

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TRIESTE  
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE INTERATENEO IN FISICA

CURRICULUM DI ASTROFISICA E COSMOLOGIA,  
FISICA TERRESTRE E DELL'AMBIENTE

PERCORSO FORMATIVO DI ASTROFISICA E COSMOLOGIA

APPUNTI DELLE LEZIONI DI

# INTRODUZIONE ALL'ASTROBIOLOGIA

TERZO CREDITO DEL CORSO DI ASTRONOMIA OSSERVATIVA C

Giovanni Vladilo

INAF - Osservatorio Astronomico di Trieste

ANNO ACCADEMICO 2010/2011



# Indice

|                                                                         |    |
|-------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Introduzione</b>                                                     | v  |
| <b>1 La vita</b>                                                        | 1  |
| 1.1 La vita terrestre . . . . .                                         | 1  |
| Definizione e proprietà . . . . .                                       | 1  |
| Costituenti chimici della vita . . . . .                                | 4  |
| Macromolecole biologiche . . . . .                                      | 8  |
| Selettività della chimica biologica . . . . .                           | 13 |
| Acquisizione e scambio di energia . . . . .                             | 14 |
| Proprietà genetiche . . . . .                                           | 15 |
| 1.2 La vita fuori dalla Terra: requisiti e vincoli . . . . .            | 17 |
| Definizioni di interesse astrobiologico . . . . .                       | 17 |
| Requisiti termodinamici . . . . .                                       | 18 |
| Vincoli sulla composizione chimica . . . . .                            | 23 |
| Aspettative su possibili tipi di vita esistenti nell'Universo . . . . . | 29 |
| <b>2 Ambienti abitabili</b>                                             | 31 |
| 2.1 La Terra come ambiente abitabile . . . . .                          | 31 |
| Fonti di energia . . . . .                                              | 31 |
| Protezione da radiazioni ionizzanti . . . . .                           | 33 |
| Presenza di acqua liquida . . . . .                                     | 34 |
| Condizioni climatiche superficiali . . . . .                            | 36 |
| Limiti estremi di abitabilità terrestre . . . . .                       | 36 |
| 2.2 Abitabilità fuori dalla Terra . . . . .                             | 39 |

---

|                                                                       |        |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|
| Abitabilità planetaria superficiale . . . . .                         | 39     |
| Fattori climatici . . . . .                                           | 43     |
| Effetti di retroazione ( <i>feedback</i> ) . . . . .                  | 49     |
| Abitabilità continua . . . . .                                        | 51     |
| Altri tipi di abitabilità planetaria . . . . .                        | 53     |
| Fonti di energia . . . . .                                            | 54     |
| Protezione da radiazioni ionizzanti . . . . .                         | 55     |
| <br><b>3 Origine della vita</b>                                       | <br>57 |
| 3.1 Abiogenesi terrestre . . . . .                                    | 58     |
| L'origine <i>in situ</i> come ipotesi di lavoro . . . . .             | 58     |
| Vincoli temporali sull'origine della vita terrestre . . . . .         | 58     |
| Condizioni ambientali all'epoca della formazione della vita . . . . . | 60     |
| Sintesi di precursori biologici . . . . .                             | 62     |
| Le prime macromolecole biologiche . . . . .                           | 65     |
| I primi organismi viventi . . . . .                                   | 68     |
| 3.2 Abiogenesi nell'Universo . . . . .                                | 69     |
| Lezioni tratte dall'abiogenesi terrestre . . . . .                    | 70     |
| Abiogenesi nel Sistema Solare . . . . .                               | 71     |
| Ipotesi di un'origine extraterrestre della vita . . . . .             | 72     |
| <br><b>4 Evoluzione della vita e del proprio ambiente</b>             | <br>75 |
| 4.1 Evoluzione della vita terrestre . . . . .                         | 75     |
| Principali tappe dell'evoluzione . . . . .                            | 76     |
| I meccanismi dell'evoluzione . . . . .                                | 79     |
| Evoluzione del clima terrestre . . . . .                              | 79     |
| Cause di instabilità climatica . . . . .                              | 81     |
| 4.2 Evoluzione della vita nell'Universo . . . . .                     | 83     |
| Lezioni tratte dalla storia della vita terrestre . . . . .            | 83     |
| <br><b>5 Ricerche di vita e ambienti abitabili nell'Universo</b>      | <br>87 |
| 5.1 Ricerche nel Sistema Solare . . . . .                             | 87     |

---

|                                                                   |                |
|-------------------------------------------------------------------|----------------|
| Ricerche nella zona abitabile circumstellare . . . . .            | 87             |
| Ricerche fuori dalla zona abitabile circumstellare . . . . .      | 90             |
| <b>5.2 Pianeti extrasolari . . . . .</b>                          | <b>93</b>      |
| Ricerche di pianeti nella zona abitabile circumstellare . . . . . | 94             |
| Caratterizzazione dei pianeti . . . . .                           | 101            |
| Abitabilità attorno a stelle di tipo M . . . . .                  | 103            |
| Ricerca di biomarcatori atmosferici . . . . .                     | 103            |
| <b>5.3 Zona abitabile Galattica . . . . .</b>                     | <b>107</b>     |
| Criteri di abitabilità Galattica . . . . .                        | 108            |
| Risultati e sviluppi futuri . . . . .                             | 109            |
| <br><b>Bibliografia</b>                                           | <br><b>111</b> |
| Testi generali e di consultazione . . . . .                       | 111            |
| Testi e articoli classici . . . . .                               | 112            |
| Articoli . . . . .                                                | 112            |
| Siti web . . . . .                                                | 118            |



# Introduzione

Nel corso della storia dell'umanità la natura, l'origine e l'evoluzione degli organismi viventi sono sempre state al centro di riflessioni religiose e ragionamenti filosofici, entrando a far parte di studi scientifici solo in tempi relativamente recenti.

Nell'approccio non scientifico l'origine della vita viene solitamente attribuita a un atto di creazione divina, così come l'esistenza di diverse specie viventi viene attribuita ad una serie di interventi soprannaturali. In tale visione, la natura degli organismi viventi viene considerata intrinsecamente diversa da quella degli oggetti inanimati, in quanto sostenuta da un "soffio vitale" di origine divina.

L'approccio scientifico ha il fine ultimo di descrivere la vita in termini di processi che avvengono in conformità alle comuni leggi della fisica. In tale approccio, l'origine e l'evoluzione della vita sono da intendersi come una successione di stati della materia con livelli crescenti di complessità, auto-organizzazione e di relazione tra le proprie parti. Tale successione deve aver portato alle prime forme di vita e, successivamente, a una differenziazione in diverse specie mediante un meccanismo di selezione naturale, senza interventi soprannaturali.

L'approccio scientifico, per quanto non scevro di difficoltà, ci permette di porre il fenomeno della vita in un contesto universale. Infatti, se l'origine della vita è un atto che, per quanto complesso, obbedisce alle comuni leggi della fisica, viene spontaneo ipotizzare che forme di vita possano esistere non solo sulla Terra, ma anche in altri ambienti dell'Universo con condizioni fisiche opportune.

La possibilità di esistenza di vita in altri mondi era stata presa in considerazione ben prima della nascita della scienza moderna, come ad esempio dal filosofo romano Lucrezio nel suo *De Rerum Natura* (I secolo a.C.). Tale idea era stata avanzata anche da filosofi con matrice culturale religiosa, come ad esempio Giordano Bruno (*De l'infinito universo et Mondi*, 1584). Oggigiorno l'esistenza di altri mondi è ampiamente dimostrata dalle ricerche sui pianeti extrasolari che, dopo aver portato alla scoperta di centinaia di pianeti, sono in procinto di rivelare l'esistenza di pianeti abitabili. Questo fatto ha aumentato l'interesse riguardo la possibile esistenza di vita fuori dalla Terra, già presente da decenni nella comunità scientifica e alla base della motivazione scientifica di numerose missioni spaziali esplorative condotte nel Sistema Solare.

La fiducia nella capacità della scienza di inquadrare il fenomeno della vita da un punto di vista fisico/chimico è aumentata nel corso del tempo, grazie a una storia ormai lunga di

successi scientifici nella comprensione dell'evoluzione delle specie e della natura degli organismi viventi, quantomeno a livello di microbiologia e biologia molecolare.

Lo studio scientifico dell'*evoluzione* della vita terrestre è iniziato circa un secolo e mezzo fa. Punto di svolta in tal senso è stata la pubblicazione, nel 1859, del lavoro di Charles Darwin *On the Origin of Species* [17]. L'evoluzione darwiniana, basata sul meccanismo di mutazione e selezione naturale delle specie, ha retto al vaglio sperimentale di una mole impressionante di dati osservativi. Alcune critiche che potevano inizialmente essere poste alla teoria darwiniana sono state superate. Ad esempio il fatto che, all'epoca di Darwin, non fosse conosciuto il meccanismo di mutazione a livello chimico/fisico: l'esistenza di tale meccanismo poggiava unicamente sull'analisi comparativa a livello macroscopico delle diverse specie. I progressi scientifici vertiginosi occorsi nell'ultimo mezzo secolo hanno completamente cambiato questo quadro, in particolare per quanto riguarda la genetica e la biologia molecolare. Tra le tappe fondamentali di questo sviluppo non si può non citare la scoperta della struttura del DNA [20]. Si può certamente dire che lo studio della *natura* dei sistemi viventi dal punto di vista chimico/fisico è diventato una realtà grazie a tali progressi e a molti altri ancora, ad esempio nel campo della biochimica e bioinformatica.

I progressi scientifici nella comprensione dell'evoluzione e della natura degli organismi viventi incoraggiano ad affrontare la questione più difficile, quella cioè dell' *origine* della vita. I primi tentativi di spiegazione dell'origine della vita in termini materialistici sono stati avanzati da Alexander Oparin e John B.S. Haldane negli anni venti del secolo scorso. I primi esperimenti di laboratorio di formazione di molecole prebiotiche a partire da semplici composti chimici sono stati condotti negli anni cinquanta da Stanley Miller [18]. Oggigiorno gli esperimenti di laboratorio riguardanti l'origine della vita sono estremamente diversificati ed esplorano anche la sintesi e le capacità autoreplicative di macromolecole biologiche.

Parallelamente ai progressi scientifici riguardanti la natura, origine ed evoluzione della vita, ve ne sono stati altri che hanno dato nuovo impulso alla ricerca di vita nell'Universo. Tra questi, le scoperte dei microrganismi "estremofili", così chiamati in quanto vivono in ambienti con condizioni fisiche solitamente ritenute proibitive per l'esistenza stessa della vita. La scoperta di tale organismi ha dato un nuovo impulso alla ricerca di vita anche in pianeti e satelliti con condizioni fisiche estreme.

In questo scenario così variegato di ricerche svolte in diverse aree, gli studi riguardanti la vita nell'Universo stanno gradualmente confluendo a formare un insieme di nuove scienze [5] che vanno sotto il nome di bioastronomia, esobiologia e astrobiologia.

## LE SCIENZE DELLA VITA NELL'UNIVERSO

Il termine *bioastronomia* è stato ufficialmente adottato dall' Unione Astronomica Internazionale (IAU) che nel 1982 ha creato la Commissione No. 51 preposta a questo tipo di studi [133]. Gli obiettivi di questa commissione includono: la *ricerca di pianeti* attorno ad altre stelle, la *ricerca di trasmissioni radio*, intenzionali o no, *di origine extraterrestre*; la *ricerca di molecole interstellari di rilevanza biologica* e lo studio dei loro processi di formazione; i metodi di

*rivelazione di possibili evidenze di attività biologica in altri pianeti*; il coordinamento degli sforzi in queste aree di ricerca a livello internazionale.

Il termine *esobiologia* è stato coniato attorno al 1960 dal biologo Joshua Lederberg [73], ed è spesso impiegato dall'Agenzia Spaziale Europea (ESA) per le ricerche di vita nel Sistema Solare. A rigore, l'esobiologia include solamente lo studio della vita fuori dalla Terra. L'utilizzo di tale termine è, in principio, criticabile in quanto non esiste attualmente prova dell'esistenza di tale tipo di vita. Tale obiezione non si applica direttamente alle definizioni di astrobiologia e di bioastronomia.

Il termine *astrobiologia*, introdotto nel 1955 dall'astronomo Otto Struve [110], è stato ufficialmente adottato, con il significato di "*studio dell'universo vivente*", dal NASA Astrobiology Institute [134]. Secondo una definizione comunemente adottata *l'astrobiologia studia l'origine, l'evoluzione, la distribuzione e il destino della vita nell'universo*, includendo la vita sulla Terra. Questo termine è tradizionalmente usato da biologi e chimici che si occupano dell'origine della vita, ma si sta gradualmente diffondendo in tutto il mondo scientifico che lavora in questo campo. Useremo anche noi questo termine per indicare, in maniera del tutto generale, le ricerche di vita nell'Universo.

## L'ASTROBIOLOGIA

L'astrobiologia è fortemente multidisciplinare. Essa affonda le proprie conoscenze in diverse aree delle scienze della vita (microbiologia, biologia molecolare, biochimica, genetica), delle scienze della Terra (geologia, paleontologia, geofisica, climatologia), e delle scienze dello spazio (Sistema Solare, pianeti extrasolari, astronomia stellare, evoluzione chimica galattica). Le scienze computazionali (bioinformatica) e quelle matematiche stanno gradualmente acquistando un ruolo di primo piano. A causa della sua natura multidisciplinare, l'astrobiologia richiede uno sforzo notevole di acculturamento al di fuori della propria disciplina scientifica di appartenenza.

L'astrobiologia è una scienza ancora nelle sue prime fasi di definizione e sviluppo, in maniera simile a quello che era cosmologia mezzo secolo fa. In quell'epoca lo studio dell'origine ed evoluzione dell'Universo non poggiava ancora su solide basi osservative e i modelli cosmologici erano estremamente incerti. Ciononostante, nel corso di pochi decenni, la cosmologia si è trasformata in una solida scienza sperimentale, grazie ai notevoli progressi quantitativi compiuti in diverse discipline astronomiche, ai contributi di fisica delle particelle elementari, e soprattutto grazie alla scoperta e allo studio della radiazione di fondo a microonde. Quanto successo per la cosmologia ci fa sperare che l'astrobiologia possa evolvere in maniera simile, fino a raggiungere un livello di maturità scientifica, sviluppando un proprio linguaggio dalla sintesi dei linguaggi delle scienze che la compongono.

L'attuale mancanza di prove di esistenza di vita fuori dalla Terra presta il fianco a una critica di principio: che senso ha cercare nell'Universo qualcosa che non sappiamo se esiste? Tale critica non va certamente ignorata. D'altra parte vale la pena ricordare che per molti anni si sono studiati i buchi neri sulla sola base di predizioni teoriche, così come attualmente

si studiano l'inflazione cosmologica e l'energia oscura senza averne prove osservative dirette. Quantomeno, nel caso della vita, abbiamo la certezza dell'esistenza di almeno un tipo di vita, quella terrestre, che possiamo studiare in grandissimo dettaglio.

#### RICADUTE TECNOLOGICHE

Nonostante il tema della vita nell'Universo possa apparire privo di ricadute pratiche, molti aspetti dell'astrobiologia hanno un importante impatto tecnologico e promettono di averne uno ancora maggiore in futuro. Vediamo alcuni esempi.

Gli studi di laboratorio sulle molecole biologiche con capacità autoreplicanti, fondamentale per la comprensione dell'origine della vita, richiede lo sviluppo di tecnologie miniaturizzate d'avanguardia che verosimilmente potranno essere utilizzate per applicazioni pratiche. In generale, l'aumento della nostra comprensione dei meccanismi di funzionamento della vita a livello microscopico potrà portare a notevoli applicazioni in campo farmaceutico e nell'ambito delle nanotecnologie.

Un secondo esempio è quello dello studio della resistenza di organismi viventi in ambienti spaziali. Tale studio non è solo importante ai fini della caratterizzazione di possibili tipi di vita extraterrestre, ma anche per acquisire la tecnologia necessaria a colonizzare l'ambiente spaziale. La colonizzazione della Luna, anche come base di partenza per missioni spaziali verso regioni più distanti del Sistema Solare, sta' infatti tornando di attualità. Le sfide tecnologiche legate a questo tipo di progetti sono enormi, così come le aspettative di ricadute pratiche.

In campo astronomico, la necessità di caratterizzare i pianeti extrasolari abitabili sta' portando a un notevole sviluppo tecnologico della strumentazione sia da Terra che dallo spazio, e a un notevole progresso nella modellistica della climatologia planetaria. Il fiorire di studi di climatologia planetaria potrebbe gettar luce su particolari aspetti della climatologia terrestre.

#### SCOPO DEL CORSO

Il presente corso è mirato a introdurre in maniera graduale una serie di conoscenze provenienti da diverse aree scientifiche, selezionate sulla base della loro utilità nell'ambito dell'astrobiologia. Il taglio del corso è introduttivo ed è pensato per studenti che non abbiano sostenuto esami di scienze della vita. Si rimanda a testi specializzati per approfondimenti di biologia e biochimica [11, 3]. Per quanto riguarda la parte astronomica, si è cercato di mettere in luce il molteplice ruolo dell'astronomia nell'ambito delle ricerche sulla vita dell'Universo e, in particolare, il concetto di "abitabilità" di ambienti astronomici. Per approfondimenti si rimanda alla bibliografia che comprende testi introduttivi di astrobiologia [5, 8, 15, 16], numerosi articoli specializzati, siti web di consultazione, e testi o articoli d'interesse storico.

# Capitolo 1

## La vita

In questo capitolo ci familiarizziamo con le principali proprietà della vita. La prima parte del capitolo è una breve introduzione alla vita terrestre, il punto di riferimento per lo studio della vita nell'Universo. La seconda parte è mirata a capire quali caratteristiche della vita terrestre potrebbero essere comuni e quali invece diverse in forme di vita eventualmente presenti in ambienti diversi dalla Terra.

### 1.1 La vita terrestre

#### Definizione e proprietà

La definizione di vita dovrebbe essere, in teoria, il punto di partenza per lo studio della vita nell'Universo. In pratica, non esiste una semplice definizione di vita comunemente accettata, nonostante numerose proposte fatte in tal senso [31, 66, 72]. È infatti difficile trovare una singola proprietà che, da sola, offra un criterio per discriminare in maniera netta un sistema vivente da uno non vivente. Di conseguenza per definire la vita si usa stilare un *elenco di proprietà che devono essere simultaneamente possedute da un organismo* per distinguerlo dal mondo non biologico. La scelta di quali proprietà siano più o meno essenziali, e vadano pertanto incluse in tale elenco, varia da autore ad autore e cambia nel tempo, seguendo i progressi nella nostra comprensione delle scienze della vita. Questa situazione è insoddisfacente da un punto di vista epistemologico e potrà essere superata solamente quando verrà identificata una qualche proprietà che riesca, da sola, a discriminare il mondo biologico da quello non biologico. Torneremo su questo aspetto nella seconda parte (origine ed evoluzione della vita).

