

Giuseppe Galletta

Astrobiologia

La ricerca di vita nello spazio



PADOVA
UP

P A D O V A U N I V E R S I T Y P R E S S


Prima edizione 2021, Padova University Press
Titolo originale: Astrobiologia

© 2021 Padova University Press
Università degli Studi di Padova
via 8 Febbraio 2, Padova

www.padovauniversitypress.it
Redazione Padova University Press
Progetto grafico Padova University Press

Immagine di copertina: Osservatorio Astronomico Europeo in Cile, con Via Lattea e la
cometa 2014Q2 Lovejoy. n. potw1845a. Crediti: ESO. Foto di Petr Horálek

ISBN 978-88-6938-229-1

This work is licensed under a Creative Commons Attribution International License (CC
BY-NC-ND) (<https://creativecommons.org/licenses/>) .

GIUSEPPE GALLETTA

Astrobiologia

Alla ricerca di vita nello spazio

PADOVA
UP

Sommario

Premessa	7
1 L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo	13
1.1 Il cosmo e la vita secondo la Grecia classica	13
1.2 L'impero romano e il medioevo	17
1.3 Dal Rinascimento alla Rivoluzione Francese	19
1.4 L'Ottocento	23
1.5 Il Novecento e oltre	27
2 La vita sulla Terra	33
2.1 Forme di vita terrestri	35
2.2 Molecole vitali	42
2.3 Riproduzione e replicazione	51
2.4 Varianti genetiche e mutazioni	53
2.5 La selezione naturale	57
2.6 Il Precursore unico	62
3 Dove nascono gli elementi e le molecole	65
3.1 La nascita di stelle	66
3.2 La formazione dell'elio e del carbonio	70
3.3 Formazione degli elementi oltre il carbonio	74
3.4 La nascita di molecole	78
4 Dalla polvere interstellare ai protopianeti	87
4.1 La polvere cosmica	87
4.2 La composizione delle polveri	88
4.3 Il ciclo di formazione dei granuli	90
4.4 La nascita del disco protoplanetario	93
4.5 Formazione dei planetesimi e dei protopianeti	95
5 Origine dei pianeti e dei corpi minori	101
5.1 L'età della Terra	101
5.2 Le meteoriti	103
5.3 I composti organici nelle condriti carbonacee	106
5.4 Le micrometeoriti	109
5.5 La polvere cometaria	110
5.6 Origine e stabilità delle sostanze prebiotiche	111
5.7 La formazione delle atmosfere	113
5.8 L'effetto serra	115
5.9 Il problema del fosforo e zolfo	116
5.10 L'origine dell'acqua sui pianeti	117
6 Origine della vita sulla Terra	121

6.1	Gli ingredienti della vita	121
6.2	Il mondo a RNA	125
6.3	Una miscela speciale	128
6.4	Lo sviluppo dei microrganismi	131
6.5	Gli ambienti originari della vita	135
6.6	Cronologia della vita	138
7 Ambienti terrestri estremi		147
7.1	Vita intorno ai black smokers	148
7.2	Vita in regioni idrotermali subacquee	152
7.3	Vita tra i clatrati oceanici	152
7.4	Vita nei ghiacci	153
7.5	Vita nelle grotte sulfuree	156
8 Vita nel Sistema Solare?		159
8.1	Venere, una serra caldissima	160
8.2	Marte, fratello della Terra	162
8.3	Oceani nascosti	177
8.4	Mari di Metano	182
9 Pianeti di altre stelle		185
9.1	Ricerca di dischi protoplanetari	186
9.2	Ricerca di pianeti intorno ad altre stelle	188
9.3	Caratteristiche dei pianeti scoperti	194
9.4	La zona abitabile	196
10 Viaggi spaziali		203
10.1	Il problema della propulsione	203
10.2	Esportare la vita	208
10.3	Eppure qualcuno sopravvive...	213
10.4	La mancanza di gravità	217
10.5	I nuovi alieni?	223
11 La ricerca di intelligenze extraterrestri		225
11.1	L'equazione di Drake e i suoi limiti	226
11.2	L'evoluzione delle civiltà	230
11.3	Comunicazione con civiltà extraterrestri	234
11.4	Come comprendersi?	236
11.5	Perché viaggiare nello spazio?	241
11.6	Il paradosso SETI	242
11.7	L'impatto di due civiltà	247

Premessa

Questo volume parla di Astrobiologia, una scienza che abbraccia molte discipline scientifiche. Essa tocca argomenti che hanno spesso affascinato molti di noi, e stimola domande che ci siamo già posti almeno una volta nella vita, leggendo romanzi, guardando film, o semplicemente se ci siamo stesi una notte d'estate a faccia in su, ad ammirare il bisbigliare delle stelle, magari sperando di vedere una stella cadente... siamo veramente soli nell'Universo, o esiste da qualche altra parte un pianeta simile, anche se all'altro capo della Via Lattea? Magari, laggiù si sono realizzati quei grandi ideali che sulla Terra non esistono ancora: pace planetaria, fratellanza tra gli esseri umani, lunga giovinezza, comprensione del nostro posto nell'Universo...

Nei laboratori scientifici di tutto il mondo la comprensione dell'origine della vita terrestre e la ricerca di altre forme di vita affronta gli stessi argomenti e le stesse domande, ma basandosi su esperimenti, analisi chimiche e misurazioni fisiche, e cercando di fare una sintesi attraverso la cooperazione di scienziati di discipline molto diverse tra loro: astronomi, biologi, geologi, medici e sociologi. In Italia il lettore interessato a questi argomenti può trovare libri, riviste o trasmissioni TV che stimolano la sua fantasia, esaltando l'aspetto misterioso o sensazionale dei problemi, oppure libri che trattano in dettaglio alcuni aspetti come l'origine della vita, l'esplorazione del Sistema Solare o lo studio delle atmosfere dei pianeti intorno ad altre stelle. Le ricerche sono state tantissime, e le pubblicazioni dei risultati innumerevoli. I testi specialistici però nella maggior parte dei casi presuppongono una conoscenza di base della specifica materia.

Dovendo spiegare l'Astrobiologia a persone con un interesse verso le scienze naturali, in passato mi sono chiesto se era possibile aiutarli non con un altro volume, ma con un testo che permettesse di comprendere meglio i libri sui singoli argomenti, ponendo le basi della disciplina senza trascurarne nessun aspetto. Con questo spirito divulgativo, nel 2005 ho pubblicato il libro "Astrobiologia: le frontiere della vita", scritto insieme a Valentina Sergi per la casa editrice Hoepli. Si trattava del primo libro in italiano che discuteva in maniera semplice tutti gli argomenti di Astrobiologia, dalla ricerca spaziale agli aspetti filosofici e umani del problema. Quel libro è stato adottato come testo di riferimento, integrato da appunti e formule, da diversi docenti che hanno tenuto un insegnamento di Astrobiologia in Italia, incluse le centinaia di studenti che hanno seguito le mie lezioni di Astrobiologia a Padova e ne hanno sostenuto l'esame.

In 15 anni l'Astrobiologia è molto cambiata e ci sono state tantissime scoperte,

che hanno chiarito diversi dubbi che esistevano in quegli anni. Ho scelto così di fare un nuovo libro in forma digitale e più compatta, partendo dalla struttura descrittiva del testo del 2005 ma riscrivendolo e aggiornandolo, con diversi materiali supplementari (referenze, approfondimenti con formule, figure aggiuntive) visibili e scaricabili dal mio sito internet.

Questo volume si basa su 44 anni di esperienza didattica, costituita da lezioni, conferenze pubbliche e sulla lettura di centinaia di articoli su riviste scientifiche e libri di vari argomenti. Nel corso di questi anni ho avuto la fortuna di conoscere e dialogare con esperti di differenti settori scientifici, il cui aiuto mi ha permesso di spiegare a un pubblico “normale” alcuni concetti tipici di ogni scienza. Non sono stati trascurati nemmeno aspetti storici o letterari del problema, incluso il cinema, poiché gli scrittori, in quanto a fantasia, non sono da meno dei veri scienziati e spesso presentano il problema con aspetti molto interessanti che possono avere sviluppi nelle future ricerche. Anche affrontare aspetti sociologici e filosofici mi ha permesso di conoscere l’Astrobiologia da un altro punto di vista, ed è stata un’esperienza molto proficua.

Per nostra fortuna, per affrontare la maggior parte degli argomenti di Astrobiologia ci si può limitare a piccole nozioni di Fisica, Chimica, Astronomia e Biologia che stanno alla base di queste Scienze. Alcuni di questi aspetti potranno sembrare insoliti, ma permetteranno poi di capire perché alcuni fenomeni di enorme importanza dell’Universo, senza i quali non ci sarebbero né le stelle né i pianeti né la vita, siano proprio fatti così, e perché non potrebbe essere diversamente.

Il libro può essere letto dall’appassionato o dal curioso, seguendo il filo logico che inizia con la nascita delle stelle e ci porta ad attraversare la storia della Terra fino agli ultimi risultati dell’esplorazione planetaria o di pianeti intorno ad altre stelle. Alla fine mi auguro che il lettore capisca i legami naturali che esistono tra i diversi campi della scienza e del pensiero umano.

Ringraziamenti

Si ringraziano tutte le persone che mi hanno permesso di realizzare questo volume, e in particolare il Prof. Gianni Tamino per i suoi utili suggerimenti sulla parte biologica, la dr.ssa Valentina Sergi, coautrice della precedente versione, la dr.ssa De Vidovich della Hoepli che mi ha assistito in questi anni, e la casa editrice Hoepli per il rilascio dei diritti di pubblicazione dei materiali del vecchio libro.

Voglio ringraziare di cuore tutti quelli che mi hanno ascoltato, sostenuto e voluto bene in questi anni di studio e di lavoro.

Materiali supplementari:

<https://www.galletta.it/gg/astrobiologia2021>

Termini utilizzati

Nel testo, verranno date spesso le definizioni di alcune quantità o oggetti di cui si discute successivamente. In questi casi, il loro nome verrà indicato in **neretto**.

Discutendo di Astrobiologia tratteremo spesso di oggetti molto grandi o molto piccoli. La Galassia, le stelle, le enormi nuvole di polvere interstellare da una parte; le radiazioni gamma, i protoni e i neutrini dall'altra. Però sarebbe poco pratico parlare della distanza di Proxima Centauri, la stella più vicina a noi dopo il Sole, affermando: "... è a circa 30 milioni di miliardi di metri". Invece è più comodo introdurre un sistema che conti solo il numero di cifre presenti in un valore. Per esempio, nel nostro sistema decimale, 300 significa tre moltiplicato due volte per dieci, ovvero $3 \times 10 \times 10 = 300$. Posso scrivere lo stesso numero come 3×10^2 usando la cifra significativa (il 3), la base (10) e l'esponente (il 2 che rappresenta il numero di zeri). Questo modo di scrivere si chiama **notazione esponenziale a base 10** e la cifra dell'esponente viene detta **ordine di grandezza**. Un numero dieci volte più grande di un altro è un ordine di grandezza maggiore, uno cento volte più grande è due ordini di grandezza maggiore ecc. Certo, si perdono tutte le cifre intermedie, ma normalmente ha poca importanza sapere se la distanza di Proxima Centauri ha qualche miliardo di chilometri in più o in meno, almeno finché non dobbiamo inviarcì una sonda spaziale, e ci basta sapere quanti zeri dobbiamo aggiungere alla cifra. La sua distanza diventa quindi in notazione esponenziale: 3×10^{16} m, che in lettere corrisponde a 30 milioni di miliardi di metri. Per abbreviare ulteriormente la notazione delle misure, diventa utile usare prefissi per esprimerne i multipli, quali k (= chilo- o 10^3) o M (= Mega- o 10^6). Così km rappresenta 1000 metri, MHz rappresenta un milione di Hertz ecc. La notazione esponenziale e i prefissi possono essere utili anche per esprimere grandezze piccole: per esempio 2 milionesimi di secondo può essere scritto come 2×10^{-6} s o come 2 μ s (microsecondi). Il segno negativo dell'esponente vuol dire che il numero è diviso successive volte per dieci anziché essere moltiplicato. Così 100 GW sono cento miliardi di watt, mentre un 1 ng vuol dire un nanogrammo o un miliardesimo di grammo. Lo stesso può essere fatto con altre unità di misura, quali l'*Unità Astronomica* o il *parsec*, che generalmente non incontriamo nella vita di tutti i giorni. Alla fine di questa premessa sono riportate tabelle per la notazione esponenziale, i prefissi e i simboli greci usati nei nomi delle stelle o nel testo.

Trattando del Sistema Solare, avremo a che fare con le dimensioni e le masse dei

pianeti. Sulla Terra, la scala internazionale di misura lineare è il metro, che per definizione corrisponde alla “40 milionesima parte del meridiano terrestre”. Poiché il meridiano geometrico è una circonferenza, dividendo 40 milioni di metri per 2π si ottiene il raggio terrestre, che sarebbe di 6366 km. In realtà, la Terra è un po’ schiacciata sui poli e il suo raggio equatoriale corrisponde a 6378,14 km. Dimenticandoci il numero appena scritto, chiamiamo questa dimensione 1 Raggio Terrestre e indichiamolo con $1 R_{\oplus}$, essendo \oplus il simbolo del pianeta Terra. Un pianeta come Giove, grande $11,2 R_{\oplus}$ sarà poco più di 11 volte più grande della Terra, un numero più facile da ricordare che la sua reale dimensione radiale: 71435,78 km! Anche la distanza media Terra-Sole, detta **Unità Astronomica** (1 U.A. = $1,495979 \times 10^{11}$ m), è spesso utilizzata per esprimere le distanze all’interno del Sistema Solare, oppure per confronto con altri sistemi planetari e dischi di gas attorno ad altre stelle.

Nel nostro viaggio alla ricerca di forme di vita nello spazio ci muoveremo principalmente all’interno della Via Lattea, la nostra Galassia, un sistema formato da più di 200 miliardi di stelle, gas e polveri, enormemente vasto rispetto alla distanza Terra-Sole e tutti in rotazione rispetto al centro galattico. Per trattare degli oggetti che popolano la Via Lattea dovremo usare altre unità di misura, più grandi di quelle terrestri. In questo caso il Sole, la stella a noi più vicina, fa da standard di riferimento: la massa o la luminosità delle stelle saranno espresse in unità solari, come multipli o sottomultipli delle corrispondenti grandezze del Sole, indicate con il simbolo solare egizio \odot come pedice, per esempio M_{\odot} che vuol dire “masse solari”. Per le distanze invece si userà un’unità di misura basata sulla triangolazione, una tecnica usata sulla Terra e che misura gli angoli a cui un oggetto viene osservato rispetto a una base di misura nota. Questa unità è il parsec e viene indicata con il simbolo pc. Il Sole si trova all’interno di una struttura schiacciata in rotazione, detta disco galattico, a circa 10 kpc dal centro della galassia.

Per quanto riguarda gli elementi chimici e le molecole, useremo la seguente convenzione: indicando un atomo dell’elemento Z con un numero A di particelle scriveremo Z^A , come ad esempio C^{12} o C^{14} per indicare rispettivamente il carbonio con 12 o 14 particelle. Quando il numero nell’apice viene omissso, si intende l’elemento in generale, nella sua forma stabile più abbondante. Per le molecole il numero di atomi verrà indicato come pedice, omettendolo se ce n’è solo uno. Per esempio nella formula dell’acqua, H_2O , in cui ci sono 2 atomi di idrogeno (H) e un atomo di ossigeno (O). Se si vuole indicare invece uno ione, per esempio CH^+ , si userà un simbolo + o - in apice rispettivamente per le cariche positive o negative. Nel testo eviteremo di usare simboli matematici, a parte pochi casi: il simbolo < che indica *minore di...*, il suo opposto > (*maggiore di...*) e il simbolo

~ che corrisponde a *circa*. Per esempio, ~200 g significa *circa 200 grammi* mentre >200 Ma è una forma abbreviata per dire *più di 200 milioni di anni*. Il simbolo → in una reazione chimica o nucleare ne indica il risultato. A+B → C vuol dire A più B produce C.

Prefissi e notazione esponenziale

Prefisso	Simbolo	Notazione esponenziale	Numero	Significato
Tera	T	10^{12}	0, 000 000 000 001	Un migliaio di miliardi
Giga	G	10^9	1 000 000 000	Un miliardo di...
Mega	M	10^6	1 000 000	Un milione di...
kilo	k	10^3	1000	Un migliaio di...
milli	m	10^{-3}	0,001	Un millesimo di...
micro	μ	10^{-6}	0,000 001	Un milionesimo di...
nano	n	10^{-9}	0, 000 000 001	Un miliardesimo di...
pico	p	10^{-9}	0, 000 000 001	Un millesimo di miliardesimo di...

Unità di misura in Astronomia (S.I.=Sistema Internazionale)

Nome	Simbolo	S. I.	Altre unità
Raggio solare	R_{\odot}	$6,960 \times 10^8$ m	$109,1 R_{\oplus}$
Massa solare	M_{\odot}	$1,9891 \times 10^{30}$ kg	$332\,946 M_{\oplus}$
Luminosità solare	L_{\odot}	$3,826 \times 10^{26}$ W	–
Raggio terrestre	R_{\oplus}	$6,37814 \times 10^6$ m	$9,166 \times 10^{-3} R_{\odot}$
Massa terrestre	M_{\oplus}	$5,9742 \times 10^{24}$ kg	$3,0035 \times 10^{-6} M_{\odot}$
Massa gioviana	M_J	$1,898 \cdot 10^{27}$ kg	$317,8 M_{\oplus}$
Accelerazione standard	g	$9,80665 \text{ m s}^{-2}$	–
Unità Astronomica	U.A.	$1,495979 \times 10^{11}$ m	$214,9 R_{\odot}$
Anno luce	a.l.	$9,46053 \times 10^{15}$ m	$63239,7 \text{ U.A.}$
Parsec	pc	$3,085678 \times 10^{16}$ m	$206264,8 \text{ U.A.} = 3,26 \text{ a.l.}$
Pressione al livello del mare	Pa	1013,25 hPa	$1 \text{ atm} = 1013,25 \text{ mbar}$

1

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

L'idea che possa esistere vita nel cosmo è uno degli interrogativi più interessanti di questa epoca. Nel momento in cui gli esseri umani si pongono domande sul loro "ruolo" sul pianeta Terra, sapere se essi ricoprono davvero un posto privilegiato oppure no può mutare il loro modo di avvicinarsi alla natura. Può sembrare strano e noioso al lettore del XXI secolo parlare di come i popoli antichi interpretassero il mondo, ma per capire il perché di tante persecuzioni e oppressioni di idee avvenute nel passato, e dei movimenti di pensiero attuali che negano il Big Bang o l'evoluzione biologica, bisogna conoscere l'evoluzione della cultura umana.

Guardando al nostro passato, migliaia di anni fa, quando il pianeta non era ancora completamente esplorato, ogni volta che i viaggiatori si spingevano oltre i propri confini trovavano altre genti, altre lingue e usanze, e così per molti secoli i pochi sapienti dell'epoca ritenevano ovvio il fatto che ci fossero altri animali, piante ed esseri umani. La preoccupazione del resto della popolazione era più orientata ai problemi quotidiani che all'esistenza di popoli esterni, a meno che essi non costituissero una minaccia alla loro sopravvivenza. Bisogna pensare che anche dopo le osservazioni al telescopio fatte da Galileo nel 1600 ben pochi si rendevano conto che la Luna fosse un altro pianeta con montagne e vallate, o che le stelle fossero altri Soli.

1.1 Il cosmo e la vita secondo la Grecia classica

Nel bacino del Mediterraneo, per i pensatori dell'antica Grecia il mondo, inteso come totalità delle cose reali, era fatto solo da ciò che è visibile dalla superficie del nostro pianeta. La Terra viene descritta da Anassimandro (~ 610-546 a.e.v.¹) come un cilindro che si libra nel nulla al centro del mondo, immaginato come *uno* in un'*infinità di mondi*. Anassimandro abbozza anche l'idea che gli esseri umani

¹ Il termine a.e.v. (ante era vulgaris) indica una data prima dell'anno 1 del calendario gregoriano, in accordo col termine inglese BCE (before common era), più preciso di a.C che si riferiva alla nascita di Cristo, databile invece intorno a tre anni prima. Le date dopo l'anno 1 non hanno suffisso.

non siano nati all'origine del mondo, ma derivino da altri animali, poiché non sono in grado di nutrirsi da sé come dovevano essere invece gli esseri primordiali. Naturalmente egli è molto lontano dalle idee moderne dell'evoluzione dei viventi, poiché suggerisce che gli umani siano nati dentro i pesci e si siano diffusi poi sulle terre emerse.

Il mondo viene descritto come una sfera dai seguaci di Pitagora (~ 571-496 a.e.v.): Al centro c'è il fuoco primordiale, attorno al quale si muovono la Terra e l'Antiterra, la Luna, il Sole che come una lente raccoglie la luce del fuoco centrale, i cinque pianeti visibili ad occhio nudo (Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno) e il cielo delle stelle. Si può pensare che la dottrina pitagorica tolga la Terra dal centro del mondo, anticipando perciò le idee di Copernico enunciate diversi secoli dopo. Però secondo un filosofo posteriore come Simplicio (490-560) il fuoco primordiale della cosmologia pitagorica sarebbe quello all'interno della Terra, che resterebbe così al centro, circondata dal Sole e dagli altri pianeti. Bisogna capire che le idee di questi antichi filosofi sono arrivate a noi molto spesso attraverso l'interpretazione di autori greci o latini dei secoli successivi ed è oggi inutile cercarvi – a posteriori – una coerenza con la struttura del cosmo come la conosciamo oggi, immaginando un'antica sapienza che in realtà non esisteva. Quello che ci preme sottolineare qui è che l'universo degli antichi sapienti nel bacino del Mediterraneo era fatto essenzialmente da ciò che si vede, inclusi gli esseri viventi. L'esistenza di altri mondi, intesi come altri universi simili al nostro, implicava l'esistenza di altri esseri viventi.

Un'altra cosa importante è capire che queste idee non si sono diffuse facilmente, ma sono rimaste spesso patrimonio di pochi e a volte osteggiate con forza. Nella concezione degli antichi greci, siano essi pitagorici, platonici, aristotelici o stoici, i cieli restano comunque l'immagine del divino e oggetto di speculazioni teologiche. I sapienti, i nobili, i sacerdoti spendono il loro tempo cercando di comprendere la struttura del cosmo e organizzando la vita quotidiana di tutti gli altri cittadini. Essi sono però assolutamente incapaci di gestire attività pratiche. La maggioranza dei lavoratori come i fabbri, i contadini o gli schiavi, in grado di costruire e operare anche con abilità nelle tecniche dei metalli o dell'edilizia, nella società greca non hanno né istruzione né potere. La stabilità di questa società oligarchica, in cui pochi ricchi e istruiti tengono il potere, è legata al mantenimento delle differenze. Analogamente, la stabilità della vita e del cosmo rappresenta un ideale da raggiungere. Il cielo perciò, e tutto ciò che esso comprende, deve essere immobile e immutabile. Il variare del moto dei pianeti e delle dimensioni della Luna, invece, sono già allora argomenti delicati che possono portare all'accusa di eresia contro gli dei e contro il pensiero dominante, e a subire di conseguenza

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

violente reazioni da parte dei sacerdoti o di altri filosofi.

Idee destinate a creare una grande discussione sono quelle della scuola filosofica di Democrito (~ 460-370 a.e.v.). Essa ritiene che ogni cosa sia composta da particelle piccole e invisibili – ma di cui si può comprendere l'esistenza – non scomponibili ulteriormente in oggetti più piccoli, gli *atomi* (la parola stessa significa *indivisibile*). Secondo la teoria atomista le trasformazioni che avvengono in natura sono la conseguenza del perenne movimento degli atomi nello spazio, immaginato come vuoto e infinito. Urtandosi tra loro essi si aggregano formando ogni cosa e si disgregano. Si comprende perciò come gli stessi esseri viventi, fatti da atomi, secondo la teoria atomista possano esistere in qualsiasi angolo dell'universo. Anche l'anima dei viventi perciò deve nascere e morire come tutte le cose del cosmo. La teoria atomista ha avuto seguaci famosi, come il filosofo Epicuro (342-271 a.e.v.) e il poeta latino Tito Lucrezio Caro (98-55 a.e.v.) che fu contemporaneo di Giulio Cesare. Per Epicureo il mondo è “un pezzo di cielo ritagliato nell'infinito che comprende astri, terre e tutti i fenomeni”. Gli esseri animati devono la loro essenza a particelle diffuse per il corpo, più sottili e rotonde di quelle che costituiscono la materia inanimata. I mondi sono perciò infiniti ed esistono in uno spazio vuoto infinito.

Ma già nella Grecia classica le idee atomiste vengono criticate da altri filosofi. Platone (428-347 a.e.v.) sostiene che l'unirsi casuale di atomi non può riproporre sempre le stesse forme naturali, se non grazie ad un intervento divino. Oggi sappiamo che molecole ed esseri viventi riproducono le stesse forme grazie ai legami elettrici e al codice genetico, ma ci sono voluti molti secoli per comprenderlo. L'idea espressa da Platone è importante, perché considera la struttura del mondo e della vita sotto il dominio di leggi divine o sovrannaturali, stabilendo la priorità della religione sullo studio del cosmo. Questa priorità verrà imposta per secoli, fino al Rinascimento e oltre.

Anche Aristotele (384-322 a.e.v.) nella sua opera *Metafisica* dimostra di conoscere le teorie dell'atomismo, paragonando gli atomi alle lettere dell'alfabeto, la cui combinazione produce parole diverse. Il mondo degli umani (mondo sublunare) gli appare formato dai quattro elementi: *fuoco*, *aria*, *acqua* e *terra*, e i cieli fatti dall'elemento *etere* devono essere perfetti, unici, eterni e compiuti dunque finiti, interpretando invece il termine *infinito* come *non-finito*, incompiuto. A questo **assioma**, non verificabile e non sperimentale, egli applica l'osservazione dei fenomeni sostenendo che ogni elemento tende verso un centro del moto. Per la terra è il basso, per il fuoco è l'alto, mentre l'aria e l'acqua trovano il loro equilibrio tendendo verso posizioni intermedie. Egli dice che, se esistessero altri mondi, la terra e gli altri elementi ne mostrerebbero l'esistenza cadendo anche verso di loro.

Astrobiologia

Osservando il fatto che ogni corpo finisce per fermare il suo moto, Aristotele nega il vuoto perché se i corpi si muovessero in esso, resterebbero in riposo o in moto uniforme, fatto oggi ben chiaro e noto come Primo principio della Meccanica, o Principio d'inerzia. In pratica, partendo da queste affermazioni (errate) – la perfezione del mondo e la sua eternità – la scuola dei seguaci di Aristotele ritiene che la vita fatta da animali, piante e umani sia stata presente sulla Terra dall'eternità e per l'eternità. Si noti come in questa teoria venga negato l'infinito spaziale perché imperfetto ma non l'infinito temporale, ritenuto perfetto.

In conclusione, nel mondo greco l'idea di vita extraterrestre dipende dal fatto che lo spazio sia o no infinito e pieno di infiniti altri mondi analoghi al nostro. Questo spazio infinito non è simile alla nostra concezione di altri sistemi planetari attorno ad altre stelle, ma una ripetizione del cosmo visibile, infiniti mondi ciascuno con una Terra, Sole, pianeti e sfera delle stelle fisse. Chi nega questa infinità spaziale come Aristotele non può ammettere altri esseri viventi diversi da quelli osservati sulla Terra. Chi ritiene che lo spazio sia infinito come i pitagorici trova questo fatto come ovvio.

Perché può interessarci oggi sapere come la pensavano gli antichi greci? Come vedremo, la scienza moderna è ancora oggi influenzata da idee originate nel mondo ellenico, proprio da quelle scuole di pensiero che abbiamo presentato sopra. L'idea degli atomisti di una natura fatta da particelle e autosufficiente, che oggi possiamo chiamare "materialista" si contrappone ancora con quella che la natura nasconda un qualche scopo o disegno superiore. Per esempio, in un brano del poema "De rerum Natura" il poeta atomista ed epicureo Lucrezio dice che siamo tutti nati dagli atomi delle stelle, e se ci sono moltissimi atomi dobbiamo ammettere che nello spazio esistano altre terre, uomini e animali². Come vedremo nei prossimi capitoli, i nostri atomi sono effettivamente nati all'interno delle stelle, ed esistono davvero altri pianeti simili alla Terra, ma la conclusione puramente filosofica di Democrito nulla ha a che fare coi secoli di ricerche scientifiche che ci hanno portato alle conoscenze attuali. Tuttavia, la sua intuizione può essere tradotta oggi in questi termini: "*se la vita ha bisogno di particolari molecole per esistere, essa può esistere ovunque siano presenti le stesse molecole e le stesse condizioni isiche e chimiche.*" Esplorando altri pianeti con sonde automatiche o con strumenti scientifici da Terra stiamo percorrendo la stessa strada: cerchiamo prove di

² "Infine siamo tutti nati da seme celeste./ ... ora, se c'è una quantità di atomi tanto grande, / ...è necessario ammettere/ che in altre parti dello spazio esistono altre terre/ e diverse razze di uomini e specie di fiere"

Denique caelesti sumus omnes semine oriundi./ ... nunc et seminibus si tanta est copia,/ ...necesse est confiteare/esse alios aliis terrarum in partibus orbis /et varias hominum gentis et saecula ferarum. (De rerum natura, Libro II)

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

sostanze chimiche e processi simili a quelli generati dalle forme di vita terrestri. Se queste sostanze e processi non ci sono, allora la probabilità che su quei pianeti nasca vita come noi la conosciamo sarà bassa; ma se queste sostanze sono abbondanti, allora potremo aspettarci che anche lì possano nascere altre forme di vita.

1.2 L'impero romano e il medioevo

Tutto il Mediterraneo e l'Europa cambiano con la creazione dell'Impero romano, a partire dal I secolo dell'Era Volgare. Dopo la conquista della Macedonia da parte dei romani, nel 168 a.e.v., idee come quelle di Aristotele o di Democrito si diffondono anche fuori dalla Grecia. L'impero esige dalle sue province un generale e assoluto riconoscimento dell'autorità, per fare di vari territori una sola nazione. I culti si mescolano, le divinità si confondono tra loro tramite analoghi greci, romani, fenici, egizi, e il culto di Roma e dei suoi imperatori diventa una religione di stato. L'impero combatte ferocemente le religioni che non riconoscono la sua autorità anche se, dopo la conversione dell'imperatore Costantino al cristianesimo, successivamente al III secolo, le parti si invertono. L'imperatore, unico supremo essere umano, è il tratto d'unione con il mondo divino, dominato a sua volta da un essere unico e trascendente, Dio. A questo punto, l'impero combatte il paganesimo con la stessa ferocia con cui in aveva combattuto il cristianesimo. È importante capire che, con la proclamazione dell'imperatore-Dio, già iniziata dopo Augusto e culminata con Domiziano che impone la sua adorazione come facevano i sovrani orientali, l'impero aveva spianato la strada ad un monoteismo fatto di gerarchie divine e terrene. Possiamo pensare che le idee filosofiche che ammettono universi "meccanici" come l'atomismo o che negano gli dei siano molto osteggiate nell'Impero, mentre quelle che parlano di perfezione dei cieli come le dottrine aristoteliche, siano considerate utili nella costruzione di questo nuova struttura del potere. Il cristianesimo si diffonde così nel mondo romano nel giro di pochi secoli, ma soprattutto nel IV e V secolo, anche perché diventa utile all'Impero.

I filosofi della Grecia antica, Socrate e Platone tra molti altri, vedevano la ricerca filosofica come una liberazione dalle tradizioni e dai costumi imposti all'uomo e credevano che la verità stesse nel ragionamento, anziché nelle parole degli antichi predecessori. Invece con il prevalere dell'interesse religioso nei secoli successivi si torna a pensare che la verità sia frutto di una rivelazione originaria e che la tradizione sia l'unica garanzia su cui basarsi. Questo diventa evidente all'avvento delle nuove religioni. Esse si propongono come la continuazione della filosofia greca dichiarando di esserne il completamento, con una verità che non è più ricerca ma testimonianza data agli umani da un essere superiore. In questa nuova

concezione della società e del mondo, le dottrine degli antichi vengono viste come un patrimonio intoccabile e quella di Aristotele in particolare viene utilizzata e piegata alle nuove idee religiose. Si usa ciò che serve però, confutando il resto. Per esempio, Bonaventura (Giovanni Fidanza, 1221-1274) nega l'eternità aristotelica del mondo, visto che esso è stato creato, e Tommaso d'Aquino (1225 -1274) dice che Aristotele rappresenta il limite massimo a cui la mente umana può arrivare senza la fede.

Il contatto col mondo arabo nel XIII secolo rinverdisce l'interesse per le scienze, che nel medioevo erano state lasciate fuori dall'ufficialità, agli alchimisti e ai cosiddetti maghi e astrologi, interessati in gran segreto a studiare la natura per ottenerne ricchezza e salute e conoscere il futuro. Gli arabi avevano proseguito gli studi sulla matematica sviluppando discipline oggi importantissime come l'Algebra, l'Astronomia, la Fisica, la Medicina e introducendo la numerazione decimale, appresa dagli studiosi indiani. Anche nel mondo arabo, monoteista, la filosofia cercava una via logica per spiegare una verità rivelata. Giungono così in Italia e nel resto d'Europa le teorie dell'astronomo Tolomeo (100-175) di Alessandria. In questo modello del cosmo, che dominerà per secoli, il mondo aveva al centro la Terra, mentre tutti i cieli ruotavano su sfere agganciate ad altre sfere, in moti regolari e immutabili poiché i cieli erano immutabili e perfetti.

Un piccolo giallo è rappresentato dall'apparizione in cielo, il 4 luglio 1054, di una stella luminosissima nella costellazione del Toro la cui luminosità rivaleggiava con quella della Luna piena e si vedeva attraverso le nuvole. Si trattava di una *Supernova*, una stella massiccia che alla fine della sua vita esplose lanciando nello spazio il suo materiale, una delle più catastrofiche esplosioni che avvengono nelle galassie. Alle nostre latitudini, la supernova si poteva vedere all'alba, in direzione nordest, a circa 16° dalla Luna che appariva come una falce sottile. Gli astronomi cinesi e coreani ne parlano e la disegnano sulle mappe. Anche i nativi americani, gli Anasazi, nel Navajo Canyon disegnano su una roccia una grande stella vicino alla falce di Luna. Invece il mondo cristiano e arabo, attento ai fenomeni naturali, non ne parla mai. L'unica traccia incerta è in un manoscritto, copia fatta nel quattrocento di un testo più antico, detto *Cronaca Rampona*, in cui è descritto un evento avvenuto il 24 luglio MLVIII (=1058) che potrebbe essere una cattiva trascrizione della data dell'apparizione in caratteri latini (MLIII=MLIV=1054). Perché nel mediterraneo un evento così suggestivo e forse impressionante viene ignorato nei libri? Tra le varie ipotesi possibili, quello di non affermare per iscritto che i cieli non erano immutabili e perciò imperfetti.

1.3 Dal Rinascimento alla Rivoluzione Francese

Bisogna aspettare alcuni secoli perché siano messe in dubbio le teorie aristoteliche e tolemaiche sulla struttura del cosmo, grazie ai progressi della scienza fatti da Niccolò Copernico (1473-1543) e Galileo Galilei (1564-1642). In Italia, la Chiesa cattolica romana affronta una grave crisi: la Riforma Protestante iniziata nel 1517 da Martin Lutero ha posto in discussione la validità del suo ruolo guida, mettendone in crisi la stessa autorità. Come accade sempre in queste situazioni, l'autorità religiosa si aggrappa maggiormente ai testi sacri cercando di seguire rigorosamente la dottrina scritta e combattendo qualsiasi innovazione da cui possa derivare qualche nuova eresia.

In questo clima di sospetto si muove il monaco domenicano e filosofo Giordano Bruno (1548-1600). Egli riprende l'idea che possano esistere altri mondi, come avevano fatto Democrito ed Epicuro, ma lo fa sulla base di argomentazioni teologiche: Nell'opera *De l'Infinito, Universo e Mondi* egli immagina pianeti (globi) simili alla Terra sparsi per lo spazio infinito³. La ragione di questo è che Dio, nella sua onnipotenza e perfezione, non può essersi limitato a creare solo questa Terra imperfetta ma deve averne create altre. Negare l'infinità di altri mondi significa negare l'onnipotenza di Dio. Giordano Bruno però ha idee molto personali sulla religione. Dopo aver girato l'Europa suscitando discussioni e facendosi scomunicare per le sue idee sulla Trinità e sui riti cristiani, viene ospitato a Venezia dal patrizio Giovanni Mocenigo a cui tiene alcune lezioni. Ma quando cerca di andarsene contro la volontà del Mocenigo questi lo denuncia e viene imprigionato dall'Inquisizione veneta, che lo estraderà poi a Roma. Incarcerato per sette anni, torturato per fargli confessare le sue idee eretiche, alla fine rifiuta di abiurare e viene messo al rogo in Piazza Campo dei Fiori il 17 febbraio del 1600. L'esperienza di Bruno mostra come fosse difficile sradicare quelle idee aristoteliche che erano state adottate come principio di stabilità del cosmo e che si adattavano alle trascrizioni dei libri sacri adottate dalle varie chiese.

Nello stesso secolo opera Galileo Galilei, professore all'Università di Padova, che viene attratto dall'Astronomia grazie a una supernova apparsa in cielo il 9 ottobre 1604, descritta da Giovanni Keplero nel libro *De Stella nova in pede Serpentarii* e visibile ad occhio nudo per diciotto mesi. Così, una volta costruito il suo canno-

³ "...Non bisogna dunque cercare, se estro il cielo sia loco, vacuo o tempo; perché uno è il loco generale, uno il spacio immenso che chiamar possiamo liberamente vacuo; in cui sono innumerabili ed infiniti globi, come vi è questo in cui vivemo e vegetamo noi. Cotal spacio lo diciamo infinito, perché non è raggione, convenienza, possibilità, senso o natura che debba finirlo: in esso sono infiniti mondi simili a questo, e non differenti in geno da questo..." (De l'Infinito, Universo e Mondi).

chiale, venduto alla Serenissima Repubblica di Venezia come arma difensiva per avvistare le navi nemiche a grande distanza, nel 1609 lo punta verso il cielo. Egli conosce già l'esistenza di fenomeni celesti variabili, come le comete o le stelle *Novae*, eventi in contrasto con l'immutabilità e perfezione dei cieli ma creduti vapori atmosferici. Ma il cannocchiale mostra in certi periodi Mercurio e Venere come piccole falci di luna, in contrasto con l'idea che essi ruotino intorno alla Terra; la Luna appare possedere pianure e montagne come la Terra; il Sole – simbolo di perfezione – ha ogni tanto delle macchie scure. Se la Luna è un pianeta simile alla Terra, anche gli altri pianeti possono esserlo, sulla base delle osservazioni. Galileo conosce i problemi che possono sorgere discutendo di cose oggetto della religione e ritenute immutabile e perfette, e sa che basta una denuncia da parte di un collega invidioso per finire sotto i ferri dell'Inquisizione. Perciò cerca di inquadrare il ruolo dello scienziato nella cornice di un osservatore della meraviglia del creato. Egli afferma che l'universo creato da Dio ha un linguaggio scritto in termini matematici⁴ e l'uomo che lo studia attraverso la matematica non commette nessuna eresia. Tuttavia i libri di Galileo verranno vietati e lui verrà condannato dall'Inquisizione salvandosi solo in parte abiurando, cioè ammettendo di essersi sbagliato e di aver fatto delle ipotesi ma di non aver inteso che la realtà sia diversa da quella scritta nei testi sacri.

Il secolo XVI però è ricchissimo di scoperte scientifiche: Giovanni Keplero (1571-1630) enuncia le sue leggi del moto dei pianeti; Isaac Newton (1642-1727) formula le leggi del moto, tra cui quella della gravitazione universale; Blaise Pascal (1623-1662) costruisce la prima macchina calcolatrice per fare addizioni e sottrazioni; Christiaan Huygens (1629-1695) crea il primo orologio a pendolo per misurare il tempo; William Harvey (1578-1657) compie i primi studi sul sistema circolatorio.

Tutti questi scienziati e molti altri iniziano a studiare la natura e gli esseri viventi, spazzando via le idee degli antichi filosofi che avevano dominato le scuole europee per diversi secoli. In particolare si scopre che gli animali e le piante visibili al suolo non comprendono tutte le forme di vita, ma che ne esistono alcune così piccole da essere invisibili. Precursore in questo campo è Anton Van Leeuwenhoek (1632-1723), mercante e scienziato olandese, costruttore del microscopio. Egli nel 1674 descrive i microscopici esseri viventi presenti in una goccia d'acqua, diventando il primo microbiologo della storia. Egli comprende che esistono organismi viventi fatti da singole cellule, una scoperta che viene accolta con molta difficoltà

⁴ “La filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi agli occhi (io dico l'universo), ma non si può intendere se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscer i caratteri, né quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.” (Il Saggiatore)

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

dalla comunità scientifica della Royal Society di Londra. Scopre i protisti, i batteri, gli spermatozoi, le cellule delle fibre muscolari, e apre la strada verso un mondo di viventi più ricco di quanto si potesse mai credere.

Gli studi avanzano anche nel campo della struttura e origine del cosmo. Tra gli altri, il filosofo e matematico René Descartes detto Cartesio (1596-1650), nei suoi *Principes de la philosophie* (1644) scrive che l'Universo è fatto da vortici, che esso non ha un centro e che le stelle sono altri soli, simili al nostro. Christiaan Huygens osserva al telescopio gli anelli di Saturno e nella sua opera *Kosmotheoros...* (Lo spettatore del cosmo...) trova analogie tra la Terra ed i pianeti e fa l'ipotesi che altri pianeti ospitino piante e animali. Egli scrive: "Poiché le stesse leggi naturali operano ovunque, la vita deve essere universale, e non può essere molto diversa dalla vita terrestre"⁵. Troviamo ancora l'analogia con l'idea atomista, basata però sul principio che assume che le leggi fisiche e chimiche siano universali. Noi possiamo oggi osservare le righe degli elementi chimici e misurare le velocità e le masse di stelle e di lontanissimi insiemi di stelle come le galassie. In essi troviamo le stesse tracce chimiche e lo stesso comportamento fisico che osserviamo sulla Terra. Questo ci conforta nell'idea, di per sé indimostrabile, che queste leggi e principi fisici siano gli stessi in tutto l'universo. In realtà oggi sappiamo che i processi naturali dipendono dalle condizioni ambientali (pressione, temperatura, abbondanze chimiche, fenomeni costruttivi e distruttivi presenti) e che perciò in ambienti diversi si sono sviluppate specie viventi diverse, cosa allora ignota agli scienziati dell'epoca.

La tecnica della stampa, apparsa in Germania nella seconda metà del '400, si era diffusa nel '500 anche nel resto d'Europa, permettendo a sempre più persone di leggere e acquistare libri. Tuttavia nel XVII secolo il libro "colto" è ancora patrimonio di pochi e questo tipo di riflessioni non arriva mai alla gente comune. Molte scuole sono tenute dal clero e hanno lo scopo di istruire sulla grammatica, sull'umanesimo e sulla retorica. Le università restano comunque patrimonio di ricchi e nobili.

Troviamo un accenno al problema della vita su altri pianeti nel libro del 1686 *Entretiens sur la pluralité des mondes* (Conversazione sulla pluralità dei Mondi) del francese Bernard Le Bouyer de Fontenelle (1657-1757). Il libro è la prima opera di divulgazione scientifica che invita il lettore al piacere della scoperta di questi argomenti. Mentre negli stessi anni Newton componeva in latino i suoi *Principi matematici della filosofia naturale* rivolgendosi così a quei pochi che potevano comprendere la matematica dell'epoca, Fontenelle si rivolge invece ad un pubbli-

⁵ "... Since the same natural laws operate everywhere, life must be universal, and it cannot differ much from life on earth..." (Kosmotheoros, sive de terris coelestibus earumque ornatu conjecturae).

co più vasto. La “conversazione” viene immaginata tra uno scienziato e una marchesa. L’argomento per credere all’esistenza di altri mondi abitati appare essere “la somiglianza completa dei pianeti con la Terra, che è abitata, l’impossibilità di immaginare che essi siano stati fatti per un uso diverso [che ospitare la vita], la fecondità e la magnificenza della natura”⁶. Fontenelle riprende idee precedenti, come i vortici di Descartes, che verranno contraddette dalle leggi della gravità di Newton, ma la sua opera e il successo che essa ha nel pubblico mostra quanto fosse alto all’epoca l’interesse per l’Astronomia. Un’altra cosa da notare è che questi argomenti non appaiono più particolarmente delicati e non creano l’imbarazzo che avevano avuto gli scienziati dei secoli precedenti nel presentare le loro idee o i risultati dei loro esperimenti.

Occorre citare anche l’opera di François Marie Arouet, detto Voltaire (1694-1778), un filosofo e scrittore che utilizza spesso la sua vena satirica in romanzi rivolti contro le idee comuni della sua epoca. In *Candido o l’ottimismo* (1759) ironizza sul fatto che quello in cui vive sia “il migliore dei modi possibili” mentre l’idea di esseri da altri mondi è sviluppata nel romanzo *Micromégas* (1752), forse ispirato ai *Viaggi di Gulliver* del romanziere irlandese Jonathan Swift. Un viaggiatore proveniente da un pianeta che orbita intorno alla stella Sirio, Micromégas, arriva sul pianeta Saturno dove fa amicizia con il Segretario dell’Accademia di Saturno. Micromégas è alto 36 km, mentre il saturniano “solo” 11 metri. Entrambi visitano la Terra che appare loro disabitata essendo i suoi abitanti microscopici rispetto a loro. Attraverso un grande diamante usato come lente d’ingrandimento si accorgono di una nave di scienziati e filosofi e si stupiscono di come queste creature così piccole siano in grado di ragionare e comunicare. Il romanzo viene citato qui perché è un primo esempio di quella che sarà la letteratura di fantascienza e parla di come si debba essere aperti ad accogliere e rispettare altre culture. Il tono resta sempre ironico, come si vede da questo brano sull’eterna insoddisfazione degli esseri viventi: “ho viaggiato un po’; ho visto dei mortali molto inferiori a noi; ne ho visti altri molto superiori; ma non ne ho visto nessuno che non avesse più desideri che bisogni, e più bisogni che soddisfazioni.”⁷

I tempi stavano cambiando, e nel Nord America e in Francia le grandi rivoluzioni del 1775 e 1789 portavano nuove idee e libertà di pensiero anche verso i problemi dell’origine della vita terrestre e sugli altri mondi al di là del nostro pianeta.

⁶ “...la ressemblance entière des planètes avec la Terre qui est habitée, l’impossibilité d’imaginer aucun autre usage pour lequel elles eussent été faites, la fécondité et la magnificence de la nature...”

⁷ “...J’ai un peu voyagé; j’ai vu des mortels fort au-dessous de nous; j’en ai vu de fort supérieurs; mais je n’en ai vu aucuns qui n’aient plus de désirs que de vrais besoins, et plus de besoins que de satisfaction.”

1.4 L'Ottocento

Il XIX secolo vede la nascita di molte importanti teorie sull'origine della vita e sulla struttura dell'Universo. Con l'avanzare delle conoscenze scientifiche, il problema dell'esistenza di altri mondi abitati si lega a quello dell'origine della vita sulla Terra. Dalla comprensione di questo fenomeno si potrebbe dedurre se esso sia una prerogativa del nostro pianeta, oppure il risultato di leggi fisiche e chimiche che essendo valide in tutto l'universo possono realizzarsi anche altrove.

In questo secolo si sviluppano le ricerche di quattro grandi scienziati: Pasteur, Lamarck, Wallace e Darwin. Nel 1809 Lamarck (Jean-Baptiste de Monet chevalier de la Marck, 1744-1829) avanza l'ipotesi che forme di vita semplici vengano create sempre in una generazione spontanea, e che una **forza vitale** innata le spinga a diventare sempre più complesse. Al contrario, Louis Pasteur (1822-1895) dimostra che la vita non si può generare spontaneamente dalle cose inanimate, ma deriva sempre da altra vita. L'incapacità di generare nuova vita della Terra attuale viene attribuita da Pasteur alle condizioni ambientali terrestri, adatte a mantenere gli esseri viventi, ma inadatte a generarli, come dimostrano gli esperimenti. Su questo argomento Charles Darwin (1809-1882) scriveva nel 1871 all'amico botanico Hooker "...se (ma che grande se!) potessimo immaginare che in un piccolo stagno caldo, pieno di diversi tipi di sali di ammonio e di sali fosforici, in presenza di luce, calore ed elettricità, un derivato proteinico si è potuto formare, pronto a subire delle modifiche più complesse ancora...". Egli anticipava l'idea di una Terra primordiale diversa da quella attuale, proponendo involontariamente quegli esperimenti di Oparin e di Miller che quasi un secolo dopo avrebbero portato alla scoperta del "brodo primordiale", una miscela di acqua e amminoacidi, tra le molecole indispensabili alla vita terrestre.

In queste ricerche si scopre l'importanza dell'ambiente nel generare la vita e le caratteristiche degli esseri viventi. Lamarck osserva anche che l'uso di un organo può stimolare in esso un cambiamento, come avviene nei muscoli, ma egli crede che questo possa anche trasmettersi alle generazioni successive: animali e piante si sarebbero evoluti nel tempo adattandosi all'ambiente. Per esempio, il collo delle giraffe si sarebbe allungato di generazione in generazione per brucare le foglie degli alberi sempre più in alto. Alfred Russel Wallace (1823-1913), credendo in questa trasmutazione delle specie, propone una teoria dell'evoluzione causata dalle pressioni ambientali che costringono le specie viventi ad adattarsi, generando così una selezione naturale. Una pietra miliare in questo campo è rappresentata dall'opera di Charles Darwin, *L'origine delle specie*, pubblicato nel 1859. Darwin, come Wallace e Lamarck, segue l'idea di una vita che può trasformarsi ed evol-

versi da organismi semplici verso organismi più complessi. Però diversamente da Lamarck egli ritiene che le variazioni degli organi non siano guidate dall'ambiente, ma che siano gli individui con diverse proprietà ad essere selezionati dall'ambiente. Nell'esempio delle giraffe, secondo la teoria Darwiniana esistevano giraffe con colli di varia lunghezza, ma solo quelle con il collo più alto sono sopravvissute e hanno generato discendenti, mentre le altre sono morte perché non riuscivano ad alimentarsi abbastanza. L'evoluzione darwiniana, di cui parleremo più in dettaglio nel Cap. 6, sull'origine ed evoluzione della vita, viene però criticata aspramente dai suoi contemporanei, e lo è tuttora in alcuni ambienti, perché va contro l'idea di una creazione divina in cui ogni specie possiede oggi la stessa forma con cui è stata concepita nella Genesi. La teoria di Darwin viene censurata negli USA fino al 1920 e nello stato del Tennessee i suoi libri restano vietati fino al 1967, quando la Corte Suprema USA dichiara questo divieto in conflitto con due emendamenti della Costituzione. Diventa vietata nelle scuole turche nel 2017 e la riforma scolastica del 2004 in Italia la rimuove dai programmi scolastici della scuola dell'obbligo, reintroducendo l'anno dopo una "coevoluzione della geosfera e biosfera" e indicando le scoperte di Galileo, Newton e Einstein come "ipotesi"!

Eppure, negli stessi anni in cui Darwin studia l'evoluzione delle specie, l'applicazione delle tecniche di spettroscopia nell'Astronomia mostra che nelle stelle e nell'intera Galassia si trovano diffusi gli stessi elementi chimici della Terra. Diffondendosi in ambienti scientifici, questa scoperta viene accolta in maniera positiva senza creare dibattiti o polemiche. Astronomi come il britannico Richard Proctor (1837-1888) o il francese Camille Flammarion (1842-1925) scrivono, senza creare scandalo, libri su come possano esistere mondi abitati nel nostro Sistema Solare. Darwin invece aveva toccato "l'Uomo", la sua origine e la sua riproduzione, un argomento tabù per molte persone anche all'epoca attuale. Oggi molti ne parlano ma pochi hanno le competenze biologiche necessarie per inquadrarla nel suo giusto contesto. Vengono fuori storielle come la discendenza dal gorilla o dallo scimpanzé, o le biotecnologie viste come esperimenti del dottor Frankenstein. Cercheremo di spiegare correttamente l'evoluzione biologica nei capitoli seguenti.

Circa vent'anni dopo la pubblicazione della teoria evolutiva di Darwin, con un telescopio di 21 cm di diametro a Brera l'astronomo Giovanni Schiaparelli (1835-1910) scopre su Marte delle zone di colore verdastro che vengono attribuite a vegetazione e osserva la presenza di linee sottili e diritte, che chiama *canali*. Egli nota che il colore delle zone scure e la posizione dei *canali* variano nel corso dei mesi. Schiaparelli non si pronuncia sull'origine di questi canali, ma altri astronomi come Flammarion avanzano l'ipotesi che essi siano opera di una qualche civil-

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

tà. Anche il direttore dell'Osservatorio di Harvard, Edward Pickering (1846-1919), uno dei padri della spettroscopia stellare, sostiene per alcuni anni la presenza di canali e vede 'oasi' circolari nelle zone di congiunzione tra di essi. Nascono però alcune voci contrarie: l'astronomo Edward Barnard (1857-1923) vede crateri simili a quelli lunari e il biologo Alfred Wallace (1823-1913) calcola la temperatura superficiale di Marte, concludendo che deve essere troppo freddo ($- 35\text{ }^{\circ}\text{C}$) per ospitare la vita. Tuttavia queste affermazioni rimangono per lo più ignorate. L'astronomo statunitense Percival Lowell (1855-1916), uomo abbastanza ricco da farsi costruire un osservatorio astronomico privato a Flagstaff, in Arizona, riprende le osservazioni di Schiapparelli sostenendo con certezza la presenza di canali, che egli si fa tradurre in *canals* anziché *channels*. In inglese, la prima parola denota una via d'acqua artificiale creata per la navigazione, mentre *channel* indica un percorso naturale quale quello creato da un flusso d'acqua o un passaggio tra due luoghi; una bella differenza, se applicata su Marte!

L'idea errata che su Marte esistano dei *canals* si diffonde anche nel pubblico non colto e induce a pensare all'esistenza di abitanti in grado di costruire vie di comunicazione e di modificarle nel tempo. Intorno al 1911, lo scrittore Edgar Rice Burroughs, il creatore di Tarzan, inizia una serie di romanzi che vedono come protagonista John Carter, un uomo che si trova sbalzato dal suo mondo e atterra su Marte. Qui trova una popolazione di uomini verdi, di cui diventa uno dei capi, in combattimento con una più primitiva popolazione di uomini rossi. Probabilmente dobbiamo a questi romanzi la definizione dei marziani come *omini verdi* che si trova spesso nei giornali e che è diventata ormai un modo di dire per denominare gli extraterrestri antropomorfi. Così, il mito del Marziano inizia a diffondersi. Anche Guglielmo Marconi si interessa alla questione e scopre segnali radio a una frequenza di circa 2 MHz. Nel 1922, quando Marte è nella posizione più vicina alla Terra, durante una traversata atlantica cerca senza successo di captare segnali provenienti dal pianeta.

In realtà i canali di Marte erano solo un'illusione ottica dovuta alla morfologia superficiale del pianeta, nascosta talvolta dalle nuvole o dalle tempeste di sabbia. Occorreranno numerosi anni perché i nuovi telescopi di maggior risoluzione permettano di sfatare questa illusione, mostrando l'assenza di linee diritte su Marte. Solo negli anni '60 del ventesimo secolo le sonde spaziali Mariner rompono definitivamente questo mito, mostrando un mondo fatto di vulcani spenti e grandi deserti, in cui la temperatura può abbassarsi così tanto da far congelare l'anidride carbonica. Negli stessi anni le sonde sovietiche inviate su Venere, completamente coperto da nuvole e perciò non studiabile coi telescopi, lo mostrano simile a una caldaia a 470 gradi centigradi, con una pressione atmosferica da abissi oceanici

e la superficie flagellata da una pioggerellina di acido solforico. Due speranze di trovare pianeti simili alla Terra che si infrangono!

Parallelamente alla letteratura scientifica, patrimonio di poche persone colte, si diffonde nel pubblico comune l'interesse per la vita extraterrestre vista attraverso la fantasia della narrativa, come mostrano i romanzi di Burroughs su Marte. Come Voltaire e Fontenelle nei secoli precedenti, nell'Ottocento il romanzo diventa un modo di diffondere conoscenze scientifiche e fare ipotesi, senza la pressione della verifica a cui è sottoposta la ricerca scientifica. Autori come Jules Verne (1828-1915) nei suoi romanzi immagina l'esplorazione umana del nostro pianeta e della Luna. Alcune sue anticipazioni, come il sottomarino di *Ventimila leghe sotto i mari*, verranno poi realizzate mentre altre, come la discesa nei meandri del pianeta in *Viaggio al centro della Terra* non sono realizzabili. Per quanto riguarda la Luna, nel romanzo *Dalla Terra alla Luna* il viaggio di andata avviene tramite un gigantesco cannone, in grado di far raggiungere la velocità di fuga dalla Terra a una capsula, la Columbiad. Questo metodo sarebbe svantaggioso sulla Terra per la sua grande forza di gravità e impossibile da usare con equipaggio umano a causa dell'enorme accelerazione, ma potrebbe essere usato nell'attività delle future colonie lunari, per trasferire in orbita i materiali di scavo delle industrie minerarie. Il problema degli alieni Verne lo affronta solo nel romanzo *Attorno alla Luna*, dove racconta il seguito del precedente viaggio e il ritorno a Terra con un ammaraggio nell'oceano. Qui descrive la Luna come un mondo disabitato, aspetto già noto all'Astronomia di quel secolo, ma immagina che in passato ci sia stata una razza simile a quella umana che era vissuta sul pianeta finché esso è stato abitabile. In realtà Verne non è mai stato interessato alla presenza di alieni ma ha cercato di restare legato alla scienza dell'epoca anche se non era uno scienziato.

Può essere sorprendente invece trovare nella stessa Parigi di quegli anni un giovane allievo astronomo come Flammarion, che nel 1862 scrive *La pluralità dei mondi abitati* dove discute la possibilità di vita su altri pianeti. Secondo i biografati, il libro nasce quando il ragazzo sedicenne che spera di lavorare al telescopio si trova invece confinato all'ufficio calcoli e cerca di scacciare la noia con la fantasia. Nonostante il grande successo di pubblico, il libro appare poco serio al Direttore Le Verrier, che lo convoca invitandolo ad andar via dall'Osservatorio. Flammarion tuttavia non smette di astronomo, il giornalista, e diventa famoso anche per i suoi libri di divulgazione scientifica. Nel 1872 scrive tre novelle fantastiche, *Récits de l'infini* (Racconti dell'infinito), in cui uno spirito vaga in altri mondi reincarnandosi in esseri diversi da noi, ma adattati ai differenti pianeti in cui si ferma, secondo l'idea dell'evoluzione guidata dall'ambiente.

Nella stessa epoca, altri autori come il filosofo e storico tedesco Kurd Lasswitz

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

(1848-1910) o lo scrittore Herbert George Wells (1859-1927) affrontano il tema del contatto con una civiltà aliena nelle loro opere, rispettivamente *Due pianeti* del 1897 e *La guerra dei Mondi* del 1898. Entrambi immaginano l'arrivo di marziani sulla Terra. Quelli di Lasswitz giungono sulla Terra e la pongono sotto un regime di benigno protettorato. Questo scuote la dignità dei terrestri che si ribellano riuscendo a farsi riconoscere come pari. La storia finisce con questo contatto a distanza tra civiltà che instaurano un nuovo ordine planetario, con un messaggio di speranza per le generazioni future. I marziani di Wells invece hanno solo l'obiettivo di spazzar via dal nostro pianeta la razza umana; essi non comunicano, ma distruggono tutto ciò che incontrano finché non sono distrutti dai batteri terrestri a cui non sono immuni. Sebbene questi due romanzi siano creazioni di pura fantasia, riflettono le idee e le paure di quegli anni. La visione del contatto tra due civiltà descritta da Lasswitz riprende i toni dell'imperialismo coloniale del diciannovesimo secolo; quella di Wells è influenzata dai lavori di Lowell sui canali di Marte e preannuncia tristemente quella mentalità sterminatrice che si affermerà nella prima metà del ventesimo secolo con le guerre mondiali e le persecuzioni etniche e religiose.

Si noti come in questo secolo l'idea che esista vita extraterrestre non è più un tabù, e se ne parla senza timori di critiche e ritorsioni, sotto l'etichetta di romanzo. Il romanzo diventa un laboratorio in cui studiare la risposta della società contemporanea a eventi come il contatto tra civiltà diverse (e chi più diverso di un alieno?) e l'alieno a volte diventa una metafora del diverso, del nemico, proprio in quanto non-umano.

1.5 Il Novecento e oltre

A cavallo del secolo appaiono anche nella scienza idee nuove e piuttosto originali. Partendo dal fatto che all'epoca attuale non appaiono più nuove forme di vita, alcuni scienziati propongono che la vita potrebbe non essere nata sul nostro pianeta. William Thomson, Lord Kelvin (1824-1907), propone che frammenti di corpi extraterrestri portino occasionalmente germi dallo spazio. Il chimico svedese Svante Arrhenius (1859-1927) avanza l'ipotesi che la vita possa viaggiare attraverso lo spazio interstellare spinta da quella piccolissima pressione generata dalla luce del Sole e delle stelle. La pressione di radiazione, oggi usata per far muovere veicoli spaziali a vela, sarebbe in grado di spingere spore batteriche di 0,15 micron per migliaia di anni, fino a farle giungere presso un'altra stella, allo stesso modo in cui spinge verso l'esterno le particelle e gli atomi che formano la coda delle comete. Questa ipotesi prende il nome di **Panspermia**.

Questa ipotesi viene portata all'estremo nella teoria della **Panspermia Diretta**,

che immagina addirittura una vita primordiale trasmessa da un pianeta all'altro volontariamente, tramite navi spaziali in grado di portare al loro interno grandi quantità di microrganismi. Essa fu formulata dai biologi Leslie Orgel (1927-) e Francis Crick⁸ (1916-) in un articolo pubblicato nel 1972, in cui si riconosce una certa influenza della letteratura di fantascienza che era proliferata già all'inizio del ventesimo secolo con numerosi autori di alto livello. Se la vita fosse nata sulla Terra, sostengono Crick e Orgel, dovrebbe invece rifletterne in parte la composizione chimica. Inoltre, il fatto che il codice genetico sia uguale per tutti gli organismi viventi non si adatta all'idea che la vita possa essere nata qui in un'unica forma, senza varianti, ma è in accordo con l'idea di un precursore unico, che secondo loro sarebbe di origine extraterrestre.

Fred Hoyle (1915-2001) crede fermamente nella Panspermia cercando di dimostrare che il materiale superficiale della polvere interstellare sia di origine biologica. Inoltre, studiando la nascita e la diffusione dei casi di influenza in Gran Bretagna, trova che essi appaiono simultaneamente in regioni distanti diversi chilometri e suggerisce che i virus cadano sulla Terra come fa la polvere cosmica, in una pioggia simile a quella delle stelle cadenti, limitata nel tempo e a una regione geografica. In Astronomia si era opposto all'idea del Big Bang ed è considerato un 'eretico'. Egli è noto inoltre per aver scritto numerosi romanzi di fantascienza che immaginano l'incontro con forme di vita extraterrestri: nel romanzo, *A come Andromeda*, sceneggiato dalla BBC negli anni '60 e trasmesso in edizione italiana dalla RAI un essere vivente prodotto al computer diventa il messaggero di una civiltà aliena; ne *La nuvola nera* immagina un'intelligenza formata da pensieri senza corpo, trasmessi da correnti elettriche e campi magnetici all'interno di una nube interstellare di gas e polvere che si avvicina al Sole.

Puntano molto lontano i fisici Giuseppe Cocconi (1914-2008) del Centro Europeo di Ricerche Nucleari di Ginevra (CERN) e Philip Morrison (1915-2005) della Cornell University, USA. Nel giugno del 1959, in una lettera al direttore dell'Osservatorio radio di Jodrell Bank (UK), Sir Bernard Lovell (1913-2012), Cocconi discute, con calcoli matematici, l'intensità dei segnali radio provenienti da un'ipotetica civiltà extraterrestre e suggerisce di usare il radiotelescopio per cercare questi segnali nelle stelle più vicine simili al Sole. Tre mesi dopo, Cocconi e Morrison pubblicano sulla rivista *Nature* un articolo dal titolo *Ricerca di comunicazioni interstellari* con cui accendono il dibattito sulla comunicazione con civiltà esistenti su pianeti di altre stelle. Una civiltà in grado di inviare segnali nello spazio può

⁸ Crick, con Watson e Wilkins, basandosi su dati di Rosalind Franklin ma non citandola mai, scoprirono la struttura del DNA e vinsero il premio Nobel per la Medicina e Fisiologia nel 1962. Anche Watson è noto per le sue idee bizzarre, avendo affermato nel 2007 che i neri sono meno intelligenti dei bianchi "per genetica"!

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

essere scoperta anche a grandi distanze, senza bisogno di viaggiare fino al loro pianeta. Questo articolo rappresenta una pietra miliare del problema e apre la strada a successivi esperimenti. Seguendo questa ipotesi l'astronomo Frank Drake (1930-) nel 1961 sviluppa un'equazione statistica che esprime il numero di possibili civiltà extraterrestri presenti nella Via Lattea che sono in grado di comunicare con noi. Drake inizia a cercare segnali radio extraterrestri in un progetto che battezza OZMA, dal nome dell'immaginary regina della Terra di Oz⁹, svolto al *National Radio Astronomy Observatory* (NRAO) in Virginia. A questo progetto ne seguiranno altri, che verranno illustrati nell'ultimo capitolo di questo libro e che vanno sotto il nome di progetti SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligences*) ovvero Ricerche di Intelligenze Extraterrestri.

Il progredire della Biologia e la nascita della Biochimica nel Novecento hanno l'effetto di spostare la discussione da come sia nata la prima cellula a come si sono formate le molecole che rappresentano le basi biochimiche della vita: gli amminoacidi, e gli acidi nucleici (RNA e DNA). Il biologo inglese John Haldane (1892-1964) e il biochimico sovietico Alexander Oparin (1894-1980) sostengono piuttosto che la vita non sia un fenomeno speciale, ma solo una diversa combinazione di proprietà chimiche. Entrambi ipotizzano che la vita si sia generata sulla Terra da processi chimici avvenuti in un'atmosfera ricca di sostanze **riducenti** (composti contenenti idrogeno). Questo tipo di atmosfera è notevolmente diversa da quella attuale, dove le molecole di ossigeno possono sostenere forti processi di ossidazione. Come abbiamo visto, una simile idea, l'origine chimica della vita, era stata già concepita da Darwin.

L'ipotesi di Oparin viene messa alla prova sperimentalmente negli anni '50 da Harold Urey e dal suo laureando Stanley Miller, che provano a simulare in laboratorio la composizione chimica dell'atmosfera primitiva terrestre in presenza di oceani, in un esperimento approssimativo. Dopo diversi giorni di produzione di vapori e di scariche elettriche, la soluzione acquosa estratta dal recipiente, detta genericamente **brodo primordiale**, conteneva numerosi composti organici, tra cui alcuni amminoacidi. Diversi esperimenti simili, condotti negli anni successivi con varianti della miscela originaria, hanno prodotto risultati analoghi. Ne parleremo nella Sezione 6.1.

L'idea che la vita sia nata e si trovi ancora in ambienti proibitivi per gli esseri umani viene rafforzata dall'esplorazione dei fondali oceanici, delle zone vulcaniche, del sottosuolo e dello spazio circumterrestre in cui si scopre l'esistenza o la sopravvivenza di forme di vita terrestri **estremofile**. L'Astronomia scopre negli

⁹ Dal romanzo *Ozma of Oz*, di Frank Baum, pubblicato nel 1907.

anni '50 che i processi fisici e chimici con cui nascono e si propagano gli atomi e le molecole hanno un ciclo che abbraccia l'intera nostra galassia, la Via Lattea. Per definire questo tipo di ricerche Joshua Lederberg (1925-2008) crea il termine Esobiologia, in un articolo del 1960 in cui vengono discusse: la definizione delle molecole essenziali per la nascita della vita, i limiti ambientali in cui può esistere, la definizione stessa di vita e la possibilità che essa esista nel Sistema Solare, in particolar modo sul vicino pianeta Marte. Questo termine verrà poi sostituito nel 1982 con Bioastronomia (*Bioastronomy*), adottato dall'IAU (Unione Astronomica Internazionale) e nel 2015 con quello coniato dalla NASA e oggi largamente accettato di Astrobiologia (*Astrobiology*).

Se la Fisica e la Biologia hanno una vera e propria rivoluzione dall'inizio del secolo – basta pensare alle teorie della Relatività Speciale e Generale e alla teoria quantistica – nella politica e nella società si afferma una filosofia dualistica, buoni da una parte e cattivi dall'altra, e si scatenano due lunghe guerre, distruttive per la maggior parte delle nazioni. Finita la seconda guerra mondiale, questo dualismo continuerà a svilupparsi nella logica dei due blocchi di stati contrapposti, raccolti attorno agli Stati Uniti o all'Unione Sovietica, pronti a sparsi ed eventualmente a distruggersi con armi nucleari. Se la ricerca di vita extraterrestre durante le due guerre mondiali non ha grandi sviluppi, l'idea dell'alieno ostile trova un alimento inconscio nell'opinione pubblica come personificazione di un nemico che non può essere attaccato apertamente dandogli il nome delle nazioni avversarie, ma che nel racconto immaginario viene regolarmente sconfitto, esorcizzando così la paura della distruzione. Molte opere che descrivono gli alieni come aggressori e tecnologicamente avanzati possono essersi sviluppate in un simile clima.

Che la paura dell'alieno non sia solo patrimonio dei romanzi di fantascienza lo dimostrano le reazioni del pubblico e dei giornali della notte di Halloween del 1938. Quella sera, negli Stati Uniti, l'attore Orson Welles recita alla radio un dramma tratto da *La guerra dei Mondi* dello scrittore Herbert G. Wells. Per ottenere un maggiore effetto, il dramma inizia con l'interruzione di un programma musicale e l'annuncio che i marziani hanno attaccato la Terra sbarcando vicino New York. In realtà Orson Wells, prima di iniziare a recitare, dice che si tratta di una finzione, ma molte persone accendono la radio in un momento successivo e credono realmente a un attacco alieno in corso. La seconda guerra mondiale non è ancora iniziata, ma la paura di essere annientati esiste. I giornali, anche nell'intento di screditare la radio che faceva loro concorrenza, scrivono di telefonate impaurite alle forze dell'ordine e gente in panico, anche se la notizia appare oggi gonfiata rispetto alla realtà. Il fatto che una simile notizia venga presa per buona indica il clima in cui la gente viveva in quegli anni. L'idea di alieni infidi e misteriosi

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo

arrivati sulla terra a bordo di astronavi sopravvive alla guerra e traspare ancora negli anni '50, traducendosi negli annunci di avvistamenti di oggetti volanti non identificati (UFO), che creano apprensione o paura in molte persone, alimentando un'ampia letteratura costituita da romanzi, saggi e riviste.

Si arriva così alla fine del ventesimo secolo. I blocchi contrapposti si dissolvono, non attraverso nuove guerre, ma grazie anche all'opera di diverse personalità e uomini politici di entrambi gli schieramenti. Stati Uniti e Unione Sovietica iniziano a smantellare le armi nucleari; nazioni divise in due dalla guerra, come la Germania, si riuniscono mentre nazioni accorpate, come la Cecoslovacchia, si separano in maniera incruenta diventando indipendenti. Purtroppo non finiscono le guerre, che da globali si trasformano in innumerevoli conflitti territoriali, in cui le maggiori potenze vengono coinvolte sia singolarmente sia insieme ad altre nazioni (Corea, Vietnam, Afghanistan, Somalia, Cecenia, Iraq, Balcani, Palestina, Crimea, Libia tanto per citarne alcune). Nuove superpotenze come la Cina nascono e anche piccole nazioni si dotano di bombe nucleari. Tutto il pianeta cambia configurazione politica e si finisce per cercare altrove il nemico da combattere.

In questa seconda metà del secolo, come abbiamo detto, la ricerca di vita extraterrestre inizia una fase scientifica e anche la riflessione di alcuni romanzieri si concentra su aspetti realistici del problema. Per esempio gli alieni diventano virus catturati intenzionalmente da satelliti militari per la guerra batteriologica ma che sfuggono al controllo creando una strage (come in *Il virus Andromeda* di Michael Crichton); il pianeta Giove diventa una stella dopo aver accumulato tanta materia da innescare un collasso gravitazionale (in *2010, l'anno del contatto* di Arthur C. Clarke). I problemi dell'interpretazione di un messaggio in codice binario inviato da una civiltà aliena vengono presentati in due romanzi, tra tanti altri: *Messaggio da Cassiopea* di Harrison Zerwick e Cloe Brown e *Contact* di Carl Sagan (1934-1996), astrobiologo e scrittore.

In questi romanzi e film l'alieno intelligente assume nuove forme, non più necessariamente ostili ai terrestri ma amiche, come per esempio in *E.T.*, e *Incontri ravvicinati del terzo tipo*, entrambi film del regista Steven Spielberg, e in diversi altri. Oppure è un'intelligenza artificiale dotata di coscienza, come nel primo film di *Star Trek* o il supercomputer di *2001: Odissea nello spazio*. Questi film o romanzi seguono il dibattito scientifico in corso negli ultimi decenni su cosa si debba realmente definire *essere vivente* e su quali potrebbero essere le conseguenze di un incontro con altre civiltà. La discesa dei primi uomini sulla Luna il 21 luglio 1969, rappresentata l'anno prima nel film *2001: Odissea nello spazio*, appare come la realizzazione di molte fantasie umane, finora relegate alla letteratura e al cinema.

Nel XXI secolo i telescopi spaziali trovano migliaia di pianeti intorno ad altre stelle, e decine di questi simili alla Terra. Molte sonde spaziali sorvolano e atterrano su asteroidi e comete per cercare sostanze organiche; si studiano da vicino i satelliti dei pianeti giganti; si atterra su Titano (satellite di Saturno). Veicoli dotati di ruote esplorano Marte alla ricerca di tracce di vita, trovando un pianeta che ha avuto fiumi e laghi nel suo lontano passato, e che contiene ancora sostanze organiche nel sottosuolo.

In quest'epoca di scoperte spaziali la buona letteratura di fantascienza, da semplice svago della fantasia, è diventata come un laboratorio teorico di fatti che potrebbero avvenire nella realtà. La pandemia di un coronavirus del 2020 (COVID19) che uccide quasi due milioni di persone appare drammaticamente nei telegiornali come la riedizione di film catastrofici che prevedono l'attacco di virus (naturali, artificiali o alieni) che molti avevano visto al cinema o in TV.

Parlare scientificamente di possibilità di vita aliena oggi ci permette di valutare quali sono le nostre conoscenze attuali e quanto sia possibile trovare altre forme di vita nello spazio. La scoperta di tracce biologiche su Marte o nell'atmosfera di un pianeta alieno è alla portata dei nostri strumenti e potrebbe arrivare da un giorno all'altro; allo stesso modo un segnale da una civiltà intelligente potrebbe arrivare un domani, attivando una procedura già studiata che coinvolge l'ONU. Oppure non si potrebbe trovare nulla e restare nel dubbio se siamo veramente soli nella nostra galassia, noi intorno a questa stella di periferia con più di 200 miliardi di stelle e pianeti senza vita. Ne parleremo nei prossimi capitoli.

2

La vita sulla Terra

Nella Storia umana, naturalisti e filosofi si sono sempre interrogati sull'origine della vita e alcuni di essi hanno ipotizzato la sua esistenza fuori dalla Terra. Con lo sviluppo delle scienze sperimentali negli ultimi secoli, il problema si è spostato da un piano puramente speculativo a quelli dei laboratori di chimica e biologia, sia terrestri, sia orbitanti nello spazio. Autori come Jacques Monod, Ilya Prigogine, Isabelle Stengers, Christian De Duve e diversi altri hanno trattato il problema della vita, la sua origine e funzione. Lungi dall'essere chiarito, questo problema è sostenuto oggi da un'aperta discussione filosofica, scientifica e religiosa.

Tutti noi abbiamo in mente l'idea di cos'è vivente e cosa non lo è, come la parola "luce" evoca nella nostra mente un'idea chiara di un fenomeno percepibile, che tuttavia ha più di una interpretazione fisica; provate però a definire ciò che chiamate "vita", in modo da includere delle proprietà che siano uniche e ben definite. Molti autori del passato ci hanno provato senza riuscirci. Biologi come Vera Kolb o Martino Rizzotti nei loro articoli e libri hanno raccolto numerose definizioni date da filosofi, biologi, fisici e altri scienziati, notando l'impossibilità di una definizione univoca. Ogni definizione appare diversa dalle altre, con solo alcuni punti in comune. In realtà la definizione di vita, come tutte le definizioni, è un atto linguistico che deve adoperare concetti già noti per spiegare il significato di qualcosa di nuovo. Noi non sappiamo se le forme di vita note siano le uniche possibili e non le conosciamo tutte, e neppure nella loro interezza. Probabilmente per questa ragione diventa molto difficile definire la vita come proprietà intrinseca degli esseri viventi, che li distingue – e forse li separa – dal resto del mondo.

La riproduzione, la crescita e le altre caratteristiche degli esseri viventi, incluso il pensiero, in passato aveva fatto pensare che vi fosse qualcosa di speciale nell'essere vivi rispetto a tutto ciò che è inanimato, ovvero che accanto alle forze della Fisica si manifestasse una speciale "forza vitale" che permea le cose viventi e che è preclusa al mondo inanimato. Questa nozione prende il nome di **vitalismo**. Alcuni sostenitori del vitalismo hanno considerato la vita come qualcosa che pone ordine nel caos del mondo, per la sua capacità di produrre strutture regolari e funzioni ben precise partendo da fluidi e gas in cui le molecole sono distribuite a caso. Altri autori hanno messo in evidenza come l'informazione contenuta nei cromosomi sia enorme rispetto a quella di una roccia o di una struttura ripetitiva

come un cristallo; hanno perciò sostenuto che essere vivi corrisponde alla capacità di organizzare le informazioni, in un cosmo che tenderebbe invece verso il disordine completo (tendenza all'**entropia** o grado di disordine). L'idea che la vita possieda un'*entropia negativa* che si opponga al secondo principio della termodinamica¹⁰ è stata tuttavia messa in dubbio da numerosi autori, perché in realtà gli esseri viventi non sono sistemi *chiusi*, che non interagiscono con l'ambiente. Per poter realizzare i processi vitali essi necessitano di un passaggio di energia e di materie chimiche dall'esterno e verso l'esterno e perciò si comportano come sistemi termodinamici *aperti*. Questo ingresso di energia passa per molti animali attraverso il cibo e proviene da altri animali o da piante, mentre per le piante deriva dalla luce del Sole. In entrambi i casi, origina dall'esterno. Le forme viventi quindi possono organizzare la loro struttura interna, ma solo modificando e destrutturando il loro ambiente. Per esempio, molti processi vitali producono calore, aumentando quindi l'entropia dello spazio intorno, perciò ubbidiscono senza eccezioni al secondo principio della termodinamica.

Senza avere l'ambizione di definire cos'è la vita, possiamo limitarci a delineare le caratteristiche degli esseri viventi (o **forme di vita**), interessandoci più agli effetti della vita che al suo principio. La raccolta di queste caratteristiche non può essere ristretta, includendovi quelle della maggior parte delle specie viventi *ma non tutte*, perché correremmo il rischio di incontrare forme di vita aliene e non riconoscerle come tali. Per esempio, una definizione che includa la capacità di riprodursi autonomamente escluderebbe numerose categorie di esseri viventi sterili (come api, formiche, muli, bardotti) o strutture che hanno bisogno di altre forme viventi per riprodursi (come i virus o i virusoidi). Atterrare su un pianeta pieno di virus ritenendolo sterile sarebbe molto pericoloso! Non possiamo neanche pensare a forme di vita troppo generiche, altrimenti includeremmo tra queste dei fenomeni fisico-chimici in grado di autoalimentarsi e diffondersi nello spazio, ma non viventi. Per esempio, ci sono galassie come le **ellittiche con anello polare**, fatte di stelle, che assorbono gas e polvere dall'esterno e lo trasformano in altre stelle ingrandendosi. Ingeriscono materia e la trasformano in sé stesse, come fanno molte forme di vita. Tuttavia è chiaro che esse non sono "vive" nel senso in cui noi possiamo intenderlo.

Senza avere la pretesa di spiegare qui la Biologia, elencheremo i tipi di forme di vita a noi note e – molto in breve – la loro struttura e funzionamento. Si rimanda a testi semplici di Biologia per informazioni più dettagliate.

¹⁰ Una trasformazione che inizi e termini in stato di equilibrio si svolge sempre in modo da causare un aumento dell'entropia dell'insieme sistema più ambiente.

2.1 Forme di vita terrestri

Le forme di vita che conosciamo sulla Terra hanno un'enorme varietà (**biodiversità**) e includono molti milioni di specie, presenti in un'ampia varietà di condizioni ambientali anche estreme per noi umani. In base a studi recenti sulla massa degli organismi (**biomassa**), le piante costituiscono l'81,8% del totale¹¹; i batteri rappresentano il 12,7 % mentre gli animali solo lo 0,36% e gli esseri umani appena 1/10000 del totale. L'86% delle forme di vita censite vivono sulla superficie dei continenti, il 13% nel sottosuolo e solo l'1% negli oceani.

Tutti questi esseri viventi sono costituiti da molecole contenenti carbonio. Abbiamo buone ragioni per credere che il carbonio debba necessariamente entrare nella chimica delle forme viventi. Esso passa facilmente (con lo scambio di poca energia) dalla forma completamente ossidata (CO_2 , anidride carbonica) alla forma completamente ridotta (CH_4 , metano) e viceversa. Altri elementi con simile valenza, per esempio il silicio, possiedono forme ossidate e ridotte molto stabili, con legami chimici difficili da spezzare. Per il silicio si va dal quarzo (SiO_2) durissimo e cristallino, che fonde solo al di sopra di 867°C al silicometano o silano (SiH_4), un gas incolore meno denso dell'anidride carbonica. Alcuni autori si sono interrogati sulla possibilità che una forma di vita sia basata sul silicio anziché sul carbonio, ma questa eventualità richiederebbe un fabbisogno di energia maggiore di quella offerta dal secondo. Poiché i fenomeni a più bassa energia sono sempre favoriti nell'evoluzione di un sistema fisico, possiamo ragionevolmente accettare l'idea che la vita debba avere come costituente essenziale il carbonio ovunque essa sia. D'ora in poi perciò parleremo sempre di forme di vita basate sul carbonio.

Allo stato delle attuali conoscenze, noi sappiamo che una forma di vita per mantenersi non ha bisogno di precise condizioni fisiche e chimiche, ma di condizioni ambientali piuttosto stabili. Poiché ambienti con temperatura, densità di materia e di radiazione quasi costanti esistono in diverse regioni dello spazio, non abbiamo oggi nessun motivo né per credere che la presenza di forme di vita sia un fenomeno esclusivo del pianeta Terra, né per pensare che forme di vita terrestri non possano adattarsi (o contaminare) altri ambienti nello spazio. Una loro caratteristica essenziale è la loro capacità di utilizzare energia, sottratta all'ambiente, per il proprio sostentamento e lo svolgimento di altre funzioni. Questa interazione tra ambiente e forme di vita si esplica nei processi di metabolismo e di crescita.

In uno schema semplificato del **metabolismo**, alcune sostanze esterne vengono

¹¹ Le percentuali sono basate sul contenuto di Carbonio di ogni specie riferite a un totale di 550 Giga tonnellate.

assorbite e poi trasformate per produrre energia. Gli organismi e le cellule stesse hanno bisogno di energia per muoversi, per produrre sostanze utili ad altri processi, oppure per accrescersi e riprodursi. Questa energia deriva in gran parte dall'ossidazione dei **carboidrati**. Si tratta di molecole contenenti carbonio che è legato ad atomi di idrogeno e ossigeno con la stessa proporzione dell'acqua ($2:1 \Rightarrow \text{H}_2\text{O}$). Per esempio il ribosio ($\text{C}_5\text{H}_{10}\text{O}_5$) o il glucosio ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) in cui il numero di atomi di idrogeno è sempre il doppio di quelli di ossigeno. La produzione diretta di energia però produrrebbe calore, che sarebbe dannoso per la cellula, che deve lavorare a temperatura costante. Perciò l'energia prodotta dai carboidrati viene immagazzinata nei legami chimici di un composto detto **ATP** (Adenosintrifosfato), costituito da una base azotata, l'adenina, più uno zucchero, il ribosio, e tre molecole di fosfato. Attraverso le molecole d'acqua, i legami dei fosfati dell'ATP sono facilmente spezzati rilasciando energia. La prima reazione che produce ATP avviene in assenza di ossigeno libero, ed è la fermentazione, in cui il glucosio acquista fosfati (fosforilazione) e produce ATP. In presenza di ossigeno libero, a essa segue un'ossidazione con un processo a due stadi detto respirazione. Questo processo è 18 volte più efficiente della fermentazione per produrre ATP e si è affermato successivamente sulla Terra. Entrambi sono descritti nella Sezione 6.4.

La **crescita** degli esseri viventi possiede caratteristiche particolari, che la rendono diversa dall'accrescimento delle forme inanimate. Un cristallo si accresce utilizzando sostanze presenti nel suo ambiente, le cui molecole si legano tra loro seguendo precisi schemi geometrici (a strati, a spirale o su una linea) e occupando gli spazi a disposizione. In tutti i casi, le sostanze in gioco non vengono scomposte e assorbite dal cristallo, ma semplicemente aggiunte alla sua struttura preesistente. Invece l'accrescimento degli esseri viventi avviene attraverso l'assorbimento di sostanze chimiche esterne trasformate nelle sostanze di cui è composto il vivente. Le cellule di un organismo si accrescono e si dividono producendo nuove copie; così l'insieme di cellule diventa più grande.

Molti biologi ritengono che non possano essere definite forme di vita quelle strutture più piccole di 200 nm che non sono in grado di riprodursi. In questo senso, i virus non possono essere definite forme di vita ma molecole complesse che interagiscono con cellule viventi. Come vedremo, ci sono altre molecole come i prioni che possono generare malattie e dall'altro lato ci sono i viroidi che possono riprodursi da soli. Per iniziare, faremo un censimento di tutto ciò che rientra nella definizione di vivente, includendo altre categorie come i virus, i virusoidi, i viroidi e i prioni.

La Biologia distingue i viventi dividendoli in due **Domini**: Procarioti ed Eucarioti, distinti in **Regni**. I Procarioti includono i **Batteri** e il regno distinto degli **Ar-**

La vita sulla Terra

chaea, forme microscopiche con caratteristiche diverse dai primi. Gli Eucarioti includono i regni degli **Animali**, **Piante**, **Funghi**, **Cromisti** e **Protisti**. L'ultimo regno include solo organismi unicellulari.

2.1.1. La cellula

Tutti gli esseri viventi sono costituiti da uno o più cellule. La **cellula** è la più piccola porzione organizzata di materia che possiede le caratteristiche della vita e ha un proprio metabolismo. Essa si autoregola, modificando le sue funzioni con meccanismi di *feedback*, è in grado di riparare sé stessa e di regolare il proprio funzionamento anche sulla base di input esterni; scambia materia, energia, informazione con l'ambiente ed interagisce con esso.