Passiamo dunque brevemente in rassegna alcune delle principali proprietà comunemente utilizzate per definire la vita. È bene sottolineare che la lista di proprietà qui considerata non è esaustiva e che tali proprietà non sono necessariamente indipendenti le une dalle altre.

Chiamiamo *organismi viventi* i sistemi che, individualmente, godono dell'insieme delle proprietà della vita.

#### STRUTTURA E ORGANIZZAZIONE INTERNA

Gli organismi viventi organizzano se stessi in sotto-sistemi interconnessi, rilevanti per la operatività dell'insieme. L'organizzazione delle sotto-parti degli organismi viventi avviene in maniera autonoma, cioè senza alcun intervento esterno.

La minima unità strutturale considerata vivente è chiamata *cellula*. Gli organismi possono essere composti da una cellula (organismi unicellulari) o da più cellule (organismi multicellulari).

Le cellule sono delimitate da un bordo che le separa dall'esterno, ma che al tempo stesso permette di scambiare energia e materia con l'ambiente. L'esistenza di tale bordo, aperto da un punto di vista termodinamico, è una caratteristica strutturale essenziale della vita. Nel caso di organismi unicellulari l'ambiente esterno, con cui le cellule scambiano energia e materia, è generalmente di tipo non biologico. Nel caso di organismi multicellulari l'ambiente è generalmente di tipo biologico (le altre cellule dello stesso organismo).

#### METABOLISMO

Gli organismi viventi acquisiscono, consumano e trasformano energia mediante un insieme di reazioni chimiche che prendono il nome di *metabolismo*. Esempi di metabolismo della vita terrestre sono la fotosintesi (fissazione del carbonio), il catabolismo (digestione), l'estrazione di energia chimica (respirazione) e la sintesi di molecole organiche (anabolismo). L'energia viene estratta mediante trasferimento di elettroni e quindi immagazzinata in legami chimici di molecole preposte a tale scopo.

Le proprietà metaboliche non sono, di per se', sufficienti a discriminare il mondo biologico da quello inanimato. Esistono infatti esempi di reazioni chimiche non biologiche con scambi di elettroni e immagazzinamento di energia simili a quelli che avvengono nelle reazioni biologiche [15]. Questo fatto rende difficile definire la vita puramente su basi metaboliche.

#### REPLICAZIONE E RIPRODUZIONE

La riproduzione consta di un insieme di processi mediante i quali gli organismi viventi generano nuovi individui simili a sè. A livello cellulare tali processi includono la replicazione di molecole contenenti l'informazione genetica. Gli organismi viventi sono capaci di riprodursi da soli oppure associandosi con un altro organismo della stessa specie. L'insieme degli organismi di una stessa specie costituisce una popolazione.

Anche la presenza o meno di capacità riproduttive non è sufficiente, da sola, a discriminare il mondo biologico da quello non biologico. Esistono infatti organismi viventi privi della capacità di riproduzione, quali ad esempio i muli.

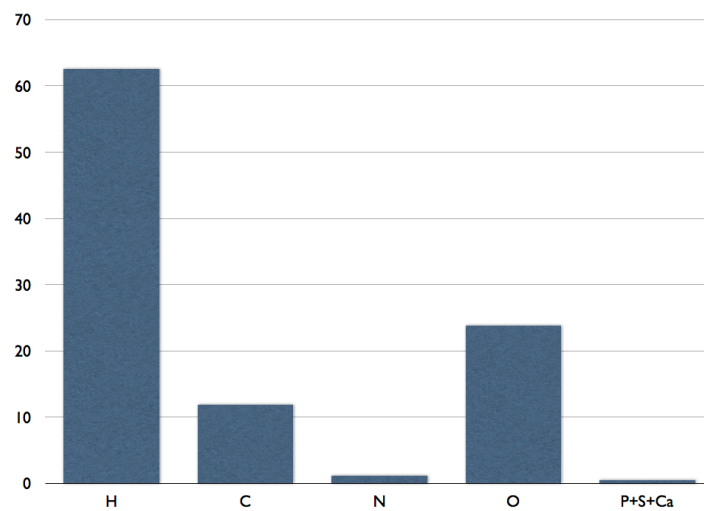


Figura 1.1: Abbondanze dei principali elementi chimici presenti nel corpo umano [41] espresse in percentuale del numero di atomi.

#### CONTENUTO D'INFORMAZIONE

Gli organismi hanno immagazzinate in sé le istruzioni che servono a guidare i processi metabolici e riproduttivi. Tali istruzioni costituiscono l'*informazione genetica* della vita.

La presenza di informazione di tipo genetico è una delle proprietà più specifiche della vita. Tuttavia anche questa proprietà, da sola, non è sufficiente a caratterizzare la vita. Ad esempio, i *virus*, pur contenendo informazione genetica, non hanno un metabolismo proprio, e pertanto non sono considerati organismi viventi.

#### ADATTAMENTO ALL'AMBIENTE

L'adattamento all'ambiente avviene sia a livello di singoli organismi che a livello di popolazione.

A livello di singoli organismi l'adattamento consiste in una serie di meccanismi di reazione o di compensazione, in risposta a cambiamenti delle condizioni ambientali. Tali meccanismi sono tipicamente finalizzati a mantenere la possibilità di auto-sostentamento.

A livello di popolazione l'adattamento consiste nello sviluppo di nuove abilità in risposta a cambiamenti ambientali a lungo termine. Tale forma di adattamento è alla base dell'evoluzione delle specie, che avviene nel corso di molte generazioni. Requisito essenziale per tale forma di adattamento è la possibilità di mutare in maniera graduale l'informazione genetica contenuta negli organismi di una data popolazione, sulla base di mutamenti ambientali.

## Costituenti chimici della vita

In ambito astrobiologico è utile inquadrare il fenomeno della vita nei suoi aspetti chimici. Grazie a questo approccio, la validità universale delle leggi della chimica ci consente di valutare vincoli e aspettative riguardo l'esistenza e la sostenibilità di altre forme di vita in ambienti diversi da quello terrestre. Introduciamo dunque i principali costituenti chimici della vita terrestre, dagli atomi alle molecole più complesse.

### ELEMENTI CHIMICI

I più abbondanti *elementi chimici* negli organismi terrestri sono l'idrogeno, l'ossigeno, il carbonio, e l'azoto. In Fig. 1.1 mostriamo come esempio le abbondanze nel corpo umano espresse in percentuale del numero di atomi. L'abbondanza particolarmente alta di idrogeno e ossigeno è dovuta al fatto che una frazione significativa degli organismi viventi è composta di acqua. Il valore del rapporto stochiometrico  $H:O \simeq 2$ , come si vede in figura, è indicativo di tale fatto. L'acqua costituisce dunque un substrato della vita.

Escludendo il substrato d'acqua, il carbonio è di gran lunga l'elemento dominante: la chimica della vita è *chimica organica*, basata cioè sul carbonio. Il successivo elemento in ordine di abbondanza è l'azoto che gioca un ruolo fondamentale, come vedremo, nelle proteine e negli acidi nucleici. Continuando in ordine di abbondanza troviamo quindi il fosforo, presente negli acidi nucleici, nelle molecole di scambio energetico e nelle membrane cellulari. Lo zolfo, seppur meno abbondante, è un componente essenziale di molte proteine. Le abbondanze relative di elementi chimici possono variare da organismo a organismo. Ad esempio il calcio è abbondante quanto il fosforo nel corpo umano (in quanto componente delle ossa), mentre è praticamente assente in molti organismi unicellulari. Vi sono poi altri elementi presenti solamente in tracce, ma comunque essenziali per la vita, come ad esempio potassio, sodio, cloro, magnesio, ferro e altri ancora.

### LEGAMI CHIMICI

Mediante i legami chimici gli atomi si uniscono a formare molecole, dalle più semplici alle più complesse. Facciamo un breve richiamo sui principali legami chimici al fine di evidenziare quelli più importanti nelle molecole biologiche.

Le cause dei legami chimici sono da ricercare nelle leggi della meccanica quantistica, che determinano la distribuzione degli elettroni negli orbitali atomici. Esistono legami di diversa natura e diversa intensità. Parte dei legami possono essere spiegati in base alla tendenza di alcuni atomi a reagire in modo da completare il secondo guscio elettronico esterno con otto elettroni (regola dell'ottetto).

Tra i legami forti, abbiamo quelli covalenti e quelli ionici. Di questi, i *legami covalenti* sono i più importanti nella chimica della vita. In tale tipo di legame gli elettroni sono *compartiti* tra gli atomi, senza che via sia un vero e proprio trasferimento da un atomo ad un altro. Le

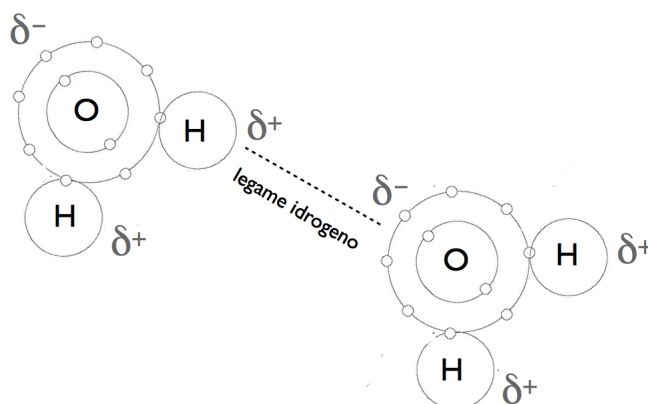


Figura 1.2: Rappresentazione schematica di due molecole d'acqua. Sono indicati gli eccessi di carica positivi in prossimità degli atomi di idrogeno,  $\delta^+$ , e gli eccessi di carica negativi in prossimità degli atomi di ossigeno,  $\delta^-$ . La linea tratteggiata raffigura un legame idrogeno tra le due molecole.

energie medie di legami covalenti C-C, C-N e C-O, che sono tra i più rappresentativi nelle molecole biologiche, cadono nell'intervallo tra  $\approx 50$  e  $200$  kcal/mole, ovverosia tra  $\approx 2$  e  $8$  eV per legame. Nei *legami ionici* c'è un trasferimento di un elettrone da un atomo ad un altro, con il risultato che entrambi gli atomi formano uno ione con un guscio esterno con otto elettroni. I legami ionici sono tipici dei cristalli, ma non delle molecole biologiche. Le molecole biologiche non usano neppure i legami metallici.

Tra i legami deboli, ricordiamo qui i legami idrogeno e le forze di Van der Waals. I *legami idrogeno* si hanno quando l'atomo d'idrogeno si trova ad essere attratto tra due atomi. Sono generalmente il risultato di forze di dipolo elettrico che agiscono tra due molecole polari, come ad esempio tra due molecole d'acqua (Fig. 1.2). I legami idrogeno sono essenziali nei processi chimici biologici [7] e sono alla base delle principali caratteristiche dell'acqua [28]. Sono più deboli di quelli covalenti di circa un ordine di grandezza, con valori dell'ordine di  $\approx 5$ - $10$  kcal/mole, ovverosia  $\approx 0,2$ - $0,4$  eV per legame.

In sintesi, si può affermare che i legami covalenti sono quelli che saldano la struttura portante delle molecole biologiche, mentre i legami idrogeno sono i principali legami intermolecolari e intramolecolari. Questi ultimi sono importanti nelle macromolecole biologiche che, essendo estremamente lunghe, sono soggette a diversi tipi di ripiegamento su se stesse. Tali ripiegamenti sono governati da legami idrogeno intramolecolari. Nelle rappresentazione grafiche di molecole biologiche i legami covalenti sono solitamente indicati con linee continue, mentre i legami idrogeno con linee tratteggiate, ad indicare la diversa intensità dei legami.

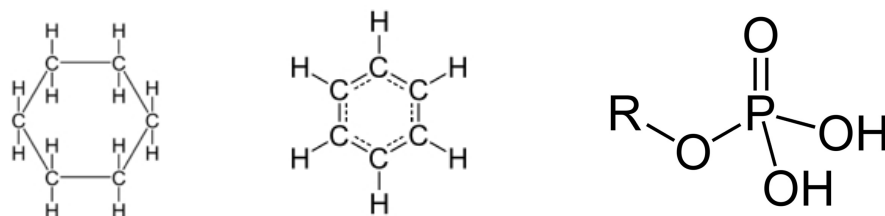


Figura 1.3: Alcuni esempi di strutture molecolari. A sinistra: molecola di cicloesano. In centro: molecola di benzene. A destra: un gruppo fosfato.

## PROPRIETÀ CHIMICHE DELLE MOLECOLE

Richiamiamo alcune concetti chimici utili a capire le proprietà delle molecole biologiche.

Una *molecola* si dice *polare* se vi è una parziale carica positiva,  $\delta^+$ , e una parziale carica negativa,  $\delta^-$ , i cui centri non coincidono geometricamente. Un esempio di molecola polare è l'ammoniaca,  $\text{NH}_3$ , che ha un  $\delta^-$  sull'azoto non bilanciato dal  $\delta^+$  sugli idrogeni a causa della struttura non simmetrica rispetto all'azoto. Un esempio di molecola non polare è il  $\text{CO}_2$ : in questo caso il  $\delta^+$  sul carbonio è cancellato dai  $\delta^-$  sugli ossigeni a causa della struttura lineare, simmetrica rispetto al carbonio. L'acqua è l'esempio più importante di molecola polare in biologia, con un  $\delta^+$  in prossimità dei due atomi di idrogeni che non si cancella con il  $\delta^-$  che si trova dal lato dell'atomo di ossigeno (Fig. 1.2).

Le molecole vengono dette *idrofile* se tendono essere attratte dalle molecole d'acqua e *idrofobiche* se vengono respinte dalle molecole d'acqua. Le molecole polari sono idrofile, mentre quelle non polari idrofobiche. Una stessa molecola può avere un'estremità polare e una non polare, nel qual caso viene detta *anfifilica*. Come vedremo, le proprietà idrofile, idrofobiche e anfifiliche permettono la formazione spontanea di strutture biologiche in acqua.

Una delle proprietà chimiche più importanti per caratterizzare le molecole, comprese quelle biologiche, è il carattere acido o basico. Ricordiamo che per *acido* si intende una sostanza che *dona un protone*, oppure che forma un nuovo legame covalente accettando una coppia di elettroni. Per *base* si intende una sostanza che *accetta un protone*, oppure che forma un nuovo legame covalente donando una coppia di elettroni.

Infine, ricordiamo che una molecola organica si dice *satura* nella misura in cui le valenze disponibili degli atomi di carbonio sono saturate da legami con atomi di idrogeno. Un esempio di molecola satura è il cicloesano,  $\text{C}_6\text{H}_{12}$ , in cui tutte le valenze degli atomi di carbonio sono saturate da atomi di idrogeno (a sinistra in Fig. 1.3).

Un esempio di molecola insatura è il benzene (in centro in Fig. 1.3), che è il prototipo degli anelli aromatici. Tali strutture sono particolarmente stabili e risultano dalla sovrapposizione di orbitali atomici che formano anelli in cui gli elettroni sono compartiti tra tutti gli atomi. Come vedremo, sono utili a capire le strutture delle basi azotate presenti negli acidi nucleici.

## GRUPPI FUNZIONALI

I gruppi funzionali sono gruppi di atomi che fungono da unità strutturali nella costruzione di molecole biologiche più complesse. Sono siti di reazioni chimiche: un dato gruppo funzionale, in qualsiasi molecola si trovi, ha un simile comportamento chimico. Capire le proprietà dei gruppi funzionali aiuta dunque a capire alcune proprietà delle molecole più complesse che li contengono, senza dover tenere in conto tutta la loro struttura. Citiamo alcuni esempi di gruppi funzionali importanti nelle molecole biologiche.

Il *gruppo ossidrilico*,  $-\text{OH}$ , tipico degli alcoli. È leggermente polare; ha proprietà acide, in quanto tende a cedere uno ione idrogeno. Esempio: etanolo ( $\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$ ).

Il gruppo carbossilico,  $-\text{COOH}$ , è caratteristico di un acido carbossilico. Ha proprietà acide, in quanto tende a cedere uno ione idrogeno. Esempio: si trova ad un estremo degli amminoacidi.

Il *gruppo amminico*,  $-\text{NH}_2$ , è anche chiamato ammina primaria. Ha proprietà basiche, in quanto tende ad acquisire un idrogeno. Esempio: si trova negli amminoacidi, all'estremo opposto rispetto al gruppo carbossilico.

Il *gruppo fosfato*, mostrato in Fig. 1.3; è un gruppo acido e polare costituito dall'anione fosfato legato a una molecola organica tramite uno dei suoi 4 ossigeni. È un costituente essenziale degli acidi nucleici e delle molecole usate nelle membrane cellulari e negli scambi energetici.

## L'ACQUA

L'acqua non è solamente il substrato della vita terrestre, come abbiamo già detto, ma anche una componente fondamentale per il funzionamento dei processi biochimici. L'importanza biologica dell'acqua deriva dalle seguenti proprietà delle sue molecole: (1) polarità, (2) capacità di formare legami idrogeno e (3) capacità di formare spontaneamente ioni<sup>1</sup>.

Grazie a tali proprietà microscopiche l'acqua gode delle seguenti proprietà d'interesse biologico: (1) è il mezzo in cui molecole biologiche si muovono liberamente e interagiscono tra loro; (2) ha un ruolo attivo nella formazione spontanea di strutture biologiche (Fig. 1.4); (3) partecipa direttamente a reazioni chimiche metaboliche, mediante il gruppo ossidrilico e l'idrogeno in cui si scompongono e ricompongono le sue molecole. Nella seconda parte del capitolo approfondiremo queste proprietà.

---

<sup>1</sup>In una piccola frazione delle molecole di acqua i legami covalenti si rompono spontaneamente portando alla formazione di  $\text{OH}^-$  e  $\text{H}^+$ . In un litro d'acqua tipicamente una molecola su 550 milioni è ionizzata in un dato istante [11]. Ciò corrisponde a  $10^{-7}$  moli di  $\text{H}^+$  per litro d'acqua. Questa quantità serve da riferimento per la scala di  $\text{pH} = -\log[\text{H}^+]$ , dove  $[\text{H}^+]$  è la concentrazione molare di protoni presenti in un litro di un liquido. Sostanze acide disciolte in acqua aumentano la concentrazione di  $\text{H}^+$  rispetto al valore dell'acqua e hanno  $\text{pH} < 7$ ; sostanze basiche aumentano la concentrazione di  $\text{OH}^-$ , diminuendo quella di  $\text{H}^+$ , e hanno  $\text{pH} > 7$ .

## Macromolecole biologiche

La biologia terrestre utilizza molecole di grandi dimensioni, chiamate macromolecole. La maggior parte delle macromolecole biologiche sono *polimeri*, ovverosia molecole costruite legando tra loro un numero molto grande di unità più piccole chiamate *monomeri*.

La polimerizzazione avviene mediante reazioni di *condensazione* tra due monomeri, in cui vengono rimossi un gruppo ossidrilico (OH) da un monomero e un idrogeno dall'altro monomero. La condensazione porta pertanto alla rimozione di una molecola di acqua (viene chiamata *dehydration synthesis* in inglese). Il processo inverso in cui monomeri vengono disassemblati richiede, di fatto, l'addizione di una molecola d'acqua e viene chiamato *idrolisi*.

Esistono quattro tipi di macromolecole biologiche: carboidrati, lipidi, proteine e acidi nucleici. Li descriviamo brevemente.

### CARBOIDRATI

I *carboidrati* sono un gruppo di molecole con formula empirica generalmente del tipo  $C_n(H_2O)_m$ . Essi rappresentano la sorgente primaria di energia chimica per molti organismi, ricavata dalla rottura dei legami C–H. In certi tipi di organismi i carboidrati svolgono anche funzioni di supporto strutturale.

I carboidrati più semplici sono detti *monosaccaridi* e hanno formula del tipo  $(CH_2O)_n$  con  $n$  tra 3 e 8. Tipici esempi sono gli zuccheri. Quelli che giocano un ruolo centrale per produzione di energia hanno  $n = 6$ . Gli zuccheri vengono usati per l'utilizzo immediato di energia. Un esempio di zucchero è il glucosio, che ha una struttura lineare, ma forma un anello in soluzione. Di particolare interesse è uno zucchero a 5 carboni (D-ribosio) che, come vedremo, è un costituente fondamentale degli acidi nucleici.

I *disaccaridi* si ottengono dalla condensazione di due monosaccaridi. Grazie al fatto che non sono solubili, sono usati per *trasportare* energia senza consumarla immediatamente.

I *polisaccaridi* sono macromolecole che si ottengono dalla polimerizzazione di monosaccaridi. Non sono solubili e sono pertanto utilizzabili per *immagazzinare* energia. Gli amidi sono un esempio di polisaccaridi con funzione di riserva di energia. La cellulosa è un esempio di polisaccaride con funzione strutturale nelle piante.

### LIPIDI

I *lipidi*, o grassi, sono una classe eterogenea di composti organici che hanno proprietà comuni di solubilità, tra cui quella di non essere solubili in acqua in quanto *molecole non polari*. Il rapporto H:O nei lipidi è molto maggiore di 2:1, il valore tipico dei carboidrati. Questo è dovuto al fatto che i lipidi contengono un numero di legami C–H maggiore rispetto ai carboidrati. Hanno pertanto un alto grado di saturazione. Il gran numero di legami C–H fa

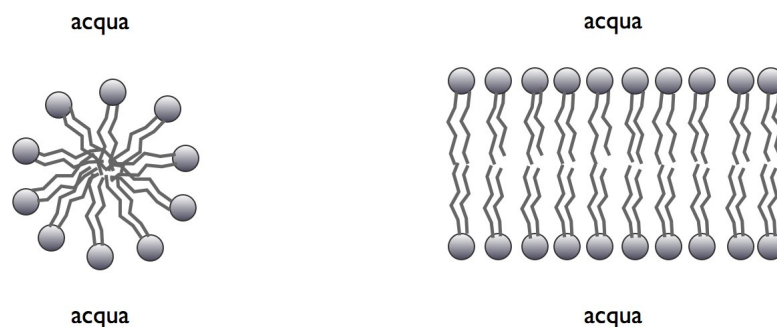


Figura 1.4: Esempi di formazione spontanea di strutture di fosfolipidi immersi in ambiente acquoso. Le teste di fosfato, schematizzate mediante cerchi, si dispongono verso l'acqua, mentre le code di lipidi vengono isolate. Figura a sinistra: schema di una micella. Figura a destra: doppio strato.

sì che i lipidi siano ideali per immagazzinare *riserve* di energia: tale è in effetti uno dei ruoli principali che essi giocano negli organismi viventi.

Un tipo di lipidi di particolare interesse biologico sono i *fosfolipidi*, costituiti da una testa a base di fosfato e una coda di lipidi. L'estremità di fosfato è polare quindi idrofila, mentre l'altra estremità di lipidi è non polare, e quindi idrofobica. Tale tipo di struttura *anfifilica* ci offre un esempio di come un sistema chimico, anche non vivente, possa auto-organizzarsi. Infatti se mettiamo fosfolipidi in acqua, le molecole d'acqua tenderanno ad associarsi con le estremità idrofile mentre tenderanno ad isolare le estremità idrofobiche. In tal modo si formerebbero spontaneamente strutture organizzate come quelle schematizzate in Fig. 1.4. Un esempio sono le *micelle*, *strutture sferiche* con le teste polari disposte verso l'esterno acquoso e le code non polari racchiuse nell'interno (a sinistra nella figura). Un altro esempio, fondamentale in biologia, sono le *strutture a doppio strato* (*bilayers*), con le teste di ciascuno strato disposte verso l'esterno acquoso, e le code disposte verso l'interno (a destra nella figura). Le membrane cellulari degli attuali organismi terrestri sono doppi strati di fosfolipidi.

È importante tener presente che, anche in assenza di fosfati, è possibile la formazione di molecole di lipidi con proprietà anfifiliche. Infatti qualsiasi acido grasso, con un gruppo OH polare, è anfifilico e può quindi dar luogo alla formazione spontanea di micelle e doppi strati. Tali molecole, più semplici dei fosfolipidi, potrebbero aver giocato un ruolo importante nelle prime strutture biologiche e nell'origine della vita.

## AMMINOACIDI E PROTEINE

Le proteine sono macromolecole ottenute dalla polimerizzazione di amminoacidi. Un *amminoacido* è un composto che contiene sia un gruppo carbossilico, COOH, che un gruppo

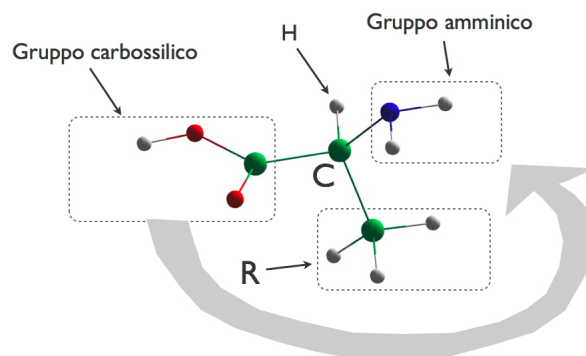


Figura 1.5: Struttura della L-alanina,  $\alpha$ -amminoacido con catena laterale  $R = CH_3$ . Per distinguere il tipo di chiralità si procede nel seguente modo: (1) immaginiamo che l'atomo di H laterale si trovi lontano dall'osservatore; (2) vediamo in che verso (orario o anti-orario) sono disposti, rispettivamente, il gruppo carbossilico, la catena laterale R e il gruppo amminico (regola mnemonica "CORN"). Nell'esempio la freccia congiunge tali gruppi in senso antiorario e pertanto la simmetria è di tipo L. Nella D-alanina gli stessi gruppi sarebbero disposti in senso orario.

amminico,  $NH_2$ . Gli amminoacidi hanno proprietà acide in corrispondenza del gruppo carbossilico e proprietà basiche in corrispondenza del gruppo amminico. Si conoscono migliaia di amminoacidi, ma i più importanti in biologia sono gli  $\alpha$ -amminoacidi, in quanto sono i monomeri da cui si costruiscono le *proteine*. Gli  $\alpha$ -amminoacidi sono costituiti da un C centrale, il gruppo amminico, il gruppo carbossilico, un idrogeno e infine da una gruppo laterale, R, che cambia nei diversi tipi di amminoacidi (Fig. 1.5). Facendo variare il gruppo laterale è possibile ottenere migliaia di amminoacidi. Tuttavia nei sistemi biologici gli amminoacidi che costituiscono le proteine sono soltanto 20. Li elenchiamo nella Tabella 1.1.

Nella sintesi delle proteine il gruppo amminico di un amminoacido, si lega al gruppo ossidrilico dell'amminoacido successivo formando un *legame peptidico*. In tale reazione di condensazione si libera una molecola d'acqua. Nel processo inverso di idrolisi le proteine vengono separate in singoli amminoacidi assorbendo molecole d'acqua.

Le proteine si ripiegano formando strutture secondarie, quali le *alpha helices* e *beta sheets*. La ripetizione regolare di legami idrogeno nella struttura portante degli amminoacidi permette interazioni lungo i filamenti che promuovono la formazione di tali strutture.

Catene di poche decine di amminoacidi vengono chiamate *polipeptidi*. Le proteine sono formate da un gran numero di catene polipeptidiche. Le masse molecolari di una proteina variano tra  $\approx 10^3$  a  $\approx 10^6$  unità di massa atomica. Le proteine sono utilizzate per molti scopi: per la struttura, trasporto, immunoglobine, enzimi. Questi ultimi fungono da catalizzatori di reazioni biochimiche poco favorite dal punto di vista energetico. Le proteine contribuiscono a circa il 50% della massa di una cellula.

Tabella 1.1: I 20 amminoacidi utilizzati nella sintesi delle proteine. Sono elencati in quattro gruppi separati, sulla base delle proprietà chimiche della catena laterale R. Questi amminoacidi sono codificati dal codice genetico mediante i codoni indicati nell'ultima colonna. Esistono alcuni altri amminoacidi biologici diversi da questi, ma non utilizzati dalle proteine e non codificati dal codice genetico.

| Amminoacido      | Sigla | Catena Laterale | Codoni                       |
|------------------|-------|-----------------|------------------------------|
| Alanina          | Ala A | Non polare      | GCU, GCC, GCA, GCG           |
| Glicina          | Gly G |                 | GGU, GGC, GGA, GGG           |
| Isoleucina       | Ile I |                 | AUU, AUC, AUA                |
| Leucina          | Leu L |                 | UUA, UUG, CUU, CUC, CUA, CUG |
| Metionina        | Met M |                 | AUG                          |
| Fenilalanina     | Phe F |                 | UUU, UUC                     |
| Prolina          | Pro P |                 | CCU, CCC, CCA, CCG           |
| Triptofano       | Trp W |                 | UGG                          |
| Valina           | Val V |                 | GUU, GUC, GUA, GUG           |
| Asparagina       | Asn N | Polare          | AAU, AAC                     |
| Glutamina        | Gln Q |                 | GAA, GAG                     |
| Serina           | Ser S |                 | UCU, UCC, UCA, UCG           |
| Treonina         | Thr T |                 | ACU, ACC, ACA, ACG           |
| Acido aspartico  | Asp D | Acida           | GAU, GAC                     |
| Acido glutammico | Glu E |                 | GAA, GAG                     |
| Cisteina         | Cys C |                 | UGU, UGC                     |
| Tirosina         | Tyr Y |                 | UAU, UAC                     |
| Arginina         | Arg R | Basica          | CGU, CGC, CGA, CGG, AGA, AGG |
| Istidina         | His H |                 | CAU, CAC                     |
| Lisina           | Lys K |                 | AAA, AAG                     |

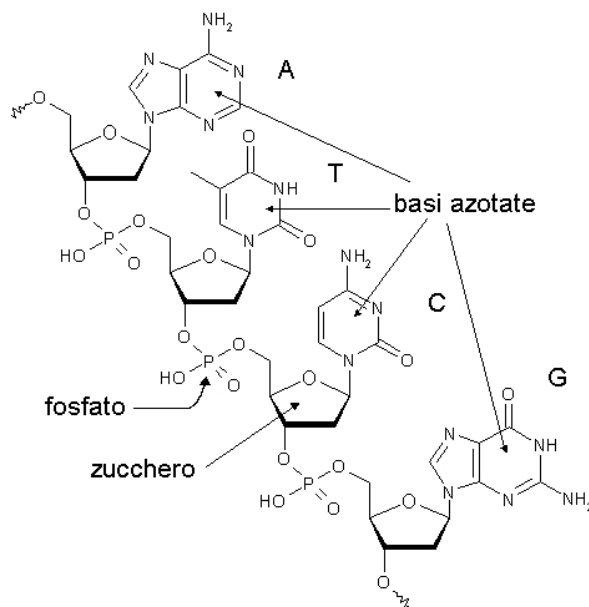


Figura 1.6: Sequenza dei quattro nucleotidi del DNA.

## ACIDI NUCLEICI

Gli acidi nucleici sono macromolecole ottenute dalla polimerizzazione di *nucleotidi*. Un nucleotide è a sua volta costituito da un *gruppo fosfato*, un *pentosio* e una *base azotata*.

Il pentosio è un monosaccaride con 5 atomi di carbonio. Nei nucleotidi vi sono due tipi di pentosio, il *ribosio* e il *deossiribosio*, che si differenziano unicamente per un atomo di ossigeno: nel deossiribosio vi è una terminazione H al posto di una OH.

Le basi azotate sono, più precisamente, anelli eterociclici aromatici. Un anello aromatico è una struttura di atomi di carbonio fortemente insatura con elettroni condivisi, simile alla molecola del benzene. Eterociclico significa che nell'anello alcuni atomi di carbonio sono sostituiti da un altro elemento. Nel nostro caso l'azoto sostituisce alcuni atomi di carbonio e pertanto le basi vengono chiamate "azotate". Le basi azotate degli acidi nucleici sono di due tipi: le *purine*, formate da due anelli eterociclici aromatici, e le *pirimidine*, formate da un solo anello. Esempi delle basi azotate utilizzate negli acidi nucleici sono mostrate in Fig. 1.6.

Nella polimerizzazione dei nucleotidi si formano filamenti di acido nucleico il cui scheletro è costituito dai fosfati e dagli zuccheri. Le basi azotate sono attaccate in libera successione su tale scheletro (Fig. 1.6).

Esistono due tipi di acidi nucleici: l'*acido ribonucleico (RNA)* e l'*acido deossiribonucleico (DNA)*. Questi nomi derivano dal fatto che nell'RNA lo zucchero dei nucleotidi è il *ribosio*, mentre nel DNA lo zucchero è il *deossiribosio*. La principale differenza tra RNA e DNA è di tipo strutturale, il primo è costituito da un singolo filamento, mentre il secondo da un doppio filamento.

Per quanto riguarda le basi azotate i due acidi nucleici sono molto simili, pur mostrando una differenza anche sotto questo aspetto. Entrambi acidi usano quattro diverse basi: due pirimidine e due purine. Le due purine sono *guanina* e *adenina* per entrambi gli acidi. La differenza riguarda una delle due pirimidine: nell'RNA le pirimidine sono *citocina* e *uracile*, mentre nel DNA sono citosina e *timina*.

I due filamenti del DNA si avvolgono a doppia elica e sono complementari, nel senso che a ogni base di un filamento corrisponde una ben precisa base dell'altro. L'adenina e la timina sono basi complementari, così come la citosina e la guanina. Ciascuna di queste due coppie di basi è composta da una purina e una pirimidina e occupano uno spazio geometrico pressochè uguale. I due filamenti del DNA sono accoppiati mediante legami idrogeno presenti tra le basi complementari. La coppia di basi A-T è tenuta insieme da due legami idrogeno, mentre la coppia C-G da tre.

Gli acidi nucleici racchiudono l'informazione genetica, che è determinata dalla sequenza in cui le basi azotate sono disposte sullo scheletro di zuccheri e fosfati.

## Selettività della chimica biologica

### RAPPORTI ISOTOPICI

La chimica biologica utilizza il  $^{12}\text{C}$  ma non il  $^{13}\text{C}$ . Ne consegue che materiale organico processato da organismi viventi tende ad aumentare il rapporto  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  rispetto al valore dell'ambiente. Questo fatto è estremamente importante in astrobiologia perchè ci offre un metodo indiretto per rivelare presenza di attività biologica, presente o passata, a partire dalla misura del rapporto isotopico  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  di un campione di materiale. Anche il rapporto isotopico  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  può essere usato per cercare tracce di processi biologici mediante il confronto con un valore standard di riferimento non biologico.

### OMOCHIRALITÀ DELLE MOLECOLE BIOLOGICHE

I processi biologici sono estremamente selettivi riguardo alle possibili strutture tridimensionali delle molecole biologiche a parità di formula chimica. Molecole con la stessa formula ma diversa struttura tridimensionale si chiamano *isomeri*. Gli isomeri in cui gli atomi sono legati nello stesso ordine, ma che sono l'uno l'immagine speculare dell'altro si chiamano *enantiomeri*. Le *molecole chirali* sono enantiomeri non sovrapponibili alla propria immagine speculare, in quanto dotate di uno o più centri di asimmetria<sup>2</sup>.

Una parte importante della chimica biologica è basata su molecole chirali che presentano un solo tipo di enantiomero. Si parla in tal caso di *omochiralità* delle molecole biologiche.

---

<sup>2</sup>Il termine chirale deriva dalla parola greca (*cheir*) che significa mano, in quanto ciascuna delle nostre mani è chirale. La chiralità si incontra anche in comuni oggetti tridimensionali, come una vite e un'elica.

L'esempio più significativo di omochiralità è quello degli amminoacidi, sebbene vi siano esempi anche tra i carboidrati.

Gli amminoacidi proteici hanno uno stesso tipo di simmetria, chiamata L, rispetto al carbonio centrale, che è il centro di asimmetria (Fig. 1.5). Fa eccezione la glicina il cui carbonio centrale non è un centro di asimmetria: infatti nella glicina il gruppo R è costituito da un idrogeno, che è pertanto simmetrico rispetto all'idrogeno che si trova al lato opposto del gruppo R.

Un composto chimico di molecole chirali si dice *racemico* se contiene le stesse proporzioni di entrambi gli enantiomeri. I composti di origine non biologica sono solitamente racemici, mentre quelli biologici contengono un *eccesso enantiomerico*. In linea di principio l'omochiralità permette di distinguere tra composti di origine biologica e non biologica. La chiralità delle molecole può essere misurata da misure di polarizzazione.

## Acquisizione e scambio di energia

Gli organismi viventi necessitano di un costante approvvigionamento di energia per sostenere il proprio metabolismo, per mantenere basso il proprio livello di entropia e, in generale, per svolgere lavoro. Sulla base di come acquisiscono energia, gli organismi terrestri possono distinguersi in autotrofi ed eterotrofi. Gli *organismi autotrofi* acquisiscono autonomamente energia dall'ambiente esterno non biologico. Gli *organismi eterotrofi* acquisiscono energia dalle molecole organiche assimilate mediante ingestione di organismi autotrofi. Le piante sono un esempio di organismi autotrofi, gli animali di organismi eterotrofi.

Nel secondo capitolo vedremo in che modo gli organismi autotrofi terrestri acquisiscono energia dall'ambiente.