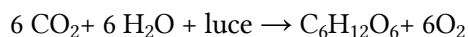
La sua riproduzione avviene tramite un processo che coinvolge gli acidi nucleici come l'RNA e il DNA, di cui parleremo più diffusamente in seguito, e quest'ultimo in particolare. La riproduzione cellulare avviene principalmente per divisione (mitosi, negli eucarioti) e negli organismi pluricellulari è connessa al loro accrescimento. La riproduzione sessuata in organismi pluricellulari richiede una forma più complessa di divisione, detta **meiosi**, che include la fecondazione da parte di **gameti**, cellule portatrici di caratteristiche femminili e maschili. Negli eucarioti i gameti sono detti spermatozoi e ovuli. Sia nella mitosi che nella meiosi l'informazione viene trasmessa attraverso i **geni**, porzioni dei filamenti di DNA che trasmettono alcune caratteristiche dell'essere vivente. L'insieme dei geni presenti nei filamenti di DNA nelle cellule o di RNA nei virus viene detto **genoma**. Nei batteri il DNA è strutturato in forma circolare, mentre negli eucarioti è organizzato in cromosomi, di cui parleremo dopo. Ogni specie eucariote è caratterizzata dal numero di cromosomi contenuti nel nucleo di ognuna delle sue cellule e dalle caratteristiche dei geni contenuti in essi.

Descrivendo la cellula a grandi linee, richiamiamo solo alcuni concetti che ci serviranno nelle discussioni di questo libro. Possiamo distinguere due tipi di cellule: le cellule procariote e quelle eucariote. La **cellula procariote** (per esempio un batterio) ha una parete e una **membrana cellulare** esterne fatta di sostanze come i fosfolipidi. Esse separano la cellula dall'ambiente esterno e racchiudono una soluzione acquosa detta **citoplasma**. Diffusi all'interno del citoplasma si trovano degli **organelli**, strutture dotate di membrana che svolgono diverse funzioni. Il DNA nella cellula procariote è fluttuante nel citoplasma e possono esserci altri piccoli filamenti di DNA, i **plasmidi**. Nella parte esterna possono esserci delle appendici fatte di proteine, corte e diffuse come i **pili** o lunghe e molto mobili come i **flagelli**.

La **cellula eucariote** è più complessa. Oltre alla membrana cellulare esterna, che isola parzialmente il citoplasma dal mondo esterno, contiene una **membrana nucleare** interna che racchiude il **nucleo** nel quale è contenuto il DNA. Nel citoplasma degli eucarioti gli organelli sono vari e più complessi. Oltre ai **ribosomi**, che sintetizzano le proteine, ci sono i **mitocondri**, strutture allungate dotate di un proprio DNA, preposte all'ossidazione delle sostanze, forse batteri primitivi inglobati dagli eucarioti. Tutti insieme regolano la produzione di energia, la respirazione cellulare e il metabolismo. Nel nucleo della cellula si trova il DNA avviluppato in una masserella detta **cromatina**. Durante la riproduzione cellulare esso si raggruppa a formare delle strutture a X, dette **cromosomi**. Tutte le cellule del nostro organismo hanno una coppia di ognuno dei 23 cromosomi (**cellule diploidi**), mentre i gameti sono aploidi, cioè contengono un solo cromosoma per tipo. Le cellule di altre specie possono avere anche 4, 8 o più cromosomi per tipo (**cellule poliploidi**).

Le membrane cellulari possono essere fatte da una doppia parete di **fosfolipidi**, lipidi (grassi) contenenti fosfati. Ma se fossero fatti esclusivamente di queste sostanze, non potrebbe esserci scambio di molecole con l'esterno e la cellula "soffocherebbe". Invece esistono diverse proteine inserite nella membrana che agiscono come **canali**, passaggi passivi che permettono il transito di sostanze utili al metabolismo cellulare oppure come **pompe**, in grado di spingere dentro o fuori alcune molecole, o ancora come **recettori**, che attivano alcuni meccanismi in base agli impulsi esterni.

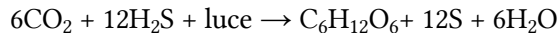
Le **cellule eucariote vegetali** sono differenti da quelle animali perché contengono una zona detta **vacuolo**, contenente acqua, e una **parete di cellulosa** esterna che conferisce loro una certa rigidità. Il citoplasma con i suoi organelli e il nucleo con il DNA sono confinati in un settore esterno della cellula, attorno al vacuolo. Nelle cellule vegetali esistono degli organelli particolari chiamati **cloroplasti**, che sono alla base della trasformazione della luce in molecole organiche, attraverso la sintesi dell'anidride carbonica (CO₂) e dell'acqua (H₂O). Questo avviene in un processo detto **fotosintesi**. I cloroplasti posseggono, come i mitocondri, un proprio genoma e derivano dai **cianobatteri**, batteri che sulla Terra attraverso la fotosintesi possono produrre grandissime quantità di ossigeno sia sulle terre emerse che nei mari. Anche i cloroplasti, come i mitocondri, potrebbero derivare da batteri primitivi inglobati dagli eucarioti. La fotosintesi utilizza l'energia della luce solare per trasformare l'anidride carbonica e l'acqua in energia chimica del glucosio e di altre molecole organiche, secondo la reazione:



La vita sulla Terra

Essa trasporta l'energia del fotone utilizzando la **clorofilla a**, la **clorofilla b** e altri pigmenti come il **betacarotene**. Tutti questi pigmenti assorbono la luce blu-verde (lunghezze d'onda tra 400 e 500 nm); la clorofilla a e b assorbono anche la radiazione rossa-infrarossa tra 650 e 700 nm. Alla fase dipendente dalla luce, che libera ossigeno, segue una fase complessa in cui viene fissato il carbonio, il **ciclo di Calvin**, che contiene molecole come l'ATP e altre, producendo molecole di glucosio e liberando una piccola quantità di CO₂ attraverso la respirazione cellulare. Il ciclo complessivo è a favore della produzione di O₂ a spese della CO₂. Come vedremo nella Sezione 5.7, attraverso la fotosintesi l'antica atmosfera terrestre contenente anidride carbonica è stata trasformata nell'atmosfera attuale, in cui è presente una certa quantità di ossigeno. Oggi i cianobatteri marini sono i maggiori produttori di ossigeno, più delle grandi foreste terrestri.

Dobbiamo citare anche che in alcuni organismi procarioti esistono altre forme di fotosintesi. In esse l'idrogeno non proviene dall'acqua ma dall'acido solfidrico (H₂S), che viene ossidato a zolfo elementare tramite la reazione di **fotosintesi anossigenica**:



Abbiamo trattato qui più diffusamente della fotosintesi perché – come vedremo nella Sezione 9.4 – è possibile prevedere la presenza di fotosintesi anche in condizioni di luce emessa da una stella nana rossa. La presenza di ossigeno atmosferico e dell'assorbimento della clorofilla nella luce riflessa di un pianeta di queste stelle sarebbero prove dell'esistenza di questo tipo di fenomeni anche su un pianeta alieno.

Le dimensioni delle cellule procariote vanno da 100 nanometri a 10 micron, mentre quella eucariote sono molto più grandi, da 10 a 100 micron. Il genoma ha milioni di parti, dette **nucleotidi** e di cui parleremo in questo capitolo. Per esempio l'*Escherichia coli* ha 4 milioni di nucleotidi, i lieviti hanno 20 milioni di nucleotidi. Il DNA umano ha circa 3 miliardi di nucleotidi e i mitocondri ne hanno circa 16000.

2.1.2. Virus

Iniziamo a discutere di una categoria di strutture che, diversamente dalle cellule, non possono produrre energia metabolica sotto forma di ATP né sintetizzare proteine: i **virus**. Essi sono costituiti da acidi nucleici (DNA o RNA) che possono essere avviluppati da una proteina o da una membrana composta da più proteine. La loro struttura può essere quasi sferica, con dimensioni che vanno da 25 nm (per esempio parvovirus), a 300 nm (per esempio virus della peste) o basata

su una figura geometrica a molte facce, come l'icosaedro (per esempio HIV 1) o uno sferoide con diverse protuberanze fatte da proteine (Coronavirus). Altri sono filamentosi, come i filovirus, che possono avere un diametro di 80 nm e una lunghezza di 14000 nm (= 14 μ m). Le particelle virali, dette **virioni**, non possono riprodursi al di fuori di una cellula infettata.

Molti biologi ritengono che i virus non possano essere considerati forme di vita, ma indubbiamente essi sono portatori di informazioni genetiche che trasmettono venendo a contatto con una cellula. Il loro meccanismo d'azione permette loro di penetrare nella cellula, per esempio producendo un varco tramite una proteina esterna. All'interno della cellula il genoma del virus perde il rivestimento protettivo e può far replicare il proprio acido nucleico e sintetizzare proteine virali. Queste permettono la formazione di nuovi virus, che fuoriescono dalla cellula ospite. La maggior parte delle specie virali si moltiplica dentro una cellula, distruggendola, ma non tutti i virus lo fanno. Alcuni possono entrare in uno stato di quiescenza e attivarsi dando origine alla propria replicazione solo in condizioni particolari. I meccanismi di azione descritti sopra sono molto schematici e servono solamente a capire che un virus si comporta come un trasmettitore di informazione solo integrandosi a una forma di vita più complessa. Si tratta dunque di molecole che possono riprodursi indirettamente a spese di cellule viventi.

2.1.3. Virusoidi e viroidi

I **virusoidi** o **RNA satelliti**, composti da alcune migliaia di nucleotidi, sono formati da un singolo filamento circolare di RNA associato a un altro virus e incapsulato nel suo stesso rivestimento. Il virus ospitante, detto **Helper virus**, fornisce la proteina per la loro duplicazione, altrimenti non avrebbero la capacità di riprodursi. Per esempio, il virusoide dell'epatite D, che utilizza, per replicarsi, come aiuto l'azione del virus dell'epatite B.

I **viroidi** o **virus delle piante** sono agenti infettivi generalmente attivi nei vegetali, di cui si conoscono attualmente poche decine di specie. Essi hanno una struttura semplicissima se confrontata con i circa tre miliardi di coppie di nucleotidi del genoma umano, essendo composti essenzialmente da un filamento di RNA con un numero di nucleotidi che può variare da 246 a 375. Sono costituiti da un singolo filamento richiuso come ad anello e non producono proteine. La loro riproduzione è interessante perché utilizza un fenomeno di auto-distacco delle porzioni di RNA: una parte del filamento si distacca ed è in grado di ricostruire la parte mancante. Questa caratteristica, denominata **autocatalitica**, li definisce come **ribozimi**, RNA che codificano sé stessi.

La vita sulla Terra

Tabella 2.1 - Sommario delle strutture organiche descritte nel Cap.2

Nome	Descrizione	Dimensioni	N. nucleotidi	Riproduzione
Eucarioti	Cellule dotate di membrane e mitocondri; utilizzano proteine.	μm - mm	DNA+RNA $10^6 - 10^9$ nt	Sessuata, per gameti, oppure scissione o gemmazione
Procarioti	Cellule dotate di membrane; utilizzano proteine,.	pochi μm	DNA+RNA $10^6 - 10^7$ nt	Scissione
Mitocondri	Organelli degli eucarioti.	pochi μm	DNA+RNA $10^6 - 10^7$ nt	Con la cellula ospite
Cloroplasti	Organelli delle piante	pochi μm	DNA+RNA $10^6 - 10^7$ nt	Con la cellula ospite
Virus	Acidi nucleici con rivestimento di proteine.	decine di nm	DNA+RNA 10^4 nt	Per infezione di cellule
Virusoidi	RNA legato a proteine.	pochi nm	RNA 300 - 400 nt	Sfruttano i virus
Viroidi	Filamenti di RNA. Non utilizzano proteine	pochi nm	RNA 300 - 400 nt	Per autocatalisi
Prioni	Agglomerati di proteine che modificano altre proteine.	pochi nm	nessuno	Nessuna

Questo aspetto dei viroidi è molto interessante: le strutture più semplici previste alla nascita della Vita sulla Terra sono probabilmente dei filamenti di RNA. I viroidi, per questa proprietà autocatalitica, sono dei buoni candidati ad essere i precursori delle forme di vita terrestri.

2.1.4. Prioni

Una categoria ancora più ambigua rispetto alle forme di vita definite prima è quella dei **prioni**. Essi sono costituiti da una proteina, cioè un assemblaggio di amminoacidi, più piccola di un virus. Si trovano, come le normali proteine, in tutti i mammiferi e nelle cellule nervose aiutano il passaggio dei segnali. I prioni possono assemblare la loro struttura in forma di elica (α -elica) oppure quasi planare, come a dente di sega (β -foglietto). Quest'ultima configurazione ha un livello energetico minore e perciò, per il principio fisico di minima energia, è favorita nei processi di trasformazione. Un prione β -foglietto, venendo a contatto con prioni ad α -elica, può destrutturarlo rendendolo planare.

Come vedremo nelle prossime Sezioni del libro, la struttura tridimensionale delle proteine determina la loro funzione e una proteina destrutturata può perdere la capacità di svolgere correttamente la sua attività fisiologica. Questo aspetto è molto importante: non si tratta di una forma di vita in senso stretto, ma di un aggregato di molecole, come i virus, in grado di duplicare la loro struttura, modificando a propria somiglianza le molecole vicine. Ma i virus sono dotati di un

genoma, e sfruttano il meccanismo riproduttivo di una cellula per fare copie di sé stessi. Qui si tratta di molecole senza genoma che trasformano le altre, ma sono in grado come i virus di generare malattie. Alcuni prioni, modificando proteine del midollo spinale o del cervello, causano nell'uomo patologie come il morbo di Creutzfeldt-Jakob (o della mucca pazza) o il Kuru, entrambi neuropatie degenerative, mentre nelle pecore producono la Scrapie.

Un altro aspetto interessante è che i prioni sono molto resistenti al calore e agli agenti chimici quali gli enzimi di difesa degli organismi, tipo la proteasi, diversamente dalle proteine comuni. In una Terra primordiale, la resistenza delle prime forme di vita poteva essere un fattore determinante per la sua affermazione in un ambiente ancora instabile. Una delle ipotesi fatte in passato sull'origine della vita suggeriva che i coacervati di proteine fossero stati i precursori delle forme di vita terrestri, invece dei filamenti di RNA.

2.2 Molecole vitali

2.2.1. L'acqua

L'acqua (H_2O) riveste un ruolo importantissimo nello sviluppo della vita terrestre. Ha delle particolarità che la distinguono dalle altre molecole: è una molecola polare, ovvero una parte della molecola (quella contenente ossigeno) ha una carica positiva mentre l'altra (contenente i due atomi di idrogeno) è negativa. Essa forma uno strato carico intorno alle altre molecole (**solvatazione**), indebolisce l'attrazione tra gli ioni o tra altre molecole polari e svolge la funzione di **solvente**, potendo dissociare altre sostanze. Gli atomi d'idrogeno formano dei legami, detti **legami a idrogeno**. Sono interazioni che legano la carica + dell'idrogeno a molecole che contengono un atomo elettronegativo (per esempio N, azoto, oppure O, ossigeno). I legami a idrogeno si formano e si rompono facilmente e per questa proprietà l'acqua partecipa a un gran numero di interazioni, tutte importanti dal punto di vista biologico.

L'acqua forma con sé stessa dei legami a idrogeno, che insieme alla sua polarità fanno sì che essa sia liquida alle temperature e pressioni dell'ambiente terrestre. I legami a idrogeno le consentono di assumere un volume minore, minimo a 4 °C. A temperature maggiori il moto delle molecole cresce fino a passare allo stato di vapore e il volume dell'acqua aumenta. A temperature più basse di 4° C invece i legami formano strutture cristalline che occupano un volume di spazio maggiore, formando ghiaccio. La sua bassa densità permette al ghiaccio di restare in superficie mantenendo stabile la temperatura dell'acqua sottostante. Si pensi a quanto sia utile questa variazione di volume per le forme di vita acquatiche: immagina-

La vita sulla Terra

mo un lago pieno di pesci, piante acquatiche e batteri. D'inverno a temperature esterne sotto lo 0°C l'acqua superficiale diventa ghiaccio. Ma l'acqua solida non va a fondo; il suo strato solido protegge la massa liquida sottostante dove la vita continua. Nelle altre sostanze lo stato solido è più denso di quello liquido, e la parte solida tende ad affondare. In un ipotetico lago di un'altra sostanza chimica, man mano che la temperatura esterna diminuisce i pezzi solidi del liquido finirebbero sul fondo, accumulandosi fino a raggiungere la superficie. Così tutti i pesci e gli esseri viventi contenuti in quel liquido finirebbero intrappolati in un solido e morirebbero. All'interno della struttura cristallina del ghiaccio possono accumularsi piccole molecole, per esempio metano o ammoniaca, creando i **clatrati** o **gas idrati**. La presenza di questi gas abbassa la temperatura di solidificazione dell'acqua, permettendole di restare fluida anche a bassissime temperature. I clatrati possono diventare fonti di energia per alcune forme di vita, come descritto più avanti nella Sezione 7.3.

L'acqua è perciò importante perché le sue peculiari proprietà determinano la forma e la stabilità delle strutture biologiche (membrana delle cellule, doppia elica del DNA, forma delle proteine) e il decorso di tutti i fenomeni connessi ad esse. L'interazione tra molecole d'acqua liquida e gruppi idrofilici delle proteine assicura, per esempio, che esse possano mantenere la loro struttura in un ampio intervallo di temperatura e in presenza di un'opportuna concentrazione di sali. Lo stesso vale per il DNA e tante altre bio-macromolecole. L'acqua partecipa in modo dinamico alle trasformazioni cellulari e alle reazioni biochimiche e facilita i moti delle molecole degli sistemi viventi.

Perciò, anche se l'acqua non è una molecola organica, a base di carbonio, essa è essenziale per le nostre forme di vita. Per questa ragione si cerca acqua liquida sugli altri pianeti e satelliti; la sua presenza non implica necessariamente la presenza di vita, ma la sua assenza impedisce che la vita sia attiva in quell'ambiente.

2.2.2. Le proteine

Negli esseri viventi la maggior parte delle macromolecole è fatta da polimeri. Un **polimero** è una catena di una particolare molecola (**monomero**) che si ripete con le sue varianti. Una **proteina** è un polimero fatto da una catena di amminoacidi.

Un **amminoacido** è formato da un atomo di carbonio, detto **carbonio α** , a cui sono legati un gruppo atomico COOH detto **gruppo carbossilico**, un gruppo H₂N, detto **gruppo amminico**, un atomo di idrogeno (H) e un gruppo di atomi detto **gruppo laterale**, che caratterizza l'amminoacido. Per esempio se il gruppo

laterale è fatto da un atomo di idrogeno, l'amminoacido risultante è la glicina; se è fatto da una molecola CH_3 si chiama alanina, e così via. L'estremità carbossilica contiene il gruppo OH (ossidrile), carico negativamente, mentre l'estremità amminica (NH_2) è carica positivamente. Quando due amminoacidi si uniscono, l'ossidrile si lega a un atomo di idrogeno formando acqua (H_2O) mentre C (carbonio) e N (azoto) si legano insieme. Il processo di polimerizzazione degli amminoacidi rilascia acqua. Viceversa, l'acqua può scindere la catena di amminoacidi, nel processo di **idrolisi** che separa il polimero nei diversi monomeri. Si sottolinea di nuovo l'importanza dell'acqua nella costruzione e scissione delle proteine.

I gruppi laterali possono contenere qualsiasi atomo e perciò gli amminoacidi possono essere in un numero enorme. Invece le proteine biologiche, utilizzate dagli esseri viventi sulla terra, sono solo una combinazione di 20 **amminoacidi standard**. I loro gruppi laterali sono costituiti esclusivamente da ossigeno, azoto, carbonio, idrogeno e alcuni amminoacidi come la metionina e la cisteina contengono zolfo.

Tabella 2.2 I venti amminoacidi biologici standard. L rappresenta la loro chiralità.

Acido L aspartico (Asp)	Acido L glutammico (Glu)	L Alanina (Ala)	L Arginina (Arg)
L Asparagina (Asn)	L Cisteina (Cys)	L Fenilalanina (Phe)	Glicina (Gly)
L Glutammina (Gln)	L Isoleucina (Ile)	L Istidina (His)	L Lisina (Lys)
L Leucina (Leu)	L Metionina (Met)	L Prolina (Pro)	L Serina (Ser)
L Tirosina (Tyr)	L Treonina (Thr)	L Triptofano (Trp)	L Valina (Val)

Gli amminoacidi possiedono una struttura nello spazio che ha al centro l'atomo di carbonio e una distribuzione ramificata. La posizione del gruppo laterale nello spazio rispetto agli altri due gruppi (amminico e carbossilico) costituisce una proprietà che viene detta **chiralità**. Immaginiamo di simulare la struttura di un amminoacido con la mano mettendo alluce, indice e medio distesi ad angoli di 90 gradi (per semplicità). Il pollice rappresenta il gruppo H, l'indice il gruppo NH_3 e il medio il gruppo COOH . Tra indice e medio ci sarà il gruppo laterale. Questa configurazione può essere fatta con la mano destra o la sinistra. Un amminoacido con la configurazione appena descritta simile a quella della mano destra viene detto D, quello simile alla configurazione della mano sinistra viene detto L. I gruppi atomici sono legati allo stesso modo ma sono disposti in maniera diversa nello spazio. I due gruppi L e D vengono detti **enantiomeri**, mentre una miscela che contiene i due gruppi in parti uguali è detta **racemica**. Ed ecco una particolarità importante: la configurazione di tutti gli amminoacidi che derivano dalle proteine biologiche è di tipo L. Solo la glicina non è chirale, avendo due atomi di

La vita sulla Terra

idrogeno all'estremità. Queste regole hanno tuttavia delle eccezioni: alcuni batteri utilizzano amminoacidi D per formare sostanze della loro parete cellulare, e sono importanti nel metabolismo anche alcuni amminoacidi non standard, ottenuti per aggiunta di gruppi atomici a parti di amminoacidi standard. Per esempio con l'unione di altre molecole la glicina diventa acido γ -amminobutirrico (GABA), parte della tirosina diventa dopamina e parte del l'istidina diventa istamina (sono tutti neurotrasmettitori utilizzati nel metabolismo degli organismi). Col passare degli anni alcuni amminoacidi L cambiano chiralità e una miscela con un solo enantiomero col tempo tende a diventare racemica. Si vedrà che gli amminoacidi di origine extraterrestre, trovati nelle meteoriti, sono una miscela racemica, il che mostra una lunga permanenza nello spazio o comunque un'origine non biologica.

Le proteine derivate dalla combinazione degli amminoacidi standard si ottengono attraverso un processo chiamato traduzione, cioè la **sintesi proteica**, che coinvolge i tre tipi di RNA (messaggero, ribosomale e di trasporto). Esse possono avere funzioni strutturali (far parte delle membrane, dei tessuti, ecc.) o funzionare come catalizzatori (**enzimi**); altre funzioni sono quelle di trasporto e, negli organismi superiori, quella immunitaria e ormonale.

Nelle forme di vita le proteine svolgono numerosissime funzioni:

- catalisi dei processi metabolici (riproduzione, produzione di energia).
- trasporto di sostanze (pompe).
- sono indispensabili nel metabolismo e nella riproduzione.

Le loro funzioni derivano anche dalla loro struttura nello spazio, che è molto complessa. Le proteine hanno una struttura primaria (sequenza di amminoacidi), una struttura secondaria (disposizione nello spazio), terziaria (ripiegamento), e quaternaria (raggruppamenti).

- La **struttura primaria** delle proteine biologiche è costituita in genere da un numero di amminoacidi (detti **residui**) tra 30 (per esempio l'inibitore III della proteinasi) a 26962 (la Titina). In una proteina composta, per esempio, da 100 residui con 20 amminoacidi si possono fare $20^{100} = 1,27 \times 10^{130}$ combinazioni, così il numero di potenziali proteine biologiche è enorme!
- La **struttura secondaria** delle proteine può assumere la forma detta α elica, come una scala a chiocciola, oppure una struttura detta β foglietto, più planare, o altre strutture ordinate più rare.
- La **struttura terziaria** comprende un ripiegamento della catena nello spazio (per esempio doppia o tripla elica).
- La **struttura quaternaria** delle proteine consiste nell'associazione di più catene polipeptidiche.

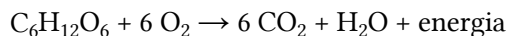
Esistono tuttavia delle **proteine intrinsecamente disordinate** (IDP) mancanti della struttura terziaria la cui funzione appare importante in alcuni processi di riparazione dello stress ossidativo causato dall'esposizione di cellule e organismi all'ambiente spaziale, come discusso nella Sezione 10.3.

Sottolineiamo nuovamente l'importanza dell'acqua liquida dicendo che la struttura funzionale biologica delle proteine viene assunta solo in acqua liquida. Nessun metabolismo come noi lo conosciamo può verificarsi nel ghiaccio o nel vapore.

2.2.3. Gli zuccheri

Gli **zuccheri** sono molecole che svolgono una funzione essenziale per gli esseri viventi. Gli zuccheri più semplici, i **monosaccaridi**, sono composti da 3 a 7 gruppi atomici (CH_2O). Il glucosio, per esempio, è composto da sei gruppi e ha formula $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$. La molecola può avere una struttura lineare o ciclica.

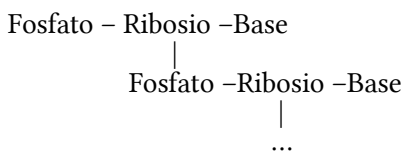
Dall'unione di più monosaccaridi si ottengono molecole anche molto lunghe, dette **polisaccaridi**. Il glucosio è utilizzato da molte cellule a scopo nutritivo, e la sua ossidazione produce anidride carbonica, acqua ed energia secondo la reazione:



Oltre all'accumulo di energia, gli zuccheri hanno un ruolo anche nelle strutture extracellulari, come la cellulosa, o legandosi alle proteine (glicoproteine) e ai lipidi (glicolipidi). Nell'RNA essi sono presenti sotto forma di ribosio e nel DNA come desossiribosio, che differisce dal precedente per la mancanza di un atomo di ossigeno. Entrambi hanno un anello di 5 atomi di carbonio e sono detti **pentosi**. Anche gli zuccheri degli acidi nucleici hanno una chiralità particolare, che deve essere D (opposta a quella degli amminoacidi biologici)

2.2.4. Gli acidi nucleici

Gli **acidi nucleici** sono grandi molecole che conservano e trasportano l'informazione genetica. Essi sono polimeri come le proteine, ma sono formati da una catena di **nucleotidi**. Un nucleotide è composto da una base azotata legata a uno zucchero e a un gruppo fosfato. Se lo zucchero è il ribosio, l'acido nucleico è l'**RNA** (acido ribonucleico), mentre se manca di un atomo di ossigeno lo zucchero è il desossiribosio e l'acido nucleico è il **DNA** (acido deossiribonucleico). Essi si legano a loro volta all'acido fosforico formando un'ossatura che si dispone a spirale come un cavatappi. La struttura è:



La vita sulla Terra

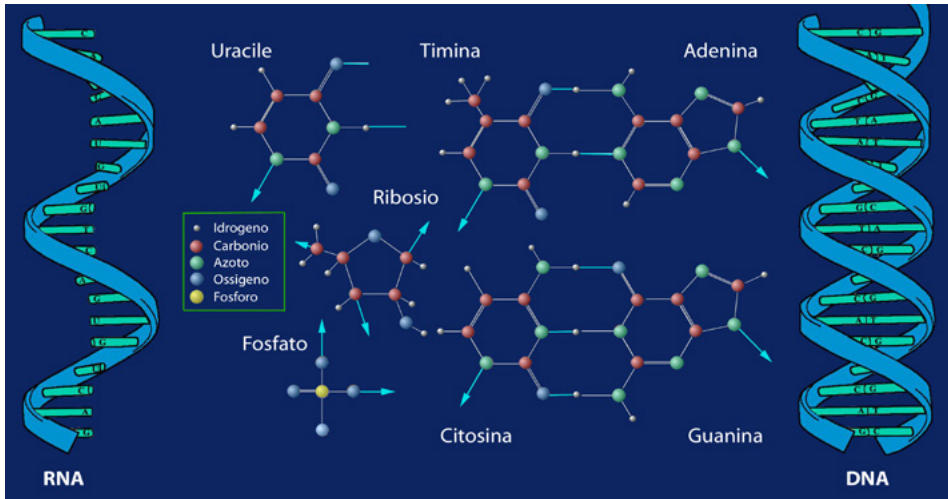


Figura 2.1 – La struttura dell’RNA (a sinistra) e del DNA (a destra), con le basi azotate disegnate come “gradini” di una scala a chiocciola e l’ossatura zucchero-fosfato disegnata come una striscia continua. Al centro sono disegnate le cinque basi azotate, lo zucchero (glucosio) e il fosfato (Immagine: G. Galletta).

Le basi azotate sono diverse lungo la struttura dell’acido nucleico e quelle biologiche sono 5. Tre di esse sono dette **pirimidine**: la **Timina** (T), la **Citosina** (C) e l’**Uracile** (U). Sono formate da un anello a 6 atomi di carbonio legato a vari gruppi. La timina e la citosina sono presenti nel DNA, mentre l’uracile sostituisce la timina nell’RNA. Le altre due basi azotate sono dette **purine**: l’**Adenina**(A) e la **Guanina**(G). Esse sono formate da un anello a 6 atomi di carbonio legato ad uno a 5 atomi, con vari gruppi laterali. Nel DNA le due ossature zucchero-fosfato formano una doppia spirale, come una scala a chiocciola in cui i nucleotidi fanno la parte degli scalini, legati a due a due. L’unione di due filamenti con l’ossatura di desossiribosio forma una struttura più “robusta” dell’RNA. Una rottura accidentale della sequenza delle basi può essere riparata inserendo i nucleotidi mancanti. Infatti due filamenti sono complementari: l’adenina si lega con la timina (o all’uracile nella duplicazione) mentre la citosina con la guanina. La combinazione è A-T, C-G.

Un acido nucleico con N nucleotidi può formare 4^N sequenze diverse. Una sequenza di soli 10 nucleotidi può formare più di un milione di combinazioni. Il DNA di semplice batterio può avere un numero immenso di combinazioni. Questo è molto importante: una sequenza delle basi non regolare permette di trasmettere un’informazione che può essere copiata su altre molecole, e in questo senso è “speciale” rispetto alle altre. Supponendo di avere 4 monomeri indicati con le lettere A,C,G,S. Esempi di sequenze polimeriche che non contengono informazione

sono AAAAAAAAA o SSSSSSS. I polimeri come questi, formati dalla stessa molecola (**omopolimeri**), non trasmettono informazione. Anche i polimeri formati da molecole diverse che però si ripetono (**eteropolimeri regolari**) non trasmettono informazione. Nel nostro esempio, la sequenza SAOCSAOC ripete la stessa combinazione senza varianti. Invece una sequenza non periodica delle stesse lettere in un polimero (**eteropolimeri aperiodici**) permette di comunicare un'informazione. Nel nostro esempio anche con quattro lettere si possono formare frasi con un significato, anche se astratto, per esempio un invito a non uscire durante un'epidemia: SACOSAACASAOCAOS (sa cosa? A casa o caos). Nella duplicazione, facciamo l'ipotesi che le 4 lettere dell'esempio si leghino come S-C, A-O. La sequenza ACASAOCAOS si lega con la sequenza complementare OSOCO-ASOAC. Se le due sequenze si distaccano, la sequenza copiata si lega con altre lettere complementari ricreando la sequenza ACASAOCAOS, che è il messaggio originale. Un meccanismo chimico, non intelligente, ha trasmesso un messaggio. Noi abbiamo usato lettere diverse per le basi, per ottenere frasi comprensibili in lingua italiana. Nel caso reale della duplicazione del DNA, con basi A, C, T, G, le due sequenze si separano grazie a un enzima (l'**elicasi**) e si legano alle basi complementari formando un nuovo DNA identico. Questo processo è regolato da un altro enzima, la **DNA polimerasi**.

La trascrizione del DNA dà origine a diversi tipi di filamenti di RNA che rendono possibile la sintesi proteica. La sequenza di tre basi, dette triplette, una volta trascritta per complementarità nell'RNA messaggero, riconosce un amminoacido specifico. Nella Tabella 2.3 ogni tripletta del DNA originario è affiancata all'amminoacido che verrà selezionato dalla tripletta complementare dell'RNA. La presenza di una codifica precisa tripletta-amminoacido, detta **codice genetico**, è un'altra particolarità della vita terrestre. Tuttavia, mentre le combinazioni possibili di 4 basi in diverse triplette sono $4^3 = 64$, gli amminoacidi biologici sono solo 20 + 1 di stop (ridondanza del codice genetico). Durante l'assemblaggio delle proteine ogni tripletta di basi azotate "aggancia" un particolare amminoacido. La tripletta successiva aggancia un altro amminoacido, in base al codice, e lo aggancia al precedente. Così, amminoacido dopo amminoacido, viene costruita la catena di una proteina. Una tripletta fa da "inizio" di costruzione della catena, e varia in base alla cellula o all'organello. La sintesi proteica con la corrispondenza tra triplette e amminoacidi avviene a livello dei ribosomi. Alcune triplette invece, dette di "stop", indicano all'acido nucleico che la catena deve essere rilasciata, liberando la proteina appena costruita.

Gli acidi nucleici nel loro metabolismo costruiscono proteine che serviranno alla cellula o all'organismo a cui appartengono. Inoltre nella duplicazione degli orga-

La vita sulla Terra

Tabella 2.3 - La codifica degli amminoacidi partendo dalle triplette di basi azotate del DNA secondo il codice genetico.

1 ^a base	2 ^a base								3 ^a base
	T		C		A		G		
T	TTT	Phe	TCT	Ser Serina	TAT	Tyr	TGT	Cys	T
	TTC	Fenilalanina	TCC		TAC	Tirosina	TGC	Cisteina	C
	TTA		TCA		TAA	Stop	TGA	Stop	A
	TTG		TCG		TAG		TGG	Trp Tryptofano	G
C	CTT	Leu	CCT	Pro Prolina	CAT	His	CGT	Arg Arginina	T
	CTC	Leucina	CCC		CAC	Istidina	CGC		C
	CTA		CCA		CAA	Gln	CGA		A
	CTG		CCG		CAG	Glutammina	CGG		G
A	ATT	Ile	ACT	Thr Treonina	AAT	Asn	AGT	Ser	T
	ATC	Isoleucina	ACC		AAC	Asparagina	AGC	Serina	C
	ATA		ACA		AAA	Lys	AGA	Arg	A
	ATG	Met Metionina	ACG		AAG	Lisina	AGG	Arginina	G
G	GTT	Val Valina	GCT	Ala Alanina	GAT	Asp	GGT	Gly Glicina	T
	GTC		GCC		GAC	Acido aspartico	GGC		C
	GTA		GCA		GAA	Glu	GGA		A
	GTG		GCG		GAG	Acido glutammico	GGG		G

nismi, alcuni settori del DNA (geni) trasmettono i caratteri esterni dell'individuo che viene generato, come il colore degli occhi, dei capelli o della pelle. Negli umani la catena comprende circa 3 miliardi di basi e l'informazione trasmessa è molto complessa. Non tutto il DNA però codifica; solo alcune zone denominate **esoni**. Nel genoma umano solo il 2,7% codifica per le proteine.

Non entriamo nel dettaglio, rimandando anche qui ai testi didattici di Biologia per maggiori e più precise descrizioni del metabolismo cellulare. Qui ci preme sottolineare alcune cose rilevanti per l'Astrobiologia: negli acidi nucleici l'accoppiamento di basi permette di fare una copia del "messaggio" che contengono e di riprodurre copie di sé stessi. Un DNA si replica attraverso vari passaggi creando un altro DNA identico. Una sequenza di basi azotate contiene in sé, tramite il codice genetico, le istruzioni per costruire particolari proteine o per indicare se

l'individuo che nascerà sarà una pianta, un animale o altro, e quali caratteristiche avrà. Il codice appare diffuso in tutti gli esseri viventi con poche eccezioni, come nei mitocondri, che usano una sua variante, e in altri rari casi.

2.2.5. I lipidi

I **lipidi** sono molecole che comprendono diverse categorie, come i grassi, gli oli non polari e gli steroidi. Un particolare tipo di lipidi, i fosfolipidi, sono importanti per la vita terrestre. Questi ultimi sono molecole **anfipatiche**, caratterizzate da una parte **lipofila** o **idrofobica** (che respinge l'acqua) e una **idrofila** (che tende ad associarsi a essa). Una volta immersi in acqua, essi tendono ad avvicinare le porzioni lipofile e a mettere in contatto con l'acqua all'esterno le porzioni idrofile. Formano così le **micelle**, sferette o bolle delimitate da uno strato lipidico. Due strati di molecole lipidiche possono anche mettere in contatto le porzioni lipofile portando verso l'esterno, da entrambe le facce, le estremità idrofile. In questo caso si parla di strutture, o vescicole, a doppio strato, che sono alla base delle pareti cellulari. Le membrane lipidiche isolano le cellule dall'acqua, che potrebbe dissociarne il citoplasma e gli acidi nucleici per idrolisi, ma lasciano aperti i canali e le pompe proteiche che ne regolano la permeabilità. I lipidi non formano polimeri, ma si associano affiancandosi e come gli omopolimeri non contengono né trasmettono informazione.

2.2.6. Proprietà molecolari dei viventi

Acqua, amminoacidi, acidi nucleici e lipidi sono molecole essenziali per le forme di vita terrestri. Tutte sono composte solamente da sei atomi: fosforo (P), ossigeno (O), azoto (N), carbonio (C), idrogeno (H) e zolfo (S). Per questo gli elementi della vita sono denominati con l'acronimo PONCHS.

Un aspetto che appare evidente è che nello scorrere del tempo la vita è un fenomeno che trascende il singolo individuo ma riguarda un'intera **specie vivente**, composta da un insieme di individui che sviluppano alcune funzioni:

- assorbimento e produzione di materia ed energia (metabolismo)
- distinzione dall'ambiente esterno (individualità)
- riproduzione (replicazione con varianti)

a livello biochimico, queste funzioni sono svolte dalla cooperazione di tre tipi di molecole:

- le proteine (funzione metabolica e catalitica)
- i lipidi (funzione di isolamento)
- gli acidi nucleici (funzione informativa)

Come vedremo, a queste funzioni individuali si aggiunge il meccanismo di sele-

La vita sulla Terra

zione naturale enunciato da Darwin.

2.3 Riproduzione e replicazione

Sembra chiaro che una forma di vita che popoli un pianeta debba essere in grado di riprodursi, generando altri esseri simili. In questo modo bilancia la perdita dovuta alla morte dei singoli individui e continua a esistere nel suo insieme. Tuttavia, la riproduzione di un essere vivente non è semplicemente **replicazione**, cioè produzione di una copia esatta di se stessi, come potrebbe farlo una macchina che costruisce altre macchine. Nella **riproduzione** una forma di vita trasmette a un'altra le informazioni contenute nella sua struttura attraverso un codice che, nel caso della vita terrestre, coincide con il codice genetico. Per chiarire questo punto, utilizziamo la definizione data da Dyson pensando che gli organismi come i computer siano costituiti da un *hardware*, in grado di eseguire le istruzioni, e da un *software*, che dà le istruzioni su cosa fare. Il codice genetico rappresenterebbe il software con cui gli esseri viventi trasmettono le istruzioni per generare nuovi esseri simili a loro.

Tuttavia, se la vita su un pianeta, considerata come un insieme di specie, ha la necessità di riprodursi per non estinguersi, ricordiamo che esistono organismi viventi che sono completamente sterili, ovvero non possono trasmettere il loro codice genetico a una propria discendenza. Tra gli esempi possibili citiamo i muli, i bardotti e le api operaie, animali sterili di cui parleremo dopo. A livello microscopico anche le cellule senza nucleo, come gli eritrociti o globuli rossi, vengono prodotte da altre cellule e non possono riprodursi. Esse sono sicuramente vive, ma non hanno in sé la capacità riproduttiva. Viceversa, alcune strutture organiche sono in grado di trasmettere il proprio codice genetico, ma solo con il concorso di forme di vita esterne: i virus e i virusoidi. A un livello ancora meno definibile si trovano i prioni. Per diversi di essi l'idea di *vivente* potrebbe essere inadatta a descrivere la loro attività ed è spesso oggetto di discussione. Ricordiamo però il punto di vista dell'Astrobiologia: alcune di queste forme di vita (vere o presunte) forse non sono *vive* come molti intendono questa parola, ma possono essere egualmente contaminanti in caso di esplorazione umana di ambienti extraterrestri o di estrazione di campioni da riportare sulla Terra. Per questa ragione vale la pena di analizzare il modo in cui le forme di vita si riproducono.

La riproduzione passa attraverso la duplicazione del DNA o RNA. Nella replicazione della cellula per divisione (**mitosi**) il DNA si separa e la cellula si divide in due. Negli eucarioti i filamenti del DNA raccolti nella cromatina si separano in singoli cromosomi. Questi successivamente si allineano e si concentrano in una zona centrale della cellula; poi si dividono a metà e la cellula inizia ad al-

lungarsi e strozzarsi al centro separandosi in due cellule identiche. Con questo meccanismo la cellula madre e la figlia sono indistinguibili. La duplicazione del DNA e quindi delle cellule sembra essere eterna: essi possono duplicarsi infinite volte. Ma non è così. La parte esterna dei cromosomi, i **telomeri**, è protetta da una sequenza ripetuta di nucleotidi e da proteine. Negli umani la sequenza dei telomeri è composta da TTAGGG ripetuta, per un totale da 3000 a 20000 basi. Questa sequenza durante la replicazione non viene totalmente duplicata, lasciando un vuoto (*gap*), che viene ricostruito attraverso l'enzima **telomerasi**. A ogni duplicazione la parte terminale dei telomeri si accorcia, e alla fine la cellula non riesce più a duplicarsi per la differente lunghezza dei cromosomi ed entra in una fase che viene detta **apoptosi** (morte altruista o programmata). La cellula muore e in un organismo il suo materiale viene riutilizzato. Il meccanismo salvaguarda il numero di cellule, senza farle crescere in numero eccessivo, come nei tumori. Un'apoptosi eccessivamente attiva è invece dannosa, producendo malattie come quelle neurodegenerative. Perciò nella Natura esiste come un "orologio" biologico che regola la quantità di cellule negli organismi.

Alcune specie di protozoi e funghi per riprodursi utilizzano una divisione detta **gemmazione**. In questo processo sulla cellula si forma una piccola protuberanza laterale, detta gemma, che poi si stacca; diversamente dalla scissione la cellula genitrice resta invariata e la gemma è in genere più piccola di essa, prima di accrescersi.

Negli organismi pluricellulari la riproduzione avviene attraverso cellule dette **gameti**, o cellule sessuali, dotate di singoli cromosomi anziché di coppie di essi (**aploidi**). Da una cellula madre si producono quattro cellule aploidi figlie. Questa riproduzione è detta **meiosi**. Come è facile comprendere, le cellule con numeri pari di cromosomi generano gameti con lo stesso numero di cromosomi ciascuna. Per molte specie animali i gameti maschili sono detti **spermatozoi** e quelli femminili **ovuli**. I gameti dei due sessi si fondono nel processo di **fecondazione**, generando una nuova cellula in cui il corredo cromosomico viene ricostruito nel numero originario di coppie. Questo meccanismo permette di avere delle varianti nella discendenza, con caratteri del padre e della madre mescolati insieme. Oltre ad essi, nella riproduzione si verifica il **crossing-over**: una parte del cromosoma di un genitore si incrocia con una parte del cromosoma dell'altro genitore, permettono una maggiore varietà di caratteri individuali.

I Procarioti hanno un solo cromosoma, mentre ogni specie diversa di eucarioti ha N coppie di cromosomi. Per esempio l'uomo ne ha 46, il cavallo 64 e l'asino 62. Animali molto piccoli com'è la zanzara hanno 6 cromosomi, mentre nelle piante si può andare da pochi cromosomi come i 14 del riso agli 80 della canna da

La vita sulla Terra

zucchero. Il numero di cromosomi non rappresenta un livello maggiore o minore di specializzazione dell'organismo: il pesce rosso per esempio ha 200 cromosomi mentre il gorilla e lo scimpanzé ne hanno 48, un numero simile agli umani. Poiché il processo di riproduzione per gameti richiede la fecondazione con un numero di cromosomi che raddoppia nella nuova cellula, esso avviene con successo solo tra specie che hanno un numero simile di cromosomi. Esempi di incroci tra specie diverse sono il mulo, incrocio tra un asino e una cavalla, e il bardotto, incrocio tra un cavallo e un'asina. Entrambi hanno 63 cromosomi perché derivano da due specie che ne hanno 64 (il cavallo) e 62 (asino). Nella riproduzione un cromosoma non può accoppiarsi all'altro di sesso opposto e risultato è un numero dispari. Tuttavia queste specie ibride non possono produrre gameti con un numero uguale di cromosomi. Il risultato è che non è possibile la riproduzione all'interno di queste specie e che esse sono sterili. La sterilità non è solo patrimonio di questi equini; essa è presente all'interno di singoli individui di altre specie, quali le api o le formiche, in cui solo la "regina" può generare altri individui della sua specie. Dunque sebbene la riproduzione sia un requisito essenziale per prolungare la vita di una specie vivente, essa non è un requisito essenziale per definire "vivente" un individuo.

2.4 Varianti genetiche e mutazioni

A questo punto è utile introdurre la differenza tra **geni** ed **alleli**: i primi riguardano una specifica funzione codificata da una sequenza di nucleotidi, i secondi sono le possibili varianti in cui i geni possono presentarsi in un cromosoma, per cui in una cellula diploide i due cromosomi omologhi hanno gli stessi geni, ma possono presentare alleli diversi. Per esempio alleli che generano piante con fiori rossi o bianchi. Uno dei due alleli può (ma non necessariamente) essere dominante. Nel caso di forme di vita che si riproducono per meiosi, le varianti possono derivare semplicemente da una mescolanza di caratteri presenti nell'organismo padre e in quello madre. Per esempio, negli esseri umani un padre con gli occhi chiari può cederli ai figli mentre la madre può trasmettere loro il colore scuro dei capelli. I figli nati attraverso la riproduzione sessuata dunque costituiscono una variante genetica dei caratteri dei loro genitori. Il processo di *crossing-over* permette inoltre una maggiore varietà di individui, producendo cellule figlie con combinazioni diverse di sequenze di geni. Tuttavia questo processo non è completamente casuale: nel *crossing-over* geni vicini tra loro nello stesso cromosoma restano legati più strettamente di quelli situati più lontano e questo fatto è responsabile della frequenza non perfettamente casuale di combinazioni genetiche in una popolazione, per cui alcuni caratteri distintivi di un individuo si trasmettono insieme.

All'epoca di Darwin non era ancora noto il meccanismo di trasmissione dei ca-

ratteri genetici ed egli pensava che vi fosse qualcosa nel sangue che permettesse questa trasmissione dai genitori ai figli. Eppure sette anni dopo l'enunciazione della teoria darwiniana il monaco austriaco Gregor Mendel scopriva il concetto di gene come unità ereditaria, e tre anni dopo il medico tedesco Friedrich Miescher isolava in laboratorio il DNA. Il lavoro di Mendel non fu però adeguatamente reso noto ai suoi contemporanei (Darwin lo ignorava) e restò pressoché sconosciuto per 50 anni, fino al ventesimo secolo. Provando a incrociare delle piante di pisello, Mendel si accorse che il colore dei fiori e la rugosità dei semi aveva dei caratteri che predominavano su altri, denominati **caratteri dominanti** e **caratteri recessivi**. Nei suoi esperimenti, il viola era dominante e il bianco era recessivo. Quando una pianta con un carattere dominante ed una con carattere recessivo si incrociavano o si riproducevano, il dominante aveva una maggiore probabilità di affermarsi. Come detto, i diversi alleli tramandano i caratteri dei vari individui dagli antenati ai discendenti. Nella prole che derivi da un uomo bruno e una donna bionda i capelli e gli occhi neri possono essere dominanti sui capelli biondi e gli occhi azzurri. Possono nascere sia figli biondi sia bruni, ma a lungo andare il carattere dominante si afferma in un numero maggiore di discendenti. In alcune specie, come i cani giapponesi Shiba-Inu, gli individui con un pelo molto chiaro, quasi bianco, hanno caratteri dominanti e gli allevatori ne vietano la riproduzione perché nel corso degli anni finirebbe per dominare su tutti gli altri tipi di colore del pelo. Per secoli, gli allevatori e i giardinieri hanno selezionato per la riproduzione gli individui che presentavano caratteristiche che erano per loro di un certo interesse, creando così una selezione artificiale dei caratteri genetici. Torneremo su questo argomento parlando della selezione naturale, indicando i caratteri genetici come **genotipo** mentre la loro espressione esterna quali la morfologia o la fisiologia del singolo individuo prodotta da esso viene chiamata **fenotipo**.

Se i caratteri genetici si trasmettono con la duplicazione del DNA o dell'RNA, la sequenza riprodotta può essere anche casualmente diversa dalla precedente; per esempio al posto di una adenina si può inserire una timina. Questa diversa sequenza delle basi, secondo il codice genetico (Tabella 2.3) si lega a un altro amminoacido e produce una proteina diversa. Questo fenomeno si chiama **mutazione spontanea**. Alcune malattie genetiche sono dovute a una mutazione in cui una base è stata sostituita da un'altra. Tuttavia la ridondanza del codice permette di creare meno varianti, perché in molti casi più triplette con una base diversa codificano lo stesso amminoacido. La mutazione spontanea ha una percentuale bassissima, che varia da specie a specie, e cambia in parti diverse del genoma. Negli esseri umani il tasso di mutazioni è stato stimato intorno a 10^{-8} , ovvero 1 ogni 100 milioni di duplicazioni, ma già nei mitocondri esso sale a 10^{-5} , mille volte più frequente. I virus a DNA hanno mutazioni inferiori a 10^{-6} , mentre i virus a

La vita sulla Terra

RNA hanno tassi di mutazione molto veloci, tra 10^{-3} e 10^{-5} per ogni coppia di basi azotate e per ogni generazione. Questo significa che, se ci vogliono in media 100 milioni di duplicazioni per far sorgere una mutazione in una cellula umana, per i virus a RNA possono bastare 1000 riproduzioni per avere un mutante. In sintesi, forme di vita che si riproducono più lentamente hanno un numero minore di duplicazioni e mutano più lentamente nel corso dei millenni; forme di vita invece che si riproducono velocemente e in gran numero, come i virus a RNA possono far apparire un numero altissimo di mutazioni.

Le mutazioni possono essere favorite da agenti esterni, di natura chimica (**so- stanze mutagene**) o dal passaggio di particelle atomiche che spezzano gli acidi nucleici o le proteine, i quali poi non riescono a ricostruire la parte mancante. Queste particelle possono essere generate da elementi radioattivi ed essere nuclei di elio (particelle α), elettroni (particelle β^-). Anche i fotoni molto energetici (UV, X, raggi γ) possono alterare la struttura del DNA. Questa radioattività naturale delle rocce può essere maggiore o minore a seconda del luogo in cui si vive. Oppure possono essere particelle espulse ad alta velocità nella Galassia dalle esplosioni di supernovae (si veda la Sezione 3.3), che entrano continuamente nell'atmosfera generando a loro volta altre particelle, tutte in grado di passare attraverso il nostro corpo. Queste particelle sono indicate genericamente come **raggi cosmici** e sono composte da nuclei atomici e neutroni. In genere elettroni, **positroni** (elettroni positivi) e ioni presenti nello spazio hanno maggiore difficoltà ad attraversare l'atmosfera a causa delle interazioni elettriche con le molecole d'aria. In questo zoo variegato di particelle, l'effetto finale è sempre quello di alzare la probabilità di generare mutazioni. Noi siamo continuamente attraversati dai raggi cosmici, che sono in grado di penetrare nella roccia per centinaia di metri. La presenza di stelle massicce nella Galassia che esplodono come supernovae potrebbe essere quindi un altro motore che ha favorito le mutazioni sin dalla nascita del nostro pianeta. Questo meccanismo sarebbe sempre casuale, perché la traiettoria delle particelle emesse milioni di anni fa da una supernova e quella delle particelle della radioattività naturale della Terra non hanno una direzione preferenziale e l'incontro con un DNA è assolutamente fortuito.

Tuttavia, gli acidi nucleici sono spesso in grado di ricostruire la sequenza mancante "riparando" il guasto, come in un puzzle di cui mancano alcuni pezzi, ma in cui si riesce ugualmente a intuire la porzione di immagine assente. Questo appare molto più facile in una sequenza doppia di nucleotidi, come il DNA, in cui ogni base deve essere accoppiata a un'altra, adenina con timina e citosina con guanina. Se una parte di filamento viene distrutta da una particella, vi è sempre la possibilità di conoscere la sequenza complementare e di aggiustarla. Senza en-

trare nel meccanismo che permette a molte cellule di riparare i danni alla propria informazione genetica, ricordiamo che a fenomeni come l'invecchiamento può concorrere una maggiore difficoltà delle cellule a trascrivere correttamente l'informazione e a correggere gli errori. La vita di un organismo si basa sull'accordo di molte funzioni quali l'alimentazione, la produzione, il trasporto di energia o la respirazione. Le sue cellule vengono continuamente rinnovate in tempi più o meno lunghi. Così durante l'avvicendamento di nuove cellule la perdita di informazione iniziale può portare alla disgregazione dell'organismo, con la sua morte. Anche nel caso dei tumori, la loro generazione ed evoluzione può essere indotta da mutazioni, ma potrebbe anche dipendere da guasti nel meccanismo di riparazione delle cellule o dalla sua inibizione. In questo campo, la piena comprensione di alcuni tumori è ancora da raggiungere.

Sulla base di quanto esposto, sia la meiosi sia la duplicazione del DNA sono meccanismi casuali per le varianti genetiche. Ricordiamo però che non tutti i caratteri di un essere vivente dipendono direttamente dai geni, perché alcuni di essi traggono origine dall'interazione di un gran numero di geni tra loro o dall'interazione con l'ambiente. Per questa ragione alcune caratteristiche come la coordinazione dei movimenti o l'intelligenza umana presentano amplissime variazioni. In altri termini, la trasmissione dei caratteri non può essere vista semplicemente come una mescolanza di numerini in una stringa matematica più o meno probabile. Quando si arriva a organismi complessi e più organizzati, le variazioni sia per mutazione sia per variabilità genetica si sommano e assumono un livello funzionale diverso. Pensando allo sviluppo di intelligenze aliene, trattato nella Sezione 11.2, non è possibile seguire regole statistiche, poiché caratteristiche come il genio e il talento che permettono di fare spesso balzi in avanti a tutta la società in cui l'individuo vive, non appaiono essere ereditarie né casuali, ma il prodotto anche di fattori sociali. Appartenendo a famiglie di musicisti, Wolfgang Amadeus Mozart fu un grande talento sin da bambino, come sembra lo fossero Leonardo e Archimede, sulle cui famiglie naturalmente si hanno scarsissime notizie. Ci è difficile tuttavia pensare che le loro capacità fossero derivate solo da un interruttore genetico o solo da una particolare educazione. Ci preme solo notare che ancora molto resta da fare per comprendere la natura della vita e dell'intelligenza.

Al di là di queste considerazioni, approfondendo il ragionamento sulle mutazioni genetiche possiamo pensare che la variazione casuale nella trasmissione dei caratteri rappresenti il "rumore di fondo" sull'informazione che viene trasmessa di cellula in cellula, da un organismo a un altro, di generazione in generazione. Questo rumore fornisce un numero alto di varianti e potrebbe portare a generare specie diverse non solo per il colore o per altri piccoli caratteri, ma per caratteri-

La vita sulla Terra

stiche più rilevanti. Ogni carattere acquisito per mutazione, una volta trasmesso a un nuovo individuo, viene ereditato dalla progenie e in buona parte diventa immutabile. Così il verificarsi di successive mutazioni si trasmette nel tempo.

La velocità di mutazione per le singole specie può essere usata come un “orologio molecolare”, prendendo il numero di differenze tra varie specie e stabilendo la loro affinità indietro nel tempo, quando si sono separate da un progenitore comune. Non tutte le mutazioni però determinano una variazione significativa negli individui di una specie, e la maggior parte sono neutre. In ogni caso, da mutazioni piccole ma progressive e in tempi molto lunghi, nei 4,3 Ga d'età della Terra possono essersi prodotte numerosissime forme di vita diverse, alcune delle quali si sono affermate sul pianeta costituendo nuove popolazioni viventi. In questo modo i biologi hanno ricostruito un “albero genealogico” della vita, confrontando le sequenze genetiche degli esseri viventi e stabilendo affinità tra loro, come descritto nella Sezione 2.6.

2.5 La selezione naturale

Il “rumore di fondo” dovuto alle mutazioni non è rimasto costante nel tempo. Il numero di specie può aumentare con la comparsa di nuove oppure ridursi quando qualcuna di esse si estingue. Sul germogliare di nuove specie, di cui oggi si ritrovano solo i fossili, si è innestato un altro meccanismo che ha permesso ad alcune di svilupparsi mentre ne ha sopresse numerose altre. Un rumore che era probabilmente molto più elevato in passato e che ha permesso, in un tempo relativamente breve, di far popolare l'intero pianeta da una grande varietà di forme di vita, integrate oggi in un insieme vivente detto **Biosfera**.

Nella seconda metà del '700 viaggi, spedizioni scientifiche sistematiche ed esplorazioni, anche se motivate principalmente da scopi commerciali, avevano dato un forte impulso alla ricerca in campo biologico e fatto nascere la Paleontologia e la Geologia. Gli studi di Charles Lyell e George Cuvier avevano rivelato strati geologici formati in tempi successivi, che incorporavano i resti di specie animali e vegetali ormai scomparse da tempo. I crani di dinosauri, creduti in passato «teschi di dragoni», venivano interpretati come resti di animali estinti. Si faceva strada l'idea che il passato della Terra fosse stato diverso dal presente, che ci fosse stata un'evoluzione biologica. Secondo la teoria di Lamarck la vita poteva sorgere spontaneamente dalla materia inanimata, ma organismi diversi potevano provenire da antenati comuni. Era l'ambiente che guidava il cambiamento in un'unica fase: gli organismi «percepiscono» un mutamento ambientale e rispondono generando la «giusta variazione», per esempio usando o no una parte del corpo, o una funzione fisiologica, per rispondere alle necessità ambientali. L'uso il disuso

di organi altererebbe la loro morfologia, come accade per l'atrofia dei muscoli che non vengono utilizzati. Per Lamarck però tale variazione sarebbe trasmessa alla generazione successiva come eredità dei caratteri acquisiti. Nell'esempio classico che viene riportato della teoria di Lamarck le giraffe, nate tutte basse e con un collo corto, per necessità di raggiungere le foglie più alte degli alberi avrebbero pian piano sviluppato un collo sempre più lungo, fino a diventare quelle attuali. Sarebbe la necessità di cibo a guidare l'evoluzione e la sopravvivenza.

In questo contesto nasce la teoria "sociologica" di Thomas Malthus, secondo cui la popolazione umana cresce in maniera esponenziale, più in fretta di quanto crescano le risorse necessarie alla loro sopravvivenza, fino ad una crisi di risorse che determina una contrazione della crescita della popolazione. Questo meccanismo viene denominato lotta per l'esistenza. Ritroveremo concetti simili quando parleremo della stasi tecnologica di una civiltà, nella Sezione 11.5.

Darwin riprende questa idea, comprendendo che, oltre ai predatori o alle malattie, la limitatezza delle risorse quali cibo acqua o territorio porta a una soppressione di individui agendo come un forte selettore naturale. Se una specie vivente tende a riprodursi con un processo di crescita esponenziale, con il conseguente esaurimento del cibo disponibile, il numero dei suoi individui a quel punto inizia a decrescere per l'aumento della mortalità conseguente alla carestia. Ma in una popolazione con individui dalle caratteristiche non omogenee non tutti moriranno allo stesso ritmo. Quelli che possiedono caratteristiche più adatte al nuovo ambiente sopravvivono in maggior numero, generando così una popolazione *con caratteristiche medie* diverse da quelle della popolazione originaria. Si noti che la sopravvivenza non privilegia necessariamente il più forte o il "migliore"; l'evoluzione di Darwin non è finalizzata a valori etici o morali e non sempre introduce caratteristiche che siano vantaggiose all'individuo. L'idea della sopravvivenza del "più adatto" fu invece introdotta dal filosofo e sociologo britannico Herbert Spencer, ma non appartiene all'interpretazione originale dell'evoluzione. Il fatto che l'evoluzione non sia sempre vantaggiosa è discusso da Konrad Lorenz a proposito della competizione intraspecifica, cioè quella che avviene tra componenti della stessa specie. Il colore sgargiante del piumaggio di alcuni uccelli per esempio, prodotto allo scopo di attrarre un elemento dell'altro sesso, li rende più identificabili ai predatori, il che non è affatto un vantaggio. L'evoluzione ha privilegiato perciò alcuni aspetti a sfavore di altri. Possiamo anche pensare che negli esseri umani attuali l'acquisizione di particolari capacità, quali quella di costruire attrezzi per diminuire l'attività fisica, ci abbia reso più vulnerabili al caldo, al freddo o alla stanchezza di quanto lo fossero i nostri antenati. L'uso eccessivo di antibiotici e disinfettanti ha comportato una minore resistenza alle infezioni batteriche e ha

La vita sulla Terra

viceversa selezionato batteri e parassiti più resistenti.

Se nello stesso ambiente si sviluppano specie diverse, esse interagiscono con esso e tra di loro. Se alcune caratteristiche del luogo in cui una specie vive diventano dannose per la sua riproduzione o per la sua sopravvivenza, i suoi individui sono costretti a spostarsi in una zona diversa del pianeta per non morire. Per esempio, una specie animale può iniziare a cibarsi di altre piante o di altri animali fino a causarne la scomparsa ed è costretta a migrare oppure a scomparire a sua volta per mancanza di cibo. Possiamo affermare che in generale gli esseri viventi modificano irreversibilmente l'ambiente in cui vivono e sono a loro volta modificati da esso. Queste osservazioni e anni di studio sull'allevamento degli animali e sulle specie presenti in natura fecero concepire a Charles Darwin e, in maniera indipendente, ad Alfred Wallace intorno alla metà dell'Ottocento, il concetto di selezione naturale. Wallace evitò di applicare questo concetto anche agli esseri umani, evitando molte polemiche che non risparmiarono Darwin.

L'evoluzione per selezione naturale si basa su tre principi:

- il principio della **variabilità**: gli individui differiscono per morfologia, fisiologia, comportamento. La variazione creata per mutazione ma soprattutto per combinazioni genetiche crea nuovi genotipi che producono, tramite lo sviluppo degli organismi, i tratti fenotipici su cui agisce la selezione.
- il principio dell'**ereditarietà**: la variazione suddetta è geneticamente trasmissibile, per cui la prole assomiglia di più ai genitori che ad altri individui della popolazione.
- il principio della **selezione naturale**: tra le diverse varianti alcune producono più discendenti a breve o a lungo termine, cioè nelle generazioni future.

La varietà dei fenotipi trasmessi dal genoma, come per esempio i capelli biondi o neri, gli occhi azzurri o castani, la pelle bianca o nera, è una strategia importantissima per la sopravvivenza di una specie in un ambiente che cambia. Infatti alcuni caratteri possono permettere la sopravvivenza di specie in grado di adattarsi all'ambiente, mentre le altre vanno incontro all'estinzione. Secondo la teoria Darwiniana, per riprendere l'esempio delle giraffe di Lamarck, nascono invece giraffe con colli di diversa lunghezza. Ma quelle col collo più corto hanno un minore accesso alle foglie degli alberi alti e finiscono per morire per mancanza di alimentazione. Così il carattere del collo corto non si trasmette alla prole mentre le giraffe che nascono con un collo più lungo possono riprodursi e quindi trasmettere questo fenotipo alla prole. Da questo punto di vista si capisce che non conta tanto l'individuo che nasce e muore in un ciclo vitale, ma l'intera specie, che mutando può sopravvivere o estinguersi. Secondo la versione classica della teoria di

Darwin il cambiamento delle frequenze di varianti geniche deriva dalla capacità riproduttiva degli individui che li possiedono. Si riproducono di più gli individui più adatti all'ambiente, che opera quindi come un filtro selettivo dell'informazione da trasmettere alla progenie. Ci sono specie i cui nuovi organismi mutano velocemente perché hanno vita breve o una prole numerosa, per esempio i virus, i batteri o gli insetti, e possono adattarsi più facilmente alle variazioni ambientali. Anche se moltissimi individui muoiono perché non sono in grado di resistere ad un ambiente che durante una glaciazione – per esempio – diventa più freddo, ne sopravvive un numero sufficientemente grande da garantire la continuazione della specie. Ma come avviene questa evoluzione, e con quale velocità?

Nell'ultimo secolo si sono affermate delle teorie denominate **neodarwinismo**, che sostengono che le specie si siano evolute secondo un andamento lento e costante, generato dall'accoppiamento di mutazione e selezione. Un esempio di questa teoria è quella della **deriva genetica**. La variazione dei caratteri trasmessi dai genitori nei loro alleli può variare casualmente e un allele che determina un fenotipo può diventare dominante o sparire, senza la necessità di meccanismi selettivi. Questo effetto è tanto più forte quanto più la popolazione è piccola e questa selezione è lenta. Simile ad essa è la **teoria neutrale dell'evoluzione**. Secondo essa, un'ampia maggioranza delle variazioni genetiche sono neutre o quasi neutre per l'individuo; in altre parole gli individui nati con queste mutazioni non presentano differenze significative dagli altri. Queste variazioni, essendo neutre, non sono soggetti alla selezione naturale e possono accumularsi fino a fissarsi nella popolazione. Ne è un esempio la variazione dell'emoglobina. Il cambiamento di vari amminoacidi in varie parti della proteina non modificano la sua funzione, mentre il cambiamento di alcuni particolari amminoacidi la modifica. Dopo un certo numero di variazioni e centinaia di milioni di anni la proteina primitiva ha modificato il suo comportamento diventando quella attuale.

Un altro effetto selettivo scoperto è quello del **collo di bottiglia**. Esso è una forte riduzione della popolazione causata da forze esterne (caccia, catastrofi ambientali, persecuzioni e genocidi), che riduce le varianti oppure isola definitivamente una parte degli individui. Può anche derivare da barriere geografiche come isole o montagne. Come in una bottiglia che contiene palline di diversi colori, quelle che vengono estratte passando attraverso di esso in piccola quantità contengono solo alcuni colori. Se i colori rappresentano dei genotipi diversi, solo quelli che superano il collo di bottiglia possono riprodursi. La variabilità genetica di una popolazione quindi si riduce, tramandando il corredo genetico solo di una parte degli individui. Un effetto simile a quello del collo di bottiglia è l'**effetto del fondatore**. Una parte di una popolazione si muove e raggiunge un altro territorio

La vita sulla Terra

isolato in cui si riproduce. Solo i caratteri presenti nella popolazione che ha fondato questa colonia saranno presenti nelle generazioni future.

Un altro adattamento evolutivo è rappresentato dall'**altruismo**, presente nelle colonie di insetti sociali come le formiche e le api. In queste colonie la maggioranza degli individui aiuta gli altri dello stesso gruppo a scapito della propria possibilità di riprodursi. Le formiche e le api operaie non possono riprodursi ma lavorano a beneficio della possibilità di riprodursi della regina della colonia. Tra gli animali sociali di altre specie come i leoni o alcuni erbivori, questo meccanismo di altruismo si manifesta in diversi modi: le leonesse allattano anche i piccoli di altre femmine, mentre alcuni erbivori vigilano affinché non ci siano predatori nei dintorni, rinunciando al pasto, mentre gli altri del branco brucano. Nei carnivori questo avviene in piccoli gruppi, mentre negli erbivori si formano grandi gruppi. Se la riproduzione è nella teoria Darwiniana il punto cruciale della sopravvivenza, in queste colonie invece il mantenimento dei vari caratteri non avviene tra individui ma tra parenti. L'altruismo in questo caso è un vantaggio evolutivo per la sopravvivenza della specie.

Un'ipotesi diversa sull'evoluzione è quella dei biologi Gould ed Eldredge, la teoria degli **equilibri punteggiati**: secondo essa l'evoluzione non procede con un cambiamento lento e costante ma con un'alternanza di lunghi periodi di stasi e improvvisi cambiamenti. Questi cambiamenti sono causati da modificazioni ambientali, dalla nascita rapida di specie derivate o dall'estinzione dovuta a catastrofi a cui segue l'occupazione della stessa nicchia ecologica da parte di specie provenienti dall'esterno, quali i mammiferi dopo la scomparsa dei dinosauri. Questa teoria lascia diverse questioni aperte. È possibile che piccole modifiche graduali possano spiegare l'origine di specie così diverse? Tutte le caratteristiche di un organismo possono derivare da adattamenti? Come si vede, sebbene la teoria dell'evoluzione sia affermata e provata da diversi decenni alcuni dei suoi aspetti non sono ancora stati chiariti.

La selezione naturale agisce quindi attraverso la **selezione ambientale** (sopravvivenza in un ambiente che cambia), la **competizione intraspecifica** (tra individui della stessa specie per l'alimentazione o la riproduzione) e **competizione extraspecifica** (tra prede e predatori o raccoglitori di cibo con capacità diverse). Effetti concentrati nel tempo come il collo di bottiglia causato da estinzioni in massa di specie viventi, oppure la deriva genica che è maggiore in piccole popolazioni, possono determinare quali specie riescano a sopravvivere nei vari ambienti terrestri. Anche quando l'evoluzione non è vantaggiosa ci possono essere specie che adottano strategie diverse di sopravvivenza. Noi umani siamo molto sensibili alla temperatura, all'umidità e alla quantità di radiazioni; uno svantaggio

evolutivo rispetto ad altri esseri viventi, a cui abbiamo sopperito modificando il nostro ambiente. Senza questa capacità di modifica dell'ambiente la nostra specie sarebbe facilmente avviata verso l'estinzione.

Inoltre la selezione naturale e la mutazione devono agire insieme per essere efficaci, altrimenti genererebbero uniformità delle specie oppure sovrappopolazione e diversità. Troppa selezione finirebbe per restringere sempre più il numero di specie presenti su un pianeta, mentre un gran numero di mutazioni negli individui senza nessuna selezione naturale genererebbe un pianeta con un immenso numero di varianti e una progressiva sovrappopolazione.

Per quanto riguarda la vita extraterrestre, la selezione naturale lega la vita all'ambiente, e perciò anche una (ipotetica) vita extraterrestre deve essere legata all'ambiente in cui si sviluppa, come tratteremo nella Sezione 9.4. Un pianeta completamente coperto da oceani può avere una vita acquatica ma non terrestre. Un pianeta con una maggiore forza di gravità potrà avere solo esseri striscianti, senza scheletro, oppure molto massicci. Su di esso non ci sarebbero alberi alti e probabilmente né uccelli né insetti volanti. Poiché questi sulla Terra sono responsabili dell'impollinazione, probabilmente non ci sarebbero neppure fiori. Un pianeta bombardato da radiazioni ionizzanti potrebbe avere solo vita nel sottosuolo, in falde acquifere o in grotte con un alto contenuto d'acqua.

2.6 Il Precursore unico

Le omologie strutturali studiate dall'Anatomia Comparata fanno pensare che organismi di specie simili abbiano avuti progenitori comuni. La teoria darwiniana fu convalidata successivamente anche dai risultati della Paleontologia, dell'Embriologia e della Biochimica.

Anche se le combinazioni genetiche possibili con 4 basi, 20 amminoacidi, le mutazioni, la riproduzione per meiosi e crossing-over sono in numero enorme, se osserviamo le differenze nelle sequenze di nucleotidi tra diverse specie è possibile tracciare un albero di affinità. Studiando le affinità del DNA mitocondriale si può vedere che la nostra specie differisce dal gorilla e dall'orango per una piccola variazione di alcune basi. È chiaro che stiamo confrontando individui di specie contemporanee tra loro, ma la somiglianza indica che le varie specie possono avere avuto un antenato comune, in cui le variazioni di queste parti del DNA hanno indotto la comparsa di una specie diversa. Basandosi su queste affinità condividiamo con il gorilla un antenato comune e entrambi, uomini e gorilla, condividono un antenato comune con l'orango. In passato una cattiva interpretazione della teoria di Darwin aveva portato a credere che gli esseri umani discendessero dalle

La vita sulla Terra

scimmie piuttosto che avessero avuto un antenato comune. Questa affermazione fu giudicata blasfema dal punto di vista di molti religiosi.

Proseguendo con queste affinità, tracciando invece molecole come il citocromo C o l'RNA dei ribosomi negli esseri viventi, si vede che le specie attuali sono progressivamente imparentate andando indietro nel tempo, perché differiscono per variazioni sempre maggiori. Conducendo indietro nel tempo questo albero genetico che include gli eucarioti a cui apparteniamo anche noi, gli archea e i batteri, tutti sembrano avere un antenato comune. Questo antenato viene denominato **LUCA**, che è l'acronimo di *Last Universal Common Ancestor* (ultimo antenato universale comune). Un antenato universale, detto anche precursore unico, permette di spiegare le particolarità della vita terrestre basata sul carbonio, che abbiamo illustrato in questo capitolo:

- solo 5 basi azotate(A,T,C,G,U)
- solo 20 amminoacidi
- solo zuccheri pentosi (anelli di 5 atomi di carbonio)
- solo amminoacidi L e solo zuccheri D (chiralità)
- legami con il fosforo e lo zolfo, elementi più rari di C,N,O,H
- il codice genetico

Tutti gli studi condotti finora hanno mostrato che non esiste una ragione chimico-fisica perché si siano affermate queste particolarità. Esse potrebbero essere solo una coincidenza: per caso sul nostro pianeta una cellula che noi denominiamo LUCA e che possedeva queste specifiche proprietà ha iniziato a riprodursi, generando così nel corso dei miliardi di anni la varietà di specie che conosciamo oggi. Non si può escludere che altri tipi di cellule con condizioni interne diverse e un diverso codice genetico non si fossero affermate all'inizio, ma una volta che una forma di vita o un processo inizia a svilupparsi, è in grado di creare situazioni svantaggiose per gli altri e affermarsi su tutti. Oppure LUCA potrebbe essere solo il sopravvissuto ad un effetto "collo di bottiglia" che abbia estinto le altre varianti di codici genetici. Oggi grazie allo stesso nostro codice genetico un virus riesce a duplicare il suo RNA o DNA sfruttando i meccanismi esistenti all'interno delle nostre cellule infettate; altrimenti le istruzioni passate alla cellula non sarebbero decodificabili e non produrrebbero probabilmente nuovi virus. Alcuni biologi hanno fatto l'ipotesi che ancora oggi sulla Terra possano esistere microrganismi o strutture microscopiche che possiedono proprietà diverse dai nostri viventi, ma non interagiscono con noi e non vengono ritenuti "viventi". Forme di vita sopravvissute alla nascita di LUCA e non distrutte diventando cibo, avrebbero potuto rifugiarsi in ambienti nascosti. Nel sottosuolo esse avrebbero potuto trovare

una nicchia ecologica in cui svilupparsi. Viceversa, alcune forme di vita terrestri discendenti da LUCA avrebbero potuto apprendere meccanismi di assemblaggio diversi. Anni fa nel Mono Lake in California alcuni ricercatori avevano trovato dei batteri che erano in grado di vivere in un'acqua con un alto contenuto di arsenico e che sembravano aver sostituito l'arsenico al fosforo nel loro DNA. Chimicamente arsenico e fosforo sono simili, e l'arsenico può entrare in reazioni biochimiche che utilizzano il fosforo. Tuttavia la loro stabilità è diversa e per questa ragione l'arsenico può facilmente essere velenoso per il nostro organismo.

Se è vero che noi discendiamo da un'unica forma di vita con caratteristiche sorte casualmente, è altrettanto probabile che su altri pianeti i precursori siano stati diversi e che questi esseri viventi non abbiano le stesse proprietà comuni della vita terrestre, possedendo un metabolismo assolutamente diverso. Nella fantascienza a volte si vedono esseri viventi e organismi intelligenti provenienti da pianeti diversi della Galassia che condividono lo stesso cibo o la stessa atmosfera. Purtroppo questo non è credibile, poiché esseri evoluti in maniera diversa utilizzerebbero sostanze differenti come alimentazione e una bevanda per noi nutriente potrebbe essere velenosa per loro e viceversa.

Cercando vita nella Via Lattea, la nostra galassia, e studiando pianeti di altre stelle, andremo alla ricerca degli elementi chimici essenziali per gli acidi nucleici, gli amminoacidi e i lipidi: il carbonio (C), l'idrogeno (H) e lo zolfo (S). La prima domanda da porci è come sono nati e se sono rari, in modo da capire se la vita sia un fenomeno altrettanto raro da divenire unico, oppure se essa si basi su materiale disponibile ovunque in grande quantità. Questo sarà il nostro primo passo, che parte dal mondo atomico e molecolare.

3

Dove nascono gli elementi e le molecole

Il cielo di notte appare costellato di stelle, soprattutto nei luoghi lontani dalle luci delle città. Sembra impossibile che un mondo così lontano e apparentemente immobile abbia qualcosa a che fare con gli esseri viventi sulla Terra. Eppure, i mattoni basilari della vita, gli atomi, sono nati proprio lì e senza le stelle non ci sarebbero la Luna e la Terra, e soprattutto non ci saremmo noi a fare queste riflessioni. La Biochimica ci dice che bastano pochi elementi chimici per fare le molecole principali della vita terrestre: gli acidi nucleici, gli amminoacidi e i lipidi possono essere costruiti in grandissima varietà con sei soli atomi: idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno, fosforo e zolfo. Questa miscela viene indicata genericamente con l'acronimo **PONCHS** e le stelle sono le macchine fisico-chimiche che li producono, con processi iniziati nello spazio miliardi di anni fa.

Le stelle che vediamo in cielo ad occhio nudo sono solo una parte di un vasto sistema detto **Via Lattea** o **Galassia**. All'epoca attuale la nostra galassia contiene centinaia di miliardi di stelle, che costituiscono la maggior parte della sua massa. Il 4% della sua materia è costituito invece da **gas interstellare** (in gran parte idrogeno, elio e altri elementi chimici). Ma non è stato sempre così. In passato la quantità di gas interstellare era molto più grande e all'origine della Via Lattea esso ne costituiva la maggior parte. Il gas interstellare attuale si trova a temperature che possono andare dagli 8 K (-265 °C) fino a 8000 K e a densità bassissime. Le zone a temperature di migliaia di gradi vengono riscaldate dalla radiazione delle stelle già nate e sono le meno dense, pochi milioni di particelle per metro cubo (10^6 m^{-3}). Questo valore è bassissimo se confrontato con la densità di molecole nell'atmosfera terrestre al livello del mare, circa 10^{25} particelle m^{-3} . Data l'alta temperatura, queste regioni contengono principalmente atomi ionizzati (a cui è stato strappato uno o più elettroni) e vengono dette **regioni HII**. Esistono regioni più "tiepide", con temperature di un centinaio di gradi kelvin (-173 °C) composte in gran parte di atomi non ionizzati. Esse vengono indicate col simbolo dell'idrogeno non ionizzato (**regioni HI**).

Le zone più fredde, circa 25 K, vengono dette **nubi molecolari**. Esse sono indicate con il termine H_2 dell'idrogeno molecolare (**regioni H_2**), ma contengono

anche molecole di altri elementi e una certa quantità di granuli solidi di polvere interstellare, fatta da carbonio, silicio e ghiacci, come vedremo nella Sezione 4.2. Senza la polvere, le nubi interstellari sarebbero trasparenti alla luce. Le sue molecole e i suoi atomi possono assorbire soltanto alcune lunghezze d'onda (**assorbimento selettivo**) lasciando passare invariate le radiazioni a lunghezze d'onda diverse. La polvere invece assorbe quasi tutta la radiazione che riceve, con una maggiore opacità alle piccole lunghezze d'onda (radiazione X, UV) e una maggiore trasparenza a grandi lunghezze d'onda (raggi IR, onde radio). Nubi di polvere molto dense appaiono nelle foto della Via Lattea come dei buchi oscuri in cui sembrano mancare le stelle. Questo perché noi vediamo solo le stelle che stanno tra noi e la nube mentre quelle più lontane, visibili al di fuori della nube, ci appaiono nascoste dalla polvere. Nonostante questa opacità, la densità delle nubi molecolari raggiunge appena 10^{12} particelle m^{-3} , diecimila miliardi di volte minore di quella della nostra atmosfera. Tuttavia le loro dimensioni sono così grandi, molto più del Sistema Solare, da riuscire ad assorbire quasi tutta la luce delle stelle che si trovano in cielo dietro di loro. Nelle nubi molecolari inizia la storia delle stelle.

3.1 La nascita di stelle

Le regioni H_2 si frammentano in nubi più piccole e dense di gas e polveri. Queste nubi fredde sono dominate dalla forza di gravità delle particelle che le compongono. Ogni particella attira le altre e l'intera struttura si schiaccia sotto il proprio peso, contraendosi in direzione del centro di gravità della nube. Questo fenomeno viene chiamato **collasso gravitazionale**. L'unica forza che potrebbe opporsi al collasso gravitazionale è la pressione gassosa, che dipende dalla temperatura e dalla composizione chimica. Ma la temperatura di questo gas è bassissima (25 K) e la pressione gassosa di conseguenza non potrebbe mai impedire il collasso gravitazionale.

È facile comprendere cosa accade: ognuna di queste enormi nubi di gas finisce per schiacciarsi su sé stessa sotto l'azione della propria forza di gravità e così facendo innalza la sua densità. La densità aumenta principalmente nel centro della nube mentre resta progressivamente più bassa verso la sua periferia. Il gas così compresso dal proprio peso aumenta sia la sua pressione sia la sua temperatura, fino a raggiungere l'equilibrio con la forza di gravità. A questo punto il collasso gravitazionale si arresta. La pressione ha rimodellato la nube facendola diventare nella sua parte interna una sfera calda che emette radiazione luminosa: è nata una stella!

La struttura di una stella dipende dalla sua massa iniziale. Le stelle di massa mag-

Dove nascono gli elementi e le molecole

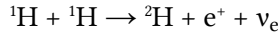
giore, più di $5 M_{\odot}$ scaricano sul core un'enorme forza di gravità e l'intera stella si riscalda a temperature molto alte. La sua fotosfera emette una gran quantità di luce UV e la stella appare come una **gigante azzurra**. Le stelle molto piccole, con massa minore di $0,5 M_{\odot}$, raggiungono all'equilibrio pressioni e temperature più basse e la loro fotosfera emette principalmente radiazione IR. La stella è così una **nana rossa**. Il nostro Sole è una stella di massa intermedia, $1 M_{\odot}$ per definizione, e la sua luce viene emessa in maggior parte nella regione gialla.

Il meccanismo che regola le stelle è facile da comprendere: quando la temperatura del gas si abbassa, la pressione scende e la gravità vince, facendo collassare l'intera struttura; il collasso alza però pressione e temperatura, ristabilendo un nuovo equilibrio che dura finché la temperatura rimane costante. La perdita di energia diffusa nello spazio sotto forma di calore e luce invece abbassa la temperatura, producendo un nuovo collasso. La nube, diventata stella, potrebbe perciò irradiare energia nello spazio a spese di una continua contrazione gravitazionale, fino a spegnersi. Nel caso del Sole, questo fu per numerosi anni un dilemma da risolvere. La Geologia testimoniava il fatto che la Terra era molto vecchia, circa 4.6 miliardi di anni, e che la vita di piante e animali era presente sul pianeta da qualche miliardo di anni. Quest'ultimo fatto richiedeva una temperatura costante al suolo per mantenere gli oceani allo stato liquido per un tempo almeno simile all'età della vita terrestre. L'emissione di energia solare non poteva essere chimica, poiché si sarebbe esaurita in poche migliaia di anni. Anche l'energia prodotta a spese della contrazione gravitazionale sarebbe potuta durare solo pochi milioni di anni. Il dilemma fu risolto trovando la sorgente di energia che rende stabile le stelle per lungo tempo: la fusione nucleare.

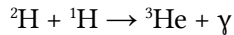
3.1.1. La fusione nucleare dell'idrogeno

Una nube fatta solo di idrogeno può attivare la fusione nucleare solo se la sua massa è almeno 8 centesimi di massa rispetto al Sole ($0,08 M_{\odot}$), che corrisponde a 60 volte la massa di Giove ($60 M_J$). Altrimenti la nube si raffredda lentamente contraendosi e diventa sempre meno luminosa, formando una **nana bruna**. Se maggiore di $0,08 M_{\odot}$, la sua massa è sufficiente a comprimere la parte centrale della stella, il **core**, fino a fargli raggiungere la temperatura di 10 milioni di gradi Kelvin (10 MK). In Fisica la temperatura di un gas esprime la velocità media delle particelle che lo compongono. A 10 MK gli atomi di idrogeno che compongono la nube sono **ionizzati** (cioè perdono gli elettroni) e i loro nuclei, semplici protoni, si muovono ad una velocità tale da collidere ad altissima energia. In condizioni normali due protoni (${}^1\text{H}$) che si incontrano nello spazio vengono respinti dalla reciproca forza elettrica essendo entrambi di carica positiva. A questa velocità invece essi possono avvicinarsi superando la repulsione elettrica fino a "attaccarsi" tra

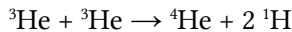
loro per effetto della forza nucleare, solo attrattiva. Questi due protoni uniti tra loro sarebbero instabili ma una volta legati tra loro uno di essi può trasformarsi in un neutrone (n), privo di carica elettrica, emettendo due particelle: un elettrone con carica positiva, il **positrone** (e^+) e una particella senza carica e di massa quasi nulla, il **neutrino** dell'elettrone (ν_e).



Il nuovo nucleo è costituito da un protone e da un neutrone e prende il nome di **deuterio** o **idrogeno pesante** (${}^2\text{H}$). Un'ulteriore collisione tra un protone e il deuterio appena formato è in grado di creare un nuovo nucleo composto da due protoni e un neutrone, con l'emissione di un fotone di energia elettromagnetica (γ).



Il numero di protoni definisce l'elemento chimico: 1 è idrogeno, 2 è elio, 6 carbonio, ecc. In questo caso il risultato della collisione è un nucleo di elio fatto da tre particelle nucleari: due protoni e un neutrone. Si chiama elio 3 (${}^3\text{He}$), e viene detto un **isotopo** dell'elio. Una successiva collisione tra due nuclei di elio 3 produce un altro isotopo dell'elio, l'elio 4, e due nuclei di idrogeno (${}^4\text{He} + 2{}^1\text{H}$).



Questo processo ha quindi trasformato la materia nel core della stella partendo da quattro nuclei di idrogeno per creare nuclei di elio stabile. Trasformare gli elementi chimici è stato in passato il sogno degli alchimisti. Questo avviene nelle stelle, ma a temperature che gli alchimisti non avrebbero mai potuto raggiungere nei loro crogioli, decine di milioni di gradi.

Occorre precisare che il bruciamento dell'idrogeno nel core coinvolge solamente una piccola parte della stella, trasformando in elio solo un 10% della massa, che è racchiusa nel core. La parte più esterna della stella, l'**involuppo**, non partecipa alla fusione dell'idrogeno ma si limita a farsi attraversare dall'energia prodotta nel core. Nel caso del Sole ci vogliono circa 10 milioni di anni perché l'energia prodotta sotto forma di raggi gamma, dopo vari assorbimenti e trasformazioni da parte degli atomi presenti nel materiale stellare, venga fuori come luce su quella superficie opaca che chiamiamo **fotosfera**. Sotto la fotosfera l'involuppo può andare incontro a rimescolamenti, come i **moti convettivi**: il materiale caldo forma delle zone meno dense che salgono verso l'esterno e richiamano verso l'interno zone più fredde e dense, come in una pentola che bolle. La fotosfera del Sole, l'unica che possiamo osservare in grande dettaglio, mostra numerosi fenomeni convettivi: bolle di gas che si aprono ed esplodono, getti di materia ionizzata e luminosa lanciati verso lo spazio in enormi protuberanze solari, e diversi altri fenomeni transitori e periodici. Quando osserviamo il Sole o una qualsiasi altra

Dove nascono gli elementi e le molecole

Tabella 3.1 Tipi di stelle durante la fase di bruciamento dell'idrogeno, in base alla massa iniziale della nube in collasso. La temperatura T è riferita alla fotosfera. Il tempo di vita rappresenta il tempo di bruciamento dell'idrogeno, che aumenta col diminuire della massa.