### MOLECOLE USATE NEGLI SCAMBI ENERGETICI

Le molecole adenosina difosfato (ADP) e adenosina trifosfato (ATP) sono utilizzati negli scambi energetici del metabolismo. La struttura di tali molecole è mostrata in Fig. 1.7. Entrambe sono composte di tre elementi: (1) una base azotata, (2) uno zucchero pentosio, (3) due o tre gruppi fosfato. La base azotata non è altro che l'adenina e pertanto ADP e ATP sono simili a nucleotidi di adenina cui vengono aggiunti uno o due gruppi fosfati.

Nei processi metabolici si aggiunge un gruppo fosfato all'ADP quando serve immagazzinare energia e, viceversa, si toglie un fosfato all'ATP quando serve rilasciare energia.

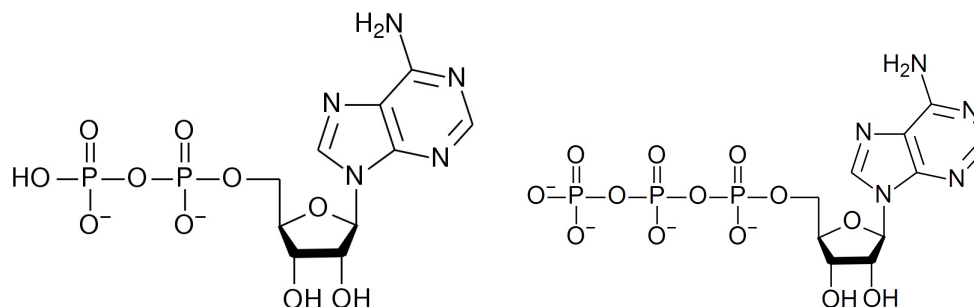


Figura 1.7: Struttura molecolare dell'adenosina difosfato, a sinistra, e dell'adenosina trifosfato, a destra.

## Proprietà genetiche

### CODICE GENETICO

Come abbiamo visto, gli acidi nucleici hanno 4 diversi tipi di basi azotate che possono essere disposte in sequenza lungo i loro filamenti senza particolari vincoli chimici. L'ordine della sequenza non è casuale, ma serve bensì a identificare i 20 amminoacidi proteici mediante un codice, chiamato *codice genetico*. Il codice consiste di triplette di basi adiacenti chiamate *codoni*. Ciascun codone identifica un unico amminoacido, come indicato nell'ultima colonna della tabella 1.1, in cui riportiamo come esempio le 4 basi dell'RNA (Adenina, Citosina, Guanina e Uracile). La corrispondenza tra codone e amminoacido non è però biunivoca: uno stesso amminoacido può essere identificato da diversi codoni. Ciò che conta è che ogni codone identifichi un ben determinato tipo di amminoacido.

Grazie all'esistenza del codice genetico la sequenza di amminoacidi che permette di sintetizzare una determinata proteina può essere codificata mediante un'opportuna sequenza di codoni. Esistono poi codoni che funzionano come segnale d'inizio sequenza (ad esempio AUG) e codoni servono a dare il segnale di fine sequenza (UAA, UAG e UGA) per la sintesi della proteina.

In generale solo una parte degli acidi nucleici codifica proteine. Ad esempio nell'uomo esistono delle porzioni di acido nucleico non codificanti, chiamate *intron*i, la cui funzione è tuttora oggetto di studio. Le regioni codificanti, chiamate *eson*i, costituiscono una piccola parte del patrimonio genetico umano.

### SEQUENZE GENETICHE E CLASSIFICAZIONE DEGLI ORGANISMI

Le tecniche di microbiologia permettono di confrontare le sequenze genetiche di organismi appartenenti a diverse specie per classificarli sulla base del loro grado di parentela genetica, anziché sulla sola base della loro somiglianze morfologiche. Tale tipo di classificazione ha rivoluzionato le nostre conoscenze degli organismi unicellulari, che sono i più diffusi, portando alla scoperta di un nuovo dominio della vita, gli *archaea*, o archeobatteri [126]. Gli *archaea* sono

organismi unicellulari che inizialmente venivano classificati come batteri con caratteristiche peculiari. La classificazione basata su sequenze genetiche distingue ora tre tipi di organismi unicellulari: gli *archeobatteri*, gli *eubatteri* e gli *eucarioti*. Per i nostri scopi ci limitiamo per il momento a menzionare che gli archeobatteri ed eubatteri, collettivamente chiamati *procarioti*, hanno una struttura più semplice e minori dimensioni rispetto agli eucarioti. Gli organismi multicellulari hanno cellule eucariotiche. Queste nozioni ci serviranno quando accenneremo all'origine ed evoluzione degli organismi terrestri nei prossimi capitoli.

## GENI E CROMOSOMI

Un *gene* è una sequenza di codice genetico, ovverosia una successione di codoni, che definisce una funzione specifica. Ad esempio, una sequenza preposta alla produzione di una particolare proteina è un gene. Dal punto di vista fisico un gene richiede un certo spazio atto a immagazzinare l'informazione in esso contenuta. Ciascun nucleotide occupa una lunghezza di circa 0.34 nm. Poiché la quantità d'informazione da immagazzinare è estremamente elevata, il filamento di DNA può contenere milioni di nucleotidi, o addirittura centinaia di milioni nel caso dell'uomo. Pertanto un filamento di DNA si può sviluppare in lunghezza per  $\sim 10^2 \mu\text{m}$  o addirittura  $10^4 \mu\text{m}$ . Tali lunghezze sono maggiori delle tipiche dimensioni delle cellule in cui i filamenti stessi sono racchiusi: le cellule dei procarioti misurano  $\simeq 1 - 10 \mu\text{m}$  e quelle, più complesse, degli eucarioti  $\simeq 10 - 100 \mu\text{m}$ . Per poter essere contenuto in tali dimensioni i filamenti degli acidi nucleici si avvolgono su se stessi. L'avvolgimento avviene su vari livelli di struttura. Ad un primo livello sono coinvolte delle proteine, dette "nucleosomi", attorno alle quali si avvolge il filamento. Vi sono poi altri livelli di ripiegamento e avvolgimento che servono a compattare il filamento nelle tre dimensioni. I livelli superiori di avvolgimento portano alla formazione dei *cromosomi* e sono presenti solo negli organismi più complessi.

## NATURA DIGITALE DEL CODICE E CONTENUTO D'INFORMAZIONE

La struttura portante degli acidi nucleici dipende unicamente dai legami tra gli zuccheri e i gruppi fosfato (Fig. 1.6). L'ordine in cui le basi azotate si dispongono su tale struttura non è vincolato da leggi chimiche. La sequenza delle basi, che contiene l'informazione genetica, può pertanto svilupparsi liberamente, così come il segnale digitale in un *compact disc* è svincolato dal substrato fisico su cui è inciso. È interessante riflettere sul fatto che il codice genetico, basato su una sequenza di triplette, è chiaramente un *codice digitale* [35]. Grazie a questo fatto i processi di trascrizione delle istruzioni sono sostanzialmente privi di errore.

È facile calcolare la capacità di informazione immagazzinabile in un acido nucleico. Tenendo conto che ogni base azotata porta 2 bit di informazione, in quanto può essere di  $2^2$  tipi diversi, un acido nucleico di un semplice microorganismo con  $\approx 10^6$  nucleotidi avrà, ad esempio, una capacità di 250 kB (1 Byte = 8 bit). Un cromosoma umano con  $\approx 10^8$  nucleotidi avrà una capacità di 25 MB. Tale capacità è estremamente elevata se rapportata al volume occupato dai filamenti di DNA. Infatti si può facilmente stimare che la massima capacità

di informazione per unità di volume<sup>3</sup> di un filamento compattato di DNA è dell'ordine dei  $10^{15}$  GB/mm<sup>3</sup>. Questo valore è di molti ordini di grandezza maggiore rispetto alla capacità di informazione immagazzinabile in supporti informatici attualmente utilizzati commercialmente. Gli organismi viventi hanno dunque un altissimo contenuto d'informazione.

## 1.2 La vita fuori dalla Terra: requisiti e vincoli

Al momento attuale l'unica forma di vita che conosciamo è quella terrestre. Tale limitazione è un punto critico dell'astrobiologia in quanto la mancanza di esempi di vita extraterrestre rende arduo progettare esperimenti atti alla sua rivelazione. L'approccio comunemente adottato in astrobiologia è quello di considerare la vita che conosciamo (*life-as-we-know-it*) come riferimento per ricerche di altri tipi di vita. Questo approccio è per certi versi sicuro, in quanto sappiamo che la vita terrestre esiste, e dunque vita dello stesso tipo potrebbe esistere in altri ambienti con condizioni adeguate. Il fatto che conosciamo in dettaglio la vita terrestre ci aiuta poi a progettare esperimenti atti alla sua rivelazione.

D'altra parte è chiaro che l'approccio *life-as-we-know-it* non è soddisfacente in quanto lascia il dubbio che altre forme di vita possano sfuggire alla nostra rivelazione in quanto dotate di caratteristiche diverse da quelle terrestri. È pertanto necessario cercare di generalizzare, per quanto possibile, il concetto di vita a situazioni diverse da quella terrestre. A tal scopo serve una definizione generale che ci permetta di dedurre che requisiti debbano avere forme di vita eventualmente presenti in altri ambienti.

### Definizioni di interesse astrobiologico

Per stabilire che requisiti debba avere un sistema fisico, terrestre o non terrestre, per essere considerato vivente è opportuno prendere in considerazione gli aspetti essenziali della vita, senza entrare in dettagli che potrebbero essere specifici della sola vita terrestre. A tal scopo, in ambito astrobiologico sono frequentemente utilizzate delle definizioni di vita introdotte unicamente per motivi pratici. Consideriamo, a titolo di esempio, due di tali definizioni, sottolineando che tali definizioni sono da intendersi unicamente come possibili definizioni operative, non avendo pretese di rigore epistemologico.

La più conosciuta di tali definizioni di lavoro è stata introdotta da Gerald Joyce [60] e viene spesso utilizzata come definizione (operativa) utilizzata dalla NASA:

*La vita è un sistema chimico che si auto-sostiene e che è capace di evolvere mediante selezione naturale.*

---

<sup>3</sup>Il volume occupato dal filamento compattato è stato calcolato tenendo conto che il diametro (spessore) dell'elica del DNA è di  $\simeq 2.2$  nm e il passo tra successive paia di basi è di  $\simeq 0.34$  nm.

Come chiarito da Antonio Lazcano [72] il fatto che il sistema si auto-sostiene è da intendersi nel senso che il sistema stesso trasforma risorse ambientali per costruire le proprie parti. La parte evolutiva della definizione, racchiusa nel concetto di selezione naturale, è quella che, secondo alcuni autori [72], potrebbe maggiormente distinguere la vita rispetto al mondo non biologico. Purtroppo l'aspetto evolutivo non ha una grossa utilità pratica per la rivelazione di forme di vita eventualmente presenti nell'Universo. La prima parte della definizione, che mette in risalto la vita come fenomeno chimico, è quella che può fornire indicazioni concrete sulla rivelazione di sistemi viventi. Purtroppo l'aspetto puramente chimico è può dare risultati ambigui all'atto di dover discriminare tra fenomeni di origine biologica e non biologica.

È bene chiarire che, per ragioni di concisione, alcune definizioni di vita date in maniera sintetica tendono a non distinguere esplicitamente le proprietà dei singoli organismi da quelle di una popolazione. Ad esempio, nella definizione di cui sopra le caratteristiche chimiche si riferiscono ai singoli individui, mentre la selezione naturale si riferisce necessariamente a una popolazione di individui di una data specie, analizzata nel corso di diverse generazioni.

La seconda definizione di uso astrobiologico che citiamo come esempio è quella introdotta da Schulze-Makuch e collaboratori [104], che pone in risalto gli aspetti termodinamici dei sistemi viventi:

*La vita è: (1) composta di microambienti confinati che si trovano in disequilibrio termodinamico con il loro ambiente esterno; (2) capace di trasformare l'energia e l'ambiente per mantenere un basso livello di entropia; (3) capace di codificare e trasmettere informazione.*

Il riferimento ai microambienti confinati è una generalizzazione del concetto di cellula degli organismi terrestri, che è delimitata e microscopica. Il fatto di porre il requisito che gli "ambienti confinati" debbano essere microscopici può sembrare troppo specifico della vita terrestre. In realtà, come vedremo, vi sono motivi per ritenere che le dimensioni ottimali delle cellule debbano essere, in generale, microscopiche.

Vediamo quali vincoli termodinamici e chimici possiamo dedurre a partire dai requisiti da noi richiesti all'atto di generalizzare la vita di tipo terrestre.

## Requisiti termodinamici

Storicamente le leggi della termodinamica sono state ricavate senza fare ipotesi sulla struttura della materia a livello microscopico. La loro validità generale ci permette pertanto di porre vincoli sul comportamento, dal punto di vista termodinamico, di qualsiasi tipo di sistemi viventi, pur senza conoscerne la loro costituzione microscopica. Tali vincoli devono essere soddisfatti quali che siano le strutture chimiche specifiche di eventuali forme di vita non terrestri. Tali vincoli, a loro volta, ci permettono di trarre delle conclusioni riguardo ai requisiti di abitabilità, dal punto di vista delle variabili termodinamiche, di un qualsiasi ambiente nell'Universo.

È bene ricordare, come già accennato, che le considerazioni termodinamiche non possono da sole spiegare l'emergenza di un fenomeno così complesso come quello della vita [95]. Pertanto, le leggi termodinamiche, sebbene utili a definire i requisiti di abitabilità di un dato ambiente astronomico assumendo che la vita sia ivi presente, non ci permetteranno, da sole, di decidere se la vita possa o no essere effettivamente emersa in tale ambiente.

Vediamo, nella pratica, come possiamo vincolare il comportamento dei sistemi viventi dal punto di vista termodinamico. Come qualsiasi altro sistema fisico, richiediamo che i sistemi viventi obbediscano alle leggi della termodinamica e, in particolare, alla seconda legge delle termodinamica. Nel corso di un processo termodinamico l'entropia del sistema vivente,  $S_{\text{sist}}$ , e dell'ambiente circostante,  $S_{\text{amb}}$ , cambieranno rispettivamente di una quantità  $\Delta S_{\text{sist}}$  e  $\Delta S_{\text{amb}}$ . Se chiamiamo  $S_{\text{univ}}$  l'entropia totale del sistema e dell'ambiente, la seconda legge della termodinamica ci dice che in un processo spontaneo deve valere la disuguaglianza

$$\Delta S_{\text{univ}} = \Delta S_{\text{sist}} + \Delta S_{\text{amb}} > 0 \quad . \quad (1.1)$$

È utile esprimere le relazioni termodinamiche in termini di proprietà del sistema, anziché dell'ambiente esterno, e in termini dell'entalpia,  $H = U + pV$ , che dipende dall'energia interna del sistema,  $U$ . Prendiamo in considerazione un ipotetico processo che avvenga a temperatura e pressione costanti e con un trascurabile lavoro pressione-volume  $pV$ . Questo processo produce una variazione di calore,  $\Delta q_p$ , uguale alla variazione di entalpia del sistema,  $\Delta q_p = \Delta H_{\text{sist}}$ . La variazione di calore dell'ambiente è uguale ed opposta, ovverosia  $\Delta q_{\text{amb}} = -\Delta q_p = -\Delta H_{\text{sist}}$ . Se l'ambiente è sufficientemente grande, il processo di scambio di calore con esso può essere considerato *reversibile*, cioè la variazione di calore produce una variazione infinitesima della temperatura dell'ambiente. In questo caso la relazione  $\Delta S = \Delta q/T$ , che vale per processi reversibili, ci dà la variazione di entropia dell'ambiente<sup>4</sup>  $\Delta S_{\text{amb}} = -\Delta H_{\text{sist}}/T$ . Sostituendo questo valore nell'Eq. (1.1) e moltiplicando per  $-T$  si ha

$$-T\Delta S_{\text{univ}} = \Delta H_{\text{sist}} - T\Delta S_{\text{sist}} \quad . \quad (1.2)$$

Nella parte a destra di quest'equazione appaiano solamente termini riferiti al sistema; nella parte a sinistra compare il termine  $\Delta S_{\text{univ}}$  il cui segno ci permette di decidere se una variazione è spontanea. L'Eq. (1.2) viene rappresentata generalmente in un'altra forma, introducendo una funzione termodinamica chiamata *energia libera di Gibbs*, definita mediante equazione  $G = H - TS$ . Per un processo a temperatura costante la variazione di energia libera è

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad . \quad (1.3)$$

Tutti i termini di questa equazione si riferiscono ora al sistema. Confrontando le ultime due equazioni si vede che quando  $\Delta S_{\text{univ}}$  è positivo,  $\Delta G$  è negativo. Questo ci fornisce un criterio basato sulle sole proprietà del sistema per decidere se una reazione sarà spontanea: per un processo che avviene a  $P$  e  $T$  costanti, il processo è spontaneo se  $\Delta G < 0$ , non spontaneo se  $\Delta G > 0$ , e all'equilibrio se  $\Delta G = 0$ .

<sup>4</sup>Non sarebbe possibile sostituire  $\Delta H_{\text{sist}}/T$  con  $\Delta S_{\text{sist}}$ : se il processo in esame è spontaneo, esso è un processo *irreversibile*; la relazione  $\Delta S = \Delta q/T$  vale se lo scambio di calore  $\Delta q$  è reversibile.

Il significato dei due termini a destra nell'Eq. (1.3) è il seguente. Il primo tiene in conto dell'energia interna del sistema, e quindi dell'energia dei legami che tengono insieme gli atomi nelle molecole. Il secondo rappresenta l'energia termica, che viceversa tende a separare gli atomi. Pertanto l'Eq. (1.3) ci dice che l'energia disponibile per fare lavoro è uguale all'energia contenuta nei legami chimici delle molecole (l'entalpia) meno l'energia termica totale alla temperatura  $T$ , che non è disponibile a causa del disordine.

La validità delle relazioni termodinamiche in processi biochimici può essere provata sperimentalmente. Un esempio è quello della liberazione di calore che si ha quando vengono mescolate soluzioni contenenti filamenti di DNA con sequenze complementari. I filamenti interagiscono tra loro formando spontaneamente doppie eliche. Questo processo porta a una diminuzione dell'entropia del sistema, per cui deve essere rilasciato calore verso l'ambiente, per non violare la seconda legge della termodinamica. Misure quantitative confermano questo comportamento e permettono di stimare la variazione di entalpia del processo [3].

#### CONSIDERAZIONI SULLA CINETICA DELLE REAZIONI

È bene tener presente che il valore di  $\Delta G$  non dà alcuna indicazione sulla velocità delle reazioni. Per le reazioni chimiche, quali quelle biologiche, la velocità di reazione descrive la variazione temporale di concentrazione dei reagenti e dei prodotti di reazione. Lo studio delle velocità delle reazioni va sotto il nome di cinetica chimica. Secondo alcuni autori l'aspetto cinetico svolge un ruolo predominante rispetto agli aspetti puramente termodinamici, al punto da venir considerato la chiave per comprendere l'emergenza della vita [95].

#### INFORMAZIONE, ENTROPIA, ENERGIA

Una caratteristica fondamentale dei sistemi viventi è il loro alto contenuto di informazione. Come abbiamo visto, nella vita terrestre la capacità di immagazzinamento di informazione in un acido nucleico è superiore di parecchi ordini di grandezza di quella dei dispositivi tecnologici più avanzati costruiti dall'uomo. È ragionevole pensare che qualsiasi forma di vita debba contenere un'alta quantità di informazione atta a guidare il proprio metabolismo e la propria riproduzione. Per creare tale informazione è necessario disporre delle molecole particolari in un ordine ben preciso ed è pertanto necessario diminuire l'entropia del sistema. Anche nello svolgimento delle funzioni metaboliche e di riproduzione i sistemi viventi evolvono, generalmente, verso configurazioni ordinate. Si pensi ad esempio alla sintesi di una proteina, che è una sequenza precisa di amminoacidi, o alla riproduzione cellulare, in cui i sistemi riprodotti devono essere altrettanto ordinati di quelli della precedente generazione. Pertanto anche durante tali processi si ha, in generale, una diminuzione dell'entropia del sistema.

La necessità di mantener basso il proprio livello di entropia implica che il sistema vivente deve costantemente assumere energia. Tale acquisizione costante di energia non può avvenire che dall'esterno. Tale energia serve anche per mantenere attiva la propria rete di reazioni chimiche (metabolismo) e per svolgere lavoro (ad esempio movimento nell'ambiente). Ne

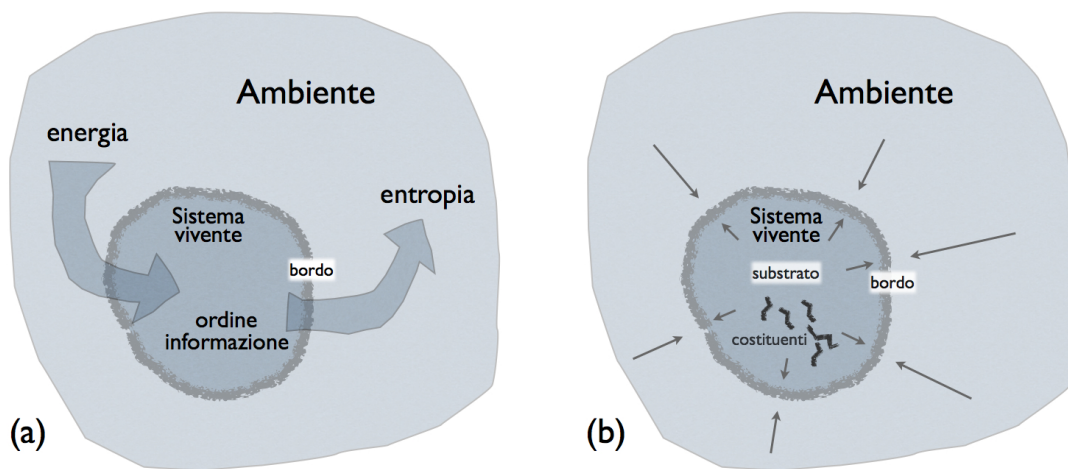


Figura 1.8: (a) I sistemi viventi mantengono un altissimo livello di ordine e contenuto di informazione utilizzando energia presa dall'ambiente e disperdendo entropia nell'ambiente; devono essere dotati di un bordo che, in maniera selettiva, assorbe energia ed emette entropia, mantenendo un disequilibrio con l'ambiente. (b) I sistemi viventi contengono un substrato fluido che permette mobilità e capacità di aggregazione ai propri costituenti; il bordo è supportato internamente dalla pressione del substrato ed esternamente dalla pressione dell'ambiente.

discende che *qualsiasi sistema vivente deve essere aperto da un punto di vista termodinamico per poter acquisire energia dall'esterno*. Allo stesso tempo, l'unico modo in cui il sistema vivente può diminuire la propria entropia è quello di aumentare l'entropia dell'ambiente esterno. Ne discende che *qualsiasi sistema vivente deve essere aperto da un punto di vista termodinamico per poter disperdere entropia verso l'esterno*.

Queste conclusioni sono valide in generale, qualunque siano i costituenti microscopici del sistema (atomi e molecole) e qualunque siano i processi in esso in atto (reazioni chimiche). Nessuna ipotesi è stata fatta neppure riguardo al modo in cui il sistema vivente assorbe energia o emette entropia. L'acquisizione di energia potrebbe avvenire mediante assorbimento di fotoni o ingestione di materia; l'emissione di entropia mediante emissione di calore (irradiazione nell'infrarosso termico) o espulsione di molecole che aumentano il disordine esterno.

Il requisito che i sistemi viventi siano aperti da un punto di vista termodinamico viene spesso utilizzato per *definire* la vita. Per quanto detto sopra, tale requisito può essere invece considerato come una *conseguenza* delle altre due proprietà che definiscono la vita, il metabolismo e la riproduzione.

Le considerazioni di cui sopra implicano che *qualsiasi sistema vivente è parte integrante di un ciclo termodinamico con il proprio ambiente: ne dipende e al tempo stesso lo influenza*. Poichè il sistema vivente trae energia e materia dall'ambiente ne consegue che (1) *la caratterizzazione di un sistema vivente richiede la conoscenza delle condizioni del suo ambiente*. Poichè il sistema vivente disperde entropia ne consegue che (2) *le condizioni dell'ambiente*

*sono necessariamente influenzate dalla presenza di sistemi viventi.* Entrambe queste conclusioni sono importanti ai nostri fini. La prima sta' alla base del concetto di *ambiente abitabile* che approfondiremo nel prossimo capitolo. La seconda ci dice che, in linea di principio, è possibile rivelare indirettamente la presenza di vita mediante gli effetti che essa produce sull'ambiente. Questo concetto sta' alla base della ricerca di *biomarcatori*, che tratteremo nel capitolo finale di questi appunti.

È bene precisare che i sistemi viventi non vivono, in generale, isolati. Pertanto il concetto di "ambiente" nelle conclusioni di cui sopra non si riferisce necessariamente a un ambiente abiotico (privo di vita), ma include, in generale, altri sistemi viventi. Nel caso di una cellula che si trovi all'interno di un organismo multicellulare l'ambiente è puramente biotico.

Per concludere queste considerazioni su informazione ed entropia è opportuno notare che, in assenza in un alto contenuto di informazione, un basso livello di entropia non è, di per se', indicativo di vita. Un esempio di sistemi con entropia bassa ma poco contenuto di informazione sono i cristalli. Infatti la disposizione degli atomi in un cristallo non è altro che una ripetizione regolare di una semplice unità strutturale. Per descrivere un cristallo basta quindi un semplice algoritmo che contenga l'istruzione di moltiplicare un certo numero di volte tale unità strutturale. Pertanto il contenuto di informazione dei cristalli è molto basso, a differenza di quanto accade, ad esempio, per gli acidi nucleici.

## REQUISITI STRUTTURALI

Diversi tipi di considerazioni suggeriscono la necessità di un substrato fluido per i sistemi viventi. Vediamone due.

(1) La capacità di separarsi dall'ambiente esterno implica che i sistemi viventi devono possedere una struttura di confine che li delimiti. Tale struttura deve avere la capacità di selezionare materia in entrata e in uscita, e di conservarsi stabilmente fintantoché l'organismo è vivente. Nella vita terrestre abbiamo visto che strutture di questo tipo, le membrane biologiche, si organizzano spontaneamente quando molecole anfifiliche, quali i fosfolipidi, sono immerse in un mezzo di molecole polari, quale l'acqua (Fig. 1.4). Dalla necessità di una struttura di confine discende pertanto il requisito della presenza di un mezzo fluido che abbia capacità di organizzare spontaneamente tale struttura. La pressione del fluido ha inoltre il compito di sostenere in equilibrio la struttura dall'interno bilanciando la pressione esterna.

(2) Nella vita di tipo terrestre le macromolecole biologiche sono costantemente assemblate o disassemblate come parte dei processi metabolici e riproduttivi. Possiamo generalizzare questo concetto, senza riferirci in particolar modo alle macromolecole della vita terrestre, affermando che qualsiasi forma di vita deve poter costantemente assemblare o disassemblare i suoi costituenti come parte dei suoi processi vitali. A tal scopo deve esistere un mezzo nel quale i costituenti possano dissolversi, muoversi liberamente e interagire per assemblarsi. Un mezzo liquido con capacità di solvente è ideale per tali scopi. Lo stesso mezzo può, allo stesso tempo, mantenere organizzata la struttura di confine mediante la propria pressione.

Da queste considerazioni discende il seguente requisito: *i sistemi viventi devono contenere un substrato liquido che ha la funzione di dissolvere i propri costituenti, di permetterne la mobilità e di permetterne l'aggregazione in strutture sostenute dalla pressione del substrato stesso. Si può anche affermare che i processi vitali avvengono al confine tra una fase liquida, rappresentata dal proprio substrato, e una fase solida, rappresentata dalle strutture e i loro costituenti.*

## TEMPERATURA E PRESSIONE

La necessità che esista un mezzo che funzioni da substrato e, al tempo stesso, che tale mezzo si trovi in fase liquida è un requisito che ha notevoli implicazioni in campo astrobiologico. Da tale requisito discendono vincoli termodinamici ben precisi: *solo in un opportuno intervallo di temperatura e pressione il substrato della vita si troverà a essere in fase liquida.* Questa conclusione è fondamentale per la definizione di ambiente abitabile.

Il bordo dei sistemi viventi è sostenuto internamente dalla pressione del substrato ed esternamente dalla pressione dell'ambiente (Fig. 1.8b). In assenza di pressione esterna ciò non sarebbe possibile. Ne consegue che *l'ambiente in cui si trovano i sistemi viventi deve essere dotato di una pressione non nulla.* Anche questa conclusione è fondamentale per la definizione di ambiente abitabile.

## Vincoli sulla composizione chimica

La necessità di trasformare energia e materia ottenute dall'ambiente, di crescita e riproduzione pongono il requisito che la vita, ovunque essa si formi spontaneamente, debba aver capacità metaboliche. In accordo con altri autori [25], non prendiamo dunque in considerazione forme artificiali di vita prive di metabolismo. Vediamo dunque quali vincoli possiamo dedurre sulla base del requisito che la vita sia di tipo chimico.

Come spunto di partenza per queste considerazioni cerchiamo di capire se i principali costituenti chimici della vita terrestre, quali il carbonio e l'acqua, sono il risultato del caso o della necessità. Un approccio per affrontare questo tema consiste nel cercare di capire se tali costituenti godano di proprietà speciali rispetto ad altri possibili costituenti alternativi offerti dalla chimica. Se gli ingredienti chimici della vita terrestre non avessero proprietà particolari saremmo propensi a credere che la scelta di tali ingredienti sia stata casuale. Se invece avessero delle proprietà uniche, o comunque molto speciali, saremmo propensi a credere che la scelta sia stata necessaria. In quest'ultimo caso potremmo ritenere che gli ingredienti chimici della vita terrestre siano i più adatti, o forse gli unici, anche per altre forme di vita.

## ABBONDANZE CHIMICHE

La prima considerazione che si può fare riguarda l'abbondanza relativa degli elementi chimici nell'Universo. Se un elemento chimico fosse troppo raro difficilmente potrebbe essere utilizzato come base per la costruzione di un sistema vivente. Possiamo dunque per prima cosa chiederci se i più abbondanti elementi chimici della vita terrestre siano abbondanti nell'Universo oppure no. Per rispondere a questa domanda in Fig. 1.9 riportiamo a titolo di esempio le abbondanze solari [77]. Sebbene le abbondanze galattiche mostrino gradienti spaziali ed evoluzione temporale, le abbondanze solari sono abbastanza rappresentative di vari ambienti astronomici, al punto da essere talvolta chiamate "abbondanze cosmiche". Le abbondanze "cosmiche" mostrate in Fig. 1.9 ci mostrano che gli elementi più abbondanti nella biologia terrestre (CHON) sono tra i più abbondanti nell'Universo.

La prima conclusione che possiamo trarre è che forme di vita di tipo terrestre non avranno, in linea di principio, difficoltà a reperire i loro principali elementi chimici in altri ambienti dell'Universo. Questa conclusione, sebbene importante, non ci dice però che altre forme di vita debbano necessariamente utilizzare gli stessi elementi chimici. Cerchiamo dunque di capire se la vita terrestre ha "scelto" tali elementi solo sulla base della loro abbondanza, o perché, viceversa, sono gli elementi più adatti in assoluto a formare la vita, grazie alle loro particolari proprietà chimiche.

Un indizio che la seconda ipotesi sia quella corretta viene dal confronto delle abbondanze nel corpo umano e nella crosta terrestre, mostrato in Fig. 1.10. Si può vedere che uno dei più abbondanti elementi presenti sulla crosta terrestre, il silicio, non è entrato a far parte della biologia umana. Viceversa, uno dei più abbondanti elementi biologici, il carbonio, è poco abbondante sulla crosta terrestre. Poiché riteniamo che la vita che conosciamo sia nata sulla superficie terrestre, dove le abbondanze chimiche si erano differenziate rispetto a quelle solari, questo grafico ci indica che la vita ha scelto il carbonio piuttosto che il silicio, nonostante il secondo fosse più abbondante.

Questo confronto suggerisce che la scelta degli elementi chimici da parte della vita sia guidata da criteri legati alle loro particolari proprietà chimiche piuttosto che alla loro abbondanza. Ciò è per certi versi ovvio, dal momento che le proprietà della tavola periodica degli elementi ci indicano chiaramente che non tutti gli elementi sono adatti a formare strutture biologiche. Ad esempio, è ben noto che gli elementi dell'ultima colonna della tavola periodica, i cosiddetti "gas nobili", non hanno alcuna propensione a stabilire legami chimici, e sono quindi inadatti per qualsiasi tipo di chimica, compresa quella biologica. Il fatto che tali elementi, come ad esempio l'elio e il neon, non siano incorporati nella vita terrestre non è certamente un caso, ma un preciso risultato delle leggi della chimica.

Queste considerazioni ci fanno capire che, ragionando in termini di proprietà chimiche si può dedurre, entro certi limiti, se un determinato elemento sia adatto o meno a qualsiasi tipo di chimica biologica. Cerchiamo ora di capire quale elemento sia il più adatto come unità costitutiva di macromolecole biologiche e quale composto il più indicato come substrato liquido.

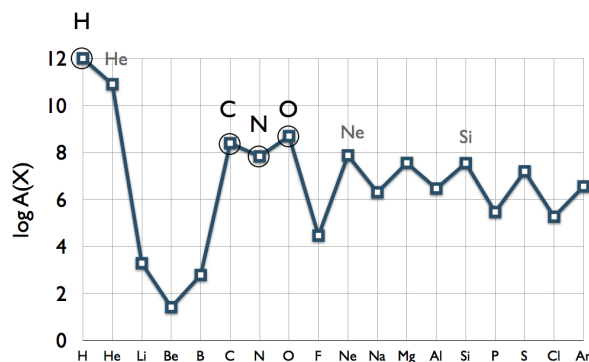


Figura 1.9: Abbondanze solari dei primi elementi della tavola periodica [77]. Le abbondanze sono espresse in numero di atomi in una scala logaritmica riferita al valore dell'idrogeno. Per convenzione  $\log A(H)=12.0$ . I più abbondanti elementi chimici della vita terrestre sono indicati con un cerchio.

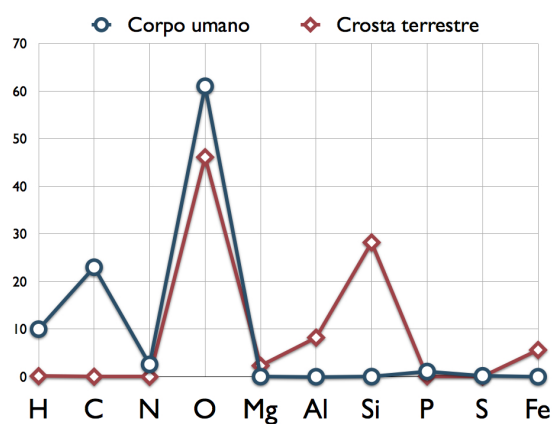


Figura 1.10: Confronto delle abbondanze dei principali elementi chimici nel corpo umano e nella crosta terrestre. Le abbondanze sono espresse come percentuale della massa totale.

## L'ELEMENTO CHIMICO DI BASE DELLE STRUTTURE BIOLOGICHE

Posto che nella vita terrestre l'ossatura delle macromolecole è costituita di carbonio, cerchiamo di capire se ciò è dovuto a particolari proprietà chimiche di tale elemento. In effetti vi sono svariate proprietà che spiegano perchè il carbonio abbia una notevolissima flessibilità a formare strutture microscopiche. Ne elenchiamo alcune tra le più importanti.

(1) Il carbonio ha 4 legami atomici *orientati* che permettono di costruire delle strutture tridimensionali estese. Questo non è vero, ad esempio, per l'azoto e l'ossigeno che, con 3 legami e 2 legami covalenti rispettivamente, tendono a produrre strutture planari o lineari.

(2) Il carbonio ha la capacità di formare molecole complesse non solo con se stesso, ma anche con altri elementi, in particolare H, O ed N. Tale versatilità è dovuta ai valori simili che hanno le energie di legame C—C, C—H, C—O e C—N. Tra gli elementi più abbondanti ha la maggior energia di legame con l'idrogeno e forma un legame forte con l'ossigeno.

(3) Il carbonio è l'unico atomo che forma anelli aromatici. Come abbiamo visto, da questo tipo di struttura si possono formare gli anelli eterociclici aromatici degli acidi nucleici. In generale, la possibilità di formare anelli offre un maggior repertorio di possibilità nella formazione di strutture molecolari.

(4) Il carbonio passa facilmente, cioè con lo scambio di poca energia, dalla forma completamente ossidata,  $\text{CO}_2$ , alla forma completamente ridotta,  $\text{CH}_4$ , e viceversa. Questo fatto è importante nelle reazioni di ossido-riduzione, quali la metanogenesi, da cui ricavano energia gli organismi autotrofi terrestri. Più in generale, questo fatto offre una maggior flessibilità, rispetto ad altri elementi chimici, di prender parte a reazioni chimiche metaboliche.

(5) La chimica del carbonio è compatibile con l'acqua come solvente liquido. Come abbiamo visto, molte delle reazioni di condensazione e idrolisi della chimica organica avvengono mediante dissociazione o formazione di molecole d'acqua.