Tipo	Colore	Temperatura	Massa iniziale	Tempo di vita
O	Blu	40000 K	40 M_{\odot}	1 Ma
B	Blu-bianco	20000 K	6,5 M_{\odot}	93 Ma
A	Bianco	10000 K	2,5 M_{\odot}	1 Ga
F	Giallo	7500 K	1,3 M_{\odot}	5 Ga
G	Giallo	5500 K	1,0 M_{\odot}	10 Ga
K	Arancio	4500 K	0,7 M_{\odot}	24 Ga
M	Rosso	3000 K	0,2 M_{\odot}	559 Ga

stella, vediamo solo la fotosfera e gli strati che la sovrastano, la **cromosfera** piena di eruzioni di materia e energia e la **corona** riscaldata dalle onde di materia che provengono dalla fotosfera. Le particelle lanciate lontano dal Sole e dalle altre stelle formano un flusso chiamato **vento stellare** (**vento solare** nel nostro caso). Esso è composto da **protoni** (${}^1\text{H}$), **particelle β^-** (e^-) e **particelle α** (${}^4\text{He}$).

Nella fase iniziale, quando una stella inizia la fusione dell'idrogeno nel core (**fase T-Tauri**), il vento stellare è particolarmente forte, tanto da essere in grado di spazzar via i residui più leggeri della nube di materiale interstellare che ha formato la stella, fatti da gas e polveri. Lo spazio intorno alla stella si ripulisce ed essa, nata dentro una nuvola oscura, esce dal suo bozzolo e diventa visibile nello spazio in tutto il suo splendore.

Riassumiamo il meccanismo di nascita di una stella: le nubi di gas presenti nello spazio si raffreddano e, poiché la pressione del gas non è in grado di sostenerle, si comprimono a causa della loro stessa forza di gravità. Ma comprimendosi il loro core si riscalda e la pressione del gas dovuta al moto delle sue particelle finisce per compensare la gravità, creando una sfera che non collassa più ed emette energia. Se la massa è sufficientemente grande, più di 8 centesimi di quella del Sole, si innesca la fusione nucleare dell'idrogeno che si trasforma in elio. La fusione nucleare produce energia e mantiene costante la temperatura del core, stabilizzando così l'intera stella che è in equilibrio tra la pressione del gas caldo che la farebbe espandere e la pressione gravitazionale che la farebbe collassare. Questo meccanismo è determinato direttamente dalle leggi fisiche: ogni nube di gas presente nella galassia che sia abbastanza fredda o densa per collassare è destinata a creare stelle. Nella Via Lattea nascono stelle con questo meccanismo da circa 14 miliardi di anni, ed essa continuerà ad arricchirsi di stelle finché resterà abbastanza gas

interstellare.

3.2 La formazione dell'elio e del carbonio

La produzione di elio dall'idrogeno, detta anche bruciamento dell'idrogeno, è tanto più efficiente quanto più alta è la temperatura e la massa del core che si trasforma. Come abbiamo visto all'inizio, l'innalzamento della temperatura centrale dipende dalla forza di gravità della nube che diventa stella. Nubi di massa maggiore avranno maggiore forza di gravità, si contrarranno con una pressione maggiore e raggiungeranno una maggiore temperatura centrale e degli strati esterni. La stella più massiccia sarà più grande e più calda e ci apparirà perciò più azzurra, emettendo energia ad alta frequenza nei raggi UV. La stella più piccola invece ci apparirà come una nana rossastra, emettendo in prevalenza radiazioni di bassa energia nell'IR. Ecco perciò il ritratto tipico di stelle molto grandi, $30 M_{\odot}$ (masse solari): giganti azzurre con temperature di 44000 K alla fotosfera e 36 MK nel core, 140000 volte più luminose della nostra stella e che bruciano l'idrogeno in pochi milioni di anni. Invece le stelle più piccole e più numerose nella Via Lattea hanno temperature di poche migliaia di gradi alla fotosfera e possono bruciare l'idrogeno del core per decine di miliardi di anni, un tempo maggiore dell'età dell'Universo. Il Sole può bruciare l'idrogeno per 10 Ga, e avendo un'età di circa 4,6 Ga si trova circa a metà della sua vita come stella che brucia l'idrogeno, una fase comune a tutte le stelle. La fase successiva è molto più veloce, ed è quella di bruciamento dell'elio.

Una volta che il core della stella ha bruciato tutto l'idrogeno trasformandolo in elio, esso diventa più denso. L'energia cinetica delle particelle, che corrisponde alla temperatura del core, è ancora costante. Però i nuclei di elio sono circa 4 volte più pesanti di quelli di idrogeno e perciò si muovono a velocità minore, facendo abbassare la pressione del gas e spegnendo la fusione nucleare. Se la pressione cala, la forza di gravità riprende il sopravvento e il core torna a collassare. La contrazione comprime il gas facendo alzare la temperatura finché non si trova una nuova situazione di equilibrio che ferma nuovamente il collasso.

Quando il core inizia a contrarsi alla fine del bruciamento dell'idrogeno la parte dell'involuppo a contatto con esso ha la temperatura necessaria per iniziare a bruciare l'idrogeno in un guscio attorno al core (**bruciamento in shell**). Il guscio che brucia è più esteso del core che racchiude e perciò sviluppa più energia di quanto ne sviluppasse il core da solo quando bruciava idrogeno. L'involuppo era in un equilibrio tra pressione e gravità determinato dal bruciamento nel core, ma ora riceve una maggior quantità di energia che aumenta la sua pressione interna e lo fa espandere. La stella in questa fase ha un core inerte di elio, non ancora in

Dove nascono gli elementi e le molecole

grado di bruciare, un guscio che brucia idrogeno e un involucro che si espande facendola diventare gigantesca. L'espansione raffredda l'involucro che diventa rossastro. La stella è ora diventata una **gigante rossa**.

Tutte le stelle, dalle giganti azzurre alle nane rosse, bruciano l'idrogeno e alla fine della loro vita diventano giganti rosse. Come già detto, le nane rosse più piccole del Sole stanno ancora bruciando l'idrogeno e questa fase non l'hanno mai raggiunta. Le stelle molto massicce l'hanno raggiunta in pochi milioni di anni e il Sole la raggiungerà tra circa 5 Ga. A quell'epoca il suo involucro ingoierà i pianeti interni raggiungendo l'orbita della Terra. Non ci sarà più possibilità di vita sul nostro pianeta e l'acqua evaporerà completamente. Il progressivo riscaldamento del Sole non è improvviso. Sin dalla nascita, durante il bruciamento dell'idrogeno, il Sole come le altre stelle diventa lentamente più grande, caldo e luminoso. Circa 4 miliardi di anni fa il Sole era il 26% meno luminoso e la Terra avrebbe dovuto essere ghiacciata. Questo è in contraddizione col fatto che si trovino tracce di oceani e vita già a quell'epoca e richiede la presenza di un forte effetto serra (vedi Sezione 5.8). Allo stesso modo, tra 1 Ga il Sole farà alzare la temperatura della Terra di 10 gradi, rendendola per noi inabitabile. In compenso, la maggiore energia irradiata dal Sole farà evaporare le atmosfere dei pianeti giganti e renderà meno ostili alla vita in superficie gli ambienti dei loro satelliti.

Mentre l'idrogeno brucia nel guscio producendo elio, questo si accumula sul core accrescendolo e facendone aumentare la densità e la temperatura. Se la massa della stella è $>0.26 M_{\odot}$ la temperatura del core raggiunge i 100 MK, sufficiente ad avviare la **fusione dell'elio**. Il bruciamento dell'elio avviene attraverso un processo che può essere descritto come la collisione simultanea, entro in $3 \cdot 10^{-16}$ s, di tre particelle α (due protoni e due neutroni) che produce una nuova particella con sei protoni e sei neutroni, con l'emissione di un fotone.



Si tratta di un atomo di carbonio stabile (${}^{12}\text{C}$), elemento di base per tutte le molecole viventi, che nasce così nel cosmo.

Una volta presente anche una piccola quantità di ${}^{12}\text{C}$, è possibile attivare una fusione dell'idrogeno attraverso un ciclo detto CNO che crea anche azoto e ossigeno, altre due atomi della miscela PONCHS. Le stelle che bruciano l'elio assumono così una nuova struttura interna: un nucleo di elio che si trasforma in carbonio, un guscio che brucia idrogeno, e un involucro che ricevendo ancor più energia si espande a dimensioni maggiori di quelle delle giganti rosse. La stella in questa fase, detta **AGB**, aumenta la sua luminosità e l'emissione di particelle che crea il vento stellare. Nella sua atmosfera si creano grandissime quantità di polvere.

La fusione dell'elio in una stella come il Sole dura 100 Ma, appena l'1% del tempo rispetto a quella dell'idrogeno. Il core diventa di carbonio e la sua temperatura, che era abbastanza alta per bruciare l'elio non è sufficiente ad innescare il bruciamento del carbonio, che richiede 600 MK. Solo stelle più massicce di $5 M_{\odot}$ riescono ad accendere l'elio nel core.

3.2.1. Bruciamento del carbonio e nebulose planetarie

Le stelle con massa tra 0.26 e $5 M_{\odot}$ dopo la fase di gigante rossa hanno un'evoluzione diversa. Il core inerte di ^{12}C genera energia tramite la perdita di energia potenziale dovuta alla contrazione e accende la fusione dell'elio nel guscio circostante, mentre il guscio sovrastante brucia idrogeno (bruciamento in doppia shell). Questo bruciamento dura pochi milioni di anni per una stella come il Sole e produce rapidamente una grande energia. Di nuovo, l'involuppo si espande come nella nascita delle giganti rosse ma molto più velocemente, raggiungendo la velocità di fuga e creando una enorme bolla di materiale che si allontana a velocità dai 10 ai 30 km/s, ovvero decine di migliaia di km/h. Vista al telescopio ottico, questa bolla appare come un dischetto luminescente che la faceva apparire come un pianeta ai primi astronomi del passato. A questa illusione ottica si deve il loro nome di **nebulosa planetaria**, ma essa è molto più grande di qualsiasi pianeta. Il vento stellare che precede e segue la nascita di una planetaria è molto alto, e le particelle lanciate verso l'esterno sono composte anche da carbonio, azoto, ossigeno e altri elementi creati nei cicli p-p, CNO e 3α . Man mano che questo gas si espande la sua temperatura scende a 1000-2000 K e gli elementi più pesanti presenti in esso si raggruppano in agglomerati irregolari formando minuscole particelle solide, la polvere interstellare, di cui parleremo in dettaglio nel Capitolo 4.

Le nebulose planetarie assumono in cielo una struttura iridata, dal colore violetto vicino al residuo del core stellare, fino al rosso delle parti più fredde, e una trama dettata dalla polvere oscura, ghiacci e granuli di grafite. A volte un disco di polvere e gas intorno alla stella frena l'espansione creando una doppia bolla, a forma di clessidra. La sorgente che illumina le nebulose planetarie è il core di carbonio e ossigeno che resta al centro, caldissimo e con un raggio comparabile a quello della Terra. Il core è diventato una stella **nana bianca**, che va lentamente spegnendosi e diventando sempre più rossastra in centinaia di milioni di anni. La nebulosa planetaria intorno alla nana bianca si raffredda più velocemente e in pochi milioni di anni la sua luminosità svanisce, mentre le sostanze lanciate nello spazio si mescolano al gas interstellare arricchendolo dei nuovi elementi chimici. Le planetarie rappresentano così una sorgente di arricchimento del gas interstellare di elementi vicini al carbonio come peso atomico. Le sostanze che costruiranno le molecole biologiche iniziano in questo modo a incontrarsi nello spazio, formando

Dove nascono gli elementi e le molecole

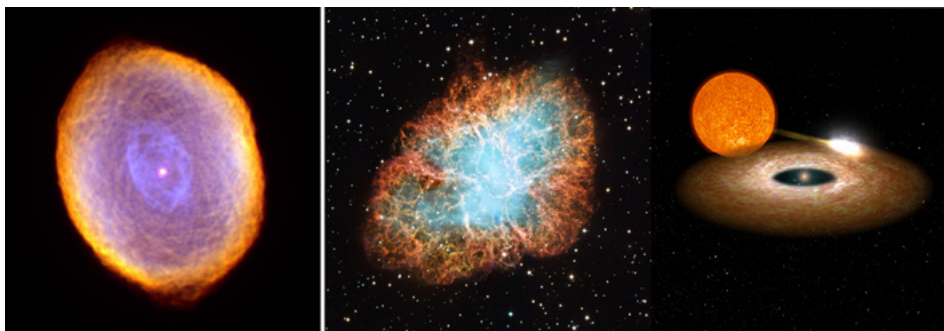


Figura 3.1 – *A sinistra*: La nebulosa planetaria IC 418, con la stella nana bianca al centro che la illumina (NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA), R. Sahai (JPL), A.R. Hajian (USNO); *al centro*: La Nebulosa del Granchio, gas espulso da una supernova (ESO / Manu Mejias); *a destra*: rappresentazione di un sistema binario che esploderà come SNIa (Immagine: G. Galletta).

molecole, come vedremo nella Sezione 3.4. Se non ci fossero questi meccanismi di arricchimento, la Via Lattea sarebbe un oceano di idrogeno, elio e qualche elemento leggero, mentre tutti gli altri elementi più pesanti resterebbero confinati nei residui del core delle stelle.

3.2.2. Stelle doppie e Supernovae Ia

E qui appare un altro meccanismo importante nella distribuzione degli elementi nello spazio. I core stellari sono densissimi, e alcuni di essi possono raggiungere delle densità enormi, anche un miliardo di kg/m^3 , un milione di volte più dense dell'acqua. Non ci interessa qui discutere in dettaglio il meccanismo che porta i nuclei del core di una stella a comprimersi fino a diventare milioni di miliardi di volte più densi delle rocce, ma ci interessa sottolineare come questa materia, detta **gas degenere**, sia fortemente instabile. Poiché le stelle non nascono isolate nello spazio, ma moltissime di esse nascono con una o più compagne vicine, la loro evoluzione è spesso legata a quella della stella compagna. Questi sistemi di stelle che orbitano intorno ad un comune centro di massa sono detti **sistemi binari** e, se le stelle sono così vicine che i loro involucri si toccano, **stelle binarie a contatto**. Il contatto tra due stelle avviene attraverso lo scambio di massa tra i due involucri. Anche se le stelle non sono inizialmente a contatto, dopo la fase di gigante rossa o di supergigante AGB di una delle due, l'involuppo può raggiungere una dimensione tale da arrivare al punto di essere attratto dalla stella compagna. Questo scambio di materia altera la massa e quindi l'evoluzione delle due stelle. Se la stella che riceve materia è ancora in una fase di bruciamento di un elemento chimico, il materiale in più aumenta la sua massa e accelera la sua evoluzione. Ma se il materiale arriva su un core nudo, dopo la fase di nebulosa planetaria, il carbonio e l'ossigeno contenuto in essa a pressioni altissime

innescano una violentissima fusione nucleare, con l'esplosione dell'intera stella (**detonazione del carbonio**). D'improvviso la luce del sistema binario aumenta, fino a diventare 5 miliardi di volte più brillante del Sole, e il materiale viene lanciato verso l'esterno a velocità di decine di migliaia di km/s. Il fenomeno viene chiamato esplosione di Supernova Ia (**SN Ia**), ed è ancora più efficace a generare nuovi elementi chimici e a distribuirli nello spazio rispetto al vento delle nebulose planetarie. Processi come cattura di neutroni durante le esplosioni di SN sono in grado di creare numerosi isotopi degli elementi già nati e nuovi elementi più pesanti. In una galassia come la nostra, esplose una supernova Ia all'incirca ogni 72 anni. Questo indica quanto attivo sia il meccanismo che genera questi "venti di supernova" che lanciano particelle creando sulla Terra quel fenomeno noto sotto il nome di "raggi cosmici", pericolosi per le forme viventi e di cui parleremo nel Capitolo 10, sull'esplorazione spaziale.

3.3 Formazione degli elementi oltre il carbonio

Stelle molto più massicce, dalle $5 M_{\odot}$ in su, hanno una massa e una dimensione tali da raggiungere temperature altissime nel core. Queste stelle sono rare rispetto a quelle come il Sole o di massa minore. Esse passano velocemente tutte le fasi del bruciamento dell'idrogeno e dell'elio, inclusa la fase di gigante rossa e la successiva espansione dell'involuppo come supergigante rossa. L'involuppo è così esteso da riuscire a soffocare nel suo interno tutte le instabilità create dall'accensione dell'elio e del carbonio, che avviene quando la contrazione del core permette di raggiungere i 600 MK. Il bruciamento del carbonio produce magnesio, sodio, neon, e ossigeno ed è attivo per un tempo più breve di quello dell'elio. In genere, più alta è la temperatura a cui avviene la fusione nucleare, più intensa e breve è la produzione di energia. L'evoluzione seguente è un ripetersi di processi già descritti. Ogni volta che la fusione di un elemento chimico si arresta, il core si contrae o si addensa se si trova già sotto forma di gas degenere, e la fusione continua in gusci concentrici. Stelle con massa iniziale inferiore a 8 masse solari non riescono a proseguire il bruciamento oltre il carbonio. La produzione di energia aumenta progressivamente il loro vento stellare e parte della massa viene così persa nello spazio. Alla fine si produrrà ancora una nebulosa planetaria ma la nana bianca residua sarà composta da ciò che era il core di ossigeno, neon e magnesio della stella originaria.

Sopra le $8 M_{\odot}$ l'evoluzione finale della stella cambia radicalmente. Queste stelle sono ancora più rare, poco più dell'1 per mille delle stelle che nascono. Una stella così grande è in grado di trattenere a sé l'involuppo, smorzando tutte le successive instabilità del core e dei gusci e proseguendo nel bruciamento degli elementi più pesanti senza arrivare alla produzione di una nebulosa planetaria. La temperatu-

Dove nascono gli elementi e le molecole

ra del core raggiunge la temperatura di 1.2 GK e una densità di 4 miliardi di kg/m³. A questa temperatura i fotoni di raggi gamma emessi sono così energetici da scindere alcuni nuclei in un processo di **fotodisintegrazione**, che favorisce il bruciamento del neon con produzione di magnesio. La fusione del Neon alla fine cessa e si innesca il bruciamento dell'ossigeno, a temperature ancora più alte. Esso produce zolfo, silicio e fosforo, due altri elementi PONCHS. Il fosforo è essenziale per la costruzione dell'ossatura del DNA e dell'RNA. Anche lo zolfo è importante in Biologia perché può costituire una fonte di energia per alcune forme viventi. Il silicio è necessario per costruire qualsiasi pianeta. Il ciclo di bruciamento dell'ossigeno produce così elementi chimici importantissimi.

3.3.1. Esplosione di Supernova core-collapse

Nel core di queste stelle massicce continuano intanto processi di fusione che coinvolgono particelle α . Il silicio può fondersi con altri nuclei di silicio oppure catturare in successione queste particelle, generando ogni volta un elemento chimico più pesante di 4 unità di massa atomica e di numero atomico più alto di due posizioni. Per esempio, $^{28}\text{Si} + ^4\text{He}$, con numero atomico pari a 14 e 2, si trasformano in ^{32}S , l'isotopo dello zolfo con numero atomico 16(=14+2) e peso atomico 32 (=28+4). La fase finale del bruciamento del silicio porta a generare ^{56}Ni , un isotopo instabile del nichel che decade in cobalto instabile e successivamente in ferro stabile, ^{56}Fe . Le reazioni che seguono segnano per la stella l'inizio di una catastrofe, che porterà alla sua distruzione.

Finora la stella è rimasta stabile perché la massa posseduta da protoni e neutroni quando sono all'interno del nucleo (**nucleoni**) è minore di quella che avrebbero se fossero liberi nello spazio (**difetto di massa**). Per l'equivalenza tra massa ed energia, l'energia di legame (negativa) che unisce i nucleoni, sottraendo loro energia ha diminuito anche la massa dell'intero nucleo. In una reazione nucleare in cui da nuclei più leggeri come il carbonio e l'ossigeno si generano nuclei più pesanti come il silicio o il fosforo, il nucleo finale ha una massa per nucleone¹² minore della somma delle masse iniziali, ed è stabile. La massa sottratta viene persa come energia o nuove particelle, come già detto. Ma il ferro 56 è l'elemento chimico con la minima massa per nucleone. Gli elementi più pesanti del ferro hanno una maggiore massa per nucleone e perciò la loro sintesi anziché produrre energia la assorbe. Riassumendo, gli elementi più leggeri del ferro producono energia attraverso la fusione nucleare che crea elementi più pesanti, mentre gli elementi più pesanti, come l'uranio, producono energia attraverso la fissione nucleare, spaccandosi per trovare la stabilità in nuclei più piccoli.

¹² la massa per nucleone è la massa dell'atomo divisa per il numero di particelle che lo compongono.

La **catastrofe del ferro** avviene in pochi minuti. La temperatura è sopra il miliardo di gradi e le particelle collidono ad altissima velocità. In particolare, le particelle α che collidono coi nuclei di ferro creerebbero zinco ma questa fusione assorbirebbe energia e abbasserebbe la temperatura. Come risultato, la fusione nucleare si arresta e il core si contrae improvvisamente riscaldandosi fino a temperature di 5 GK ma questa contrazione non crea più nuove fusioni. Il collasso del core accelera finché il gas non viene compresso così tanto da creare una struttura densissima. Il seguito di questo processo non è ancora ben compreso. Secondo una teoria la contrazione e la formazione di neutroni nel core può produrre neutrini (ν) e le loro antiparticelle, gli **antineutrini** ($\bar{\nu}$). L'energia derivante da questi processi può essere assorbita dagli strati sovrastanti facendoli espandere come in un'esplosione. Una spiegazione classica vuole invece che l'esplosione sia generata da un rimbalzo degli strati sovrastanti sul nucleo densissimo, rimbalzo che li proietta verso l'esterno. Una visione casalinga di questo fenomeno si può avere mettendo dell'acqua quieta in un catino circolare, che rappresenterà uno spaccato della stella. Dando un colpetto sul bordo si creerà un'onda circolare che viaggia verso l'interno e che dopo aver raggiunto il centro si propagherà verso l'esterno.

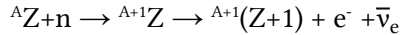
Qualunque sia in meccanismo di attivazione, l'enorme energia creata dalla contrazione del core negli ultimi minuti genera un'onda che viaggia verso strati sempre meno densi, diventando supersonica e trascinando con sé tutti i gusci sovrastanti. La stella aveva iniziato la sua vita come una sfera di idrogeno quasi puro e al momento della catastrofe del ferro ha un core di ferro e nichel e gusci di silicio, ossigeno, neon, carbonio, elio, idrogeno e diversi elementi intermedi che si sono formati nelle precedenti reazioni nucleari, come lo zolfo e il fosforo. Durante l'esplosione i loro atomi viaggiano verso l'esterno e tutto l'involuppo viene sparato fuori a velocità fino a ~ 15000 km/s, decine di milioni di km/h. L'intera stella esplose e come una sfera che si gonfia diventa luminosissima nello spazio, apparendo d'improvviso in cielo dove prima sembrava non esserci. Questo fenomeno viene detto **esplosione di Supernova**. Le supernovae che derivano da stelle più massicce di $8 M_{\odot}$ sono dette **SNcc** (*core collapsed supernova*). esse sono distinte dalle SN Ia di cui abbiamo trattato prima, che derivano da una fusione del carbonio sul materiale di una nana bianca. L'evoluzione di stelle con più di $40 M_{\odot}$, in base al loro contenuto di elementi pesanti, può non produrre esplosione di SN e non lanciare nello spazio l'involuppo di idrogeno. Ma qui ci interessano solo le stelle che creano e diffondono nuovi elementi chimici.

3.3.2. La nascita degli elementi pesanti

Possiamo chiederci come si creino gli elementi chimici più pesanti del ferro, poiché la fusione nucleare si arresta al Ni-Fe. La produzione di elementi più pesanti

Dove nascono gli elementi e le molecole

attraverso la fusione nucleare richiederebbe un input di energia e perciò non può durare nel core delle stelle, dove la sottrazione di energia favorirebbe il collasso gravitazionale. Essi nascono attraverso il processo di **cattura di neutroni**. Essendo privi di carica, questi possono penetrare nel nucleo creando un isotopo di peso atomico maggiore. A volte questo isotopo è instabile e un suo neutrone decade in un protone e un elettrone. Così un nucleo con Z protoni e A particelle attraverso la reazione



si trasforma nell'elemento chimico successivo (ha un protone in più). Un esempio di questo processo lo dà il tecnezio 98, praticamente assente sulla Terra ma osservato nell'atmosfera di stelle giganti rosse. Esso deriva dal molibdeno 97, stabile, attraverso la reazione ${}^{97}\text{Mo} + n \rightarrow {}^{98}\text{Mo} \rightarrow {}^{98}\text{Tc} + e^- + \bar{\nu}_e$ che si svolge in un tempo totale di 4 Ma. Il simbolo $\bar{\nu}_e$ indica l'antineutrino dell'elettrone. I neutroni vengono prodotti nel corso dell'evoluzione stellare in vari processi di fusione, per esempio quelli del carbonio e dell'ossigeno oppure dal carbonio che sfugge dal core attraversando i gusci che bruciano idrogeno ed elio nelle stelle AGB. Qui la cattura di protoni e particelle α produce neutroni che riescono a sfuggire verso l'esterno. Se la cattura di neutroni nei gusci e nell'involucro esterno avviene in maniera lenta, per esempio in migliaia di anni, i nuclei presenti passano attraverso una serie di catture e decadimenti β^- crescendo sia di numero atomico che di peso atomico, e un gradino dopo l'altro riempiono la tabella periodica degli elementi. Questo processo lento viene chiamato **processo-s** (dall'inglese *slow*) e avviene quando la densità di neutroni liberi è inferiore a 10^{15} neutroni/m³.

Se invece il flusso di neutroni è molto forte, circa 10^{26} neutroni/m³, come durante l'esplosione di una SNcc il cui nucleo è ricco di neutroni, le catture successive sono molto più veloci dei decadimenti β^- e perciò i nuclei acquistano peso atomico. Questo meccanismo è detto **processo-r** (*rapid*) e durante l'espansione violenta degli strati esterni della stella può generare pesi atomici fino a 270. Non appena la temperatura scende, gli atomi con un eccesso di neutroni decadono verso isotopi più stabili. Così con i processi s e r, insieme alla cattura di positroni o di protoni, nuovi elementi si formano nello spazio.

3.3.3. Il ciclo chimico della Galassia

Da quanto detto, le supernovae derivanti da stelle di grande massa sono le macchine chimiche che, partendo dall'idrogeno, producono tutti gli elementi fino al ferro e poi, esplodendo, li distribuiscono nello spazio a enormi distanze. Intorno alle SN, le nubi di gas interstellare vengono insemiinate da elementi chimici più pesanti dell'elio e col passare del tempo si arricchiscono di quei materiali essenziali a formare pianeti, atmosfere, strutture organiche. A questo meccanismo di

diffusione e arricchimento diretto si aggiunge la rotazione della Via lattea: tutte le stelle, nubi di gas e polveri ruotano intorno al centro della nostra galassia, ognuna con un'orbita diversa e a velocità diverse. Perciò gli atomi prodotti dalle stelle si mescolano tra loro, generando una composizione chimica che col passare del tempo diventa sempre più uniforme. A parte alcune regioni più ricche di elementi chimici, la percentuale dei vari elementi nei dintorni del Sole è simile a quella dall'altra parte della Galassia. Se la vita per originarsi ha bisogno di precisi elementi chimici, essa potrà nascere qui come altrove, perché le stelle, le esplosioni di supernovae e la rotazione della Via Lattea ne garantiscono la produzione e distribuzione nello spazio.

Atomi di vario peso si incrociano nello spazio quasi vuoto per milioni di anni. Gran parte dell'energia dell'esplosione di SN viene spesa nell'accelerazione di particelle leggere, come nuclei di idrogeno, a velocità fino a 30000 km/s, pari a 1/10 della velocità della luce nel vuoto. I nuclei atomici, e gli atomi da essi generati attraverso la cattura di elettroni, viaggiano invece a poche centinaia di km/s e possono interagire con altri atomi dello spazio interstellare formando legami elettrici. Si formano così molecole. Siamo ancora lontani dalla generazione di pianeti come la Terra e la nascita di vita, ma questo è un cammino che non avviene più entro il core caldissimo delle stelle, ma nel freddo spazio interstellare e nel buio delle nubi di polvere. Fino a che punto può arrivare la sintesi di molecole nello spazio, senza che siano ancora formati pianeti? Per capirlo, il nostro viaggio continua tra le molecole interstellari.

3.4 La nascita di molecole

Le funzioni degli esseri viventi sono guidate da processi fisici e chimici tra un numero grandissimo di molecole. Alla temperatura delle stelle, la maggior parte di queste molecole non esiste poiché le collisioni sono così frequenti e così energetiche da spezzare i legami tra gli atomi. Nel core poi persino gli atomi sono ridotti a nuclei e a singole particelle. Inoltre le prime stelle a formarsi erano fatte solo di idrogeno, elio e tracce di elementi leggeri e nessuna delle nostre molecole fatte di carbonio e azoto poteva esistere nell'epoca primordiale del nostro universo. Così il cammino che da un "oceano" primordiale di idrogeno ed elio ci porta alla vita passa attraverso le stelle ma continua nello spazio freddo e quasi vuoto attorno ad esse.

Gli atomi che vengono proiettati nello spazio durante la vita delle stelle si trovano in un ambiente con temperature e densità molto basse, come abbiamo scritto nella Sezione 3.1. All'esterno delle nubi di gas, la densità di particelle all'epoca attuale vale 10^6 m^{-3} . Una regione di spazio con un milione di particelle ogni metro cubo

Dove nascono gli elementi e le molecole

è dieci miliardi di miliardi di volte meno densa di quanto lo sia la nostra atmosfera in pianura (10^{25} m^{-3}). Le collisioni tra particelle sono rarissime e la temperatura cinetica (determinata dalla velocità media delle particelle di un gas) è tra -140 e -248 °C, vicina allo zero assoluto. Qui gli atomi possono catturare elettroni e collidere con altri atomi, legandosi chimicamente a formare molecole. Sebbene le collisioni siano rare, i volumi coinvolti sono migliaia di parsec cubici (milioni di miliardi di km al cubo!) e ci sono così tanti atomi da generare un numero enorme di molecole. Però la vita di queste molecole non è affatto facile; le stelle emettono particelle e quelle più calde emettono la maggior parte della loro radiazione a lunghezze d'onda UV. Anche stelle come il Sole possono produrre lampi di raggi X durante le eruzioni nella cromosfera e nella corona. In entrambi i casi, queste particelle e radiazioni sono in grado di ionizzare atomi e molecole e di dissociare queste ultime. Da una parte questo fenomeno è utile perché spezza alcuni legami chimici e crea ioni, che possono catturare altri ioni o atomi e generare nuove molecole; d'altro canto se la radiazione elettromagnetica è troppo intensa, le molecole non riescono mai a formarsi e le dissociazioni prevalgono sulle associazioni di atomi. Un ruolo protettivo in questo processo viene svolto dalla polvere.

Come si comprende, il processo di formazione delle molecole interstellari si intreccia in un ciclo di produzione e distruzione di sostanze chimiche che dura miliardi di anni. Le supernove e i venti stellari continuano a riversare nello spazio nuovi atomi, e le molecole continuano a formarsi e addensarsi in nuove nubi, da cui nasceranno altre stelle. Queste molecole nascono senza l'ausilio di pianeti, in un ambiente molto diverso da quello terrestre ed è molto importante per l'Astrobiologia comprendere fino a che punto la sintesi di molecole si avvicini a quella necessaria per la nascita e il mantenimento delle forme di vita.

In laboratorio e con modelli teorici è possibile studiare e prevedere che tipi di molecole sono in grado di formarsi nello spazio. In generale, la differenza tra la **velocità di formazione** di una molecola e la sua **velocità di dissociazione** determinano l'accumulo o la distruzione delle nubi di gas molecolare. Se predomina la formazione, si accumulano molecole, mentre se predomina la dissociazione si accumulano atomi o ioni provenienti dalla distruzione delle molecole già formate. La velocità di dissociazione dipende sia dalla temperatura, che favorisce le collisioni man mano che aumenta, sia dall'intensità di radiazioni o di particelle cosmiche in grado di dissociare la molecola. La temperatura gioca un ruolo fondamentale: se è troppo bassa, le particelle si muovono molto lentamente e la probabilità che esse si incontrino è rara. Ma se la temperatura è molto alta, le collisioni avvengono a velocità così alte da dissociare la molecola e favorire il ritorno allo stato di ioni o atomi. Si capisce dunque che ogni molecola avrà una sua



Figura 3.2 – Globuli di gas molecolare e polveri in una zona di formazione stellare. I singoli globuli, frammenti instabili della nube principale, collassano a formare nuove stelle. (Foto: ESO) .

temperatura “ideale” a cui le velocità degli atomi che la formano siano abbastanza alte da farli collidere ma non tanto alte da far “rimbalzare” le particelle dopo la collisione. Atomi più pesanti necessitano di temperature più alte per combinarsi e se una molecola già formata viene colpita da un atomo, può succedere che si formi una nuova molecola dagli atomi più pesanti mentre l’atomo più leggero viene scagliato fuori. Un esempio è la reazione $\text{CH} + \text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}$, che crea ossido di carbonio dalla metilidina e ossigeno.

Nei processi di dissociazione gioca un ruolo importantissimo la radiazione UV che può far ruotare, vibrare o ionizzare le molecole fino a dissociarle. Se una nube molecolare è vicina a stelle molto calde, la regione intorno ad esse sarà priva di moltissime molecole e conterrà solo gas atomico o ionizzato. Basta però che la nube sia lontana dalle stelle più calde, e gli atomi tenderanno ad aggregarsi e a formare molecole. Nelle regioni più fredde delle nubi, a temperature di pochi gradi Kelvin si formano anche particelle ghiacciate di polvere. Esse costituiscono una buona schermatura dalla radiazione, anche se i raggi cosmici ad alta energia emessi dalle SN sono in grado di attraversare una buona parte della nube, dissociandone le molecole. La percentuale di polvere è bassa, ~ 1 grano su 10^{12} molecole ma data la massa della nube è in quantità sufficiente da renderla opaca al passaggio della luce. Le nubi molecolari più piccole, con masse fino a $\sim 50 M_{\odot}$, sono dette anche **globuli**. Scoperti dall’astronomo Bart Bok nel 1940, essi sono il luogo in cui si formano nuove stelle. La dimensione di questi globuli, circa $1/4$ di parsec, è comparabile a quello della nube di comete che circonda il sistema solare, la Nube di Oort. All’estremo opposto ci sono le **nubi molecolari giganti**, con masse da 10 000 a un milione di volte la massa del Sole. Esse appaiono

Dove nascono gli elementi e le molecole

molto irregolari e sono nella maggior parte invisibili all'osservazione ottica. Per esempio, tutta la regione della costellazione di Orione è attraversata da una nube molecolare gigante.

La molecola più abbondante è naturalmente quella fatta da due atomi di idrogeno, H_2 detta **idrogeno molecolare**. Ci si potrebbe aspettare che essa si formi dalla semplice collisione a bassa velocità di due atomi di idrogeno, per associazione radiativa, secondo la reazione $H + H \rightarrow H_2 + \gamma$, ma questa reazione non è efficiente nello spazio ed è molto lenta nelle regioni di gas a bassa densità, con poche collisioni. Essa richiede la presenza di grani di polvere per diventare molto efficace. Perciò in genere dove c'è polvere ci si aspetta di trovare anche l'idrogeno molecolare. L'idrogeno forma anche uno ione molto importante nella formazione di nuove molecole, l' H_3^+ , stabile alle basse densità e temperature dello spazio interstellare. Gli atomi più abbondanti creati dalle stelle partendo dall'idrogeno sono elio, carbonio, azoto e ossigeno. L'elio è un gas nobile, ovvero un elemento chimico in cui gli elettroni riempiono tutti i livelli all'interno dei vari gusci elettronici. Come risultato, questi elementi non tendono a formare composti chimici e restano gas puri, fatti di un solo atomo. Invece carbonio, azoto e ossigeno reagiscono tra loro e con l'idrogeno, formando vari composti.

Le reazioni che formano molecole sono tantissime e variano in base alla densità e le temperature, come descritto in dettaglio nei materiali on line di questo libro¹³. Noi descriveremo brevemente quelle di maggior interesse per l'Astrobiologia, riguardanti l'idrogeno e i composti di carbonio, azoto e ossigeno. I processi di formazione di queste molecole dipendono da diversi fattori ambientali, quali la temperatura, la densità di particelle e di radiazione in cui si trovano gli atomi e le molecole. A basse densità e temperature le reazioni in genere sono lente, come detto prima. Gli atomi neutri si incontrano raramente e se si legano tra loro devono restare stabili per lungo tempo per potersi accumulare. Se essi si trovano in forma ionica, allora possono formarsi più facilmente dei legami chimici.

Senza approfondire le varie reazioni che possono avvenire in una nube, ricordiamo che ossigeno, carbonio e azoto presenti nel gas interstellare possono interagire con H_3^+ e successivamente scambiare molecole di H_2 fino a formare ossidrilico (OH), acqua (H_2O), metano (CH_4) e ammoniaca (NH_3). Dall'ossidrilico viene formato ossido di carbonio (CO) e HCO. L'ossido di carbonio è la molecola più abbondante dopo l'idrogeno molecolare, con un valore di 10^{-4} volte rispetto ad esso. All'epoca attuale sono state trovate nello spazio numerosissime molecole, alcune delle quali di interesse biologico come l'acqua o la formaldeide. Nel mezzo inter-

¹³ su: <https://www.galletta.it/gg/astrobiologia2021>

stellare l'acqua è sotto forma di gas, mentre la forma liquida, così importante per la vita, non può esistere in queste condizioni di bassissima pressione. Le molecole d'acqua possono però aggregarsi a formare ghiacci, che si addensano anche sulle particelle di polvere per condensazione.

Alcune molecole semplici possono formarsi anche nelle stelle rossastre. Per esempio, ossidi come SiO e MgO oppure composti di carbonio legati da atomi di idrogeno quali CH_2^+ , CH_3^+ , CH_4^+ ecc., con un numero crescente di atomi legati insieme. Anche in questo caso la formazione di queste molecole può essere favorita dalla presenza di grani di polvere. Queste molecole nelle giganti rosse possono essere trasportate dal flusso di particelle del vento stellare e diffondersi nello spazio. Esse restano invece intrappolate intorno alle stelle più piccole, che hanno un vento stellare meno efficiente e un'accelerazione di gravità più forte.

Ma come si può rivelare la presenza di molecole in una nube di gas rarefatto che si trova a centinaia o migliaia di parsec di distanza? Ogni molecola può emettere o assorbire fotoni con frequenze proporzionali alle sue variazioni di energia. Se la molecola passa da uno stato di energia maggiore a uno minore, essa emette un fotone. Se viceversa viene colpita da un fotone di energia sufficiente a far cambiare il suo stato energetico, lo assorbe. Le variazioni di energia di una molecola possono derivare da salti degli elettroni da un livello all'altro, oppure da rotazioni o vibrazioni della molecola stessa. Per esempio, se una molecola come l'ossido di carbonio perde energia di rotazione, questa variazione viene trasmessa sotto forma di un fotone a varie frequenze tra cui quella a 115 GHz ($\lambda = 2,6$ mm), che cade nella regione delle microonde. Osservando una nube di gas con un radiotelescopio sensibile a quella lunghezza d'onda, sarà possibile registrare un segnale che indica la presenza di molecole di CO in rotazione. Se però il gas molecolare si trova a una temperatura inferiore, le singole molecole si muoveranno con velocità minore e le loro rotazioni e vibrazioni saranno sempre più lente. Le transizioni emetteranno e assorbiranno fotoni di energie e frequenze sempre minori, fino ad arrivare alle onde radio. Viceversa, se il gas è più caldo e le velocità più elevate, le molecole potrebbero dissociarsi e sparire. Si possono quindi rivelare molecole nello spazio misurando l'emissione di una serie di lunghezze d'onda, dette **bande molecolari**, derivanti dalle loro vibrazioni e rotazioni. Molte bande molecolari cadono nel campo delle microonde o delle onde radio e possono perciò essere rivelate tramite i radiotelescopi.

Per essere osservata una molecola deve soddisfare alcuni requisiti. Un primo requisito è quello che la molecola da rivelare abbia transizioni di energia che emettano lunghezze d'onda osservabili dal nostro pianeta. Per esempio, le radiazioni a lunghezza d'onda maggiore di qualche decina di metri sono riflesse dalla iono-

Dove nascono gli elementi e le molecole

sfera e non arrivano al suolo, restando così invisibili da parte dei radiotelescopi terrestri. Anche basandosi su radiotelescopi nello spazio, ancora non costruiti, queste radiazioni possono essere deviate dalla presenza di gas ionizzato tra questi e la sorgente di emissione. Un secondo requisito è che la molecola sia abbastanza abbondante, poiché l'intensità di un'onda elettromagnetica aumenta se è maggiore il numero di molecole che la emettono. Un terzo requisito è che il segnale sia tanto intenso da essere rivelato. Questo si può ottenere con radiotelescopi più grandi o più sensibili ma dipende sempre dalla distanza della sorgente. Infatti l'intensità di una radiazione elettromagnetica diminuisce in maniera proporzionale al quadrato della distanza (**legge del flusso luminoso**). Una sorgente a distanza doppia rispetto a un'altra di pari luminosità intrinseca sarà quattro volte ($=2^2$) meno intensa, mentre una sorgente dieci volte più lontana sarà cento volte ($=10^2$) più debole.

Nonostante questi limiti, dal 1937, anno in cui fu osservata la prima molecola interstellare, la metilidina (CH), l'osservazione con i radiotelescopi ha portato in pochi anni alla scoperta di un numero di molecole interstellari sempre maggiore, fino a superare le duecento, anche con decine di atomi. L'elenco viene riportato in fondo a questo capitolo. Le bande derivanti da transizioni tra stati vibrazionali o rotazionali delle molecole vengono trovate principalmente nelle regioni più dense del gas, dove il numero di molecole presenti nel campo di osservazione del radiotelescopio è sufficientemente grande da generare un segnale intenso. Oggi le nubi molecolari giganti che esistono nella galassia rappresentano il luogo principale in cui trovare molecole complesse.

Nella lista delle molecole scoperte ve ne sono alcune interessanti per l'Astrobiologia. Per esempio, nelle molecole biologiche ricorre la presenza di gruppi atomici che conferiscono loro particolari proprietà chimiche e fisiche; esse sono: $-\text{COOH}$ o $-\text{CO}_2\text{H}$ (gruppo carbossilico), $-\text{NH}_2$ (gruppo amminico), CH_3 (metile) e $-\text{OH}$ (ossidrilico), col segno $-$ che indica il legame chimico. Nello spazio interstellare questi gruppi compaiono all'interno di molecole, come acido formico (HCO_2H), formaldeide (H_2CO), metilammina (CH_3NH_2), alcool etilico ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) e molte altre. Tra le molecole trovate nel materiale interstellare che possono essere prodotte da reazioni che simulano una sintesi prebiotica vi sono: il già citato acido formico, l'acido acetico (CH_3COOH) e il formiato di metile (HCOOCH_3).

In laboratorio la combinazione di acido acetico e dello ione NH_2^+ sintetizza la glicina ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$), il più semplice degli amminoacidi di importanza biologica. Se nelle nubi molecolari si forma glicina dovrebbe essere presente anche acido acetico. Tuttavia mentre il formiato di metile è abbondante nelle nubi interstellari, l'acido acetico che ha la sua stessa composizione atomica, ma diversa

struttura (cioè è un isomero), è difficile da scoprire perché il gruppo metile ne riduce la possibilità di rotazione. Finora sono state osservate solo tracce di acido acetico alla frequenza di 90,2 MHz, nella parte più densa di nubi molecolari. In esse la densità raggiunge 10^{20} m^{-3} , enorme rispetto a quella del gas interstellare e la temperatura è circa 10 gradi Kelvin. Una debole riga spettrale non identificata nella stessa nube potrebbe inoltre essere attribuita alla glicina. Nella stessa banda di frequenza tra 82 e 92 MHz sono state scoperte righe di acetone $(\text{CH}_3)_2\text{CO}$.

Mancano all'appello diverse molecole importanti per la vita, ma come abbiamo affermato l'assenza di bande molecolari non esclude la presenza di molecole in un gas che si sta osservando. Esse potrebbero essere semplicemente più fredde oppure troppo grandi per ruotare o vibrare a velocità ed energie tali da cadere nel dominio osservabile. Quanto più una molecola è complessa, tanto meno velocemente essa potrà vibrare o ruotare senza essere distrutta e di conseguenza le sue variazioni di energia saranno piuttosto basse. Possiamo pensare che molecole molto complesse quali gli acidi nucleici possano emettere e assorbire radiazioni di lunghezza d'onda tanto elevate da cadere in regioni dello spettro elettromagnetico difficili da osservare. Tuttavia sappiamo che la formammide (HC_3NO) e l'acido cianidrico (HCN) nel vuoto e sotto i raggi UV, in laboratorio possono sintetizzare basi azotate se riscaldate a 700 K. Questo suggerisce la loro presenza anche nello spazio interstellare e indica che non occorre un pianeta come la Terra per formare molecole anche molto complesse. Esse si stanno formando e accumulando dalla nascita della Via Lattea, da 14 miliardi di anni.

Dove nascono gli elementi e le molecole

Tabella 3.2 Molecole trovate nello spazio. N rappresenta il numero di atomi presenti in ciascuna di esse.

N	Molecola	N	Molecola	N	Molecola	N	Molecola	N	Molecola
2	AlCl	3	C ₂ S	4	l-C ₃ H, l-CH ₃ ⁺	5	HC ₃ N	8	HCOOCH ₃
2	AlF	3	C ₂ P	4	c-C ₃ H	5	HCC-NC	8	CH ₃ COOH
2	AlO	3	CO ₂	4	C ₃ N, CN ₃ ⁻	5	HCOOH	8	H ₂ C ₆
2	ArH ⁺	3	CaNC	4	C ₃ O	5	NH ₂ CN	8	CH ₂ CHCHO
2	C ₂	3	FeCN	4	C ₃ S	5	NCCNH ⁺	8	CH ₂ CCHCN
2	CF ⁺	3	H ₃ ⁺	4	H ₃ O ⁺	5	HC(O)CN	8	CH ₃ CHNH
2	CH, CH ⁺	3	H ₂ C	4	C ₂ H ₂	5	C ₅	8	C ₇ H
2	CN, CN ⁺	3	H ₂ Cl ⁺	4	H ₂ CN, H ₂ CN ⁺	5	SiC ₄	8	NH ₂ CH ₂ CN
2	CO, CO ⁺	3	H ₂ O, H ₂ O ⁺	4	H ₂ CO	5	SiH ₄	8	(NH ₂) ₂ CO
2	CP	3	HO ₂	4	H ₂ CS	5	NH ₃ D ⁺	9	CH ₃ C ₄ H
2	CS	3	H ₂ S	4	HCCN	5	C ₅	9	CH ₃ OCH ₃
2	FeO	3	HCN	4	HCCO	5	H ₂ NCO ⁺	9	CH ₃ CH ₂ CN
2	HeH ⁺	3	HNC	4	HCNH ⁺	6	c-H ₂ C ₃ O	9	CH ₃ CONH ₂
2	H ₂	3	HCO, HCO ⁺	4	HOCO ⁺	6	E-HNCHCN	9	CH ₃ CH ₂ OH
2	HCl, HCl ⁺	3	HCP	4	HCNO	6	C ₂ H ₄	9	C ₈ H, C ₈ H ⁻
2	HF	3	HCS, HCS ⁺	4	HOCN	6	CH ₃ CN	9	HC ₇ N
2	OH, OH ⁺	3	HN ₂ ⁺	4	CNCN	6	CH ₃ NC	9	CH ₃ CHCH ₂
2	KCl	3	HNO	4	HOOH	6	CH ₃ OH	9	CH ₃ CH ₂ SH
2	NH	3	HOC ⁺	4	HNCO	6	CH ₃ SH	10	(CH ₃) ₂ CO
2	N ₂	3	HSC	4	HNCS	6	l-H ₂ C ₄	10	(CH ₂ OH) ₂
2	NO, NO ⁺	3	KCN	4	NH ₃	6	HC ₃ NH ⁺	10	CH ₃ CH ₂ CHO
2	NS	3	MgCN	4	HSCN	6	HCONH ₂	10	CH ₃ OCH ₂ OH
2	NaCl	3	MgNC	4	SiC ₃	6	C ₅ H	10	CH ₃ C ₅ N
2	MgH ⁺	3	NH ₂	4	HMgNC	6	C ₅ N	10	CH ₃ CHCH ₂ O
2	NaI	3	N ₂ H ⁺	4	HNO ₂	6	HC ₂ CHO	10	(CH ₃) ₂ CHCN
2	O ₂	3	N ₂ O	4	NH ₂ D, NHD ₂ , ND ₃	6	HC ₄ N	10	NH ₂ CH ₂ COOH
2	PN	3	NaCN	4	HDCO, D ₂ CO	6	CH ₂ CNH	11	HC ₈ CN
2	PO	3	NaOH	4	DNCO	6	C ₅ S	11	C ₂ H ₅ OCHO
2	SH, SH ⁺	3	OCS	4	PH ₃	6	NH ₂ CDO, NHDCHO	11	CH ₃ COOCH ₃
2	SO, SO ⁺	3	O ₃	4	MgCCH	7	c-C ₂ H ₄ O	11	CH ₃ C ₆ H
2	SiC	3	SO ₂	4	NCCP	7	CH ₃ C ₂ H	12	C ₆ H ₆
2	SiN	3	c-SiC ₂	4	SiH ₃ CN	7	H ₃ CNH ₂	12	C ₃ H ₇ CN

2	SiO	3	SiCSi	5	NH ₄ ⁺	7	CH ₂ CHCN	12	(CH ₃) ₂ CHCN
2	SiS	3	SiCN	5	CH ₄	7	H ₂ CHCOH	12	CO(CH ₂ OH) ₂
2	TiO	3	SiNC	5	CH ₃ O	7	C ₆ H, C ₆ H ⁻	12	C ₂ H ₅ OCH ₃
2	HD	3	TiO ₂	5	c-C ₃ H ₂	7	HC ₄ CN	13	₆ H ₅ CN
2	SiH	3	H ₂ D ⁺ , HD ₂ ⁺	5	l-H ₂ C ₃	7	HC ₅ O	13	HC ₁₀ CN
3	AlNC	3	HDO, D ₂ O	5	H ₂ CCN	7	CH ₃ CHO	13	HC ₁₁ N
3	AlOH	3	DCN	5	H ₂ C ₂ O	7	CH ₃ NCO	18	C ₁₀ H ₈ ⁺
3	C ₃	3	DCO	5	H ₂ CNH	7	HOCH ₂ CN	24	C ₂₄
3	C ₂ H	3	DNC	5	HNCNH	7	CH ₂ DCCH, CH ₃ CCD	24	C ₁₄ H ₁₀
3	CCN	3	N ₂ D ⁺	5	H ₂ COH ⁺	8	H ₃ CC ₂ CN	26	C ₁₆ H ₁₀
3	C ₂ O	4	CH ₃	5	C ₄ H, C ₄ H ⁻	8	H ₂ COHCHO	60	C ₆₀
								70	C ₇₀

4

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

4.1 La polvere cosmica

Il gas molecolare è mescolato a particelle di polvere, raggruppate a formare nubi. Esse rappresentano il maggior contenitore di elementi pesanti nella Galassia, fatta eccezione per le stelle. La polvere permette il raffreddamento delle nubi molecolari e scherma le molecole dagli effetti distruttivi delle radiazioni ultraviolette emesse dalle stelle. Inoltre la polvere è in grado di raffreddare le nubi impedendo il passaggio della radiazione infrarossa e ne facilita il collasso gravitazionale, come descritto nella Sezione 3.1.

Le particelle di polvere assorbono la luce ricevuta dalle stelle vicine in un ampio intervallo di lunghezze d'onda e la diffondono nello spazio circostante. Esse si comportano in maniera diversa dalle molecole, che assorbono soltanto le lunghezze d'onda corrispondenti alle loro variazioni di energia interna e lasciano passare tutte le altre. La somma dell'effetto di diffusione e assorbimento della luce da parte della polvere è detta **estinzione**. L'estinzione della luce delle stelle, causata dai grani di polvere che si trova tra noi ed esse, varia in maniera inversamente proporzionale alla lunghezza d'onda: i raggi ultravioletti e la luce azzurra, di minor lunghezza d'onda, vengono assorbiti in massima parte, mentre i raggi infrarossi e le onde radio attraversano facilmente la nube. Per esempio la luce ultravioletta a 183 nm viene assorbita 4 volte di più di quella verde a 550 nm. Per contro la radiazione infrarossa a 1000 nm (= 1 μ m) è assorbita solo del 57% rispetto a quella verde. Si tratta di un effetto che vediamo tutti i giorni: quando c'è una maggiore quantità di polvere nell'aria, i tramonti e le albe sono più rossi. Nelle foto astronomiche, la luce delle stelle dietro le nubi di polvere viene affievolita e appare più rossa.

La curva di estinzione ha un picco (cioè un'estinzione maggiore) intorno alla lunghezza d'onda di 220 nm; poi decresce per risalire nel lontano ultravioletto, come mostrato in Figura 4.1. Vi sono tuttavia sostanze le cui righe sono direttamente rilevabili in assorbimento nello spettro della luce stellare che attraversa le nuvole di polvere e che giunge fino a noi. In aggiunta all'e-

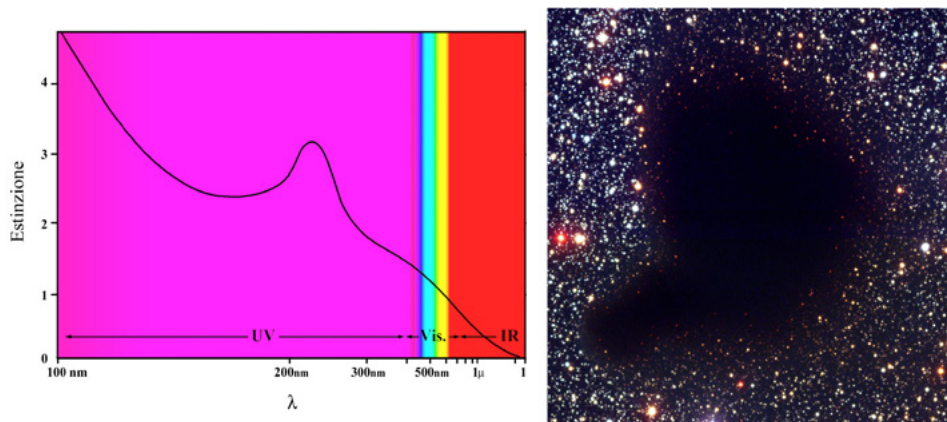


Figura 4.1 – *A sinistra*: La curva di assorbimento della luce dovuta alla polvere interstellare. Il picco a 220 nm è dovuto alla presenza di granuli di grafite (Immagine: G.Galletta); *a destra*: La nube Barnard 68, con la luce delle moltissime stelle che stanno dietro che viene assorbita sui bordi del globulo fino a sparire (Foto: ESO).

stinzione, viene spesso osservata una polarizzazione della luce. Essa indica che le particelle di polvere sono allungate e orientate in una certa direzione dello spazio. L'allineamento è quasi sempre dovuto alla presenza di un campo magnetico.

Lo studio delle particelle di polvere dello spazio interstellare non può essere svolto su campioni prelevati in loco. Tuttavia diverse sonde spaziali negli ultimi anni hanno eseguito analisi delle polveri nel Sistema Solare, e alcune di esse, come la Stardust, hanno riportato sulla Terra dei campioni. La sonda Philae della missione Rosetta è atterrata sulla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko nel 2014 analizzandola per due anni; altre sonde spaziali hanno prelevato dei campioni dal suolo degli asteroidi Eros e Itokawa e dal sottosuolo di Ryugu, per riportarli sulla Terra. Parallelamente all'analisi dei campioni, lo studio della polvere interstellare viene fatto ricreando in laboratorio condizioni ambientali simili a quelle spaziali e studiando la condensazione di grani di polvere e molecole. Una volta generati questi materiali, si possono confrontare le loro curve di estinzione della luce con quelle osservate nello spazio. In base a questo confronto è possibile creare modelli teorici che spieghino le proprietà osservate.

4.2 La composizione delle polveri

I modelli attuali prevedono la presenza di quattro tipi di particelle, che possono coesistere nelle stesse regioni di spazio, con variazioni di composizione chimica locali entro pochi parsec.

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

- **Granuli di carbonio.** Questi sono presenti sotto forma di grafite, la stessa sostanza delle matite, oppure carbonio amorfo idrogenato (HAC) con dimensioni inferiori a 10 nm. Essi sarebbero responsabili del grande picco di assorbimento ultravioletto a 220 nm, visibile in Figura 4.1. In alcune regioni, formate da gas espulso da stelle evolute, sono visibili bande di emissione infrarosse a lunghezze d'onda a circa 340 nm attribuibili a diamanti, cioè carbonio puro in forma cristallina.
- **Granuli di silicati.** Un secondo tipo di granuli è composto da silicati amorfi, con dimensioni entro 30 nm. Il silicio è rivelabile attraverso un forte assorbimento della luce infrarossa a circa 970 nm (= 0,97 μm).
- **Granuli ghiacciati.** I granuli di carbonio e quelli di silicati rappresentano il core di granuli di polvere con dimensioni maggiori, che nascono a temperature tra i 10 e i 20 K. A questi valori bassissimi, nelle zone più dense delle nubi molecolari gli atomi presenti possono colpire il granulo e rimanervi attaccati formando uno strato congelato (ghiacci). Secondo gli studi attuali, la formazione di ghiacci può avvenire solo quando le particelle iniziali sono più grandi di qualche decina di nanometri. Particelle più piccole non riuscirebbero a trattenere gli atomi o le molecole presenti nel loro ambiente in maniera efficace. In questo processo il granulo di polvere, molto più grande di una singola molecola, fa da "attrattore" e collante delle molecole che ha intorno. Attratto dai granuli, l'idrogeno presente può combinarsi a formare ghiacci d'acqua (H_2O), di ammoniaca (NH_3) e altre molecole come alcol metilico (CH_3OH) e metano (CH_4). Quest'ultimo però nel mezzo interstellare è presente maggiormente in fase gassosa anziché sotto forma di ghiacci. Anche l'ossido di carbonio (CO) può depositarsi sul grano di polvere e formare ghiacci insieme all'anidride carbonica (CO_2). Una molecola che occorre menzionare è l'ossisolfuro di carbonio (OCS), l'unica specie contenente zolfo identificata nei ghiacci. Infine, un altro tipo di molecola di cui si può presumere l'esistenza è indicata con XCN, in cui la X è un nome generico per indicare un atomo legato al cianogeno, per esempio l'ossigeno nella molecola OCN. Alla fine del processo di accrescimento si produrrebbe quindi un terzo tipo di granuli con dimensioni da 250 a 500 nm formati da un core di silicati (Mg, Si, Fe) e uno strato di materiale organico e ghiacci. I granuli agiscono quindi da catalizzatori di reazioni chimiche, formando nuclei di condensazione per molecole più complesse.
- **PAH.** In mezzo alle polveri esistono alcune particelle estremamente piccole, meno di 10 nm, costituite da **idrocarburi policiclici aromatici** (PAH). Gli idrocarburi sono sostanze composte da carbonio e idrogeno; essi sono detti policiclici quando gli atomi di carbonio sono organizzati in strutture chiuse ad anello (**composti ciclici**). In alcuni di questi composti gli elettroni leganti

sono in grado di muoversi nella molecola (**composti aromatici**). Molecole dotate delle tre caratteristiche illustrate in precedenza sono dette idrocarburi policiclici aromatici e sono ricorrenti nelle sostanze biologiche. I PAH dello spazio interstellare sono responsabili dell'assorbimento tra 100 e 150 nm. L'energia assorbita viene riemessa attraverso una serie di bande molecolari che appaiono nell'infrarosso.

La formazione di ognuna di queste quattro componenti avviene con processi diversi, che si svolgono sia nello spazio interstellare che nelle zone intorno alle stelle.

4.3 Il ciclo di formazione dei granuli

I tempi di formazione spontanea della polvere interstellare all'interno delle nubi molecolari sono superiori al milione di anni per quelle più dense (con densità di 10^{10} particelle m^{-3}) e superiori al miliardo di anni in quelle diffuse (10^7 particelle m^{-3}). Sebbene questo processo appaia molto lento, in una nube di gas della Via Lattea la nascita di granuli e l'assorbimento di molecole sotto forma di ghiacci sarebbe tanto efficiente da riuscire a rimuovere tutto il gas nell'arco di dieci milioni di anni, trasformandolo in granuli di polvere. Invece le osservazioni di zone in cui si formano stelle mostra la presenza di polveri, ma anche di una grande quantità di gas. Per spiegare questo aspetto occorre pensare che, insieme al processo di condensazione, ci sia un processo di distruzione dei granuli per evaporazione delle sostanze che li compongono. Responsabili di questo processo sono la radiazione ultravioletta delle stelle calde vicine (bianche e azzurre) e i raggi cosmici emessi dalle supernovae, che distruggono parte del rivestimento esterno dei granuli. Questa azione distruttiva è in realtà un meccanismo che permette di far avanzare la sintesi di molecole verso forme più complesse. Le molecole già sintetizzate su alcuni granuli si liberano nuovamente nello spazio e si ricombinano con altre sulla superficie di altri granuli, formando nuove sostanze. Lungi dall'essere uno spazio immobile, il gas interstellare è un crogiolo di nuove catene molecolari.

Un secondo ambiente favorevole alla formazione di polvere è quello delle regioni circumstellari di stelle rosse. Se vicino alla nube si sono già formate stelle di piccola massa (nane rosse) o si sono già evolute stelle di massa maggiore fino a formare giganti e supergiganti rosse, nella parte esterna delle loro atmosfere i tempi di formazione per i granuli di polvere possono essere più brevi, poiché la densità di molecole è molto più alta, $10^{19} m^{-3}$. Grazie a questa densità, un milione di volte inferiore rispetto a quella dell'atmosfera terrestre al livello del mare, eppure enorme rispetto a quella delle nubi, le collisioni costruttive tra molecole sono molto più frequenti e il processo di formazione è molto più efficiente. Le stelle

Dalla polvere interstellare ai protopianeti



Figura 4.2 – Evaporazione della polvere nelle nebulose M16 (*a sinistra*) e Testa di cavallo (*a destra*) causata dalla luce delle stelle vicine. (Foto: J. Hester & P. Scowen - ASU, HST, NASA e ESO)

supergiganti rosse AGB come Betelgeuse sono le maggiori produttrici di polveri nella galassia. Anche le temperature di queste regioni, tra 1000 e 2000 K, sono favorevoli: esse sono abbastanza alte da permettere agli atomi di ridistribuirsi cambiando la configurazione delle molecole, ma abbastanza basse da permettere la formazione di molecole stabili. Per esempio, se in una regione circumstellare è presente alluminio oppure titanio o silicio, a 1500 gradi essi possono condensarsi in particelle di corindone (Al_2O_3), ossido di titanio (TiO) o di silicio (SiO). Il corindone raffreddandosi può reagire con i gas di SiO, Ca e Mg per formare altri composti che permettono la condensazione di olivine e pirosseni, materiali tipici dei pianeti rocciosi. Le variazioni locali di composizione possono inoltre favorire la formazione di tipi particolari di granuli anziché altri: per esempio, in stelle dove il carbonio è più abbondante dell'ossigeno, esso forma acetilene (C_2H_2) e PAH ed è disponibile a formare catene di molecole più complesse. In queste stelle possono formarsi granuli di grafite, carbonio amorfo e composti simili contenenti principalmente carbonio. Invece in zone circumstellari dove l'ossigeno è più abbondante il carbonio rimane per lo più in forma gassosa, sotto forma di molecole di CO, e non concorre a formare polvere. Una volta formate, tutte queste molecole vengono spinte verso lo spazio circostante dalla radiazione luminosa e dalle particelle del vento provenienti dalla stella. Sono inizialmente in forma di gas, ma allontanandosi nello spazio si raffreddano condensandosi in particelle solide (reazioni di **condensazione**). Le particelle di grafite, se presenti, possono inoltre schermare le molecole dalla radiazione ultravioletta della stella che, seppur bassa, può distruggerle quando sono ancora nei suoi dintorni.

Un terzo ambiente favorevole alla formazione di polveri è il materiale espulso a migliaia di km al secondo dalle stelle che esplodono, come novae e supernovae. Diffondendosi nello spazio, questo materiale si raffredda producendo polveri. Le condizioni fisiche di queste regioni riproducono quindi quelle delle stelle fredde

e delle nubi più diffuse.

Vista su grande scala, l'evoluzione delle nubi di gas e polveri è dunque un intreccio di processi di formazione di granuli e molecole, favoriti dalla gravità e dalle forze elettriche, e processi di scissione o evaporazione, provocati dalla radiazione ultravioletta e dai raggi cosmici. Dove prevalgono i primi processi, la formazione di nubi di polvere procede in maniera massiccia, sia nelle nubi molecolari dense sia intorno alle stelle rosse. Per più di dieci miliardi di anni le nubi galattiche sono state continuamente arricchite di polvere tramite questi meccanismi produttivi. Viceversa, vicino alle stelle calde i processi di evaporazione predominano e le nubi si dissolvono producendo nuovamente gas diffuso. Un bell'esempio di nube di polvere in evaporazione si può osservare nelle immagini dallo spazio della nebulosa Aquila nella costellazione del Serpente (Figura 4.2). Le stelle giovani e molto calde nate da questa nebulosa distruggono il suo materiale, che evapora formando filamenti visibili nelle immagini del telescopio spaziale. Lo stesso fenomeno rende sfumata l'immagine della nebulosa Testa di cavallo, nella costellazione di Orione, mostrata nella stessa figura.

Il ciclo di formazione e distruzione delle nubi di gas e polveri si innesta quindi nel ciclo di formazione stellare. Una nube ricca di polveri, densa e fredda, può frammentarsi facilmente in pezzi più piccoli come i globuli di Bok descritti nella Sezione 3.4, che collassano a formare stelle con pianeti intorno (**nubi protostellari**). Queste ultime si riscaldano velocemente poiché la polvere trattiene all'interno buona parte della radiazione prodotta durante il collasso. I granuli contenuti nella nube protostellare tendono a cadere verso il centro e poiché la nube ruota si accumulano sul suo piano di rotazione (piano equatoriale), formando un disco detto disco protoplanetario, come vedremo più avanti. Dove la polvere è riscaldata dalla stella centrale, essa perde tutte le sostanze volatili, mentre nella parte esterna e più fredda la sua composizione chimica resta invariata. Al centro del disco protoplanetario si ricreano condizioni simili a quelle delle regioni circumstellari: alte densità e temperature di poche migliaia di gradi permettono la nascita di nuovi granuli di polvere che si muovono poi verso l'esterno mescolandosi alla polvere preesistente. La polvere del disco protoplanetario cambia quindi la sua composizione dall'interno verso l'esterno, arricchendosi in silicati, metalli e sostanze non volatili vicino alla stella e conservando i ghiacci e i gas in periferia. Se i ghiacci formati dalle sostanze più volatili quali CO, O₂ e N₂ evaporano al primo riscaldamento della nube sopra ~40 K, i ghiacci d'acqua invece possono resistere fino a temperature di 90 K e sopravvivere alle prime fasi di formazione stellare e planetaria. I composti racchiusi da questi ghiacci concorrono quindi alla composizione dei pianeti che si formano più all'esterno del disco protoplanetario

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

e dei corpi solidi più piccoli contenuti in esso.

Nel nostro viaggio attraverso la formazione degli elementi chimici iniziato nel Capitolo 3 siamo giunti nuovamente alla nascita di una stella attraverso il collasso gravitazionale di una nube di gas. Abbiamo dunque descritto un ciclo che si è aperto per la prima volta circa 14 miliardi di anni fa, con la nascita della Via Lattea a partire da una grande nuvola di idrogeno quasi puro. Dopo le prime nascite ed esplosioni di stelle, la Galassia ha acquisito però nuovi componenti, le molecole di gas interstellare e la polvere. Quest'ultima, agendo da catalizzatore di reazioni chimiche che non potrebbero resistere nelle condizioni dello spazio aperto, trasporta lontano ghiacci e molecole grazie al vento stellare, che permette ai suoi granuli di viaggiare lentamente. La nascita di nuove stelle può contare quindi su nubi di gas e polveri che contengono una gran quantità di molecole organiche, pronte a concorrere a quei fenomeni biologici che nel Sistema Solare si sono svolti sul pianeta Terra. L'analisi dei processi di formazione dei pianeti sarà dunque il nostro nuovo argomento da analizzare nelle prossime Sezioni. Prima di iniziare lo studio dei pianeti, occorre però spingere la nostra ricerca di molecole organiche in quelli che sono oggi i resti della nuvola di polvere che ha formato il Sistema Solare, attraverso il processo di formazione dei planetesimi, germi di quelli che saranno i pianeti veri e propri.

4.4 La nascita del disco protoplanetario

Continuando nel nostro studio, che ci porta dalle grandi nubi galattiche di idrogeno all'origine della vita, abbiamo visto che il Sistema Solare è nato da una nube di gas e polveri in collasso gravitazionale. Nel Capitolo 3, dedicato alla nascita degli elementi chimici, ci siamo concentrati sull'evoluzione della parte centrale della nube in collasso, che formerà la nuova stella. Successivamente in questo capitolo abbiamo discusso su come le particelle solide presenti nella nube possano favorire il collasso mescolandosi al gas.

Molto probabilmente la nube protostellare ruotava su un proprio asse. Il motivo di credere a questa rotazione è che tutti i pianeti e la maggior parte dei corpi più piccoli del Sistema Solare orbitano nello stesso verso intorno al Sole. Anche la rotazione del Sole e della maggior parte dei pianeti attorno al proprio asse ha lo stesso verso, con eccezione di Venere e Urano. Viene spontaneo pensare perciò che questo movimento rotatorio, suddiviso tra i corpi del Sistema Solare, derivi da un moto di rotazione globale che esisteva già nella nube originaria. Perché mai le nubi primordiali dovevano ruotare? Se si pensa alla loro forma, si nota che esse sono irregolari o allungate. Nubi vicine tra loro si attirano a causa della forza di gravità, ma per la loro forma asimmetrica il movimento deve essere simile a

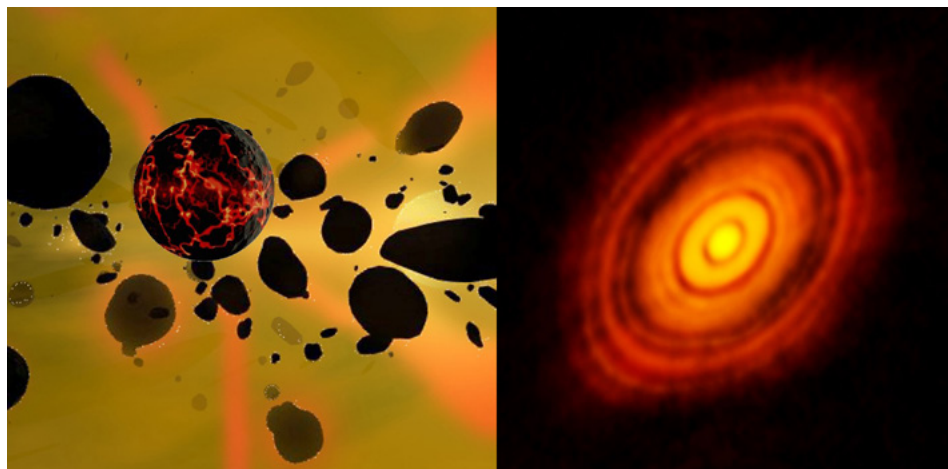


Figura 4.3 – *A sinistra*: Rappresentazione della formazione di protopianeti attraverso gli impatti di planetesimi all'interno del disco protoplanetario (Immagine: G. Galletta). *A destra*: immagine radio del disco protoplanetario della stella HL Tauri, in cui sono visibili i solchi creati dal passaggio dei protopianeti nelle loro orbite (Foto: ALMA - ESO/NAOJ/NRAO).

quello di uno spillo a cui viene avvicinata una calamita: esso tende inizialmente ad allinearsi con la calamita prima di esserne attratto. Immaginiamoci l'incontro di due nubi interstellari che ad alta velocità si passino vicino, allontanandosi poi nello spazio: esse non collideranno tra loro, ma tenderanno a perturbarsi e ad allinearsi l'una verso l'altra. Poiché nello spazio l'attrito è trascurabile, una volta che una nube ha iniziato un moto di allineamento ruotando attorno a un proprio asse, questo moto continuerà indefinitamente se nessuna altra forza interverrà ad alterarlo. La perturbazione tra due nubi può far nascere quindi un moto di rotazione.

Man mano che la nube collassa, la rotazione si evolve seguendo la legge di **conservazione del momento angolare**. Essa afferma che il prodotto tra il raggio di un oggetto che ruota e la sua velocità di rotazione è costante. Perciò se la sua dimensione (il raggio) cambia per contrazione, la velocità di rotazione si adegua, aumentando di conseguenza. Questo effetto può essere verificato osservando i pattinatori su ghiaccio: partendo da una posizione con le braccia larghe, iniziano a fare una piroetta e via via che le loro braccia si chiudono verso il petto la loro velocità aumenta. Anche la nube che ha formato il Sistema Solare deve aver ruotato molto lentamente all'inizio del suo collasso gravitazionale. La sua grande contrazione ne ha aumentato la velocità fino a livelli simili a quelli attuali. Durante il collasso però si fa strada una forza che si oppone alla gravità: la forza centrifuga. Sull'equatore essa diventa così forte da eguagliare la forza di gravità e arrestare la caduta di materiale verso il centro. Man mano che ci si sposta dal piano equatoriale, l'efficacia della forza centrifuga diminuisce, fino a svanire quando si arriva ai

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

poli di rotazione della nube. Lungo questa direzione il materiale continua a cadere verso il centro fino a che la pressione del gas, compresso e riscaldato, non riesce a bilanciarne la caduta. Dato che la nube non è un corpo rigido, essa si schiaccia sui poli, diventando un disco. Chiamiamo questa struttura **disco protoplanetario**, poiché in esso nasceranno i pianeti. Un disco protoplanetario è quindi un insieme di molecole, polveri e corpi solidi che ruota intorno a una stella in formazione. Il nostro Sistema Solare era probabilmente così composto circa 5 Ga fa e la sua nube protosolare dovrebbe essersi schiacciata di 1000 volte in circa 200 ka.

4.5 Formazione dei planetesimi e dei protopianeti

All'interno del disco protoplanetario i granuli presenti tendono ad addensarsi, legandosi tra loro attraverso forze elettriche, come ad incollarsi l'un l'altro (processo di **sticking**), fino a costituire oggetti più grandi. I granuli tendono anche ad accumularsi sul piano equatoriale del disco, cadendo verso il centro in un lento moto a spirale. In un tempo di circa 10 000 anni l'aggregazione di un numero sempre maggiore di granuli è in grado di costruire piccoli corpi celesti con dimensioni di qualche chilometro, detti **planetesimi**. Nella nascita di stelle è la gravità a comprimere il gas fino a innescare la fusione nucleare; nella nascita dei pianeti invece l'aggregazione avviene per sticking fino a dimensioni di centinaia di metri o pochi km. Poi le collisioni tra planetesimi e materiale residuo danno l'avvio a ulteriori processi di accrescimento che formano i pianeti veri e propri. I planetesimi nati originariamente vicino al Sole, tra l'attuale orbita di Mercurio e quella di Cerere, dovevano essere privi di ghiacci ed elementi volatili a causa della temperatura del Sole in fase di formazione, e costituiti principalmente di metalli e rocce; quelli nati lontano dal Sole, a basse temperature, si saranno formati con tutti i composti chimici solidi esistenti nel disco.

Gli oggetti che si muovono oggi nel Sistema Solare hanno velocità dell'ordine di alcuni km/s, corrispondenti a diverse migliaia di km/h. Anche le meteoriti che cadono sulla Terra hanno in genere velocità tra i 10 e i 60 km/s (più veloci di un missile!). A queste velocità la collisione è in grado di fondere la maggior parte del loro materiale. Lo stesso accade nel sistema solare primordiale con i planetesimi. Essi urtandosi ad alta velocità possono disgregarsi oppure fondersi, a formare un corpo di dimensioni maggiori. Queste collisioni, iniziate all'origine del Sistema Solare, portano alla costruzione di grandi masse (**protopianeti**) attraverso la fusione di numerosi planetesimi di piccole dimensioni. Nel caso della Terra, si stima che il tempo necessario per la sua aggregazione alle dimensioni attuali sia stato all'incirca di 200 Ma.

I planetesimi prima, e i protopianeti poi, tendono ad attrarre non solo corpi di

dimensioni simili ma anche tutto il gas e le polveri che incontrano al loro passaggio. Questo materiale può accrescere ulteriormente la massa del pianeta in formazione ma non viene fuso, poiché le velocità con cui esso viene acquisito non sono molto elevate, e quindi mantiene parte della sua composizione chimica. Se si tratta di gas del disco protoplanetario, questo può formare una tenue atmosfera iniziale, arricchita dei componenti chimici presenti. Se questo gas è molto più abbondante della componente rocciosa può stratificarsi fino a formare una spessa coltre che ricopre completamente il pianeta. Possiamo pensare che nella prima fase di formazione di un sistema planetario si formino in maniera casuale piccoli oggetti rocciosi verso la stella e oggetti ghiacciati all'esterno, insieme a pianeti giganti con un nucleo roccioso ed enormi strati atmosferici come lo sono Giove e Saturno oggi.

I pianeti giganti nati all'esterno del disco protoplanetario non sono però stabili nelle loro orbite. Il materiale del disco protoplanetario frena il loro moto, scambiando energia cinetica e momento angolare, ed essi tendono a spiraleggiare muovendosi verso la stella al centro. Secondo le simulazioni fatte al computer della nascita del Sistema Solare e note come **Modello di Nizza**, Giove e Saturno per 100 ka si sono avvicinati al Sole, sconvolgendo le orbite degli oggetti che trovavano sulla loro strada. I planetesimi vicini al Sole si sono mescolati con altri provenienti dall'esterno e questo ha alimentato le collisioni che hanno portato alla formazione dei pianeti interni come Mercurio, Venere, la Terra e Marte. La proto-Terra poi si è scontrata con un protopianeta grande come Marte, detto **Theia**, che 4,5 miliardi di anni fa si sarebbe scontrato col nostro pianeta formando coi suoi residui la Luna. I due pianeti giganti, avvicinatasi al Sole fino a circa la distanza attuale della Terra, 1 U.A., si sarebbero scambiati energia cinetica allontanandosi così verso l'esterno e spingendo verso l'esterno anche Urano e Nettuno. In questo "Grande giro di boa" (ipotesi del **Gran Tac**) i planetesimi più esterni sarebbero stati proiettati fuori, creando la nube di comete con miliardi di oggetti. Il tutto si sarebbe svolto nei primi 150 ka. Gli oggetti più piccoli, residui dei planetesimi primordiali oggi sono gli **asteroidi** e le **comete**.

I protopianeti nascono dunque da miliardi di collisioni ad alta velocità, che scaricano grandi quantità di energia alla loro superficie, e gli impatti continuano secondo il modello precedente in un periodo detto **Grande Bombardamento**, tra 4,3 e 3,5 Ga circa. All'interno del disco protoplanetario la trasmissione del calore del Sole avveniva in maniera convettiva, molto più efficiente della trasmissione radiativa che avviene oggi, con i fotoni solari che attraversano uno spazio quasi vuoto. Per questa ragione 4,6 miliardi di anni fa, quando la Terra era ancora avvolta nella nebulosa protoplanetaria, la temperatura nei suoi dintorni doveva

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

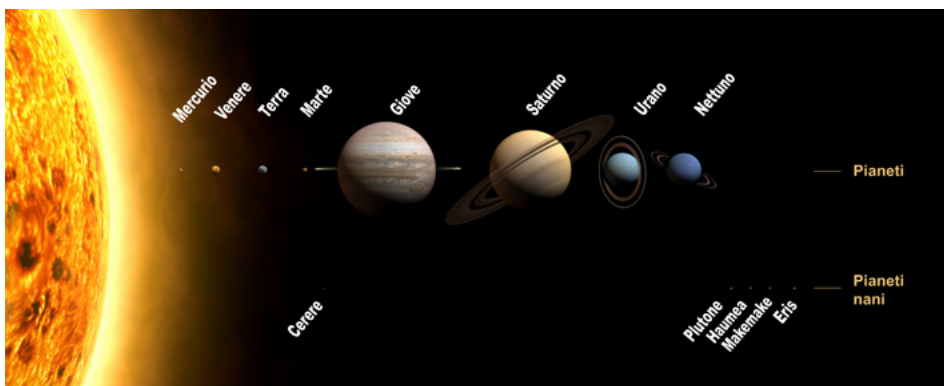


Figura 4.4 – Il Sistema Solare attuale, con gli otto pianeti e i cinque pianeti nani finora noti (Immagine: G. Galletta, IAU).

essere intorno a 1000 K. Questa temperatura è in grado di fare evaporare qualsiasi composto organico, ma permette la condensazione di sostanze non volatili, come metalli e silicati. Inoltre l'energia degli impatti, la contrazione del pianeta e il decadimento di elementi radioattivi presenti nel sottosuolo hanno prodotto ulteriore calore, facendo assomigliare la Terra primordiale a una sfera quasi fusa di ferro, nichel, alluminio e con granuli di silicio.

Questa fase semifluida è responsabile anche della progressiva immersione dei materiali più pesanti (ferro e nichel) verso il centro di gravità, a formare un nucleo metallico. L'affondamento delle goccioline di metallo fuso ha lasciato invece all'esterno i materiali più leggeri (silicati). Il pianeta ha subito così una differenziazione chimica, con un nucleo metallico, un mantello caldo e plastico e una crosta di silicati più leggera del mantello. Questa struttura a strati dovrebbe essere presente in tutti gli attuali pianeti. Naturalmente tale differenziazione non può essere avvenuta per gli oggetti più piccoli come gli asteroidi o molto freddi come le comete, formati in buona parte per accrescimento progressivo e con poche collisioni ad alta velocità. Così ci si aspetta che corpi planetari più piccoli di 500 km di raggio (praticamente tutti gli asteroidi e molti satelliti) non siano differenziati nel loro interno. Essi sono troppo piccoli affinché il peso degli strati sovrastanti riesca a riscaldare l'interno e non dovrebbero possedere elementi radioattivi in quantità tale da produrre un calore in grado di fonderlo. Sono come dei mucchi di pietre e polveri di forma irregolare.

Man mano che la massa dei protopianeti aumenta, anche i ghiacci e i gas del disco protoplanetario vengono attratti, costruendo uno strato primordiale di atmosfera e ripulendo lo spazio intorno. L'IAU ha distinto nel 2006 due categorie di pianeti nel Sistema Solare: i **pianeti**, da Mercurio a Nettuno, che hanno forme quasi

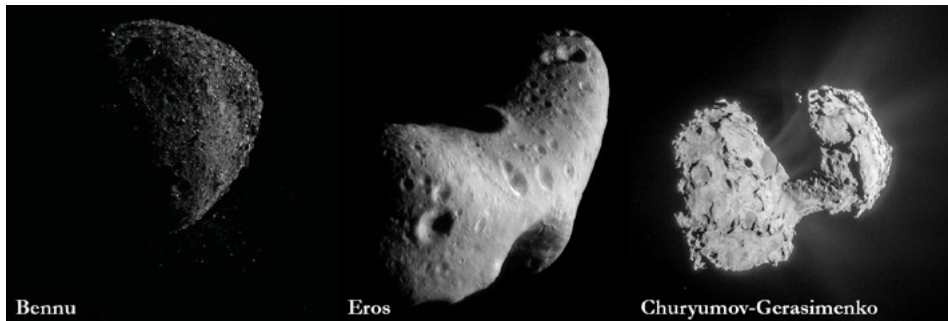


Figura 4.5 – Asteroidi e comete su cui sono atterrate sonde spaziali. Da sinistra: gli asteroidi Benu, con uno sciame di particelle che si disperdono nello spazio, ed Eros. A sinistra la cometa Churyumov-Gerasimenko. (Crediti: JPL/ NASA/Goddard/University of Arizona/Lockheed Martin, NASA/JPL/JHUAPL e JPL/ ESA/Rosetta/NAVCAM).

sferiche e hanno ripulito lo spazio intorno, e i **planeti nani**, più piccoli e ancora circondati da oggetti residui dei planetesimi primordiali. I pianeti nani orbitano all'interno di due fasce di asteroidi, che contengono più di 1 milione di oggetti osservati.

Quella più interna è la **Fascia Principale**, tra Marte e Giove (1,5 – 5 U.A.), formata da asteroidi con dimensioni inferiori a qualche decina di chilometri, con solo 26 di essi con raggio superiore ai 200 km. In questa fascia orbita il pianeta nano **Cere**, con un diametro di 932 km, e un asteroide grande la metà, l'asteroide **Vesta**. In realtà gli asteroidi più piccoli appaiono meno brillanti e sono molto più difficili da scoprire lontano dalla Terra. Di conseguenza non tutti gli asteroidi esistenti nel Sistema Solare sono stati scoperti. Vi possono essere milioni di piccoli asteroidi di poche centinaia di metri o meteoroidi di decine di metri non ancora avvistati. Un esempio è Dattilo, un minuscolo pezzo di roccia arrotondata grande poco più di 1 km che ruota intorno all'asteroide Ida, un corpo quasi cilindrico di $56 \times 24 \times 21$ km. Sebbene Ida fosse stato scoperto già dal 1884, sarebbe stato impossibile scoprire Dattilo da Terra ed è stata la sonda spaziale Galileo a fotografarlo per caso passando a 2400 chilometri di distanza. Su alcuni asteroidi come **Eros**, **Itokawa**, **Ryugu** e **Benu** (Fig. 4.5) sono atterrate sonde spaziali che ne hanno studiato la superficie e hanno riportato dei campioni sulla Terra. La fascia più esterna è detta **Fascia di Kuiper**, formata da corpi ghiacciati al di là dell'orbita di Nettuno. In essa orbitano altri pianeti nani, alcuni dotati di satelliti, come **Plutone**, **Haumea**, **Makemake** ed **Eris**, con diametri maggiori di 1500 km. Tra i più di mille oggetti noti, ci sono asteroidi con dimensioni di centinaia o un migliaio di km, come **Orcus**, **Qaoar**, **Gonggong** e altri. Nella Fascia di Kuiper i corpi che la compongono sono molto più grandi di quelli della Fascia Principale. Più esternamente, la nube di comete arriva fino a 50 000 U.A. ed è detta **Nube di Oort**. La dimensione delle

Dalla polvere interstellare ai protopianeti

comete lontano dal Sole è dell'ordine di decine di chilometri e la maggior parte della massa è costituita da ghiacci. La loro massa decresce ad ogni passaggio vicino al Sole per sublimazione del materiale e dispersione dei granuli di polvere che esse contengono. Alcune sonde spaziali hanno lanciato proiettili (**impattori**) per scavare sotto la superficie, come per la cometa **Tempel 1**, oppure sono atterrate, come nel caso della cometa **Churyumov-Gerasimenko** (Fig. 4.5).

I processi di collisione che hanno formato i pianeti continuano ancora oggi in quantità molto minore. Sulla Terra per esempio ogni milione di anni circa cade un asteroide di dimensione superiore a 1 km. Anche la pioggia di stelle cadenti, provocata dall'aspirazione di residui di comete rimasti in orbita, rappresenta un meccanismo simile all'attrazione della polvere da parte della Terra avvenuta sin dalla sua formazione. Gli impatti attuali sono molto meno frequenti di quelli primordiali, soprattutto perché la maggior parte del materiale del disco protoplanetario è già stata assorbita o espulsa dal Sistema Solare. La tenue atmosfera di idrogeno ed elio del pianeta Mercurio è anch'essa attribuibile a un meccanismo di cattura di atomi trasportati dal vento solare, mentre le gigantesche atmosfere dei pianeti esterni sono il risultato dell'acquisizione primordiale di gas. Nel corso del primo milione di anni, grazie alla fase T-Tauri del Sole, il disco protoplanetario del Sole si è svuotato di piccole particelle e lo spazio tra i pianeti è diventato trasparente.

Se oggi dunque tutti i pianeti ruotano nello stesso verso e hanno orbite vicine a uno stesso piano, il **piano dell'eclittica**, la ragione è che sono nati da un disco ruotante, il disco protoplanetario, il cui piano equatoriale ha determinato quello delle loro orbite, conservandone l'orientazione nello spazio. Anche la rotazione del disco deve essersi trasferita al moto di rivoluzione dei pianeti e in parte al loro moto di rotazione attorno al proprio asse. Questa situazione è il risultato delle innumerevoli collisioni avvenute per miliardi di anni, quando i protopianeti con orbite che si incrociavano tra loro hanno finito per urtarsi e si sono fusi insieme. A seguito dei ripetuti urti, le orbite sono diventate circolari, rendendo così impossibili altre collisioni e diventando stabili. Se tutti gli oggetti del Sistema Solare fossero in orbite circolari distanziate le une dalle altre, essi non si urterebbero mai tra loro. Tuttora oggetti su orbite molto ellittiche o inclinate rispetto al piano dell'eclittica possono collidere con altri pianeti o fuggire dal Sistema Solare. Le comete e alcuni asteroidi che si avvicinano al Sole, per esempio, si trovano tuttora nella condizione di potenziale collisione con i pianeti.

5

Origine dei pianeti e dei corpi minori

5.1 L'età della Terra

La Terra nasce ad alta temperatura e come risultato di impatti violentissimi, che ne sconvolgono la superficie per un miliardo di anni. L'entità del Grande Bombardamento sulla Terra può essere intuita osservando l'enorme quantità di crateri lasciati da planetesimi, asteroidi e meteoriti sulla Luna. Alcuni impatti sulla superficie lunare primordiale sono stati così violenti da perforarne la crosta e permettere la formazione di grandi laghi di lava proveniente dall'interno ancora fuso. Queste distese di lava basaltica solidificata, più scura della crosta circostante, formano quelle regioni che chiamiamo **mari lunari**. Ancora oggi questo bombardamento continua, sulla Terra come sugli altri pianeti, anche se in cinque miliardi di anni il numero di impatti è diminuito esponenzialmente col passare del tempo, man mano che lo spazio si ripuliva. Anche se grandi impatti sono rari all'epoca attuale (pochi ogni milione di anni), nel luglio del 1992 si è assistito alla collisione tra la cometa Shoemaker-Levy 9 e il pianeta Giove. Attratta dalla sua enorme forza di gravità, la cometa si è sgretolata in varie parti di alcuni km che si sono poi vaporizzate nell'attraversare la densa atmosfera del gigantesco pianeta.

Se gli impatti primordiali hanno trasferito energia alla superficie dei pianeti rocciosi, mentre le superfici si raffreddavano, il loro interno è rimasto caldo più a lungo per diverse ragioni. Una di esse è la pressione degli strati sovrastanti, che nel sottosuolo degli attuali continenti terrestri innalza la temperatura di circa 30 gradi per ogni chilometro (**gradiente geotermico**). Un secondo meccanismo di riscaldamento è dovuto alla presenza di isotopi radioattivi presenti nel mantello, tra cui torio, uranio e potassio radioattivo (Th^{232} , U^{235} e K^{40}). Se presenti in grande quantità, le particelle e la radiazione prodotte dal decadimento di questi isotopi possono riscaldare ed eventualmente fondere il materiale circostante. Questi processi sono tanto più efficaci quanto più un pianeta è massiccio; perciò i pianeti rocciosi più grandi come la Terra possiedono ancora un mantello plastico con zone fuse che smaltiscono il calore in modo convettivo, mentre pianeti più piccoli sono ormai inattivi e freddi. Quando si parla del mantello fuso, non bisogna im-

maginarsi un materiale fluido come le lave durante le eruzioni; piuttosto un fluido lento come l'asfalto, in grado di deformarsi a forti pressioni e alte temperatura. Sul nostro pianeta, la densità più bassa della crosta terrestre le permette di galleggiare sul mantello plastico.

I moti convettivi del mantello sono la causa del fratturarsi della crosta in enormi zolle, che si muovono lentamente l'una rispetto all'altra. Il materiale del mantello che arriva in superficie, liberatosi dalla enorme pressione degli strati sovrastanti, fluidifica in materiali molto più simili a un liquido, i magmi. Il magma che fuoriesce da queste fratture, chiamate **dorsali**, spinge le due zolle adiacenti verso l'esterno imprimendo così un moto che le allontana da una parte e le fa collidere con le altre dal lato opposto. Due zolle che si incontrano si comportano come un materiale plastico: una delle due si corruga formando catene montuose lungo i margini che si scontrano; l'altra affonda sotto di essa nel mantello fino a fondere a circa 70 km di profondità. Dal materiale che affonda si forma un magma ricco del silicio della crosta che crea catene di vulcani. Anche su altri pianeti rocciosi sono presenti fenomeni vulcanici, estinti o tuttora attivi, e tutti i maggiori rilievi planetari sono di origine vulcanica. La Terra però sembra unica nell'aver un movimento delle placche così diffuso e connesso con l'attività vulcanica.

Il meccanismo di movimento delle zolle è molto attivo ed è in grado di rigenerare i terreni della superficie terrestre nel corso di milioni di anni. Questo però distrugge sia le tracce degli impatti del Grande Bombardamento, sia le rocce primordiali, che vengono rifuse e plasmate in nuovi continenti. Per questa ragione sulla Terra è molto difficile trovare crateri in abbondanza come sulla Luna e i grandi crateri terrestri, testimonianza del bombardamento primordiale, sono localizzati solo in zone molto antiche come il Canada o la Groenlandia. La presenza di questi antichi crateri, visibili nelle foto da satellite, indica che questi territori non sono stati modificati di recente dal moto dei continenti, né si sono formati da magmi fuoriusciti dal mantello negli ultimi miliardi di anni.

Studiando le rocce di queste regioni è possibile fissare limiti per l'età della Terra. Con il **metodo radiometrico** di studio, l'età di una roccia può essere stabilita sulla base della percentuale di elementi radioattivi presenti. Se all'interno di essa è incluso un elemento radioattivo, col passare del tempo esso decade in un altro elemento chimico stabile, passando eventualmente attraverso altri elementi instabili. La sua quantità decresce in maniera esponenziale col tempo. Così, se un elemento decade in un altro, le percentuali relative dei due elementi permettono di determinare quanto tempo è passato da quando il primo è stato incorporato dalle rocce, per condensazione o attraverso processi geologici metamorfici. Gli elementi radioattivi generalmente usati per questo metodo sono uranio, rubidio

Origine dei pianeti e dei corpi minori

e potassio, torio e renio.

Le rocce più vecchie trovate finora sul nostro pianeta sono di tipo metamorfico (gneiss) e sono ubicate nella zona di Acasta in Canada. A esse è stata attribuita un'età di circa a 3,96 miliardi di anni (Ga). Tuttavia nella regione del monte Narryer, in Australia, inglobati nelle rocce metamorfiche, sono stati trovati cristalli di zircone con un'età tra 4,1 e 4,3 Ga. La stima dell'età della Terra è stata ottenuta dai rapporti isotopici del piombo misurati nei depositi minerali di galena (solfo di piombo) più antichi, confrontati con quelli di una meteorite con un'età di 4,5 Ga trovata nel canyon Diablo, la più vecchia mai datata, la stessa che ha formato il Meteor Crater in Arizona (USA). Calcolando il tempo necessario per la formazione dei rapporti isotopici di questi depositi tenendo conto di quelli della meteorite, è stata calcolata un'età di 4,6 Ga. Le più antiche rocce lunari, prelevate dagli altopiani dagli astronauti dell'Apollo 16 e 17, hanno un'età simile, tra 4 e 4,5 Ga. Questi valori e l'età delle meteoriti più vecchie, circa 4,57 Ga, sono in accordo con le stime dell'età del Sole basate sulle teorie di evoluzione stellare, che gli attribuiscono 4,58 Ga. Nell'ipotesi che la crosta si sia formata dal raffreddamento di masse fluide, è possibile stimare, per la superficie solida del nostro pianeta, un'età di 4,3 Ga, con una fase precedente di solidificazione superficiale durata circa 300 milioni di anni. È importante tenere presente queste cifre perché l'origine calda del pianeta e il Grande Bombardamento sono tutti fattori ostili alla stabilità dell'ambiente terrestre, che possono aver ostacolato il sorgere della vita per sintesi chimica dal materiale organico presente.

5.2 Le meteoriti

All'epoca attuale sono frequenti le cadute di frammenti del materiale del Sistema Solare sotto forma di meteoriti o polvere cosmica. Una parte delle meteoriti deriva da frammenti prodotti durante le collisioni tra asteroidi avvenute in passato. Anche le comete che si avvicinano al Sole liberano le polveri di cui sono composte, formando la caratteristica coda della cometa, a causa della sublimazione dei ghiacci che le rivestono. Queste polveri possono arrivare nei pressi del nostro pianeta e venire intercettate nel fenomeno detto **stelle cadenti**. Lo studio mineralogico delle meteoriti può darci informazioni sulla composizione degli asteroidi e indirettamente su quella dei planetesimi rocciosi. Invece lo studio della polvere cometaria e dei gas sublimati dalle comete ci permette di conoscere quella che doveva essere la composizione dei planetesimi esterni e della polvere interstellare. Le meteoriti possono contenere sostanze organiche complesse. Già nel 1834 lo svedese Berzelius riuscì a estrarle da un campione raccolto in Francia.

I corpi rocciosi e metallici che arrivano al suolo, i **meteoroidi**, devono attraversa-

re l'atmosfera terrestre e alla fine della caduta, a causa dell'attrito, la loro dimensione è minore di quella originaria. In genere un meteoroido più piccolo 10 metri non riesce a raggiungere il suolo, ma brucia completamente a causa dell'alta velocità con cui precipita (decine di migliaia di km all'ora). Così la maggior parte degli oggetti attratti dalla Terra, con una massa anche maggiore di 1000 tonnellate, viene completamente distrutta nel passaggio attraverso l'atmosfera perché quest'ultima non riesce a rallentarla per azione aerodinamica, mentre l'attrito ad alta velocità può agire per un tempo lungo sulla sua struttura, facendola fondere ed evaporare. L'energia sviluppata ionizza l'aria producendo scie luminose che permettono di avvistare l'oggetto in caduta, come per le stelle cadenti. Nel caso di meteoroidi più grandi di 10 metri, il calore e l'energia cinetica persa nell'urto con il suolo possono essere così grandi da eguagliare e superare quella di un'esplosione nucleare. In molti casi l'oggetto in caduta può sbriciolarsi esplodendo (**bolidi**) e i suoi frammenti finire al suolo con velocità più basse. Questi frammenti possono essere analizzati in laboratorio, costituendo la categoria delle **meteoriti**. In genere si dà alla meteorite il nome della località in cui viene raccolta. Nel caso di ricerche sistematiche esso viene indicato con una sigla seguita da un numero progressivo. Così la meteorite Orgueil è stata trovata nell'omonima località francese mentre ALH 84001 è stata raccolta in Antartide nella località Allan Hills nel 1984 e catalogata al numero 001.

Quando una meteorite viene ritrovata sul terreno, a meno che essa non sia stata vista cadere, può aver subito alterazioni dovute a agenti atmosferici ed essere stata attaccata da forme di vita terrestri. In generale la parte che ha subito la maggiore contaminazione è la crosta esterna. Essa appare fusa e levigata in conseguenza dell'attrito con l'atmosfera creato dal passaggio ad alta velocità, ma al suo interno si trovano rocce con caratteristiche completamente diverse. Col passare del tempo, la pioggia e le variazioni di temperatura possono incidere la crosta, deteriorando anche l'interno. Nelle microfratture che si formano in una roccia esposta alle intemperie possono infiltrarsi forme di vita microscopiche. Diventa quindi molto delicato discutere di Astrobiologia trattando con meteoriti che sono venute a contatto con l'ambiente terrestre. La ricerca di composti prebiotici nelle meteoriti deve essere eseguita all'interno di laboratori specializzati, seguendo norme precise che evitino eventuali contaminazioni. I campioni raccolti da geologi esperti vengono isolati al più presto dall'ambiente esterno e portati in laboratorio per essere sezionati e studiati. L'Antartide, con i ghiacci che hanno inglobato per migliaia di anni piccole meteoriti e particelle di polvere extraterrestre, rappresenta una miniera di informazioni sulla composizione di questi frammenti dello spazio esterno. I ghiacci da cui si estraggono queste polveri e micrometeoriti per il loro tipico colore sono detti *blue ices* (**ghiacci blu**).

Origine dei pianeti e dei corpi minori

Sulla base della loro composizione, le meteoriti si possono distinguere in metalliche e litoidi. Ulteriori suddivisioni all'interno di queste classi e gruppi intermedi permettono oggi di classificare in maniera accurata le meteoriti e tracciarne una genesi. Distinguiamo quattro tipi principali di meteoriti:

- **Sideriti (meteoriti metalliche)** hanno una composizione in cui predominano leghe di ferro e nichel. Trattate in laboratorio, mostrano figure geometriche (**figure di Widmanstätten**). La loro temperatura di formazione è distribuita tra alcune centinaia e i quasi 1000 gradi centigradi. Le sideriti rappresentano una piccola percentuale delle meteoriti ma sono in grado di resistere più degli altri tipi all'impatto con l'atmosfera terrestre e sono più frequenti nelle collezioni terrestri.
- **Sideroliti**, composte da metalli e silicati quasi in ugual misura. Queste meteoriti dovrebbero derivare da minerali che si sono raffreddati lentamente nel corso di milioni di anni.
- **Acondriti (meteoriti litoidi)**, spesso molto simili alle rocce terrestri. Alcune hanno strutture simili alle rocce vulcaniche mentre altre sono agglomerati di vari minerali. Potrebbero essere frammenti di crosta planetaria (Marte, Luna, ecc.) distrutta e rimbalzata nello spazio a causa di collisioni con altri corpi rocciosi. Le acondriti rappresentano circa il 3% delle meteoriti note.
- **Condriti (meteoriti litoidi)**, composte in maggior parte da silicati. Al loro interno esistono le **condrule**, piccoli agglomerati quasi sferici composti da olivine, pirosseni, plagioclasti, tre componenti della crosta terrestre, e da vetro, troilite, ferro-nichel. Questi minerali possono essere anche combinati tra loro all'interno delle condrule. Le dimensioni delle condrule possono variare da un decimo a poche decine di millimetri. Esse devono la loro forma e la loro origine alla cristallizzazione o al raffreddamento di materiale fuso che nello spazio aveva assunto la forma di goccioline sferiche. Questo materiale potrebbe essersi generato durante la formazione del disco protoplanetario grazie all'energia rilasciata da scariche elettriche simili a fulmini. Molte condriti appaiono come materiali antichissimi del Sistema Solare, con età prossime ai 4 miliardi di anni, mentre altre mostrano segni di trasformazione successiva alla loro formazione e potrebbero derivare da frammenti di corpi più grandi. Nel primo caso la composizione chimica è simile a quella del Sole, con relativa abbondanza dei vari elementi chimici.
- Le **condriti carbonacee** meritano una trattazione a parte. Esse sono classificate tra le condriti a causa della simile composizione chimica e mineralogica. Vengono dette carbonacee perché contengono una notevole quantità di carbonio la cui abbondanza varia in maniera decrescente nelle tre categorie in cui

sono distinte: C1, C2, C3. Appaiono come pietre molto scure anche all'interno e la loro composizione include principalmente magnetite (FeO_3) e olivine. Tutte le condriti carbonacee dovrebbero essersi formate nello spazio a pressioni bassissime, 10^{-1} – 10^{-4} hPa, fino a un decimilionesimo della nostra atmosfera, nate per condensazione dalla nebulosa protoplanetaria senza ulteriori trasformazioni. Tuttavia alcune condriti C2 e C3 contengono nella loro struttura piccole intrusioni di altri materiali oppure condrule. Queste intrusioni, formatesi in condizioni fisiche diverse da quelle del resto della condrite, potrebbero essere state inglobate successivamente nella matrice carbonacea in fase di condensazione. Alcune condriti mostrano di aver subito una parziale metamorfosi dovuta a riscaldamento, che ha fatto evaporare parte delle sostanze più volatili. Queste meteoriti sono indicate come CM (**condriti metamorfosate**). Le condriti carbonacee di tipo C1 si differenziano dalle altre perché non presentano condrule. Esse contengono composti volatili quali acqua, zolfo e gas rari, che sarebbero evaporati e sfuggiti nello spazio se la roccia fosse stata sottoposta ad alte temperature. La loro presenza garantisce quindi l'invariabilità, sin dalla formazione della meteorite, dei composti rinvenuti nelle condriti C1. Le temperature a cui si sono formate le condriti C1 devono essere inferiori a 373 K, mentre le C2 e le C3 possono essersi formate a temperature più elevate, rispettivamente ~400 e ~430 K. Esse sono dunque i campioni più vicini alle sostanze della nube primordiale, solidificate da miliardi di anni, utilissimi per l'Astrobiologia.

Come detto nella Sezione 4.5, nel 2005 e 2019 due sonde giapponesi sono atterrate sugli asteroidi Itokawa, simile alle meteoriti silicee, e Ryugu, carbonaceo, e hanno riportato dei frammenti sulla Terra rispettivamente nel 2010 e nel 2020. Le rocce di Itokawa hanno mostrato un contenuto interno di acqua nei minerali simile a quello terrestre. I frammenti di Ryugu mostrano la presenza di materiali carbonacei e di gas che si è liberato nel contenitore una volta riportato in laboratorio. Il suo studio è in corso. L'asteroide Bennu, una condrite carbonacea, è stato raggiunto nel 2018 da una sonda NASA, e i suoi frammenti sono attesi nel 2023.

5.3 I composti organici nelle condriti carbonacee

Nelle condriti carbonacee le percentuali degli elementi chimici non gassosi (esclusi perciò ossigeno, idrogeno e gas nobili) sono identiche a quelle presenti nel Sole, come ci si aspetta se esse si sono formate dalla nube che ha formato il Sistema Solare. Se in questo materiale erano già presenti molecole prebiotiche, queste possono aver concorso alla nascita della vita sulla Terra. Le meteoriti più studiate a questo proposito sono l'Orgueil (C1), la Murchison (CM), la Murray (CM) e più recentemente la meteorite antartica LEW 90500 (CM).

Origine dei pianeti e dei corpi minori

Tabella 5.1 Concentrazione media di amminoacidi misurata nelle condriti carbonacee (Ehrenfreund, P. et al., 2001, Proceedings of the National Academy of Sciences. **98**, 2138. I valori sono espressi in ppb (= parti per miliardo).

Tipo	C1			CM
	Orgueil	Ivuna	Murray	Murchison
acido D-aspartico	28±16	30± 2	51±31	100±15
acido L-aspartico	54±18	146± 8	65±16	342±103
acido D-glutammico	15± 6	8± 1	135±50	537±117
acido L-glutammico	61±31	372±11	261±15	801±200
D,L- α -acido amminobutirrico	13±11	12± 7	463±68	914±189
D,L- β -acido amminobutirrico	332±99	438±142	424±18	708±171
γ - acido amminobutirrico	628±294	~600	717±192	1331±472
acido isobutirrico	39±37	46±33	1968±350	2901±328
D,L- β - acido isobutirrico	148±70	84±12	147±88	343±102
D-alanina	69±9	82±22	617±79	720±95
L-alanina	69±9	157±14	647 ± 58	956 ± 171
β -alanina	2052±311	1401±146	1063±268	1269±202
Glicina	707±80	617±83	2110±144	2919±433
D,L-isovalina	< 194	< 163	2834±780	3359±534
Totale	4200	4000	11500	17200

Nella prima meteorite sono state identificate nel 1964 *purine* e altri *composti azotati*. Questa scoperta è stata confermata nel 1981 con l'osservazione di purine anche nelle meteoriti Murchison e Murray. Le stesse tre meteoriti, Orgueil, Murchison e Murray, hanno rivelato nel 1979 la presenza di altre basi azotate, quali le *pirimidine*. Tuttavia non bisogna pensare che questi composti siano identici a quelli utilizzati dalle forme di vita terrestri nell'RNA e nel DNA. La struttura delle **basi azotate meteoritiche** può presentare differenze marcate rispetto alle nostre basi azotate, quali legami con gruppi atomici diversi da quelli degli esseri viventi sulla Terra. L'esistenza di basi azotate diverse da quelle biologiche appare ampliare la possibilità di esistenza di "biochimiche" non terrestri, anche se non è dimostrabile che da queste sostanze possa nascere una forma di vita di qualche tipo.

Oltre alle basi azotate, nelle condriti carbonacee sono state trovate tracce di amminoacidi, come indicato in Tabella 5.1. Il campione della meteorite Murchison è quello che ne presenta la maggiore concentrazione. Differenze marcate sembrano

dividere le condriti C1, probabilmente rimaste simili al materiale protoplanetario, da quelle CM, che hanno subito una metamorfosi. Se da una parte la glicina, la β -alanina e l'acido γ -amminobutirrico hanno nelle meteoriti un'abbondanza maggiore di quella degli altri amminoacidi, le condriti metamorfosate possiedono concentrazioni di isovalina e acido isobutirrico decine di volte maggiori rispetto alle C1. Dunque una sintesi o una distruzione di amminoacidi deve essere avvenuta dalla nascita del Sistema Solare alla formazione dei corpi da cui queste meteoriti hanno avuto origine.

Come si vede nella Tabella 5.1 una caratteristica particolare delle basi azotate e degli amminoacidi meteoritici è la loro presenza in entrambi gli enantiomeri, molecole con simmetrie opposte descritte nella Sezione 2.2.2. Composti quali l'acido aspartico e altri sono presenti sia con struttura levogira (per esempio L-aspartico) sia destrogira (D-aspartico). Questo fatto è marcatamente diverso da quanto accade nella biologia terrestre, dove gli amminoacidi utilizzati dalle forme di vita sono quasi sempre levogiri. Come è stato detto parlando degli amminoacidi biologici anche sulla Terra, nel corso del tempo, fenomeni quali la racemizzazione possono generare una molecola con chiralità diversa. Per esempio, nel cristallino dei vertebrati a causa della racemizzazione l'acido L-aspartico in soluzione acquosa, in circa 10 anni, si trasforma parzialmente in D-aspartico. Tra i casi "biologici" in cui entrambi gli enantiomeri vengono utilizzati, citiamo quello di alcuni batteri che usano la D-alanina per formare le pareti cellulari, mentre in generale è dominante l'enantiomero opposto, L-alanina. Un'ulteriore caratteristica tipica degli amminoacidi meteoritici è la presenza di legami in cui l'idrogeno (H^1) è sostituito dal deuterio (H^2) o il C^{12} è sostituito dal C^{13} , con una frequenza maggiore rispetto a quella trovata nelle molecole biologiche. Esistono dunque indizi che possono indicare un'origine non biologica di sostanze che sono utilizzate dalla vita terrestre.

Continuando l'elenco di sostanze simili a quelle prebiotiche trovate nelle meteoriti, ricordiamo la scoperta, nel 1992, di acidi contenenti zolfo e fosforo, due elementi chimici importanti nella biochimica. Fosfati inorganici e composti organici con fosforo sono presenti nelle ossa, nei trasferimenti di energia delle reazioni biochimiche, nel DNA e RNA, nei fosfolipidi delle membrane cellulari. I solfati sono utilizzati per il metabolismo di alcuni organismi (solfobatteri) e sono presenti come composti organici nelle forme viventi. Nelle meteoriti sono stati trovati minerali solfati come il gesso, ma anche composti solubili in acqua e acido (radicali alchilici dell'acido fosfonico e sulfonico). Sostanze che portate in acqua formano vescicole o micelle, simili alle membrane cellulari, e che rendono sempre maggiore la somiglianza tra le molecole extraterrestri e quelle biologiche. Queste membrane si formano grazie al concorso di molecole anfipatiche, descritte nella

Origine dei pianeti e dei corpi minori

Sezione 2.2.5. Negli organismi viventi questo ruolo è svolto dai fosfolipidi, dal colesterolo e dai glicolipidi. Una serie di almeno 6 molecole anfipatiche immerse in acqua tende a disporsi radialmente, in modo che le estremità idrofobe siano “schermate” da quelle idrofile esposte verso l'esterno, formando una micella. Un numero maggiore di molecole anfipatiche può accostarsi a formare un doppio strato con le pareti esterne idrofile. Esso costituisce una struttura simile a una membrana quando tende a richiudersi isolando una porzione di spazio dall'esterno (una cella, da cui il nome cellula). La formazione di membrane è considerata agli albori della vita un passo importantissimo nello sviluppo degli esseri viventi perché isola la cellula dall'ambiente esterno, come discuteremo nel Capitolo 6. Il fatto che anche queste sostanze siano presenti nelle meteoriti ci dà una maggiore possibilità di trovare processi simili a quelli della Biologia in ambienti non terrestri. Tuttavia occorre affermare che le strutture generate dai lipidi estratti dalle meteoriti sono molto distanti dalle membrane cellulari reali. Esse sono impermeabili all'acqua e alla maggior parte delle molecole solubili in essa; al contrario le membrane cellulari permettono lo scambio di sostanze attraverso “pori” selettivi nella parete (pompe e canali) e presentano un contenuto di proteine pari a quello dei lipidi. Esse proteggono le parti interne delle cellule viventi escludendo sostanze che potrebbero essere dannose, ma consentono lo scambio con l'esterno di quelle utili. Le micelle di cui abbiamo trattato quindi sono buoni isolatori di processi chimici, ma non possono essere completamente raffrontate alle membrane cellulari.

5.4 Le micrometeoriti

Un ulteriore aiuto nella deduzione delle sostanze presenti nel disco protoplanetario proviene dallo studio delle micrometeoriti estratte dai ghiacci blu dell'Antartide, dai sedimenti oceanici o da quelli estratti in Groenlandia. Da miliardi di anni queste piccole particelle si accumulano sulla Terra e possono essere incorporate nei ghiacci o giacere sui fondali per migliaia di anni. L'estrazione di questo materiale extraterrestre non è facile; da 100 tonnellate di ghiaccio blu possono essere estratti solamente 10 grammi di sedimenti glaciali e in essi sono contenute appena 5000 sferule cosmiche che non appaiono fuse per l'attrito con l'atmosfera. L'assenza di una fusione per attrito può essere spiegata con la loro composizione: la grande maggioranza di queste particelle (80%) ha dimensione tra 50 e 200 μm e contiene aggregati di materiali porosi, immersi in una matrice ricca di carbonio e ossigeno. Questi materiali sono simili agli schermi termici usati nelle navette spaziali, che permettono ai veicoli lanciati nello spazio di ritornare al suolo senza bruciare. Nel caso delle micrometeoriti, essi offrono un'efficace protezione dal calore.

Poiché le micrometeoriti sono molto piccole, l'atmosfera ne frena la caduta riscaldandole per un intervallo di tempo brevissimo, non sufficiente a disintegrarle. Una volta frenate, esse possono cadere senza che la loro struttura interna sia alterata dal calore come avviene per le meteoriti più grosse. Per queste ragioni, la composizione delle micrometeoriti dovrebbe essere simile a quella presente in queste particelle quando erano fuori dall'atmosfera. A conferma di ciò, le sostanze vetrose presenti nelle sferule di micrometeoriti antartiche non mostrano effetti di contaminazione da parte degli agenti atmosferici o biologici dopo la caduta sulla Terra. Il loro studio rivela una composizione chimica con abbondanze di elementi simili a quelle delle condriti carbonacee C1, sia pure con qualche differenza, e perciò per esse si possono applicare le considerazioni espresse in precedenza a proposito delle condriti carbonacee.

5.5 La polvere cometaria

Essendo corpi ghiacciati e porosi, le comete avvicinandosi al Sole liberano facilmente il materiale incluso nei loro ghiacci e non è insolito che i loro nuclei si spezzino in più frammenti oppure si distruggano se attirati dalla forza di gravità del Sole o di un pianeta. La cometa Shoemaker-Levy 9 è caduta su Giove nel luglio del 1994, mentre la Ikeya-Seki è passata estremamente vicina al Sole nel 1965 frantumandosi in tre parti. Durante la vita di una cometa, buona parte del suo gas e delle polveri viene diffuso nello spazio, lungo l'orbita della cometa, spargendosi nel Sistema Solare. I frammenti di polvere sono così piccoli da potere essere spinti dalla stessa pressione della luce (pressione di radiazione), che possiede una forza infinitesima, ma che nello spazio può fungere da motore per particelle microscopiche.

Il caratteristico spettacolo delle stelle cadenti che entrano nell'atmosfera terrestre in precisi periodi dell'anno, per esempio intorno al 12 agosto, è dovuto ai frammenti di particelle cometarie rimaste in orbita intorno al Sole. Essi sono attratti dalla Terra quando il nostro pianeta attraversa la loro scia, il che avviene in precisi punti della sua orbita. L'alta velocità a cui giungono, fino a 30 km/s, li riscalda fino a farli bruciare in atmosfera ionizzando l'aria e creando tracce luminose. Queste particelle rappresentano un campione di materiale cometario che raggiunge la Terra. Nella maggior parte dei casi, purtroppo, ciò che arriva al suolo è alterato dal calore o dall'impatto.

Un grande apporto allo studio delle comete deriva dalla spettroscopia dei materiali persi durante il periodo di avvicinamento al Sole, che formano la coma e la coda. In questi anni, una maggiore conoscenza dei materiali cometari deriva dalle indagini svolte dalle sonde spaziali: Vega, Giotto e Stardust hanno rivelato

Origine dei pianeti e dei corpi minori

che il 14% della massa cometaria è composta da sostanze organiche e che almeno un terzo delle particelle cometary è simile alle condriti carbonacee. L'analisi dei campioni cometary di Stardust riportati sulla Terra ha mostrato diverse ammine e amminoacidi tra cui la glicina, con rapporti isotopici del carbonio che suggeriscono fortemente un'origine extraterrestre. La sonda Philae è atterrata sulla cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko, ma è rimbalzata finendo in un crepaccio, inviando pochi dati rispetto a quanto previsto. Il suo orbiter, Rosetta, ha rivelato la presenza di sali ammoniacali, sostanze immaginate da Darwin come precursori della vita terrestre, seppure in uno stato e a temperature molto più basse di quelle immaginate dal grande naturalista.

I ghiacci delle comete sono simili a quelli osservati nelle regioni di formazione stellare e nei dischi protoplanetari, ma la composizione chimica osservata indica un materiale interstellare riprocessato dal calore o da reazioni fotochimiche. Questo processo può essere avvenuto durante la nascita del Sistema Solare prevista nel Modello di Nizza, quando lo spostamento verso l'esterno dei pianeti giganti ha disperso i planetesimi formati a basse temperature, mescolando materiali con composizioni chimiche diverse.

5.6 Origine e stabilità delle sostanze prebiotiche

A questo punto possiamo affermare che ci sono molti aspetti che legano la composizione chimica delle meteoriti e comete a quella della nube interstellare da cui è nato il Sistema Solare. Lo studio chimico delle condriti carbonacee ha portato negli ultimi anni a scoprire nel loro interno numerose molecole simili a quelle che sono importanti per la vita sulla Terra. La loro presenza e le loro caratteristiche devono essere considerate come una forte indicazione di una sintesi molecolare molto avanzata avvenuta nello spazio, di cui le meteoriti sono una testimonianza. La presenza di glicina, le cui righe sono state osservate probabilmente anche nelle nubi di gas interstellare, potrebbe indicare che questo amminoacido e forse molti altri possono nascere in condizioni ben diverse da quelle di un pianeta come la Terra. Nel caso delle purine, delle pirimidine meteoritiche e degli amminoacidi meteoritici, la presenza di queste molecole nei due enantiomeri è indice di lunghi tempi trascorsi dalla formazione, quali possono essere quelli passati nello spazio. Anche la differenza strutturale riscontrata tra le basi azotate incluse nelle condriti carbonacee e quelle biologiche e la diversa abbondanza isotopica sostengono la possibile origine extraterrestre di queste sostanze. Se lo studio del gas interstellare e delle polveri è limitato dall'impossibilità di osservare direttamente molecole biologiche quali amminoacidi, pirimidine e purine, le condriti carbonacee suppliscono a questa mancanza e ci permettono di approfondire meglio l'argomento.

Naturalmente per estendere questo discorso al resto della Galassia è necessario accettare l'ipotesi che questi pezzi di roccia siano simili in tutto ai materiali che si trovano oggi nelle nubi interstellari. L'analisi spettroscopica e chimica della materia interstellare ci fornisce indizi che sostengono quest'ipotesi. Come affermato in precedenza, le percentuali dei diversi elementi chimici meteoritici sono simili a quelle del Sole e quindi a quelle di altre stelle.

Sembrerebbe un quadro completamente positivo, eppure bisogna frenare gli entusiasmi e chiederci se questa sintesi di sostanze prebiotiche è realmente avvenuta nelle nubi interstellari e può essere quindi diffusa in tutta la Galassia oppure se necessita di un ambiente planetario opportuno per generarsi. In tal caso solo stelle con pianeti sarebbero possibili luoghi di formazione della vita. Per comprendere questi aspetti sono stati realizzati alcuni esperimenti simulando in laboratorio l'ambiente extraterrestre (pressioni e temperature bassissime, radiazioni ionizzanti), studiando il comportamento degli amminoacidi in diverse situazioni. Sulla base di questi esperimenti, la radiazione UV appare la fonte di maggiore distruzione degli amminoacidi, sia nelle nubi sia in strati ghiacciati sottili. Questa radiazione può essere generata dalle stelle appena nate oppure indotta dal passaggio di particelle ad alta velocità espulse dalle supernovae (raggi cosmici).

Nelle nubi più dense la vita media degli amminoacidi è la stessa di quella della nube, ~10 milioni di anni, mentre nelle regioni di gas diffuso si riduce a poche centinaia di anni. Questa tendenza alla distruzione di molecole può essere diminuita se gli amminoacidi sono stati già incorporati nei granuli di polvere e nei ghiacci che li ricoprono. Il fenomeno non dipende dal tipo di amminoacido presente (biologico o non biologico) né dal tipo di ghiaccio (acqua o azoto), ma essenzialmente dal suo spessore.

In condizioni di nubi di polvere molto dense, possiamo aspettarci che una buona frazione degli amminoacidi presenti si trovi nella parte interna delle nubi, impenetrabile ai raggi UV, e sia perciò protetta; viceversa è probabile che quando la densità delle nubi diminuisce per evaporazione o nella loro parte esterna gli amminoacidi vengano distrutti in breve tempo. Essi vengono strappati dalla fase solida, immersa nei ghiacci, e scomposti in molecole più semplici. Questo fatto potrebbe spiegare perché sia così difficile osservare nel mezzo interstellare righe di amminoacidi, provenienti quindi da una fase gassosa.

Se le sostanze prebiotiche sono sopravvissute in nubi dense schermate dalle polveri, e se queste collassano a formare un sistema planetario, dopo la formazione del disco protoplanetario si attraversa una nuova fase di distruzione a opera dei raggi UV della stella appena nata. Nella fase T-Tauri, in cui la stella neonata ac-

Origine dei pianeti e dei corpi minori

cede l'idrogeno e ripulisce lo spazio con il vento stellare, la sua emissione UV è ~10 000 volte maggiore di quella del Sole attuale. Possiamo pensare che tutta la regione centrale venga sterilizzata dal calore e dalle radiazioni ionizzanti, ma che possano essere distrutte anche sostanze presenti in zone esterne. Attualmente, eventuali amminoacidi presenti su Europa (satellite di Giove) se affioranti alla superficie ed esposti al Sole verrebbero distrutti in pochi giorni. Solo quelli inclusi nelle meteoriti e nelle comete possono dunque sopravvivere allo shock termico e chimico derivante dalla formazione della stella centrale e dei planetesimi. Per questa ragione, le comete sono importanti nella ricerca di composti prebiotici come lo sono le condriti carbonacee.

5.7 La formazione delle atmosfere

Da quanto esposto, nella parte interna del Sistema Solare primordiale la maggior parte dei gas presenti tendeva a evaporare, spostandosi progressivamente verso l'esterno. I pianeti interni quindi non potevano trattenere l'enorme quantità di idrogeno ed elio che costituiva la gran parte del disco protoplanetario. Un'eventuale atmosfera terrestre composta da gas primordiali, come prevista nell'esperimento di Miller, deve essere stata persa entro poche centinaia di milioni di anni dalla formazione del disco protoplanetario.

Invece, nella parte esterna del Sistema Solare il gas presente si trovava nelle condizioni di bassa temperatura adatte alla sua cattura da parte dei nuclei planetari in formazione. I pianeti esterni hanno potuto quindi accumulare progressivamente una spessa coltre di gas primordiali fino a formare un'atmosfera gigantesca, probabilmente stabile da miliardi di anni. A riprova della loro origine, queste atmosfere hanno una percentuale di elementi chimici simile a quella del Sole, anche se i gas presenti si sono combinati in maniera diversa a causa della temperatura più bassa, che alla sommità delle nubi può arrivare a ~100 K (-173 °C). Essi formano nubi composte da cristalli di ammoniaca (NH₃), idrosolfuro di ammonio (NH₄SH), acqua (H₂O) e metano (CH₄). La densità atmosferica di questo pianeta aumenta verso l'interno fino a raggiungere compressioni in cui l'idrogeno molecolare diventa liquido e, più in profondità, un solido cristallino (**idrogeno metallico**). Questi pianeti, Giove, Saturno, Urano e Nettuno, sono quindi gigantesche sfere di gas primordiale con un nucleo roccioso.

Dopo aver perso l'atmosfera primordiale, i pianeti interni hanno prodotto una seconda atmosfera attraverso la fuoriuscita dei gas contenuti nelle rocce fuse del mantello attraverso le spaccature della loro crosta. Dalle dorsali terrestri, come dai vulcani attualmente attivi in altri pianeti del Sistema Solare (Venere, Terra, Io), fuoriescono sostanze che possono restare intrappolate dalla forza di gravità del

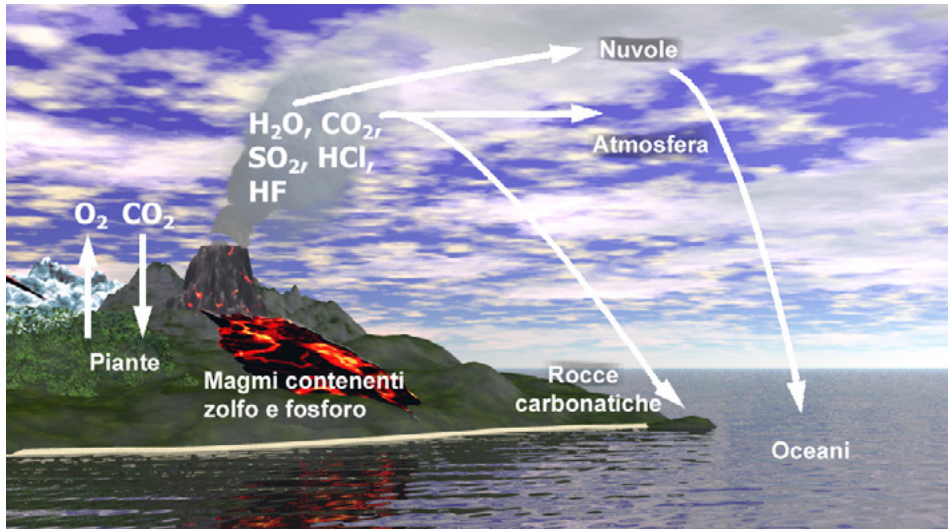


Figura 5.1- Gas emessi dai vulcani nell'atmosfera terrestre e loro evoluzione. L'anidride carbonica viene assorbita principalmente dalla fotosintesi di cianobatteri e piante (Immagine: G. Galletta)

pianeta e finiscono per formare un'atmosfera. Questo tipo di atmosfera di origine vulcanica è diversa da quella presente nei pianeti giganti, che è basata sull'idrogeno e i suoi composti. I gas attualmente prodotti dai magmi terrestri che arrivano in superficie sono formati dal 70 al 95% di vapor d'acqua (H_2O). Oltre a essa fuoriescono anidride carbonica (CO_2) che può raggiungere il 4%, azoto (N_2), anidride solforosa (SO_2), acido solfidrico (H_2S), zolfo (S), acido cloridrico (HCl) e ossido borico (B_2O_3). Per il resto si tratta di piccole quantità di idrogeno (H_2), metano (CH_4), anidride solforica (SO_3), ammoniaca (NH_3) e acido fluoridrico (HF).

L'acqua prodotta dai vulcani viene trasformata diventando liquida, congelando o finendo incorporata in altre sostanze presenti nella crosta, a seconda della temperatura esterna al suolo di ogni pianeta. Tra i gas che restano nell'atmosfera predomineranno CO_2 e N_2 , come osservato su Venere e su Marte. In entrambi i pianeti la percentuale di CO_2 è rispettivamente il 96% e il 95% di tutta l'atmosfera mentre l' N_2 rappresenta il 4% e il 3%. La somiglianza dei valori ne indica un'origine simile.

Per la stessa ragione, la Terra primordiale doveva avere un'atmosfera con il 95% di anidride carbonica, il 3% di azoto e la restante percentuale di vapor d'acqua e altri gas. Seguendo questo meccanismo di formazione, le atmosfere di Venere, Terra e Marte devono aver avuto origine in un periodo d'intensa attività vulcanica. La presenza di anidride carbonica può aver regolato in seguito la temperatura del suolo e dell'atmosfera tramite l'effetto serra.

5.8 L'effetto serra

L'atmosfera di un pianeta è generalmente trasparente alla radiazione solare. Però alcune molecole presenti possono assorbire radiazioni di particolari lunghezze d'onda e così riscaldarsi. Nel caso della Terra, l'ozono che esiste tra i 10 e i 25 km di quota cattura la radiazione ultravioletta, proteggendo il suolo dalla ionizzazione causata da questi fotoni, riscaldando a quella quota l'atmosfera. Nell'infrarosso invece la radiazione solare viene assorbita dall'anidride carbonica, dal vapor d'acqua e dal metano. Globalmente l'atmosfera assorbe direttamente il 25% dell'energia ricevuta dal Sole, mentre il 45% di essa viene assorbita dal suolo, o viene dissipata dall'evaporazione dell'acqua marina e dal trasporto delle particelle mosse dal vento. L'energia solare assorbita dal terreno e dagli oceani viene a sua volta riemessa nell'atmosfera sotto forma di calore (radiazione infrarossa) e tende a sfuggire verso lo spazio esterno. Ma la presenza di sostanze che assorbono l'infrarosso e che a loro volta lo riemettono impedisce che il calore venga diffuso nello spazio, riscaldando l'atmosfera a partire dagli strati più vicini al suolo. Perciò l'atmosfera è in generale più calda a bassa quota e più fredda procedendo verso l'alto, sulle montagne o alle quote degli aerei. La variazione di temperatura con l'altezza, detta **gradiente termico verticale**, è in media di $-6,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ per ogni km di quota. Tuttavia nel primo centinaio di metri di quota la variazione è minore, con temperature che si mantengono simili grazie ai moti ascensionali dell'aria calda. Al suolo l'escursione termica diurna è in genere minore di $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a causa dell'inerzia dell'aria a raffreddarsi. Le temperature più alte vengono misurate nei nostri deserti a bassa latitudine, con un massimo storico di $57\text{ }^{\circ}\text{C}$ nella Valle della Morte, in California (USA). Le temperature più basse mai registrate appaiono vicino ai poli, con un minimo di $-89\text{ }^{\circ}\text{C}$ registrato in Antartide, alla stazione Vostok

Un pianeta con un'atmosfera che contenga CO_2 , CH_4 e H_2O sotto forma di vapore, è in grado di intrappolare l'energia solare trasformandola in calore. Questo è quanto avviene in una serra, dove i vetri lasciano passare la luce, ma trattengono l'infrarosso riscaldando l'ambiente. I gas che assorbono l'infrarosso vengono detti **gas serra** e sono responsabili del riscaldamento del pianeta. Per avere un'idea della sua efficacia, si pensi che nel caso della Terra, senza l'effetto serra, la temperatura superficiale media sarebbe di $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, 33 gradi più bassa, e la sua superficie in gran parte coperta di ghiaccio.

Come visto nella Sezione precedente, i maggiori produttori naturali di gas serra sono i vulcani, che scaricano nell'atmosfera questi gas, con percentuali che possono variare a seconda della temperatura e del tipo di magma presenti. In presenza di acqua liquida, le sostanze contenute nei gas vulcanici possono finire per esse-

re incorporate nella crosta, come le rocce carbonatiche per l'anidride carbonica, o trasformate nell'atmosfera formando nuove molecole come l'acido solforico (H_2SO_4), oggi presente nell'atmosfera di Venere, che deriva dalla reazione tra anidride solforica, ossigeno, ossidrilico e acqua. Se i gas serra di origine vulcanica non vengono alterati da processi chimici e i loro componenti non entrano nelle rocce, essi contribuiscono ad alzare sempre di più la temperatura globale, con un'entità proporzionale alla quantità di anidride carbonica e di vapore acqueo presenti. Su Venere e sulla Terra il vulcanesimo è ancora attivo e continua a produrre anidride carbonica, mentre il pianeta Marte, più piccolo, deve essersi raffreddato più velocemente avendo comunque esaurito la sua attività vulcanica. Tratteremo più in dettaglio di Marte e della sua evoluzione nella Sezione 8.2.1.

5.9 Il problema del fosforo e zolfo

Oltre a essere importanti per la formazione delle atmosfere e per il mantenimento dell'effetto serra, i vulcani sono anche il luogo dove è possibile trovare un elemento chimico essenziale per la vita, il fosforo. Il fosforo è presente negli acidi nucleici sotto forma di trifosfato (PO_3), e permette il legame tra le molecole di zucchero su cui si impernano le basi azotate. Nelle regioni vulcaniche si trova anche lo zolfo, in vari composti. Se la vita è basata su elementi come H, C, N e O, che sono i più diffusi nella Galassia grazie ai processi di sintesi degli elementi nelle stelle, il fosforo e lo zolfo sono prodotti in percentuale bassissima. La ragione di questa scarsità risiede nel loro meccanismo di sintesi, che avviene in buona parte col bruciamento dell'ossigeno, a temperature di circa un miliardo di gradi. Queste temperature vengono raggiunte solo nel nucleo di stelle massicce dopo che carbonio, azoto e ossigeno sono stati sintetizzati. Poiché le stelle di massa maggiore sono sempre meno numerose di quelle di massa minore, comunque il fosforo e lo zolfo saranno sempre meno abbondanti di carbonio, azoto, ossigeno ed elio, che sono prodotti anche da stelle più piccole.

In termini di abbondanze cosmiche, ci sono ~4 atomi di ossigeno ogni 10000 atomi di idrogeno, con carbonio e azoto presenti rispettivamente con percentuali pari a ~1/2 e ~1/8 rispetto all'ossigeno. Il fosforo invece è così raro che nel gas interstellare ne esistono solo 2 atomi ogni 100 milioni rispetto a quelli di idrogeno. Altri elementi chimici, come il silicio, il sodio e il magnesio, sono molto più abbondanti del fosforo eppure non entrano nelle molecole basilari della vita. Questa rarità si riflette sulla composizione delle molecole trovate nello spazio interstellare e nelle polveri, quasi tutte costituite da atomi di H, C, N e O, con una sola molecola nota che contenga il fosforo (PN). Oltre a essa, attorno ad alcune stelle è stata anche osservata solo un'altra molecola formata da carbonio e fosforo (CP). Infine, nell'atmosfera di Giove sono state osservate righe di assorbimento della fosfina

Origine dei pianeti e dei corpi minori

(PH₃) a lunghezze d'onda di alcuni μm. La sua presenza è stata ipotizzata anche per spiegare l'opacità delle atmosfere di Nettuno e Saturno, ma in generale è rara. Nel 2020 è stata avvistata una singola riga della fosfina nelle nubi di Venere. Come abbiamo detto parlando dell'acqua nelle atmosfere, se questa riga fosse dovuta ad un'azione di microrganismi, è difficile pensare che questi siano nati ad alta quota. Ne parleremo in dettaglio nel Capitolo 8.

Tuttavia, anche se non è presente nei gas vulcanici, che rappresentano meno del 5% del peso totale dei magmi, il fosforo è presente in parecchi minerali vulcanici e in particolare nelle apatiti, con formula Ca₅(PO₄)₃(F,Cl,OH). Disciolto nell'acqua marina forma HPO₄ e precipita costituendo noduli o depositi, che possono dare luogo anche a grandi giacimenti. Alcune varietà di apatite così formate, le **fosforiti**, possono avere una concentrazione di fosforo intorno al 30%.

Questa peculiarità del fosforo è nota in Astrobiologia e determina l'idea che una vita di tipo terrestre abbia bisogno di condizioni particolari per nascere, tra cui un ambiente nel quale esso sia abbondante. Nella Terra primordiale molecole contenenti fosforo come P₂O₅ dovevano essere presenti negli ambienti vulcanici. I vulcani potrebbero essere quindi un requisito indispensabile alla formazione di forme di vita basate sugli acidi nucleici. In tal caso solo pianeti abbastanza vicini alla loro stella da essere rocciosi e abbastanza grandi da mantenere a lungo un'attività vulcanica possono avere un ruolo fondamentale nell'Astrobiologia. Questo limiterebbe moltissimo la ricerca di vita di tipo terrestre in ambienti diversi da questi.

Come alternativa, per spiegare l'utilizzo di un atomo così raro nelle molecole delle forme di vita è necessario pensare che il Sistema Solare sia nato in una zona con un'abbondanza di fosforo particolarmente elevata e che costituisca in qualche modo un'eccezione rispetto agli altri sistemi planetari della Galassia. In effetti il gas solare ha una percentuale di fosforo, carbonio, azoto e ossigeno 10 volte più elevata di quella del gas interstellare. Attualmente il problema è ancora aperto.

5.10 L'origine dell'acqua sui pianeti

Le atmosfere planetarie formatesi dai vulcani costituiscono la base di una successiva evoluzione: il vapor d'acqua può condensarsi in goccioline che formano nubi, ricadendo al suolo sotto forma di pioggia. Il meccanismo di condensazione dell'acqua può avere formato fiumi, laghi, mari e oceani su tutti quei pianeti in cui la temperatura era abbastanza elevata da impedirle di congelare, ma abbastanza bassa da non farla evaporare nello spazio. L'acqua liquida è fondamentale per lo svolgersi dei processi biologici e la sua presenza sul nostro pianeta è legata alme-

no in parte alla presenza di vulcani.

In Astrobiologia però l'idea che gli oceani siano nati esclusivamente da gas vulcanici ripropone la difficoltà di "costruire" forme di vita ripartendo da zero: l'acqua fuoriesce a temperatura molto elevata ed è quindi sterile o poco ricca di sostanze organiche complesse. Dobbiamo chiederci perciò se dopo il raffreddamento del nostro pianeta i meccanismi che hanno prodotto la vita siano dovuti ripartire dai singoli elementi chimici sopravvissuti al calore anziché utilizzare le molecole complesse già presenti nello spazio interstellare. Se così fosse, probabilmente dovrebbero essere stati necessari diversi milioni e forse miliardi di anni prima che una combinazione chimica casuale riuscisse a sintetizzare nuovamente degli amminoacidi. C'è però un processo che avrebbe potuto fornire subito il materiale prebiotico necessario all'origine della vita: l'accrescimento di materia dalle regioni più fredde del Sistema Solare, dove le sostanze organiche della nube protoplanetaria non hanno subito riscaldamenti e sono ancora integre. I ghiacci d'acqua contenuti nelle comete e quelli che ricoprono i granuli di polvere interstellare sono ricchissimi di tutte le sostanze organiche di cui si è trattato nei capitoli precedenti. Quella porzione di sostanze che riesce a raggiungere il suolo rimanendo inalterata può avere contribuito ad arricchire la Terra di acqua e polimeri prebiotici. Con l'aiuto di questo materiale proveniente dall'esterno, la nascita della vita sulla Terra sarebbe potuta avvenire velocemente subito dopo il raffreddamento del pianeta.

Questa ipotesi, una versione "chimica" della Panspermia, ha dei vantaggi ma presenta anche dei problemi. Da una parte le comete, come vere e proprie montagne di ghiaccio e sostanze organiche, nel corso del Grande Bombardamento, avrebbero potuto formare una parte dei nostri oceani. Un nucleo cometario come quello della cometa Hale-Bopp può contenere migliaia di miliardi di tonnellate d'acqua e per riempire almeno la metà degli oceani attuali ($1,37 \times 10^{18}$ tonnellate d'acqua) sarebbero sufficienti gli impatti di 14 000 comete, un numero veramente piccolo durante il Grande Bombardamento all'origine del Sistema Solare. Dall'altra parte la quantità di deuterio nell'acqua delle comete appare maggiore di quello presente negli oceani terrestri e l'impatto di grandi comete è così violento che la maggior parte delle sostanze contenute può essere stata distrutta durante l'esplosione al suolo. Questi fatti rendono più difficile ipotizzare che l'acqua ricca di sostanze prebiotiche possa derivare direttamente dalle comete. Tuttavia alcuni satelliti artificiali che monitorano la Terra hanno mostrato che piccole masse di ghiaccio tra 20 e 40 tonnellate, come mini-comete, cadono continuamente sul nostro pianeta, vaporizzandosi a ~1000 km di quota. Gli impatti nell'alta atmosfera attribuiti a queste mini-comete sono milioni ogni anno e se il ritmo di collisioni

Origine dei pianeti e dei corpi minori

è stato maggiore in passato, esse potrebbero aver fornito una parte sostanziale dell'acqua degli oceani. Purtroppo questi piccoli oggetti sono quasi impossibili da scoprire prima della loro vaporizzazione e si conosce perciò molto poco della loro composizione. Secondo i geologi, una parte dell'acqua oceanica affonda nel mantello a causa dell'immersione delle zolle in collisione e non tutta torna alla superficie come vapore vulcanico. Quindi questi piccoli impatti continui potrebbero rifornire il pianeta dell'acqua persa.

L'evoluzione successiva dell'atmosfera terrestre ha segnato i miliardi di anni passati dalla sua nascita legandosi alla formazione degli oceani e alla nascita della vita, due eventi che hanno gradualmente assorbito l'anidride carbonica. Grazie all'acqua una parte della CO_2 è stata incorporata nelle rocce carbonatiche e, successivamente, l'inizio della fotosintesi l'ha sottratta all'atmosfera in grande quantità. Così il pianeta ha potuto raffreddarsi raggiungendo un equilibrio.

Una diversa evoluzione ha subito Venere, che possiede anch'esso vulcani attivi. La temperatura iniziale più alta rispetto alla Terra, causata dalla minore distanza dal Sole, ha impedito la liquefazione del vapor d'acqua vulcanico o il suo congelamento. Di conseguenza, anche la CO_2 non si è fissata nelle rocce carbonatiche e il suo accumulo ha favorito l'effetto serra, innalzando la temperatura al suolo. Tuttavia, alcuni modelli di evoluzione di Venere fanno l'ipotesi che esso possa aver avuto, come Marte, un periodo di acqua liquida in superficie. Anche se questa ipotesi fosse vera e una parte della CO_2 atmosferica di Venere si fosse trasformata nel tempo, questo processo di sottrazione non è stato sufficiente e la CO_2 è stata continuamente rifornita dai suoi vulcani per miliardi di anni. L'ambiente si è così saturato di gas vulcanici, fino a raggiungere una pressione al suolo 90 volte maggiore di quella terrestre e una temperatura superficiale di 472°C . L'acqua di Venere continua a esistere oggi nella sua atmosfera sotto forma di vapore, interagendo con l'anidride solforosa dei vulcani e producendo goccioline di acido solforico.

Nel caso della Luna e di Marte invece la fuoriuscita di gas dal sottosuolo è già terminata e i pianeti hanno perso progressivamente le loro atmosfere. La Luna non ha praticamente nessun gas sulla sua superficie a causa della bassa gravità. Oggi si misura una densità di particelle pari a 10^{-14} m^{-3} , insignificante se confrontata con i 10^{25} m^{-3} della Terra al suolo. Su Marte invece esiste tuttora un'atmosfera molto rarefatta con una pressione al suolo di 7 hPa e l'acqua si trova allo stato sia gassoso sia ghiacciato. Il ghiaccio costituisce la maggior parte dell'acqua di Marte osservabile alla superficie del pianeta. Le nubi alte 16 km dell'atmosfera marziana sono costituite principalmente da cristalli di ghiaccio, come le nubi dell'alta atmosfera terrestre, e durante l'inverno nelle zone d'ombra si formano piccoli strati ghiacciati. La maggior parte del ghiaccio marziano risiede però nelle calotte po-

lari e probabilmente nei primi metri di sottosuolo. Vicino alla calotta polare nord, il cratere Korolev, con un diametro di 80 km, è riempito da una distesa di 2 km di ghiaccio. L'acqua non può esistere allo stato liquido a causa della bassissima pressione atmosferica che la fa sublimare, cioè passare direttamente da ghiaccio a vapore. L'esistenza di acqua liquida su Marte verrà discussa molto più in dettaglio nella Sezione 8.2.2. Anche per questo pianeta, nato caldo per accrescimento e contrazione, vale l'ipotesi che dopo la sua formazione parte dell'acqua superficiale sia arrivata attraverso le comete o i granuli di polvere.

Strati di ghiaccio ricoprono i satelliti dei pianeti giganti: su Europa essi creano una vera e propria crosta spessa fino ad alcuni chilometri. Sotto il ghiaccio dovrebbe trovarsi un oceano di proporzioni ancora sconosciute, composto da acqua mescolata ad ammoniaca e metano, due molecole che abbassano la temperatura di congelamento e permettono a questa miscela di restare quasi liquida. Poiché la temperatura tende ad aumentare verso l'interno di ogni pianeta, dovrebbero esistere nel sottosuolo di Europa regioni con acqua a temperature favorevoli a reazioni chimiche in grado di formare molecole biologiche. Naturalmente dovrebbe trattarsi solo di strati tiepidi in mezzo a zone con temperature molto più basse di quelle terrestri. La presenza di un oceano sotterraneo su Ganimede, Titano ed Encelado¹⁴ è più dubbia, come discusso in dettaglio nella Sezione 8.3, mentre su satelliti più piccoli, quali Rhea e Tritone¹² nel sistema di Nettuno, si sono trovate strutture superficiali che possono essere attribuite a ghiaccio d'acqua a bassissime temperature. Più all'esterno nel Sistema Solare, grandi depositi di ghiaccio d'acqua sono rappresentati dalle comete, che abbiamo già esaminato in precedenza.

Anche nell'atmosfera dei pianeti giganti e su Venere esiste uno strato di nubi con goccioline d'acqua a temperatura superiore a 0° C, ma è difficile pensare alla nascita di forme di vita limitate all'ambiente aereo. Questa affermazione però fa riferimento a una vita simile a quella terrestre, che ha avuto probabilmente bisogno di grandi quantità di acqua per formarsi. Non sappiamo se sia possibile una nascita della vita in una "nebbia" di goccioline, ma data la complessità dei processi coinvolti si può pensare che questo sia molto difficile.

A conclusione di questa Sezione possiamo comprendere che la presenza di acqua non sia una prerogativa esclusiva del nostro pianeta, anche se altrove essa è in grado di favorire una possibile biochimica solo in regioni ben delimitate, quali l'interno dei pianeti. Di questi aspetti si è tenuto conto nella progettazione di missioni scientifiche passate e future sui corpi che compongono il Sistema Solare.

¹⁴I satelliti citati appartengono a Giove (Europa e Ganimede), Saturno (Titano, Encelado, Rea), Nettuno (Tritone)

6

Origine della vita sulla Terra

Da molti anni il dibattito scientifico su come sia nata la vita sul nostro pianeta ha coinvolto un numero sempre crescente di ricercatori, inclusi diversi premi Nobel per la Medicina e la Chimica come per esempio Harold Urey, Ilya Prigogine, Walter Gilbert, Christian De Duve e Francis Crick, delle cui idee discuteremo in seguito. Gli esperimenti svolti finora non hanno portato a una conclusione condivisa da tutti, ma hanno permesso di gettare luce su numerosi problemi connessi ai meccanismi della vita, come quelli sulla struttura degli acidi nucleici e sulla funzionalità e particolarità delle proteine biologiche.

Sebbene discordi sul principio, la maggior parte dei ricercatori interessati all'origine della vita sulla Terra è d'accordo nel pensare che le prime e le più semplici forme di vita dovevano essere legate a tre tipi di molecole, in grado di svolgere le seguenti funzioni: quella replicativa, quella catalitica e quella isolante dall'ambiente. All'epoca attuale la prima funzione è svolta dagli acidi nucleici, mentre la seconda essenzialmente dalle proteine e l'ultima dalle molecole lipidiche. Solo gli acidi nucleici hanno però la funzione di codifica e trasmissione delle informazioni, come detto nella Sezione 2.2.4. Oggi i tre tipi di molecole lavorano simultaneamente per permettere il metabolismo e la riproduzione di una cellula e, nel caso delle membrane lipidiche, la protezione di questi processi dall'ambiente esterno. Poiché molte reazioni biologiche utilizzano l'acqua per attivarsi, le membrane possono costituire una difesa contro la dispersione delle sostanze prodotte in un ambiente liquido. L'origine di queste tre sostanze sulla Terra è quindi legata al problema dell'origine della vita.

6.1 Gli ingredienti della vita

Le prime idee sulla nascita della vita sostenute da esperimenti risalgono ad almeno due secoli fa. Per centinaia di anni si era creduto all'esistenza di una "generazione spontanea" della vita, perché osservando l'acqua stagnante o sostanze organiche lasciate all'aria aperta si osservavano nascere alghe, funghi, muffe o larve, come se essi fossero nati dal nulla. Ma già nel '700 l'olandese Van Leeuwenhoek, inventore del microscopio, aveva osservato e descritto quelle piccole ombre che vedeva muoversi nell'oculare del suo strumento, i batteri, intuendo che esistevano forme di vita invisibili a occhio nudo. Seguendo questi studi, intorno al 1862

Louis Pasteur condusse esperimenti che dimostravano come in piccoli ambienti isolati dall'aria non ci fosse generazione spontanea di muffe o funghi, né deterioramento di cibo. Egli sapeva che queste forme di vita microscopiche nell'aria erano responsabili della contaminazione e riproduzione di altri microrganismi, e che impedendo loro l'ingresso l'acqua sarebbe rimasta sterile. Si era tuttavia lontani dal concepire la vita come generata e trasmessa da molecole e considerare i processi metabolici come effetto di reazioni chimiche. L'idea che le prime forme di vita fossero nate da reazioni chimiche fu sviluppata solo sessant'anni dopo, tra il 1920 e il 1930, a opera del britannico John B.S. Haldane e del sovietico Aleksandr Ivanovič Oparin. Entrambi ipotizzarono che la vita si fosse generata sulla Terra da processi chimici avvenuti in un'atmosfera ricca di **sostanze riducenti** (composti contenenti idrogeno). Questo tipo di atmosfera è notevolmente diversa da quella attuale, dove le molecole di ossigeno possono sostenere forti processi di ossidazione. L'ipotesi di Oparin venne messa alla prova sperimentalmente negli anni '50 da Harold Urey e dal suo laureando Stanley Miller, che provarono a simulare in laboratorio la composizione chimica di quella credevano essere l'atmosfera primitiva terrestre in presenza di oceani. Essi mescolarono in un recipiente una miscela di metano, idrogeno, ammoniacca e vapor d'acqua sottoponendo i gas a scariche elettriche. Negli esperimenti, la miscela gassosa doveva assomigliare all'atmosfera primitiva, l'acqua rappresentava gli oceani primordiali e le scariche elettriche eventuali fulmini atmosferici. Il liquido di Miller viene definito genericamente **brodo primordiale**. In realtà, nessuna delle condizioni usate era stata tarata con dati sperimentali sulle percentuali di sostanze presenti sulla Terra primordiale, perché le informazioni allora note sulle prime epoche del nostro pianeta non erano molte, come non lo erano quelle sulle atmosfere riducenti, tipiche dei pianeti più esterni del Sistema Solare. Si può affermare che l'esperimento fosse molto approssimativo, ma era pur sempre un inizio di analisi sperimentale. Dopo diversi giorni di produzione di vapori e di scariche elettriche, la soluzione acquosa estratta dal recipiente conteneva numerosi composti organici. Diversi esperimenti simili, condotti negli anni successivi con varianti della miscela originaria, hanno prodotto risultati analoghi.

Cosa avviene in un esperimento "alla Miller"? Le scariche elettriche nei gas (CH_4 , NH_3 , H_2) sintetizzano acido cianidrico (HCN) e aldeidi (composti contenenti il gruppo CHO , come la formaldeide). Passate nella fase acquosa queste sostanze producono ammino-nitrili (contenenti NH_2 e CN), e idrossi-nitrili (contenenti OH e CN) che, a causa di scissione dovuta all'acqua (idrolisi), diventano amminoacidi e idrossiacidi. Anche altre sostanze importanti per la vita possono essere pro

Origine della vita sulla Terra

Tabella 6.1 Sostanze presenti negli esperimenti di Miller e Urey. La quantità di gas è espressa in termini della pressione parziale nella camera (hPa = ettoPascal), quella di liquidi in millilitri (ml). La nostra atmosfera al livello del mare ha una pressione standard di 1013,25 hPa.

Gas iniziali		Sostanze aggiunte per l'analisi	
metano	267 hPa	Cloruro di mercurio	
ammoniaca	267 hPa	Idrossido di bario	
idrogeno	133 hPa	Acido solforico	
Liquidi			
acqua	200 ml		
Principali prodotti finali			
Nome	Formula	Nome	Formula
acido formico	CH ₂ O ₂	acido a-ammino-n-butirrico	C ₄ H ₉ NO ₂
glicina	C ₂ H ₅ NO ₂	acido a-ammino-isobutirrico	C ₄ H ₉ NO ₂
acido glicolico	C ₂ H ₄ O ₃	acido a-idrossi-butirrico	C ₄ H ₈ O ₃
a-alanina	C ₃ H ₇ NO ₂	acido succinico	C ₄ H ₆ O ₄
acido lattico	C ₃ H ₆ O ₃	urea	CH ₄ N ₂ O
acido acetico	C ₂ H ₄ O ₂	N-metil-urea	C ₂ H ₆ N ₂ O
b-alanina	C ₃ H ₇ NO ₂	N-metil-alanina	C ₄ H ₉ NO ₂
acido propionico	C ₃ H ₆ O ₂	acido glutammico	C ₅ H ₉ NO ₄
acido imino diacetico	C ₄ H ₇ NO ₄	acido aspartico	C ₄ H ₇ NO ₄
N-metil glicina (sarcosina)	C ₃ H ₇ NO ₂		

dotte in laboratorio in condizioni simili a quelle dell'esperimento di Miller: gli **acidi grassi** si formano da ossido di carbonio (CO) e da idrogeno (H) a temperature di ~450 °C, mentre il **ribosio** può formarsi dalla formaldeide.

Questi esperimenti possiedono però diversi punti deboli. In primo luogo, essi non conducono direttamente alla produzione di tutti gli amminoacidi: l'unico amminoacido presente inizialmente nella soluzione di Miller è la glicina, che abbiamo già trovato nella composizione chimica del gas interstellare (Tabella 3.2) ed è stata scoperta nelle meteoriti carbonacee (Tabella 5.1) e nelle comete¹⁵, mentre gli altri si formano successivamente dai derivati dell'acido cianidrico, solo dopo un'ebollizione prolungata o attraverso la loro estrazione dalla soluzione usando acidi forti, come descritto nella Tabella 6.1.

¹⁵La glicina è stata osservata dalle sonde Stardust nella cometa Wild 2 e da Rosetta nella 67P/Churyumov-Gerasimenko.

Inoltre la concentrazione delle sostanze usata nel brodo primordiale era molto più alta di quella che poteva esserci in un oceano della Terra primitiva, per accelerare i tempi rispetto a un processo naturale, probabilmente lunghissimo. Infine, la critica maggiore all'idea che la vita sulla Terra si sia formata in condizioni fisiche e chimiche simili a quelle degli esperimenti di Urey e Miller nasce da quanto illustrato nella Sezione 5.7. Trattando della formazione del Sistema Solare, abbiamo ribadito come l'atmosfera primordiale della Terra derivasse da gas vulcanici e fosse quindi ricca di anidride carbonica (~95%) e viceversa molto carente di ammoniacca e metano. Questo perché la Terra deve essersi formata a temperature intorno ai 700 K, così alte da far fuggire o distruggere i composti volatili presenti inizialmente nella nube. Inoltre la formazione del pianeta tramite le collisioni di un gran numero di planetesimi, continuate nell'epoca del Grande Bombardamento, ha sottoposto la sua crosta a un continuo riscaldamento dovuto agli enormi impatti. Tutte queste condizioni, note solo dagli studi degli anni recenti, fanno supporre una Terra primordiale completamente diversa da quella immaginata da Oparin, Urey e Miller, dotata di un ambiente ricco di idrogeno. A meno di trovare ambienti ben delimitati in cui la composizione chimica doveva essere riducente, tutto farebbe supporre che la Vita non si sia formata partendo da un brodo "alla Miller".

A sostegno del valore di questo esperimento c'è tuttavia il fatto che esso può descrivere un meccanismo plausibile per la nascita delle sostanze prebiotiche. Gli amminoacidi sintetizzati sono in maggior parte molto robusti, cioè hanno un'alta probabilità di resistere alle condizioni ambientali e al passare del tempo e perciò possono essere riutilizzati per formare molecole ancora più complesse. Sostanze poco stabili non sarebbero molto utili nei primi processi di formazione della vita, a meno che esse non siano presenti in grandissima quantità. In esperimenti più recenti Miller è riuscito a produrre quasi tutti i 20 amminoacidi che entrano nel metabolismo cellulare, tranne la lisina, l'arginina e l'istidina. In atmosfera riducente è possibile anche la generazione di basi azotate, ma in questo caso non tutte resistono a lungo, per esempio le pirimidine. Che la sintesi di amminoacidi, purine e pirimidine sia possibile in un ampio intervallo di condizioni lo si era già evidenziato nella Sezione 5.3, poiché essi sono stati trovati nelle condriti carbonacee, nate nello spazio. La produzione di sostanze prebiotiche in esperimenti che cercano di riprodurre le condizioni locali di un pianeta non fa che confermare l'ampia gamma di possibilità esistenti alla loro sintesi. L'esperimento di Miller ha portato infine a comprendere che i composti prebiotici richiedono, per la loro formazione, la presenza di gas riducenti. Negli anni successivi infatti è stata tentata con lo stesso meccanismo (acqua, energia e miscele di gas) la sintesi di composti organici in condizioni ambientali ossidanti o neutre. Essi hanno mostrato, per

Origine della vita sulla Terra

esempio, che in presenza di anidride carbonica e acqua non è facile produrre queste sostanze se non in piccola quantità e con una stabilità inferiore a quella della sintesi in atmosfera riducente.

Per quanto riguarda le basi azotate, si è detto che alcune molecole simili sono state trovate nelle condriti carbonacee. Per comprendere e simulare i meccanismi della loro formazione la formammide, una molecola diffusa nello spazio interstellare, è stata mescolata a polvere di meteoriti di vario tipo e irradiata da fasci di protoni ad alta energia, simulando i raggi cosmici. Questo esperimento svolto in laboratorio simulando e condizioni dello spazio ha prodotto una larga varietà di composti prebiotici importanti quali amminoacidi, acidi carbossilici, basi azotate, zuccheri e, in particolare, quattro nucleosidi: citidina, uridina, adenosina e timidina. Risultati simili erano stati ottenuti riscaldando a 700 K strati di ossido di titanio e formammide e irradiandoli con radiazione UV. Anche negli esperimenti di laboratorio che simulano la formazione di ghiacci interstellari di H₂O, CO, NH₃ e CH₃OH, irradiando con luce ultravioletta si sono ottenute tutte e tre le pirimidine (citosina, uracile e timina) e tre nucleobasi puriniche (adenina, xantina e ipoxantina). Questo implica che sulla Terra primordiale oltre alla formazione di amminoacidi potevano arrivare attraverso la polvere cosmica o gli impatti anche basi di acidi nucleici, che hanno innescato i primi processi viventi.

6.2 Il mondo a RNA

Se è noto che all'epoca attuale la sintesi degli acidi nucleici (DNA, RNA) è catalizzata da proteine particolari (enzimi), che sono a loro volta sintetizzate dagli acidi nucleici, il problema che si presenta all'epoca delle origini è: chi è nato prima? Come nel cosiddetto dilemma dell'uovo e della gallina, bisogna chiedersi se in condizioni diverse da quelle attuali acidi nucleici o proteine possano aver iniziato da soli un processo che ha portato a una forma vivente. Una delle maggiori divisioni delle teorie attuali origina proprio da questo dilemma.

Le ipotesi correnti affermano che gli acidi nucleici siano stati i precursori delle prime forme di vita. Queste teorie vanno sotto il nome di "mondo a RNA", coniato nel 1986 da Walter Gilbert in un commento sulla scoperta che alcuni RNA, detti **ribozimi**, possiedono proprietà catalitiche, sono cioè in grado di favorire alcuni processi metabolici proprio come fanno le proteine. Il mondo a RNA ipotizza un'epoca primordiale in cui le proteine non avevano ancora iniziato le loro funzioni biologiche e dove semplici filamenti di acidi nucleici come l'RNA svolgevano sia il ruolo di conservatori dell'informazione genetica sia tutti i processi catalitici della vita primordiale. L'effetto protettivo prodotto dai lipidi sarebbe stato svolto dallo stesso RNA, che in acqua tende a raggrupparsi con altre molecole, avvicinando le

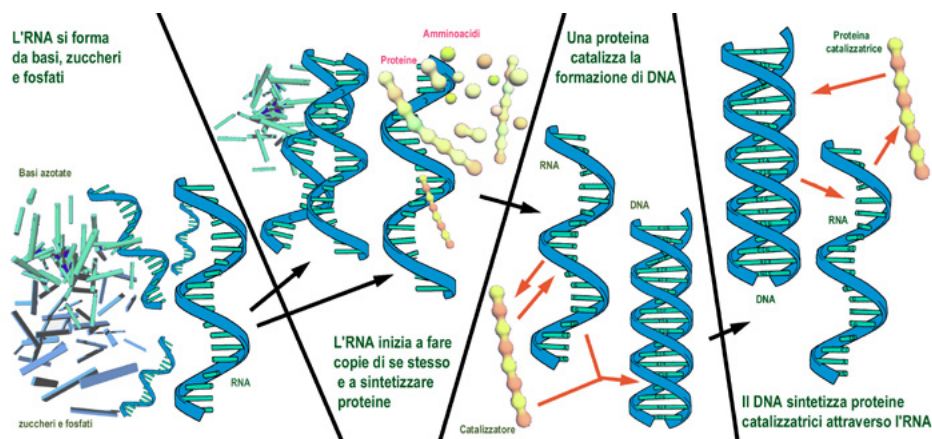


Figura 6.1 – Una possibile evoluzione del “Mondo a RNA” (Immagine: G. Galletta).

porzioni idrofobe delle varie molecole e presentando verso l'esterno bordi idrofili. I primi RNA avrebbero potuto associarsi con legami a idrogeno avvolgendosi in una struttura a doppia elica, come avviene oggi per il DNA.

Alcuni RNA attuali in effetti possiedono tratti intronici, che non entrano a far parte della molecola finale, che si distaccano spontaneamente (autodistacco dell'introne) favorendo il trasferimento di nucleotidi, in un processo simile a quello catalitico svolto dalle proteine. Per esempio, la costruzione di un filamento di RNA utilizzando singoli mono-nucleotidi è svolta generalmente da un enzima proteico definito RNA-polimerasi. Eppure un processo simile può essere svolto da un introne modificato del virus T4 che, in alcuni esperimenti, permette di “incollare” tra loro due tratti di RNA. Anche se la funzione svolta dal virus modificato non è allo stesso livello di quella della proteina, essa ci mostra che potrebbe essere plausibile una situazione molto antica in cui filamenti di RNA erano in grado di autoreplicarsi. Esistono altri esempi di RNA con funzioni da ribozimi e anche tra i viroidi, descritti nella Sezione 2.1.3, si trovano casi di modifiche spontanee dopo la replicazione. Questi fenomeni potrebbero essere residui di antiche attività ribozimiche rimaste incorporate in strutture biologiche attuali.

Un esempio di molecola utilizzata da tutti i viventi e quindi probabile residuo del modo a RNA è un dinucleotide, ovvero una molecola formata da due nucleotidi, detto **NAD** (nicotin-ammide-adenin-dinucleotide). Essa, accoppiata a uno ione idruro (da cui la molecola NADH) o come ione (NAD^+), rappresenta il più importante trasportatore di idrogeno nelle reazioni cataboliche, perché lo ione idruro possiede un legame debole, facilmente trasferibile ad altre molecole. Il NAD appare invariato e diffuso in tutta la biosfera e una delle sue basi, la **nicotinammide**,

Origine della vita sulla Terra

($C_6H_6N_2O$) non fa parte delle cinque basi “biologiche”. Questo lo fa credere una molecola comparsa alle origini, la cui funzione si è trasmessa a tutte le strutture successive. Oltre al NAD, la molecola di ATP, di cui abbiamo trattato nella Sezione 2.1, ha una funzione di portatore di energia nel metabolismo che appare diffusa in tutti gli organismi viventi e deve essere perciò molto antica.

L’idea che nelle cellule attuali porzioni di RNA con funzioni enzimatiche siano il relitto di funzioni antiche è sostenuta anche dal fatto che i ribozimi sono stati trovati in tutti gli organismi viventi. Abbiamo parlato prima dell’autodistacco dell’introne e Sezione 2.1 dei ribosomi, che contengono quattro molecole di RNA e proteine associate tra loro. I ribosomi si trovano sia nei batteri che negli archaea e negli eucarioti ma con sequenze nucleotidiche e strutture differenti. Un’attività ribozimica è mostrata anche dall’enzima **Ribonucleasi P (RNasi P)**, che contiene una porzione proteica legata a una singola molecola di RNA. Quest’ultima è in grado di produrre il taglio di un tipo di RNA (RNA di trasporto) mentre la parte proteica sembra agire mantenendo stabile la struttura dell’RNA catalitico. La RNasi P è presente in tutti i tre domini della vita: negli archaea, nei batteri e negli eucarioti, oltre che nei mitocondri e nei cloroplasti. Essa esiste in due varianti: una con RNA che abbiamo già descritta e l’altra basata solo su una proteina, senza RNA, che è stata trovata anche nei batteri e negli archaea.

Se dunque i primi acidi nucleici possono essere nati in un mondo in cui erano a disposizione basi azotate, ribosio e fosfati, si può pensare che in una prima fase essi abbiano potuto legarsi tra loro creando mononucleotidi e formando successivamente polimeri (Figura 6.1). Una volta raggiunta una lunghezza di un centinaio di basi, questi neonati filamenti di acidi nucleici avrebbero potuto assumere forme diverse nello spazio e creare aggregati con funzione di ribozima. In presenza di amminoacidi, che si possono formare negli stessi esperimenti di generazione degli acidi nucleici come in quello di Miller, sarebbe stata possibile la formazione di proteine tra cui alcuni enzimi con un’attività di polimerasi maggiore di quella dei ribozimi. Le combinazioni dei 20 amminoacidi biologici avrebbero garantito una gamma di attività enzimatiche molto più ampia di quella offerta dalle combinazioni delle quattro basi azotate dell’RNA e secondo il meccanismo di selezione naturale, il processo enzimatico guidato dalle proteine sarebbe riuscito a soppiantare gli altri, affermandosi come cardine del processo di riproduzione. Solo in un secondo tempo gli acidi nucleici avrebbero utilizzato il DNA, una molecola stabilmente basata sulla struttura a doppia elica e depositaria dell’informazione genetica, come descritto nella Sezione 2.2.4. In questo mondo, costituito di acidi nucleici simili a virus, si sarebbero sviluppati alcuni processi all’interno di membrane lipidiche, in grado di proteggere e quindi rendere più efficienti i meccani-

smi di riproduzione e il metabolismo.

Queste teorie sull'origine della vita tramite acidi nucleici incontrano però alcuni problemi. Uno di essi riguarda l'efficienza della produzione di acidi nucleici rispetto a quella delle proteine. In tutti gli esperimenti effettuati sulla generazione di molecole prebiotiche da un "brodo primordiale" i polimeri che si formano più facilmente sono gli amminoacidi, dopo il trattamento della soluzione acquosa risultante. Le basi azotate appaiono con difficoltà e non sono sempre stabili. Tuttavia si è visto nella Sezione precedente che le basi azotate, insieme a zuccheri e altre sostanze prebiotiche si possono formare sui ghiacci interstellari ed essere incorporati nel materiale che oggi forma le meteoriti. Anche se in condizioni terrestri la loro sintesi può essere difficile, tenendo presente il Grande Bombardamento come sorgente di acqua e di materiale chimico "freddo", non si può escludere che il contributo di molecole extraterrestri non sia stato decisivo.

Un altro punto da chiarire è che per avere una sintesi uniforme di nucleotidi occorrerebbe un meccanismo, tuttora ignoto, di selezione preferenziale di basi quali citosina e uracile, che appare solo nell'RNA, a scapito della creazione di altre sostanze analoghe. Una sequenza proteica costruita utilizzando gli amminoacidi presenti è senza dubbio più facile da produrre rispetto a una di nucleotidi che codifica un RNA. In passato si sono cercate sostanze catalizzatrici per questo processo selettivo, quali i cristalli di ferro e di zolfo, simili a quelli proposti Wächtershäuser nel 1988 per la formazione di lipidi, o le argille, proposte da Cairns-Smith nel 1985, sulle cui superfici si sarebbero aggregate catene di nucleotidi. Questo processo è analogo a quello illustrato nel Capitolo 4, considerando i granuli di polvere interstellare come catalizzatori di molecole complesse. Resta tuttavia difficile condurre oggi esperimenti e misure su processi avvenuti alcuni miliardi di anni fa in condizioni fisiche ancora incerte.

6.3 Una miscela speciale

A questo punto possiamo provare a riordinare un po' le idee. Ogni teoria che è stata proposta cerca di ridurre il problema dell'origine chimica della vita terrestre a una serie di processi che iniziano da una sola delle sue caratteristiche principali: quella informativa, connessa agli acidi nucleici. Le altre funzioni, quella catalitica e metabolica connessa alle proteine, e quella protettiva connessa ai lipidi, sono importanti. Tutte queste molecole aggregate insieme formano strutture (microsfere, liposomi, coacervati) che possono generare duplicati di se stesse ma non hanno la possibilità di trasmettere una vera e propria informazione come gli acidi nucleici. Da sole, non avrebbero potuto innescare lo sviluppo e la riproduzione di forme di vita con varianti, su cui ha agito la selezione naturale producendone una

Origine della vita sulla Terra

lenta ma progressiva evoluzione.

La difficoltà maggiore non è, in realtà, quella di trovare molecole in grado di riprodursi e di interagire con l'ambiente, eventualmente schermandosi con strati di sostanze organiche come fanno oggi i batteri. Sembra essere invece l'acquisizione di una struttura molto selettiva, con precise regole, che devono essersi trasmesse invariate nel tempo fino alle specie attuali. Come abbiamo anticipato nella Sezione 2.6 parlando del Precursore Unico di tutte le forme di vita terrestri, queste regole sono:

- le proteine biologiche attuali, anche se più sofisticate di quelle primitive, contengono solo 20 amminoacidi (vedi Tabella 2.3) e hanno precisi legami tra le loro molecole. Nei meteoriti e sulla Terra esistono altri amminoacidi, che vengono definiti per questa ragione 'non biologici' e, nonostante eventuali somiglianze, non entrano nel codice di costruzione delle forme viventi.
- Gli zuccheri coinvolti nella costruzione dei nucleotidi devono essere costituiti di cinque atomi di carbonio (**pentosi**). Essi sono il ribosio nell'acido ribonucleico (RNA) e il desossiribosio nell'acido desossiribonucleico (DNA). Zuccheri a sei atomi di carbonio, detti **esosi**, come il glucosio o il fruttosio, non si trovano mai nel DNA e RNA e negli esperimenti di laboratorio non risultano essere efficienti nella produzione di acidi nucleici.
- Tutte le molecole che fanno parte degli acidi nucleici e delle proteine biologiche hanno una spiccata chiralità, che fa predominare solo amminoacidi levogiri e zuccheri destrogiri. In natura esistono naturalmente molecole simili, con legami atomici di simmetria opposta, come gli amminoacidi destrogiri. Tuttavia essi non sono in grado di creare un'attività simile a quella biologica e non vengono mai usati spontaneamente dalle forme di vita, a parte una certa racemizzazione con il passare del tempo. Negli esperimenti citati nei paragrafi precedenti, un problema che si affaccia spesso è quello di una miscela completamente racemica oppure dell'instabilità del prodotto a mantenere un solo enantiomero. Per giustificare questo aspetto, diversi ricercatori hanno suggerito che la sintesi di molecole prebiotiche sia avvenuta in presenza di catalizzatori chimici o fisici che inducano solo una certa chiralità. Essi possono essere cristalli polarizzanti, che stimolino la tendenza levogira degli amminoacidi, ma in alcune ricerche è stata presentata addirittura l'ipotesi che la Terra primordiale abbia ricevuto la radiazione di una pulsar, il residuo di una stella massiccia esplosa come supernova, che emette un'energia polarizzata da un intensissimo campo magnetico (**radiazione di sincrotrone**). L'idea della pulsar appare originale, ma purtroppo questa stella, soprattutto se giovane, emette anche raggi X e UV, molto energetici e perciò dannosissimi per

un'eventuale sintesi molecolare. In generale, nessuna delle ipotesi tendenti ad attribuire alla sintesi primordiale una certa "simmetria" appare in grado di ottenere risultati soddisfacenti e accettati da tutto il mondo scientifico.

- Gli acidi nucleici, i lipidi e le proteine sono basati essenzialmente su una combinazione di sei atomi (PONCHS secondo i loro simboli chimici). Quattro di essi, idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno sono tra i più diffusi in tutta la Galassia e da questo punto di vista le proprietà della vita non appaiono eccezionali. Tuttavia, lo zolfo è più raro e il fosforo, come abbiamo già esposto è ancora meno abbondante e perciò la sua presenza costituisce una particolarità rispetto all'abbondanza cosmica di elementi disponibili. Eppure esso è essenziale per i processi biologici: i legami fosforici sono utili al trasferimento di energia nelle reazioni biochimiche e la molecola di ATP (adenosintrifosfato), sopra ogni altra, entra in centinaia di reazioni chimiche che scambiano energia dentro la cellula. Sotto forma di fosfolipidi, il fosforo entra anche come costituente essenziale delle membrane cellulari.
- Il meccanismo di replicazione degli acidi nucleici trasmette l'informazione accoppiando le triplette delle loro basi attraverso un codice, il codice genetico, che appare praticamente planetario, cioè unico per tutti gli organismi viventi.