Non sorprende dunque che il carbonio, con la sua capacità di formare un numero elevatissimo di molecole di vario tipo, stabili e complesse, sia probabilmente l'elemento più adatto per qualsiasi tipo di biologia. Naturalmente questo non significa che non possano esistere altri elementi adatti, entro certi limiti, per biologie alternative a quella terrestre. Alcuni autori hanno considerato, ad esempio, la possibilità che possa esistere una esobiologia basata sul silicio anziché sul carbonio [15].

Il motivo per prendere in considerazione il silicio sta' nel fatto che questo elemento si trova nella stessa colonna del carbonio, subito sotto di esso, nella tavola periodica degli elementi. Pertanto ci si può aspettare che il silicio goda di proprietà chimiche simili a quelle del carbonio. In realtà questo è vero solo in prima approssimazione: è facile dimostrare che la chimica basata sul silicio è molto meno versatile di quella basata sul carbonio. Il suo maggior volume riduce la regione di sovrapposizione degli orbitali *p* e crea legami un po' diversi da quelli del carbonio. Studi dettagliati di una possibile biochimica basata sul silicio [15] portano alle seguenti conclusioni. Il silicio può formare lunghe catene di silani (es.  $\text{SiH}_4$ ), siliconi e silicati. Alcuni di questi composti potrebbero offrire una possibile alternativa al carbonio

come elemento base per la costruzione di polimeri, ma solo in un intervallo molto ristretto di condizioni ambientali. Queste includono la presenza di pochissimo carbonio, ossigeno e acqua, dei valori di temperatura e pressione diversi da quelli della Terra, e la presenza di un solvente diverso dall'acqua, quali ad esempio metano o metanolo.

Queste considerazioni suggeriscono che, se elementi chimici diversi dal carbonio fossero alla base di altri sistemi viventi in altri mondi, tali forme di vita non terrestri dovrebbero trovarsi in condizioni ambientali diverse da quelle della Terra.

## IL SUBSTRATO LIQUIDO

Una frazione significativa della massa degli organismi terrestri è costituita di molecole di acqua, che ne costituiscono quindi il substrato fluido. Come abbiamo detto, tale substrato è in realtà una componente indispensabile per la struttura e il funzionamento dei processi biochimici nella vita terrestre. Di tutte le molecole più comuni sulla Terra, solo l'acqua esiste in fase liquida alle temperature prevalenti sulla superficie terrestre. È forse questa una coincidenza, nel senso che la vita terrestre usa l'acqua solo perché disponibile sulla Terra? Oppure l'acqua gode di particolari proprietà che la rendono ideale per qualsiasi tipo di biologia? Per rispondere a queste domande ricapitoliamo le principali proprietà dell'acqua.

Come abbiamo detto, l'acqua è un potente *solvente di molecole polari*, grazie alla propria polarità. In pratica, le molecole polari immerse nell'acqua vengono circondate da una “nube” di molecole H<sub>2</sub>O orientate attorno ad esse. Le molecole polari così disciolte hanno la possibilità di muoversi liberamente e quindi interagire tra loro per far avvenire le reazioni chimiche del metabolismo. La libertà di movimento si ha grazie alla capacità dell'acqua di formare associazioni chimiche deboli mediante i legami idrogeno, con solo il 5% – 10% di forza rispetto ai legami covalenti. L'esistenza di soluti all'interno di un solvente offre inoltre la possibilità di stabilire *gradienti di concentrazione di soluti* tra diverse parti di un organismo. Tali gradienti sono alla base del funzionamento di importanti meccanismi fisiologici, come ad esempio la *chemiosmosi*.

Le molecole di acqua non riescono a formare legami idrogeno con le molecole non polari, che mostrano un comportamento “idrofobico”. In realtà, sono le molecole d'acqua che “respingono” le molecole non polari: allo scopo di massimizzare il numero di legami idrogeno le molecole di acqua si legano tra esse, escludendo le molecole non polari e forzandole quindi ad associarsi. Come abbiamo visto, questo fatto è alla base della formazione spontanea di strutture biologiche, quali ad esempio le membrane cellulari.

Le molecole d'acqua entrano direttamente a far parte di importanti processi metabolici, mediante il gruppo ossidrilico (OH) e l'idrogeno di cui si compongono.

L'acqua ha un *alto calore specifico*. Questa proprietà può essere utilizzata per stabilizzare la temperatura degli organismi viventi, come effettivamente succede per gli organismi terrestri.

L'acqua ha grande *forza di coesione* tra le sue molecole. Questa proprietà permette all'acqua di fluire lungo un organismo anche superando la forza di gravità, come nel caso

Tabella 1.2: Confronto di proprietà di solventi polari e non polari (adattata da [15])

| Proprietà               | Note | H <sub>2</sub> O | NH <sub>3</sub> | HCN   | HF    | H <sub>2</sub> S | CH <sub>3</sub> OH | N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> | CH <sub>4</sub> | C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> |
|-------------------------|------|------------------|-----------------|-------|-------|------------------|--------------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|
| $\mu$                   | (a)  | 18.0             | 17.0            | 27.0  | 20.0  | 34.1             | 32.0               | 32.1                          | 16.0            | 30.1                          |
| $\rho$                  | (b)  | 0.997            | 0.696           | 0.684 | 0.818 | 1.393            | 0.793              | 1.00                          | 0.426           | 0.572                         |
| $p$                     | (c)  | 1.85             | 1.46            | 2.99  | 1.83  | 0.98             | 1.6                | 1.9                           | 0.00            | 0.00                          |
| $T_{\text{fus}}$        | (d)  | 0                | -78             | -13   | -83   | -86              | -94                | 2                             | -182            | -172                          |
| $T_{\text{boil}}$       | (d)  | 100              | -33             | 26    | 20    | -60              | 65                 | 114                           | -162            | -89                           |
| $\Delta T_{\text{liq}}$ | (e)  | 100              | 44              | 39    | 103   | 26               | 159                | 111                           | 20              | 83                            |
| $\Delta H_{\text{vap}}$ | (f)  | 40.7             | 23.3            | 25.2  | 30.3  | 18.7             | 40.5               | 40.9                          | 8.2             | 14.7                          |
| $\Pi_i a_i$             | (g)  | -3.4             | -4.3            | -7.9  | -7.6  | -4.9             | -7.1               | -8.5                          | -3.8            | -7.5                          |

(a) Peso molecolare in unità di masse atomiche. (b) Densità in g/ml. (c) Momento di dipolo in debye ( $1 \text{ D} = 10^{-10} \text{ esu} \cdot \text{\AA}$ ). (d) Punti di fusione e di ebollizione in °C alla pressione di 1 bar. (e) Intervallo di temperature in cui il composto è in fase liquida alla pressione di 1 bar. (f) Entalpia di vaporizzazione in kJ/mol. (g) Disponibilità cosmica.

dell'acqua che sale dalla radici di una pianta verso l'alto.

È dunque chiaro che l'acqua è particolarmente adatta a svolgere un ruolo fondamentale di tipo biologico. Cerchiamo comunque di capire se esistono altre sostanze con proprietà simili a quelle dell'acqua e che siano quindi possibili candidati per una eventuale biochimica non basata sull'acqua. In Tabella 1.2 confrontiamo a tale scopo l'acqua con alcune sostanze polari (terzo gruppo di colonne) e non polari (ultimo gruppo di colonne). Il momento di dipolo dato in tabella,  $p$ , ci indica quanto la molecola è polare.

Tra le proprietà prese in considerazione abbiamo l'intervallo di temperature in cui il solvente è in fase liquida,  $\Delta T_{\text{liq}}$ , trovandosi tra il punto di fusione,  $T_{\text{fus}}$ , e quello di ebollizione,  $T_{\text{boil}}$ . Tali temperature dipendono naturalmente dalla pressione. Come riferimento riportiamo i valori corrispondenti alla pressione  $P = 10^5 \text{ Pa} = 1 \text{ bar}$ . Un altro fattore di interesse nel confronto è l'entalpia di vaporizzazione,  $\Delta H_{\text{vap}}$ , che ci dà una stima della capacità termica al punto di ebollizione.

Infine in questo confronto è importante capire quanto la molecola possa essere abbondante nell'Universo, sulla base della disponibilità dei suoi costituenti chimici a parità di altre condizioni. Per avere una stima approssimativa riportiamo nell'ultima riga della tabella il prodotto  $\Pi_i a_i$ , dove  $a_i$  è la frazione degli atomi dell'elemento  $i$  sul numero totale di atomi in un gas di composizione chimica solare. Il prodotto è esteso agli atomi inclusi nella formula chimica della molecola. Ad esempio, nel caso dell'acqua il prodotto è  $a_{\text{H}}^2 a_{\text{O}}$ .

Il confronto tra le proprietà considerate generalmente favorisce l'acqua. Vediamo ad esempio il caso dell'ammoniaca,  $\text{NH}_3$ , che è quasi altrettanto polare dell'acqua. Si vede dalla tabella che una biochimica basata sull'ammoniaca liquida dovrebbe svolgersi a temperature più basse e in un intervallo di temperature più ristretto. Le temperature più basse implicherebbero una minor efficienza delle reazioni chimiche, mentre l'intervallo ridotto di temperature in

fase liquida limiterebbe le possibili escursioni termiche di una eventuale forma di vita il cui substrato fosse l'ammoniaca.

Come secondo esempio consideriamo l'acido fluoridrico, HF, la cui molecola ha una polarità anche maggiore di quella dell'acqua. In questo caso l'intervallo in fase liquida è altrettanto grande di quello dell'acqua. D'altra parte, sulla base delle abbondanze solari, ci aspettiamo che, a parità di condizioni di formazione/distruzione molecolare, HF sia ben 4 ordini di grandezza meno abbondante dell'acqua. Un'ipotetica biochimica basata su HF liquido dovrebbe aver luogo in una nicchia ambientale in cui ci sia stato un notevole arricchimento di F relativamente ad altri elementi necessari per tale biochimica.

Alcuni autori hanno considerato anche la possibilità di una biochimica basata su un liquido non polare [15], come ad esempio il metano e l'etano, mostrati nelle ultime colonne della Tabella 1.2. Discutiamo brevemente il caso del metano. Tale composto può essere certamente abbondante, ma il suo intervallo liquido molto ristretto vincolerebbe fortemente le variazioni di condizioni ambientali atte a sostenere un'ipotetica biochimica basata sul metano. Le condizioni presenti sulla superficie di Titano forniscono un esempio di tale ambiente. Resta da vedere se sia possibile una biochimica basata su un solvente *non polare* quale il metano. Secondo alcuni autori questa possibilità non può essere completamente esclusa [15]. In tal caso, le molecole polari e non polari dovrebbe invertire i propri ruoli rispetto a quelli da loro svolti nella biochimica terrestre. Ad esempio, si potrebbero ancora formare membrane biologiche in maniera spontanea, nelle quali l'estremità polare verrebbe a trovarsi nell'interno del doppio strato, mentre l'estremità non polare verrebbe a trovarsi all'esterno, in contatto con il substrato liquido non polare.

## Aspettative su possibili tipi di vita esistenti nell'Universo

I requisiti di esistenza di sistemi viventi dotati di metabolismo indicano che essi debbano essere composti, in ultima analisi, da molecole complesse immerse in un substrato fluido. Lo studio dettagliato delle proprietà del carbonio e dell'acqua indicano che il carbonio è ottimale, fra tutti gli elementi chimici, per formare molecole complesse, mentre l'acqua è ottimale, tra diversi tipi di solventi, come substrato liquido. Questi fatti suggeriscono che eventuali forme di vita presenti in altri ambienti possano essere anch'esse basate sulla chimica organica e sull'acqua, considerata anche la disponibilità cosmica di carbonio, idrogeno e ossigeno.

Questi ragionamenti non implicano affatto che altre forme di vita debbano essere strettamente di tipo terrestre. Ad esempio, non vi è alcun motivo perché l'omochiralità delle molecole biologiche sia uguale a quella trovata nella vita terrestre. Inoltre, data la complessità degli acidi nucleici e del codice genetico, è ragionevole aspettarsi che altre forme di vita possano usare modi di immagazzinare e trasmettere l'informazione diversi dagli acidi nucleici e dal nostro codice genetico. Una ragionevole estrapolazione di come potrebbe essere la vita in altri ambienti, ci porta pertanto a immaginare forme di vita basate sul carbonio e sull'acqua, come sulla Terra, ma con diverse proprietà a livello molecolare e genetico.

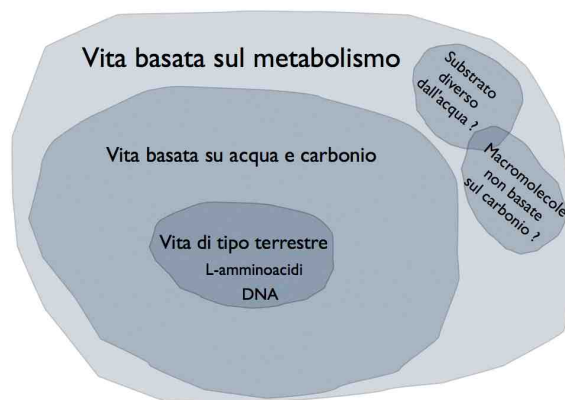


Figura 1.11: Possibili tipi di vita nell'Universo. Vengono presi in considerazione solamente sistemi basati sul metabolismo. La vita di tipo terrestre potrebbe essere un caso particolare di vita, relativamente diffusa, basata su acqua e carbonio.

Non possiamo escludere che in ambienti particolari, privi di acqua e carbonio, possano svilupparsi forme di vita basate su un diverso solvente e un diverso elemento chimico. In ogni caso, qualsiasi sia il tipo di chimica da essi adottato, i sistemi viventi dovranno soddisfare i requisiti termodinamici di acquisizione di energia dall'ambiente e di immissione di entropia nell'ambiente stesso. A tal fine, tali sistemi dovranno in ogni caso essere delimitati da un bordo che permetta il passaggio di energia e materia in maniera selettiva. Le variabili di stato termodinamiche, quali temperatura e pressione, dovranno avere valori tali da far sì che il substrato della vita, qualunque esso sia, si trovi in fase liquida.

## Capitolo 2

### Ambienti abitabili

Per *abitabilità* intendiamo l'insieme delle condizioni fisiche e chimiche che consentono di sostenere la vita in un determinato ambiente. L'abitabilità dipende da svariati fattori astro-nomici, geofisici e climatologici, spesso tra loro interdipendenti. Il concetto di abitabilità è generalmente riferito alla vita di tipo terrestre, ma può essere generalizzato nella misura in cui riusciamo a generalizzare il concetto di vita.

Nelle prime due sezioni di questo capitolo studiamo le condizioni di abitabilità dell'ambiente terrestre e i limiti estremi di adattamento della vita in tale ambiente. Nella terza sezione estendiamo il concetto di abitabilità ad altri pianeti, solari o extrasolari.

#### 2.1 La Terra come ambiente abitabile

Diversi sono i fattori che rendono abitabile il nostro pianeta. Qui prendiamo in considerazione la presenza di fonti di energia, la protezione da radiazioni ionizzanti e le condizioni climatiche che determinano la temperatura superficiale.

Chiudiamo questa prima parte del capitolo accennando agli habitats terrestri con condizioni ambientali estreme.

##### Fonti di energia

Per capire il grado di abitabilità di un ambiente in termini di fonti di energia, è sufficiente discutere il caso degli organismi autotrofi, gli unici che estraggono energia direttamente dall'ambiente abiotico. Dato che la base della catena alimentare degli eterotrofi è composta da autotrofi, in'ultima analisi, tutta la vita trae energia dall'ambiente. Gli organismi autotrofi terrestri acquisiscono l'energia in due modi: mediante reazioni chimiche di ossido-riduzione o mediante la fotosintesi.

## REAZIONI DI OSSIDO-RIDUZIONE

L'utilizzazione di energia chimica nei sistemi viventi comporta il trasferimento di elettroni da un reagente ad un altro. Tali reazioni sono conosciute come reazioni di *reazioni di ossido-riduzione*. Un composto si dice "ridotto" quando acquista un elettrone, "ossidato" quando lo cede. Nei confronti di altri composti l'idrogeno ha proprietà riducenti, mentre l'ossigeno ha invece proprietà ossidanti.

Le reazioni di ossido-riduzione costituiscono la forma più antica di acquisizione di energia da parte degli organismi autotrofi, precedente allo sviluppo di processi più complessi quale quello della fotosintesi.

Esistono vari tipi di reazioni di ossido-riduzione utilizzate da organismi autotrofi, adattati alla disponibilità di certi elementi chimici in particolari nicchie ambientali. Tali reazioni possono avvenire anche in assenza di luce solare. Un esempio è quello della *metanogenesi*, in cui viene ossidato idrogeno e ridotta anidride carbonica, secondo lo schema di reazione



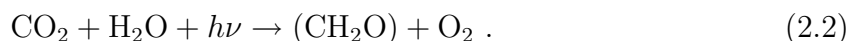
Nel corso di tale processo il carbonio passa dalla forma completamente ossidata,  $\text{CO}_2$ , alla forma completamente ridotta,  $\text{CH}_4$ . In tal modo il carbonio viene fissato diventando così disponibile per ulteriore sintesi di molecole organiche. La metanogenesi viene ad esempio utilizzata da organismi autotrofi nelle bocche vulcaniche sottomarine ("hydrothermal vents") nei fondali oceanici.

Tra le svariate altre reazioni di ossido-riduzione utilizzate dalla vita terrestre ne esistono alcune basate sullo zolfo. Tali reazioni sono utilizzate da microrganismi poco evoluti, quali il *Thiobacillus thiooxidans* e il *Sulfolobus acidocaldarius*, presenti in ecosistemi ricchi di fuoriuscite di zolfo. Anche nel corso di tali reazioni viene fissato il carbonio.

## FOTOSINTESI

La *fotosintesi* converte energia luminosa in energia chimica. Rispetto alle reazioni di ossido-riduzione, che hanno luogo solo in nicchie ambientali con particolari condizioni chimiche, la fotosintesi offre una disponibilità di energia praticamente illimitata nel tempo in qualsiasi ambiente esposto all'illuminazione solare.

La fotosintesi è attualmente la fonte di quasi tutti i composti del carbonio e di tutto l'ossigeno da cui dipende il metabolismo degli organismi aerobici. La reazione schematica della fotosintesi è apparentemente semplice



Anidride carbonica e acqua reagiscono e, utilizzando l'energia catturata dai fotoni solari, producono carboidrati e liberano ossigeno. Nello schema  $\text{CH}_2\text{O}$  rappresenta un carboidrato, principalmente il saccarosio o l'amido. Anche in questo caso dunque il carbonio viene fissato

e diviene disponibile per l'utilizzo nel ciclo biologico. L'energia della fotosintesi viene in gran parte incanalata per produrre ATP a partire da ADP (Fig. 1.7).