Queste particolarità devono essere spiegate, possibilmente con un unico modello di partenza. E se al momento attuale un modello coerente con quanto sappiamo della vita primordiale non esiste, una semplice soluzione alla presenza di queste e altre peculiarità viene trovata con l'ipotesi del **precursore unico**. Possiamo pensare che, qualunque fosse il primo organismo vivente comparso sulla Terra, descritto nella Sezione 2.6 e chiamato anche LUCA, l'**ultimo progenitore comune**, esso avrebbe potuto possedere queste particolarità *per caso o per qualche altra ragione*. Tutta la sua progenie, evoluta poi nelle attuali specie viventi, avrebbe così ereditato l'uso di 20 amminoacidi prevalentemente levogiri, cinque basi contenenti fosforo e tutti i meccanismi essenziali alla vita. Quest'ipotesi è ragionevole e apparentemente senza conseguenze. Tuttavia essa contiene in sé un'importante intuizione: se la chiralità e l'attuale selezione di amminoacidi sono solo un'eredità del nostro precursore, forse in altri ambienti si sono potuti sviluppare precursori diversi, basati sul carbonio, ma con amminoacidi o zuccheri o chiralità differenti da quelle della vita terrestre. Attraente dal punto di vista filosofico, quest'idea ci suggerisce di non essere troppo rigidi nella nostra ricerca di vita nello spazio, anche se non si sa se sia possibile sviluppare una vita con molecole diverse dalle nostre.

Qui è doveroso ricordare che, per quanto riguarda il nostro pianeta, tra la sintesi "à la Miller" di amminoacidi e LUCA, probabilmente simile a un batterio con

Origine della vita sulla Terra

un meccanismo codificato di replicazione, passano centinaia di milioni di anni di vuoto della nostra conoscenza. Come vedremo nella Sezione 6.6, se la prima attività chimica può essere partita subito dopo il raffreddamento della Terra e insieme alla nascita degli oceani 3,95 Ga nel passato, le prime testimonianze di batteri, oggi fossili, sono stati trovati in rocce di 3,46 Ga, 490 milioni di anni dopo. Non sappiamo bene come da alcune molecole replicanti si sia passati, in un periodo che può essere stato anche così lungo, ad una struttura organizzata di un microrganismo. C'è ancora molto da scoprire.

6.4 Lo sviluppo dei microrganismi

Abbiamo comunque qualche informazione sul nostro precursore. Partendo dall'idea che l'evoluzione abbia proceduto per piccoli passi, variando a ogni generazione solo qualche meccanismo o qualche sequenza di nucleotidi, è possibile tentare di tracciare un diagramma di discendenza tra le specie viventi osservando come una specie sia distante dall'altra per caratteristiche genetiche. Questo non è l'unico modo di procedere per creare un 'albero genealogico' della vita, poiché man mano che si procede verso organismi superiori la struttura e le funzioni di ogni specie non sono semplicemente determinate da una collezione di materiale genetico ma comprendono anche attività superiori, quali la capacità di interagire con l'ambiente trasmettendo le conoscenze tra genitori e figli e, nel caso dell'uomo, la sua capacità di pensiero. Una specie potrebbe essere più distante geneticamente da un'altra, ma comportarsi con modalità simili o essere addirittura in simbiosi con essa. La classificazione zoologica e gli studi antropologici o di comportamento animale indagati dall'**etologia**, la scienza del comportamento animale, hanno sottolineato aspetti che vanno oltre la semplice combinazione dei geni. Dovendo però risalire ai primordi, quando i primi organismi erano plausibilmente unicellulari, occorre ricorrere alla biochimica. Essa afferma che anche negli organismi attuali il metabolismo che si attua assorbendo sostanze nutrienti per ricavarne l'energia necessaria alla cellula inizia con la fermentazione.

Nella **fermentazione** viene decomposta chimicamente una sostanza, solitamente un carboidrato, grazie all'azione degli enzimi. Nel caso in cui questo carboidrato sia il glucosio, un processo chimico detto **glicolisi** (scissione del glucosio) scinde la sua molecola, con 6 atomi di carbonio, in due molecole di **piruvato** con 3 atomi di carbonio, producendo ATP. Due molecole di ATP entrano in questa reazione a più stadi e producono 4 molecole di ATP e 2 di NADH. La fermentazione si presenta solitamente in un ambiente senza ossigeno e il piruvato può produrre, a sua volta, acido lattico o alcol etilico con il rilascio di anidride carbonica. Nella vita comune, la produzione del vino e della birra è un esempio di fermentazione.

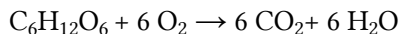
Negli organismi aerobici, che utilizzano l'ossigeno, al primo stadio descritto in precedenza con la formazione di piruvato dai carboidrati segue un ciclo, detto dell'acido citrico. In esso gli atomi di carbonio si trasformano in anidride carbonica mentre quelli di idrogeno si associano all'ossigeno producendo acqua o entrando nei trasportatori di energia come i NAD e GTP (simile all'ATP ma con guanina al posto dell'adenina). Il guadagno netto di ATP o equivalenti in questa seconda fase corrisponde a 34 legami, che vanno ad aggiungersi ai due guadagnati nella fase iniziale di fermentazione. Il processo globale qui descritto è detto **respirazione** e, nell'esempio riportato, è 18 volte più efficiente della sola fermentazione nel produrre ATP dal glucosio. Non ci stupisce perciò che, in presenza di ossigeno, il processo di respirazione si sia affermato in molti esseri viventi, essendo energeticamente più efficace. Tuttavia, in entrambi i casi, sia perciò negli organismi aerobi sia in quelli anaerobi, esiste un primo passo verso la produzione di piruvato che fa pensare a un'eredità comune avvenuta in assenza di ossigeno. Questo potrebbe essere quindi lo scenario delle prime forme di vita: una vita anaerobica, in assenza di ossigeno libero.

Se la vita può essere iniziata in condizioni anaerobiche, da dove può essere derivato poi l'ossigeno necessario per la respirazione? Proviene principalmente da un processo che utilizza una molecola detta **clorofilla**, composta di magnesio, carbonio, azoto, idrogeno e ossigeno, con la funzione di donatore di elettroni. È una sostanza verde, presente nelle piante terrestri, nelle alghe, nei cianobatteri e nei licheni, che partecipa a un processo detto **fotosintesi**, di cui abbiamo trattato nella Sezione 2.1.1. Come illustra il suo nome, la fotosintesi utilizza l'energia luminosa per produrre carboidrati e ossigeno da anidride carbonica e acqua.

Tenendo conto dello schema della fotosintesi:



e ricordando quello molto semplificato della respirazione, si ottiene:

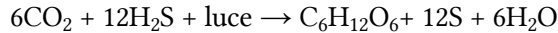


si può notare che i due processi sono sostanzialmente l'uno l'inverso dell'altro. Dal momento in cui la clorofilla ha potuto essere inserita in un processo di utilizzo dell'energia luminosa esistente sulla superficie terrestre, essa ha funzionato come produttrice di glucosio, generando anche ossigeno. La produzione di ossigeno ha frenato i processi biologici anaerobici, bandendoli in buona parte dall'atmosfera e dagli ambienti aerei. Essa ha modificato il metabolismo delle forme di vita facendo affermare la respirazione come processo per produrre energia.

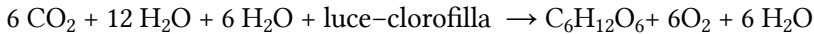
Prima che l'acqua fosse ampiamente disponibile sulla Terra poteva esistere una forma di fotosintesi simile a quella attuale basata però su sostanze diverse. Negli

Origine della vita sulla Terra

anni '30 Cornelius Van Niel scoprì che alcuni batteri potevano utilizzare zolfo anziché acqua come sorgente di idrogeno da 'ossidare' attraverso l'utilizzo di anidride carbonica. Questi **solfo batteri** sono in grado di attuare una forma di fotosintesi, già citata nella Sezione 2.1.1, attraverso la reazione schematica tra CO_2 e acido solfidrico (H_2S):



che è simile a quella scritta in precedenza per la fotosintesi, ma aggiungendo 6 molecole d'acqua



La reazione clorofilliana è più complessa di quella dei solfo batteri e quindi quest'ultima potrebbe essersi affermata all'inizio o nei luoghi dove la fornitura di solfuro d'idrogeno è molto abbondante, come nei pressi delle emissioni vulcaniche subaeree o sottomarine.

La fotosintesi è in grado inoltre di assorbire grandi quantità di anidride carbonica. La maggior parte della sua attività è svolta dai cianobatteri, negli oceani o sui continenti. Una parte rilevante ma minore è svolta dalle grandi foreste sui continenti. Ricordando che l'atmosfera terrestre primitiva era in gran parte composta da questo gas, è possibile pensare che parte di esso abbia iniziato a scomparire dall'ambiente aereo per entrare sotto forma di carboidrati o di altri composti organici nelle varie forme di vita. Morendo o tramite i prodotti del loro metabolismo esse possono averlo ceduto infine al terreno, sottraendolo definitivamente all'atmosfera. La potenza di questo processo e la diffusione di forme di vita sono così elevate da ritenere che la fotosintesi clorofilliana sia la responsabile della trasformazione dell'intera atmosfera terrestre. Facendo passare l'anidride carbonica, inizialmente presente dal 95% (in volume) a poco più dello 0,03%, nel corso di miliardi di anni le forme di vita fotosintetiche hanno creato una quantità di ossigeno molecolare pari al 21% (in volume) dell'intera atmosfera. Tale quantità è in un certo senso auto-regolata: se salisse troppo, produrrebbe la morte di numerosi organismi e verrebbe così diminuita la sua stessa produzione da parte degli organismi fotosintetici. Qualora scendesse eccessivamente, si produrrebbe per fermentazione una maggiore quantità di anidride carbonica che stimolerebbe a sua volta la produzione di nuovo ossigeno per fotosintesi. Così l'azoto, derivante dalle emissioni vulcaniche, è diventato oggi il maggior costituente dell'atmosfera. Approfondiremo nel Capitolo 8 come, in assenza di vita fotosintetica, Venere e Marte non abbiano potuto modificare la loro atmosfera vulcanica. Come abbiamo già detto nei capitoli precedenti, un altro meccanismo che sottrae anidride carbonica dall'atmosfera in presenza di acqua è basato sulla trasformazione dei silicati (CaSiO_3) che genera silice (SiO_2), calcio (Ca^{++}) e ioni carbonato (HCO_3^-)

nelle rocce carbonatiche.

Più di 2 miliardi di anni fa, a seguito della nuova produzione di ossigeno, in alta atmosfera l'azione dei raggi ultravioletti deve aver scisso le molecole permettendo la formazione di ozono (O_3). Questa molecola oggi produce il maggiore assorbimento di raggi UV e protegge il suolo e gli organismi viventi dai danni che potrebbero derivare da questa radiazione. Ma se la produzione di composti organici sulla Terra primordiale era favorita da sorgenti di energia come i raggi UV, la formazione dello strato di ozono deve aver bloccato questi processi produttivi, lasciando affermare altri processi metabolici, come la respirazione, più efficienti a creare energia con il materiale disponibile. Alla morte di cellule in grado di produrre sostanze organiche, il prodotto del loro metabolismo ha iniziato a essere disponibile per l'affermazione di forme di vita senza fotosintesi. Le forme di vita possono essersi così divise in produttori (come le alghe) e consumatori (come gli animali).

Questa rivoluzione può essersi attuata grazie ai cianobatteri. Essi sono in grado di attuare la fotosintesi anche con poca luce e sopravvivono a condizioni ambientali diversissime, dagli oceani al sottosuolo, in acqua dolce o salata, in presenza di ossigeno o in sua assenza. Questa adattabilità ha permesso loro di sopravvivere alle variazioni dell'ambiente terrestre con poche modificazioni. Grazie anche a una riproduzione asessuata, che permette di riprodurre l'individuo in maniera quasi identica, i cianobatteri attuali sono molto simili a quelli trovati nei fossili di due milioni di anni fa. Mentre le specie anaerobiche hanno avuto la necessità di migrare in regioni dove non si trova ossigeno libero e altri viventi come gli eucarioti hanno potuto riprodursi variando di molto le loro caratteristiche fino a generare migliaia di nuove specie, i cianobatteri possono rappresentare una forma di vita stabile sulla Terra.

Dopo essere nata, la vita terrestre con la sua evoluzione aerobica può avere arrestato gli stessi processi di formazione di nuove forme di vita affermandosi con i meccanismi già presenti. Sappiamo infatti che negli esperimenti di "tipo Miller" l'aggiunta di O_2 libero blocca la sintesi di amminoacidi e questo gas risulta velenoso a molte forme di vita, inclusi gli esseri umani, se respirato puro in grande quantità. Le nuove molecole organiche che nascono oggi vengono assorbite dagli esseri viventi già presenti oppure sono ossidate dall'aria. Qualora un ambiente "alla Miller" sia esistito sul nostro pianeta, l'arrivo dei cianobatteri deve averlo distrutto o relegato in piccole regioni isolate. Ossigeno e competizione biologica hanno finito per dominare la Terra.

L'evoluzione successiva compiuta dalla vita terrestre può essersi sviluppata se-

Origine della vita sulla Terra

guendo le regole di adattamento all'ambiente e di selezione naturale discusse nel Capitolo 2, permettendo la **competizione extraspecifica** e subendo a volte variazioni brusche, come nel caso di cambiamenti dell'ambiente a cui alcune specie viventi non sono riuscite ad adattarsi. In tal caso la variazione dell'ambiente può aver portato in poche generazioni alla scomparsa dell'intera specie. Quando diverse estinzioni avvengono in contemporanea per specie diverse, appartenenti ad ambienti diversi e diffuse su vaste aree del globo, questo fenomeno viene denominato **estinzione in massa**. L'estinzione non è necessariamente istantanea e può verificarsi anche nel corso di centinaia o migliaia di anni. Sulla Terra, ci sono state da 5 a 9 estinzioni in massa, dovute a varie cause. Da quella più antica del Precambriano (650 Ma) attraverso altre tra cui la Crisi del Permiano (250 Ma) in cui scomparve il 90% delle specie viventi, alla più nota Estinzione del Cretaceo-Terziario (65 Ma) in cui scomparvero i dinosauri, le ammoniti, le belemnite e altre specie. L'estinzione ha il vantaggio (evolutivo) di cancellare una gran parte delle specie del pianeta e permettere ad altre specie, che si erano rifugiate in alcune zone protette o nascoste (**nicchie ecologiche**), di espandersi e moltiplicarsi sul pianeta.

Nella ricerca di forme di vita su altri pianeti dobbiamo aspettarci, come sulla Terra, che i meccanismi metabolici affermatosi devono averne modificato l'ambiente: per esempio, una forma di vita fotosintetica può aver prodotto ossigeno nell'atmosfera del proprio pianeta. A sua volta l'ambiente attuale di questi pianeti dev'essere compatibile con forme di vita adatte a esso. Nel sottosuolo di un pianeta con atmosfera priva di ossigeno possiamo aspettarci, per esempio, forme di vita anaerobiche che non utilizzano la clorofilla. Allo stesso modo in un pianeta coperto da oceani e con vulcani sottomarini possiamo ipotizzare la presenza di un meccanismo simile a quello dei solfobatteri terrestri. Nel Capitolo 7 osserveremo che diverse forme di vita terrestri si sono adattate ad ambienti estremi per noi umani per quanto riguarda la loro temperatura, pressione e acidità, riuscendo ad attuare un particolare metabolismo. È proprio la varietà di forme di vita incontrata sul nostro pianeta che ci incoraggia a pensare all'eventuale esistenza di vita su altri.

6.5 Gli ambienti originari della vita

Se l'esperimento di Miller non poteva avvenire globalmente su una Terra primordiale la cui superficie era ricca di anidride carbonica, come spiegare la comparsa della vita? Come abbiamo detto, esistono almeno due possibilità: una legata alla "Panspermia chimica" e l'altra alla presenza di emissioni di gas vulcanici. Nel primo caso, la Terra non sarebbe quindi la generatrice della vita, ma solo la sua culla, in cui sostanze già elaborate hanno trovato le condizioni favorevoli per

assemblarsi: una temperatura stabile, l'acqua allo stato liquido e un rifornimento continuo di energia, sufficiente a stimolare le reazioni chimiche ma non tanto potente da distruggere le sostanze coinvolte. In tal caso amminoacidi, acidi nucleici e lipidi sarebbero stati tutti disponibili simultaneamente, senza la necessità di aspettarci che uno solo di essi sia stato il precursore di altri. Nel secondo caso, i meccanismi biologici sarebbero nati sulla Terra ma lontano dalla superficie esposta al Grande Bombardamento e quindi a condizioni instabili. Solo dopo, quando le condizioni superficiali lo avrebbero permesso, le forme di vita avrebbero colonizzato la superficie degli oceani e le terre emerse.

6.5.1. Panspermia chimica

La prima ipotesi suggerisce che tutte le molecole importanti per la vita si siano formate nello spazio e siano state deposte su una Terra sterile dopo il suo raffreddamento. Sappiamo che sostanze simili a quelle necessarie alla vita sono presenti nelle nubi interstellari da cui si formano stelle e pianeti. Perciò nulla vieta di pensare che esse fossero presenti nelle zone più fredde del disco protoplanetario del Sistema Solare. Una conferma a questa presenza ci viene dal ritrovamento di amminoacidi, basi azotate e in generale di sostanze simili a quelle biologiche all'interno delle condriti carbonacee (vedi la Sezione 5.3). Come nel caso dell'acqua degli oceani, una parte o tutte le sostanze prebiotiche potrebbero essere arrivate su una Terra sterilizzata dal calore degli impatti solo dopo il suo raffreddamento, trasportate da comete e polveri interplanetarie. Un buon trasportatore di molecole è costituito dalle micrometeoriti tra 100 μm e 1 mm, che costituiscono oggi il picco di dimensioni dei materiali che cadono sulla Terra dallo spazio. I minerali delle micrometeoriti possono incorporare il materiale organico, e se essi si degradano poco nella caduta al suolo, sono in grado di proteggerlo.

Naturalmente questo dipende dalla velocità di caduta al suolo, decine di km/s, e dalla composizione e densità dell'atmosfera che può bruciare la polvere per attrito. Come trattato nella Sezione 5.7, l'atmosfera primordiale della Terra doveva essere vulcanica, con abbondante vapor d'acqua e di anidride carbonica, ben diversa da quella primordiale di ammoniaca e metano prevista nell'esperimento di Miller. È probabile tuttavia che un residuo di atmosfera primordiale possa essere rimasto inizialmente ad alta quota. Un'atmosfera di questo tipo, con molecole più leggere, può favorire il passaggio di micrometeoriti frenandoli senza un eccessivo riscaldamento e conseguente distruzione delle sostanze che trasportano. Tra i materiali candidati ad essere il veicolo di sostanze prebiotiche ci sono granuli di carbonati (magnesite, calcite e siderite), silicati (forsterite e fayalite) e solfati (anidrite). Questi ultimi minerali, in grado di incorporare acqua e molecole organiche, secondo studi recenti possono resistere all'ingresso nell'atmosfera restando par-

Origine della vita sulla Terra

zialmente inalterati e permettendo al materiale organico di accumularsi al suolo.

Se le prime forme di vita sono nate 3,95 Ga nel passato, alla stessa epoca della nascita degli oceani, questo meccanismo di consegna delle sostanze prebiotiche potrebbe accorciare molto il tempo necessario alla nascita ed evoluzione della vita terrestre.

6.5.2. Ambienti protetti

Una seconda possibilità, legata invece all'idea che la vita sia nata completamente sulla Terra, suppone che le prime forme di vita si siano generate in ambienti particolari in cui i gas riducenti siano abbondanti, quali le pozze d'acqua calda riscaldate da vulcani (sorgenti idrotermali). Se restiamo legati all'ipotesi di Miller, che vede la luce e le scariche elettriche come le fonti di energia per la sintesi di sostanze prebiotiche in un'atmosfera riducente, possiamo immaginare le origini biologiche in acque tiepide e poco profonde con reazioni chimiche stimolate dai raggi UV solari, non ancora schermati dallo strato di ozono atmosferico. In vicinanza dei vulcani terrestri, le emissioni gassose includono oltre ad anidride carbonica, acido solfidrico e metano, anche altre sostanze contenenti idrogeno. Anche il fosforo, lo zolfo e l'azoto sono più abbondanti rispetto al resto del pianeta e possono concorrere alla formazione di sostanze più complesse.

Come vedremo nel prossimo capitolo, in queste zone, per esempio nelle sorgenti idrotermali a Vulcano, nelle isole Eolie, si trovano oggi microrganismi che possono vivere a temperature fino a 114 °C. Altri batteri amanti del calore (ipertermofili) si sviluppano a temperature simili: *Thermococcus*, *Pyrococcus*, *Hypertermus*, *Staphylothermus* si trovano in ambienti fino a 105 °C; *Pyrodictium* e *Methanopyrus* si moltiplicano tra 110 e 130 °C. Dal punto di vista genetico gli ipertermofili possono essere considerati i più antichi tra i batteri esistenti. Sono classificati tra gli *Archea* e molti utilizzano lo zolfo per il loro metabolismo (solfobatteri), producendo metano (metanogeni). Alcuni solfobatteri trovati in prossimità dei vulcani possono essere sia aerobi (utilizzano cioè l'ossigeno atmosferico) sia anaerobi. Dobbiamo aspettarci che le prime forme di vita possano essere nate in condizioni estreme di temperatura, pressione e acidità, molto diverse da quelle attuali, e che facciano parte perciò di una categoria di batteri detti estremofili. I batteri estremofili attuali possono vivere in zone con pH da 1,4 (molto acido) a 13,5 (molto alcalino), con temperature che oscillano fra i 130 °C (in regioni vulcaniche) e i -15 °C (nella brina nel permafrost siberiano), in acqua priva di sali, ma anche fino al 300% satura di cloruro di sodio. Batteri terrestri possono restare quiescenti all'interno di rocce porose del deserto, difese così dai dannosi raggi UV solari, ma si attivano in presenza di acqua. Possono restare congelati per milioni di anni

nel permafrost o inclusi nei sedimenti marini. Alcuni batteri aerobici estratti dai sedimenti marini del Pacifico del Sud, vecchi di 101 milioni di anni, sono stati coltivati con successo in laboratorio. Batteri estremofili adatti a vivere in ambienti con pressioni assai elevate sono stati trovati in giacimenti petroliferi e in depositi acquiferi in profondità.

Se la vita è nata intorno ai vulcani, essa potrebbe aver sintetizzato dai gas vulcanici diversi idrocarburi e acidi organici, inclusi tutti gli amminoacidi, con il concorso catalitico di metalli, utilizzando il calore anziché la luce o le scariche elettriche come sorgente di energia. In realtà nell'ambiente aereo gli amminoacidi ad alta temperatura potrebbero essere instabili. Secondo studi più recenti, non è alle sorgenti idrotermali aeree che dobbiamo guardare come culle della vita, ma a quelle sottomarine. Sui fondali oceanici, dove il magma che fuoriesce dalla crosta forma catene di vulcani (dorsali oceaniche), esistono regioni in cui il gas vulcanico, ricco di metalli, zolfo e idrogeno, alimenta batteri chemiosintetici estremofili che a loro volta permettono la vita ad animali marini in simbiosi con essi. Queste comunità isolate si aggregano attorno agli sfiatatoi vulcanici, detti *black smokers*, di cui tratteremo nella Sezione 7.1. Come vedremo, una sintesi calda di amminoacidi accanto ai vulcani sottomarini permetterebbe alle nuove molecole di muoversi per convezione e arrivare in brevissimo tempo in acque dalla temperatura più bassa, dove sarebbero stabili.

6.6 Cronologia della vita

I ricercatori che sviluppano esperimenti per comprendere come la vita si sia formata sulla Terra in genere non si chiedono in quanto tempo questo sia accaduto. Il primo obiettivo importante è scoprire quali reazioni possano generare una molecola o una microstruttura in grado di replicarsi e interagire con l'ambiente attraverso una forma di metabolismo simile a quelle delle forme di vita terrestri. Sarebbe già molto importante riuscire a rispondere a questa domanda. Il problema però si complica se attraverso la Geologia e la Paleontologia si esaminano i tempi in cui si è sviluppata la vita terrestre.

Abbiamo trattato nella Sezione 5.1 come si possa determinare l'età di una roccia attraverso i metodi radiometrici. Se gli esseri viventi sono fatti di atomi di carbonio, nel loro metabolismo essi fissano prevalentemente solo uno dei due isotopi stabili che esistono in natura: il carbonio 12 (C^{12}) composto da 6 protoni e 6 neutroni. L'altro isotopo stabile (C^{13}) possiede un neutrone in più nel nucleo ed è perciò un atomo più pesante. In natura sono privilegiati i processi fisici e chimici che si svolgono a minore energia. In questo caso le forme di vita utilizzano maggiormente l'isotopo più leggero, C^{12} , e quando animali e piante muoiono ne

Origine della vita sulla Terra

rilasciano nel terreno la quantità assorbita durante la loro vita. Il terreno così si arricchisce di carbonio 12. All'origine della Terra il rapporto C^{13}/C^{12} era quello "cosmico" (~50/1000), determinato dai processi di fusione nucleare all'interno delle stelle. Una volta nati processi che segregano l'isotopo più leggero, sul terreno questo rapporto si abbassa (ovvero aumenta la quantità di C^{12} al denominatore) fino ad arrivare a quello "biologico" nelle piante viventi (11/1000).

Capovolgendo il ragionamento, se si misura il rapporto isotopico del carbonio si può stabilire se un terreno, o un oggetto come una meteorite che contiene il carbonio ha subito l'influenza di forme di vita. Questo effetto si esprime con la variazione del rapporto C^{13}/C^{12} , riferito a uno standard che segna un arbitrario punto zero. Questo standard, nel 1957, è stato identificato con il rapporto isotopico misurato nella calcite del fossile di un mollusco del Cretaceo, *Belemnitella americana*, trovato nella formazione *Pee Dee* della Carolina del Sud (USA). Per questa ragione lo standard è stato denominato PDB (*Pee Dee Belemnite*). Successivamente, l'Agenzia Internazionale per l'Energia atomica (IAEA) a Vienna ha ridefinito lo standard, che è noto come VPDB (*Vienna Pee Dee Belemnite*). Il rapporto $R = C^{13}/C^{12}$ nel caso del fossile campione vale $R_{VPDB} = 11,237\%$ ed è naturalmente molto distante da quello presente nel materiale interstellare. Per chi fosse interessato ai dettagli tecnici, misurando R in un oggetto, ogni variazione da R_{VPDB} viene calcolata attraverso la formula:

$$\delta C^{13} [\text{‰}] = 1000 \times (R/R_{VPDB} - 1)$$

Nell'acqua marina si ha un δC^{13} prossimo allo 0, nell'erba che cresce nelle zone aride esso raggiunge -13% e nelle foglie fino a -27% , come elencato nella Tabella 6.2. Poiché il δC^{13} diminuisce con il tempo a causa del metabolismo degli esseri viventi, misurando i rapporti isotopici del carbonio di rocce sempre più antiche si potrebbe stabilire l'epoca approssimata in cui le forme di vita presenti sulla Terra hanno iniziato a metabolizzare il carbonio. Un altro fattore di abbassamento del δC^{13} con valori di ~ -15 è la presenza di chetogene, una miscela di sostanze di origine biologica che si trova nei sedimenti, che sottoposti a pressione e in tempi lunghissimi può formare bitume, petrolio, gas naturale, grafite.

Il meccanismo di segregazione isotopica avviene però anche nel caso dell'evaporazione: l'isotopo più leggero evapora più facilmente, e il serbatoio di materiale da cui proviene si arricchisce dell'isotopo più pesante. Sulla Terra questo avviene per l'ossigeno, l'idrogeno e il carbonio contenuti nell'acqua (H_2O) e nel metano (CH_4). Nei processi di ossidazione del metano, per esempio la sua conversione in anidride carbonica, si trasformano principalmente quelle molecole che contengono l'isotopo più leggero. Se questo gas viene nuovamente ridotto, per esempio tornando ad essere metano in una regione con acquiferi, esso avrà una bassa

Tabella 6.2 Valori approssimati del δC^{13} (in millesimi) nelle stelle, nelle meteoriti, sulla superficie terrestre e negli organismi viventi. Gli oggetti extraterrestri sono indicati in corsivo.

Sorgente	δC^{13} [‰]
<i>Stelle 1,5 M_{\odot} (valore teorico)</i>	3000 – 3900
<i>Condriti carbonacee</i>	25 – 75
VPDB standard	0
CO ₃ marina	0
CO ₂ del terreno	-5
CO ₂ atmosferico	-9
Erba in zona arida	-13
<i>Meteorite marziana ALH84001</i>	-15
Organismi e piante marine	-16
Legno fossile, carbone di legna	-24
Massimo valore nelle piante (riso, patate)	-33
Metano in zone anaerobiche	fino a -60

quantità di C^{13} e la sua presenza abbasserà il valore di δC^{13} , mimando quanto accade nei processi biologici. Su un altro pianeta, per esempio Marte, rocce con valori alti di δC^{13} potrebbero perciò derivare da forme di vita “fossili” oppure da metano derivante da processi non biologici. Torneremo a parlare di questo nella Sezione 8.2.

Purtroppo sulla Terra la tettonica a placche modifica e rimodella la maggior parte dei continenti ed è difficile eseguire misure alla ricerca di tracce di vita su rocce estremamente antiche. Tuttavia, come abbiamo esposto nella Sezione 5.1 dedicata alla formazione della Terra, le rocce databili più antiche hanno un’età di 3,96 Ga e i cristalli più antichi noti (zirconi) hanno un’età di 4,3 Ga. Tenendo conto, come detto nella stessa Sezione, dell’età delle meteoriti più antiche, si può datare la formazione del nostro pianeta intorno a 4,6 miliardi di anni fa.

Sappiamo che la Terra e la vicina Luna hanno subito un intenso bombardamento di planetesimi e asteroidi. Le grandi distese laviche dei mari, che testimoniano impatti così violenti da perforare la crosta e far fuoriuscire i basalti del mantello, appaiono più giovani del resto della crosta. Le rocce lunari riportate a terra dagli astronauti delle missioni Apollo mostrano un’età di 3,85 Ga per il Mare Imbrium, un enorme cratere da impatto di 1300 km di diametro e di ~3,5 Ga per l’oceano

Origine della vita sulla Terra

delle Tempeste. L'età di altri terreni lunari da cui non è stato possibile riportare frammenti di rocce viene stabilita contando il numero di crateri presenti per unità di superficie, raggruppati per diametro. Questo metodo non è molto preciso anche perché è di difficile applicazione a piccole regioni. Tuttavia il concetto è semplice: più un terreno è stato esposto all'esterno, più impatti ha ricevuto e perciò deve avere più crateri. Con questo metodo, si deduce che impatti abbastanza forti da creare crateri come Copernico (93 km di diametro) o Tycho (102 km) si sono verificati più recentemente, rispettivamente 800 e 109 milioni di anni fa. Crateri di qualche centinaio di chilometri di diametro sono prodotti dall'impatto di oggetti rocciosi di pochi km, che rilasciano al suolo un'energia equivalente a quella di un'esplosione di ~100 000 Megaton, in grado di bruciare ogni cosa per centinaia di km. Possiamo pensare che la Terra, sottoposta al Grande Bombardamento, sia stata un luogo molto poco ospitale per le forme di vita che vi stavano nascendo. Impatti con oggetti più grandi di 100 km sarebbero stati addirittura sterilizzanti per tutto il pianeta. Possiamo quindi supporre che, finché il bombardamento iniziale di planetesimi è stato massiccio, fino a 3,5 miliardi di anni fa, quando si formavano i mari lunari, l'ambiente superficiale terrestre doveva essere caldo e sottoposto a brusche variazioni di condizioni fisiche.

Sulla Terra le rocce sedimentarie più antiche sono state scoperte a Saglet Block, in Canada, con un'età di 3,95 Ga e nel massiccio di Isua, in Groenlandia, con 3,8 Ga. Queste rocce, parzialmente metamorfosate nel corso dei miliardi di anni trascorsi, derivano dalla deposizione di sedimenti trasportati dal vento e dall'acqua sul fondale di mari o oceani. Se così fosse, distese d'acqua dovevano essere già presenti 3,95 Ga fa. In queste regioni i sedimenti mostrano un contenuto di carbonio sotto forma di grafite e cherogene con valori δC^{13} da -13 a -28 ‰, mentre i carbonati presenti hanno valori di ~ -3. Valori anche maggiori sono stati misurati in rocce sedimentarie più giovani, a Pilbara (Australia), con un'età di 3,5-3,4 Ga e con $\delta C^{13} \sim -26$ ‰, e nell'isola di Akilia, Groenlandia, con età di 3,83 Ga e $\delta C^{13} = -37$ ‰. Questi valori, se corretti, indicano che le prime tracce di arricchimento di carbonio organico sono databili a prima di 3,95 miliardi di anni fa. Questi risultati sono sorprendenti. La Terra nasce caldissima, a centinaia di gradi, e si raffredda progressivamente bombardata da enormi impatti mentre i gas contenuti nel suo interno arrivano in superficie attraverso i vulcani. Il vapor acqueo forma le piogge che trasportano sabbie negli oceani, dove iniziano a formarsi quelle che oggi sono le rocce sedimentarie. In base alle datazioni radiometriche, questo avviene a ~3,95 Ga nel passato. Se insieme alla formazione degli oceani, creati dall'acqua bollente e sterile dei vulcani, esistono già delle forme di vita che hanno prodotto il valore di δC^{13} misurato oggi, può voler dire che la vita si è sviluppata subito, non appena ci sono state le giuste condizioni per il suo sviluppo.

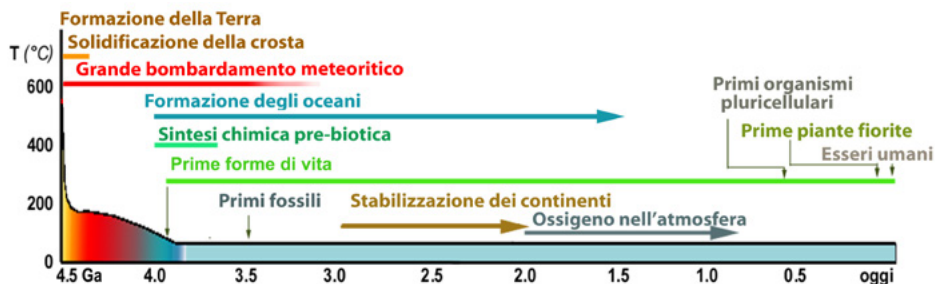


Figura 6.2 – Sequenza cronologica degli principali eventi terrestri dopo il raffreddamento della crosta. Il diagramma indica il calo della temperatura mentre le barre orizzontali indicano lo svolgersi degli altri eventi (Immagine: G.Galletta)

Ci vogliono centinaia di milioni di anni per passare dalle tracce chimiche di vita ai batteri. Microstrutture interpretate come batteri fossili sono state trovate in a Pilbara, in Australia, in rocce di 3,47 e 3,45 Ga, e nelle Barberton Mountains, in Sud Africa, in rocce tra 3,1 e 3,2 Ga. Questi fossili rappresentano residui di singole cellule e gruppi, disposti in filamenti o raggruppati, con 11 diverse specie di organismi classificate sulla base della forma e delle strutture dei filamenti stessi. Alcune di esse assomigliano ai cianobatteri attuali. Ci sono anche strutture filamentose carboniose larghe $\sim 2 \mu\text{m}$ e lunghe da decine a poche centinaia di μm , simili a quelle dei moderni batteri filamentosi. Il valore δC^{13} varia da -30 a -42,4 ‰ rispetto al PDB.

Oltre a queste strutture microscopiche, ne esistono altre a forma sferica o filamentosa simili a fossili, trovate all'interno di sedimenti stratificati. Queste stratificazioni sono prodotte da batteri, che catturano particelle di sedimenti marini in regioni influenzate dalla marea o in acque basse, racchiudendole in strutture a lamine o filamenti intrecciati. Quando le cellule muoiono, le particelle sedimentarie rimangono cementate a formare una lamina sottile di selce (SiO_2). Ogni nuovo strato che si forma con nuovi batteri può intrappolare altre particelle, producendo strutture a strati con una forma a cupola dette **stromatoliti**. Se invece le lamine sono trascinate dalle correnti, rotolando sul fondo marino, si formano strutture stratificate sferiche, chiamate **oncoliti**. Poiché entrambe derivano da un'attività biologica sono genericamente chiamate **strutture organogeno-sedimentarie**. Ancora oggi possono formarsi stromatoliti, a causa di colonie di cianobatteri, con una frequenza minore rispetto al passato. Alcune stromatoliti e oncoliti australiane hanno un'età tra 3,2 e 3,5 Ga e sono un'altra testimonianza fossile della presenza di vita in un'epoca di più di 3 Ga. Se queste stromatoliti sono state prodotte, come quelle attuali, dai cianobatteri, dobbiamo pensare che l'ossigeno iniziava a essere prodotto biologicamente già da quell'epoca.

Origine della vita sulla Terra

Tuttavia occorre spingersi fino a ~2 miliardi di anni fa per trovare i primi segni di una forte ossidazione dell'atmosfera, probabilmente in conseguenza della diffusione della fotosintesi a livello planetario. Questa forte ossigenazione dell'atmosfera è nota come **Great Oxidation Event**, o **Catastrofe dell'ossigeno**. I mari anossici e il terreno iniziano ad assorbire ossigeno già a 2,5 Ga, mentre lo strato di ozono si forma tra 1.9 Ga e 850 Ma, dall'ossigeno in eccesso. Dopo quest'epoca esso inizia ad accumularsi nell'atmosfera. La testimonianza geologica della presenza di ossigeno si manifesta dapprima con rocce silicee che contengono strati rossastri di ossido di ferro, indicativo del rilascio di piccole quantità di ossigeno nell'atmosfera o nell'idrosfera. Questi strati possono essersi formati negli oceani primitivi, anossici, dove il ferro doveva esistere in forma Fe_2 (ferroso), solubile e disciolto in acqua di mare. La comparsa di ossigeno nelle acque superficiali a opera dei batteri può averlo trasformato in Fe_3 (ferrico), producendo ossidi di ferro idrati, insolubili e in grado di precipitare sul fondo marino, accumulandosi con la silice. Rocce silicee con bande di ossidi di ferro appaiono in tutti gli attuali continenti e sono denominate **BIF** (*Banded Iron Formations*). Esse hanno un'età tra 3,2 e 2 Ga e scompaiono in sedimenti più giovani di ~2 miliardi di anni. Da quest'epoca appaiono invece depositi di rocce di colore rossastro, giallo o bruno, detti **Red Beds** formati da strati di limonite, ossido di ferro trivalente (Fe_2O_3). Anche le formazioni di uraninite (UO_2) nei letti di antichi fiumi precambriani sono prove della progressiva comparsa di ossigeno. Questo minerale si ossida facilmente producendo U_3O_8 che è solubile in acqua. Anche i depositi di uraninite sono più antichi di 2 Ga.

La comparsa di organismi produttori di ossigeno può avere frenato la sintesi di nuove molecole e amminoacidi, ma non ha estinto i microrganismi anaerobi. Essi hanno popolato nicchie lontane dalla superficie, come i fondali oceanici o il sottosuolo, dove li troviamo ancora oggi. Allo stesso modo, la comparsa della fotosintesi non ha fermato la chemiosintesi batterica: nelle stesse epoche, oltre ai batteri fotosintetici, altri procarioti operavano diversi tipi di metabolismi, tra cui la fissazione dell'azoto, ed è forse tra questi che vanno ricercati i primi organismi aerobici. La disponibilità di ossigeno atmosferico deve aver favorito la nascita del processo di respirazione, che permetteva di utilizzare l'ossigeno altrimenti pericoloso per molti batteri.

In conclusione di questa Sezione dobbiamo notare un problema che emerge dalla recente datazione delle prime tracce di vita e dell'età delle rocce terrestri. La Terra nasce caldissima, a centinaia di gradi, e si raffredda progressivamente mentre i gas contenuti nel suo interno arrivano in superficie attraverso i vulcani. La formazione di una crosta solida può essere fatta risalire a 4,3 Ga. Il vapor acqueo dei

vulcani forma le piogge che trasportano sabbie negli oceani, dove iniziano a formarsi quelle che oggi sono le rocce sedimentarie. In base alle datazioni radiometriche, questo avviene a ~3,95 Ga nel passato. In base all'età delle rocce dei mari lunari possiamo ipotizzare che il Grande Bombardamento sia durato almeno fino a 3,5 Ga, creando un ambiente superficiale inospitale, con forti variazioni di temperatura. In realtà impatti distruttivi sono anche continuati fino a oggi, ma con minore frequenza. In base alle stime dei modelli di formazione del Sistema Solare, da 4,3 a 3,5 Ga la frequenza di impatti si era tuttavia ridotta di 100 milioni di volte, pur restando ~10 volte maggiore di quella attuale. Ma in base ai rapporti isotopici misurati, la vita doveva già essere presente sul nostro pianeta intorno a 3,95 Ga. E riferendosi ai fossili, batteri potevano esistere sul nostro pianeta in epoche di 3,46 Ga (Pilbara), 3,2 Ga (Fig Tree Group) o 3,5 Ga (stromatoliti australiane). Ma come potevano esistere batteri o forme di vita su una Terra ancora sotto l'effetto della devastazione di impatti giganteschi, in grado di formare laghi di lava sulla Luna, con un effetto sicuramente simile anche sulla nostra crosta planetaria?

Se insieme alla formazione degli oceani, creati dall'acqua bollente e sterile dei vulcani, a 3,95 Ga esistono già delle forme di vita che hanno prodotto il valore di δC^{13} misurato oggi, può voler dire che la vita è un fenomeno "esplosivo", che nasce appena ci sono le giuste condizioni per il suo sviluppo, anche durante il Grande Bombardamento. Ma sulla superficie terrestre vi erano un oceano o pozze d'acqua anossiche a contatto con un'atmosfera piena di anidride carbonica, come la possiedono Venere e Marte ancora oggi. Allora solo ambienti speciali, ricchi di idrogeno, potevano generare la chimica necessaria a un brodo primordiale simile a quello riprodotto negli esperimenti di Urey e Miller. Questi potevano essere le zone intorno ai vulcani, aerei o sottomarini. Tuttavia anche ammesso di localizzare gli ambienti di nascita della vita primordiale terrestre, il tempo disponibile per tutti i processi chimici che hanno dato origine alle prime forme di vita non si misura in miliardi di anni, ma in centinaia di milioni o meno. Se si pensa poi ai fossili di 3,46 Ga, non basta una molecola in grado di riprodursi e avere un proprio metabolismo per generare strutture così grandi e complesse. Per avere un fossile di un batterio è necessario che tutta una sequenza di molecole si siano già formate e collaborino insieme: gli acidi nucleici per la riproduzione, le proteine per il metabolismo e i lipidi per le pareti cellulari, di cui è possibile trovare tracce nei fossili. Tutto questo si è realizzato in meno di mezzo miliardo di anni dalla nascita della vita!

Come può essersi realizzato l'arricchimento del carbonio non appena nati gli oceani e sotto il bombardamento meteoritico? Possiamo immaginare tre possibilità, presentate nelle Sezioni precedenti, oltre a un intervento esterno di tipo creazio-

Origine della vita sulla Terra

nistico: la catalisi, la nascita in regioni isolate dall'esterno o la panspermia.

Nella prima possibilità dovrebbe essere esistito un meccanismo molto efficace che ha guidato la sintesi delle prime molecole in modo tale che, una volta verificatesi le condizioni ottimali per la nascita della vita, essa ha potuto formarsi molto velocemente. Dovrebbe esservi stato dunque un catalizzatore fisico o chimico, come le piriti o altre sostanze. Tuttavia, attualmente non sono presenti indizi tali da credere fermamente che questo catalizzatore "forte" esista.

La seconda ipotesi vorrebbe che la vita abbia potuto formarsi non alla luce del Sole, ma nelle profondità del terreno o degli oceani, dove anche il Grande Bombardamento poteva avere un effetto minore su condizioni ambientali più stabili. In questo caso l'energia per la sintesi biochimica non proverrebbe dalla radiazione solare, ma dall'energia termica vulcanica o dalla chemiosintesi di gas. Le ricerche attorno agli sfiatatoi idrotermali o nei depositi di clatrati sottomarini possono confermare o smentire queste ipotesi.

Una terza possibilità rientra nell'idea generale che la vita, essendo basata su elementi chimici diffusi in tutta la galassia, possa essere nata nello spazio nelle nubi di polvere con una sintesi durata miliardi di anni e giunta in seguito sulla Terra sotto forma di granuli di polvere o trasportata da comete. In tal caso nuove quantità di sostanze organiche prebiotiche continuerebbero a cadere ancora oggi, ma sarebbero distrutte dall'ossigeno o dal metabolismo delle nostre forme di vita. Secondo alcuni ricercatori, come il già menzionato Hoyle, anche le epidemie virali che appaiono sporadicamente sarebbero il risultato di questa "pioggia" cosmica di forme di vita. Si è anche affermato nella Sezione 5.10 che una parte dell'acqua degli oceani terrestri potrebbe provenire dalle comete. Nell'ipotesi della Panspermia diretta di Crick si ipotizza addirittura che la vita terrestre derivi da un esperimento di colonizzazione realizzato da civiltà aliene più avanzate.

Non occorre tuttavia abbracciare completamente la panspermia per supporre che acqua e altre sostanze, più o meno importanti per l'origine della vita, derivino dalla parte esterna e fredda del Sistema Solare. Abbiamo notato che la Terra era inizialmente troppo calda e l'acqua vulcanica completamente sterile per rilasciare molecole così complesse come gli acidi nucleici o gli amminoacidi negli oceani dell'Archeano. Così diventa assolutamente necessario postulare un aiuto dallo spazio per formare le molecole necessarie, forse sotto forma di minicomete o di polvere cosmica. Inoltre, anche se l'ipotesi della provenienza dallo spazio di tutte o parte delle molecole necessarie alla vita non è sostenuta da prove certe, è indubbio che il problema di formarla in breve tempo potrebbe essere risolto se le sostanze prebiotiche, come acidi nucleici, amminoacidi e lipidi, fossero già

arrivate dall'esterno durante e dopo il Grande Bombardamento. Non si tratta solo di comprendere l'origine della vita su questo pianeta: se la sua nascita è dovuta a condizioni tipiche ed esclusive della Terra, l'esplorazione del Sistema Solare, attualmente in corso, non potrà che offrirci nuove frontiere sterili. Anche attorno ad altre stelle occorrerà cercare solo pianeti simili alla Terra per dimensioni, temperatura e massa che orbitano attorno a stelle con la stessa temperatura superficiale del Sole. Ma se essa dipende da meccanismi che non sono un'esclusiva del nostro pianeta, possiamo allora aspettarci di trovarla anche in altri luoghi, nel Sistema Solare come attorno ad altre stelle diverse dal Sole. Risolvere questo dilemma, per il nostro pianeta, significa quindi aprire o chiudere un enorme orizzonte.

7

Ambienti terrestri estremi

Alcuni luoghi della Terra presentano condizioni chimiche e fisiche così diverse da quelle tipiche dei nostri continenti o dei mari da assomigliare ad ambienti extraterrestri. Si potrebbe pensare che dove le temperature sono molto sotto lo zero, come avviene alla superficie del pianeta Marte, oppure troppo alte come nei pressi dei vulcani, non esista la possibilità di trovare forme di vita attive e in grado di riprodursi. Le temperature non possono essere troppo alte perché sopra i 125 °C il materiale genetico inizia a dissociarsi, mentre a basse pressioni l'acqua contenuta negli organismi tende a sublimare, eventualmente distruggendo le pareti cellulari. Allo stesso modo, nei fondali oceanici, dove non c'è luce solare né ossigeno libero a sufficienza, ci si aspetterebbe un deserto sterile rispetto alla ricchezza di vita esistente alla superficie. O nel sottosuolo, senza luce né ossigeno, l'ambiente dovrebbe essere così inospitale da rendere molto difficile la sopravvivenza. Invece negli ultimi anni sono stati trovati diversi ecosistemi ricchi di forme di vita che si sono adattate o sviluppate in condizioni simili a quelle appena descritte. Oltre ad animali adattati a queste condizioni particolari, la maggior parte delle forme di vita trovate sono microrganismi detti estremofili, in grado di resistere a temperature, pressioni e acidità insopportabili per gli esseri umani. I microrganismi estremofili finora scoperti sono distinti in:

- **Psicrofili** – vivono in ambienti freddi come ghiacci e Antartide, anche a -15°C.
- **Termofili** – vivono in ambienti caldi come vulcani sottomarini e laghi vulcanici, fino a 113 °C
- **Alcalofili** – vivono in ambienti basici come laghi evaporati di soda, fino a pH 11
- **Alofiti** – vivono in ambienti molto salati come laghi evaporati e miniere di sale
- **Acidofili** – vivono in ambienti molto acidi come geysir sulfurei, fino a pH 0
- **Barofili** – vivono ad alte pressioni, come i fondali sottomarini o il sottosuolo fino a 122 MPa
- **Osmofili** – vivono in ambienti molto zuccherini
- **Xerofili** – vivono in ambienti desertici con pochissima acqua
- **Anaerobi** – vivono in assenza di ossigeno

- **Microaerofili** – vivono solo dove c'è poco ossigeno
- **Endolitici** – abitano nelle rocce e nelle caverne
- **Tossicotolleranti** – possono sopportare alti livelli di agenti nocivi (benzene o radiazioni nucleari)

Gli ambienti degli estremofili sono simili a quelli esistenti su altri corpi rocciosi del Sistema Solare e perciò lo studio delle forme di vita trovate in essi ci possono aiutare a comprendere che cosa ci si può aspettare di trovare nelle future missioni di esplorazione. Gli ambienti che studieremo in questo capitolo iniziano con le manifestazioni di attività vulcanica sottomarina. Abbiamo discusso nella Sezione 5.9 l'importanza delle regioni vulcaniche perché nei magmi si trovano composti di fosforo sotto forma di apatiti e perché l'ambiente è in grado di produrre idrogeno. Successivamente si passerà agli ambienti molto freddi e aridi, come le regioni e i laghi dell'Antartide o i depositi di clatrati nei fondali oceanici. Infine tratteremo di vita in ambienti sotterranei, senza luce e con un'atmosfera composta da gas vulcanici. Lo studio delle forme di vita che si sono affermate o adattate a questi ambienti estremi ci permetterà di comprendere meglio i limiti fisici e chimici di quelle che potrebbero trovarsi su altri pianeti.

7.1 Vita intorno ai **black smokers**

Nel 1977 nei fondali vicino alle isole Galapagos è stato scoperto un ricco ecosistema marino intorno a camini vulcanici attivi. Dopo di esso sono state scoperte numerose altre zone ricche di sfiatatoi vulcanici sottomarini, come nella Dorsale Atlantica o nel Jan de Fuca Ridge nell'Oceano Pacifico. I condotti sono larghi al massimo alcune decine di centimetri, ma nel Pacifico possono raggiungere alcuni metri. Essi si sviluppano in altezza fino ad assumere l'aspetto di camini alti anche decine di metri. Da essi i solfuri metallici a contatto con l'ossigeno precipitano formando ossidi scuri che intorbidano l'acqua. In particolare, il solfuro di ferro (FeS) forma un flusso nero simile al fumo, che dà a queste strutture il nome di **black smokers**, o fumarole nere.

La chimica di queste zone è particolare: l'acqua si trova a pressioni tra 70 e 300 bar, a seconda della profondità dei *black smokers*, e fuoriesce mescolata al gas e alle particelle a temperature maggiori di 370 °C. In queste condizioni essa perde la distinzione tra liquido e vapore e si comporta come un fluido con un'alta capacità di solvente e una maggiore produttività di ioni. La forte pressione favorisce la polimerizzazione delle sostanze e può aumentare molto la viscosità dei fluidi organici. In questo ambiente, la sintesi di composti organici complessi può essere più facile rispetto alla superficie. Rispetto ai vulcani terrestri, le concentrazioni di zolfo sotto la forma di acido solfidrico (H₂S) sono almeno 5 volte maggiori. Anche

Ambienti terrestri estremi

l'emissione di metano, che nei vulcani aerei è inferiore a poche parti per milione, può essere di più di un ordine di grandezza maggiore. L'idrogeno libero, raro nei siti termali terrestri, può arrivare al 5% del gas totale. Nelle zone idrotermali sono stati trovate anche altre specie chimiche abbondanti, come fosforo, azoto e diversi metalli. Si noterà che queste sostanze creano un ambiente molto simile a quello dell'esperimento di Miller, a parte l'assenza di luce e l'alta pressione. Nei *black smokers* l'ossidazione di FeS con H₂S genera pirite (FeS₂) e rilascia l'idrogeno necessario alle reazioni metaboliche. In questi sfiatatoi vulcanici vengono emesse anche sostanze come i **tioli**, precursori dei **tioesteri**, proposti in alcune teorie come molecole basilari per l'origine della vita. Nelle simulazioni di laboratorio, le molecole di FeS in presenza di acido formico e in combinazione con i gas ricchi di idrogeno e carbonio generano acido acetico (CH₃COOH). Ad alta temperatura e pressione e in presenza di un altro gas vulcanico, CO, viene prodotto acido piruvico. Se questo si unisce all'ammoniaca (NH₃) si possono formare amminoacidi. In realtà gli amminoacidi ad alta temperatura e pressione potrebbero essere instabili, come lo sono gli acidi nucleici o l'acido piruvico, che si decompone a 165 °C. Tuttavia un sistema come uno sfiatatoio vulcanico ha un veloce ricambio di acqua a causa dei moti convettivi dei gas e dell'acqua riscaldata. Le sostanze prodotte possono passare velocemente da ~400 °C a 4 °C muovendosi verso l'esterno e verso l'alto diventando così stabili. Se tali simulazioni possono rappresentare processi simili a quelli dell'origine della vita, allora queste regioni rappresentano i residui attuali di quelle zone in cui si sono formate le prime reazioni biochimiche.

I sostenitori della nascita della vita negli sfiatatoi idrotermali, come Wächtersäuer, notano che il solfuro di ferro (FeS) si accumula nel tempo, creando addensamenti grigiastri con una struttura a nido d'ape. Nei fori di questa struttura, larghi poche decine di micron, si addensano i fluidi idrotermali ricchi di idrogeno, cianuri (+CN), solfuri (+S) e monossido di carbonio (CO). Le strutture di FeS sono semipermeabili, permettendo a queste sostanze di entrare ma impedendone la dispersione nell'acqua oceanica. Queste strutture avrebbero potuto trattenere le sostanze biologiche svolgendo la funzione di membrane e facendo da catalizzatori ai processi vitali primordiali.

Nelle regioni dei *black smokers* attuali si trovano numerose forme di vita, sia microscopiche sia macroscopiche. Tra essi solo tre specie scoperte usano l'ossigeno. La maggior parte degli altri batteri isolati nelle bocche idrotermali sono archaea anaerobici, eterotrofi e metanogeni. In pratica, essi non hanno bisogno di ossigeno, non producono le sostanze necessarie al loro metabolismo, ma utilizzano quelle già presenti e producono metano. Essi utilizzano lo zolfo, nella forma SO₄ o S₂O₃, come accettore di elettroni e in sua assenza alcuni di loro possono impie-

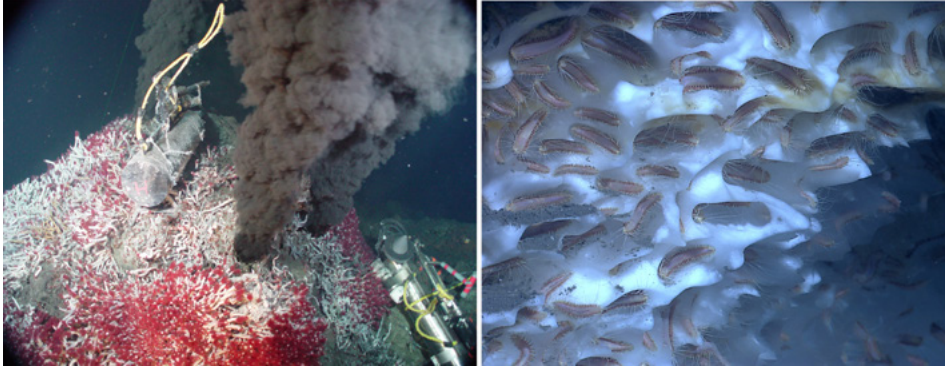


Figura 7.1 – *A sinistra*: I camini vulcanici o *black smokers* sui fondali oceanici circondati dai vermi a tubo (Foto: NOAA); *a destra*: i clatrati di metano sul fondale del Golfo del Messico con i vermi del ghiaccio che utilizzano il metano per il loro metabolismo (Foto: NOAA Okeanos Explorer Program, 2012 Expedition).

gare i carboidrati presenti. Come per le prime forme di vita, la maggior parte di essi usa il meccanismo di fermentazione, mentre pochi usano il ciclo dell'acido citrico per fissare la CO_2 .

Alla superficie di alcuni archaea del tipo *Igniococcus*, presenti in una regione idrotermale a nord dell'Islanda, sono stati trovati batteri ancora più piccoli, a cui è stato dato il nome di *Nanoarchaeota*. La dimensione degli *Igniococcus* è di 1000-2000 nm, mentre questi batteri quasi sferici hanno 400 nm di diametro. Essi non sono in grado di vivere in coltura senza la presenza degli *Igniococcus*, ma sembrerebbero avere un RNA ribosomale. Dopo la scoperta in mare, alcuni batteri che fanno parte di questa specie, *Nanoarchaeum equitans*, sono stati trovati nei siti caldi, con emissione di fluidi idrotermali, nel parco di Yellowstone in USA e nella Kamchatka in Russia. Essi potrebbero rappresentare un'altra forma di vita primitiva ancora da studiare in dettaglio.

In questo ecosistema non vi sono piante o batteri fotosintetici perché la luce è troppo scarsa. Tuttavia ne esistono alcuni che usano una forma diversa di clorofilla rispetto a quella delle piante, la batterioclorofilla, sensibile all'infrarosso. Essi utilizzano quindi la radiazione IR prodotta dall'acqua calda e a pressione dei *black smokers*. Una singola bocca degli sfiatatoi emette in genere tra 3 e 9 MW, ma quelle più calde possono arrivare fino a 300 MW con un'emissione di calore molto intensa. Sebbene questi batteri siano normalmente eterotrofi, in caso di necessità (mancanza di molecole di carbonio organico) possono attivare questa particolare fotosintesi, raggiungendo una maggiore competitività rispetto agli altri batteri.

All'esterno degli sfiatatoi esistono numerosissime specie di animali non micro-

Ambienti terrestri estremi

scopici (**macrofauna**). In questi anni i ricercatori ne hanno trovate più di 500, molte delle quali completamente nuove. Diversamente dalla vita batterica, simile in tutti i *black smokers*, la macrofauna può variare da zona a zona: in alcuni siti come nella parte est dell'Oceano Pacifico, esistono vermi Policheti e molluschi bivalvi. Questi ultimi invece non sono presenti nella regione di Jan de Fuca, mentre nella Dorsale Atlantica o nell'Oceano Indiano intorno agli sfiatatoi idrotermali non si osservano né vermi né molluschi, ma gamberetti. Tra gli animali presenti, alcuni di essi hanno adottato una strategia di simbiosi con i batteri. I vermi Policheti per esempio ospitano al loro interno colonie di batteri ipertermofili eterotrofi. La specie batterica può anche dipendere dal tipo di materiale del fondale. I vermi a tubo, che vivono sugli sfiatatoi in rocce basaltiche, utilizzano batteri diversi rispetto a quelli che vivono in sedimenti fangosi. Le caratteristiche di questi animali sono molto particolari. L'*Alvinella* (Verme Pompei), lunga ~13 cm e chiomata con numerosissimi peduncoli, può resistere in acqua da 40 a 90 °C, la più alta temperatura sopportata da un animale. La *Riftia pachyptila*, un verme bianco con una punta di colore rosso, largo pochi cm e lungo fino a 3 metri, non ha bocca, né occhi né stomaco, ma contiene milioni di batteri che producono il proprio cibo dall'acido solfidrico. La *Riftia* vive in acqua calda fino a 30 °C, ma in assenza di acido solfidrico muore.

La vita intorno agli sfiatatoi vulcanici può diffondersi verso altri sfiatatoi anche se la simbiosi tra animali e batteri può interrompersi nella riproduzione. Le uova e le larve dei vermi a tubo non sembrano contenere batteri, mentre li contengono quelle dei molluschi bivalvi. A causa del movimento dell'acqua calda in risalita e delle correnti oceaniche, le larve dei molluschi trasportate lontano possono trovare altre bocche idrotermali possedendo già il loro corredo batterico. Invece le larve dei vermi a tubo dipendono dalla disponibilità e dal tipo di batteri per la loro sopravvivenza. Quando uno sfiatatoio si spegne, fatto che può avvenire in un intervallo da qualche decina a poche migliaia di anni, la fauna presente muore. Dove se ne apre un altro, per esempio lungo una dorsale vulcanica, esso può essere colonizzato in pochi anni da nuove larve che provengono dagli sfiatatoi vicini. Per effetto di questa dipendenza, la macrofauna insediata nei pressi degli sfiatatoi sottomarini non può allontanarsi molto dal luogo di nascita. Essa appare simile lungo una cresta di montagne vulcaniche, ma diversa tra una catena e un'altra.

Lo studio delle forme di vita e della biochimica intorno agli sfiatatoi idrotermali sottomarini ha aperto la strada all'idea che non necessariamente la vita possa svilupparsi ed evolversi alla luce del Sole o sulla superficie dei pianeti. Come osserveremo, altre zone di origine vulcanica, ma più fredde, sono state trovate sui fondali, in corrispondenza di risalite di calore senza emissione di gas o in regioni

dove i gas naturali vengono intrappolati nel ghiaccio d'acqua.

7.2 Vita in regioni idrotermali subacquee

Nella dorsale atlantica esistono regioni in cui pur non essendoci attività vulcaniche l'acqua viene riscaldata dalle rocce calde del mantello, esposte sulle fratture della crosta. L'olivina presente nel mantello viene esposta all'acqua di mare reagendo fino a produrre minerali detti serpentine, costituiti da un gruppo di molecole del tipo $\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH}_4)$ legato a vari composti di ferro, alluminio, magnesio ecc. Questo processo di trasformazione, detto **serpentinizzazione**, riscalda l'acqua da 40 a 150 °C e crea getti ricchi di minerali, che tendono a risalire verso l'alto fino a incontrare quella fredda del fondo dell'oceano. Raffreddandosi a contatto con essa, i getti rilasciano i sali minerali che cristallizzano sulle rocce vicine. Col passare del tempo i depositi costruiscono dei veri e propri camini, alti decine di metri e composti completamente da minerali carbonati. Il flusso biancastro che contraddistingue i getti di queste regioni è molto diverso da quello nero del solfato di ferro emesso dai *black smokers*.

La prima regione costituita da pinnacoli di carbonati scoperta nei nostri oceani è nella Dorsale Atlantica, a 30° N ed è stata chiamata Lost City (Città Perduta). Le strutture presenti si innalzano fino a 60 metri dal fondo marino, con colori dominati dal bianco dei carbonati depositati da poco al bruno di quelli più antichi e alterati dall'ambiente esterno. L'età della regione rocciosa sottostante è di ~1,5 Ma.

In queste zone non vi è vita macroscopica come per gli animali che vivono intorno ai *black smokers*, ma esistono numerosissime colonie di microbi con una densità che raggiunge anche 100 milioni di batteri per ogni grammo di carbonato. Alcuni di essi sono **mesofilici**, cioè vivono in condizioni di temperature intermedie, a 25 °C; altri invece sono **termofilici** e sono in grado di resistere a temperature più elevate, tra i 50 e i 70 °C. Benché non vi siano ancora molti studi sulle forme di vita di queste regioni idrotermali sottomarine, probabilmente si tratta di batteri in grado di ossidare il metano e l'idrogeno.

7.3 Vita tra i clatrati oceanici

In alcune zone dei fondali marini terrestri i gas naturali restano intrappolati nel reticolo cristallino di ghiaccio d'acqua, formando strati di clatrati (vedi Sezione 2.2.1) spessi parecchi metri. Questo avviene tra 500 e 1000 metri di profondità sullo zoccolo continentale, una regione che segna il passaggio tra le parti emerse dei continenti e la scarpata che piomba nelle profondità dell'oceano. La pressione a cui si formano questi depositi di clatrati è tra 50 e 100 volte quella atmosferica

Ambienti terrestri estremi

e la loro temperatura supera di poco i 7 °C. Queste “pozze ghiacciate” possono essere larghe 60 m o più e sono molto più salate dell’acqua circostante. Nel Golfo del Messico, dove si trovano alcuni di questi depositi, le pozze di clatrati si sono formate nel Giurassico (200-150 Ma) durante un prosciugamento della regione. Il mare evaporato ha lasciato depositi di sale, sepolti poi nel corso dei secoli da sedimenti che hanno permesso la formazione di idrocarburi. In seguito il mare risalendo ha ricoperto le pozze, relegandole di nuovo sui fondali.

Come nei *black smokers* e nelle zone idrotermali, esiste una popolazione di batteri chemiosintetici che vivono nella brina utilizzando il metano e l’acido solfidrico per il loro metabolismo. Queste sostanze vengono convertite in materiali nutrienti che servono da cibo per gli animali più grandi. Nella zona circostante i sedimenti vivono animali come mitili, molluschi bivalvi, gamberetti e vermi a tubo. Essi sono simili a quelli trovati attorno ai *black smokers*, anche se tendono a essere più piccoli. I mitili si spingono fino ai bordi delle pozze, mentre gli unici animali che vivono nei clatrati sono i vermi del ghiaccio. I batteri che vivono nei sedimenti convertono gli idrocarburi e i solfati in acido solfidrico. Questo si diffonde nell’acqua fino a giungere agli animali che vivono sui bordi. Poi i grandi vermi a tubo lo raccolgono, insieme all’ossigeno estratto dall’acqua, e alimentano con queste sostanze i batteri che vivono in simbiosi al loro interno. Questi a loro volta producono carbonati nutrienti per i vermi. Nel caso dei piccoli vermi del ghiaccio, lunghi tra 2 e 5 cm, senza occhi e con una struttura a segmenti, la loro nutrizione avviene probabilmente attraverso i batteri che utilizzano il metano. Alla luce delle lampade subacquee, i batteri donano ai depositi di clatrati un colore arancione, mentre i vermi del ghiaccio appaiono gialli. Il rosso con varie gradazioni è il colore dei mitili e dei granchi, mentre il bianco e il rosso dei vermi a tubo creano zone variopinte accanto agli sfiatatoi vulcanici. È curioso osservare come questi ambienti oscuri nelle profondità del mare siano colorati in maniera così intensa.

Questa comunità di batteri e animali in simbiosi è in grado di vivere completamente isolata dalla luce solare e dalle condizioni climatiche esterne. La loro attività è totalmente chemiosintetica e una simile comunità potrebbe vivere probabilmente anche in ambienti simili agli oceani sotto la crosta ghiacciata di Europa (vedi la Sezione 8.3).

7.4 Vita nei ghiacci

Durante l’esplorazione di regioni remote ed estremamente fredde del nostro pianeta sono stati trovati microrganismi adattati nel permafrost siberiano o in Antartide. Data la bassa temperatura a cui si trovano, essi restano quiescenti e possono mantenere questo stato per lunghissimo tempo. Tuttavia durante l’estate

antartica il calore del sole è in grado di sciogliere piccole quantità del ghiaccio che si trova in superficie, a contatto con i granuli di polvere depositati. Questi ultimi operano come collettori di calore e fanno nascere goccioline d'acqua in cui i batteri si risvegliano per svolgere il loro breve ciclo vitale. Insieme a queste colonie batteriche si trovano anche microscopiche alghe. Microrganismi e alghe vivono anche nelle acque gelide dei laghi, coperti da strati di ghiaccio.

In Antartide sono stati trovati più di settanta laghi, sotto una coltre di ghiaccio che può raggiungere alcuni chilometri. Essi vengono scoperti con osservazioni aeree che utilizzano radar a 60 MHz. Le onde elettromagnetiche di questa frequenza passano attraverso il ghiaccio e colpiscono il suolo sottostante. Se la roccia è irregolare, coperta di massi o di fratture, le onde radar si disperdono e l'eco è molto debole. Se invece la superficie è liscia, come nel caso di un giacimento di liquidi, esse vengono in maggior parte riflesse e ritornano verso il radar con un eco molto intensa. In questo modo è stato scoperto il più grande dei laghi antartici, il lago Vostok, che si trova sotto l'omonima stazione russa, a 1000 km dal polo sud e a 3400 m di quota. Questo lago è esteso 250 per 50 km e profondo da 100 a 600 m, e si trova a 500 metri sotto il livello del mare. La sua estensione è pari a quella del lago Ontario, uno dei grandi laghi che si trovano tra Canada e Stati Uniti. Il lago Vostok è attualmente coperto da uno strato di ghiaccio di quasi 4000 metri di spessore. Sotto il ghiaccio si trova acqua liquida, con una densità che fa pensare ad acqua dolce. Il lago potrebbe essersi formato in un'epoca in cui l'Antartide aveva un clima più temperato ed essere stato progressivamente coperto dai ghiacci quando, seguendo la deriva dei continenti, si è spostato verso il Polo Sud. Sul fondo del lago potrebbero esserci uno strato di sedimenti spesso ~300 metri, a una pressione di 380 bar, come sui fondali marini. La temperatura dell'acqua alla sommità della volta ghiacciata deve essere di ~-3 °C, ma essa può aumentare verso il fondo, sia per il calore interno della Terra sia per la protezione termica dello strato di ghiaccio che agisce da "coperta". Il calore proveniente dal sottosuolo ha valori inferiori o simili a quelli di un continente terrestre, il che fa pensare a un ambiente ad alta pressione, freddo e oscuro, senza bocche vulcaniche idrotermali sul fondo del lago, che produrrebbero un maggior flusso di calore di quanto osservato. Quindi l'ambiente del lago Vostok è tipicamente ad alta pressione, freddo e oscuro.

I quasi quattro chilometri di ghiaccio sopra il lago sono stati perforati, in un'escavazione (carotaggio) iniziata nel 1970. Inizialmente lo scavo ha raggiunto ~3600 m e si è fermato a 100 m dalla volta di ghiaccio del lago. Il cilindro di ghiaccio estratto da questo scavo ha mostrato che i depositi più profondi hanno un'età di ~0,42 Ma, facendo pensare che il congelamento della superficie del lago sia

Ambienti terrestri estremi

iniziato tra 0,5 e 1 Ma nel passato. Si era pensato di usare una sonda che sciogla il ghiaccio fino ad arrivare all'acqua e liberi un *hydrobot*, un mini-sommergibile computerizzato che dovrebbe esplorare il lago alla ricerca di forme di vita e prelevare campioni. Ma nel 2012 una squadra di ricerca ha completato la perforazione, e quando il trapano ha raggiunto l'acqua, una certa quantità di essa è sgorgata dal pozzo, spingendo fuori il kerosene lubrificante usato dalla trivella. Nella trivellazione finale sono state trovate 19 specie di batteri dovuti a contaminazione del kerosene o umana e successivamente pochissimi batteri di una specie non classificata. Gruppi di ricerca che hanno studiato campioni di altri laghi antartici ghiacciati hanno trovato batteri con una percentuale di sequenze genetiche non corrispondenti a nulla di ciò che si trova nei database del DNA. Poiché la maggior parte dei batteri terrestri non è stato classificato geneticamente, questi ritrovamenti non sembrano rappresentare la scoperta di nuove specie.

L'analisi microscopica dei materiali inglobati nel ghiaccio dei laghi antartici ha permesso anche di scoprire numerosi microfossili e diverse forme di vita. Alcune di esse sono facilmente riconoscibili perché simili ai nostri batteri, funghi, lieviti, spore, grani di polline oppure diatomee, quei microscopici scheletri silicei creati da cellule o gruppi di cellule che formano il plancton. Attaccati ad alcuni cianobatteri sono presenti anche nanobatteri. Ma altre strutture trovate nel ghiaccio hanno forme che non sono riconoscibili, e non è chiaro se possano rappresentare esseri viventi di un passato di centinaia di migliaia di anni oppure abbiano un'altra origine non biologica. In genere i microrganismi trovati nel ghiaccio sono più piccoli di quelli "normali", un fatto che potrebbe essere attribuito alle basse temperature e alla scarsità di cibo. La loro concentrazione a 3589 m di profondità è tra 3 000 e 30 000 cellule per millilitro (ml). Ma già a 3603 m questi valori diminuiscono, per giungere a 200-300 cellule/ml, un valore molto basso, inferiore a quello di ogni altro ambiente estremo della Terra. Come esposto in precedenza, i batteri non crescono nel ghiaccio a causa della mancanza di acqua liquida. Tuttavia, batteri estratti da più di 3 km di profondità e con un'età di ~400 ka sono stati riattivati in laboratorio e coltivati dopo un lunghissimo periodo di inattività (una vera ibernazione!).

Che tipo di vita ci si può aspettare di trovare? Il lago Vostok è rimasto isolato dal resto del pianeta da centinaia di migliaia di anni. La fauna allora esistente può essersi trovata in una situazione simile a quella delle grotte di Movile che tratteremo nella Sezione 7.5, dove gli organismi esistenti si sono adattati all'ambiente sfruttando le forme di energia disponibili. Nel caso del lago Vostok le forme di vita potrebbero essere simili a quelle delle regioni idrotermali più fredde o delle pozze di clatrati.

Il lago Vostok non è l'unico habitat che riproduce condizioni di freddo estremo. Alcune zone dell'Antartide racchiuse tra montagne hanno una temperatura superficiale così bassa che la sublimazione dell'acqua indotta dal vento è più forte della caduta di neve a causa di precipitazioni. Così i ghiacci non hanno modo di formarsi sul suolo roccioso e il terreno appare completamente arido. In questo senso, queste vallate sono simili all'ambiente marziano freddo e privo di acqua. Queste vallate aride (*Dry Valleys*) possiedono però antichi laghi, saturi di sale depositatosi nel corso del tempo a causa della continua fuga nell'atmosfera dell'acqua che giunge dalle cime vicine. Il lago Vanda nella Wright Valley è uno di questi. Esso ospita colonie di batteri e fitoplancton sotto una copertura di ghiaccio. Al suo interno sono stati trovati corpi mummificati di foche, animali di un mare che oggi dista centinaia di chilometri. Un altro lago simile è il Vida, nella Victoria Valley, lungo 5 km in una zona con una temperatura media annua di $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ alla superficie. L'acqua di questo lago, grazie alla grande quantità di sale disciolto, resta liquida anche a $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nel carotaggio del lago Vida si è riusciti a estrarre microrganismi di almeno 2800 anni fa. Tutti questi ambienti antartici estremi rivestono un'importanza particolare per gli studi biologici e rappresentano un utile banco di prova di ipotesi connesse all'Astrobiologia.

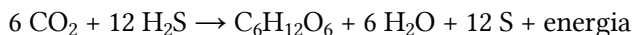
7.5 Vita nelle grotte sulfuree

Un altro ambiente sotterraneo che sulla Terra ospita vita è quello di alcune grotte ricche di gas e acque vulcaniche, come la grotta di Movile, in Romania e quella di Villa Luz a Lechuguilla, in Messico.

La grotta di Movile si trova nei pressi del Mar Nero e si addentra nel sottosuolo per diverse decine di metri, fino a giungere sotto il livello del mare, con pozzi e campane di roccia in cui ristagnano i gas prodotti nel suo interno. Il sistema di grotte e cunicoli si espande per $\sim 12000\text{ m}^2$ ed è rimasto isolato dall'ambiente aereo della superficie terrestre fino al giugno 1986, quando venne scoperta a causa di sondaggi effettuati nelle rocce calcaree per la costruzione di una centrale elettrica. La grotta deve essere rimasta isolata per più di cinque milioni di anni, quando il clima di quella regione è passato da tropicale a temperato e l'antico mare della Sarmazia si è ritirato dalla regione di Dobrogea. Le specie animali allora esistenti sono sopravvissute rifugiandosi in nicchie ecologiche isolate come questa caverna. Non essendoci luce, esse hanno perso la loro pigmentazione e sono cieche. Perciò insieme a nuove specie, diverse altre trovate nella caverna sono simili a quelle che vivono all'esterno in altre località. L'ecosistema delle grotte di Movile è autosufficiente ed è basato su una catena di predatori e prede che include vermi, rari scorpioni d'acqua e altri animali e che termina con batteri e funghi che rica-

Ambienti terrestri estremi

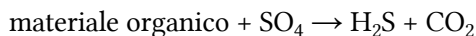
vano energia e producono zuccheri e acqua dall'ossidazione dell'acido solfidrico (H_2S). Questa sostanza dal caratteristico e sgradevole odore di uova marce si trova in zone idrotermali, come l'isola di Vulcano nelle Eolie. I solfuri provengono da sorgenti calde nel sottosuolo. Il meccanismo è approssimativamente:



Questi batteri sono **chemiosintetici**, perché utilizzano l'energia chimica per produrre sostanze nutrienti, diversamente dalla fotosintesi in cui gli zuccheri sono prodotti con l'energia della luce solare.

L'acqua che chiude le due "campane" proviene dal sottosuolo a una temperatura di 20 °C e ha un alto contenuto di solfuro d'idrogeno. La superficie di questi laghi sotterranei è coperta da strati di batteri e funghi chemiosintetici. Lo zolfo libero elaborato dai batteri si deposita sulle pareti delle grotte, mentre l'atmosfera sovrastante, chiusa dalle rocce e contenente azoto e metano, è asfissiante: l'ossigeno presente è da 10 000 a 200 000 volte meno concentrato dell'atmosfera esterna al livello del mare.

Un'altra grotta simile, ma esposta alla luce in alcuni punti e non sigillata dall'esterno è la grotta di Villa Luz negli altopiani del Chapas, in Messico. Scavata nel calcare formatosi nel periodo Cretaceo ha un'estensione di ~2 km, con diverse zone aperte verso l'alto tramite pozzi-luce. Anche qui l'emissione di acido solfidrico domina le zone interne e le forme di vita microscopiche usano la sua ossidazione come sorgente di energia producendo cibo per altri organismi. Lo zolfo libero prodotto da queste reazioni può essere ossidato trasformandosi in acido solforico. Questo scioglie la roccia tramutandola in gesso, che forma aggregati simili a gocce pietrificate che scendono dalla volta (**mucoliti**). Le particelle di gesso sono tenute insieme da batteri o funghi e probabilmente dai fili prodotti dai numerosi ragni che vivono nella grotta. L'acidità di questi ambienti è molto alta (pH 0,3-0,7 e in alcuni punti 0,0). La zona contiene anche batteri che riducono il solfato di zolfo, modificando i solfati naturali presenti nell'acqua in acido solfidrico. Una tipica reazione può essere:



Diversi tipi di macrofauna vivono a Villa Luz: moscerini, pesci biancastri tipo *Pecilia (Poecilia sphaenops)* e pipistrelli. Anche se queste forme di vita più complesse non destano interesse per quanto riguarda la possibilità di vita in altri pianeti, ci confermano il fatto che comunità microbiche con o senza animali più grandi possono esistere in maniera autosufficiente isolate dal resto del pianeta. Oltre alle due grotte descritte in dettaglio, comunità batteriche basate sull'ossidazione dello zolfo sono presenti in altre caverne di tipo carsico, come il complesso Grotta del

Fiume - Grotta grande del Vento a Frasassi, a 61 km da Ancona, che ospita anche mucoliti. Oltre a esse, vanno ricordate la grotta Lower Kane vicino a Lovell nel Wyoming e la grotta Cesspool, nella contea di Allegheny in Virginia, entrambe negli USA.

Insieme alle sorgenti idrotermali subacquee e ai *black smokers*, le grotte sulfuree ci convincono del fatto che ecosistemi nascosti dalla superficie del pianeta possono affermarsi stabilmente in maniera indipendente dalle condizioni esterne.

8

Vita nel Sistema Solare?

Quello che è accaduto sulla Terra quasi 4 miliardi di anni fa, si è ripetuto o può ripetersi anche altrove, su un altro pianeta nel Sistema Solare o intorno ad altre stelle? Se sulla Terra si sono sviluppate forme di vita anche in ambienti con condizioni fisiche e chimiche estreme, queste condizioni sono presenti anche in altri luoghi del Sistema Solare. In questi anni si sta sviluppando un'intensa attività di esplorazione dei pianeti e dei satelliti maggiori attraverso l'invio di sonde automatiche che li esplorano dall'orbita (orbiter) o che atterrano al suolo (lander), esplorandolo con robot mobili (rover). Una parte di queste sonde possiede strumenti per l'analisi chimica dell'atmosfera e del terreno e può fornirci importanti informazioni sull'ambiente planetario. In alcuni casi, gli strumenti trasportati sono stati progettati espressamente per la ricerca di forme di vita extraterrestre. Ma dove ci si può aspettare di trovare vita, tenendo conto del vasto intervallo di condizioni ambientali in cui vivono gli estremofili?

Mercurio è troppo caldo e troppo piccolo per trattenere un'atmosfera significativa dal punto di vista biologico. Anche la Luna è molto piccola e non in grado di trattenere un'atmosfera. La loro superficie è cosparsa di crateri, testimonianza del Grande Bombardamento, e le sostanze presenti sono spesso dissociate dalla radiazione solare ad alta energia (UV, X). Non esiste acqua superficiale e il vulcanesimo ha avuto breve durata. Lo stesso quadro desolato offrono molti satelliti rocciosi come quelli di Urano e gli asteroidi. La loro superficie è craterizzata e senza atmosfera.

Venere è un pianeta caldissimo a causa di un imponente effetto serra, ma che può riservare ancora delle sorprese nel sottosuolo o nelle nubi alte e più fredde. Marte presenta condizioni estremamente interessanti, e sarà oggetto di una discussione molto dettagliata in questo capitolo.

Nel loro viaggio verso il Sistema Solare esterno, diverse sonde spaziali hanno sorvolato i satelliti dei pianeti esterni ed esplorato Plutone: intorno a Giove le sonde *Pioneer* e *Voyager*, Galileo e *Juno*, a Saturno la sonda *Cassini*, ad Urano e Nettuno la *Voyager 2* e a Plutone la *New Horizons*. Molti satelliti sono craterizzati e senza atmosfera, altri come Io (di Giove) hanno vulcani attivi alimentati da un'enorme marea, creata da Giove da una parte e da Europa e Ganimede dall'altra, che

scarica la sua energia riscaldando il satellite. A causa delle maree la superficie rocciosa di Io si solleva di 100 m. La sua temperatura media è di 130 K (-143 °C), ma i numerosi vulcani attivi e le caldere vulcaniche presenti possono raggiungere temperature di 1500 K. La tenue atmosfera composta di gas sulfurei crea condizioni ambientali molto particolari rispetto a quelle degli altri ambienti del Sistema Solare. Non vi sono ipotesi a favore di una possibile presenza di vita su Io.

Più promettenti gli altri grandi satelliti di Giove, Europa e Ganimede, e di Saturno, Titano ed Encelado. Coperti da una crosta ghiacciata spessa anche diversi chilometri, sembrano custodire un oceano sotterraneo nascosto sotto il ghiaccio. Anche di loro parleremo in dettaglio. Su Tritone, satellite di Nettuno, sono stati osservati dei getti di azoto e polvere scura, probabilmente carboniosa, mentre anche su Plutone una vasta pianura a forma di cuore sembra nascondere un mare sottostante. Purtroppo, a parte le missioni Galileo e Cassini che hanno orbitato per anni intorno a Giove e Saturno, le missioni che hanno studiato Urano, Nettuno e Plutone sono state limitate a un passaggio ravvicinato al sistema pianeta-satellite per poi perdersi nello spazio profondo. Tutto ciò che di interessante è stato osservato non può essere approfondito fino ad una futura missione con un viaggio di diversi anni.

8.1 Venere, una serra caldissima

Venere ha una massa e una struttura simili a quelle della Terra. Ma le condizioni fisiche alla sua superficie sono estremamente diverse, per la presenza di un enorme effetto serra. Sin dall'epoca della sua formazione, 4,5 miliardi di anni fa, i vulcani di Venere hanno prodotto gas serra scaricandoli nell'atmosfera. Se questi gas non vengono alterati da processi chimici e i loro componenti non entrano nelle rocce, essi contribuiscono ad alzare sempre di più la temperatura globale. Così nel corso di miliardi di anni la sua temperatura superficiale si è innalzata fino ad arrivare a 465 °C attuali, quasi costanti dall'equatore ai poli. Questo tipo di effetto serra è detto **a valanga** perché, una volta instaurato e raggiunta una soglia di squilibrio, esso non può che aumentare senza che alcun fenomeno naturale possa arrestarlo. Man mano che l'emissione di gas si accumula, anche la pressione atmosferica cresce. Su Venere, essa ha raggiunto al suolo il valore di 9,5 MPa, come nei fondali marini a quasi 900 m di profondità. Per questa ragione si ritiene che la superficie del pianeta sia oggi troppo calda per ospitare qualsiasi forma di vita basata sul carbonio o su reazioni chimiche simili alle nostre. Inoltre, l'anidride solforosa (SO₂) emessa dai vulcani si combina con il vapor d'acqua e l'idrogeno e forma acido solforico (H₂SO₄), che è presente nelle nubi e cade al suolo come una pioggerellina corrosiva.

Vita nel Sistema Solare?

Tuttavia nel 2020 osservazioni radio hanno rivelato nell'atmosfera di Venere insieme a moltissime altre bande molecolari di composti noti, una singola riga di assorbimento a 266,9 GHz, (1,12 mm) che è stata interpretata come dovuta alla fosfina (PH_3). Questa molecola va incontro a una veloce degradazione sia per **fotolisi** (dissociazione dovuta alla radiazione UV del Sole), sia per ossidazione dovuta all'acido solforico delle nubi e in generale attraverso reazioni dei radicali O, H, e OH, che lo trasformano in PH_2 e altri composti. Anche se l'intensità della riga è stata successivamente corretta dalle fluttuazioni elettroniche del segnale, secondo gli osservatori la sua presenza è in quantità troppo alta per pensare a una produzione inorganica con i meccanismi noti sulla Terra, come emissioni vulcaniche e fotolisi dell'acido fosforico (H_3PO_4).

La fosfina è stata già trovata nelle atmosfere di Giove e Saturno, ricche di gas riducenti contenenti idrogeno, prodotta dai fosfati presenti nelle nubi colpiti dai fulmini. Essa è stata trovata su Titano ed essendo una sostanza solubile nel metano, che forma i suoi laghi, può essere prodotta e riemessa da meccanismi non biologici presenti su quel pianeta. Sulla Terra invece viene prodotta in maggior quantità da batteri in ambienti senza ossigeno, come quelli dei residui organici animali, e quest'ultimo meccanismo è l'unico che potrebbe spiegare l'abbondanza osservata su Venere. Ma la rilevazione di una sola riga della fosfina, tra l'altro osservata spesso nel gas interstellare, in mezzo alle numerose righe delle molecole SO_2 e CN che potrebbero portare a un'errata interpretazione, ha creato un certo scetticismo tra i radioastronomi, in attesa di nuovi dati e conferme.

Ma se essa fosse creata da molecole di origine biologica, quale potrebbe essere la loro sorgente? Una possibilità è che la vita sia apparsa anche su Venere in contemporanea con la Terra, 650 milioni di anni dopo la sua formazione. Se Venere avesse avuto acqua liquida e un periodo di rotazione di alcune ore, avrebbe potuto ospitare forme di vita per un periodo di qualche miliardo di anni. Ma oggi Venere ha un asse planetario ruotato di 177° rispetto al piano dell'orbita, con un periodo di rotazione 244 giorni terrestri, più lungo del suo anno, di 225 giorni. Una tale inclinazione dell'asse di rotazione, che lo fa girare in senso opposto a quello degli altri pianeti, potrebbe essere dovuta a un enorme impatto, simile a quello tra la proto-Terra e Theia, nel periodo del Grande Bombardamento. Il rallentamento lo espone ad un irraggiamento solare prolungato con un accumulo di calore; questo fatto e l'evento catastrofico potrebbe aver mutato la superficie del pianeta, favorendo l'accumulo di gas vulcanici e rendendola inospitale. Le ipotetiche forme di vita venusiane potrebbero essersi rifugiate nel sottosuolo, dove la temperatura decresce per decine di metri e dove potrebbero esserci ancora falde acquifere. Una migrazione nel sottosuolo dei microrganismi anaerobi è avvenuta anche sulla

Terra, all'epoca della Catastrofe dell'Ossigeno descritta nella Sezione 6.6. Ma la fosfina inizia a decomporsi a 375 °C e perciò, anche se fosse generata da forme di vita oggi nascoste nel suo sottosuolo, non potrebbe attraversare gli strati densissimi di Venere, 100 gradi più caldi, ed essere rivelata alla sommità delle nubi.

Come alternativa, forme di vita venusiane trasportate miliardi di anni fa ad alta quota e lì rifugiate potrebbero essere sopravvissute, sospese tra le nubi. Sulla Terra le nuvole si sviluppano nella troposfera, lo strato più basso dell'atmosfera che raggiunge i 12 km di quota. Nella troposfera sono state trovate più di 1800 specie batteriche. Microrganismi e spore sono stati scoperti fino a 77 km di quota, nella stratosfera, trasportati in alto da tempeste e monsoni, insieme a polveri e goccioline d'acqua. Su Venere la troposfera arriva molto più in alto, a 60 km. A quella quota, la pressione è simile a quella terrestre, 100 KPa e le temperature vanno da 0 a 60 °C. Spore batteriche nate su Venere potrebbero aver trovato lì una nicchia ecologica. Intorno alle spore trasportate verso l'alto si condenserebbero goccioline di vapor d'acqua, dove le spore potrebbero tornare attive e riprodursi. Quando le gocce d'acqua si accrescono e diventano pesanti, esse ricadrebbero verso il pianeta, evaporando. Le spore rimaste scoperte sarebbero così più leggere, e potrebbero restare sospese fino al prossimo "risveglio". Se spore "venusiane" esistessero, con questo meccanismo potrebbero spiegare l'osservazione di questa molecola in alta atmosfera.

Un'ipotesi alternativa suppone che i microrganismi che producono oggi la fosfina siano nati sulla Terra e siano stati lanciati nello spazio dall'impatto di una meteora in grado di farli sfuggire nello spazio. Una volta fuori, attratti dal Sole, avrebbero potuto diffondersi nelle nubi venusiane popolandole in un processo di panspermia, già proposto per l'origine della vita sulla Terra. Questa origine dovuta a un evento fortuito, un "collo di bottiglia", potrebbe spiegare perché si trovi solo la fosfina e non altre molecole di origine biologica più abbondanti sulla Terra. .

8.2 Marte, fratello della Terra

L'interesse nei confronti di Marte come pianeta che potrebbe ospitare la vita è molto antico. Nella Sezione 1.5 abbiamo detto di come esso sia stato studiato sin dalla fine dell'Ottocento e come le sue caratteristiche abbiano alimentato numerosi miti sui presunti "marziani". In realtà, pur essendo più piccolo (~11% della massa terrestre), questo pianeta dal punto di vista geologico ha avuto un'evoluzione iniziale simile alla Terra e a Venere: fusione per aggregazione di planetesimi, grande bombardamento di corpi rocciosi e cometari, vulcanesimo con emissione di lave e gas. Lo testimonia la sua atmosfera, tipicamente formata da anidride carbonica, che ha composizione quasi identica a quella di Venere e a

Vita nel Sistema Solare?

quella che doveva avere la Terra primordiale. L'esplorazione di Marte comprende numerose missioni al suolo, come Mars 5, Viking 1 e 2, InSight. E esplorazioni con rover come Sojourner, Spirit, Opportunity, Curiosity, Phoenix e dopo il 2020 Tianwen-1, Mars 2020, ExoMars 2022. Come vedremo, il pianeta ha molto da raccontare sulla sua evoluzione e la sua antica somiglianza con la Terra.

8.2.1. L'evoluzione dell'ambiente marziano

La nascita del pianeta e la formazione dei terreni più antichi si sono svolte in un periodo detto Noachiano, che corrisponderebbe per la Terra all'Adeano, la cui datazione è ancora incerta, ma che si aggirerebbe da 4,5 a 3,8 Ga dal presente. Questo periodo potrebbe essere stato dominato da un ambiente ancora caldo o tiepido ed è caratterizzato da grandi crateri da impatto, come Hellas, largo 2100 km e profondo 9, ma anche Argira e Isidis. Molte strutture formatesi in quest'epoca sono concentrate nella regione detta Noachis Terra, da cui il nome. L'atmosfera di Marte potrebbe essersi formata nel medio o tardo Noachiano, intorno a 3,8 Ga, per l'attività effusiva di grandi vulcani. Sappiamo oggi che l'atmosfera marziana doveva essere stata più densa, come indicato da una minore quantità di piccoli crateri da impatto rispetto a quelli previsti su un pianeta senza atmosfera. La carenza di crateri più piccoli è causata da due effetti: il primo è la fusione per attrito con i gas atmosferici dei meteoroidi di massa più piccola. L'atmosfera della Terra brucia o sbriciola nella caduta meteoroidi con dimensioni minori di ~10 m. Un secondo effetto è posteriore alla caduta ed è causato dall'erosione atmosferica, che ne distrugge le tracce, livellando e cancellando prima i crateri da impatto più piccoli e, con il passare del tempo, anche quelli più grandi. Osservando Marte, i grafici sulla densità di crateri indicano una carenza di quelli più antichi con diametro inferiore a 30 km e un maggior numero di crateri più piccoli formati in tempi più recenti. Un'atmosfera più densa nel passato di Marte implicherebbe un maggiore effetto serra e una temperatura in grado di mantenere liquida l'acqua in superficie.

Nella Noachis Terra e nei terreni più vecchi dell'emisfero sud del pianeta viene osservata una rete di vallate (*valley networks*), simili a quelle scavate dai nostri fiumi. Il fluido che ha prodotto queste vallate deve essere stato comune nell'era noachiana a causa del gran numero di strutture osservate. Esse formano una rete con vallate affluenti (canali tributari) e si allargano dalla "sorgente" verso la "foce", come sulla Terra. Alcune vallate come la Nirgal Vallis sono lunghe più di 400 km e hanno pochi canali tributari, mentre quelle più corte, circa un centinaio di km, possiedono numerosissimi tributari (rete dendritica di tributari) come i canali formati dalle piogge. La presenza di meandri come nella Nandedi Vallis indica un flusso lento ed erosivo simile a quello fluviale. Tuttavia alcuni canali sono troncati improvvisamente,

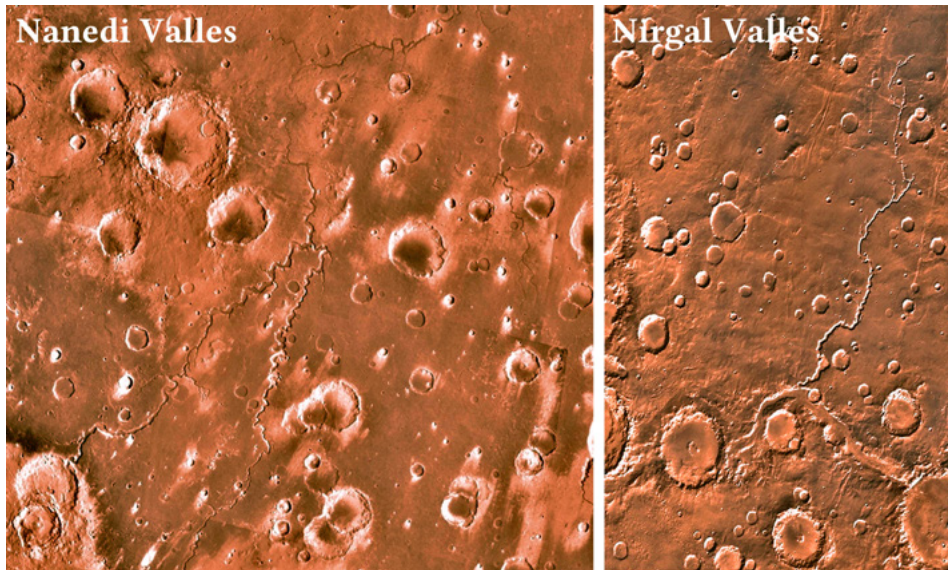


Figura 8.1 – Le vallate marziane Nanedi e Nirgal, simili ai fiumi terrestri, generate dallo scorrimento di un fluido che potrebbe essere stato acqua. (Foto estratte da Mars Trek - NASA/JPL)

come se il flusso si fosse interrotto, differendo dai canali fluviali terrestri. Queste morfologie superficiali indicano che in un periodo più antico Marte doveva avere non solo un'atmosfera densa, ma anche acqua superficiale allo stato liquido e forse un vero e proprio oceano.

L'idea di un oceano marziano sarebbe sostenuta dall'analisi dei dati altimetrici dei suoi continenti, eseguita dal satellite Mars Global Surveyor nel 1999. Si può osservare come alla stessa quota esistano su Marte zone a bassa pendenza, terrazzamenti simili a quelli lasciati per erosione e deposizione di sabbie lungo le linee di costa dei mari terrestri. Questo livello altimetrico dovrebbe coincidere con quello dell'antico oceano che copriva la parte settentrionale del pianeta con una profondità di ~1 km, estendendosi dalle pianure di Chrise Acidalia a Utopia fino ad Amazonis. Esistono altre zone con terrazzamenti a livelli inferiori, come se questo oceano si fosse ritratto progressivamente (o espanso in una prima fase). In tutta la regione del presunto fondale marino, i bassopiani dell'emisfero nord, la topografia è particolarmente smussata, come ci si aspetterebbe per deposizione di sedimenti su un fondale. Tuttavia questi terrazzamenti non sono visibili in picchi isolati presenti nelle pianure, che corrisponderebbero a isole se ci fosse stato un mare. Perciò, sebbene si sia abbastanza d'accordo sulla presenza di acqua liquida nel passato, l'idea di un mare globale non è ancora molto supportata. I rover che hanno esplorato il suolo hanno trovato la presenza di ematite, un minerale che

Vita nel Sistema Solare?

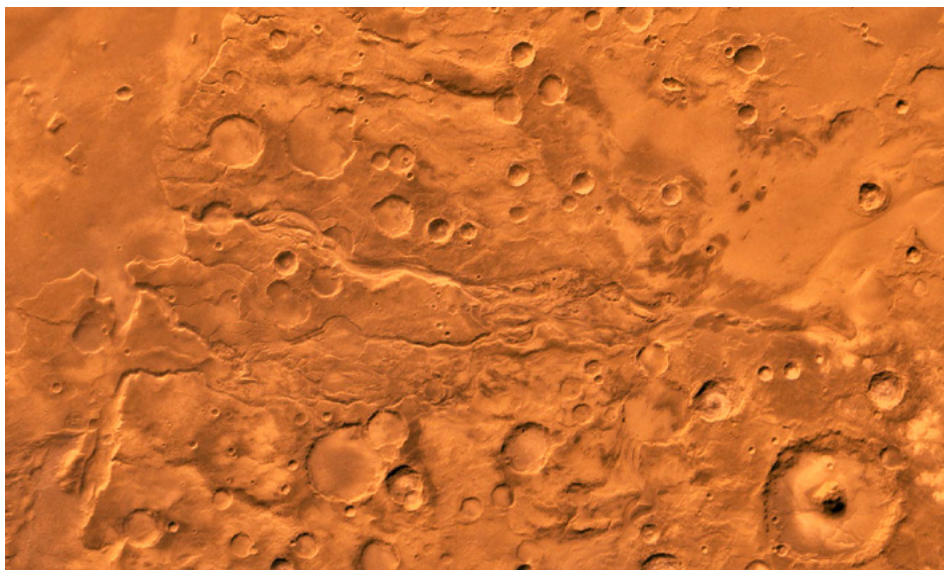


Figura 8.2 – Mangala Valles, un canale di flusso caotico creato da un fluido che dai rilievi a destra si è riversato in enorme quantità nella pianura a sinistra. (foto NASA/JPL/USGS)

sulla Terra si forma in presenza di acqua, mentre da satellite sono evidenti strutture sedimentarie, che confermano la presenza di liquidi nel lontano passato. Il cratere Gale, vecchio di 3,6 Ga ed esplorato dal 2012 dal rover Curiosity ha mostrato di aver contenuto un antico lago.

Questi terreni nell'emisfero nord del pianeta appartengono a un periodo più recente della storia marziana, indicato come Esperiano, in cui appare la grande regione denominata Tharsis, dove spiccano i vulcani più alti del Sistema Solare come Arsia, Ascreus, Pavonis e Olympus, di quasi 27 km. Sul lato est di Tharsis appare la più grande frattura della crosta, lunga ~4000 km, detta Valles Marineris. La datazione del periodo Esperiano è incerta, perché nessuna roccia è stata ancora analizzata per stimarne l'età, ma il suo inizio potrebbe situarsi tra 3,8 e 3,7 Ga. Il vulcanesimo di Tharsis su grande scala continua fino all'ultimo periodo di Marte, detto Amazoniano dalla regione Amazonis Planitia, periodo in cui iniziano a formarsi i depositi di ghiaccio ai poli, circa 500 Ma dall'epoca attuale.

Nel periodo Esperiano-Amazoniano (3,8 Ga – 500 Ma) intorno alla regione di Tharsis si sviluppano alcune zone dette **canali di flusso (outflow channels)**, ricoperte da sedimenti e massi che indicano un trasporto di materiale da parte di una sostanza fluida. Tuttavia essi appaiono enormi sia rispetto alle antiche vallate marziane, sia ai canali fluviali terrestri, con larghezze di decine di km alla sorgente che possono ampliarsi fino a centinaia di km nella parte più bassa. I flus-

si d'acqua richiesti per generare tali canali sono enormi, ~10 000 volte quelli dei maggiori fiumi terrestri, e fanno pensare più a eventi catastrofici che a corsi d'acqua alimentati da piogge. Il periodo Esperiano dovrebbe essere stato molto più freddo del Noachiano. Dallo studio dei terreni in cui appaiono le vallate e dalla loro morfologia che passa da quella a V, tipica delle vallate fluviali, a quella a U dei ghiacciai, si può supporre che all'incirca 3,7 miliardi di anni fa la temperatura di Marte deve aver fatto un balzo verso il basso. Una probabile causa di questo fatto è stata la progressiva scomparsa dell'atmosfera con il conseguente crollo dell'effetto serra. Diversamente dalla Terra e da Venere, nati con un'atmosfera simile, Marte sarebbe andato incontro a un progressivo essiccamento, con la scomparsa di gran parte dell'acqua dall'atmosfera. La deviazione dal cammino evolutivo della Terra risiederebbe nella sua più bassa temperatura iniziale, ma soprattutto nella più breve stagione vulcanica. La maggiore distanza dal Sole, circa doppia rispetto alla Terra, contribuisce a renderlo più freddo di ~40 gradi. Perciò un effetto serra di tipo terrestre non sarebbe bastato a mantenere l'acqua superficiale allo stato liquido. Ma anche se vi fosse stata una quantità di gas serra sufficiente a riscaldarlo globalmente sopra lo 0 °C, un pianeta così piccolo non avrebbe avuto abbastanza energia interna da alimentare i suoi vulcani per 4,5 miliardi di anni; a poco a poco si sarebbero spenti, come li vediamo oggi. Non è chiaro tuttavia quando è cessata la maggior parte dell'attività vulcanica marziana. Studi recenti di geomorfologia dei vulcani spenti hanno suggerito che una certa attività vulcanica è stata presente fino a circa 20 Ma, ben oltre l'inizio del periodo Amazoniano. Ancora oggi il sismografo del lander InSight ha rivelato nel 2020 la presenza di più di 300 piccoli terremoti in un anno, con due di magnitudo ~4 provenienti dalla *Cerberus Fossae*. Quest'ultima è un insieme di faglie estese più di 1000 km che sono rimaste attive negli ultimi dieci milioni di anni, originariamente vulcaniche ma incise in epoche più recenti da flussi caotici di acqua.

In ogni caso, una volta che i vulcani di Marte hanno smesso di rifornire l'atmosfera di grandi quantità di gas, è ragionevole pensare che l'effetto serra abbia iniziato a diminuire. Questo ha portato una parte del vapor d'acqua a essere incorporato nel terreno sotto forma di ghiaccio e ha permesso all'anidride carbonica di essere assorbita dal suolo, sottraendo gas serra all'atmosfera. Ai poli, quando la temperatura di Marte è scesa sotto -78 °C circa con una pressione inferiore a 100 hPa, l'anidride carbonica ha iniziato a formare ghiaccio secco ed è scomparsa dall'atmosfera in maggiore quantità. Alcune molecole sono state scisse dalla radiazione solare UV e gli atomi che le componevano sono sfuggiti nello spazio. Potrebbe esserci stata un'altra causa alla fuga dei gas: dallo studio delle proprietà di riflettività delle rocce sembra che nel tardo Noachiano si sia verificato un periodo di scomparsa del campo magnetico, che può aver permesso alle particelle

Vita nel Sistema Solare?

del vento solare di giungere più in profondità nell'atmosfera, favorendone la fuga verso l'esterno. Oggi la pressione al suolo è di ~ 7 hPa, meno di un centesimo rispetto ai 1000 hPa di quella terrestre, in accordo con l'idea che i gas emessi dai vulcani siano sfuggiti nello spazio o siano stati incorporati dal suolo. Un esempio è l'ossigeno, oggi concentrato sotto forma di ossidi nelle rocce e nelle particelle finissime che coprono il terreno e danno al pianeta il suo caratteristico colore rosso. Il risultato complessivo della dissipazione o assorbimento dei gas atmosferici è stato quello di avere un pianeta con un effetto serra di appena 3 gradi, con la scomparsa di condizioni superficiali favorevoli alla vita.

Un'atmosfera così tenue e la conseguente mancanza di effetto serra producono temperature che possono raggiungere ai tropici i 27°C , d'estate e poche ore dopo mezzogiorno, per crollare ai poli fino a -130°C durante la notte. La bassa pressione atmosferica impedisce la distribuzione del calore e il gradiente termico verticale arriva a 10 gradi tra il suolo e 1 metro di altezza. Sul terreno la temperatura è più alta quando il sole riscalda le rocce e più bassa durante la notte. Questo è molto diverso da ciò che accade sulla Terra, dove l'atmosfera più densa fa da "coperta" trattenendo il calore al suolo e rimescolando l'aria nei primi 100 m grazie ai moti convettivi dell'aria calda. Solo alla stazione Vostok in Antartide, già citata nella Sezione 7.4, sono state registrate temperature minime di -89°C . Questa temperatura è simile a quella delle notti marziane, in cui l'anidride carbonica può solidificare formando ghiaccio secco. Alla stazione Vostok questo non succede perché essa si trova ad alta quota e la pressione atmosferica è più bassa; a bassa pressione la solidificazione avviene a temperature ancora inferiori. Tuttavia alle bassissime temperature dell'Antartide anche l'acqua atmosferica è scarsa (cfr. con le *Dry Valleys* della Sezione 7.4) e i due ambienti diventano simili, a parte le differenze di pressione e di composizione dei gas atmosferici.

Se Marte è andato incontro a una progressiva perdita dell'atmosfera, è pensabile che l'acqua abbia iniziato a evaporare man mano che la pressione si abbassava. Infatti a pressione molto bassa il ghiaccio sublima direttamente generando vapore, senza poter passare attraverso una fase liquida. Parallelamente alla scomparsa dell'acqua in superficie, l'oceano marziano iniziava probabilmente a contrarsi, abbassando velocemente il livello del mare. Alla fine l'acqua residua si sarebbe assestata nel sottosuolo a più alta pressione o nelle calotte polari.

8.2.2. Acqua su Marte

Che l'acqua sia ancora presente lo suggeriscono diverse osservazioni: i Viking 1 e 2 hanno fotografato la formazione di ghiaccio nelle zone d'ombra e prima dell'alba, a temperature superiori a quelle del ghiaccio secco; tale ghiaccio all'arrivo del

sole spariva velocemente. Le calotte polari, principalmente quella nord, hanno una ricopertura di ghiaccio d'acqua che resta anche durante l'estate, mentre il ghiaccio secco si forma ogni inverno e sublima d'estate tornando nell'atmosfera. Presso alcuni crateri da impatto si notano zone simili a colate fangose (**crateri a piedistallo**), come se il calore generato dall'impatto avesse permesso al ghiaccio nel sottosuolo di liquefarsi, trascinando con sé il terreno verso l'esterno. Inoltre le immagini ad alta risoluzione del satellite Mars Global Surveyor mostrano in alcune vallate la nascita di strisce di materiale scuro, simile allo scorrimento di fluidi, che poi svaniscono in poco tempo. A parte altre ipotesi come frane di polvere scura, queste strisce sono consistenti con la liberazione di acqua salata contenuta nel suolo, rimasta liquida per brevissimo tempo prima di evaporare nell'atmosfera. Infine, le nubi di ghiaccio d'acqua che appaiono nell'atmosfera marziana sono un'ulteriore testimonianza che l'acqua non ha completamente abbandonato il pianeta.

Attualmente, alla pressione di 7 hPa l'acqua può restare liquida solo sopra i -40 °C e in solo in un intervallo di 10 gradi. Ma l'acqua marziana non è pura; può avere un alto contenuto di sali perclorati di sodio e magnesio, che abbassano la temperatura di solidificazione fino a -75 °C e quella di evaporazione fino a 23 gradi. Nonostante ciò, i due limiti sono facilmente superati dall'ampia escursione termica di un giorno marziano, per esempio da -80 a +10 °C in poche ore. Questo rende impossibile la presenza di laghi o fiumi in superficie. Ma già nel sottosuolo a partire da 10 cm di profondità la temperatura può restare stabile entro 10 gradi. Per effetto della pressione degli strati sovrastanti, la temperatura verso il centro del pianeta tende ad aumentare, finché non si raggiungono le condizioni che permettono all'acqua di restare stabilmente allo stato liquido. In effetti, la sonda Mars Express esplorando col radar la calotta polare Sud di Marte ha rivelato un'ampia distesa di acqua liquida sepolta sotto i ghiacci. Nel 2020 nella regione di *Ultimi Scopuli* sotto 1,5 km di ghiaccio della calotta è stato trovato un deposito d'acqua di 20 x 30 km, circondato da pozze di minore dimensione. Sepolta sotto il ghiaccio, come il lago Vostok in Antartide, quest'acqua non congela sia per il suo probabilmente alto contenuto di sali, sia per la pressione degli strati sovrastanti.

Le missioni delle *Rover* ci hanno dato molte informazioni sulla mineralogia delle rocce marziane. Nel cratere Gale *Curiosity* ha rilevato materiali idrati in cui l'acqua costituisce dall'1,5 al 3 % del peso. L'antico lago presente fino a 3,3 Ga ha formato sedimenti stratificati, con zone ricche di sali ossidanti e fondali poveri di essi. Alcuni minerali presenti, contenenti carbonio e ossigeno, appaiono formati in una fase fredda, in un'epoca glaciale o dopo il definitivo congelamento del pianeta.

Vita nel Sistema Solare?

Se lo scenario della scomparsa degli oceani rappresenta una possibile evoluzione dell'ambiente marziano, molti punti non sono ancora chiari. Sulla Terra, già tra 3,95 e 3,46 miliardi di anni fa erano apparse le prime forme di vita. Se esse non provenivano dall'esterno come vorrebbe la teoria della Panspermia, questo significa che le condizioni ambientali erano già sufficienti alla loro nascita. Marte si è formato con tutta probabilità insieme alla Terra ma si è raffreddato prima essendo più piccolo. Il suo inizio deve essere stato simile a quello della Terra. Mentre le prime forme di vita terrestri si sviluppavano, sul pianeta vicino probabilmente avveniva già la transizione tra Noachiano ed Esperiano, con il raffreddamento del pianeta. In un pianeta più freddo, un'eventuale vita marziana appena nata ha avuto la possibilità di trovare nicchie ecologiche in cui rifugiarsi? Oppure ha avuto modo di adattarsi al nuovo clima? Le condizioni termiche attuali sono certamente estreme, ma a basse latitudini esse non sono molto diverse da quelle dei poli terrestri. La pressione è sicuramente più bassa ma, come osserveremo nella Sezione 10.3, alcune spore e microscopici animali come i Tardigradi possono resistere anche nello spazio a pressioni bassissime con temperature di 10 K. Inoltre nel sottosuolo la temperatura è più alta, e sappiamo che in zone del polo sud esistere ancora acqua liquida. Ci saranno forme di vita?

8.2.3. Gli esperimenti biologici delle Viking

Nel 1976 due sonde spaziali denominate Viking 1 e 2 hanno raggiunto Marte e permesso a due *lander* di atterrare in due zone pianeggianti dell'emisfero nord, nelle regioni forse coperte dall'antico oceano marziano. Viking 1 è atterrato a bassa latitudine, 22,5 °N, nella Chryse Planitia, mentre Viking 2 è sceso a 48° N, in Utopia Planitia. Entrambi trasportavano due strumenti importanti: il gas-cromatografo e lo spettrometro di massa (riuniti in uno strumento denominato GCMS). Oltre a questi erano presenti tre strumenti progettati esclusivamente per valutare la presenza di vita sul pianeta rosso. Essi erano basati su un'idea abbastanza semplice: se i microrganismi marziani esistono e sono simili a quelli terrestri, possono alimentarsi con sostanze organiche presenti nel terreno e produrre anidride carbonica come nella respirazione oppure metano come per i batteri metanogeni. Possono assorbire altresì anidride carbonica dall'atmosfera e trasformarla sotto l'azione della luce per produrre sostanze organiche, come nella fotosintesi. Possono assimilare sostanze producendo diversi tipi di gas con processi metabolici. Su questi tre processi sono stati costruiti i tre strumenti; il rilascio di gas marcato (LR = *labelled release*), il rilascio pirolitico (PR = *pyrolytic release*) e lo scambio di gas (GEX = *gas exchange*).

Per ogni esperimento il terreno prelevato dal suolo veniva diviso in due campioni, posti in camere diverse. Su uno di essi veniva eseguito l'esperimento. In

caso di risultato positivo, l'altro campione veniva riscaldato per tre ore a 160 °C in modo da sterilizzarlo completamente, con la ripetizione dell'esperimento su questo campione. In caso di risultati uguali, essi venivano attribuiti a reazioni chimiche inorganiche in grado di attivarsi in un ampio intervallo di temperature. Gli esperimenti biologici venivano ripetuti tre volte, denominate *cicli*. La sequenza poteva essere estesa per un quarto ciclo nel caso in cui i primi tre avessero avuto risultato negativo.

Il GCSM prima analizzava i gas rilasciati riscaldando il campione di suolo, poi riscaldato a temperature più alte per valutare la presenza di elementi meno volatili. La sensibilità dello strumento riguardo la presenza di materiale organico era tale da rilevare una parte di esso su un campione di suolo un miliardo di volte maggiore. Questa sensibilità in realtà non sarebbe sufficiente a rilevare la presenza di pochi microrganismi nel suolo marziano, poiché un singolo batterio può pesare 10^{-15} kg e ~il 90% della sua composizione è acqua, con il carbonio presente che raggiunge appena 10^{-18} kg. Per giungere alla soglia di 10^{-9} a cui lo strumento dei Viking avrebbe potuto dare un segnale positivo, indicando la presenza di vita, sarebbero occorsi da 300 000 a un milione di microrganismi. Tuttavia, come abbiamo discusso nella Sezione 6.6, le forme di vita basate sul carbonio tendono a metabolizzare l'anidride carbonica rilasciando C^{12} nel terreno. Se vi fosse stata vita su Marte, anche in un deserto si sarebbe potuto trovare materiale arricchito di C^{12} , con un'entità proporzionale al tempo in cui vi è stata vita in quel terreno. Questo test dovrebbe funzionare anche in assenza di vita all'epoca attuale: il valore di δC^{13} sarà inferiore a quello del suolo terrestre, ma superiore a quello cosmico, come illustrato nella Tabella 6.2. Inoltre anche le meteoriti più antiche, come le condriti carbonacee, contengono carbonio ed è pensabile che durante il Grande Bombardamento esse abbiano depositato una certa quantità di questo elemento sul suolo marziano. Il GCMS avrebbe potuto rilevare composti di carbonio simili a quelli meteoritici in quantità anche 10 000 volte minore rispetto a quella di una condrite carbonacea. Invece l'analisi del terreno marziano eseguita dal GCMS dei due Viking Lander ha indicato un'inattesa quantità di acqua, ma non ha trovato composti organici entro i suoi limiti di sensibilità. Il valore misurato era addirittura inferiore a quello calcolato per la deposizione di carbonio meteoritico che avrebbe dovuto esserci, data la simile storia di formazione dei due pianeti. Quindi la mancanza di composti organici, che di per sé indicherebbe assenza di vita attuale e passata, è resa invece anomala dall'assenza di carbonio di origine meteoritico. Una possibile spiegazione risiede nella presenza nel suolo di materiali fortemente ossidanti, come i sali perclorati, trovati dalla sonda Phoenix e dal rover Curiosity, in grado di cancellare le tracce chimiche di vita. Anche la radiazione UV del Sole, non schermata dalla tenue atmosfera, potrebbe essere responsabile

Vita nel Sistema Solare?

della distruzione di composti organici, siano essi depositati da meteoriti o da forme di vita estinte. Oggi si ritiene che materiali organici complessi non possano resistere alla superficie di Marte, anche se nel 2018 nel cratere Gale sono state trovate dal rover Curiosity concentrazioni di carbonio simili a quelle trovate nelle meteoriti marziane e 100 volte maggiori di quelle dell'esperimento GCMS.

Un secondo strumento era progettato per esperimenti di rilascio marcato (LR o *labeled release*), cercando di verificare l'esistenza di una respirazione di eventuali microrganismi marziani. Il campione nella camera sigillata veniva irrorato con 1 cc di soluzione nutriente composta da acqua distillata e composti organici simili a quelli dell'esperimento di Miller, contenente però carbonio radioattivo C^{14} al posto del carbonio stabile. Un contatore Geiger era in grado di misurare quanto carbonio contenuto nella soluzione veniva rilasciato nell'atmosfera. Se ci fossero stati un processo di respirazione o una produzione di metano simile a quello dei nostri batteri, il livello di radioattività sarebbe salito ogni volta che la soluzione nutriente fosse stata metabolizzata perché le forme di vita avrebbero prodotto CO_2 oppure CO o CH_4 . Questo esperimento ha dato inizialmente un risultato positivo, liberando CO_2 . Però una seconda iniezione di brodo nutriente ha fatto crollare i conteggi radioattivi per farli aumentare poi lentamente. Il campione di controllo, sterilizzato prima dell'esperimento per tre ore a $160\text{ }^\circ C$, non ha dato nessuna risposta e la curva di radioattività è rimasta praticamente piatta per tutta la durata dell'esperimento. Il numero dei conteggi è crollato anche nel primo campione quando esso è stato sterilizzato. L'esperimento è stato ripetuto in un secondo e in un terzo ciclo dopo circa un mese, con risultati analoghi a quelli del primo ciclo. Il secondo lander, arrivato nella piana di Utopia mesi più tardi, ha mostrato esiti analoghi. Condotta sulla Terra con materiale terrestre e lunare esso ha prodotto risultati positivi nel primo caso e negativi nel secondo, mostrando che il suolo di Marte è più simile alla Terra, in particolare al suolo dell'Antartide, rispetto alla Luna in quanto ad attività di rilascio di CO_2 dalle sostanze organiche nutrienti.

Il terzo strumento denominato PR (*pyrolytic release*) studiava il rilascio pirolitico di gas, per verificare se esistevano microrganismi in grado di assorbire l'anidride carbonica dall'atmosfera, come fanno le piante terrestri che utilizzano la fotosintesi. La prima analisi ha dato risultati positivi per entrambi i Viking, liberando il carbonio incorporato nel suolo; la seconda, basata sui gas rimossi chimicamente dall'atmosfera per inclusione dei loro atomi in composti organici, ha dato risultati molto variabili, da molto positivi a lievemente positivi. Il risultato non sembra influenzato dalla presenza di luce o buio, come sarebbe nel caso della fotosintesi. Per avere un'idea della sensibilità di questo esperimento, il segnale rilevato sareb-

be atteso in un campione terrestre se ci fossero solo 50 batteri, anziché migliaia o milioni. Anche questo esperimento non è negativo, ma i risultati positivi mostrano una dubbia interpretazione in termini di presenza di vita marziana.

Il quarto strumento voleva verificare le variazioni dei gas presenti nella camera di test, dove era trasportato del suolo marziano, e veniva chiamato GEX (*gas exchange*=scambio di gas). Esso veniva prima esposto ai vapori di una soluzione nutriente di amminoacidi, vitamine, saccarosio, lattosio e zuccheri, tutti in soluzione acquosa, e poi immerso in essa. Il gas presente nella camera di test veniva monitorato tramite un gascromatografo e un misuratore di conduttività termica, che analizzavano ogni giorno l'atmosfera al di sopra del campione, per misurare la presenza di gas leggeri come azoto, idrogeno, ossigeno, anidride carbonica e metano. Se la vita marziana avesse usato uno di questi gas, la sua concentrazione netta sarebbe aumentata o diminuita con il tempo. Ricordiamo che l'idea alla base di questo esperimento era che le forme di vita alterano chimicamente l'ambiente in cui si trovano. I risultati hanno rilasciato CO₂ e O₂ presenti nel suolo ma senza variazioni interpretabili come attività metabolica di qualche tipo

Dei quattro esperimenti, l'unico che ha acceso un dibattito nella comunità scientifica, sostenuto dal coordinatore degli esperimenti dei Viking, Gilbert Levin, è quello di rilascio marcato (LR). Molti autori hanno concluso che i risultati dell'esperimento erano dovuti a una reazione chimica con ossidanti. Noi oggi sappiamo che i perclorati trovati sulla superficie del pianeta rosso sono molto ossidanti, ma essi sono stabili a diverse temperature, mentre il risultato positivo dei Viking spariva quando il campione di suolo veniva sterilizzato a 160 °C. Sappiamo anche, da esperimenti di simulazione dell'ambiente marziano fatti negli USA, in Germania e a Padova, la forte radiazione UVC alla temperatura di Marte è in grado di distruggere le spore batteriche in poche ore, ma che esse possono resistere a lungo se schermate da sabbie o altri minerali. Questo confermerebbe la bassissima quantità di carbonio rilevata da parte del GCMS, più bassa di quella derivante dal bombardamento meteorico, ma fa pensare che forme di vita microscopiche, cancellate dalla superficie a causa delle mutate condizioni ambientali, possano ancora esistere dove queste condizioni di sterilizzazione chimica o irraggiamento solare sono assenti. Per esempio potrebbe vivere nel sottosuolo, dove il calore interno può conservare l'acqua allo stato liquido oppure sotto il ghiaccio delle calotte polari.

8.2.4. Il mistero del metano su Marte

Dal 2003 osservazioni coi telescopi terrestri e col satellite Mars Express hanno rilevato un'emissione di metano, che raggiunge un massimo nell'estate marziana

Vita nel Sistema Solare?

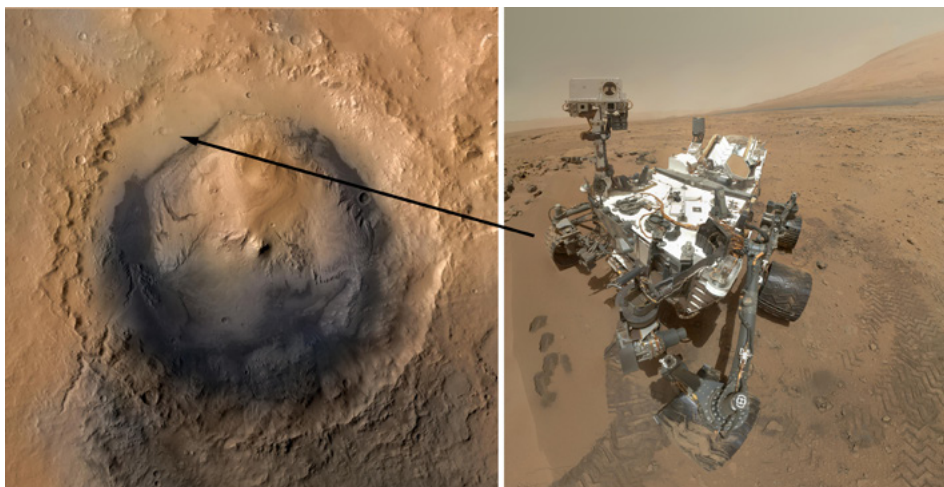


Figura 8.3 – *A sinistra*: Il cratere Gale, al cui interno esisteva un antico lago; *a destra*: un autoscatto della sonda Curiosity all'interno del cratere, dalla zona indicata dalla freccia (foto NASA/JPL-Caltech/ESA/DLR/FU Berlin/MSSS/Malin Space Science Systems)

e fluttua fino al 30% raggiungendo da 10 a 21 ppb¹⁶, con un picco nel 2019. Questa concentrazione va confrontata con quella terrestre, 2000 ppb, tenendo conto che la nostra atmosfera è un migliaio di volte più densa. Durante la notte il metano si distribuisce al suolo e di giorno si diffonde verso l'alto, alzando e abbassando periodicamente la sua concentrazione locale. In genere il metano (CH₄) e l'acqua (H₂O) su Marte vengono dissociati dalla radiazione UV del Sole, permettendo agli atomi di idrogeno di sfuggire nello spazio. Vicino al suolo gli ioni residui, ossigeno e ossidrile (OH) ossidano il metano facendolo scomparire.

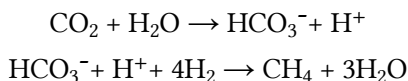
Con questi processi la sua concentrazione diminuisce esponenzialmente, riducendosi di un fattore $1/e$ (~37%) in 300-600 anni. Sulla Terra gli stessi processi agiscono in un tempo più breve, 10 anni. La sua lunga persistenza in atmosfera permette ai venti di distribuirlo uniformemente e di diluirlo. Così questi picchi di emissione fanno pensare che sul pianeta esistano dei depositi o delle sorgenti di metano, che liberano il gas nell'estate marziana. L'emissione periodica di metano nella stagione calda¹⁷ è stata trovata anche al suolo nel cratere Gale. Nei suoi depositi stratificati di argille e minerali solfati, vecchi miliardi di anni, Curiosity ha trovato molecole aromatiche di carbonio contenenti zolfo e dette **tiofeni**. Il tiofene sulla Terra appare presente in piccole percentuali nel petrolio o nel carbone. La distribuzione in massa delle molecole trovate è simile a quella del cherogene,

¹⁶ ppb = parti per miliardo rispetto al volume dell'atmosfera.

¹⁷ L'anno di Marte è di 687 giorni, quasi 2 anni terrestri e le stagioni sono proporzionalmente più lunghe.

contenente bitume, che riscaldato produce petrolio, metano ed etano.

Sulla Terra, il metano oggi proviene da allevamenti animali o da depositi fossili in cui è avvenuta la decomposizione di organismi viventi in assenza di ossigeno, dove può trovarsi insieme al petrolio. Può essere incorporato nei ghiacci sotto forma di clatrati nei fondali marini o nelle rocce sedimentarie. Esistono anche dei batteri, detti **metanogeni**, in grado di produrre metano e acqua come residuo a temperature maggiori di 100 °C partendo da sostanze che contengono carbonio (anidride carbonica, acetato, metanolo, metilammine). La reazione di riduzione è schematizzata dal processo:



La produzione di metano sul nostro pianeta è perciò principalmente di origine biologica. Il metano emesso dai vulcani rappresenta oggi lo 0,2% e viene emesso insieme al biossido di zolfo (SO₂), una sostanza che non è stata rilevata nell'atmosfera marziana.

Esiste però anche un modo non biologico di produrre metano. In rocce ricche di Fe o Mg, come le olivine e pirosseni delle croste planetarie, si produce idrogeno nel processo di serpentinizzazione, che abbiamo citato nella Sezione 7.2. L'idrogeno reagisce col carbonio nella CO, CO₂, granuli di carbonio o carbonati minerali generando CH₄, in maniera analoga alla reazione descritta prima. I metalli fanno da catalizzatori e la pressione e il calore attivano la reazione. La serpentinizzazione avviene a temperature tra 350 – 400 °C oppure tra 30 –90 °C, in presenza di acqua liquida.

Su Marte, sia la serpentinizzazione a bassa temperatura che i batteri metanogeni possono spiegare l'emissione continua di metano, perché tutte le sostanze necessarie sono presenti nel suo sottosuolo. Qualunque sia la sua origine, una volta intrappolato nei depositi di clatrati, il metano può essere fuoriuscito attraverso fratture nella roccia o nei ghiacci ed è stato così rivelato dal radar di Mars Express in zone contenenti ghiacci nel sottosuolo. Come già accaduto con gli esperimenti delle sonde Viking, le analisi fatte su Marte possono avere due spiegazioni, biologiche o abiologiche, ma per ora gli esperimenti non permettono di escluderne nessuna.

8.2.5. Meteoriti marziane e batteri fossili?

Alcune meteoriti possiedono caratteristiche che indicano la loro origine dal pianeta Marte. Esse sarebbero state generate da impatti di grandi oggetti che hanno lanciato frammenti di rocce nello spazio, dove sono attratti dal Sole ma hanno

Vita nel Sistema Solare?

finito per collidere con la Terra. I minerali al loro interno sono modificati chimicamente, come le rocce terrestri che nascono da processi di sedimentazione o metamorfosi. Queste meteoriti mostrano tracce dei processi subiti vagando nello spazio per migliaia o milioni di anni. Per esempio, può esserci una percentuale alterata di isotopi dei vari elementi chimici, causata dall'esposizione ai raggi cosmici. Questi ultimi, collidendo con i nuclei degli atomi presenti nel minerale, possono asportare alcune particelle nucleari (**spallazione**), creando isotopi. Con i metodi radiometrici è possibile stimare l'età di formazione delle rocce contenute nella meteorite; invece dalle abbondanze degli isotopi prodotti per spallazione di protoni e neutroni è possibile ricostruire il tempo di permanenza nello spazio. Questo periodo, più quello trascorso sulla Terra, è denominato **età di eiezione**. Per le meteoriti marziane note esso varia da 20 Ma a 700 ka.

Alcune meteoriti hanno una composizione con minerali solidificati e cristallizzati da magmi. L'età ricavata dall'analisi radiometrica dei cristalli presenti nelle rocce (**età di cristallizzazione**) indica 175 Ma per 4 basalti e un'epoca tra 300 e 500 Ma per altre meteoriti. Il fatto che rocce di origine magmatica trovate in alcune di queste meteoriti si siano cristallizzate ~175 Ma dalla nostra epoca implica che l'attività vulcanica del pianeta è stata attiva, anche se sporadicamente, fino a tempi relativamente recenti, come abbiamo detto nella Sezione 8.2.1. Altre, con un'età intorno a 1 Ga, contengono minerali la cui presenza è legata all'acqua, come i fillosilicati o le evaporiti. Questo indica che a quell'epoca poteva esistere su Marte acqua allo stato liquido.

Una meteorite marziana, ALH 84001, raccolta nella zona antartica di Alan Hills, mostra un'età di cristallizzazione maggiore, ~4,5 Ga, prossima alla fase di nascita del pianeta. Formatasi originariamente da lave ad alta temperatura, tra 4,0 e 3,6 Ga è stata riscaldata e deformata da una forte pressione, probabilmente dovuta all'impatto di una grossa meteorite o un asteroide all'epoca del Grande Bombardamento. Dopo questo shock, il materiale di ALH 84001 è stato ricoperto da un fluido (presumibilmente acqua) in grado di generare noduli di carbonati minerali. Anche questo evento potrebbe essere una conseguenza dell'impatto. Infatti la formazione di crateri di più di 65 km di diametro potrebbe sciogliere abbastanza acqua dal sottosuolo da creare laghi temporanei all'interno dei crateri. In base alle condizioni ambientali esistenti, quest'acqua potrebbe congelare completamente o evaporare dopo migliaia di anni, lasciando in entrambi i casi dei depositi minerali. Successivamente a questo periodo, si trovano fratture nei cristalli che indicherebbero un secondo shock con età di ~16 Ma e che potrebbe corrispondere all'impatto che ha lanciato la roccia nello spazio. Il viaggio tra Marte e Terra è finito ~13 ka fa, quando ALH 84001 è caduta in Antartide per essere recuperata nel 1984 da

una spedizione scientifica.

All'interno di ALH84001 ci sono dei globuli di carbonati stratificati, la cui origine sulla Terra può essere dovuta all'azione di batteri o all'evaporazione di laghi salati, come il Mar Morto. All'interno dei globuli l'analisi netta del carbonio dopo il trattamento in laboratorio ha un residuo $\delta C^{13} = -15\%$, attribuibile a condriti cadute al suolo oppure ad attività biologica. Associati ai carbonati si trovano idrocarburi policiclici aromatici (PAH), sostanze trovate anche nella polvere interstellare e che possono derivare dalla decomposizione di organismi viventi. Sulla Terra, essi sono abbondanti nelle rocce sedimentarie, nei depositi di carbone e petrolio e derivano dalla degradazione di piante primitive e di plancton. Quando i sedimenti in cui i microrganismi sono immersi si trasformano in roccia (**diagenesi**) si producono migliaia di tipi di PAH, con differenti pesi molecolari. Diversi aspetti della loro distribuzione nei globuli e in peso atomico indicherebbero una loro origine marziana. Tuttavia è possibile ottenere PAH senza attività biologica, attraverso reazioni simili a un processo industriale, chiamato reazione Fischer-Tropsch, che è catalizzata dalla magnetite (Fe_3O_4), un ossido di ferro trovato nella meteorite. Quando i globuli carbonati sono stati osservati al microscopio elettronico a scansione, sono stati osservati degli ovoidi allungati con dimensioni da 20 a 100 nm, simili a residui fossili di nanobatteri trovati sulla Terra nel travertino e in generale nei calcari. Queste rocce si generano per evaporazione di acque di sorgente o di fiume: man mano che l'acqua evapora, il carbonato di calcio si deposita sulla superficie di piante e materiali viventi. Quando essi scompaiono per putrefazione, lasciano una roccia porosa. Tuttavia queste strutture allungate non sono state trovate nelle altre meteoriti marziane, mentre sono presenti nella meteorite Tahouine, caduta nel deserto del Sahara e raccolta nel 1931, immerse o deposte sulla calcite o sui silicati che la compongono. Queste strutture sono più lunghe di quelle di ALH 84001 di ~3 volte, ma sono simili a quelle trovate nel suolo del Sahara vicino alla zona di raccolta della meteorite, residui generati da batteri terrestri, e non fossili. Anche in questo caso è difficile distinguere, tra l'ipotesi di attività biologica e non biologica marziana.

8.2.6. Vita su Marte?

Possiamo concludere questa Sezione su Marte facendo alcune riflessioni. Non vi è più praticamente alcun dubbio sul fatto che Marte abbia avuto in passato un'atmosfera densa, che gli ha permesso di avere acqua superficiale allo stato liquido. Le meteoriti di origine marziana e l'analisi delle *rover* aiutano a fissare alcune date nella storia di Marte: la nascita a 4,6 Ga come la Terra, l'acqua liquida fino a 1 Ga e l'attività vulcanica fino ad almeno 200 Ma dall'epoca attuale. I due pianeti partono insieme, Marte si raffredda prima e la composizione dei suoi gas vulca-

Vita nel Sistema Solare?

nici può aver creato come sulla Terra - e prima della Terra - un ambiente favorevole alla sintesi di molecole organiche, anche complesse. Quando è apparsa la vita sul nostro pianeta, tra 3,95 e 3,5 miliardi di anni fa, anche Marte aveva acqua liquida, come mostrato dall'età dei minerali sedimentari e delle evaporiti trovate nelle meteoriti marziane e al suolo. Poi la scomparsa del vulcanesimo su Marte e la conseguente perdita dell'atmosfera hanno impedito che queste condizioni favorevoli durassero fino ai nostri giorni. La mancanza di sufficiente pressione al suolo e la scomparsa dell'effetto serra hanno reso praticamente impossibile l'esistenza di acqua liquida in superficie, ma tale sostanza è presente nelle calotte, nell'atmosfera e nel sottosuolo. La ricerca attuale su Marte tende a determinare quanta acqua sia rimasta nel suolo e in quali condizioni fisiche essa si trovi (temperatura e pressione).

L'eventuale materiale organico accumulatosi al suolo è stato probabilmente distrutto dai raggi ultravioletti del Sole, non schermati per assenza di ozono atmosferico, e da altri processi quali le reazioni chimiche con sostanze ossidanti abbondanti nel terreno. Se una forma di vita batterica si è sviluppata in passato sul pianeta, essa può essere sopravvissuta in ambienti particolari sotto forma di estremofili oppure può essersi estinta milioni di anni fa lasciando solo tracce nel terreno. Per questa ragione Marte è un pianeta molto promettente per l'esplorazione e per l'Astrobiologia. Visitato da decine di missioni, forse in futuro sarà visitato da una missione umana, come verrà discusso nel Capitolo 10. Forse una di queste potrà dare risposta alla domanda della presenza, su questo pianeta, di qualche forma di vita.

8.3 Oceani nascosti

L'esplorazione del Sistema Solare esterno ha fatto scoprire tra i satelliti dei pianeti giganti un'ampia varietà di ambienti, alcuni promettenti per l'Astrobiologia. Come abbiamo detto, la presenza di acqua liquida è un requisito essenziale per la nascita e lo sviluppo di forme di vita, e perciò tutti i pianeti che possono avere acqua liquida sono interessanti da studiare. Le acque superficiali possono esistere solo in un intervallo di temperature (distanza dal Sole e effetto serra) e pressioni (atmosfera dense) che nel Sistema Solare si trovano solo nella fascia tra Venere e Marte, detta zona abitabile, che troveremo ancora nella Sezione 9.4. Fuori dalla zona abitabile la superficie di un pianeta è troppo calda, come nel caso di Mercurio, o è troppo fredda, come intorno ai pianeti giganti. Però l'acqua ha delle importanti proprietà che le permettono di restare liquida anche a basse temperature, come detto nella Sezione 2.2.1, grazie ai legami a idrogeno e alla presenza di sali perclorati o clatrati. La bassa densità del ghiaccio crea uno strato superficiale che

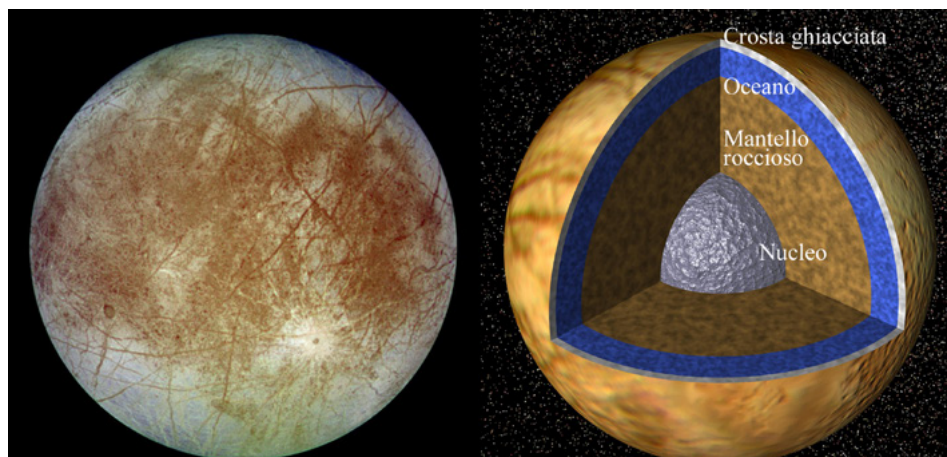


Fig. 8.4 - *A sinistra*: Foto del satellite Europa, ricoperto da ghiacci fratturati per migliaia di chilometri. (Foto NASA, DLR); *a destra*: possibile struttura interna, col l'oceano sepolto sotto i ghiacci (Immagine NASA)

mantiene stabile la temperatura dell'acqua sottostante. L'esempio che abbiamo fatto dei pesci e delle piante acquatiche che sopravvivono d'inverno all'interno del lago ghiacciato è tipico di questa importante proprietà. In alcuni satelliti dei pianeti giganti la superficie appare coperta da ghiacci e sedimenti di materiale interplanetario che nascondono sotto di essi un oceano d'acqua e clatrati. Nella parte più fredda del Sistema Solare la presenza di grandi quantità di acqua liquida è sospettata per i satelliti di Giove (Europa, Ganimede e Callisto), di Saturno (Titano, Encelado) e per i pianeti nani Cerere e Plutone.

Europa, Ganimede e Callisto possono avere oceani sotto una crosta ghiacciata. Insieme ad Io, i primi due rappresentano un trio di satelliti legati a Giove dalla sua enorme forza gravitazionale e in una situazione dinamica nota come **risonanza**. La risonanza avviene quando i periodi di rotazione o rivoluzione di oggetti legati dalla forza di gravità stanno tra loro in rapporti interi. Quella che vediamo tutti i giorni è la risonanza Terra-Luna, per cui il periodo di rotazione della Luna intorno al suo asse e il periodo di rivoluzione intorno alla Terra sono uguali, con un rapporto 1:1. Una zona della superficie lunare rivolta verso di noi fa un giro completo intorno all'asse lunare nello stesso periodo in cui la Luna fa un giro completo intorno alla Terra, restando quindi sempre rivolta verso la Terra. Per questa risonanza 1:1 noi vediamo sempre la stessa faccia della Luna, e non vediamo il lato nascosto. Usando sempre l'esempio Terra-Luna, ricordiamo che questa risonanza è collegata alle forze di marea, che deformano la parte fluida del pianeta, gli oceani, scaricando così l'energia di rotazione del sistema e facendo rallentare la Terra di 23 microsecondi all'anno e allontanare la Luna nello spazio di 4 cm all'anno.

Vita nel Sistema Solare?

Nel caso di Giove l'energia delle maree è molto più grande, e l'azione mareale dei satelliti in risonanza 4:2:1 (4 orbite di Io ogni 2 di Europa e 1 di Ganimede) è anch'essa molto forte. Si pensi che Ganimede è più grande di Mercurio mentre Io ed Europa sono paragonabili alla Luna. Ecco che corpi celesti molto freddi perché distanti dal Sole possono essere riscaldati dall'energia mareale.

Tralasciando il satellite Io, di cui si è trattato all'inizio di questo Capitolo, con molti vulcani attivi e troppo caldo per l'acqua liquida, Europa e Ganimede possono avere sotto la crosta ghiacciata un oceano mantenuto liquido dalla risonanza mareale, oltre che dalla presenza di clatrati. La crosta ghiacciata di Europa ricorda il *pack* delle calotte polari terrestri e dell'Antartide ed è completamente ricoperta da enormi fratture larghe decine di chilometri ed estese per migliaia di chilometri. Queste grandi fratture fanno ipotizzare che al di sotto della crosta di ghiaccio vi sia un fluido che permette ai suoi frammenti di scorrere su di esso. La crosta si solleva giornalmente di 30 m e l'intero satellite è deformato di 500 m a causa delle maree. Anche il modo in cui Europa assorbe questa energia fa pensare a un meccanismo di smorzamento, come sarebbe in grado di fare l'inerzia di un liquido sotto la crosta. Inoltre, il debole campo magnetico osservato all'esterno del pianeta potrebbe derivare dai moti di sostanze cariche elettricamente disciolte in acqua (elettroliti). È possibile prevedere che durante la formazione del satellite la forza di marea, la pressione interna e il calore primordiale sommati insieme possano aver separato l'acqua contenuta nei magmi dai minerali, lasciandola risalire verso la superficie e depositando le rocce nel mantello. Questo avrebbe formato un enorme oceano d'acqua e di clatrati (di metano e ammoniaca oppure di anidride carbonica) profondo anche 120 km, sotto una crosta di 25 km di ghiaccio a $-171\text{ }^{\circ}\text{C}$ in superficie. La temperatura sui fondali potrebbe essere tra i 30 e i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ mentre alla base del ghiaccio sarebbe di $7\text{ }^{\circ}\text{C}$, tutte condizioni compatibili con la sopravvivenza di molti estremofili terrestri. L'oceano fluido avrebbe dei moti convettivi che sarebbero all'origine delle fratture della crosta, che si spacca in grandi poligoni galleggianti, come iceberg alla deriva. La pressione sul fondo di questo oceano caldo e buio sarebbe enorme, pari a 2 milioni di hPa, il doppio della massima pressione misurata nella fossa delle Marianne, a 11 000 metri di profondità. Però le condizioni di pressione e temperatura variano con la profondità e perciò pressioni simili a quelle dei mari terrestri sono possibili più vicino alla superficie, con temperature intorno alla decina di gradi centigradi. I telescopi terrestri hanno rivelato la presenza di occasionali pennacchi d'acqua, getti di materiale che si diffonde nello spazio dalle fratture.

La crosta frantumata di Europa è stata studiata in dettaglio dalla sonda Galileo e le future missioni JUICE e Clipper dovrebbero sorvolare il satellite nel 2029 e 2030.

Se esistono fratture che possono arrivare fino al fondo dello strato di ghiaccio, potrebbe essere possibile in futuro inviare una sonda con un *lander* che esplori la crosta e forse esplorare l'oceano con un piccolo sommergibile. Questa missione sarebbe simile a quella progettata per l'esplorazione del lago Vostok, di cui abbiamo trattato nella Sezione 7.4. Sui fondali di Europa il calore potrebbe permettere l'esistenza di forme di vita con un metabolismo basato sull'energia infrarossa o su sostanze sulfuree. Non è nemmeno chiaro se il fondo dell'oceano possa avere altopiani che abbassino la profondità dei mari, per renderli più simili agli ambienti terrestri. Se su Europa si fosse sviluppata una qualche forma di vita in epoca primordiale dovremmo aspettarci qualcosa di simile a quella terrestre intorno agli sfiatatoi idrotermali come i *black smokers*. Tuttavia non vi sono indicazioni in tal senso, e perciò tutto è ancora da scoprire.

Ganimede e Callisto sono completamente coperti da uno strato di ghiaccio spesso chilometri, a temperature da 90 a 170 K (da -183 a -103 °C). Il primo ha un proprio campo magnetico e anche una tenue atmosfera di $\sim 10^{-8}$ hPa di ossigeno, probabilmente derivata dalla scissione del ghiaccio d'acqua superficiale a opera delle particelle del vento solare. Callisto ha una superficie craterizzata da impatti caduti su uno strato di ghiaccio spesso 200 km, molto più di Europa. Per entrambi si ritiene che ci sia un grande oceano salato sotterraneo profondo decine di km, oppure alcuni strati di acqua e ghiaccio tra la crosta e il nucleo roccioso.

Titano, anch'esso più grande di Mercurio, è stato studiato dalla sonda Cassini che ha scoperto la presenza di maree sulla sua superficie solida. Se essa fosse totalmente rocciosa, la marea causata da Saturno causerebbe un "rigonfiamento" di circa 1 metro, simili a quelle delle maree terrestri sull'acqua degli oceani. Invece la superficie si deforma con maree di 10 metri, che fanno pensare alla presenza di un oceano sotterraneo. Questo strato d'acqua non deve essere enorme o profondo per creare i valori osservati; basta uno strato liquido tra il guscio esterno deformabile e un mantello solido. Poiché il ghiaccio d'acqua abbonda sulla superficie di Titano, come su quella degli altri satelliti ghiacciati, l'oceano potrebbe essere composto da acqua molto salata e clatrati di ammoniaca sotto una crosta di 50 km. Parleremo di Titano anche dopo, poiché il suo ambiente superficiale è simile a quello dell'esperimento di Miller sull'origine della vita, anche se a temperature bassissime.

Intorno a Saturno anche Encelado, di appena 500 km di diametro, mostra caratteristiche interessanti per l'Astrobiologia. La sua superficie, a -201 °C, è ricoperta da ghiacci che riflettono il 99% della luce del Sole. Il satellite è in risonanza con Saturno e con gli altri grandi satelliti Teti e Dione, una situazione simile a quella di Io ed Europa. La sua crosta ha numerosi crateri in una parte dell'emisfero nord,

Vita nel Sistema Solare?

mentre il resto della superficie è priva di crateri. Questo indica che essa non è stata esposta al Grande Bombardamento e si è formata di recente. Su queste regioni intorno al polo sud esistono delle lunghissime fratture, con un fondo che appare più scuro e che le ha fatte denominare “strisce di tigre” (*tiger stripes*). Questi solchi si spostano sotto l’azione di marea e da essi vengono fuori dei pennacchi di particelle d’acqua ghiacciate, come dei geysir freddi, a velocità di 400 m/s. Le misure suggeriscono un grande mare esteso sotto la regione polare meridionale, profondo ~10 chilometri e nascosto da un guscio di ghiaccio spesso 30–40 km. Dai pennacchi esce il materiale dell’oceano, in una miscela di acqua, gas volatili, vapore acqueo, anidride carbonica e monossido di carbonio, nonché materiali organici. Parte del materiale ricade su Encelado e alcune particelle sfuggono per formare il vasto anello E di Saturno. Esso è composto principalmente da particelle di ghiaccio, con nano-granuli di silice, che possono essere generati solo dove l’acqua liquida e la roccia interagiscono a temperature superiori a 90 °C. Questo indica che esistono sorgenti idrotermali in profondità sotto il guscio ghiacciato di Encelado.

Nella fascia interna di asteroidi, tra Marte e Giove, il pianeta nano Cerere sorvolato dalla sonda Dawn ha rivelato emissioni di brina di hydrohalite (acqua ghiacciata e salgemma) all’interno del grande cratere Occator. L’impatto avvenuto 20 milioni di anni fa ha creato il cratere, riscaldando il terreno e fratturandolo. Da queste fratture uscirebbe la brina che secondo alcuni ricercatori indicherebbe la presenza di un oceano a 35 km sotto la superficie ghiacciata, a -120 °C. Tuttavia secondo altri ricercatori si potrebbe trattare solo di depositi di brina e non di un vero e proprio serbatoio di acqua liquida.

Infine Plutone, un pianeta nano della Fascia di Kuiper, potrebbe avere anch’esso un oceano nascosto. Sorvolato dalla sonda New Horizons nel 2015, ha rivelato una geologia superficiale molto complessa, con ghiacci di metano a -230 °C. La sua superficie ospita una grande pianura di ghiaccio a forma di cuore, la regione di Tombaugh, con il lobo sinistro largo 1000 km denominato Sputnik Planitia. Secondo una teoria, Plutone e i pianeti nani della fascia esterna sono nati ad alta temperatura, da enormi impatti iniziali. Essi avrebbero mantenuta alta l’energia interna, facendolo formare in soli 300 ka. Questo avrebbe mantenuta calda l’acqua dell’oceano sotterraneo. In alternativa, una formazione lenta e fredda del pianeta nano avrebbe prodotto l’oceano, che all’epoca attuale sarebbe riscaldato dal decadimento degli elementi radioattivi racchiusi nel mantello roccioso. In entrambi i casi, il “cuore” di Plutone avrebbe anch’esso un oceano sottostante.

8.4 Mari di Metano

Sopra l'oceano di Titano, sulla crosta ghiacciata a $-179\text{ }^{\circ}\text{C}$, esiste un'altra distesa liquida ma fatta di metano ed etano. Intorno al satellite esiste un'atmosfera molto opaca, composta principalmente da azoto con la presenza di diversi idrocarburi. A $\sim 300\text{ km}$ di altezza si trova uno strato di foschia (aerosol) causato da molecole di metano e azoto che vengono dissociate dai raggi ultravioletti del Sole. L'aerosol diffonde la luce azzurra e circonda l'atmosfera di un tenue alone blu. Nella dissociazione delle molecole si formano polimeri che danno all'atmosfera più densa una colorazione arancione visibile nelle foto. In questa spessa fascia atmosferica, tra i 50 e i 100 km di quota e a temperatura di $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$, i polimeri condensano in particelle solide, che per il loro peso cadono verso il basso come una neve vischiosa. L'insieme di tali composti è stato chiamato **tolina**, dalla parola greca *tholos* = fangoso. Tra i 50 e i 20 km si formano nubi di metano (CH_4) che ricoprono completamente la superficie del pianeta. Vicino al suolo persiste una nebbia di metano o etano (C_2H_6), che si condensa in particelle ghiacciate. La pressione al suolo è maggiore di quella terrestre, ed è pari a 1,6 bar.

Titano è stato sorvolato per anni dalla sonda Cassini e sulla sua superficie nel 2005 è stata inviato il lander Huygens. Sotto le nubi si trovano regioni ghiacciate scavate da piogge, erosione e canali fluviali creati da un liquido che a quelle temperature non può che essere metano o etano. Su Titano appare esservi un "ciclo del metano" con nubi, piogge e fiumi, come sulla Terra ne esiste uno dell'acqua. La pioggia di metano liquido finisce per sfociare nelle pianure attraverso i canali di drenaggio, e in uno di questi è atterrato il lander Huygens, un canale fangoso fatto da una miscela di ghiaccio d'acqua e delle particelle di idrocarburi diffuse nella nebbia. Il liquido si raccoglie nell'emisfero polare nord in grandi mari di idrocarburi (metano, etano e azoto disciolto) con contorni molto frastagliati. Sono il Mare di Kraken, esteso come il Mar Caspio sulla Terra, il Mare di Ligea e il Mare di Punga, estesi come i grandi laghi del Nordamerica.

Dal punto di vista astrobiologico tutta l'atmosfera di Titano si presenta come un gigantesco esperimento di Miller. I gas presenti sono riducenti e la radiazione ultravioletta scinde il metano presente creando etano e liberando idrogeno secondo la seguente reazione:



La scissione del metano e dell'acqua permette la formazione di molecole quali l'anidride carbonica, diversi nitriti e idrocarburi, tra cui etano, acetilene, etilene e acido cianidrico (HCN). Alle temperature tipiche del suolo di Titano acetilene ed etilene sono liquidi, mentre l'acido cianidrico è gassoso. Ricordando quanto

Vita nel Sistema Solare?

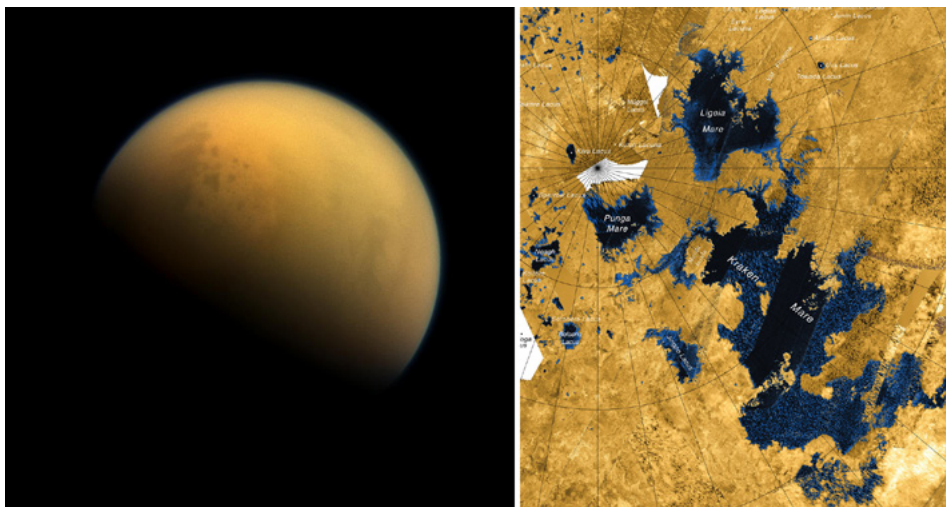


Figura 8.5 – A sinistra: Titano fotografato in infrarosso per vedere attraverso la nebbia. (Foto: NASA/JPL-Caltech/Space Science Institute); a destra: I suoi laghi di metano intorno al polo nord, mappati col radar in falsi colori. (il metano liquido è colorato in blu) ,

affermato discutendo l'esperimento di Miller, l'acido cianidrico è un precursore per la formazione degli amminoacidi. Diversamente dall'esperimento di Miller, l'energia sarebbe presente in alta atmosfera sotto forma di radiazione UV solare anziché di scariche elettriche. Essa innescerebbe la produzione dei polimeri, in grado di generare amminoacidi alla fine di una lunga catena di reazioni chimiche. Anche se oggi sappiamo che questo meccanismo non era presente sulla Terra primordiale su scala globale, su Titano esso crea sostanze che cadono con la pioggia e si accumulano sulla superficie.

Può essersi innescata la nascita di una forma di vita a queste bassissime temperature? Il lander ha misurato un $\delta C^{13} = 81,29$ che è un valore fortemente inorganico, ricordando dalla Tabella 6.2 che nelle condriti esistono valori tra 25 e 75 e nei granuli delle meteoriti marziane di -15.

Poiché il metano viene scisso nell'atmosfera e la sua persistenza nell'ambiente di Titano è stimata di 10–100 Ma, l'abbondanza osservata oggi non può essere spiegata con un residuo del disco protoplanetario nella formazione del satellite. Occorre che esso sia continuamente rifornito dall'interno. In questo senso, la presenza dell'oceano sotterraneo gioca un ruolo importante. Acqua con ammoniaca disciolta che funge da anticongelante può reagire con le rocce liberando idrogeno, che a sua volta reagisce con la CO_2 e altri materiali carboniosi creando metano. Questo processo è analogo alla serpentizzazione di cui abbiamo parlato per la Terra e Marte (Sezioni 7.2 e 8.1.4). Il metano può formare dei clatrati ed essere ri-

lasciato lentamente attraverso fratture della crosta. Infatti è stata osservata un'attività vulcanica simile a quella dei geysir, ma a bassissima temperatura (**criovulcanismo**) in cui si formano bolle di metano o fuoriescono colate di ghiaccio d'acqua e ammoniaca. La scissione dell'ammoniaca e l'utilizzo dell'idrogeno per altre reazioni può spiegare la grande quantità di azoto presente nell'atmosfera (tra il 77 e l'85%). Così l'oceano sotterraneo, il criovulcanismo, la radiazione UV interagiscono a creare questo serbatoio di sostanze organiche "à la Miller". Le esplorazioni future ci diranno se su Titano possono esistere reazioni simili a quelle metaboliche attraverso molecole di tipo prebiotico, come una forma di vita alternativa alla nostra.

9

Pianeti di altre stelle

La nascita del nostro pianeta è stata un evento molto importante per l'origine della vita. La scoperta di altri pianeti simili alla Terra ci fa pensare che la vita abbia maggiori possibilità di esistere in altri luoghi della Galassia. Ripercorrendo i processi della nascita del Sistema Solare descritti nei Capitoli 4 e 5, comprendiamo che la formazione della Terra è passata attraverso diverse fasi. All'inizio vi è stata la contrazione della nube ruotante di gas da cui si è formato il Sole. Essa ha generato un disco schiacciato e poco denso, il disco protoplanetario. Nel suo interno poi si sono aggregati i primi planetesimi e il disco è rimasto intorno al Sole finché l'energia emessa non l'ha fatto evaporare e il vento solare l'ha spazzato via. La prima fase di accensione dell'idrogeno, la fase T-Tauri, ha determinato un'emissione irregolare e intensa di energia e particelle che ha permesso così di ripulire lo spazio tra i pianeti. Nel caso del Sistema Solare, la vita del disco protoplanetario sembra essere stata di qualche centinaio di milioni di anni. Nella nostra galassia, numerose altre stelle sono tuttora nella fase T-Tauri, riconoscibile dall'irregolare fluttuazione della loro luminosità nel tempo, e potrebbero avere pianeti già formati. Essi resteranno immersi nel disco protoplanetario per milioni di anni, ma potrebbero restarvi per miliardi di anni, se il processo di evaporazione del disco non sarà tanto efficiente da far svanire il materiale circostante.

Cercando di capire se la nascita di un pianeta è un evento raro oppure comune, dobbiamo soffermarci su una riflessione preliminare: la nascita del Sistema Solare, secondo quanto descritto, è stata un fenomeno puramente meccanico, dominato dalla forza di gravità, dall'energia cinetica dei planetesimi e dalle condizioni termiche del gas e delle polveri del disco protoplanetario. Queste caratteristiche non sono certamente una peculiarità del Sistema Solare. Ovunque si formino altre stelle la forza di gravità, l'energia cinetica e le leggi della termodinamica agiranno nello stesso modo. Quindi ogni stella potenzialmente potrebbe aver seguito lo stesso processo: ossia la formazione di un disco protoplanetario e successivamente di pianeti. Estendendo questa considerazione su un piano puramente logico, tutti i 200 miliardi di stelle della nostra Galassia potrebbero essere circondati da pianeti.

Tuttavia ogni stella differisce da un'altra per massa, tempo di evoluzione e composizione chimica. Per esempio è difficile pensare alla formazione di pianeti roc-

ciosi quando all'origine della Galassia non erano esplose abbastanza supernovae da arricchire di silicio il gas interstellare. Le primissime stelle nate, dunque, potevano essere composte solo da idrogeno, elio e scarsissime quantità di elementi chimici più pesanti. Solo dopo alcuni milioni di anni la composizione chimica del gas interstellare deve aver raggiunto una concentrazione di silicio sufficiente a far condensare un pianeta. Tutte queste stelle passano attraverso il processo di collasso da una nube di gas e probabilmente di formazione di un disco protoplanetario. La nostra ricerca di pianeti quindi potrebbe avere origine proprio dalla ricerca di questi dischi, più facili da scoprire dei singoli pianeti già formati. Un disco protoplanetario può riflettere la luce della stella centrale, oppure può nascondersela se è visto "di taglio", cioè se la **linea di vista** (tra l'osservatore e la stella) si trova lungo il suo piano equatoriale. Esso può anche riemettere la luce stellare sotto forma di radiazione infrarossa o onde radio ed essere visto a queste lunghezze d'onda. Le sue dimensioni nel caso del Sistema Solare dovevano essere estremamente elevate, dell'ordine di qualche centinaio di unità astronomiche. Esso è perciò un oggetto abbastanza esteso da essere osservabile anche da un'altra stella e può essere scoperto meglio dei singoli pianeti già formati. La dimensione dei pianeti infatti è estremamente più piccola, ed essi sono molto più difficili da trovare con un'osservazione diretta. Per scoprirli, le ricerche più recenti hanno dovuto escogitare tecniche e metodi sempre più accurati di osservazione e misura.

9.1 Ricerca di dischi protoplanetari

Già dai primi anni '80 alcune stelle vicine al Sole mostravano nelle lunghezze d'onda infrarosse un alone che poteva essere attribuito a un disco di polvere. Il prototipo di queste stelle è la brillantissima Vega, la più luminosa della costellazione della Lira, e per diversi anni queste stelle sono state chiamate di *tipo Vega* (*Vega-like*). Negli stessi anni era stata osservata un'altra stella molto brillante, ma dell'emisfero australe, β -Pictoris, che appariva nelle immagini con una struttura allungata e debolmente luminosa, interpretabile come un disco di materia visto quasi di taglio. Questa stella è probabilmente l'unico caso in cui il disco protoplanetario o quel che ne resta è visibile nelle immagini ottiche (non solamente infrarosse) con osservazione da Terra. L'analisi spettroscopica della luce di stelle di tipo Vega mostrava la presenza di righe di elementi chimici, che apparivano per poche ore o pochi giorni assorbendo la luce della stella, e successivamente scomparivano. Se queste stelle sono circondate da dischi o gusci di polvere, allora queste righe, simili a quelle delle comete, possono essere le tracce di **planetesimi** ruotanti intorno alla stella centrale e in fase di caduta verso il centro di massa del disco. Quando essi attraversano la linea di vista, i gas che li circondano assorbono la luce stellare producendo le righe. Anche le osservazioni con radiotelescopi ave-

Pianeti di altre stelle

vano mostrato che le stelle T-Tauri erano circondate da dischi di gas molecolare ruotante intorno alla stella. Questi aspetti erano una conferma al fatto che dischi protoplanetari o gusci di gas e polveri potevano esistere intorno a stelle di nuova formazione come le T-Tauri oppure già vecchie di milioni di anni come Vega o β -Pictoris.

Con l'entrata in funzione del Telescopio Spaziale Hubble (HST) nei primi anni '90 la nostra visione dell'universo ha raggiunto una risoluzione spaziale impensabile prima con le osservazioni da Terra. Le osservazioni di stelle T-Tauri hanno mostrato chiaramente la presenza di dischi che oscurano la luce stellare e di getti di materia perpendicolari al disco. In queste stelle il disco protoplanetario sta evaporando e l'energia della stella espelle fuori dal piano equatoriale parte del gas che la circonda. Successivamente è pensabile che anche il resto del disco possa evaporare. Ma la rivelazione maggiore a conferma dell'esistenza di dischi protoplanetari si è avuta con l'osservazione di nebulose vicine, come Aquila nella costellazione del Serpente o M42 in quella di Orione. In esse il telescopio spaziale ha mostrato decine di piccole nubi schiacciate che sono state finalmente riconosciute come dischi protoplanetari. In particolare l'osservazione della nebulosa di Orione dove stanno nascendo nuove stelle ha rivelato più di 50 dischi protoplanetari con dimensioni da 50 a 1000 U.A., concentrati in una zona estesa meno di 1 parsec, la distanza tra noi e Proxima Centauri, la stella più vicina al Sole.

La presenza di un numero così alto di dischi protoplanetari osservati in maniera diretta in una piccola zona della Galassia fa pensare che il processo di formazione dei dischi sia un evento comune nella nascita di stelle, a cui seguirà la nascita di planetesimi da cui in seguito si formeranno i pianeti. Nel caso di β -Pictoris, il suo disco è deformato come se un pianeta massiccio lo attraversi con un'orbita inclinata di qualche decina di gradi. Dopo il 2010 è stata osservata in effetti la presenza di due pianeti.

Si ritiene oggi che i dischi protoplanetari siano una fase dell'evoluzione stellare a cui ogni stella debba andare incontro per un periodo che, nel caso di stelle con massa pari al Sole, ha una durata di alcuni milioni di anni. L'esistenza di materiale intorno a stelle già formate e stabili quali Vega o β -Pictoris, stelle bianche o blu più massicce del Sole, può essere spiegata supponendo che in alcuni casi il disco protoplanetario non evapori completamente. Poiché queste stelle si evolvono velocemente, potrebbero non avere una fase T-Tauri abbastanza lunga da ripulire completamente lo spazio circostante. I pianeti nati attorno a queste stelle potrebbero restare avvolti nella nebulosa del disco per tutta la loro esistenza.

9.2 Ricerca di pianeti intorno ad altre stelle

Scoprire pianeti già formati attorno ad altre stelle, detti pianeti extrasolari, è stata per anni una sfida dell'Astronomia. Si sapeva che un pianeta col diametro di Giove che rifletta il 50% della luce ricevuta e si trovi alla distanza di Proxima Centauri (1 pc), apparirebbe con dimensioni angolari di mezzo millesimo di secondo d'arco ($0,0005''$) e con una separazione di $5''$ dalla stella. Inoltre esso sarebbe ~ 22 magnitudini (ovvero 5 miliardesimi di volte) più debole della sua stella, un valore che lo renderebbe difficilissimo da osservare. Questi problemi sono stati parzialmente risolti e, come vedremo, foto dirette di pianeti extrasolari sono possibili per quelli giganti, molto più grandi di Giove. I metodi che si sono diffusi negli ultimi anni in questo settore, producendo numerose scoperte, sono principalmente metodi indiretti, basati sugli effetti che i pianeti hanno sulla luce o sulla posizione della loro stella. Il primo di essi è basato sulle perturbazioni di velocità causate dalla massa del pianeta (**metodo delle velocità radiali**). Un secondo si basa sulla possibilità che un pianeta passi nella sua orbita tra noi e la stella, eclissando una parte piccolissima ma misurabile della sua luce (**metodo dei transiti**). Altre tecniche si basano su misure molto precise di posizione delle stelle (astrometria) o sulla deformazione del cammino della luce previsto dalla teoria della relatività generale in presenza di grandi masse (**microlente gravitazionale**). Diversi telescopi spaziali e strumenti terrestri sono stati costruiti per scoprire nuovi pianeti di altre stelle. Grazie a tutte queste ricerche sono stati scoperti più di 4000 pianeti intorno a più di 3000 stelle, con un numero che cresce ogni settimana¹⁸. I pianeti scoperti si dividono in base al loro raggio e alla loro massa in: **gioviani, nettuniani, superterre, terre, subterre e miniterre**. In inglese le "terre" vengono dette *terran* (aggettivo), e non ci si può confondere col pianeta Terra (*Earth*)

Secondo le regole dell'IAU i pianeti intorno ad altre stelle prendono la denominazione della stella attorno a cui ruotano con l'aggiunta di una lettera minuscola dell'alfabeto. Per esempio, il primo pianeta scoperto intorno a β Pictoris è denominato β Pic b, il secondo β Pic c, e così via. La Terra e Marte sarebbero in questo sistema di denominazione Sol d e Sol e. Dopo un certo tempo dalla scoperta, l'IAU propone un sondaggio per assegnare nomi propri a un numero piccolo di nuovi pianeti e alle loro stelle¹⁹. Tra tanti esempi possibili, nel caso della stella delle Pleiadi ϵ Tauri, dal nome arabo Ain (occhio), per il suo pianeta ϵ Tauri b l'IAU ha approvato il nome proprio di Amateru, dalla dea giapponese Amaterasu.

La ricerca di pianeti extrasolari inizia più di un secolo fa. Nel Novecento per al-

¹⁸ Un elenco aggiornato si può trovare su exoplanet.eu, *Extrasolar Planets Enciclopedia*.

¹⁹ Catalogo aggiornato su: https://www.iau.org/public/themes/naming_exoplanets/

Pianeti di altre stelle

cuni anni si era creduto che una stella nana rossa a soli 1,82 pc da noi, la stella di Barnard, possedesse un pianeta che perturbava il suo velocissimo transito vicino al Sole. L'astronomo Van de Kamp studiò negli anni '60 questa stella ritenendo che fosse circondata da un paio di pianeti simili a Giove, ma questa scoperta venne smentita nel decennio successivo. Solo nel 2018 venne scoperto, con strumenti molto più sensibili, un pianeta di $3 M_{\oplus}$ (masse terrestri) che perturba la stella di appena 1 m/s, un valore troppo basso da misurare per gli strumenti dell'epoca di van de Kamp. Nel 1992 studiando la pulsar PSR1257+12, come spiegato nella Sezione 9.2.4, vennero scoperti tre oggetti orbitanti intorno a questo nucleo residuo dell'esplosione di una stella come supernova. Il primo pianeta extrasolare scoperto intorno a una stella normale (sostenuta dalla fusione nucleare) fu scoperto nel 1995²⁰ intorno a 51 Pegasi. Quest'ultima è simile al Sole e dista da noi ~14 pc. 51 Peg b ha una massa che è circa metà di quella di Giove, ma orbita vicino alla stella in soli 4 giorni e a una distanza inferiore a quella dell'orbita di Mercurio. Questa stranezza rispetto alla struttura del Sistema Solare diventerà la regola per moltissimi sistemi di pianeti extrasolari scoperti negli anni successivi.

La ricerca di pianeti extrasolari è molto attiva in questi anni, e ha portato e porterà risultati importanti per l'Astrobiologia. Alcuni pianeti scoperti sono simili alla Terra per massa e dimensione, e si trovano ad una distanza dalla stella che permette l'esistenza di acqua liquida in superficie. Appena gli strumenti lo permetteranno, l'analisi spettroscopica della luce della stella, riflessa dalla superficie o filtrata dalla loro atmosfera, permetterà di sapere quali molecole esistono su questi pianeti, scoprendo magari acqua, ozono, e forse anche la presenza di clorofilla. Queste sostanze sarebbero una forte indicazione per l'esistenza di vita sulla loro superficie.

9.2.1. Velocità radiali

Un metodo molto usato è quello di misurare la velocità di una stella lungo la linea di vista (velocità radiale), cercando di scoprire oscillazioni periodiche. Se due o più corpi ruotano nello spazio legati tra loro dalla reciproca attrazione gravitazionale, il moto avrà come centro un punto che è il centro di massa del sistema. È facile comprendere che se i due corpi in orbita sono di massa uguale, il loro centro di massa si troverà a metà della distanza che li separa. Quanto più un corpo è meno massiccio dell'altro, tanto più il centro di massa del sistema si avvicinerà all'oggetto più massiccio. Solo se uno dei due corpi è estremamente piccolo rispetto all'altro, il centro di massa coinciderà con il centro geometrico del più grande. Osservato da lontano l'oggetto più massiccio, nel nostro caso una stella, apparirà

²⁰La scoperta di 51 Peg b fruttò il Premio Nobel per la Fisica 2019 a M. Mayor e D. Queloz

muoversi attorno a un punto che non si trova nel suo centro, ma sembrerà oscillare avvicinandosi e allontanandosi dall'osservatore. Nel caso del Sole e Giove, il centro di massa si trova poco al di fuori del raggio del Sole, a ~742 000 km dal suo centro. Quando Giove orbita intorno al Sole, ruota come se fosse imperniato a un asse di rotazione tangente alla superficie solare. Visto da lontano, per esempio a 10 pc, questo movimento non supera 0,008", una quantità piccolissima, ma oggi rivelabile con strumenti e tecniche molto precise. L'oscillazione del Sole causata da Giove avviene a velocità di 12 m/s, con un periodo di 11,9 anni. Nello stesso tempo Giove orbita intorno al Sole a una velocità di 13 600 m/s.

Il pianeta che perturba una stella può non essere visibile nelle osservazioni, ma manifestare la sua presenza, come nel caso di Giove, facendo "oscillare" col suo stesso periodo di rivoluzione la stella attorno a cui ruota. Per un effetto fisico (**effetto Doppler-Fizeau**) le righe spettrali di un oggetto che si muove appaiono spostate verso lunghezze d'onda maggiori se l'oggetto si allontana da noi e verso lunghezze d'onda minori se si avvicina. Questo spostamento è direttamente proporzionale alla sua velocità radiale. Attraverso l'effetto Doppler è possibile misurare la velocità radiale di una stella cercando la presenza di queste oscillazioni periodiche. Questa tecnica richiede spettrografi ad altissima risoluzione, in grado di misurare spostamenti delle righe spettrali fino a un decimilionesimo di lunghezza d'onda. Essa è efficace al massimo per orbite viste "di taglio", parallele alla linea di vista Terra-stella. In quel caso le velocità misurate coincidono con quelle reali nello spazio. Per orbite inclinate rispetto alla nostra linea di vista le velocità misurate sono solo proiettate e minori di quelle reali. Il metodo è inefficace invece per orbite perpendicolari alla linea di vista (parallele al piano del cielo) perché l'effetto Doppler misura solo movimenti radiali, di avvicinamento o di allontanamento dall'osservatore. Il periodo di rotazione della stella intorno al baricentro è uguale a quello del pianeta perché i due oggetti si fronteggiano su una linea passante per il centro di massa. Dal periodo, attraverso la terza legge di Keplero adattata alla massa della stella che dipende dal tipo spettrale, si può dedurre il valore del semiasse dell'orbita del pianeta. Con questo valore e la massa della stella, dalla velocità orbitale si può calcolare la massa del pianeta. Se l'orbita non è di taglio il valore sarà solo un limite inferiore, ovvero la massa del pianeta sarà più grande di quanto stimato. Se il sistema ha più di un pianeta, la velocità oscillerà con più di una frequenza, e analizzando le curve di velocità sarà possibile stabilire semiasse dell'orbita e massa di ogni componente.