In realtà il meccanismo della fotosintesi è molto più complesso di quanto rappresentato, schematicamente, nella reazione di cui sopra. Richiede l'intervento di molte proteine e altre molecole e avviene in vari stadi. Parte delle reazioni avvengono alla luce, altre in assenza di luce ("reazioni al buio"). Per approfondimenti rinviamo a testi specializzati [11, 3].

## Protezione da radiazioni ionizzanti

L'ambiente terrestre è abitabile non solo grazie alle sue condizioni climatiche, ma anche perchè è protetto dall'effetto distruttivo di radiazioni ionizzanti. La Terra è esposta a particelle e fotoni energetici di origine solare e Galattica. Le particelle di alta energia presenti nei raggi cosmici sono protoni (89%) e nuclei di elio (10%), cui si aggiungono tracce di nuclei più pesanti e di elettroni. Tra i fotoni ionizzanti vi sono quelli ultravioletti, X e gamma. L'esposizione diretta della vita terrestre a tali radiazioni produce danni biologici.

### EFFETTI BIOLOGICI DELLE RADIAZIONI IONIZZANTI

Le radiazioni possono ionizzare o anche solo eccitare gli atomi presenti nelle molecole biologiche. In entrambi i casi possono prodursi danni biologici, tra i quali alterazioni del DNA.

Le radiazioni nell'ultravioletto vicino, pur non producendo ionizzazioni, possono far diventare reattivo un gruppo funzionale di una macromolecola. Nel caso del DNA le radiazioni possono far diventare reattive le basi degli acidi nucleici. Se le basi si attivano, tendono a legarsi tra di loro, creando una specie di nodo o piega nel DNA. Questo fatto può causare un danno letale in quanto crea una mutazione genetica. In genere questo tipo di alterazione coinvolge *un solo filamento* del DNA. Grazie all'informazione contenuta nel filamento complementare, che non è stata danneggiata, è possibile, in linea di principio, riparare questo tipo di danno. Meccanismi di questo tipo sono in effetti presenti e riescono a riparare il danno entro certi limiti. Tali meccanismi recidono la porzione di filamento danneggiato e la sostituiscono con una porzione in cui sono presenti le basi complementari al filamento non danneggiato.

Le particelle o fotoni di alta energia producono invece ionizzazione. Siccome le molecole biologiche sono immerse nell'acqua, il danno diretto avviene generalmente sulle molecole d'acqua. In tal modo si creano dei *radicali liberi* che sono dei gruppi di atomi con un eccesso di carica elettrica, molto instabili e reattivi chimicamente. Sono poi i radicali liberi che vanno a danneggiare le macromolecole biologiche. Essi possono causare danni ancor più gravi al DNA, alterando anche *entrambi i filamenti*. In questo caso l'informazione presente nel tratto di DNA danneggiato non è generalmente recuperabile.

Il danno biologico dipende da molti fattori e per quantificarlo sono state introdotte diverse grandezze con relative unità di misura [10].

Per *dose assorbita*,  $D$ , si intende la quantità di radiazione assorbita per unità di massa,

senza tener conto del tipo di radiazione. L'unità di misura è il gray, che corrisponde a un joule per kilogrammo ( $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ).

Il danno sull'organismo dipende dal tipo di radiazione,  $R$ . Per tener conto di questo fatto si introducono dei fattori di peso,  $w_R$ , proporzionali al danno arrecato da un particolare tipo di radiazione, e si calcola la *dose equivalente*,  $H = \sum_R w_R D_R$ . L'unità di misura di dose equivalente è il Sievert ( $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ). Ad esempio, per i raggi  $\gamma$  si adotta  $w_R = 1$ , e quindi ad una dose assorbita di 1 Gy corrisponde una dose equivalente di 1 Sv. La stessa dose assorbita per particelle  $\alpha$ , per i quali  $w_R = 20$ , darebbe una dose equivalente di 20 Sv.

Nell'uomo dosi equivalenti  $\ll 0.25 \text{ Sv}$  non portano a danni clinici identificabili. A valori  $\geq 0.25 \text{ Sv}$  i danni possono essere misurati clinicamente, diventando gravi attorno 1 Sv e letali, con morte entro 24 h, attorno ai 10 Sv [10].

Da tener presente che gli effetti biologici dipendono non solo dalla dose, ma anche dal tasso con cui tale dose è assorbita. Se il tasso è particolarmente basso i meccanismi di riparazione sopra menzionati potrebbero intervenire efficacemente. Per approfondimenti sui danni biologici delle radiazioni rinviamo a testi specializzati [6, 10].

#### EFFETTO PROTETTIVO DELL'ATMOSFERA

L'atmosfera terrestre svolge il ruolo fondamentale di protezione sia dalle particelle (raggi cosmici) che dai fotoni di alta energia.

L'effetto dell'atmosfera sui raggi cosmici è quello di trasformarli in particelle di minore energia, mediante una serie di cascate di particelle negli strati più alti dell'atmosfera. Tipicamente i protoni energetici collidono con una molecola atmosferica producendo una cascata ("air shower") di mesoni carichi che decadono a loro volta in altre particelle. I raggi cosmici sono anche responsabili della produzione continua di isotopi instabili nell'atmosfera terrestre, quale ad esempio il  $^{14}\text{C}$ .

L'effetto protettivo nei confronti dei fotoni ultravioletti si ha grazie all'esistenza di ossigeno nell'atmosfera terrestre e, in particolare, di uno strato di ozono ( $\text{O}_3$ ) che assorbe molto efficacemente le radiazioni ultraviolette più energetiche. L'ozono si forma proprio grazie al fatto che parte delle molecole di  $\text{O}_2$  vengono dissociate dalla radiazione ultravioletta negli strati più alti dell'atmosfera. Gli atomi di ossigeno così liberati reagiscono con molecole  $\text{O}_2$  non dissociate per creare  $\text{O}_3$ . Nel caso della Terra, dunque, la presenza di ossigeno svolge attualmente un ruolo fondamentale di protezione dalle radiazioni ionizzanti.

## Presenza di acqua liquida

La Terra è l'unico pianeta del Sistema Solare in cui vi sia acqua allo stato liquido in superficie. Per quanto discusso nel precedente capitolo, la presenza di un solvente in fase liquida, e in particolare dell'acqua, è un requisito essenziale per la presenza di vita. Il fatto che l'acqua si trovi in fase liquida dipende dalle condizioni climatiche presenti sulla superficie terrestre.

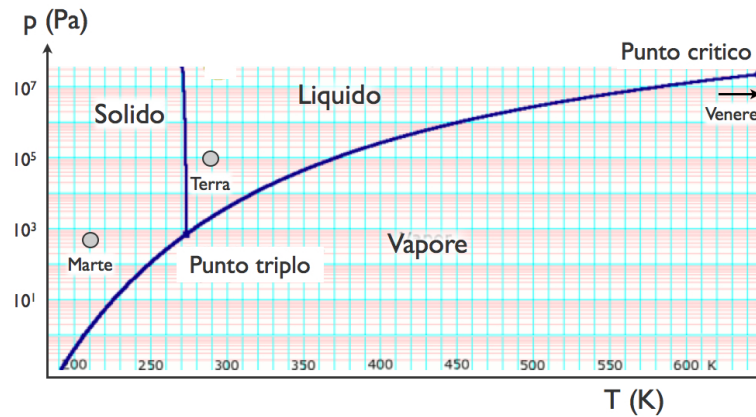


Figura 2.1: Diagramma di fase dell'acqua. Sono indicati: i campi di esistenza del solido, liquido e vapore; il *punto triplo* (273.16 K, 610.6 Pa), dove coesistono le tre fasi; il *punto critico* (647 K, 22.1 MPa), dove le caratteristiche del vapore e del liquido diventano le medesime. Sul diagramma sono riportati i valori medi di temperatura e pressione attualmente presenti sulla superficie della Terra, di Marte e di Venere (fuori campo: 735 K, 9.3 MPa).

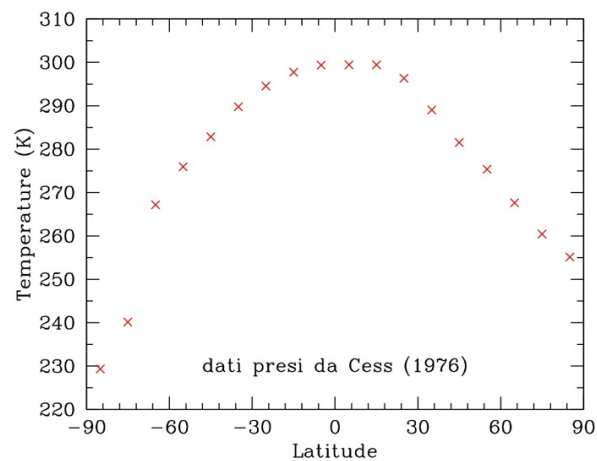


Figura 2.2: Medie annuali della temperatura superficiale della Terra stimate a diverse latitudini [27].

## Condizioni climatiche superficiali

La temperatura media della Terra è attualmente di 15°C (288 K), mentre la pressione al livello del mare è di 1 atmosfera ( $1.01 \times 10^5$  Pa). Tali valori cadono nel campo di esistenza dell'acqua in fase liquida nel diagramma di fase dell'acqua, mostrato in Fig. 2.1. Ciò non è vero in generale per la superficie di altri pianeti, come ad esempio nei casi di Marte e Venere mostrati in figura.

La superficie terrestre gode di valori medi di temperatura che permettono l'esistenza di acqua in fase liquida a quasi tutte le latitudini, con l'eccezione delle zone polari (Fig. 2.2). La temperatura media superficiale della Terra è il risultato di un gran numero di fattori astronomici e geofisici che discutiamo seconda parte di questo capitolo.

## Limiti estremi di abitabilità terrestre

La percezione tradizionale di habitat terrestre è di tipo antropocentrico: un ambiente è considerato tanto più abitabile quanto più le sue condizioni climatiche, fisiche e chimiche sono ottimali per sostenere la vita dell'uomo. Nel corso dell'ultimo secolo, e in particolare negli ultimi decenni, ci si è accorti che la vita riesce anche a prosperare in ambienti con condizioni considerate estreme, e quindi inabitabili, da tale punto di vista. Gli *organismi* che vivono in tali ambienti vengono chiamati *estremofili*.

### ORGANISMI ESTREMOFILII

L'esistenza di organismi estremofili riveste una grande importanza in astrobiologia poiché questi organismi ci indicano quali sono i limiti fisici e chimici entro i quali la vita può esistere anche in condizioni ambientali molto diverse, quali quelle presenti in ambienti astronomici fuori dalla Terra (pianeti/satelliti del Sistema Solare e pianeti/satelliti extrasolari). Lo studio degli organismi estremofili, che ora passeremo rapidamente in rassegna, ci indica che la vita riesce ad adattarsi a condizioni molto diverse. Questo fatto ci incoraggia a ritenere che la vita possa manifestarsi anche in ambienti extraterrestri solitamente ritenuti ostili alla vita.

Gli studi di microbiologia hanno portato a una progressiva estensione dei limiti della biosfera terrestre, rivelando l'esistenza di ecosistemi in ambienti un tempo ritenuti inabitabili. Casi particolarmente famosi di tali ecosistemi si trovano, ad esempio, all'interno del parco di Yellowstone, conosciuto per il suo vasto sistema di *fumarole vulcaniche* ( "*hydrothermal vents*" ), fessure della crosta terrestre dalle quali fuoriesce acqua riscaldata geotermicamente.

Ma le scoperte più sorprendenti sono avvenute a partire dalla fine degli anni settanta, quando si sono scoperte evidenze di ecosistemi in un particolare tipo di fumarole trovate nelle profondità oceaniche ( "*black smokers*" , o "*fumarole nere*" ). Tali ambienti, pur essendo privi di luce solare e pur avendo temperature e pressioni particolarmente elevate, ospitano infatti

diversi tipi di organismi sia autotrofi che eterotrofi. Gli organismi autotrofi utilizzano reazioni di ossido-riduzione basate sullo zolfo, presente in abbondanza in tali ambienti.

Accenneremo rapidamente ad alcuni tipi di organismi estremofili, senza entrare nel dettaglio del loro funzionamento biologico, per il quale rinviamo ad altri testi [8]. Gli organismi estremofili vengono classificati a seconda della loro capacità di adattamento a una particolare caratteristica fisica o chimica. Quella che segue è una lista di esempi di microrganismi che si sono adattati a valori estremi di temperatura, pressione, acidità, salinità, umidità, e intensità di radiazioni ionizzanti. I nomi degli estremofili sono stati conati proprio sulla base della loro resistenza a questi diversi tipi di parametri fisici e chimici.

#### ORGANISMI TERMOFILI

Si chiamano *termofili* gli organismi che riescono a crescere in maniera ottimale anche a circa 40° C e a temperature maggiori. Si chiamano *ipertermofili* quelli che riescono a resistere a 80° C e a temperature anche maggiori. Esistono poi casi estremi di resistenza a temperature maggiore di 100° C, se la pressione è sufficientemente alta per mantenere l'acqua in fase liquida. Questo è ciò che accade nelle fumarole sottomarine ("black smokers"), dove l'acqua raggiunge temperature di circa 400° C senza evaporare a causa della sua pressione.

Gli organismi termofili, pur essendo unicellulari, si organizzano in colonie ben riconoscibili dal punto di vista macroscopico. Un esempio è rappresentato dai "bacterial mat" (tappeti batterici) dal colore rosso visibili in varie pozze idrotermali a Yellowstone. In tali ambienti non solo la temperatura è molto alta, ma vi sono condizioni di estrema salinità e acidità.

Un esempio particolarmente importante di microrganismo termofilo, scoperto a Yellowstone, è rappresentato dal *Thermus aquaticus*. Tale batterio produce un enzima termoresistente la cui importanza è fondamentale nell'ambito di una tecnica di biologia molecolare nota come *polymerase chain reaction (PCR)*. Grazie a questa tecnica siamo in grado di amplificare frammenti di DNA che possono in tal modo essere analizzati a scopo diagnostico, scientifico o di medicina legale.

L'esistenza di organismi termofili ed ipertermofili ci indica che la vita può sostenersi in ambienti astronomici con temperature relativamente alte. Ma il motivo di interesse per gli organismi termofili non si limita a questo fatto: essi ci forniscono infatti indicazioni sugli ambienti primordiali in cui la vita terrestre sembra essersi sviluppata. Chiariremo questo concetto nel Capitolo 3.

#### ORGANISMI PSICROFILI

Organismi resistenti alle basse temperature sono chiamati *psicrofili*. Tali vengono considerati organismi con crescita ottimale a circa 15° C o a temperature minori. Un esempio di ambiente in cui sono stati trovati è rappresentato dai ghiacciai dell'Antartide. Di particolare interesse sono i laghi subglaciali dell'Antartide, di cui ne sono stati scoperti un centinaio. Il ghiaccio

superficiale potrebbe aver isolato questi laghi per periodi dell'ordine delle centinaia di migliaia di anni, preservando antiche caratteristiche evolutive. Si cerca pertanto di prelevare campioni di ghiaccio in profondità senza contaminarli. Dai carotaggi finora effettuati si sono trovati batteri a grandi profondità, fino a 3 km. Tra questi laghi il più famoso è Lago di Vostok, nella parte russa dell'Antartide. Si pensa che sotto il ghiaccio, l'acqua in fase liquida dei laghi possa essere riscaldata da sorgenti geotermiche. In tal caso avremmo sia acqua che una sorgente di energia, che dovrebbe sopperire alla mancanza di luce solare.

L'esistenza di organismi psicrofili ci indica che la vita è potenzialmente in grado di esistere in ambienti ghiacciati nel Sistema Solare. Un esempio di ambiente con superficie composta di ghiaccio d'acqua è il satellite Europa, su cui torneremo nel Capitolo 5.

#### ORGANISMI ALOFILI

Microrganismi che resistono a condizioni di alta salinità vengono chiamati *alofili*. Si conoscono microrganismi che vivono in concentrazioni saline fino a circa del 25%. Esempi sono stati trovati nel Mar Morto e nel Grande Lago Salato (Utah, USA). Oltre alle condizioni estreme di salinità, tali microrganismi sono fortemente esposti alla radiazione ultravioletta. Come possibile esempio di ambiente simile nel Sistema Solare citiamo alcune zone superficiali di Marte di forma pianeggiante che sembrano aver potuto ospitare un antico lago salato (ad esempio *Meridiani Planum*).

#### ORGANISMI RADIORESISTENTI

Particolarmente interessante è il caso degli *organismi radioresistenti* che riescono a sopravvivere ad alte dosi di radiazioni ionizzanti. Il caso più estremo è il batterio *Deinococcus Radiodurans*<sup>1</sup>, che resiste a dosi di 5000 Gy o maggiori. Per confronto, ricordiamo che la dose letale per l'uomo è dell'ordine di 10 Gy. Il *Deinococcus Radiodurans* fa delle copie complete dell'intera doppia elica e, tramite meccanismi di riparazione e duplicazione, riesce a ricostruire il DNA danneggiato. Tale batterio è simile alle altre forme di vita terrestri dal punto di vista genetico e biochimico. Questo fatto contraddice un'origine extraterrestre, ipotizzata da alcuni autori.

Esistono altri esempi di microrganismi radioresistenti, sia tra i batteri che tra gli archaea. L'esistenza di tali microrganismi implica che la vita può esistere anche su superfici planetarie non protette da un'atmosfera e pertanto esposte a radiazioni ionizzanti. Questo fatto ha implicazioni sia riguardo alla possibilità di scoprire forme di vita in ambienti ostili, e sia riguardo la possibilità di colonizzare ambienti spaziali da parte dell'uomo.

---

<sup>1</sup>Il nome di questo batterio significa "batterio meraviglioso resistente alle radiazioni".

## 2.2 Abitabilità fuori dalla Terra

Nonostante la notevole varietà di condizioni fisiche esistenti nell'Universo, è estremamente difficile trovare un ambiente astronomico abitabile. Ad esempio, se utilizziamo come requisito di abilità quello di esistenza di acqua allo stato liquido, possiamo eliminare dalla lista di potenziali ambienti abitabili stelle e mezzo interstellare mediante le seguenti considerazioni.

Le superfici stellari, e a maggior ragione gli interni stellari, hanno temperature troppo elevate: persino le stelle più fredde hanno infatti temperature superficiali dell'ordine di qualche migliaio di gradi [4]. In tali ambienti le molecole d'acqua non possono neppure esistere. Negli strati esterni delle stelle più fredde, dove peraltro si trovano evidenze di molecole semplici, l'acqua potrebbe esistere, ma solo in forma di vapore.