I limiti di questo metodo sono dovuti al fatto che si misura la perturbazione di un pianeta sulla sua stella. Questa è tanto maggiore quanto maggiore è la massa e la vicinanza del pianeta. Non può stupire che i primi pianeti scoperti fossero più

Pianeti di altre stelle

grandi di Giove e più vicini della distanza Mercurio-Sole. Nel corso degli anni, gli strumenti di osservazione sono stati potenziati e le ricerche si sono spostate verso stelle nane rosse, di massa più piccola. Questo ha permesso di scoprire pianeti più piccoli e più distanti dalla stella. La sensibilità degli strumenti è arrivata a rilevare velocità di 20 cm/s, sufficienti a scoprire masse di $1 M_{\oplus}$. Quasi 1000 pianeti attorno a più di 600 stelle sono stati scoperti con questo metodo. Alcuni hanno un'orbita molto inclinata rispetto all'asse di rotazione della stella e persino con un moto retrogrado rispetto alla stella. Queste anomalie sono in contrasto col fatto che i pianeti nascono dal disco protoplanetario da materiale che ruota insieme alla proto-stella. Una volta formati, tutti dovrebbero orbitare nello stesso senso e sullo stesso piano, come accade nel Sistema Solare dove tutti i pianeti orbitano nello stesso senso della rotazione del Sole e sullo stesso piano, quello dell'eclittica. Orbite così anomale fanno pensare a una cattura del pianeta dall'esterno o a una diffusione dei pianeti in uno scenario simile a quello del Gran Tac discusso nella Sezione 4.5.

9.2.2. Transiti fotometrici

Se l'orbita del pianeta è orientata nello spazio in modo da essere quasi parallela alla linea di vista, ogni volta che il pianeta passa davanti alla stella avviene una mini-eclisse, come accade nel Sistema Solare durante il transito di Mercurio o Venere davanti al Sole (**eclissi primaria**). La luce della stella si affievolisce per un breve tempo e poi riprende con l'intensità precedente. Anche quando il pianeta passa dietro alla stella, in base a quanto esso riflette la luce della stella (albedo) può avvenire un calo di luminosità (**eclissi secondaria**). Di solito la luce della stella più quella riflessa del pianeta si sommano, tranne che nell'eclissi primaria o secondaria. La curva che descrive la luminosità della stella nel tempo perciò ha una o due minimi di intensità differente che si ripetono periodicamente. La variazione di luce è piccolissima, meno dell'1%, ed è facile comprendere come dipenda da molti parametri: la dimensione del pianeta, che oscura più o meno il disco della stella, la presenza di un'atmosfera che rende meno brusco il calo di luce in entrata o in uscita, la presenza sulla stella di macchie solari, e altro. Anche qui, il periodo dell'eclissi primaria ci dà, attraverso la terza legge di Keplero, la distanza del pianeta dalla stella. La durata dell'eclissi dà informazioni sul raggio del pianeta, sulla sua atmosfera, sull'ellitticità dell'orbita e sull'eventuale presenza di altri pianeti che perturbano la sua orbita. Confrontando le curve di luce osservate con quelle prodotte da modelli numerici è possibile dedurre molte caratteristiche dell'orbita.

I pianeti che creano un'eclissi sono solo una piccola parte di quelli esistenti intorno alle stelle, perché è necessario che l'orbita del pianeta sia inclinata in maniera tale da farlo passare tra noi e la stella. Nella maggior parte dei casi invece non

avviene nessuna eclissi, poiché le orbite sono orientate casualmente nello spazio, e perciò il numero reale di pianeti è molto più grande. Questa esplorazione è stata condotta con telescopi a terra e in orbita, come CoRoT lanciato nel 2006 e Kepler lanciato nel 2009, che hanno osservato per anni ampie zone di cielo con migliaia e migliaia di stelle, rilevandone le variazioni di luce. Tra le stelle “sospette” molte stelle variabili pulsanti o stelle binarie a eclisse ma anche migliaia di candidate con pianeti. Sono state scoperti così più di 3000 pianeti extrasolari che producono eclissi attorno a più di 2000 stelle. I sistemi planetari a eclissi possono anche essere studiati col metodo delle velocità radiali. Dalla curva di luce dell’eclissi si ottiene il raggio del pianeta, mentre da quella della sua velocità radiale si ottiene la massa. Dal rapporto massa/volume è possibile determinare la densità media del pianeta e capire se esso è roccioso come la Terra o prevalentemente gassoso come Saturno. I due metodi si integrano, anche se il loro limite è quello di scoprire più facilmente pianeti grandi rispetto alla stella e vicini ad essa. Un pianeta come la Terra visto da un’altra stella, oltre a produrre una piccola eclissi, ripeterà l’evento solo ogni 365 giorni e perciò occorrerà osservare il Sole per almeno 3 anni per essere certi della scoperta del suo pianeta. Poiché secondo la terza legge di Keplero il periodo orbitale è maggiore per pianeti più lontani dalla stella, hanno una maggiore probabilità di essere scoperti i pianeti grandi e vicini alla stella. Quando parleremo delle caratteristiche dei pianeti scoperti terremo conto anche di questa limitazione dei metodi.

9.2.3. Astrometria

Con l’avvento di telescopi spaziali in grado di misurare la posizione delle stelle con precisione di millesimi di secondo d’arco (~3 milionesimi di grado) quali Hipparcos e Gaia, è emersa la possibilità di misurare le oscillazioni della stella causate dalla presenza di pianeti in base alla loro posizione in cielo. Il numero di pianeti scoperti in questo modo è molto inferiore a quello degli altri metodi, con poco più di una decina di pianeti trovati fino al 2020, ma dovrebbe diventare grandissimo nel corso di alcuni anni, man mano che il satellite scansiona tutto il cielo per più volte distanti nel tempo.

9.2.4. Timing

Se la stella possiede un evento temporale con variazioni precise, la sua ripetizione può essere perturbata dalla presenza di un pianeta. Questo avviene in genere con le pulsar, residui di una stella esplosa come supernova, che emettono un impulso cronometrico con una precisione di millesimi di secondo. Quando la pulsar tende ad avvicinarsi a noi, perturbata dai suoi pianeti, gli impulsi si fanno più frequenti mentre quando si allontana si diradano, per un effetto analogo a quello di spostamento delle righe spettrali. Anche in questo caso si tratta di effetto Doppler, ma

Pianeti di altre stelle

la frequenza che cambia periodicamente non è quella della radiazione luminosa, ma degli impulsi. Essendo il ritmo di una pulsar estremamente breve e preciso è possibile misurarlo con maggiore accuratezza rispetto alle variazioni delle righe spettrali; in questo modo è possibile scoprire oggetti poco massicci rispetto agli altri pianeti extrasolari. Con questo metodo sono state scoperte poche decine di pianeti, la maggior parte di tipo gioviano ma anche alcune superterre.

Purtroppo dal punto di vista dell'Astrobiologia i pianeti attorno a una pulsar sono meno interessanti perché sterili. La stella è esplosa in passato e deve aver distrutto qualsiasi ambiente favorevole alla vita come noi la conosciamo. Se l'esplosione è stata particolarmente violenta, essa potrebbe avere addirittura spazzato via i suoi pianeti e questi osservati oggi potrebbero essersi formati dal gas espulso durante l'esplosione piuttosto che dall'originario disco protoplanetario.

Un'altra applicazione del metodo dei transiti detta TTV (**Transit-Timing-Variation**) è quella di studiare le variazioni temporali delle eclissi, per dedurre l'esistenza di altri pianeti che perturbano l'orbita del pianeta che produce l'eclissi osservata. Anche qui la scoperta di nuovi pianeti ammonta a poche decine.

9.2.5. Microlenti gravitazionali

Questo metodo deriva dall'effetto di **lente gravitazionale** previsto dalla Teoria della Relatività Generale, per cui un oggetto dotato di massa deforma lo spazio intorno. La luce di una stella lontana che passa accanto ad un oggetto massiccio viene deviata e in alcuni casi "focalizzata" su un punto dal lato opposto alla sorgente, come se attraversasse una lente. In questo caso il sistema stella+pianeta fanno da "microlente" all'immagine di una stella di sfondo esattamente allineata col sistema. Monitorando la luce amplificata della stella per giorni o settimane, si possono misurare le variazioni e dedurre la massa e il semiasse dell'orbita del pianeta. Il numero di pianeti scoperti con questo metodo è dell'ordine del centinaio. Anche questo metodo è limitato alla scoperta di pianeti più massicci.

9.2.6. Immagine diretta

Oggi l'osservazione diretta di un pianeta extrasolare, come un puntino luminoso intorno alla stella, è diventata possibile grazie ai coronografi, strumenti che mascherano la luce della stella e permettono di osservare il cielo intorno, e alle tecniche di interferometria e ottica adattiva, che tendono ad aumentare la risoluzione delle immagini e a ridurre la turbolenza dell'atmosfera. Ritenuto in passato un limite difficile da superare, ha prodotto la scoperta di più di 100 pianeti. Ancora una volta il metodo è limitato dal fatto che i pianeti più grandi sono i più facili da fotografare, ricordando che riflettono la luce della stella e che la copertura di

nuvole dei pianeti giganti ha una riflettività maggiore del 50%.

9.3 Caratteristiche dei pianeti scoperti

Nei primi vent'anni del XXI secolo sono stati scoperti, come abbiamo detto nella Sezione 9.2, migliaia di pianeti. Diversi sistemi sono multipli, avendo da due a sette pianeti. Si è potuto affermare con certezza che la presenza di pianeti intorno alle stelle – forse intorno a tutti 200 miliardi di stelle della Via Lattea – non è un fatto speciale ma la regola. Questo non dovrebbe stupirci, tenendo conto che la formazione di pianeti è un evento dettato dalla forza di gravità e dal moto delle particelle che compongono il disco protoplanetario, determinati dalle leggi fisiche dell'Universo, e non un fenomeno speciale. La distribuzione delle stelle con pianeti scoperti abbraccia tutto il cielo: lungo la Via Lattea ma anche nell'alone, dove si trovano fino ad ulteriori 200 miliardi di stelle. Alcuni pianeti sono stati trovati persino nel sistema di stelle più vicino a noi, quello di α Centauri a soli 1,3 pc dal Sole e composto da tre stelle. Due sono più vicine tra loro, α Cen A simile al Sole (Tipo G) e α Cen B, arancione (Tipo F). Ad esse si aggiunge α Cen C, detta Proxima Centauri, una nana rossa (Tipo M) che si muove in un'orbita 400 volte più estesa. Proxima Cen ha due pianeti: uno simile alla Terra, come raggio, massa e una temperatura superficiale che permette l'esistenza di acqua liquida in superficie, e l'altro una superterra di $7 M_{\oplus}$.

Nell'elenco dei pianeti scoperti i gioviani e nettuniani sono i più frequenti, rappresentando circa l'80%, con terre e superterre al secondo posto con meno del 20%. Pianeti più piccoli hanno percentuali insignificanti. La maggior parte dei pianeti, più del 70%, si trova a una distanza inferiore a 0.4 U.A. dalla stella, che è pari a quella Sole-Mercurio. Come abbiamo spiegato, questa vicinanza dei pianeti scoperti è un effetto di selezione dei metodi usati, che misurano la perturbazione del moto della stella da parte del pianeta. Essa è tanto più forte quanto più massiccio e vicino è il pianeta. Tuttavia questo fatto negli anni passati ha portato a interrogarsi sull'origine dei sistemi planetari, incluso il Sistema Solare, in cui si credeva che la formazione dei pianeti avvenisse *in loco*, con i pianeti rocciosi vicino alla stella perché nati da materiale più caldo e senza il gas, che era fuggito verso le regioni esterne. Trovare pianeti gassosi come Giove vicini alla loro stella più di Mercurio ci si faceva chiedere come potessero, questi enormi strati di gas che formano le loro atmosfere, resistere al forte calore e non essersi dissipati nei miliardi di anni della loro vita. Oltre a questo, poiché tutti i sistemi planetari avevano questa caratteristica, come poteva il nostro essere così diverso dagli altri? Si è compreso poi come i pianeti, nati nel disco protoplanetario, subiscano l'interazione dinamica del materiale intorno (**frizione dinamica**), che fa perdere

Pianeti di altre stelle

Tabella 9.1 Denominazione dei tipi di pianeti extrasolari in base alla loro massa e raggio (in unità terrestri, M_{\oplus} , R_{\oplus}).

Nome	Massa	Raggio	Esempio
Miniterre	0,00001 – 0,1 M_{\oplus}	0,03 – 0,4 R_{\oplus}	Mercurio
Subterre	0,1 – 0,5 M_{\oplus}	0,4 – 0,8 R_{\oplus}	Marte
Terre	0,5 – 5 M_{\oplus}	0,8 – 1,5 R_{\oplus}	Venere, Terra
Superterre	5 – 10 M_{\oplus}	1,5 – 2,5 R_{\oplus}	-
Nettuniani	10 – 50 M_{\oplus}	2,5 – 6 R_{\oplus}	Urano, Nettuno
Gioviiani	>50 M_{\oplus}	>6 R_{\oplus}	Giove, Saturno

loro energia portandoli in un moto a spirale verso la stella. Pianeti come Giove migrerebbero verso l'interno passando su orbite sempre più strette (**teoria della migrazione** o dei **jumping jupiters**). Nel disco protoplanetario esiste però una zona centrale in cui l'alta temperatura della stella fa evaporare tutto il materiale lasciando una regione libera da polveri e planetesimi. Per una stella come il Sole questo "buco" centrale del disco protoplanetario si trova entro l'orbita di Mercurio. Una volta arrivati a quella distanza, l'attrito dinamico cessa e il pianeta resta in un'orbita più stabile. Questo spiegherebbe l'accumularsi di pianeti giganti in regioni troppo calde per le loro atmosfere. Il pianeta impiegherebbe però un tempo molto lungo, circa un miliardo di anni, a dissipare l'atmosfera e diventare un nucleo roccioso. Alcuni pianeti potrebbero tuttavia cadere sulla stella ed essere vaporizzati a temperature più alte di 2000 K, in grado di dissociare qualunque molecola. Questo "cannibalismo planetario" potrebbe spiegare perché le stelle con pianeti hanno spesso una quantità maggiore di elementi chimici più pesanti dell'elio nella loro atmosfera.

La formazione dei pianeti, secondo le teorie correnti, avviene nel disco protoplanetario come descritto nella Sezione 4.4. La condensazione dei granuli arriva a formare agglomerati grandi fino a centinaia di metri, che si accumulano formando planetesimi con dimensioni da 10 a 100 km, che a loro volta collidono generando protopianeti con dimensioni di un migliaio di km, simili ai pianeti nani e ai satelliti più grandi. Un ulteriore accrescimento per collisioni e catture permette di generare nuclei rocciosi delle dimensioni della Terra. Nella parte esterna del disco protoplanetario i nuclei rocciosi possono accrescersi accumulando i gas presenti a formare le loro atmosfere giganti. Una teoria alternativa propone per i pianeti giganti una nascita per instabilità locali nel disco, che farebbero collassare

i materiali formando un pianeta gioviano. Qualunque sia il processo di nascita di questi giganti nella parte esterna del disco protoplanetario, i protopianeti gioviani tendono poi a migrare verso il centro del disco, perturbando e disperdendo i planetesimi e i pianeti già formati. In base a questo meccanismo, alcuni verrebbero lanciati all'esterno, lontani dalla stella, mentre altri subirebbero collisioni come è avvenuto per la proto-Terra e Theia, nello scontro che ha generato la Luna. Nel nostro Sistema Solare la presenza (casuale) di due pianeti gioviani, Giove e Saturno, ha permesso di scambiarsi momento angolare e di non precipitare verso il Sole, ma di invertire la direzione nell'evento del Gran Tac, proiettare le comete fino a 50 000 U.A. e favorire la formazione dei quattro pianeti terrestri.

Essendo molto vicini alla stella, una gran parte dei pianeti scoperti sono probabilmente in risonanza 1:1, e volgono sempre lo stesso emisfero alla stella. Su di essi non c'è alba o tramonto e il loro sole resta sempre fisso nel cielo. Vicino all'equatore è sempre estate, mentre ai poli è inverno perenne. Dal lato oscuro, invece la notte è eterna. Questa condizione orbitale limita la variabilità di luce e temperatura dell'ambiente planetario e può influenzare le forme di vita presenti. Si aggiunga che moltissimi sistemi planetari noti girano intorno a una stella nana rossa di tipo M. Queste stelle, avendo meno di $0,5 M_{\odot}$, rivelano più facilmente la presenza di pianeti piccoli. I pianeti delle nane M sono spesso di tipo terrestre e a volte numerosi, come per esempio nel caso di TRAPPIST-1, con 7 pianeti di raggio e massa simili alla Terra. Alcuni suoi pianeti sono infatti in risonanza tra loro, come i grandi satelliti di Giove. Bloccato in una risonanza 1:1 è anche il pianeta WASP-67b che gira a $9/100$ della distanza di Mercurio attorno a una stella più calda del Sole (tipo F). La faccia rivolta alla stella arriva a 2000°C mentre quella opposta è a 1000°C . La temperatura è così alta che le molecole vengono dissociate e la faccia illuminata è sgombra di nubi, mentre sul bordo del pianeta durante l'eclissi della stella è stata rilevata la presenza di ferro gassoso, che condensa in nubi e cade come una pioggia di ferro fuso al suolo. Un posto dove sarebbe inutile cercare forme di vita!

Tra i casi di pianeti extrasolari scoperti, che hanno qualche particolarità, dobbiamo ricordare il pianeta S Orionis 70, un oggetto appartenente all'ammasso giovane di stelle σ -Orionis, che non sembrerebbe legato a nessuna singola stella. Si tratta di un oggetto caldo a 700°C simile a una nana bruna, con un'atmosfera di metano e una massa di $\sim 3 M_{\text{J}}$. Esso potrebbe essere stato espulso da un sistema stellare instabile.

9.4 La zona abitabile

Che tipo di vita possiamo aspettarci su pianeti di altri sistemi stellari? Un modo

Pianeti di altre stelle

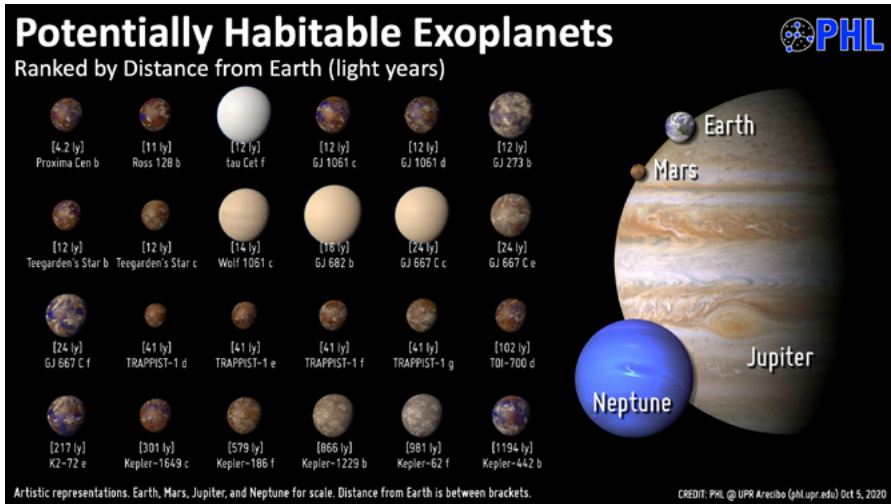


Figura 9.1 - Disegno dei pianeti nella zona abitabile, confrontati in scala rispetto ai pianeti del Sistema Solare scoperti fino al 2020, elencati in base alla loro distanza dal Sole. (Immagine PHL@UPR Arcibo, phl.upr.edu).

per affrontare il problema è analizzare la regione attorno a ogni stella in cui la temperatura superficiale di un pianeta è simile a quella terrestre. Questa regione, detta **zona abitabile** (*habitable zone*), viene fatta corrispondere, nelle attuali ricerche sui pianeti extrasolari, a una fascia di spazio in cui l'acqua può esistere allo stato liquido sulla superficie di un pianeta. A pressioni simili a quella terrestre questo avviene tra 0 e 100 °C ovvero 273 e 373 K, mentre a pressioni inferiori questo intervallo si riduce progressivamente. In questo esempio l'acqua liquida assume il ruolo principale per l'esistenza di forme viventi. Nel Sistema Solare questa zona inizia a 0,95 U.A., poco al di fuori dell'orbita di Venere, e termina a 1,15 U.A., poco prima di quella di Marte, come abbiamo già definito nella Sezione 8.3. La zona abitabile naturalmente dipende dall'energia emessa dalla stella, dal suo raggio e dall'effetto serra generato dall'atmosfera del pianeta. Come abbiamo esposto nei capitoli precedenti, tutti questi parametri mutano col passare del tempo. Per esempio la luminosità di una stella può aumentare del 50% durante la sua vita, il suo raggio estendersi nella fase di gigante rossa, l'effetto serra variare con l'attività vulcanica e così per tutti gli altri parametri che possono influenzare la presenza di acqua liquida. I pianeti scoperti che orbitano nella zona abitabile delle stelle più vicine sono il luogo ideale in cui cercare forme di vita. Pianeti terrestri oppure lune rocciose intorno a pianeti gioviani potrebbero ospitare forme di vita di tipo terrestre.

Su più di 4000 pianeti extrasolari, solo il 14% ha una misura o una stima della temperatura al suolo, e solo un 2% del totale, circa un centinaio, ha valori che ci

permettono di stabilire che essi orbitano nella zona abitabile. Se restringiamo la selezione a quelli con masse o dimensioni simili alla Terra, essi sono poco più di una decina. In alcuni casi non si conoscono i valori della massa, e bisogna fare l'ipotesi che avendo le dimensioni della Terra, abbiano una simile densità, sapendo che i pianeti gassosi sono molto più estesi.

Naturalmente anche corpi celesti fuori dalla zona abitabile ma dotati di energia interna o oceani sotterranei sono possibili candidati, anche se è molto difficile scoprire tracce di vita alla loro superficie. Ricordiamo il caso di Io, Europa e Ganimede, che ricavano buona parte della loro energia termica dall'interazione di marea con Giove e con gli altri satelliti. Nel sottosuolo di pianeti freddi con un oceano e una sorgente di energia interna potrebbero trovarsi ambienti adatti a ospitare forme di vita che non necessitano di luce. Tenendo poi conto che le forme di vita terrestri mostrano un ampio spettro di adattamento alle condizioni ambientali più estreme, come abbiamo illustrato nel Capitolo 7, non si può escludere a priori che una forma di vita, sia pur simile alle nostre, non possa esistere in luoghi che verrebbero esclusi dalle ricerche usando la zona abitabile come criterio di selezione.

Una ventina di terre in zona abitabile dovrebbe farci pensare di aver raggiunto un ottimo risultato. Su quei pianeti c'è la temperatura giusta e l'acqua liquida. Se i gas incorporati nelle rocce durante la formazione del pianeta sono in grado di creare un'atmosfera vulcanica, allora avremmo tutti gli ingredienti per la nascita della vita, che – lo ripetiamo – è un fenomeno sulla cui origine non conosciamo ancora abbastanza. Avere dei pianeti simili alla Terra è un ottimo punto di arrivo del percorso che abbiamo fatto, dalla nascita degli elementi chimici alle molecole, fino ai pianeti seguendo in dettaglio quella che è stata l'evoluzione della Terra e di Marte e delle forme di vita terrestre. Ma avere un'altra Terra non basta. Si saranno sviluppate su di essa forme di vita? Come scoprirlo? Saranno simili alle nostre?

Lo studio dei pianeti extrasolari non si ferma; anzi diversi nuovi progetti e satelliti stanno iniziando analisi sempre più approfondite. Per esempio, quando il pianeta passa davanti alla stella la luce di quest'ultima attraversa la sua atmosfera, e le molecole presenti assorbono alcune lunghezze d'onda. Anche quando il pianeta non crea un'eclissi, la luce della stella riflessa sulla sua superficie e sulle sue nubi assorbe o emette le lunghezze d'onda caratteristiche dei suoi gas atmosferici. È dunque possibile conoscere i gas atmosferici presenti su un pianeta extrasolare osservando quali righe o bande spettrali appaiono o scompaiono nella sua orbita. Nel campo delle microonde, dove stelle come il Sole sono meno luminose, è possibile studiare coi radiotelescopi le molecole presenti. Si è dunque teoricamente

Pianeti di altre stelle

in grado di sapere non solo quanto grande, denso e caldo è il pianeta, ma anche di cosa è fatta la sua atmosfera. Nel nostro Sistema Solare, lo spettro di Nettuno o Giove mostra ammoniaca e metano, quello di Marte e Venere l'anidride carbonica, ma lo spettro della Terra ha caratteristiche uniche. In esso si vedono le tracce del vapor d'acqua, dell'ossigeno molecolare e dell'ozono. Tracce di acqua che fanno pensare a piogge sono state osservate, per esempio, sul pianeta K2-18b, una superterra che orbita intorno a una nana rossa.

La presenza di batteri e piante che utilizzano la fotosintesi lascia una traccia molto evidente nell'assorbimento e riflessione della luce solare. La clorofilla crea un marcato assorbimento nell'infrarosso vicino a 800 nm, che viene chiamato "*red edge*". In fotografie prese con filtri con bande di lunghezza d'onda molto piccola, si vede come dai 700 agli 800 nm ci sia un salto di assorbimento. Finora le osservazioni ci hanno rivelato la presenza di molte molecole: nei pianeti intorno alle stelle più calde ci sono tracce di carbonio atomico, di ferro e altri metalli; in quelli con stelle simili al Sole tracce di acqua, sodio, potassio e ossigeno; in quelli delle nane rosse appaiono metano, monossido di carbonio e acqua. Non è stata ancora osservata la presenza di clorofilla o ozono. Se accadesse, questo farebbe fare un grande balzo in avanti all'Astrobiologia.

Possiamo tuttavia speculare su come potrebbero essere le forme di vita di questi pianeti, in base a ciò che sappiamo sull'evoluzione e lo sviluppo della vita terrestre. Alcuni dei pianeti scoperti vengono frettolosamente definiti "una seconda Terra". Ma dimensioni e raggi simili non bastano, perché gli organismi terrestri più grandi sono sensibili all'accelerazione di gravità, quella che ci fa avere il nostro peso. Una piccola variazione di dimensioni o densità è sufficiente a modificare completamente l'ambiente planetario rispetto al nostro pianeta. Nella Tabella 9.2 possiamo vedere, per un piccolo campione di pianeti terrestri, il valore di g che varia dall'86% al 160% e il peso corrispondente di una persona di 70 kg. Alla superficie del pianeta più massiccio, TOI 700d, questa persona peserebbe 112 kg, e sarebbe per lui difficile e faticoso persino camminare. Anche l'energia necessaria per decollare dal pianeta sarebbe più alta. Che tipo di vita ci potrebbe essere su TOI 700d? Oltre a batteri e altri animali microscopici, potrebbero esserci solo animali striscianti, senza scheletro, oppure molto massicci, in grado di resistere a quella forza di gravità. Non ci sarebbero alberi alti e probabilmente né uccelli né insetti volanti. Di conseguenza, poiché sulla Terra i fiori sono impollinati dagli insetti, è possibile pensare che non esistano fiori su TOI 700d. Niente palme o orchidee in questo presunto paradiso terrestre. Forse solo i mari darebbero tregua al grande peso, con una maggiore spinta idrostatica. All'estremo opposto, su un pianeta con densità minore della Terra come TRAPPIST 1f, lo stesso umano di

Tabella 9.2 Caratteristiche ambientali di alcuni pianeti extrasolari simili alla Terra confrontate col nostro pianeta. Sono riportate la temperatura T , il raggio R e la luminosità apparente S della stella, in unità solari. Seguono: la distanza media a_p del pianeta dalla stella a_p , la sua massa m_p e il suo raggio r_p in unità terrestri. Inoltre si è calcolata l'accelerazione di gravità g_p , il peso che avrebbe una persona di 70 kg sul suolo di quel pianeta, la dimensione apparente D^* della stella vista dal pianeta, in multipli della dimensione apparente del Sole, e la Temperatura superficiale media T_{serra} del pianeta in base all'irraggiamento della stella, assumendo una riflettività del 30% e un effetto serra di 33 gradi, simile al nostro.

Stella	T [K]	R [R_\odot]	S [S_\odot]	Pianeta	a_p [AU]	m_p [M_\oplus]	r_p [R_\oplus]	g_p [g_\oplus]	Peso 70 kg	D [D_\odot]	T_{serra} [°C]
Sole	5770	1,00	1000‰	Terra	1,00	1,0	1,0	1,0	70	1,0	14
Proxima Cen	3050	0,14	0,05‰	Proxima Cen b	0,05	1,0	1,1	0,9	60	2,9	-10
Tau ceti	5344	0,79	430‰	Tau Ceti e	0,54	3,9	1,6	1,6	110	1,5	46
Teegarden	2637	0,11	0,01‰	Teegarden b	0,03	1,1	1,0	1,0	71	4,2	0
				Teegarden c	0,04	1,1	1,0	1,0	72	2,4	-59
TOI700	3480	0,42	0,05‰	TOI700 b	0,06	1,3	1,0	1,3	89	6,6	154
				TOI700 d	0,16	2,3	1,2	1,6	112	2,6	6
				TOI700 c	0,09	7,9	2,6	1,1	80	4,5	87
TRAPPIST 1	2628	0,119	0,004‰	TRAPPIST 1 d	0,02	0,4	0,8	0,7	48	5,5	33
				TRAPPIST 1 e	0,03	0,6	0,9	0,7	50	4,2	-2
				TRAPPIST 1 f	0,04	0,7	1,1	0,6	43	3,2	-32
				TRAPPIST 1 g	0,05	1,3	1,1	1,16	74	2,6	-52

Pianeti di altre stelle

70 kg ne peserebbe 43. Dagli esperimenti nella Stazione Spaziale Internazionale sappiamo che una gravità più bassa provoca danni al sistema scheletrico, al cuore e ai muscoli. Vivere con una gravità minore farà crescere esseri alti, ma per noi terrestri sarebbe dannosa. Potrebbero svilupparsi piante e animali alti, e insetti e uccelli, ma molto diversi dai nostri. Solo su pianeti come Proxima Cen b, Teegarden b e c, TRAPPIST 1g e TOI700b e c la forza di gravità assicura un ambiente fisicamente simile al nostro.

Potrebbero essere questi i pianeti ideali per un terrestre? No, perché le loro stelle, nane rosse, sono molto più piccole e fredde del Sole. L'acqua sarà liquida solo alla superficie dei pianeti più vicini alla stella, dove il calore è maggiore, ma questo come abbiamo visto porta alla risonanza 1:1 pianeta-stella oppure a varie risonanze tra i pianeti. Si potrebbe avere una metà del pianeta caldo al punto giusto e l'altra metà ghiacciata. Guardando la Tabella 9.2, si vede che il disco luminoso della stella potrà apparire in cielo da 3 a 5 volte più grande del Sole. Ma sui pianeti appena citati come più simili alla Terra, la luce della stella non è abbastanza intensa da riscaldare il pianeta molto sopra lo °C. Sappiamo che microrganismi, piante e animali terrestri sono abituati a temperature "polari", ma questo rende per noi umani meno ospitale il pianeta. Inoltre, a causa della luce rossa/infrarossa di queste stelle e alla loro bassa intensità rispetto al Sole, le piante utilizzeranno una fotosintesi diversa da quella terrestre, e se la luce non è abbastanza intensa non produrranno quell'ossigeno che è indispensabile alla nostra respirazione. Un'ulteriore complicazione deriva dalle eruzioni e brillamenti, emissioni di energia che avvengono normalmente sul Sole ma, data la sua grande superficie e temperatura, non alterano in maniera significativa la sua emissione di energia. Le stelle M possiedono superfici e temperature molto minori, e i loro brillamenti scaricano nello spazio quantità di raggi UV in grado di alterare per breve tempo la loro emissione. Le loro corone stellari emettono raggi X come altre stelle, ma i pianeti della zona abitabile, così vicini alla stella, verrebbero irradiati con particelle e radiazioni pericolose per le forme di vita. Sulla Terra noi siamo protetti dalle Fasce di van Allen e dallo strato di ozono, che però è un prodotto biologico, e in sua assenza l'unico riparo può essere trovato sotto i mari. Ecco che il paesaggio dei pianeti più simili alla Terra finora noti sarà dominato da una luce rossa che si diffonde su ogni cosa, senza alba né tramonto, un'aria fresca o gelida, atmosfera anossica, con pericolosi lampi di energia dal cielo. Tutto è molto diverso dai pianeti abitabili della fantascienza!

10

Viaggi spaziali

Dal 4 ottobre 1957, data in cui il primo veicolo spaziale costruito sul pianeta Terra usciva dall'atmosfera, si è incominciato a pensare concretamente alla possibilità di viaggiare nello spazio. Il volo dello Sputnik 1 aprì la strada a una grandissima quantità di speranze. Gli esseri umani iniziavano un'esplorazione della Terra e dello spazio che li avrebbe portati, diversi anni più tardi, all'atterraggio di esseri umani sulla Luna e di sonde automatizzate su Marte, asteroidi, comete e un satellite di Saturno.

Si pensi che da allora sono state effettuate migliaia di missioni spaziali, fatte da agenzie spaziali nazionali e da società private. Europa, USA, Russia, Cina, Giappone, India, Emirati Arabi hanno lanciato sonde spaziali verso i pianeti più vicini. Si progetta una stazione permanente sulla Luna e successivamente su Marte. Alla fine del XX secolo è entrata in funzione la **ISS** (Stazione Spaziale Internazionale) in orbita permanente a una quota che varia tra 240 e 400 km. Essa attraversa i nostri cieli per pochi minuti come una stella brillante, da magnitudine 0,5 a -2,5 (poco meno di Giove). Diversi testi si sono occupati della storia e delle prospettive dell'esplorazione spaziale; qui siamo interessati a comprendere quali sono i limiti attuali della nostra possibilità di viaggiare nello spazio e quanti di questi limiti possano essere dettati da leggi fisiche piuttosto che dal livello delle nostre tecnologie.

10.1 Il problema della propulsione

Senza discutere qui i dettagli ingegneristici dei motori spaziali, facciamo alcune considerazioni legate alla Fisica e perciò valide per tutto l'Universo. Il lancio di un veicolo spaziale richiede un'energia sufficiente a vincere la forza di gravità del pianeta da cui esso parte. Qualsiasi oggetto può abbandonare definitivamente la superficie di un pianeta solo se la sua velocità è superiore o uguale alla **velocità di fuga**. Essa non dipende dalla massa dell'oggetto, ma dalla massa e dal raggio del pianeta; sulla Terra corrisponde a 11 km/s. Se poi si vuole che il veicolo lasci il Sistema Solare, occorre vincere anche la forza di gravità del Sole alla distanza della Terra, e in tal caso la velocità di fuga dal Sole raggiunge i 42 km/s. Si noti che, anche se serve la stessa velocità v per far sfuggire uno spillo o un'astronave, l'energia cinetica necessaria, pari a $\frac{1}{2}mv^2$, dipende dalla massa e perciò oggetti più

massicci richiedono proporzionalmente più energia.

10.1.1. L'energia dei viaggi spaziali

Un lancio spaziale quindi può essere tradotto in termini di energia, che è una valuta universale con cui qualsiasi tecnologia deve fare i conti. Il lancio di uno Shuttle, del peso di 104 t (tonnellate) e dotato di missili e serbatoi per un peso totale di 2,041 kt, richiedeva un'energia di quasi 120 mila miliardi di Joule. Per avere un'idea di quanto grande sia questo valore, diciamo che esso corrisponde a 35 GWh, il consumo elettrico annuo di un paese di 35 000 abitanti. Se potessimo avere un motore così potente da inviare lontano dal Sole un'astronave interstellare di 100 kt, grande quanto una nave da crociera, esso dovrebbe fornire un'energia di ~25 000 GWh, 12 volte il consumo di energia dell'Italia in tutto il 2018. Sottolineiamo il fatto che non basta l'energia del lancio a far muovere a velocità costante una nave spaziale, perché essa rimane legata al potenziale del Sole. Essendo un sistema ad energia totale costante, man mano che l'energia potenziale del Sole (negativa) diminuisce con la distanza, anche la sua energia cinetica (positiva) diminuisce, in modo che la somma energia potenziale+cinetica abbia sempre lo stesso valore. La velocità di una sonda che si allontana dal Sole perciò diminuisce anche nello spazio vuoto. La propulsione deve essere rinnovata continuamente se si vuole una velocità costante.

Il consumo di energia necessario a viaggiare aumenta in maniera crescente con la velocità. Poiché l'energia cinetica è proporzionale al quadrato della velocità, se facessimo viaggiare le nostre sonde spaziali a velocità 10 volte maggiori impiegheremmo un decimo del tempo, ma avremmo bisogno di consumare 100 volte più energia. Inoltre, secondo le leggi fisiche attualmente note, man mano che ci si avvicina alla velocità della luce l'energia cinetica aumenta in maniera più veloce del quadrato della velocità, e tende a diventare infinita. Se volessimo far raggiungere un decimo della velocità della luce alla nostra astronave da crociera, dovremmo utilizzare ~13 miliardi di GWh, 76000 volte il consumo mondiale annuo di energia. Una volta raggiunta la meta, se non si vuole rischiare di superarla a velocità elevata senza potersi fermare, ci vorrà altrettanta energia per frenarla. Perciò la richiesta di energia necessaria per la propulsione in un viaggio spaziale può essere doppia rispetto a quella richiesta semplicemente per andare da un punto all'altro dello spazio. Se poi si volesse raggiungere la velocità della luce, $c = 299792,458$ km/s, sarebbe necessaria un'energia infinita! Qualsiasi tecnologia, per quanto avanzata essa sia, non dispone di un'infinita quantità di energia e perciò, per muoversi nello spazio fisico con un corpo dotato di massa, si deve rinunciare a viaggiare a velocità prossime a quelle della luce.

Viaggi spaziali

Questo limite ha una forte conseguenza sulla durata del viaggio. Anche viaggiando a velocità costante pari a un decimo di quella della luce (quasi 2000 volte più veloci delle attuali sonde interplanetarie) occorrerebbero 42 anni dalla Terra per giungere a Proxima Centauri e 326 000 anni per avvicinarci al centro della Galassia. Quantità estreme per noi umani!

Un viaggio spaziale richiede inoltre ulteriore energia per mantenere in vita l'equipaggio, per far funzionare gli strumenti e per le trasmissioni da e verso la Terra. Diventa anche necessario trasportare una quantità di cibo, aria e acqua sufficiente a sostentare i viaggiatori fino a un'ipotetica meta, ovvero fino al loro ritorno a casa. Raggiungendo una grande velocità i tempi e il fabbisogno di sostentamento dell'equipaggio diventerebbero minori, ma occorrerebbe consumare molto più carburante. Non occorre fare calcoli precisi per comprendere come un viaggio nello spazio si traduca in costi energetici elevati per la comunità che lo intraprende, che potrebbe invece decidere di utilizzare questa energia per risolvere numerosi altri problemi.

10.1.2. Tipi di propulsori

Ma come avviene la propulsione di un missile che parte da un pianeta e si muove nello spazio? Nella maggior parte dei casi si utilizza il principio di azione e reazione, come negli aerei. Un getto di materia (gas combusto o particelle) prodotto da un **motore a razzo** o **endoreattore** viene lanciato in una direzione e il missile o l'aereo si muove in direzione opposta. La velocità di uscita del getto determina la velocità del missile, ma dipende anche dalla variazione di massa del missile. Man mano che il carburante viene consumato, esso si alleggerisce e la spinta permette di andare più velocemente. Se si parte dalla Terra, entra in gioco anche la pressione dell'atmosfera e la dimensione degli ugelli di uscita del motore. Nello spazio, per velocità basse rispetto a quella della luce, la velocità Δv acquisita dal missile dopo l'accensione del propulsore è descritta dall'**equazione del razzo di Ciolkovskij**:

$$\Delta v = v_e \ln(m_i/m_f)$$

In cui v_e , detta **velocità equivalente**, coincide con la velocità di uscita dei gas relativa al veicolo, mentre m_i è la massa iniziale del missile più quella del carburante e m_f la loro massa finale. Guardando la formula si vede che, più è piccola la massa finale (più carburante viene bruciato) tanto maggiore sarà il logaritmo naturale (**ln**) del rapporto tra le masse e la velocità finale. Per un lancio dalla Terra, in cui occorre una grande spinta iniziale, nel missile (**lanciatore**) viene utilizzata una grande quantità di carburante rispetto al veicolo da portare in orbita (**carico utile** o *payload*) e più stadi del lanciatore, in cui ognuno dà una spinta e si stacca alleggerendo gli stadi restanti che potranno allontanarsi più velocemente. Questo

tipo di propulsione è detta **propulsione chimica**, con combustibile solido, per esempio perclorato di ammonio e alluminio e altre sostanze, o liquido come idrogeno e ossigeno. Se invece è necessario spostarsi nello spazio dopo il lancio, ovvero manovrare il veicolo, è meglio avere motori con un alto valore della velocità del getto ma poca massa espulsa. Questa propulsione può essere elettrica, come la **propulsione ionica** usata da sonde attualmente in volo nel Sistema Solare, in cui ioni vengono accelerati da un campo elettrico o magnetico e forniscono la spinta. La spinta non è alta ma può essere fornita per tempi più lunghi di quelli in cui brucia il combustibile di un lanciatore e quindi si possono raggiungere lentamente grandi cambiamenti di velocità.

A velocità vicine a quelle della luce, almeno il 30% di c , la formula cambia:

$$\Delta v = c \tanh(v_e/c \ln(m_i/m_f))$$

e appare la funzione tangente iperbolica **tanh**. Non ci interessa analizzare le formule, ma notiamo solo che diventa importante il rapporto v_e/c , la velocità del getto rispetto a quella della luce. Propulsori di maggior potenza possono essere i **razzi nucleari**, in cui un getto di idrogeno viene riscaldato in un reattore nucleare e lanciato fuori, ottenendo una spinta almeno doppia di quella dei propulsori chimici. Questi propulsori sono stati costruiti e provati al suolo, ma per ora non hanno mai volato. **Razzi a fusione nucleare**, in cui l'idrogeno è riscaldato fino a temperature stellari e poi espulso ad altissima velocità, sono solo teorici. Il plasma nucleare deve essere mantenuto isolato dall'esterno attraverso campi magnetici che fungono da contenitori, pena l'esplosione di tutto il missile. Un veicolo spaziale con questo propulsore sarebbe forse il più veloce realizzabile con la nostra tecnologia. Un **razzo ad annichilazione** sarebbe ancora più veloce e sfrutterebbe l'energia sviluppata dall'incontro tra particelle di materia e antimateria, che creano fotoni a raggi gamma. Anche qui si potrebbe usare l'annichilazione per riscaldare un fluido e creare elettricità, come nei motori a ioni. Gli evidenti problemi di questo tipo di motore sono la grande quantità di energia richiesta per creare l'antimateria e la difficoltà di mantenerla separata dalla materia normale.

10.1.3. Fionde gravitazionali e vele solari

Per ovviare in parte al problema della propulsione e viaggiare più velocemente senza usare energia terrestre, i viaggi nel Sistema Solare sfruttano a volte la forza di gravità del Sole e dei pianeti facendosi attirare da essi come una sorta di **fionda gravitazionale**. Per permettere alle sonde Voyager di raggiungere Saturno, esse sono state lanciate verso Giove nello stesso senso della sua rivoluzione attorno al Sole. Attratte dal pianeta, che le precede muovendosi nella stessa direzione, le

Viaggi spaziali

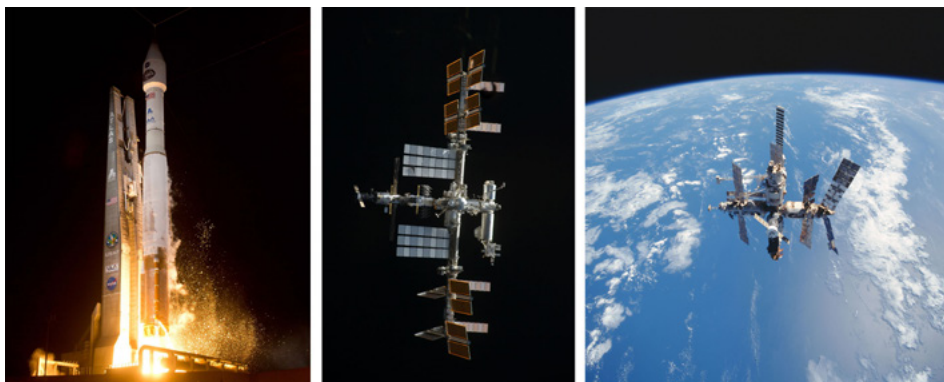


Figura 10.1: Il lancio di un Atlas V, la stazione Spaziale Internazionale fotografata dallo Shuttle Atlantis e la Stazione MIR (Foto: NASA).

Voyager hanno acquisito un'ulteriore quantità di energia cinetica che ha permesso loro di allontanarsi nello spazio verso il pianeta successivo. Approfitando di una particolare posizione favorevole dei pianeti, che avviene una volta ogni 175 anni, il Voyager 2 è stato progressivamente lanciato verso Saturno, Urano e Nettuno ottenendo ogni volta una spinta gravitazionale, per poi allontanarsi nello spazio. La fionda gravitazionale viene usata normalmente dalle sonde spaziali lanciate in questi anni, utilizzando la stessa Terra, Venere e Marte per raggiungere la fascia degli asteroidi o i pianeti giganti. La velocità raggiunta in questo modo può raggiungere i 42 km/s, la velocità di fuga dal Sole alla distanza della Terra. Questo metodo però non può funzionare per un viaggio tra il Sole e Proxima Centauri in quanto non vi è tra queste stelle nessuna “boa cosmica” attorno a cui virare per un nuovo slancio.

Un'altra tecnica di navigazione è quella che permette di sfruttare la radiazione solare come propulsore basandosi sulla pressione che essa esercita su enormi **vele solari**. La navigazione è simile a quella delle navi a vela spinte dal vento, ma qui è la luce solare ad esercitare una lievissima ma continua pressione in grado di spingere una sonda interplanetaria. La vela può essere composta da materiali leggeri come la poliimide, da cristalli liquidi che possono variare la loro riflettività modificando la spinta per orientarsi nello spazio, e da sottilissime celle solari che forniscono energia. Come nelle vele tradizionali, orientando l'inclinazione della vela si può navigare verso il vento o in direzione opposta, avvicinandosi o allontanandosi dal Sole. Questo progetto è stato realizzato con la sonda giapponese IKAROS, che ha sorvolato Venere in circa sei mesi di viaggio utilizzando solo una vela solare quadrata di 14 m di lato, ed ha orbitato intorno al Sole per altri quattro anni. Altri progetti, come le nano-vele di 10 m² lanciate dalla NASA in orbita terrestre, sono stati fatti o sono in fase di progettazione.

Una vela solare non può decollare da terra. Anche se si è tentato di accelerarla con un laser molto potente, fino a 800 km di quota la pressione della luce è inferiore all'attrito atmosferico e quindi la vela va aperta solo in orbita, lanciata da un lanciatore convenzionale. La sua potenza è bassa, simile a quella dei propulsori elettrici, ma ha il vantaggio di non consumare carburante e di ricevere un'accelerazione continua, che diminuisce col quadrato della distanza dal Sole man mano che la sua luce si affievolisce allontanandosi. Associando la spinta luminosa con una fionda gravitazionale coi pianeti o addirittura col Sole, si può pensare di far raggiungere alle vele solari anche grandi velocità. Nel suo volo verso Venere la sonda IKAROS ha raggiunto la velocità di 0,4 km/s, ben lontana dagli 11 km/s dei lanciatori terrestri e dai 42 km/s necessari per lasciare il Sistema Solare, ma è una tecnica in via di sviluppo.

10.2 Esportare la vita

Esseri viventi che viaggino nello spazio hanno bisogno di poter restare in un ambiente stabile che simuli quello in cui sono nati o si sono sviluppati. Anche senza immaginare i viaggi interstellari, un modulo spaziale che contenga batteri, piante o animali ha bisogno di mantenerli in condizioni controllate che permettano loro di vivere.

10.2.1. Sistemi di supporto vitale

Analizziamo i problemi principali da affrontare per poter trasportare forme di vita nello spazio. Tra le principali necessità dei viventi ci sono quelle di respirare, di restare a temperature compatibili col proprio metabolismo e di alimentarsi. Leggendo le specifiche necessarie per la costruzione dei moduli spaziali della ISS, in cui è richiesta una presenza umana permanente, si può notare che un gran numero di sistemi di controllo deve intervenire per permettere all'equipaggio di restare in vita. Uno di essi è il controllo della pressione e dell'atmosfera interna. La pressione deve restare tra 800 e 1000 hPa, simile a quella terrestre, la temperatura deve essere controllata tra 18 e 28 °C e l'umidità relativa tra il 25 e il 70%. Nell'aria circolante nella stazione, l'azoto rappresenta circa l'80%, mentre le pressioni parziali devono essere contenute tra 190 e 230 hPa per l'ossigeno e 7 e 10 hPa per l'anidride carbonica. Le quantità di polveri ammesse devono essere inferiori in media a 50 microgrammi per ogni metro cubo di aria. Un eccesso o un difetto di ognuno di questi componenti attiva diversi tipi di circuiti di controllo dei **Sistemi di Supporto Vitale (LSS)** che riportano tali quantità entro i valori previsti. Tuttavia ogni essere umano presente nella Stazione interferisce con i sistemi vitali, producendo anidride carbonica (1 kg) e acqua (1,8 kg come umidità e 1,5 kg come urine), muovendo polveri (1 miliardo di particelle), assorbendo ossigeno (0,9 kg),

Viaggi spaziali

utilizzando acqua (2,8 kg per bere e 6,8 kg per l'igiene personale) e calore (137 W)²¹. Egli produce anche microbi, con un ritmo di 3000 CFU²² al minuto per persona. Questi microbi devono essere filtrati, per evitare la contaminazione degli altri membri dell'equipaggio. L'elenco appena esposto dimostra quanto complessa sia la gestione interna di un veicolo spaziale se si vuole mantenere in vita l'equipaggio o comunque animali e piante. L'energia del LSS è un'ulteriore necessità da aggiungere a quella della propulsione. Occorre anche produrre energia elettrica, per illuminare l'ambiente e per far funzionare i sistemi elettronici e i computer. L'elettricità vicino al Sole può essere fornita da celle solari, che convertono la luce in corrente elettrica, ma lontano da una stella è necessario ricorrere a batterie nucleari.

L'alimentazione costituisce un altro problema per i viaggi nello spazio. Se l'acqua può essere filtrata e riciclata, una buona parte di essa deve essere trasportata a bordo prima della partenza. Il cibo deve essere immagazzinato o deve esserci la possibilità di coltivare piante o allevare animali. Esistono attualmente diversi studi sulle coltivazioni nello spazio. Per fare un esempio, alcune varietà di frumento sono state studiate e prodotte in ambienti artificiali e potrebbero costituire esempi di future coltivazioni spaziali. Queste colture non vengono disposte su un suolo, ma in una soluzione acquosa che contiene tracce di sostanze nutrienti (**colture idroponiche**). Le colture idroponiche possono essere realizzate con una pellicola sottile di elementi nutritivi disciolti in poca acqua, che scorra attraverso le radici con un flusso continuo, in modo che le sostanze nutrienti siano sempre disponibili alle concentrazioni giuste per ogni tipo di pianta. Il frumento adatto allo spazio può produrre un raccolto idoneo all'alimentazione più in fretta e in maggiore quantità rispetto alle nostre varietà coltivate nei campi. Questi prodotti vegetali "dell'era spaziale" derivano da incroci e selezioni di varietà terrestri, studiati tramite biotecnologie vegetali. Tali studi procedono grazie alla ISS anche se l'idea di fattorie spaziali che possano essere autosufficienti per il cibo è ancora lontana dall'essere realizzata.

10.2.2. Pericoli spaziali

Nel Sistema Solare viaggiano numerosi piccoli corpi solidi in grado di perforare uno scafo come proiettili, che richiedono una schermatura robusta. Tra questi, le micrometeoriti e la **spazzatura spaziale**, costituita dai frammenti di vecchi satelliti artificiali confinati intorno alla Terra. Tuttavia la probabilità di essere colpiti è bassa, a meno che non ci si avvicini troppo a una cometa quando essa si trova vicino al Sole e il suo materiale si disperde nello spazio.

²¹Le quantità in kg sono stimate per ogni giorno di permanenza e per ogni persona.

²²CFU (*Colony Forming Units*) è una misura della capacità di formazione di colonie microbiche.

Un grave pericolo per i viaggi spaziali è costituito dalle radiazioni elettromagnetiche e dalle particelle cosmiche. All'interno di una stazione spaziale oppure durante un viaggio interstellare si è schermati dalle radiazioni UV e X emesse dal Sole o da altre stelle. Non si è invece del tutto protetti dalle particelle cosmiche, perché esse sono in grado di attraversare la materia per centinaia di metri. Il flusso di particelle che s'incontra nello spazio deriva, presso la Terra, da tre sorgenti: particelle dell'attività solare, raggi cosmici galattici e particelle intrappolate dal campo magnetico terrestre.

Il primo tipo di particelle è rappresentato da protoni, elettroni e ioni provenienti dal vento solare, espulse dai **brillamenti** o **flares**, fenomeni molto energetici che si sviluppano in regioni turbolente dell'atmosfera solare. In pochi minuti vengono emesse radiazioni su tutto lo spettro elettromagnetico, dai raggi X alle onde radio. Se il brillamento è accompagnato da una eruzione di materia dalla **corona solare**, la parte più esterna del Sole, vengono sparati nello spazio anche protoni con alta energia cinetica. Eventi di questo tipo sono difficili da predire e le particelle possono raggiungere la Terra in circa mezz'ora.

Diversamente dalle particelle solari, i raggi cosmici galattici sono formati anche da ioni pesanti, cioè formati da diversi protoni e neutroni, lanciati nella galassia a velocità prossime a quelle della luce, con una piccola percentuale di antimateria come positroni e antiprotoni. Questi ioni possono a loro volta strappare gli elettroni da altri atomi (ionizzare) e sono assorbiti solo in parte dai gas atmosferici attraversati. Possono inoltre generare neutroni o ioni più leggeri, abbastanza veloci da creare una radiazione con effetti secondari dannosi per le forme di vita.

Molte di queste particelle cariche restano intrappolate per mesi nelle **fasce di Van Allen**, ampie cinture ionizzate attorno all'equatore terrestre che si trovano con più strati tra ~1000 e ~60000 km di quota. Il livello inferiore delle Fasce cambia con l'attività solare e scende a 200 km in alcune zone della Terra, come nell'**Anomalia del Sud Atlantico**. L'attraversamento delle fasce di Van Allen della Terra o di altri pianeti è accuratamente evitato dalle sonde, perché può deteriorare le loro celle solari, i circuiti integrati e i sensori, a causa delle correnti indotte dalle particelle. Tuttavia la presenza di questo 'schermo' di ioni impedisce alle particelle provenienti dallo spazio di avvicinarsi alla Terra e protegge le forme di vita. La ISS, orbitando tra 300 e 400 km di quota, si trova all'interno di questo schermo protettivo, anche se il flusso di particelle è più alto di quello al suolo. Un veicolo spaziale la cui orbita sorvoli i poli terrestri non ha invece questa schermatura e viene maggiormente colpito dai raggi cosmici.

L'effetto dei protoni e delle particelle ionizzate sulle cellule viventi è quello di io-

Viaggi spaziali

nizzare l'acqua presente e danneggiare il DNA spezzandolo in più punti vicini ed eventualmente in entrambi i filamenti, rendendo così impossibile la sua ricostruzione. Tra i vari effetti delle particelle sugli esseri umani ricordiamo per esempio quello dei **fosfeni**, lampi di luce agli occhi, visti anche a palpebre chiuse dagli astronauti durante voli intorno alla Terra. Sebbene i lampi di luce non sembrino avere effetti dannosi a lunga durata, il bombardamento di raggi cosmici può essere molto dannoso o letale. L'azione della radiazione e delle particelle sulla materia viene misurato in **gray (Gy)**, per cui $1 \text{ Gy} = 1 \text{ joule/kg}$ (energia assorbita per chilogrammo di peso). In genere l'intensità di radiazione presente è così bassa da essere espressa in sottomultipli di queste unità, come milliGray ($1 \text{ mGy} = 1/1000 \text{ Gy}$). Poiché sugli esseri viventi l'effetto dannoso di ogni tipo di radiazione o particella può essere maggiore o minore, per esprimerlo si usano unità di misura diverse, quali il **sievert (Sv)**. Esso rappresenta la **dose biologica equivalente** di radiazione assorbita, che tiene conto non solo dell'entità di radiazione che si riceve (mGy), ma anche del danno che quel particolare tipo di radiazione può arrecare, espresso come un fattore di **efficacia biologica relativa (RBE)**. Per calcolare quanto dannosa sia una radiazione per un essere vivente, vale la seguente relazione:

$$1 \text{ mSv} = \text{RBE} * 1 \text{ mGy}$$

Si stabilisce che raggi X, raggi γ ed elettroni o positroni (radiazione β) abbiano un $\text{RBE} = 1$ mentre neutroni veloci, nuclei di elio (radiazione α) e protoni abbiano $\text{RBE} = 10$, siano cioè dieci volte più dannosi dei raggi X a parità di intensità di energia. Gli ioni pesanti hanno addirittura $\text{RBE} = 20$, venti volte più dannosi a parità di energia assorbita.

Per comprendere meglio queste unità dobbiamo operare un semplice raffronto tra la radiazione ricevuta da un essere che vive sulla Terra e uno che si trovi nello spazio, anche se all'interno di un veicolo spaziale. Nella vita di tutti i giorni, una schermografia toracica "regala" $\sim 0,2 \text{ mSv}$. Gli stessi elementi radioattivi presenti nel nostro corpo (K^{40} , C^{14} , H^3) producono $0,25 \text{ mSv/anno}$ e le rocce terrestri producono in media $2,4 \text{ mSv/anno}$. Vi sono poi luoghi della Terra altamente radioattivi, a causa di sorgenti termali con acqua radioattiva, fino a $260 \text{ mSv all'anno!}$ Se in genere le dosi ricevute non sono dannose, in questi luoghi i valori superano i limiti di sicurezza. Infatti, secondo le leggi attuali, chi lavora non può essere esposto a più di 30 mSv/anno e solo nelle centrali nucleari il limite può raggiungere i 50 mSv/anno . Spingerci nello spazio ci espone a una dose maggiore di radiazioni, non esistendo lo schermo creato dall'atmosfera e dal campo magnetico terrestre. Nelle missioni Apollo sulla Luna gli astronauti hanno ricevuto una dose complessiva di $\sim 11 \text{ mSv}$, un valore sotto la soglia di pericolo. Invece gli astronauti della ISS ricevono 1 mSv al giorno , e la loro esposizione diventa sempre più rischiosa col passare del tempo. Una missione di tre anni su Marte, inclusi diversi mesi di

andata e ritorno, può esporre alla radiazione cosmica fino a 1000 mSv, 200 volte la dose biologica massima ammessa in una centrale nucleare!

L'esposizione alle radiazioni può uccidere in fretta se la dose è massiccia (**esposizione acuta**) come nel caso di una esplosione nucleare, oppure può provocare danni al sistema immunitario e agli organi interni che si manifestano dopo anni dall'esposizione, sotto forma di tumori. Abitare in una zona radioattiva può favorire l'insorgere di numerose malattie indotte dalla radioattività. Se 10 Sv possono uccidere un essere umano in un paio di settimane e 50 Sv provocare una morte quasi immediata, anche dosi più basse ricevute per lungo tempo (**esposizione prolungata**) possono causare la morte per cancro. Il rischio di morte può essere stimato intorno a 0,08% ogni 10 mSv se in esposizione acuta ed è minore della metà per una esposizione prolungata.

Andare su Marte può essere mortale? Attualmente una persona che non fuma, ma vive in una città industrializzata, ha un rischio del 20% di ammalarsi mortalmente di una qualche forma di cancro in vecchiaia. Una missione su Marte può aumentare questo rischio da 1% al 19%, con una grande incertezza sulle percentuali. Il rischio è ancora più elevato per le donne, perché secondo alcune stime le radiazioni possono aumentare anche del doppio la loro possibilità di ammalarsi di cancro. Se il rischio fosse aumentato del 19%, significherebbe che un astronauta che vada su Marte ha una possibilità maggiore o uguale al 39% di morire per cancro, una quantità inaccettabile per una missione di esplorazione. Per permettere agli astronauti di una futura missione su Marte di tornare vivi e senza danni permanenti da radiazione dopo aver ricevuto 1 Sv di raggi cosmici, occorrerà probabilmente produrre schermature molto più efficaci di quelle attuali. Tra i progetti di schermature spaziali citiamo quello di proteggere il veicolo con intercapedini riempite di materiali leggeri che assorbono le particelle (per es. polveri ossidate), oppure il progetto europeo Space Radiation Super Conductive Shield, che prevede di simulare le Fasce di Van Allen, creando campi magnetici attorno al veicolo con l'uso di materiali superconduttivi alle bassissime temperature dello spazio.

Basse temperature, pressioni bassissime, micrometeoriti, radiazioni dannose, produzione di cibo e atmosfera; tutti questi fattori devono essere tenuti sotto controllo per riuscire a far viaggiare esseri viventi nello spazio e, qualunque siano le soluzioni tecnologiche future, comporteranno un costo notevole in termini di energia necessaria per realizzare la missione. Si pensi poi che devono funzionare senza interruzioni o guasti, per anni e forse secoli, non solo il LSS per mantenere in vita gli astronauti, ma anche tutti i sistemi di controllo della navigazione! Una richiesta che sembra comunque molto difficile da raggiungere.

10.3 Eppure qualcuno sopravvive...

Sulla Terra le regioni esposte alla radioattività sembrerebbero le più sterili che si possa immaginare. Tuttavia esistono batteri come il *Deinococcus radiodurans* in grado di assorbire 60 Sv in un'ora, di resistere al calore e agli acidi, con mutanti della sua specie in grado di digerire solventi e metalli pesanti come rifiuti nucleari. Scoperto nel 1956, questo mostruoso batterio (come dice il nome *deinos* = mostruoso) deve la sua resistenza al fatto di possedere diverse copie di cromosomi, in modo da potersi riparare in fretta in caso di danni al DNA copiando le parti mancanti dagli altri filamenti. Se un essere umano colpito da una dose di 10 Sv muore per danni da radiazione tra i 2 e i 14 giorni, un *Deinococcus radiodurans* può resistere fino a 150 000 Sv. Fuori dal nostro pianeta, l'ambiente spaziale sembrerebbe anch'esso il posto migliore per sterilizzare qualsiasi cosa. Invece esistono forme di vita che sono in grado di sopravvivere nello spazio senza complicati sistemi di protezione e controllo, a parte quelli naturali o piccole protezioni artificiali. Analizziamo ora come si è arrivati a queste scoperte.

La storia inizia con un probabile errore – o falso caso – di sopravvivenza spaziale. Nell'aprile del 1967 il Surveyor III, una piccola sonda della NASA, atterrò all'interno di un cratere lunare scattando alcune foto dell'ambiente circostante. Nel novembre del 1969 il lander dell'Apollo 12 atterrò a circa 500 metri di distanza e gli astronauti andarono a recuperare la telecamera e altre parti del Surveyor III per riportarle a terra. Una volta tornati nei laboratori terrestri, i vari pezzi furono analizzati e nella schiuma di poliuretano che costituiva l'isolamento della telecamera, tra due gusci protettivi di alluminio, vennero estratti dei batteri. Coltivati in laboratorio a 37 °C, questi batteri mostrarono di essere in grado di tornare in attività dopo essere stati circa 30 mesi sulla Luna, senza nessun controllo di temperatura o pressione, difesi solo dalla struttura meccanica della sonda. Si trattava di un campione di poche decine di cellule di *Streptococcus mitis alfa-emofilico*, un batterio comunemente diffuso nella cavità orale umana. Sull'origine di questi batteri e sulla veridicità della loro sopravvivenza in ambiente lunare si è molto discusso negli anni successivi. Nei comunicati della NASA dell'epoca si legge che le norme di sterilizzazione erano state ridotte per il lancio del Surveyor, proprio per verificare se l'ambiente lunare era così inospitale. L'idea che traspare è che una possibile contaminazione della Luna poteva essere esclusa poiché il materiale non sterilizzato non sarebbe venuto in contatto con l'esterno. Non è chiaro se questo esperimento, non dichiarato ufficialmente, fosse intenzionale. Alcuni anni dopo si è avanzata l'ipotesi che gli streptococchi abbiano raggiunto invece il poliuretano per mancanza di sterilità delle persone che l'hanno maneggiato a terra *dopo* la missione lunare, per esempio uno starnuto. Vera o falsa che sia, la

vicenda ha aperto una strada allo studio della sopravvivenza batterica in ambienti extraterrestri.

Abbiamo osservato nel Capitolo 7 come molte forme di vita estremofile siano in grado di colonizzare ambienti estremamente diversi del nostro pianeta, che sarebbero mortali per la maggior parte degli animali. Tuttavia esse non possono fare a meno dell'acqua liquida per il loro metabolismo e per sopravvivere. Nello spazio la pressione è bassissima e il punto di ebollizione dell'acqua scende tanto nella scala delle temperature da rendere impossibile la sua permanenza allo stato liquido. Essa bolle istantaneamente nel vuoto e poi passa velocemente allo stato di ghiaccio. Se esposte allo spazio, le cellule viventi che contengono più della metà della loro massa in acqua possono essere distrutte, con l'acqua che diventa gas frantumando le pareti cellulari (**sublimazione esplosiva**). Un essere umano espulso nello spazio senza la protezione di una tuta spaziale avrebbe il sangue e i liquidi dei tessuti in rapida ebollizione, con gonfiore dei tessuti ed embolie, in questo caso bolle d'aria che bloccano la circolazione del sangue. L'aria dei suoi polmoni si espanderebbe in fretta fino a squarciarli. L'ossigeno non arriverebbe più al cervello e la persona perderebbe conoscenza e morirebbe in stato di incoscienza nel giro di un minuto. Il corpo però non congelerebbe istantaneamente, perché il calore si trasmette solo per irraggiamento nello spazio.

Alcune specie viventi possono assumere però strutture con un basso tenore di acqua, le **spore**. Batteri e lieviti che si trovino in condizioni esterne difficili per la loro sopravvivenza bloccano le loro funzioni metaboliche e formano attorno a sé una struttura molto resistente. Questo processo di **sporulazione** permette alle cellule di resistere ad alte o basse temperature, ad agenti fisici e chimici che altrimenti le distruggerebbero e alle radiazioni. Le spore possono restare inattive, come in "animazione sospesa" per lunghissimo tempo, e tornare attive una volta ripristinate le loro condizioni ideali. Alcuni batteri estratti dal lago Vostok a 3519 m sotto il ghiaccio hanno mostrato di avere delle proteine che inibiscono la cristallizzazione del ghiaccio e che ne hanno permesso la conservazione per 400 000 anni. Nel 2020 nell'Oceano Pacifico sono state trovate delle popolazioni microbiche sia aerobiche che anaerobiche all'interno di sedimenti marini vecchi fino a 101,5 Ma. Entrambe sono state incubate in laboratorio e hanno ripreso a riprodursi, anche se la risposta è stata maggiore da parte di microrganismi aerobici e solo minima per gli anaerobi. I risultati suggeriscono che le comunità microbiche possono mantenere il loro potenziale metabolico anche in condizioni di energia estremamente bassa e ambienti sfavorevoli.

Nello studio della sopravvivenza cellulare nello spazio, moltissimi esperimenti sono stati eseguiti con le missioni delle stazioni orbitanti Skylab, dello Shutt-

Viaggi spaziali

le e della ISS, ma anche di alcune missioni lunari quali Apollo 16. Campioni di batteri terrestri, spesso sotto forma di spore, sono stati trasportati nello spazio ed esposti a temperature fino a $-270\text{ }^{\circ}\text{C}$, a pressioni di miliardi di volte inferiori a quella terrestre, ai raggi UV del sole non schermati dall'atmosfera. Tra questi esperimenti citiamo quelli fatti con spore di *Bacillus subtilis*, un batterio che non è potenzialmente patogeno (non produce malattie), pur essendo parente del *Bacillus anthracis* che genera il carbonchio. Il *Bacillus subtilis* assume forme sporulanti ed è in grado di produrre l'amminoacido lisina, ingrediente per la costruzione di pareti cellulari. Questo bacillo viene spesso usato in esperimenti di laboratorio con varietà esistenti allo stato naturale (*Wild*) o create in laboratorio come mutanti. Le spore trasportate nello spazio appaiono quasi indifferenti alla mancanza di pressione. Il basso contenuto di acqua, dal 10 al 25% nelle endospore batteriche, permette loro di non subire la sublimazione esplosiva che ucciderebbe le cellule, il cui contenuto d'acqua è dell'80-90%. Esse non sono influenzate dalla bassa temperatura esterna, che permette di conservarle. L'unico agente distruttivo, a parte un forte calore, è la radiazione UV che è in grado di spezzare i legami dei loro acidi nucleici. La radiazione di maggiore pericolosità dovrebbe essere quella nella banda tra 200 e 260 nanometri, alle cui frequenze il DNA viene maggiormente danneggiato dalla radiazione. Tuttavia, spore di *Bacillus subtilis Wild168* portate in condizioni spaziali hanno mostrato di resistere alla radiazione UV quando si trovano a temperature al di sotto dei $-160\text{ }^{\circ}\text{C}$. Può accadere che a bassissime temperature l'energia cinetica acquisita dalle particelle strappate via sia così bassa da non permettere loro di allontanarsi e facendole perciò ri-catturare. In base agli esperimenti di simulazione, spore protette dagli UV attraverso polveri possono sopravvivere su Marte e nello spazio per lungo tempo.

Gli esperimenti EXPOSE condotti dal 2008 al 2015 sulla ISS hanno dimostrato che, oltre ai batteri sporigeni come il *Bacillus subtilis* possono sopravvivere nello spazio semi, licheni (delle specie *Stichococcus*, *Trichoderma* e *Acarospora*), e batteri termofili che non formano spore come il *Deinococcus geothermalis*. Inoltre nella missione Tanpopo sulla ISS un campione di cellule disidratate di *Deinococcus radiodurans* è stato esposto un anno dal 2015 al 2016 allo spazio esterno, non mostrando variazioni morfologiche e rispondendo bene allo stress ossidativo generato dalle condizioni estreme a cui sono state sottoposte le cellule. Questo batterio è stato già citato all'inizio di questa sezione per la sua resistenza alle radiazioni. Esso è tuttavia sensibile alla radiazione UV sotto i 200 nm (UV-C).

Il meccanismo che danneggia le cellule appare essere lo **stress ossidativo**, un meccanismo di danno molecolare causato da **specie reattive all'ossigeno (ROS)** o radicali liberi, molecole che reagiscono con i lipidi, gli amminoacidi e gli acidi

nucleici alterandone la struttura. Sulla Terra, lo stress ossidativo può avere un'origine fisica o psicologica ed essere causato da inquinamento ambientale o ansia. In condizioni normali le cellule reagiscono con enzimi antiossidanti, ma se il livello di ROS è eccessivo si arriva allo stress ossidativo. Come vedremo, questo danno in condizioni spaziali apparirà anche negli organismi multicellulari e negli umani.

Alcuni animali come i **Tardigradi** appaiono anch'essi resistenti allo spazio. Si tratta di piccoli animali di circa 1 mm, in grado di resistere al disseccamento e alle radiazioni, dotati di zampe unghiate e di due punte vicino alla bocca che gli permettono di forare vegetali e animali più piccoli per succhiarne il contenuto. Sono presenti quasi ovunque sul nostro pianeta, dagli abissi oceanici all'Himalaya, e in condizioni ambientali avverse si ritraggono "appallottolandosi" ed entrando in uno stato dormiente in cui possono restare anche per un centinaio di anni, tornando in vita quando l'acqua è disponibile. Sono tuttavia sensibili alla radiazione UVC. Per esplorare questa resistenza, i tardigradi (*Richtersius coronifer* e *Milnesium tardigradum*) sono stati esposti al vuoto dello spazio e alla radiazione solare diretta per 12 giorni nella capsula FOTON-M3. Alcuni di essi sono sopravvissuti, mostrando come non solo singole cellule ma interi piccoli organismi resistano alle condizioni spaziali. Il meccanismo riparatore dello stress ossidativo appare legato ad alcune proteine intrinsecamente disordinate (citate nella Sezione 2.2.2) specifiche dei tardigradi. Esse formano, dopo l'essiccamento, dei solidi amorfi non cristallini (vetrificati) in grado di proteggere l'animale.

Queste cellule e questi animali ci fanno capire come una forma di vita microscopica potrebbe propagarsi da un pianeta all'altro - come vorrebbe l'ipotesi della panspermia - spinta dalla luce o dal vento solare. La fuga dal pianeta originario potrebbe avvenire per eventi catastrofici, quali un impatto in grado di lanciare a velocità di fuga parte del materiale del suolo, acqua o rocce. Una volta giunta nello spazio, la spinta progressiva generata dalla luce stellare la porterebbe verso l'esterno. Attratta dal Sole e arrivata accanto a un altro pianeta, questa ipotetica spora viaggiatrice potrebbe toccare il suolo frenata dall'atmosfera senza bruciare per attrito grazie alla sua piccolissima massa, come accade alle micrometeoriti raccolte in Antartide. Ma potrebbe una spora o un tardigrado arrivare fino al pianeta di un'altra stella? Ricordiamo che se la Terra fosse riprodotta in scala come un granello di polvere di pochi micron, il Sole sarebbe grande come una capocchia di spillo di 1 mm. In questa scala, la stella più vicina sarebbe un'altra sferetta di 1 mm a 10 km di distanza! Poiché la nostra galassia è costellata da miliardi di "capocchie di spillo" distanziate l'una dall'altra da enormi spazi, il viaggio di una spora durerebbe milioni di anni. Durante questo viaggio, difficilmente essa potrebbe sottrarsi ai raggi cosmici, anche se la sua piccola dimensione rendereb-

Viaggi spaziali

be la collisione con le particelle meno probabile di quella con un corpo umano o con una navetta. Gli studi sui microrganismi terrestri in materiali antichissimi confermano la loro riattivazione dopo milioni di anni, ma quanto a lungo possono resistere, per colonizzare altri pianeti o addirittura altre stelle? A questo non c'è risposta.

Alcuni progetti di esplorazione spaziale prevedono “serre” o ambienti nel sottosuolo con piante o microrganismi in grado di produrre sostanze utili agli esseri umani. L'idea di modificare un pianeta rendendolo simile alla Terra (*terraforming*) affronta problemi tecnici ed etici, e per ora la tendenza è quella di non contaminare, per nessuna ragione, gli ambienti extraterrestri con le nostre forme di vita (eccetto gli esseri umani). Tuttavia la contaminazione potrebbe essere involontaria, con specie viventi in grado di sopravvivere a condizioni estreme. Tutto il materiale inviato nello spazio viene sterilizzato prima o dopo il montaggio e mantenuto in condizioni quanto più possibile sterili. In genere viene usata la radiazione UV, o il bagno in perossido di idrogeno (comunemente noto come acqua ossigenata se in concentrazione al 3%) oppure usando gas come ossido di propilene o formaldeide. Queste sostanze in forte concentrazione sono caustiche e a volte esplosive. Tuttavia alcuni batteri possono resistere a questi metodi di sterilizzazione. Infine, un metodo di sterilizzazione può consistere nel passaggio ad alta temperatura, in autoclave. Normalmente bastano 121 °C a 1000 hPa per 15 minuti per sterilizzare un oggetto. Ma è ovvio che alcune componenti elettroniche o plastiche non possono passare in autoclave o essere bagnate e che l'irraggiamento può creare zone d'ombra in apparecchiature complesse. Quindi la mancata sterilizzazione di una sonda inviata nello spazio che poi ritorni a terra può creare problemi, introducendo forme di vita spazio-resistenti sul nostro pianeta

10.4 La mancanza di gravità

Se le particelle cosmiche rappresentano un pericolo per gli esseri umani, un altro fattore da tenere in grande considerazione viaggiando nello spazio è la mancanza di gravità. Per miliardi di anni le specie terrestri si sono adattate alla presenza di una forza di gravità che determina l'alto e il basso. La struttura scheletrica e l'apparato muscolare degli animali servono a vincere il proprio peso; le radici e le foglie delle piante si orientano in base alla direzione del centro di gravità del pianeta; i pesci nuotano sfruttando il principio di Archimede che ha nella spinta idrostatica una direzione determinata dalla gravità; persino animali e piante microscopiche o i nostri organi interni dipendono dalla presenza della forza di gravità. Eppure questa forza è una prerogativa esclusiva di un pianeta; ha un valore diverso in ognuno di essi ed è assente nello spazio. Sulla Terra, a livello del mare,

l'accelerazione di gravità è $9,8 \text{ m/s}^2$ o 1 g. Sulla Luna la gravità è di 0,17 g, molto inferiore alla nostra, mentre su Marte essa è di 0,38 g. Sulla ISS l'accelerazione sperimentata dagli astronauti, ottenuta dal bilanciamento tra la forza di gravità terrestre e quella centrifuga dell'orbita, è di 10^{-6} g.

L'assenza di gravità o la sua forte riduzione come sulla ISS (**microgravità**) determina numerosi effetti sugli esseri viventi. Analizziamoli con un certo ordine, tenendo conto delle necessità di coltivare piante e allevare animali in lunghi viaggi nello spazio e di mantenere in piena efficienza l'equipaggio.

10.4.1. Piante in microgravità

Per iniziare, dobbiamo tener conto che le piante subiscono l'azione della gravità nell'orientazione dei loro organi (**gravitropismo**) e nella costruzione della loro forma (**gravimorfismo**). Il gravitropismo risponde alle variazioni di orientazione, per esempio fa curvare la pianta raddrizzandola se il terreno modifica la sua inclinazione a seguito di una frana. Esso è importante nella nascita da un seme: dapprima la radice spunta in una direzione qualsiasi, ma poi si dirige verso il basso per impiantarsi nel suolo. Dopo che la pianta si è sviluppata, le radici primarie e secondarie si inclinano sempre verso il basso mentre le foglie e la parte apicale tendono a orientarsi a varie inclinazioni verso l'alto. La percezione della direzione verticale e del senso verso l'alto o il basso appare legata a un particolare strato di cellule vegetali, dette **statociti**, contenenti organelli mobili (**statoliti**). Gli statoliti contengono grandi granuli di amido, più densi del citoplasma circostante, che tendono a depositarsi verso il basso indicando così la direzione. Queste cellule sono concentrate nella punta delle radici e nella parte aerea, come nei germogli, e tracciano, per così dire, la strada per lo sviluppo della pianta. In generale i fattori ambientali determinano la velocità di produzione o di distribuzione degli ormoni che regolano la crescita delle piante. Se un lato della pianta cresce maggiormente e il lato opposto è inibito nell'accrescimento, allora il fusto si inclinerà dal lato in cui la crescita è più lenta. Anche la tendenza dei fluidi a muoversi verso il basso potrebbe avere un ruolo per determinare la risposta delle piante alla gravità. Sembra che la sensibilità delle piante alla gravità sia molto forte: i loro organi percepiscono l'esistenza di una direzione di accelerazione fino a 0,0005 g nelle radici e 0,001 g nel fusto.

Se fatte crescere su una centrifuga lenta, le piante tendono ad adattarsi alla nuova condizione inclinando il fusto verso l'asse di rotazione e le loro radici verso l'esterno, seguendo la combinazione della forza centrifuga con quella di gravità. Se le piante vengono portate in orbita terrestre a microgravità, la germinazione dei semi avviene ugualmente, perché dipende dalla luce, ma la radice tende a

Viaggi spaziali

orientarsi in maniera casuale. Successivamente, e per alcuni giorni, la pianta in microgravità cresce più in fretta di quella coltivata a terra, ma indirizza la sua radice principale in una direzione casuale e il fusto può curvarsi; dopo alcuni giorni la sua crescita rallenta e gli apici della pianta perdono la loro maggiore lunghezza (perdita della dominanza apicale): per esempio la punta della radice principale può diventare più corta delle altre.

Anche l'attività metabolica dei singoli microrganismi sembra influenzata dalla microgravità. Gli esperimenti in microgravità sono stati tantissimi, e non è possibile descriverli tutti qui. Quello che è importante sottolineare è che quando gli esseri umani viaggiano nello spazio, anche miliardi di batteri contenuti nei loro organi e sulla loro pelle subiscono le stesse condizioni ambientali e modificano il loro comportamento, come diremo in seguito.

10.4.2. Effetti sugli esseri umani e altri animali

Un effetto immediato del viaggio nello spazio deriva dalla percezione falsata di ciò che vi è intorno, una facoltà sensoriale che sulla Terra stabilisce la nostra idea di orientamento spaziale. I segnali usati dagli animali per muoversi nel proprio ambiente sono molteplici: essi dipendono da ciò che si vede, dal coordinamento tra arti e occhi, dalla percezione di moto ed equilibrio e dalla nostra posizione. Tutti questi segnali sono alterati in volo e, finché non ci si abitua, si provano false sensazioni di movimento sia su sé stessi sia dell'ambiente intorno. Per riportare un paragone nella vita normale, può capitare di essere seduti su un treno fermo in stazione e di averne uno accanto. Se il treno accanto si muove e se dal finestrino non si vede nessun oggetto fisso al suolo, si può avere l'impressione che il proprio treno sia in movimento e che l'altro sia fermo. Gli occhi hanno influenzato il senso di movimento anche se il resto del corpo non percepisce alcuna accelerazione come avviene quando si parte. In maniera analoga, alcuni parchi di divertimento usano attrazioni cosiddette tridimensionali, dove un'azione si svolge su uno schermo che copre completamente il campo visivo e lo stesso seggiolino su cui lo spettatore è seduto può oscillare simulando il movimento. Se lo spettatore non muove gli occhi dallo schermo e fissa lo sguardo su una parete, può avere l'assoluta impressione di essere in movimento, anche se la sua sedia è imbullonata al pavimento. Nello spazio questi effetti possono portare a non coordinare in modo efficace occhi e mani, per esempio per maneggiare un oggetto.

Anche il senso dell'equilibrio viene compromesso. In condizioni normali l'equilibrio viene fornito da un organo, detto labirinto posteriore, legato a quello dell'udito e formato da canali pieni di liquido (**canali semicircolari**) e da una parte detta **vestibolo**. I canali semicircolari permettono di valutare le accelerazioni

della testa nei tre piani dello spazio, mentre nel vestibolo la pressione esercitata da piccoli sassolini (**otoliti**), fa rilevare la direzione della forza di gravità e le accelerazioni lineari. Problemi nel funzionamento di questi organi producono sensazioni spiacevoli e a volte malattie connesse alle vertigini. Naturalmente nello spazio in assenza di gravità questi organi diventano inefficienti e i segnali inviati al cervello sono falsati fino a creare in alcuni astronauti il **mal di spazio**, un insieme di sintomi simili al mal d'auto o al mal di mare. Il fatto di non percepire alto e basso, di non sentire la spinta dei piedi sul pavimento può produrre sintomi che variano da persona a persona come mal di testa, perdita di appetito, senso di nodo nello stomaco o addirittura malessere generale e vomito. Fortunatamente questi sintomi compaiono solo nei primi giorni della missione e scompaiono spontaneamente quando il corpo e il cervello si adattano alla nuova condizione ambientale.

Più a lungo termine, la permanenza degli esseri umani in microgravità ha numerose conseguenze. Il corpo umano ha una stretta dipendenza tra organi sensoriali, coordinamento celebrale e struttura muscolare e scheletrica. Le alterazioni delle risposte di un elemento di questa catena si ripercuotono sugli altri. Un effetto immediato e tipico del volo spaziale è quello dello spostamento dei fluidi corporei in tutte le direzioni dello spazio. Non essendoci più un alto né un basso i fluidi del nostro corpo, sangue incluso, non hanno una maggiore pressione verso i piedi e una minore pressione verso il cervello ma tendono ad aumentare la loro concentrazione verso l'alto (**blood shift**). L'effetto è simile a quello che si ha nell'immersione in acqua, con la pressione idrostatica che tende a bilanciare la forza di gravità. La maggior quantità di sangue che arriva al cervello è simile a quella che si ottiene stando distesi con le gambe verso l'alto e la testa inclinata verso il basso. Se ci si trova nello spazio, un effetto visibile è quello della faccia gonfia e delle gambe che dimagriscono, detta "*puffy face and bird's legs*" per la variazione dei liquidi contenuti nei tessuti. Il cervello e il sistema cardiovascolare (cuore, arterie e vene) rispondono a questi stimoli in maniera complessa. Parte dei fluidi del sangue si trasferisce nei tessuti, si ha meno sete e si elimina una maggiore quantità di liquidi con le urine. Successivamente, il corpo torna a trattenere i fluidi e i sali presenti, cercando di ristabilire l'equilibrio. Se il volume totale dei fluidi da pompare nel sistema cardiovascolare si riduce, diminuisce anche il volume del cuore. Una volta tornati a terra, la variazione di gravità tende a ripristinare le condizioni normali, ma all'inizio il cuore più piccolo non pompa abbastanza ossigeno al cervello creando problemi. Viaggi molto lunghi in microgravità o in assenza di gravità possono creare una riduzione del volume cardiaco e sanguigno difficile da ripristinare una volta tornati sul pianeta.

Parallelamente ai problemi del sistema cardiaco, anche gli altri muscoli e le ossa

Viaggi spaziali

subiscono danni trovandosi in condizioni diverse da quelle abituali. I muscoli non servono più per stare in piedi, né a muoversi camminando, poiché non c'è nessuna forza di gravità da contrastare. Perciò essi si atrofizzano, diventando deboli e si riducono, mentre le ossa perdono calcio e diventano fragili. Questa degenerazione delle ossa è simile a quanto avviene nell'osteoporosi che si manifesta in vecchiaia.

Gli studi fatti sulle missioni spaziali dal 2006 al 2017 su cellule e su astronauti, inclusi due gemelli, hanno mostrato che alla base di tante reazioni avverse del corpo umano alla permanenza nello spazio c'è un meccanismo di infiammazione e stress ossidativo. Questi meccanismi agiscono sui mitocondri, di cui abbiamo parlato nella Sezione 2.1.1 e successivamente, organelli che presiedono alla produzione di energia tramite accumulo della molecola ATP. Una delle attività mitocondriali importanti è il trasporto di ossigeno nel muscolo. Se i mitocondri non forniscono abbastanza ATP attraverso la respirazione la creano per fermentazione, producendo acido lattico. Il malfunzionamento dei mitocondri per effetto dello stress spaziale (particelle cosmiche, diffusione dei liquidi in microgravità) si ripercuote su tutto l'organismo. Muscoli, ossa, cuore, tutti vengono influenzati. All'inizio il fegato tende a compensare questi problemi mantenendo l'**omeostasi**, la stabilità delle condizioni fisico-chimiche e del comportamento dell'organismo, poi non riesce più a regolarne le funzioni. Lo stress spaziale altera l'espressione dei geni e delle proteine a livello profondo, diventando il responsabile di molte condizioni patologiche trovate negli astronauti. Nel caso dei gemelli, quello rimasto nello spazio per un anno mostrava segni di invecchiamento maggiori di quello rimasto sulla Terra.

Un problema parallelo è l'influenza dello stress spaziale sullo sviluppo in microgravità di animali, inclusi gli esseri umani. Nei mammiferi le strutture funzionali del corpo assomigliano a quelle umane e le variazioni osservate negli astronauti possono essere estese ad altri animali. Viceversa, esperimenti di riproduzione animale eseguiti nello spazio possono in parte aiutarci a trarre conclusioni sugli umani. La maggior parte degli animali si riproduce per uova (noi compresi) e la struttura dell'uovo o dell'ovulo contiene una grande quantità di acqua e una simmetria rispetto a un asse. L'asse polare dell'uovo anticipa l'asse principale del corpo dell'embrione, per esempio la spina dorsale, e la direzione d'arrivo della cellula spermatica contribuisce a indicare il lato in cui si svilupperà il suo dorso o il ventre. Quando queste simmetrie vengono disturbate, come in microgravità, anche dopo la fertilizzazione il tuorlo può spostarsi determinando cambiamenti nella struttura dell'embrione. Sulla base degli esperimenti realizzati, per esempio con le rane *Xenopus*, gli embrioni allevati nello spazio mostrano la loro perdita

di simmetria sviluppando una spina dorsale distorta e varie altre anomalie. Le anomalie trovate nelle uova di rana non sembrano però influenzare gli ovuli del riccio di mare, un altro animale i cui ovociti e spermatozoi sono stati inviati nello spazio. Le cellule germinali di questo animale marino (ovuli e spermatozoi) hanno circa la stessa dimensione degli spermatozoi e ovuli umani e possono essere utili per studiare la reazione alle mutate condizioni ambientali. Come detto nella Sezione 10.3, la reazione alle condizioni ambientali dello spazio induce nelle cellule uno stress ossidativo. Anche gli studi fatti sulla fertilità femminile appaiono condizionati dallo stress ossidativo, indotto dalla microgravità, oltre che dalle radiazioni cosmiche. Lo stress ossidativo agisce sulla placenta ed è causa di diverse malattie della gravidanza. In conclusione, la riproduzione animale sembra non essere possibile nello spazio per diversi animali ed esseri umani.

Un'altra serie di problemi può essere determinata da fattori psicologici, quali la mancanza del giorno o della notte o di stagioni fredde e calde, la presenza di luce artificiale e la convivenza in spazi ristretti. Esperimenti eseguiti sulla Terra in grotte o piccoli spazi hanno mostrato l'insorgenza di situazioni di claustrofobia o problemi di convivenza che potrebbero alterare lo svolgimento della missione o del viaggio.

Alcuni problemi creati dallo stress ossidativo potrebbero essere ridotti con una dieta e l'assunzione di opportune medicine e col lavoro fisico con attrezzi ginnici per stimolare i muscoli. Tuttavia l'attività fisica non si è dimostrata sufficiente a compensare la perdita muscolare e ossea.

La mancanza di gravità potrebbe essere risolta con la presenza di una forza sostitutiva di questa: per esempio con l'accelerazione centrifuga ottenuta facendo ruotare il veicolo spaziale e permettendo agli astronauti di camminare sulle pareti opposte all'asse di rotazione. La fantascienza ha anticipato questa soluzione con grandi stazioni spaziali e astronavi costituite ad anello ruotante simili a quella di "2001 Odissea nello spazio", con la fascia esterna che viene percepita come il basso e l'asse che indica l'alto. Per essere efficaci, questi anelli devono avere un raggio abbastanza grande da non creare molta differenza tra la testa e i piedi degli astronauti. Un anello troppo piccolo infatti porterebbe i piedi a gravità normale, ma la testa in bassa gravità, proponendo problemi maggiori rispetto a una mancanza di gravità uniforme. Purtroppo anelli molto grandi implicano molto materiale da portare in orbita e il loro costo sarebbe enorme. Una soluzione più accettabile potrebbe essere quella di costruire due cabine legate da un cavo o da una struttura a traliccio che ruotino rigidamente, come un manubrio con pesi. I cavi o la struttura che le tiene insieme devono essere robustissimi, perché la loro rottura porterebbe inevitabilmente le capsule a scappare via per forza centrifuga

Viaggi spaziali

perdendosi nello spazio in direzioni opposte! Questo tipo di veicolo ruotante potrebbe essere adottato per un viaggio umano verso Marte o verso i pianeti esterni.

In ogni caso, proteggendo piante, umani e altri animali con diete e gravità artificiale, viaggiare nello spazio per lungo tempo o creare delle colonie umane implica la necessità di riprodursi, di allevare piante e animali per l'alimentazione o la compagnia. Questo sembra essere difficile da realizzare in un ambiente diverso da quello terrestre. In base a ciò che sappiamo sullo stress spaziale, l'idea di inviare nello spazio verso un'altra stella una colonia umana in cui vivano padri, figli e nipoti fino ad arrivare alla meta potrebbe non essere realizzabile. Siamo "incollati" al nostro pianeta per natura?

10.5 I nuovi alieni?

I problemi esposti nella Sezione precedente per il viaggio spaziale si ripropongono, anche se in misura minore, per la permanenza in una base sulla Luna o su Marte, e più in generale su pianeti con diversa gravità rispetto alla Terra.

Si può immaginare come, su colonie planetarie o orbitanti, si verificherebbero condizioni che obbligano animali e piante cresciuti nello spazio a non poter più tornare sul pianeta di origine. Allo stesso modo, esseri viventi nati e sviluppatisi su un avamposto lunare a gravità più bassa e in un'atmosfera filtrata e controllata, priva di agenti patogeni, potrebbero trovare letale la permanenza sulla Terra. Sarebbero indifesi rispetto all'abbondanza di microbi presenti nella nostra atmosfera e troppo deboli per la nostra forza di gravità. Ricordiamo come malattie comuni per gli Europei, quali vaiolo, infezioni polmonari e gastrointestinali risultarono mortali per i nativi americani, le cui popolazioni erano prive di anticorpi. Lo stesso accadde all'arrivo degli Europei nelle isole del Pacifico, dove morbillo, tubercolosi e influenza crearono gravi danni. Anche al giorno d'oggi, alcune popolazioni delle foreste amazzoniche hanno un sistema immunitario che potrebbe non resistere alle aggressioni di malattie anche banali come il raffreddore. Come ultimo esempio, la pandemia di COVID19, dovuta a un coronavirus a cui gli esseri umani non avevano nessuna immunità, ha fatto quasi 100 milioni di contagiati e più di 2 milioni di decessi, peggiorando le condizioni di persone con malattie pregresse e creando altre patologie, apparse anche dopo mesi dalla guarigione. Così esseri umani nati in ambiente extraterrestre sarebbero per noi come alieni, inadatti a vivere sul nostro pianeta tanto quanto noi possiamo esserlo nello spazio.

Se nei prossimi decenni si arriverà a stabilire colonie umane permanenti sulla Luna, su asteroidi o su Marte, e se in queste colonie potranno essere coltivate e allevate piante e animali, le persone nate in esse si troveranno nelle condizioni di

abitanti di un'isola separata dall'esterno non già a causa di grandi distanze, ma di differenze fisiche e deficienze immunitarie. Essi avranno un effetto di selezione genetica come quello del "fondatore" discusso nella Sezione 2.5. La loro stessa cultura potrebbe portare a vedere i terrestri come "sporchi" e pericolosamente infettivi, creando una vera e propria divisione culturale non molto diversa da quelle esistenti oggi nel contatto tra popoli diversi. Questo ci porta a esaminare i problemi dell'Astrobiologia in una prospettiva più ampia, quasi sociologica, quella del contatto tra forme di vita intelligente che vivono in ambienti planetari diversi.

11

La ricerca di intelligenze extraterrestri

Abbiamo trattato nei capitoli precedenti di come la vita sia nata sul nostro pianeta nell'arco di poche centinaia di milioni di anni dalla sua formazione. Essa ha trovato molecole e atomi creati dall'evoluzione stellare e ha potuto forse beneficiare di miscele "preconfezionate" di molecole, utili a sviluppare la vita e distribuite in abbondanza nel gas interstellare. Probabilmente le forme di vita hanno bisogno di un substrato planetario per svilupparsi, poiché il loro ambiente deve essere protetto dalle radiazioni e avere acqua allo stato liquido. Tuttavia abbiamo anche discusso come esseri viventi sotto forma di spore possano resistere anche in assenza di un vero e proprio pianeta e di un'atmosfera protettiva. I processi che abbiamo esplorato non appaiono straordinari, ma sono basati sulle stesse leggi fisiche e chimiche che regolano la formazione della nostra galassia. È legittimo pensare perciò che queste condizioni fisiche e chimiche possano ripetersi in altri punti della Via Lattea e creare anche altrove forme di vita simili alle nostre. Naturalmente se potesse concepirsi una vita con una chimica diversa da quella abituale per la biologia terrestre, la probabilità che nascano nuove forme di vita nella galassia sarebbe ancora più alta.

Se guardiamo all'evoluzione della vita sulla Terra, il periodo trascorso dalla solidificazione della crosta (~4,3 Ga) alla diffusione di forme di vita segnalata dalle tracce chimiche del δC^{13} (~3,95 Ga) è di 350 Ma, come trattato nella Sezione 6.6. Prendendo come riferimento l'età di formazione della Terra e del Sistema Solare, ~4,6 Ga come descritto nella Sezione 5.1, la nascita della vita avviene dopo 650 Ma, che rappresentano il 14% dell'età del pianeta. Un po' più lungo è probabilmente il tempo necessario perché da acidi nucleici, proteine e batteri si passi alla diffusione di esseri senzienti come gli umani. Usando la stessa scala di riferimento dell'età della Terra, la comparsa *dell'Homo sapiens*, almeno 300 000 anni fa, ha richiesto il 99,99% del tempo. Una volta diffusi sulla Terra questi hanno impiegato un tempo brevissimo, lo 0,007% dell'età del pianeta, per giungere a una civiltà che ha permesso loro di viaggiare nello spazio vicino e di inviare segnali tra pianeti. Questa fase può essere chiamata **civiltà della comunicazione**. Se qualcosa di simile è accaduto su un altro pianeta, altri esseri senzienti si staranno domandan-

do, come noi, se esistano forme di vita diverse dalla loro e se queste forme di vita siano a un livello di civiltà della comunicazione. Noi oggi conosciamo l'esistenza di pianeti extrasolari simili alla Terra, intorno a stelle diverse dal nostro Sole e forse più vecchie, e possiamo confrontare la nostra scala di tempo con l'età del Sole e delle altre stelle. Se il Sole ha un'età di 4,6 Ga questo può essere all'incirca il tempo necessario dalla nascita di una stella per giungere a una civiltà della comunicazione nell'ipotesi, largamente accettata, che gli esseri umani siano nati su questo pianeta. Poiché l'età della Via Lattea è di ~ 14 Ga, un tempo 3 volte maggiore, possiamo chiederci se tra i più di 200 miliardi di stelle che la compongono esistano altre civiltà in grado di comunicare con noi. Poiché l'informazione che ci viene dallo spazio esterno viaggia principalmente attraverso onde elettromagnetiche possiamo ipotizzare che un primo contatto con una civiltà extraterrestre debba avvenire per questo tramite. La risposta a questa domanda può derivare da quella che è chiamata **ricerca di intelligenze extraterrestri** ovvero **SETI** (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence*). Nel resto del capitolo indicheremo come **esseri intelligenti** quegli individui di una certa specie che hanno coscienza di sé e del mondo intorno a loro e che sono in grado di utilizzare le risorse del loro ambiente a proprio vantaggio. Come per la definizione di vita, una definizione di intelligenza lascia lo spazio a possibili equivalenti non biologici o meno spirituali dell'intelligenza umana. Diamo a questo termine lo stesso significato che il senso comune attribuisce alla parola intelligente. Con le parole **cultura** o **civiltà** intenderemo l'insieme delle conoscenze scientifiche, filosofiche e delle realizzazioni tecniche possedute da un gruppo di esseri intelligenti dotati di un'organizzazione sociale.

11.1 L'equazione di Drake e i suoi limiti

In passato di è cercato di affrontare il problema in maniera statistica, stimando il numero N di possibili civiltà esistenti nella Via Lattea. Questo numero è almeno pari a 1 (la nostra) e deriva da una serie di fattori incogniti, ma prevedibili tramite la ricerca scientifica. Il problema non è diverso dallo stimare il numero di volte in cui un certo numero esce alla roulette in un anno di lanci e coinvolge il calcolo delle probabilità. Esso è stato affrontato per la prima volta nel 1961 da Frank Drake e viene definita dalla sua **equazione di Drake**:

$$N = R_* \times P_p \times P_e \times P_v \times P_i \times P_c \times T_c$$

R_* rappresenta il numero di stelle che nascono ogni anno nella Galassia; più questo numero è grande, più alta sarà la probabilità di trovare un pianeta adatto. P_p rappresenta la frazione di stelle che hanno pianeti. P_e rappresenta la frazione di pianeti formati che hanno condizioni simili alla Terra. P_v è la frazione di pianeti simili alla Terra in cui può nascere una qualche forma di vita. P_i è la probabilità

La ricerca di intelligenze extraterrestri

che una volta nata la vita appaia una specie intelligente. P_c è la frazione di società intelligenti che raggiungono la civiltà della comunicazione. Infine T_c rappresenta l'intervallo di tempo in anni durante il quale una civiltà resta nello stato di comunicazione con l'esterno. L'equazione ci dice che la nascita di una civiltà della comunicazione è condizionata dalla presenza di altri fattori. Per esempio deve nascere una stella perché si formi un pianeta, il pianeta deve raffreddarsi affinché vi sia acqua liquida e devono essere presenti molecole adatte ecc. In questa catena di eventi ogni anello è condizionato dalla presenza dell'anello precedente. Secondo la teoria statistica, la probabilità finale P_f è legata a quelle dei singoli eventi P_i come **probabilità condizionata**:

$$P_f = P_1 \times P_2 \times P_3 \times P_4 \times P_5 \times P_6 \times \dots \times P_n$$

in cui l'indice i va da 1 a n . Essendo ciascun P minore di 1, ogni moltiplicazione per il P successivo diminuisce la probabilità finale.

Alcuni di questi fattori sono puramente astrofisici e possono essere determinati sperimentalmente, per esempio R_* , il numero di stelle che nascono ogni anno, o P_p , ricavabile dal rapporto tra il numero di pianeti extrasolari scoperti e il numero di stelle esplorate. Anche P_e , la percentuale di pianeti nella zona abitabile di ogni stella, con acqua liquida e dimensioni simili alla Terra, può essere calcolata dai database dei pianeti extrasolari scoperti che si arricchiscono continuamente. Nessuna stima è possibile poi sui fattori P_v e P_i . Non abbiamo nessun modo di stimare quale sia la probabilità P_v della nascita della vita dopo la formazione di un pianeta con acqua liquida. Se i meccanismi fisico-chimici sono uguali ovunque, potremmo pensare che una qualche forma di vita sia in grado di nascere sempre quando le condizioni fisiche lo permettano. In tal caso P_v sarebbe uguale al 100%. Finché non si troverà una qualche forma di vita su un altro pianeta questo fattore è destinato a restare senza risposta. La probabilità che su un pianeta simile alla Terra si sviluppi vita intelligente può essere interpretata anch'essa come un prodotto diretto dell'evoluzione biologica, valida per tutti i pianeti con vita ($P_i = 100\%$) oppure come un evento davvero straordinario (P_i vicino a zero). In conclusione, l'equazione esiste ma non ci sono numeri attendibili da inserire in essa, anche se alcuni autori hanno stimato valori da centinaia a migliaia di civiltà galattiche.

L'equazione di Drake riflette però una serie di pregiudizi antropocentrici, come se una vita intelligente dovesse ripercorrere le tappe avvenute sul nostro pianeta fino agli esseri umani, espressa dalla sequenza gerarchica stella \rightarrow pianeta \rightarrow acqua \rightarrow vita \rightarrow intelligenza \rightarrow tecnologia. Questa sequenza molto probabilmente non riflette la giusta impostazione del problema. Abbiamo visto nella Sezione 9.4 che un pianeta simile alla Terra ma con una piccola differenza in massa o raggio produce condizioni difficili per la nascita di organismi dotati di scheletro.

Tutta l'evoluzione sarebbe diversa da quella terrestre.

Se la somiglianza alla Terra la identifichiamo poi con la presenza di acqua in superficie, ovvero pianeta che orbita nella zona abitabile, non si tiene conto del fatto che, come sul nostro pianeta, comunità biologiche possono vivere nel sottosuolo. Anche satelliti come Europa, Ganimede o Titano, fuori dalla zona abitabile del Sole, hanno condizioni interne che gli permettono di ospitare acqua liquida e potenzialmente qualche forma di vita. In questo caso la fonte di energia non è la luce della stella, ma deriva da energia interna al pianeta, e questo altera i termini "planetari" dell'equazione $P_e \times P_v \times P_i$, che perdono di valore. Bisogna ricordare poi che la zona abitabile varia con il tempo perché, quando la stella si evolve diventando gigante rossa, può bruciare i pianeti vicini e produrre un clima moderato su quelli che prima erano ghiacciati. Tra pochi miliardi di anni i satelliti di Giove o Saturno potrebbero avere oceani di acqua in superficie ed essere simili alla Terra ma in scala ridotta, mentre i pianeti terrestri, compreso il nostro, essere ormai distrutti e ingoiati dal Sole. Ha poco senso allora stimare il numero di pianeti come la Terra in stelle con una rapida evoluzione.

Potrebbe anche esistere un pianeta con vita intelligente e con zone di acqua liquida privo di caratteristiche terrestri: massa diversa da $1 M_{\oplus}$, atmosfera non sottile o senza ossigeno, ecc. Infine il raggiungimento di una tecnologia tale da creare insediamenti spaziali orbitanti attorno a una stella e trasferibili a distanze diverse, secondo la sua evoluzione, scombina completamente i fattori dell'equazione. Queste enormi comunità viaggianti potrebbero essere ormeggiate attorno a stelle poco ospitali e potrebbero essere riprodotte in un numero che è indipendente dalla formazione stellare o dalla presenza di pianeti.

L'evoluzione stellare riveste anche qui un ruolo importante che influenza l'ultimo parametro dell'equazione di Drake: la longevità della civiltà. Se una civiltà, nata quando la stella sta bruciando l'idrogeno, non è riuscita a evolversi in modo da viaggiare nello spazio e spostarsi su pianeti più esterni, questa verrà distrutta dall'aumento di calore della stella. Successivamente anche il suo pianeta natale verrà bruciato dall'inviluppo stellare a migliaia di gradi nella fase di espansione verso la gigante rossa. Infatti la luminosità di una stella aumenta progressivamente durante il bruciamento dell'idrogeno e la temperatura superficiale dei pianeti aumenta di conseguenza. Nel caso del Sole, una stella gialla con 4,6 Ga, la fase di gigante rossa inizierà circa tra ~7 Ga ma la temperatura della Terra salirà già di 5 gradi tra 1 miliardo di anni. Se già l'effetto serra causato dall'attività umana crea gravi squilibri climatici con un paio di gradi di aumento, la crescita di 5-10 gradi sarà catastrofica, anche se su tempi lunghissimi per la vita umana.

La ricerca di intelligenze extraterrestri

La necessità di lasciare abbastanza tempo a una potenziale forma di vita per raggiungere lo stadio di civiltà della comunicazione e successivamente quella del viaggio spaziale, ci fa scartare stelle con masse troppo grandi che si evolvono in un tempo brevissimo. Tra queste, tutte le stelle che bruciano l'idrogeno in meno di 350 Ma, il tempo richiesto alla Terra per la comparsa delle prime forme di vita. Dalla Tabella 3.1 si vede che sono quelle con massa $>3 M_{\odot}$, tipo O e B. I pianeti intorno a queste giganti azzurre non riuscirebbero nemmeno a formare un mondo a RNA, perché verrebbero bruciati nella fase di gigante rossa. Quelli della fascia esterna, diventati "abitabili", verrebbero comunque distrutti o devastati dalla successiva esplosione di SN o dall'eiezione della nebulosa planetaria. Se poi si vuole cercare vita intelligente, occorre scartare tutte quelle stelle che diventano giganti rosse prima di 4,6 miliardi di anni. Questo riduce la scelta a stelle di massa più piccola, $<1,4 M_{\odot}$, escludendo oltre alle stelle azzurre quelle bianche e quelle gialle fino al tipo F. Sembrerebbe che la frazione di stelle i cui pianeti possano ospitare vita intelligente si abbassi molto, ma queste stelle di piccola massa costituiscono la maggior parte di quelle nate nella Via Lattea, circa il 98,6%²³. Si tratta di almeno 190 miliardi di stelle! Perciò se cerchiamo altre civiltà che siano in grado di comunicare e comprendere i nostri messaggi o di viaggiare nello spazio, dobbiamo limitarci a sistemi planetari attorno a stelle gialle o rosse, di tipo spettrale F, G, K e M, con età di 4,5 miliardi di anni. Stelle gialle o rosse con pochi milioni di anni potrebbero avere pianeti brulicanti di vita microscopica ma assolutamente incapace di trasmettere o ricevere segnali. Il quadro è piuttosto pessimistico se si aggiunge il fatto che i pianeti abitabili attorno a stelle rosse più fredde del Sole devono essere più vicini alla loro stella e perciò subiscono le sue variazioni di attività, come eruzioni solari e raggi X. La possibilità che nasca una civiltà intelligente decresce ulteriormente, anche se può contare ancora in miliardi di possibili stelle e una fascia temporale di ~5 miliardi di anni. Secondo alcuni ricercatori, tuttavia, anche se la probabilità che nasca una forma di vita è alta, lo sviluppo di una civiltà intelligente richiede tempi lunghi e una serie di eventi fortuiti piuttosto rari. In tal caso, noi saremmo l'unica civiltà esistente in questa enorme profusione di stelle della Via Lattea.

L'altro fattore incognito è T_c , la durata della fase di comunicazione. Esso stima la probabilità che una civiltà intelligente senta la necessità di utilizzare le onde elettromagnetiche come facciamo noi per comunicare o veicoli spaziali per viaggiare nella Galassia. Non tutte le civiltà che sono nate sulla Terra nel susseguirsi dei millenni sono riuscite a sviluppare autonomamente conoscenze e metodi appropriati per comunicare a distanza; in molti casi questa conoscenza vi è stata importata da

²³ Calcolato con una funzione iniziale di massa di Salpeter con esponente 2,35 integrata fino a 200 M_{\odot} e 200 miliardi di stelle.

altre culture. Il civilissimo Giappone introdusse la scrittura nell'anno 800, mentre gli antichi egizi usavano due tipi di scritture alcuni millenni prima. L'utilizzo di onde elettromagnetiche ha avuto un forte impulso in questi anni con le televisioni e le comunicazioni telefoniche, ma potrebbe essere solo una fase transitoria per raggiungere forme più veloci e meno soggette all'ambiente esterno (per esempio tramite fibre ottiche). Sicuramente il fattore T_c non può avere un valore maggiore della durata di una civiltà, ma potrebbe anche essere molto esiguo se questa decidesse di utilizzare altre forme di comunicazione. La scoperta di tecniche di comunicazione così potenti da rendere le onde elettromagnetiche un mezzo antiquato farebbe passare inosservato qualsiasi nostro messaggio tramite onde radio. Questo accadrebbe semplicemente perché non esisterebbero più i ricevitori adatti a questo tipo di comunicazione, come sarebbe difficile oggi ascoltare il contenuto di un disco a 78 giri in vinile o una videocassetta VHS. Infine l'equazione di Drake non tiene conto di fattori ambientali o sociologici che potrebbero portare una civiltà a disinteressarsi al contatto esterno (non comunicare o non rispondere) o a dedicarsi a valori culturali che non comprendono alcun desiderio di cambiamento (**ipotesi contemplativa**). Tratteremo di questo nelle prossime Sezioni.

11.2 L'evoluzione delle civiltà

L'equazione di Drake è stata formulata al fine di capire se possono esistere altre civiltà in grado di comunicare con noi, di scambiare informazioni sulle rispettive culture o addirittura aiutare quella meno sviluppata a migliorare il proprio benessere. Purtroppo, oltre ad essere viziata da pregiudizi antropocentrici, essa è un puro calcolo tecnico sulla probabilità che esistano altre civiltà con cui potremmo entrare in contatto. Dobbiamo renderci conto che vi sono altri fattori, non quantizzabili matematicamente, che sarebbero in grado di influire sulla possibilità di scoprire altri esseri intelligenti nella Galassia.

Per esempio, il passaggio da "vivente" a "intelligente" non è una semplice variazione biologica, spiegabile soltanto con la mutazione nel corso dell'evoluzione. Gli esseri umani hanno una parte esterna del cervello, la neocorteccia, che presiede alle percezioni sensoriali, al linguaggio, al ragionamento e al controllo dei movimenti del corpo. Essa è tre volte più grande di quella delle scimmie ed è ripiegata su sé stessa a circonvoluzioni per adattarsi allo spazio della scatola cranica. Questa parte è la più giovane dal punto di vista evolutivo ed è apparsa circa 5 milioni di anni fa, alla separazione della discendenza umana da quella delle scimmie, prima della divergenza dai Neanderthal. Essa sembra legata a una mutazione del gene ARHGAP11B nel cromosoma 15, copiato in maniera incompleta dal gene ARHGAP11A che si trova in tutto il regno animale. Secondo studi

La ricerca di intelligenze extraterrestri

recenti, è proprio questo gene che promuove l'aumento della neocorteccia e produce i ripiegamenti e può essere stato una miccia per l'innescio di attività cerebrali "superiori". Tuttavia un essere intelligente ha comportamenti coscienti, essenziali per definirlo tale, ma non direttamente conseguenti alla sua struttura biologica. Per esempio la possibilità di emettere suoni con un apparato vocale non implica necessariamente lo sviluppo di un linguaggio che permetta di trasferire i concetti da un individuo all'altro. Anche la costruzione di un utensile richiede uno sforzo immaginativo che va al di là della semplice azione di procurarsi il cibo. Un ominino, dotato di braccia e cervello, può usare un ramo per avvicinare del cibo altrimenti irraggiungibile, ma se poi lo butta via e non capisce che esso può diventare uno strumento per alimentarsi non ha fatto nessun passo avanti per migliorare la sua vita. Poiché la nascita dell'intelligenza non è legata direttamente alla Chimica o alla Fisica, che sono uguali per tutta la Galassia, ma al concorso di molti fattori più difficili da definire, essa può verificarsi su un altro pianeta?

Potremmo anche trovarci di fronte allo sviluppo di intelligenze di tipo diverso, con comportamenti simili a quelli studiati nei delfini, nelle balene o in altri animali come le formiche o le api. Questi hanno mostrato di possedere la capacità di comunicare con individui della stessa specie in maniera diversa da quella umana, con suoni o segnali chimici. In un tempo molto lungo e in assenza degli esseri umani, specie molto diverse dagli **ominini**²⁴ avrebbero potuto evolversi con forme di intelligenza completamente diverse. Anche in questo caso il discorso tra civiltà diventerebbe molto complicato: non solo non vi sarebbero significati comuni, ma la stessa logica del linguaggio potrebbe essere troppo diversa. Come spiegare le gambe a una balena extraterrestre intelligente?

Si può pensare che l'ambiente in cui una civiltà nasce influenzi anche l'uso di tecnologie diverse. Sia i Romani sia gli Incas costruivano e utilizzavano grandi vie di comunicazione per migliaia di km, ma la conformazione montuosa delle zone in cui vivevano questi ultimi ha reso probabilmente inutile lo sviluppo di veicoli trainati da ruote, di cui non è rimasta nessuna traccia o notizia tramandata ai conquistatori spagnoli. Tuttavia la ruota era loro nota, poiché è stata trovata in oggetti che facevano parte di corredi funerari. Se questa differenza tra civiltà del passato terrestre può rappresentare un esempio, possiamo immaginarci culture extraterrestri molto progredite che potrebbero non trovare utile l'uso delle onde elettromagnetiche. In un pianeta completamente coperto da oceani o in un altro in cui gli unici ambienti abitabili si trovino nel sottosuolo, esseri intelligenti po-

²⁴Gli **ominini** sono la Tribù tassonomica che include l'*Homo sapiens* e i suoi predecessori e discendenti (*Australopithecus*, *Homo neanderthalensis*, scimpanzé ecc.). Essi appartengono alla Famiglia degli **ominidi**, che include anche i gorilla e gli oranghi.

trebbero sviluppare una comunicazione basata su onde acustiche (sonar) o radio di frequenza diversa dalle nostre telecomunicazioni e non sentire mai la necessità di volgere i propri strumenti verso lo spazio. In tutti questi casi potrebbe esistere una civiltà priva di comunicazione elettromagnetica, ma non necessariamente inferiore culturalmente o tecnicamente.

Un altro fattore non prevedibile è il grado di tecnologia che una civiltà può ritenere soddisfacente per i propri bisogni prima di giungere a quella che potremmo chiamare **stasi tecnologica**. Possiamo trovare alcuni esempi di questo aspetto sulla Terra. L'esistenza di esseri intelligenti si è sviluppata tramite la contemporanea apparizione di specie di ominini geneticamente simili, ma distinti per attività e cultura. Possiamo studiare la loro cultura attraverso gli attrezzi che usavano e le forme con cui trattavano i defunti (tipi di sepoltura). Alcuni di essi hanno lasciato anche graffiti sulle pareti di rocce. Sappiamo perciò che i primi ominini utilizzavano scarsamente utensili per procurarsi il cibo mentre la specie *Homo erectus* aveva imparato a utilizzare il fuoco e attrezzi di pietra che lavorava in maniera abbastanza accurata. Le testimonianze archeologiche dell'*Homo erectus* mostrano tecniche e utensili che appaiono simili per ~1 Ma, rendendolo probabilmente l'ominino di cui si hanno tracce più persistenti nel tempo. Un'altra specie, l'uomo di Neanderthal (*Homo neanderthalensis*) aveva invece una maggiore varietà di attrezzi, ma le sue tracce sono state trovate per un arco di tempo molto più breve, ~250 000 anni. Questi due esempi ci mostrano che una specie di esseri intelligenti può essere molto longeva, ma restare sempre a un livello stazionario delle sue conoscenze, mentre un'altra può sviluppare nuove tecniche, ma scomparire in fretta.

La stasi tecnologica può derivare anche da una scelta culturale. Nell'idea corrente la parola *progresso* ha perso il suo semplice significato di "andare avanti" e si è trasformata in una necessità inarrestabile di miglioramento. La cultura a cui apparteniamo si è spinta in una fase in cui è la tecnologia stessa a creare il bisogno di se stessa, rendendo necessario il cambiamento successivo che stimola la produzione di altra tecnologia. Una città disposta su grandi distanze, con grandi tangenziali e la mancanza di piccoli negozi, rende necessario l'uso dell'auto e stimola la ricerca di nuove soluzioni di trasporto; una comunicazione basata principalmente sui computer per l'accesso ai dati e il commercio rende necessario il possesso di computer da parte degli utenti, finanziandone le ditte produttrici. In sintesi non è come l'antica necessità di viaggiare, che spingeva a inventare mezzi di trasporto migliori partendo da un bisogno più antico, ma è la struttura sociale che porta, in pochi anni, a mutare conoscenze e costumi. Se questo meccanismo da noi imboccato fosse in qualche modo insito nell'evoluzione di una cultura, po-

La ricerca di intelligenze extraterrestri

tremmo aspettarci che qualsiasi civiltà finirà per imparare la comunicazione radio e il modo di viaggiare nello spazio, almeno in una fase transitoria. In realtà la parte di popolazione umana che si trova in questa situazione è esigua rispetto alla maggioranza degli esseri umani attualmente sulla Terra. Scelte politiche internazionali potrebbero farci scegliere di non imporre questi meccanismi di sviluppo accelerato al resto del pianeta, ma utilizzare uno “sviluppo sostenibile” più lento, anche se questo tenderebbe a frenare il cammino della tecnologia delle nazioni meno ricche.

D'altronde, anche nella nostra civiltà esistono comunità umane che vivono in maniera tradizionale e non trovano vantaggioso l'utilizzo di nuove tecnologie. Si può ricorrere a numerosi esempi: da quelli di popolazioni che vivono in zone lontane dal mondo occidentale a quello delle scelte di vita dettate dalla religione come per gli Amish, ma anche a scelte individuali o di piccoli gruppi come lo erano gli Hyppies, una cultura nata negli anni '60 del secolo scorso. Queste comunità o culture aborriscono la guerra e vedono la vita in campagna, opposta a quella frenetica delle città, come un'oasi non tecnologica in mezzo alla natura in cui ritirarsi volontariamente. Se scelte di questo tipo venissero adottate dalla maggioranza della popolazione di un pianeta, potrebbero precludere alla possibilità della loro scoperta. Una civiltà di quel pianeta potrebbe svilupparsi su un piano culturale diverso, anche superiore al nostro, una volta raggiunta una tecnologia sufficiente a condurre in maniera ottimale la propria vita, ma non troverebbe utile sviluppare tecniche e attività per comunicare con altre civiltà. Non possiamo naturalmente affermare quale strada possa imboccare un'ipotetica civiltà extraterrestre, ma la probabilità di scoprirne una e di comunicare con essa dipende anche da questi fattori incogniti.

Se questa stima statistica sembra condurre a una previsione molto pessimistica, ci conforta il fatto che le forme di vita del nostro pianeta, pur evolvendosi in ambienti diversi e geograficamente separati, hanno sviluppato, in alcuni casi, forme di adattamento e strutture anatomiche simili. Questo tipo di processo può essere considerato come un'**evoluzione convergente**, in cui specie diverse tra loro finiscono per raggiungere lo stesso traguardo. Un esempio può essere considerato lo sviluppo della capacità di volare nei mammiferi (pipistrelli), negli uccelli e negli insetti. In queste specie così diverse il volo si ottiene muovendo le ali, formate da strutture anatomiche differenti tra loro: una membrana tra le dita nei pipistrelli, penne e muscoli negli arti anteriori degli uccelli e strutture aggiuntive oltre agli arti negli insetti. Il raggiungimento di queste strutture non dipende da una discendenza genetica, l'averne un comune antenato, ma dall'adattamento ad ambienti simili, prodotto in milioni di anni dalla selezione naturale. Un altro

esempio molto evidente è quello della presenza di occhi in numerosissime specie, strutturati in modo da catturare l'energia del Sole, la maggiore sorgente di energia alla superficie terrestre, il cui picco di intensità si produce proprio nelle onde luminose. In altri termini, organismi che si evolvono in maniera indipendente finiscono per trovare soluzioni simili in base al tipo di ambiente in cui vivono. Se questa regola potesse essere estesa, potremmo immaginare che esseri sviluppati su un pianeta simile alla Terra siano simili a noi non solo nella biochimica (utilizzo del carbonio, degli acidi nucleici, delle proteine ecc.), ma anche nel modo di interagire con il resto del loro pianeta. Lasciando aperta quindi la possibilità di incontrare esseri viventi completamente diversi, possiamo aspettarci che la possibilità di possedere basi simili di comunicazione non sia pari a zero. Questo incoraggia almeno a tentare la ricerca di un contatto.

11.3 Comunicazione con civiltà extraterrestri

Qualora avessimo un contatto radio con un'altra civiltà è pensabile che esso derivi da esseri viventi con la necessità di usare onde di bassa frequenza per comunicare tra un punto e l'altro del pianeta o con i propri satelliti. Potrebbero inizialmente tentare, con un basso dispendio di energia, di orientare i loro radiotelescopi verso altre stelle e di ascoltare alla ricerca di segnali inviati da altre civiltà oppure prendere l'iniziativa di trasmettere. L'insieme di molti radiotelescopi collegati insieme, anche in punti distanti della Terra, i **radiointerferometri**, ha raggiunto in teoria una sensibilità tale da percepire i segnali dei radar aeroportuali o delle trasmissioni TV e satellitari dalle stelle a noi più vicine.

La trasmissione e la ricezione di segnali radio è, tra diverse scelte possibili, quella che sembra oggi la più economica. Non richiede grandi consumi energetici come il viaggio spaziale e potrebbe essere condotta da macchine programmate per trasmettere senza posa, comunicando il risultato solo in caso di esito positivo. Questa è la strada intrapresa, da diversi anni, dai programmi che prendono la denominazione di SETI (*Search for Extra-Terrestrial Intelligence* = ricerca di intelligenze extraterrestri). In queste ricerche alcuni radiotelescopi scandagliano lo spazio cercando di ricevere segnali identificati inequivocabilmente come provenienti da esseri intelligenti. L'idea di ricevere segnali di civiltà extraterrestri fu lanciata nel 1959 dai fisici Cocconi e Morrison, che calcolarono il livello del segnale radio che ci si poteva aspettare in una trasmissione proveniente da stelle vicine, trovandolo abbastanza potente da essere ricevuto con i radiotelescopi di allora. L'attuazione di questa idea fu intrapresa nel 1960 da Frank Drake con il progetto Ozma, a cui abbiamo già accennato nella Sezione 1.6. Dal 1960 il progetto SETI è stato affrontato anche da radiotelescopi di varie nazioni con quasi cento

La ricerca di intelligenze extraterrestri

programmi diversi per nomi, tecniche, frequenze radio e strumenti. Molto spesso il progetto SETI è stato confuso, da stampa o uomini di governo, con la ricerca di fenomeni non identificati noti come UFO, che citeremo alla fine del capitolo. Questa confusione ha spesso nuociuto al SETI generando per esempio negli Stati Uniti diverse riduzioni di fondi e una sospensione completa dei finanziamenti nel 1992. Una volta sospeso il SETI gestito con fondi pubblici, dal 1995 è ripartito grazie a fondi privati ed è ripreso anche con fondi pubblici negli ultimi anni. La tecnologia del SETI richiede idee, modelli matematici, software e hardware per rivelare un segnale debolissimo da un fondo di rumore di origine naturale. Così come molte tecnologie usate nelle missioni spaziali sono state poi impiegate utilmente nella vita comune²⁵, tecniche e strumenti sviluppate per il SETI, in grado di amplificare i segnali radio o di fare un numero enorme di calcoli in brevissimo tempo, sarebbero utilissimi per tutta la popolazione (solo come esempio, il controllo del traffico aereo o automobilistico, le operazioni chirurgiche controllate da robot, la capacità di usare i telefoni anche in zone isolate con basso segnale, le previsioni del tempo, e molte altre). Dal 1995 fino al 2004 il progetto Phoenix ha osservato centinaia di stelle nelle frequenze delle microonde tra 1,2 a 3 GHz. I radiotelescopi usati erano quelli di Parkes (64 m, Australia), Green Bank (43 m, USA), Arecibo (300 m, Portorico).

Oggi esistono vari istituti di ricerca SETI nel mondo e tanti progetti, ma è difficile elencarli tutti qui. Ricordiamo negli USA il SETI Institute e il Berkeley SETI Research Center, che negli anni dal 2007 al 2015 hanno lavorato, tra l'altro, con un radiointerferometro in California, l'Allen Telescope Array. L'interferometro Allen ha osservato il cielo ogni giorno per 13 ore, trovando centinaia di milioni di segnali non naturali. Purtroppo essi erano interferenze terrestri da satelliti artificiali o trasmissioni radio, o troppo brevi per essere considerati "un messaggio", scomparendo entro un'ora. Anche in Italia ci sono stati progetti SETI, svolti presso la Stazione Radioastronomica di Medicina (Bologna). Dal 2016 si è aggiunto il progetto Breakthrough Listen, che "ascolterà" circa 1 milione di stelle, usando una parte del tempo di osservazione dei radiotelescopi già citati di Parkes e Green Bank e del FAST (500 m, Cina). Oltre ad essi, il progetto userà l'Automated Planet Finder (Osservatorio Lick, USA) alla ricerca di segnali ottici. Anche se spesso si intercettano segnali radio da stelle vicine, non ci sono ancora conferme sulla loro origine naturale oppure artificiale, per esempio "rumori" di radar, trasmissioni TV o telefoniche su un pianeta alieno,

In generale tutte le ricerche SETI possono seguire tre strade: quella di puntare

²⁵ Le missioni Apollo sulla Luna hanno generato ~150 000 brevetti, dal Goretex al teflon al velcro, il memory foam, e altri.

una serie di sorgenti ben selezionate (**targeted search**), di puntare a caso nello spazio (**serendipity mode**), oppure di esplorare in maniera uniforme tutto il cielo (**survey**). Nel primo caso le sorgenti da ascoltare sono quelle dov'è maggiormente alta la probabilità di scoprire un segnale radio artificiale. Questo tipo di ricerca riduce il numero di sorgenti da osservare, che possono essere per esempio: zone circostanti stelle simili al Sole, zone che comprendono ammassi con migliaia di stelle vicine ecc. In questo modo si cerca di avere una probabilità maggiore di scoprire un'altra civiltà in un tempo più breve. Nel secondo caso, il *serendipity mode*, si sfrutta la posizione del radiotelescopio durante le ricerche astrofisiche in corso per studiare la stessa zona di cielo a frequenze diverse. In questa modalità, mentre il ricevitore del radiotelescopio sta studiando una nube di gas molecolare, il ricevitore del progetto SETI, messo in parallelo, esamina la stessa zona di cielo senza interferire con le altre ricerche. Questo metodo è più economico rispetto a quello di riservare un intero radiotelescopio alle ricerche SETI. Il suo nome deriva dalla leggenda persiana dei tre figli di re Serendippo che, trovandosi casualmente in una particolare situazione, erano in grado di dedurre moltissime informazioni per la loro capacità di osservazione. Il termine "**serendipità**" è associato alla facoltà di trovare cose preziose o piacevoli che non si stanno esplicitamente cercando. Il terzo metodo, la *survey* di tutto il cielo, è il più impegnativo in termini di tempo e di costi, perché richiede una costante ricerca con strumenti dedicati esclusivamente al SETI. Come abbiamo detto, esistono ricerche SETI basate su lunghezze d'onda diverse da quelle radio, come le bande ottiche.

Nel 1974 anziché ascoltare, si è provato a trasmettere dal grande radiotelescopio di Arecibo un messaggio radio verso eventuali civiltà extraterrestri. Come obiettivo è stato scelto un **ammasso globulare**, un insieme di circa 600 000 stelle vecchie di almeno 14 Ga, tra i tanti che orbitano nell'alone della Via Lattea, denominato M13 e a 25 000 anni luce di distanza. Di questo tentativo di comunicazione parleremo nella prossima Sezione.

11.4 Come comprendersi?

Che tipo di segnali ci si aspetta di ricevere o di inviare? Questa domanda apre la strada a un'enorme serie di possibilità e di discussioni. Per esempio, saranno i nostri interlocutori in grado di capire un messaggio mandato dalla Terra, se persino su un pianeta piccolo come il nostro esiste una grande quantità di lingue, dialetti e logiche tutti diversi tra loro? Bisogna pensare che spesso la gente uccide o scatena le guerre per tre moventi: differenze di religione, possesso di denaro, differenze di idee su leggi sociali o morali. Ebbene, sulla Terra ogni nazione o gruppo sociale ha la sua religione, la sua valuta e le sue leggi, e non c'è nulla di meno planetario

La ricerca di intelligenze extraterrestri

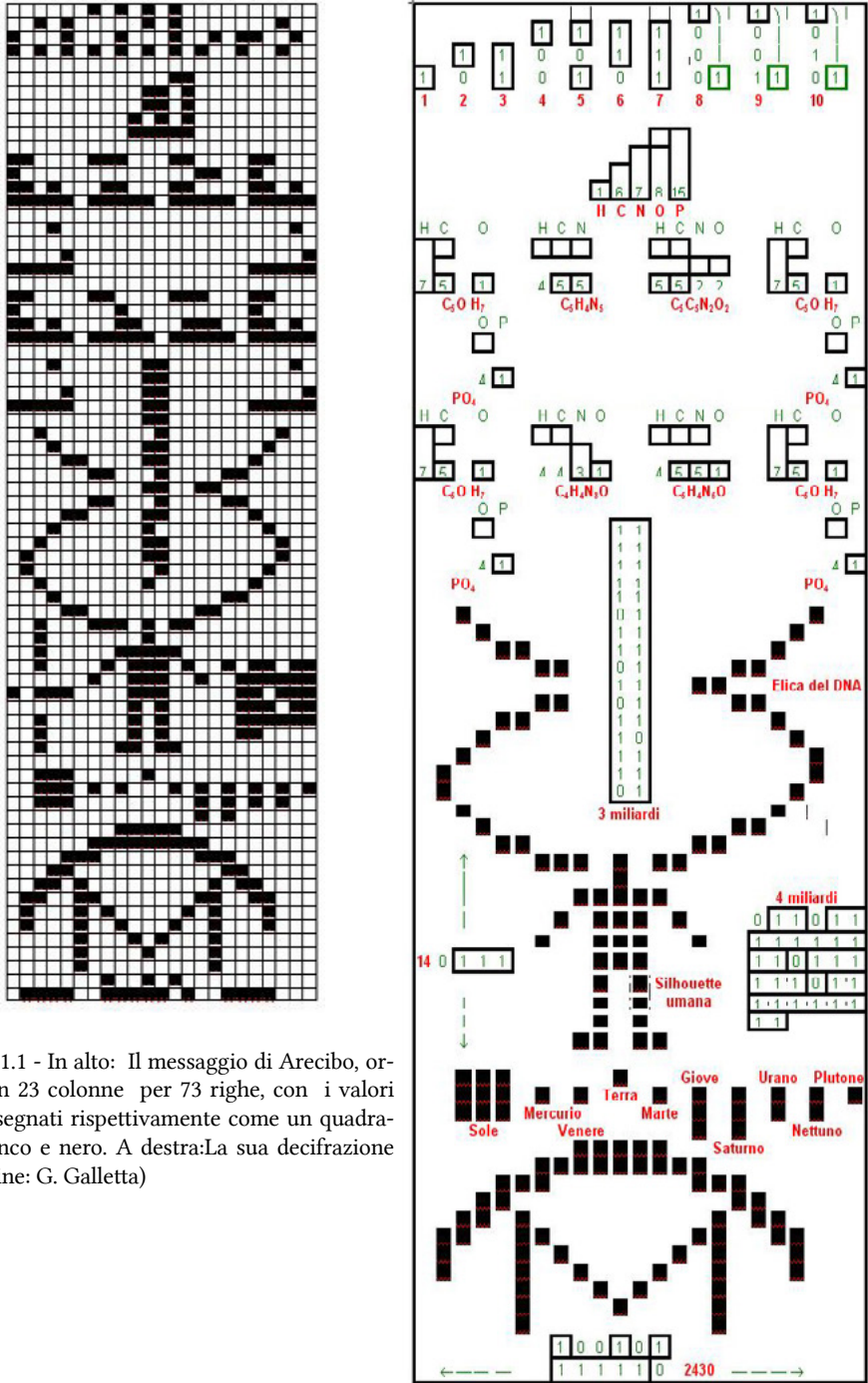


Figura 11.1 - In alto: Il messaggio di Arecibo, ordinato in 23 colonne per 73 righe, con i valori 0 e 1 disegnati rispettivamente come un quadratino bianco e nero. A destra:La sua decifrazione (Immagine: G. Galletta)

o universale di queste cose considerate importantissime da tutti. Un messaggio che parta da queste cose sarebbe un vero fallimento in termini di comunicazione con una civiltà aliena!

Secondo alcuni studiosi si potrebbe utilizzare il codice binario, che è in qualche modo “universale”. Il codice binario trasmette un numero tramite una sequenza di 0 e 1, detti singolarmente **bit**. Immaginando il segnale come un bip sonoro, la trasmissione dovrebbe comprendere una sequenza del tipo “bip-pausa-bip-bip-pausa-bip-pausa-pausa-bip-bip-bip” ecc. che in linguaggio binario sarebbe “1-0-1-1-0-1-0-0-1-1-1”. Come è possibile trasmettere un segnale comprensibile in questo modo?

Per fare un esempio, analizziamo il messaggio inviato dal radiotelescopio di Arecibo. Il messaggio è all’inizio una semplice sequenza binaria di 1679 bit, inviata alla lunghezza d’onda di 16,4 cm. Uno studioso di un altro pianeta riceve questo segnale e capisce che non è un segnale naturale e nemmeno un rumore dovuto all’elettronica del suo radiotelescopio. A questo punto può comprendere che il numero di bit è il prodotto di due numeri primi, cioè due numeri non divisibili per altri numeri tranne che per sé stessi o per 1, ovvero $23 \times 73 = 1679$. Se dispone il segnale in una tabella di 23 colonne per 73 righe, composte di 0 e 1 (una matrice di numeri), e fa corrispondere ogni 0 con una casella bianca e ogni 1 con una casella nera, appare il segnale come nella parte sinistra della Figura 11.1. Abbiamo disposto ogni riga iniziando da sinistra verso destra come nella scrittura occidentale, ma è possibile ordinarla da destra a sinistra come nella scrittura araba o nel sanscrito. Una lettura dall’alto verso il basso come tradizionalmente viene fatto nella scrittura giapponese, coreana e cinese invece non produce la stessa interpretazione.

Il messaggio è composto da gruppi di righe con caselle verticali che sono la chiave per tradurre il gruppo successivo. Si inizia con quattro righe in cui il bit più in basso indica la presenza di un numero (se uguale a 1) o la sua assenza (0). Queste righe rappresentano i primi dieci numeri interi, scritti in codice binario (vedi la Figura 11.1, *a destra*). Per i numeri maggiori di 7 è necessario spostare il bit a destra in cima alla prima riga. Successivamente seguono i numeri atomici degli atomi principali della vita (idrogeno, carbonio, azoto, ossigeno, fosforo), a cui però manca lo zolfo. La lunghezza di questi bit – e non il numero corrispondente – fa da chiave di lettura alle righe successive, dove vi sono le formule delle molecole del DNA (desossiribosio, fosfato, adenina, timina, citosina e guanina). Le righe successive sono disegni anziché numeri e rappresentano la doppia elica del DNA e una figura umana, con l’altezza media umana (176,4 cm) e il numero della popolazione, allora di soli 4 miliardi, espressi in multipli della lunghezza d’onda

La ricerca di intelligenze extraterrestri

a cui è stato trasmesso il segnale. Le quattro righe successive sono nuovamente disegni che mostrano i pianeti principali (ma viene incluso Plutone) con la Terra (terzo pianeta) spostata più in alto. Infine c'è lo schema della parabola del radiotelescopio con due linee come "raggi di luce" messi a fuoco al centro della riga e un numero che rappresenta il diametro del radiotelescopio.

Non vogliamo descrivere molto in dettaglio il messaggio perché ci interessa principalmente capire la logica insita in esso e vederne i limiti. Il concetto base è quello di far imparare il nostro linguaggio al nostro interlocutore. Per questa ragione si inizia con numeri in codice binario supponendo che esso sia veramente un linguaggio universale o il massimo della semplicità. La seconda parte contiene ancora riferimenti comuni: il numero atomico delle sostanze importanti per la vita. Questo punto si basa sul fatto che chi riceve il messaggio possa avere una biologia basata sulle stesse molecole. Quindi si passa ai disegni che però contengono numerosissimi preconcetti "umani": la proiezione della doppia elica del DNA in una linea punteggiata e lo schizzo di una figura umana, come se fosse eseguito da un bambino. Non è per nulla scontato che altri esseri viventi abbiano lo stesso concetto di disegno espresso da questi punti messi insieme. Altrettanta interpretazione umana esiste nel disegnare i pianeti e il Sole come rettangoli. Poiché Plutone non è un pianeta, e non è più grande di altri satelliti, un osservatore esterno che guardi al Sistema Solare non lo riconoscerebbe in questo disegno, per la presenza di questo corpo in più e l'assenza di altri più grandi come i satelliti principali di Giove e Saturno. Tutto ciò su cui si può contare nell'interpretazione di un messaggio di questo tipo è che l'eventuale cultura aliena sia più avanzata di noi nell'interpretare concetti non appartenenti alla propria logica o sia estremamente simile a noi, a causa di un'evoluzione convergente. Il messaggio di Arecibo è solo un esempio di segnali trasmessi per comunicare la nostra presenza nello spazio.

Altri esempi sono le targhe poste su veicoli spaziali lanciati verso l'esterno del Sistema Solare: le sonde Pioneer 10 e 11 e le Voyager 1 e 2. Nel primo caso, una targa incisa posta sul bordo esterno di ogni sonda rappresenta il veicolo stesso e, nella stessa scala, un uomo e una donna nudi che accennano a un gesto di saluto. In questo caso il concetto di schizzo artistico e di prospettiva sono fondamentali. In un'interpretazione non umana i profili della nostra anatomia potrebbero essere interpretati come strutture filamentose, vuote all'interno. Nella stessa targa sono inseriti come punti e linee i segnali emessi dalle pulsar più vicine al Sole, allo scopo di identificare il luogo di provenienza e la traiettoria della sonda attraverso i pianeti del Sistema Solare allineati. Se l'identificazione delle pulsar, considerate qui come *fari cosmici*, può essere nota anche a culture aliene, di nuovo l'interpre-

tazione dei cerchietti come pianeti del Sistema Solare può essere soggettiva. Tra l'altro, essendo stata inviata precedentemente alla scoperta degli anelli dei pianeti giganti mostra questa caratteristica stilizzata solo per Saturno.

Una filosofia diversa appare invece nel disco inciso con suoni e musiche affidato ai Voyager. Si tratta di un disco di rame placcato in oro, racchiuso in una scatola di alluminio. Sul contenitore sono incise le modalità per tradurre i solchi del disco in suoni e immagini. Sono incise sul disco in maniera analogica e sono leggibili facendolo girare a mille giri al minuto. Tra le immagini esistono visioni della Terra e degli esseri viventi, mentre tra i suoni vi sono messaggi di benvenuto in ben 55 lingue diverse, 35 suoni naturali e artificiali e 27 musiche. Inviato negli anni '70 questo disco rappresenta la tecnologia dell'epoca dei dischi microsolco in vinile ed è già incomprensibile per numerosi ragazzi terrestri che conoscono incisioni digitali e non analogiche, lettori laser, memorie a stato solido USB e SD, e non testine magnetiche con puntina, anche se negli ultimi anni i dischi in vinile sono tornati di moda per amatori della musica con vecchia tecnologia. Come la targa dei Pioneer e simili scritte su altri veicoli spaziali, queste tracce della nostra cultura sono veri e propri messaggi nella bottiglia lanciati nell'oceano con la speranza che in futuro siano letti da qualcuno.

L'emissione e l'ascolto di messaggi radio sono le iniziative che hanno la maggiore probabilità di stabilire un contatto preliminare tra due punti della Galassia in cui esistano esseri intelligenti. I veicoli spaziali hanno tempi eccezionalmente lunghi prima di poter raggiungere persino le stelle più vicine. Tuttavia i messaggi richiedono una certa dose di "umanità" per essere compresi. Seguendo la logica di farsi scoprire più facilmente, vengono trasmessi alla lunghezza d'onda di 21 cm o suoi sottomultipli. Poiché la riga a 21 cm è la più intensa proveniente dal gas freddo nella Galassia, è probabile che anche astronomi alieni la osservino. Per la stessa logica dei numeri primi, essi potrebbero cercare segnali intelligenti a lunghezze d'onda che sono rapporti interi di numeri primi (per esempio la lunghezza del messaggio di Arecibo è $3/5$ di 21 cm). Trasmettere direttamente a 21 cm può permettere una scoperta più facile, ma viceversa può far soffocare il segnale artificiale da quello naturale emesso dal gas interstellare. Per numerosi anni la logica scientifica, la letteratura di fantascienza come anche il cinema hanno studiato numerosi modi per avvicinarsi a un messaggio universale in grado di essere compreso anche da culture lontanissime. Con l'analisi critica che abbiamo seguito in questo testo possiamo pensare che forse non esiste un modo veramente universale di comunicare, ma che questi segnali radio o fisici rappresentino solo un modo per tramandare la presenza degli esseri umani sul pianeta e affermare la nostra identità. Carl Sagan riteneva che le due prospettive di essere soli o di non

La ricerca di intelligenze extraterrestri

esserlo fossero altrettanto terrificanti e possiamo chiederci se tutti i tentativi di comunicare con culture aliene non siano una traduzione culturale della paura di essere soli, innata nella specie umana e trasportata a livello galattico.

11.5 Perché viaggiare nello spazio?

La capacità di viaggiare nello spazio implica necessariamente per una civiltà la sua espansione nel cosmo? Abbiamo già trattato nella Sezione 11.2 della stasi tecnologica. Per capire il senso di questa domanda ripercorriamo brevemente la storia delle migrazioni umane sulla Terra, che ha permesso all'umanità di espandersi su tutte le terre emerse del pianeta. Pur essendosi sviluppati in una regione limitata, gli esseri umani si sono diffusi seguendo una tendenza "naturale" a spostarsi dalla zona di origine. Probabilmente i nostri precursori (genere *Homo*) sono apparsi tra 1 e 2 milioni di anni fa in Africa o simultaneamente in diversi luoghi della Terra. Da quell'epoca, seguendo la selvaggina, gruppi di esseri umani hanno attraversato lo Stretto di Bering che per lunghi periodi geologici costituiva un ponte emerso tra l'Asia e le Americhe, a piedi o su barche navigando lungo la costa dell'Alaska. Alcuni ominini hanno raggiunto la Groenlandia. Altri si sono spinti a sud, fino alla Terra del Fuoco. La somiglianza antropologica e culturale, per esempio religioni sciamaniche, tra i siberiani e i popoli originari delle Americhe sostiene questa idea della migrazione. Se questa tendenza allo spostamento fosse innata sia negli esseri dotati di intelligenza e struttura sociale sia negli animali, una volta raggiunta la capacità di viaggiare nello spazio potremo attenderci che anche altre intelligenze extraterrestri sentano la necessità di viaggiare verso altri sistemi planetari. Con questa ipotesi, una volta raggiunta una certa capacità tecnologica e risolti i problemi di propulsione, di energia, sopravvivenza e trasporto di cibo discussi nel Capitolo 10, possiamo stimare che in poco tempo, rispetto all'età della Galassia, tutte le sue stelle dovrebbero pullulare di astronavi.

Vediamo quale logica ci porti a questa conclusione: supponiamo che un giorno un ricercatore terrestre scopra una propulsione velocissima e di avere così tanta energia da arrivare a Proxima Centauri come per un viaggio in auto da una città a un'altra. Non preoccupiamoci delle difficoltà evidenti di questa ipotesi, ma analizziamone semplicemente le conseguenze, tenendo conto delle limitazioni imposte dalle leggi fisiche. Viaggiando a una velocità pari a un decimo di quella della luce, un'astronave terrestre impiegherebbe ~42 anni per giungere a Proxima Centauri. Ma dovrebbe viaggiare ~200 anni alla stessa velocità per raggiungere una delle 126 stelle più vicine ed eventualmente colonizzarne i pianeti. Facciamo l'ipotesi che 100 anni dopo l'arrivo, cioè 300 anni dopo il primo viaggio, vengano stabiliti nuovi insediamenti in 2 pianeti e che questi insediamenti siano in grado

di costruire nuove astronavi e di muoversi verso nuovi pianeti con altri 200 anni di viaggio. Se ogni insediamento raggiunge 2 nuovi pianeti e li colonizza, mantenendo questo ritmo ogni 300 anni il numero di insediamenti dei viaggiatori terrestri raddoppia e tutte le stelle della nostra Galassia saranno state visitate ed eventualmente colonizzate in poco tempo. In realtà la maggior parte delle stelle potrebbe non avere pianeti colonizzabili e ogni nuovo insediamento potrebbe richiedere più di 300 anni. Calcolando l'espansione umana in maniera più raffinata si arriva a tempi molto più lunghi, ma sostanzialmente piccoli rispetto all'età della Galassia: una generazione in grado di viaggiare nello spazio a un decimo della velocità della luce potrebbe impiegare meno di 100 milioni di anni per insediarsi ovunque. Quanto detto per i terrestri vale anche per qualunque altra civiltà in grado di viaggiare facilmente nello spazio. Se uno solo dei pianeti attorno a una stella della nostra Galassia avesse sviluppato una tale civiltà, nei 14 miliardi di anni di vita della Via Lattea la Terra sarebbe stata visitata milioni di volte e oggi sarebbe colonizzata. Questo semplice calcolo contrasta con quanto osserviamo attualmente: gli inglesi colonizzatori dell'Australia possiedono voli regolari con la madrepatria mentre noi non abbiamo spazio-porti con voli regolari verso le stelle più vicine.

11.6 Il paradosso SETI

Nonostante il cielo venga "ascoltato" nelle onde radio da più di 60 anni, a parte alcuni falsi allarmi, finora non è stato ricevuto nessun segnale interpretabile come un messaggio alieno. Basandosi sul fatto che la disponibilità di molecole utili per la nascita della vita è enorme in tutta la Galassia, questo sembra essere un paradosso, che era noto come il **paradosso di Fermi**: se ci sono tante forme di vita e civiltà extraterrestri, perché non si sente nessuno? Analogamente, abbiamo notato prima che se fosse nata una civiltà in grado di scoprire il modo di viaggiare velocemente nello spazio, essa avrebbe già colonizzato la Galassia in un tempo breve relativamente all'età delle stelle e noi avremmo avuto contatti continui con i suoi individui. Anche questo sembra un paradosso.

Tuttavia, come abbiamo spiegato in questo capitolo, anche se la probabilità che nasca una forma di vita su un pianeta è alta, lo sviluppo di una vita intelligente e di una civiltà tecnologicamente avanzata richiede miliardi di anni e la sua probabilità è molto bassa. Esistono diverse spiegazioni all'assenza di contatti ufficiali e di colonie extraterrestri sul nostro pianeta. Non possiamo elencarle tutte ma riassumiamo le più semplici, in parte già discusse in questo capitolo:

- non esiste *ancora* nessuna civiltà in grado di viaggiare nella Via Lattea. A sostegno di questa ipotesi potrebbe esserci il fatto che la composizione chimica della Galassia cresce col tempo in maniera abbastanza omogenea da mettere

La ricerca di intelligenze extraterrestri

tutti i pianeti esistenti in zone abitabili allo stesso livello.

- Il costo energetico dei viaggi nello spazio è altissimo per tutti e la crescita tecnologica finisce per giungere a livelli che non possono più aumentare oltre un certo limite (stasi tecnologica o crisi energetica).
- Esistono motivazioni sociologiche o filosofiche per cui si può non essere interessati a viaggiare nello spazio o a entrare in contatto con altre civiltà (ipotesi contemplativa o stasi tecnologica da motivi culturali).
- Civiltà più avanzate di noi sono presenti ma non vogliono farsi scoprire (ipotesi UFO).

Il primo punto, evoluzione parallela delle civiltà galattiche, è abbastanza chiaro e non necessita di molti commenti. Non si sono potuti formare pianeti con crosta solida finché non è stato prodotto abbastanza silicio nel mezzo interstellare. Tutti i pianeti rocciosi potrebbero avere pochi miliardi di anni e poiché sulla Terra ce ne sono voluti 4,5 per giungere a esseri intelligenti e tecnologicamente avanzati, questo significa che la differenza di età tra diverse civiltà potrebbe non essere molto grande. Forse esistono migliaia di civiltà extraterrestri ancora alle prese con gli stessi problemi di propulsione e sicurezza spaziale che ci impediscono attualmente viaggi umani in tempi ragionevoli. Contro questo argomento si può obiettare che basta un migliaio di anni di differenza per permettere a una civiltà di compiere il balzo nello spazio. È sufficiente che lo faccia una sola civiltà per colonizzare tutto il resto della Via Lattea in tempi non troppo lunghi (milioni di anni). In questo caso sarebbe solo questione di tempo.

Il secondo punto, stasi tecnologica per carenza di energia, è equivalente alla crisi di risorse prevista da Malthus e descritta nella Sezione 2.5. Questo limite allo sviluppo fu studiato negli anni '60 dal radioastronomo Kardashev. Partendo dall'osservazione che il consumo di energia umana aumenta di qualche unità percentuale ogni anno, dedusse che con questo ritmo nel giro di ~3000 anni avremo bisogno di una quantità di energia pari a quella irraggiata in un secondo dal Sole (4×10^{26} Watt), mentre dopo 6000 anni addirittura pari a quella emessa dalle stelle dell'intera Galassia (8×10^{37} Watt). Siamo ancora lontani da questi livelli. Nel 2018 sulla Terra si sono consumati²⁶ $1,7 \times 10^5$ GWh, ~4 milionesimi rispetto all'energia ricevuta in un'ora dal Sole su tutta la superficie terrestre fuori dall'atmosfera, che è $6,26 \times 10^{11}$ GWh. Kardashev dedusse che la produzione e il consumo di energia da parte di una civiltà non può aumentare all'infinito e che il ritmo di espansione attuale è solo in una fase transitoria, già limitata da crisi petrolifere o energetiche in generale, ma è destinato in futuro a decrescere. Con questa argomentazione, anche la nostra civiltà dovrà arrivare a una stasi tecnologica. Tutta-

²⁶ fonte: World Energy Balances online data service IEA (Agenzia Internazionale per l'Energia).

via egli ammise anche che non si poteva escludere l'esistenza di civiltà in grado di produrre maggiori quantità di energia e di utilizzarne una parte per trasmettere o viaggiare nello spazio. Se è inevitabile che, una volta giunta a un certo livello di produzione una civiltà pervenga alla stasi tecnologica prima di avere abbastanza energia perché viaggiare nello spazio diventi una routine, avremmo la risposta all'assenza di colonie extraterrestri sulla Terra.

La terza ipotesi ci porta a discutere le differenze tra un'ipotetica espansione nello spazio e la necessaria espansione degli esseri umani sulla Terra. Come abbiamo descritto in precedenza, le prime migrazioni umane sono probabilmente iniziate con piccoli gruppi di cacciatori e raccoglitori di piante che decidevano autonomamente di spostarsi. È probabile che esse non fossero massicce e programmate, ma la sovrapposizione di moltissimi piccoli spostamenti progressivi di sparuti numeri di individui. Sulla Terra la migrazione primitiva si è probabilmente fermata o rallentata alla comparsa delle prime forme di agricoltura, con popolazioni che da nomadi diventavano stanziali. Diversamente dalla possibile diffusione umana nello spazio, questi spostamenti non prevedevano l'utilizzo di grandi risorse dell'epoca e permettevano un continuo contatto con le comunità lasciate in precedenza.

La migrazione nello spazio assomiglia invece a quella avvenuta nel Pacifico, dove circa 8000 anni fa popoli coltivatori di riso o pescatori hanno imparato a navigare in acque profonde, diffondendosi verso la Polinesia. Il motore di questa espansione era spesso la scarsità di risorse, una volta cresciuta la popolazione su un'isola, o l'organizzazione sociale che lasciava tutti i beni al primogenito costringendo gli altri figli a trasferirsi con l'intera famiglia e gli animali per sopravvivere. L'esempio estremo di questo spostamento è espresso dalla popolazione di Rapa-Nui (isola di Pasqua), estremo avamposto dell'espansione polinesiana. Rapa-Nui è un'isola bassa, con montagne non più alte di 500 m, difficile da vedere a distanza e perciò spesso ignorata nel passato da navigatori che la sfiorarono senza scoprirla. La costa del Cile si trova a 3780 km di distanza, mentre le altre isole più vicine, Tahiti verso ovest e le isole Marchesi a nord, sono a più di 4000 km. L'isola più vicina, Pitcairn, è un pezzo di roccia di 47 km² con pochissima acqua e scarsissime altre risorse naturali. I colonizzatori di Rapa-Nui e delle altre isole dovevano aver intrapreso la navigazione portando con sé acqua, animali e cibo per un viaggio lunghissimo. Una volta arrivati non poterono probabilmente tornare più indietro e la loro società si è espansa localmente arrivando ad assorbire tutte le risorse disponibili, raggiungendo una vera e propria crisi di risorse che ne ha fortemente ridotto la popolazione prima ancora dell'arrivo degli Europei.

Rapa-Nui è un caso emblematico di un mondo solitario che può essere raggiunto

La ricerca di intelligenze extraterrestri

solo con spedizioni dotate di un certo bagaglio tecnico: come per la migrazione nello spazio occorrono grandi veicoli, scorte di cibo e un viaggio molto lungo, che permette una permanenza indefinita nel tempo. Per i suoi primi abitanti, i contatti con la zona di origine diventarono impossibili e l'insediamento dovette diventare presto autosufficiente. Quali sono le motivazioni che potrebbero costringere esseri intelligenti ad allontanarsi dal loro pianeta affrontando enormi spese in termini di tempo ed energie? Solo situazioni di crisi planetaria oppure il raggiungimento di un livello tecnologico che scavalchi le leggi fisiche come le conosciamo oggi. Non esiste attualmente nessun argomento per pensare che si possa superare la barriera della velocità della luce. Se questo non è possibile, i viaggi diventano lunghi e incerti come quelli per raggiungere Rapa-Nui.

In ogni caso, per sviluppare tecnologie sempre più raffinate ed efficienti, negli esseri intelligenti occorre una motivazione che ne giustifichi gli sforzi. Questo è indipendente dalle capacità potenziali di una civiltà. Solo scoprendo prima l'esistenza di un pianeta abitabile, con i mezzi e le tecniche descritte nella Sezione 9.2, si può trovare almeno una motivazione per progettare un viaggio secolare nello spazio, sempre sperando che il pianeta abitabile non sia già occupato da altri individui che non apprezzano gli stranieri. La storia della Terra ci insegna molto e, come discuteremo nella Sezione 11.6, l'incontro tra civiltà diverse non è sempre auspicabile. Resta quindi sempre aperta la possibilità che una volta raggiunta la stabilità e uno sviluppo sostenibile sul proprio pianeta, ottenuto un alto grado di benessere ed evitata la sua sovrappopolazione, una civiltà possa decidere di non investire grandi risorse in viaggi spaziali che non porterebbero a contatti frequenti o benefici economici. La motivazione sarebbe in questo caso sociologica e porterebbe a una "estinzione del desiderio" di produzione di energia. Abbiamo già discusso di questo nella Sezione 11.2, e delle motivazioni filosofiche o religiose che possono portare al rifiuto della tecnologia, col risultato di una stasi tecnologica. Non possiamo naturalmente affermare che questo argomento sia universale, non essendo valido per i singoli individui nemmeno sulla Terra, ma può fornire una spiegazione alternativa all'assenza di contatti extraterrestri evidenti.

La quarta ipotesi è quella che considera la possibilità che qualche civiltà esterna abbia realmente visitato la Terra in passato o stia in qualche modo viaggiando nel Sistema Solare senza entrare in contatto con la nostra. Questa ipotesi è sostenuta dagli appassionati delle teorie degli UFO visti come astronavi aliene ed è trattata nella fantascienza da romanzi e da serie come Star Trek ove appare come la Prima Direttiva. Essa vieta assolutamente di interferire nello sviluppo naturale di una civiltà di un altro pianeta finché essa non abbia sviluppato la tecnologia dei viaggi a velocità maggiori di quella della luce.

Affrontando questo problema con lo stesso metodo scientifico usato finora nel resto del volume, basandosi cioè su dati misurabili e ripetibili con misure più raffinate, sappiamo che esistono obiettive difficoltà a viaggiare nello spazio in termini di energie e di tempi. Come spiegato nella Sezione 10.1, per quanto avanzata sia una civiltà e longevi i suoi abitanti, il bilancio energetico di un viaggio a velocità vicine a quelle della luce tende a diventare infinito, e i tempi di percorrenza della Galassia sarebbero comunque enormi, migliaia di anni terrestri. Tutto questo è legato alle leggi fisiche e non alla tecnologia raggiungibile. Bisognerebbe pensare a viaggi di diverse decine o centinaia di anni, piuttosto che a missioni simili a quelle delle serie televisive: da una stella all'altra in pochi giorni. Anche superando le difficoltà energetiche, occorrono motivazioni specifiche perché una civiltà utilizzi grandi quantità di energia per viaggiare, anziché destinarle ad altri scopi utili, ma locali. Abbiamo affrontato questi aspetti in questa stessa Sezione.

I fenomeni **UFO**, acronimo inglese di Oggetti Volanti non Identificati, nel senso stretto del termine indicano luci o immagini osservate nel cielo che non è possibile attribuire a nessun oggetto della vita comune oppure a fenomeni o manufatti terrestri. Alcuni fenomeni UFO in vallate dei paesi del Nord sono stati identificati come sfere di plasma di origine forse piezoelettrica, dovute alla compressione delle rocce terrestri dovuta al congelamento delle acque sotterranee. Altri fenomeni UFO che come segni di astronavi extraterrestri. In genere, persone in buona fede e di discreta cultura raccontano di aver visto qualcosa che non riescono a descrivere in maniera esatta e interpretavano come non-umano. Alla fine i fatti accaduti sono impossibili da ricostruire perché i testimoni non sanno fornire ulteriori dettagli. Se in un tribunale una o più testimonianze sono ritenute sufficienti per stabilire la verità ed eventualmente condannare o assolvere qualcuno, nella ricerca scientifica la mancanza di ripetibilità o di verifica a posteriori rende impossibile qualsiasi giudizio. Dal 1940 numerose commissioni dell'aeronautica hanno studiato decine di migliaia di avvistamenti di UFO in progetti chiamati *Sign*, *Grudge*, *Blue Book*, allo scopo di capire se gli UFO erano alieni e pericolosi per gli USA. Anche commissioni non militari, la Commissione Robertson, il Comitato Jones, il Rapporto Condon hanno studiato gli avvistamenti. In tutti i casi le conclusioni erano che questi fenomeni non rappresentavano un pericolo per la sicurezza nazionale e che nessun avanzamento delle nostre conoscenze potesse derivare dal loro studio. Nella maggior parte degli avvistamenti, si trattava di fenomeni naturali o operazioni militari segrete.

Anche gli incontri ravvicinati tra umani e alieni di cui parlano alcune cronache sono spesso vicini a fatti "paranormali" piuttosto che al contatto con culture extraterrestri. Una persona da sola e senza testimoni osserva immagini, tocca

La ricerca di intelligenze extraterrestri

oggetti strani e sente eventualmente suoni che il suo cervello interpreta come “alieni” in base alla sua conoscenza. Molti secoli fa, entrare in contatto con esseri non umani veniva interpretato come un incontro con il sovrannaturale, trovando una risposta in chiave religiosa, o addirittura in chiave di magia. In tutti i casi, l’interpretazione viene fornita *dalla cultura del testimone* o della società di cui egli fa parte. Questi fatti non possono essere discussi nella chiave della scienza sperimentale, ma dobbiamo citarli qui per non dare al lettore una visione incompleta. Questi aspetti fisici e sociali sono stati discussi ampiamente nel mio precedente libro²⁷ di Astrobiologia.

11.7 L’impatto di due civiltà

Non possiamo non concludere questo capitolo chiedendoci, su un piano puramente ideale, quali vantaggi o svantaggi potrebbe portarci il contatto con una civiltà aliena, che immaginiamo più avanzata della nostra per il solo fatto di essere in grado di comunicare o di viaggiare nello spazio interstellare. Naturalmente occorrerà distinguere tra un semplice contatto attraverso segnali elettromagnetici oppure un vero e proprio sbarco di sonde automatizzate o individui.

Nel primo caso, la conoscenza può avvenire con un metodo simile all’idea del messaggio di Arecibo: prima ognuno insegna all’altro i propri numeri e le proprie lettere, poi trasmette immagini o formule o suoni, con tutte le limitazioni che queste ultime forme di comunicazione implicano. La nostra Terra è già una babele di usanze, dialetti, logiche e morali diverse tanto da risultare impossibile definire una “cultura terrestre”, soprattutto se non ci si limita alla scienza sperimentale, ma si vogliono trasmettere concetti convenzionali e non naturali come l’economia, le leggi, la religione. Questi aspetti della vita sono così legati alla cultura in cui esistono che potrebbero risultare del tutto incomprensibili per chi li riceve. Ciascuno di noi ha assistito o può immaginare una discussione tra due persone sulla Terra con idee molto distanti tra loro e capire l’impossibilità di un vero e proprio dialogo. Anche una formula fisica o chimica tuttavia potrebbe risultare incomprensibile a scienziati di culture o livelli diversi. Insegnare il funzionamento dei sensori di immagine CMOS ha senso solo per chi ha una scienza e una tecnologia dei circuiti elettronici simile alla nostra. Altrimenti nessuno dei due, chi trasmette e chi riceve, può trarre vantaggio dalla comunicazione. La trasmissione di immagini, una volta trovato chi è in grado di leggerle, propone problemi simili. Sulla Terra esistono numerose codifiche per le trasmissioni televisive, per i DVD, per codici di compressione dei *file* (detti *codec*), per i sistemi operativi (Windows, Unix, Linux, MacIntosh ecc.). Nessuna di queste è “naturale”, ma frutto di scelte

²⁷ G. Galletta, V. Sergi, *Astrobiologia, le frontiere della vita*, 2005, Ed. Hoepli, 313 pp.

commerciali e tecnologiche. Queste scelte verranno superate nell'arco di alcuni anni per essere sostituite da altri sistemi. Tanto per fare un esempio di incomunicabilità non extraterrestre, immaginiamo che un europeo con un pc Windows mandi a un amico negli USA un filmato codificato in DivX e lo scriva su un DVD acquistato in un negozio sotto casa. Anche se non capite il significato delle sigle, possiamo dirvi che il suo filmato sarà nel sistema televisivo PAL su un DVD scritto con un codice regionale 2 e in formato Windows. Il suo amico vive invece in una zona dove il sistema televisivo è NTSC e i DVD hanno un codice regionale 1. In più supponiamo che il suo pc abbia un sistema operativo MacIntosh e che lui non abbia mai montato il codec DivX. Cosa succederà? Quell'oggetto iridescente misterioso che è il DVD sarà completamente illeggibile. In questo esempio, si noti che i due protagonisti hanno lo stesso livello di tecnologia, ma che questo non è abbastanza. Si comprende come la probabilità che un messaggio trasmesso con codici terrestri sia interpretabile fuori dal pianeta è veramente infima. Si può solo sperare che vi sia qualcuno in grado di interpretarlo.

Supponiamo quindi di essere noi a captare un segnale e di riuscire a decifrarlo nella maniera corretta. Cosa ci diranno i dati ricevuti? Informazioni su chi ci scrive. Forse qualcosa sul loro livello di tecnologia e sulle loro usanze. Qualche formula, troppo complessa per essere capita e perciò di scarso uso, per ora. Oltre a questo, naturalmente ci sarebbe il rischio di trovare qualcosa di cui fare cattivo uso, come lo è stata l'energia atomica poi usata per le bombe, o la fisica dei missili usata anche per la guerra. E c'è da chiedersi quale sarebbero le reazioni della gente terrestre di diversa cultura e nazione. Imitazione degli alieni perché superiori? Sospetto per una cultura definita extra-? Paura di una possibile invasione?

Alcuni studi sociologici hanno preso in considerazione i problemi generati da un contatto alieno. Gli studiosi dei progetti SETI hanno creato un protocollo da seguire nel caso di rilevazione di un segnale radio o ottico proveniente da una civiltà extraterrestre: il Protocollo SETI Post-scoperta (*Post-Detection SETI Protocol*). Chi dovesse scoprire il segnale deve astenersi dal fare annunci alla stampa, ma deve informare immediatamente altri osservatori che possano confermare o scartare l'ipotesi di un messaggio prodotto da intelligenze extraterrestri. In caso di conferma, l'informazione deve essere distribuita a tutti tramite l'Ufficio Telegrammi Astronomici dell'IAU. Questo ufficio funziona già da anni per segnalare quelle scoperte che richiedono un'osservazione veloce di fenomeni di breve durata, come l'esplosione di supernovae, l'emissione di energia X da un oggetto celeste e l'arrivo di comete. Un annuncio attraverso l'IAU, tramite la rete informatica, viene diffuso in tutto il mondo scientifico astronomico, senza limitazioni di stati o culture. A quel punto allo scopritore verrà riconosciuto il merito della

La ricerca di intelligenze extraterrestri

scoperta. Contemporaneamente all'IAU, devono essere informati il Segretariato delle Nazioni Unite, gli organismi internazionali delle Telecomunicazioni e quelli delle agenzie spaziali. Si richiederà alle autorità locali di telecomunicazioni tramite l'*International Telecommunication Union* di Ginevra che i canali radio in cui il segnale è stato rivelato siano protetti da interferenze, in modo da studiarlo senza problemi. Secondo il protocollo, le Nazioni Unite dovrebbero nominare una commissione per decidere le operazioni successive. Nel protocollo, si afferma che la decisione se rispondere o meno al segnale deve essere presa dopo consultazioni internazionali da parte dell'ONU, essendo una questione politica più che scientifica. La risposta deve essere inviata a nome di tutta l'umanità e non da parte di singole nazioni e il contenuto del messaggio di risposta deve essere sostenuto da un largo consenso internazionale. Abbiamo già accennato alla difficoltà di un messaggio che rappresenti al tempo stesso tutta la cultura umana e comprenda anche informazioni specifiche. Al di là di un convenzionale "siamo qui, ben trovati", spiegare chi siamo e cosa crediamo giusto può essere veramente impossibile.

Uno scenario ancora più drastico potrebbe presentarsi nel caso di un "contatto" che avvenga non semplicemente tramite comunicazione, ma con lo sbarco di esseri viventi. Siamo naturalmente nel campo della teoria e dell'imprevedibile, ma possiamo riflettere ancora sul contatto tra due civiltà molto diverse tra loro. Il contatto può avvenire pacificamente, come immaginato in tanti racconti letterari o cinematografici, con un mezzo che sbarca davanti al palazzo dell'ONU dopo aver inviato segnali radio non ostili per vincere l'iniziale diffidenza dei terrestri. Secondo alcune ricerche sul comportamento sociale, non dovrebbero ripetersi oggi le scene di panico riportate dai giornali nel 1938, vere o montate ad arte che fossero, avvenute con la trasmissione alla radio dello sceneggiato *La guerra dei Mondi*, citate nella Sezione 1.6, ma certamente l'interesse dei mezzi di comunicazione come radio, TV, Web sarebbe polarizzato da un simile evento. Questo incontro potrà risolvere molti interrogativi scientifici, filosofici e religiosi, sugli esseri umani e la loro posizione nella Galassia.

Purtroppo la storia dei contatti tra civiltà sulla Terra ci prospetta uno scenario diverso: tutte le volte che una civiltà tecnologicamente più avanzata o semplicemente più potente è entrata in contatto con un'altra civiltà meno progredita, questa non si è integrata, ma ne è stata schiacciata culturalmente e fisicamente. Tutti abbiamo imparato nei nostri studi come l'invasione delle Americhe abbia portato a poche integrazioni culturali, per esempio la convivenza tra popolazione locale e nuovi arrivati. Nell'America del Nord, i popoli presenti sono stati progressivamente scacciati dai loro territori se non addirittura sterminati e costretti in territori molto limitati, le **riserve indiane**. Nell'America Centrale e del Sud, se non

c'è stato il completo sterminio fisico si è avuto un reale sterminio culturale. I testi delle culture locali, quando esistenti, sono stati distrutti. Come scrive il vescovo Diego de Landa nella conquista dei territori Maya: "Abbiamo trovato un gran numero di libri, e poiché non c'era nulla che non fosse superstizioni e menzogne del diavolo, li abbiamo bruciati tutti"²⁸. Quello che sappiamo della civiltà azteca o della scienza dei numeri maya viene ricostruito dal poco materiale che di quella cultura è sopravvissuto. Se guardiamo verso l'Asia o l'Australia, il risultato del contatto tra civiltà non cambia: soppressione di popoli ritenuti inferiori, riserve, sottrazione dei bambini nativi per educarli nelle scuole di tipo inglese, appropriazione del loro territorio in nome dei diritti dei nuovi venuti.

Questo contatto distruttivo non è però una prerogativa dei soli popoli europei e della loro espansione dell'era moderna. Altri popoli della cordigliera delle Ande, per esempio, come i Mochica o la cultura di Tihuanaco erano stati "cancellati" dalla storia a causa dell'espansione degli Incas, prima che gli archeologi riuscissero a scoprire la loro esistenza dai manufatti ritrovati negli scavi. Potremmo pessimisticamente pensare che sia insito nell'uomo ritenersi superiore a chi è diverso da lui e di arrogarsi il diritto di sopraffare tutti quelli che non appartengono alla sua società. In effetti, la maggior parte delle nostre azioni considera la specie umana più importante delle altre. Trovandosi in stato di necessità e nell'alternativa di causare la morte di un animale o di un essere umano, la morale comune non ci lascia scelta, e scegliamo di salvare l'individuo della nostra stessa specie, come avviene in ogni specie animale. Ma se dovessimo incontrare un popolo o una civiltà più avanzata di noi culturalmente e biologicamente, saremmo disposti ad accettare quello che noi pensiamo degli animali? Anche se i visitatori fossero amici e tanto superiori da non volere esercitare nessun diritto su di noi o sul nostro pianeta, come potremmo non essere sicuri di incontrare i loro virus, i loro batteri, le loro malattie, con lo stesso risultato dello sterminio di popolazioni avvenute in passato e anche nei nostri anni davanti a nuovi virus, discusse nella Sezione 10.5?

Questo interrogativo può portare alla scelta di non comunicare, non viaggiare, non farci scoprire da chi, essendo in qualche modo "più" di noi, potrebbe volere esercitare il suo potere sugli umani. È sicuramente un'elucubrante fantastica, ma spiega esaurientemente come alcuni meccanismi mentali, per noi quasi innati, siano pieni di contraddizioni. Se simili meccanismi agissero su esseri di altre civiltà, potrebbero motivare la decisione di non viaggiare nella Galassia e la mancata colonizzazione dei nostri pianeti, anche se la Via Lattea brulicasse di pianeti abitati.

²⁸ D. D. Landa, *Relación de las cosas de Yucatán*, Manoscritto, 1566

Giuseppe Galletta, docente di Astronomia e Astrobiologia all'Università di Padova, è autore di un centinaio di articoli di ricerca sulle maggiori riviste scientifiche internazionali. Negli anni '70 ha scoperto una nuova categoria di galassie con struttura allungata e l'esistenza di galassie con anelli polari, e negli anni '80 il fenomeno denominato "controrotazione" nelle galassie a disco, con il gas che ruota in senso inverso alle stelle. Ha diretto nel 2004 il progetto di un simulatore dell'ambiente marziano per studiare la sopravvivenza di microrganismi sul pianeta rosso.

Membro delle maggiori società internazionali di Astronomia e Astrobiologia, si occupa da diversi anni di divulgazione e didattica di queste scienze, collaborando con riviste e quotidiani. È autore di tre libri di divulgazione astronomica.

Come sono nati e come si sono evoluti il pianeta Terra e la sua atmosfera? Quando è nata la vita sul nostro pianeta? A queste domande i geologi e biologi hanno trovato possibili risposte, in base ai dati delle loro ricerche. Le stesse domande si ripropongono oggi, dopo la scoperta di più di 4000 pianeti intorno ad altre stelle, molti di questi simili alla Terra. La Biologia ci dice che le possibili forme di vita esistenti su questi pianeti extrasolari potrebbero essere molto diverse da noi e adattate all'ambiente in cui vivono, proprio come gli animali e le piante di isole sperdute nei nostri oceani.

Questo libro illustra in forma discorsiva le attuali conoscenze scientifiche sulla possibile esistenza di vita extraterrestre, in una ricerca multidisciplinare che prende il nome di Astrobiologia. Esso può essere letto da studenti della scuola superiore e da adulti che vogliono restare aggiornati sull'argomento. Partendo dalla storia del pensiero antico, il libro segue un filo logico che si addentra nella Biologia, nell'evoluzione delle stelle e del Sistema Solare e discute anche se possano esistere altri esseri intelligenti nella nostra Galassia. Una lunga riflessione scientifica sul nostro posto nell'Universo che abbraccia tutte le discipline scientifiche e del pensiero umano. Entro pochi anni, le missioni spaziali nel Sistema Solare e lo studio delle atmosfere dei pianeti extrasolari apriranno una nuova frontiera alle nostre conoscenze, certamente ricca di scoperte sorprendenti. Questo libro ci prepara a comprendere la reale portata di queste scoperte.

Indice:

L'extraterrestre dall'antica Grecia al XXI secolo • La vita sulla Terra • Dove nascono gli elementi e le molecole • Dalla polvere interstellare ai protopianeti • Origine dei pianeti e dei corpi minori • Origine della vita sulla Terra • Ambienti terrestri estremi • Vita nel Sistema Solare • Pianeti di altre stelle • Viaggi spaziali • La ricerca di intelligenze extraterrestri