Per quanto riguarda il mezzo interstellare, che occupa la maggior parte del volume della Galassia, è facile dimostrare che la sua pressione è inadeguata in quanto troppo bassa. I tipici valore di pressione interstellare nel gas diffuso della Galassia [14], rapportati alla costante di Boltzmann  $k$ , si trovano nell'intervallo  $(p/k)_{\text{is}} \approx 10^3 - 10^4 \text{ K cm}^{-3}$ . In unità SI, tali valori corrispondono a  $p_{\text{is}} \approx 10^{-26} - 10^{-25} \text{ Pa}$ , di molti ordini di grandezza inferiore alla pressione al punto triplo nel diagramma di fase dell'acqua ( $\approx 660 \text{ Pa}$ ; Fig. 2.1). Trovandosi al di sotto del punto triplo, l'acqua non può esistere in fase liquida neppure nelle nubi interstellari più dense.

I sistemi planetari, con pianeti e satelliti posti a diverse distanze dalla stella centrale, offrono una possibilità unica di trovare ambienti astronomici posizionati in maniera ottimale affinché l'acqua possa esistere in fase liquida. Nel discutere di ambienti abitabili nell'Universo ci limitiamo dunque a considerare l'abitabilità di pianeti o satelliti, che indichiamo complessivamente come *abitabilità planetaria*. Nella discussione consideriamo principalmente l'abitabilità in superficie, accennando brevemente ad altre forme di abitabilità, quali quella sotto la superficie.

Tra i requisiti di abitabilità consideriamo i fattori climatici, che permettono l'esistenza di acqua in fase liquida, la presenza di fonti di energia e la protezione da radiazioni ionizzanti. È bene tener sempre presente che tali requisiti di abitabilità rappresentano delle condizioni necessarie ma non sufficienti per l'effettiva esistenza di vita.

### Abitabilità planetaria superficiale

La presenza di una superficie planetaria, solida o liquida, permette l'esistenza di un ambiente con condizioni stabili di temperatura e pressione. La condizione di esistenza di acqua in fase liquida pone dei vincoli ben precisi sulla temperatura e pressione superficiali, deducibili dal diagramma di fase dell'acqua (Fig. 2.1). Dal momento che la temperatura superficiale gioca un ruolo fondamentale nella definizione di abitabilità, studiamo la dipendenza di tale variabile termodinamica da fattori astronomici e ambientali.

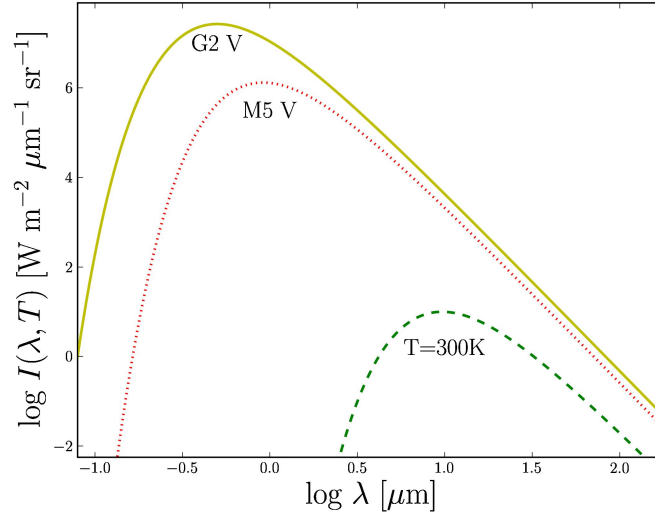


Figura 2.3: Confronto tra l'emissione di corpo nero di una stella di tipo spettrale G2 V, di una di tipo spettrale M5 V, e di un pianeta abitabile con  $T = 300$  K.

#### TEMPERATURA MEDIA SUPERFICIALE PLANETARIA

La temperatura media superficiale di un pianeta può venir stimata mediante un'equazione di bilancio tra l'energia per unità di tempo in arrivo sulla superficie del pianeta,  $\mathcal{L}_{\text{in}}$ , e quella in uscita,  $\mathcal{L}_{\text{out}}$ . L'energia che arriva in superficie è composta da due termini. Uno rappresenta l'energia in arrivo dall'esterno,  $\mathcal{L}_*$ , ovvero la frazione di radiazione stellare assorbita dalla superficie. L'altro termine,  $\mathcal{L}_g$ , rappresenta l'energia in arrivo dall'interno del pianeta, ovvero il calore geotermico. L'equazione di bilancio è pertanto

$$\mathcal{L}_{\text{in}} = \mathcal{L}_* + \mathcal{L}_g = \mathcal{L}_{\text{out}} , \quad (2.3)$$

dove  $\mathcal{L}_{\text{out}}$ , rappresenta l'energia per unità di tempo irradiata dal pianeta nello spazio.

Per meglio comprendere il significato di questa equazione bisogna tener presente che la radiazione stellare in arrivo e la radiazione planetaria in uscita si trovano in diverse bande spettrali: la prima tipicamente nella banda visibile/ultravioletta, la seconda nella banda infrarossa. In Fig. 2.3 compariamo, a titolo di esempio, le emissioni di corpo nero di una stella di tipo solare, di una stella fredda e di un pianeta con temperatura  $T = 300$  K. Il massimo di emissione della stella di tipo solare si ha a  $\simeq 0.5 \mu\text{m}$ , mentre quello del pianeta a  $\simeq 10 \mu\text{m}$ .

Valutiamo ora il termine “astronomico”  $\mathcal{L}_*$  dell'equazione. Chiamiamo  $L_*$  la luminosità della stella,  $d$  la distanza stella-pianeta, e

$$S_* \equiv L_*/(4\pi d^2) . \quad (2.4)$$

L'energia radiante stellare incidente per unità di tempo sul pianeta è data da  $\pi R_p^2 S_*$ , dove  $R_p$  è il raggio del pianeta. Chiamiamo *albedo*  $A$  la frazione di flusso stellare riflessa nello

*spazio dal pianeta* in tutte le lunghezze d'onda. Con queste definizioni l'energia di radiazione stellare assorbita dalla superficie del pianeta sarà  $\mathcal{L}_* = \pi R_p^2 S_* (1 - A)$ .

Chiamiamo poi  $\epsilon_g$  il flusso di calore interno geotermico (Watt m<sup>-2</sup>). L'energia per unità di tempo in arrivo dall'interno del pianeta sarà  $\mathcal{L}_g = 4 \pi R_p^2 \epsilon_g$ .

Per quanto riguarda l'energia irradiata dal pianeta nello spazio, assumendo che l'emissione sia di corpo nero, si ha  $\mathcal{L}_{\text{out}} = 4 \pi R_p^2 \sigma T_p^4$ , dove  $\sigma$  è la costante di Stephan-Boltzmann e  $T_p$  la temperatura effettiva del pianeta.

Sostituendo i termini nell'equazione di bilancio (2.3) si ottiene

$$(1 - A) \frac{S_*}{4} + \epsilon_g = \sigma T_p^4, \quad (2.5)$$

da cui si può ricavare una stima della temperatura effettiva del pianeta.

La temperatura effettiva determinata dalla relazione (2.5) sarà in generale diversa dalla vera temperatura superficiale del pianeta,  $T_s$ . In particolare, se l'atmosfera del pianeta contiene composti gassosi trasparenti alla radiazione visibile/ultravioletta in arrivo, ma che assorbono la radiazione termica in uscita, si avrà un *effetto serra*. Come conseguenza dell'effetto serra la radiazione termica rimarrà parzialmente intrappolata nell'atmosfera e la temperatura superficiale del pianeta sarà maggiore di quella stimata dall'espressione (2.5). Possiamo quantificare in maniera puramente empirica l'effetto serra ("greenhouse effect") definendo un incremento  $\Delta T_s$  tale che

$$T_s = T_p + \Delta T_s. \quad (2.6)$$

Per tener conto correttamente dell'effetto serra si può introdurre un termine che tenga conto della trasmittanza dell'atmosfera nell'infrarosso,  $\tau_{\text{atm}}$ , definito in maniera tale che la potenza in uscita dal pianeta sia  $\mathcal{L}_{\text{out}} = 4 \pi R_p^2 \tau_{\text{atm}} \sigma T_s^4$ . Espressioni di questo tipo sono prese in considerazione da modelli di bilancio energetico più dettagliati (*Energy Balance Models*), nei quali si cerca anche di riprodurre l'andamento della temperatura superficiale media del pianeta in funzione della latitudine [125, 109].

#### TEMPERATURA SUPERFICIALE DELLA TERRA

A titolo di esempio, applichiamo le equazioni di temperatura superficiale al caso della Terra. Data la luminosità bolometrica del Sole,  $L_\odot = 3.845 \times 10^{26}$  W e la distanza media terra-sole  $d = 1 \text{ AU} = 1.495 \times 10^{11}$  m, si ha che

$$S = L_\odot / (4 \pi d^2) = 1366 \text{ W m}^{-2}. \quad (2.7)$$

Quest'ultima quantità viene chiamata *costante solare* e rappresenta il flusso di radiazione solare incidente su di una superficie unitaria posta fuori dall'atmosfera terrestre e orientata perpendicolarmente ai raggi solari.

L'energia geotermica che giunge in superficie per unità di tempo può essere stimata combinando valori osservati con stime teoriche dei possibili contributi al calore interno [1]. Le

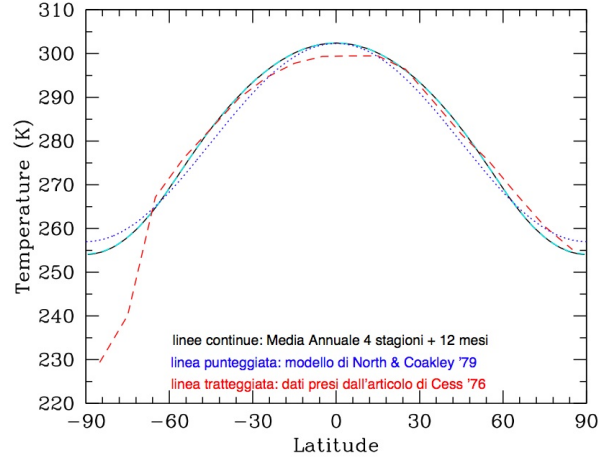


Figura 2.4: Medie annuali della temperatura superficiale della Terra a diverse latitudini. Linee continue e punteggiate: risultati di calcoli di modelli climatici unidimensionali. Linea tratteggiata: valori misurati [27].

stime complessive indicano  $\mathcal{L}_g = 42 \times 10^{12} \text{ W}$  [81], da cui si deduce che  $\epsilon_g = 0.082 \text{ W m}^{-2}$ . Questo flusso interno è decisamente trascurabile rispetto a quello in arrivo dal Sole, dell'ordine di  $S \cos z = 1366 \cos z \text{ W m}^{-2}$ , dove  $z$  è la distanza zenitale. Per stimare la temperatura effettiva della Terra si può pertanto trascurare il termine  $\epsilon_g$  nell'Eq. (2.5).

Adottando un valore di albedo  $A = 0.3$  si ottiene  $T_p = 255 \text{ K} = -18^\circ \text{C}$ . Questo valore è decisamente più basso della temperatura media misurata alla superficie della Terra,  $T_s = 288 \text{ K} = +15^\circ \text{C}$ . La differenza è interpretata come effetto serra. Il contributo alla temperatura media superficiale dato dall'effetto serra risulta pertanto essere  $\Delta T_s = 33 \text{ K}$ . In assenza di tale effetto la superficie terrestre sarebbe dunque ghiacciata. Adottando un valore di albedo più alto, tipico di nevi e ghiacci, otterremmo una temperatura ancora più bassa. Utilizzando modelli di bilancio energetico più dettagliati è possibile riprodurre con successo l'andamento della temperatura superficiale media della Terra in funzione della latitudine (Fig. 2.4).

#### ZONA ABITABILE CIRCUMSTELLARE

Come abbiamo visto, la temperatura media superficiale di un pianeta può venir stimata mediante le equazioni (2.5) e (2.6), o altre analoghe che tengano in conto l'effetto serra in maniera più realistica. L'equazione (2.5) ci dice che, a parità di altre condizioni, il flusso stellare  $S_*$  dev'essere comparabile al valore della costante solare,  $S$ , affinché la temperatura superficiale planetaria sia comparabile a quella della Terra. Poichè  $S_* \propto d^{-2}$ , è possibile determinare due valori critici di distanza dalla stella centrale,  $d_{\min}$  e  $d_{\max}$ , all'interno dei quali la temperatura media superficiale cade entro il campo di esistenza della fase liquida nel diagramma di stato dell'acqua per un dato valore di pressione. L'intervallo di distanze tra  $d_{\min}$  e  $d_{\max}$  viene chiamato *zona abitabile circumstellare*.

È bene chiarire che il vincolo sulla temperatura superficiale planetaria si traduce in maniera univoca in un anello di distanze dalla stella centrale solamente quando siano fissate tutte le condizioni fisico-chimiche del pianeta. Pertanto ha senso di parlare di zona abitabile circumstellare solo in riferimento a pianeti di un determinato tipo.

Uno dei parametri più importanti per determinare l'estensione della zona abitabile circumstellare è la pressione atmosferica superficiale. Adottando il valore terrestre  $p = 10^5$  Pa, si deduce che la temperatura superficiale deve cadere entro l'intervallo  $0^\circ\text{C} \leq T_s \leq 100^\circ\text{C}$ . La zona abitabile così definita viene anche chiamata *LWHZ* (*Liquid Water Habitable Zone*).

Vediamo ora in maggior dettaglio i fattori che determinano il clima e, in particolare, la temperatura media superficiale di un pianeta. Dallo studio di tali fattori risulteranno chiare le difficoltà inerenti alla definizione quantitativa della zona abitabile circumstellare, ma anche l'utilità pratica di tale concetto in particolari situazioni.

## Fattori climatici

Il clima e l'abitabilità superficiale planetaria sono influenzate da numerosi fattori astronomici e di fisica planetaria. Andiamo ad esaminare i principali fattori che influenzano la posizione ed estensione della zona di abitabilità circumstellare. Per brevità non prendiamo in considerazione fattori quali il periodo di rotazione del pianeta e l'inclinazione tra asse di rotazione del pianeta e asse di rivoluzione dell'orbita planetaria. Fattori relativi alla stabilità delle condizioni climatiche a lungo periodo sono discussi nel Capitolo 4. Nella Tabella 2.1 riassumiamo schematicamente tutti i fattori climatici menzionati in questi appunti.

### FATTORI ASTRONOMICI: PARAMETRI FISICI DELLA STELLA CENTRALE

È possibile esprimere la temperatura effettiva di equilibrio del pianeta in funzione della temperatura effettiva della stella,  $T_*$ . Quest'ultima è definita dalla relazione con la luminosità della stella nel caso di emissione di corpo nero,  $L_* = 4\pi R_*^2 \sigma T_*^4$ . Ne consegue che il termine  $S_*$  definito nell'equazione (2.4) diventa

$$S_* = \frac{R_*^2}{d^2} \sigma T_*^4 \quad . \quad (2.8)$$

Per pianeti con sorgenti di calore interno trascurabili, l'equazione di equilibrio termico superficiale (2.5) diventa pertanto

$$(1 - A) \frac{R_*^2}{4d^2} T_*^4 = T_p^4 \quad . \quad (2.9)$$

Ne consegue che, a parità di albedo planetaria e di effetto serra, la temperatura di equilibrio alla superficie di un pianeta scalerà come

$$T_p \propto \left( \frac{R_*}{a} \right)^{\frac{1}{2}} T_* \quad , \quad (2.10)$$

dove  $a$  è il semiasse maggiore dell'orbita planetaria. Questa espressione è utile a mettere in relazione la posizione della zona abitabile circumstellare con il raggio e la temperatura della stella. Normalizzando i valori stellari a quello solare, a parità di temperatura planetaria ottimale per la vita, si ha

$$a \propto \frac{R_*}{R_\odot} \left( \frac{T_*}{T_\odot} \right)^2 . \quad (2.11)$$

Pertanto la posizione della zona abitabile ha una dipendenza lineare con il raggio della stella e quadratica con la temperatura della stella. Per stelle di sequenza principale di diversi tipi spettrali, raggio e temperatura aumentano insieme [4] e pertanto la posizione della zona abitabile dipenderà fortemente dal tipo spettrale.

Vediamo alcuni esempi di applicazione della relazione (2.11) a stelle più fredde o più calde del Sole. Come primo esempio, consideriamo le stelle di tipo M, che, come vedremo, sono di particolare interesse per gli studi di pianeti extrasolari. Le temperature effettive di stelle di bassa massa, con raggi compresi tra  $1/10$  e  $1/2$  del raggio solare, cadono nell'intervallo tra 3500 e 2800 K. Tenuto conto che  $T_\odot \simeq 5780$  K, dall'equazione (2.11) si ricava che la zona abitabile di una stella M è rispettivamente tra  $\simeq 5$  e 40 volte più vicina alla stella rispetto alla zona abitabile del Sole.

Come esempi di stelle più calde, consideriamo dapprima una stella F0 con massa  $1.6 M_\odot$  e raggio  $1.5 R_\odot$ ,  $T_* \simeq 7682$  K; rispetto ad un analogo terrestre la zona abitabile sarebbe circa 2.6 volte più lontana dalla stella. Consideriamo infine una stella A0 con massa  $2.9 M_\odot$  e raggio  $2.4 R_\odot$ ,  $T_* \simeq 10^4$  K; rispetto ad un analogo terrestre la zona abitabile sarebbe circa 7 volte più lontana dalla stella.

In generale, il calcolo della distanza della zona abitabile dipenderà da molti altri fattori. In Fig. 2.5 mostriamo, come esempio, alcuni risultati di letteratura [106] in cui si stimano  $d_{\min}$  e  $d_{\max}$  in funzione della luminosità stellare, per diversi tipi di modelli climatici.

#### FATTORI PLANETARI: ESISTENZA DI UN'ATMOSFERA

L'esistenza di un'atmosfera planetaria è una condizione necessaria per l'abitabilità di tipo superficiale. Questo fatto è facilmente dimostrabile, e quantificabile, tenendo in conto che deve esserci una pressione atmosferica superficiale superiore a quella del punto triplo dell'acqua affinché possa esistere acqua in fase liquida. Come si può vedere dalla Fig. 2.1, la pressione superficiale del pianeta dev'essere pertanto

$$p_s \gtrsim 612 \text{ Pa} . \quad (2.12)$$

L'esistenza di un'atmosfera pone a sua volta vincoli sulla massa,  $M_p$ , e il raggio,  $R_p$ , del pianeta. Tali parametri devono essere sufficientemente grandi da trattenere gravitazionalmente l'atmosfera, prevenendo il meccanismo di *Jean escape*. Tale meccanismo consiste nella perdita verso lo spazio esterno delle molecole atmosferiche con velocità termica superiore alla velocità di fuga del pianeta. Questo succede se le molecole che si trovano nella coda della distribuzione

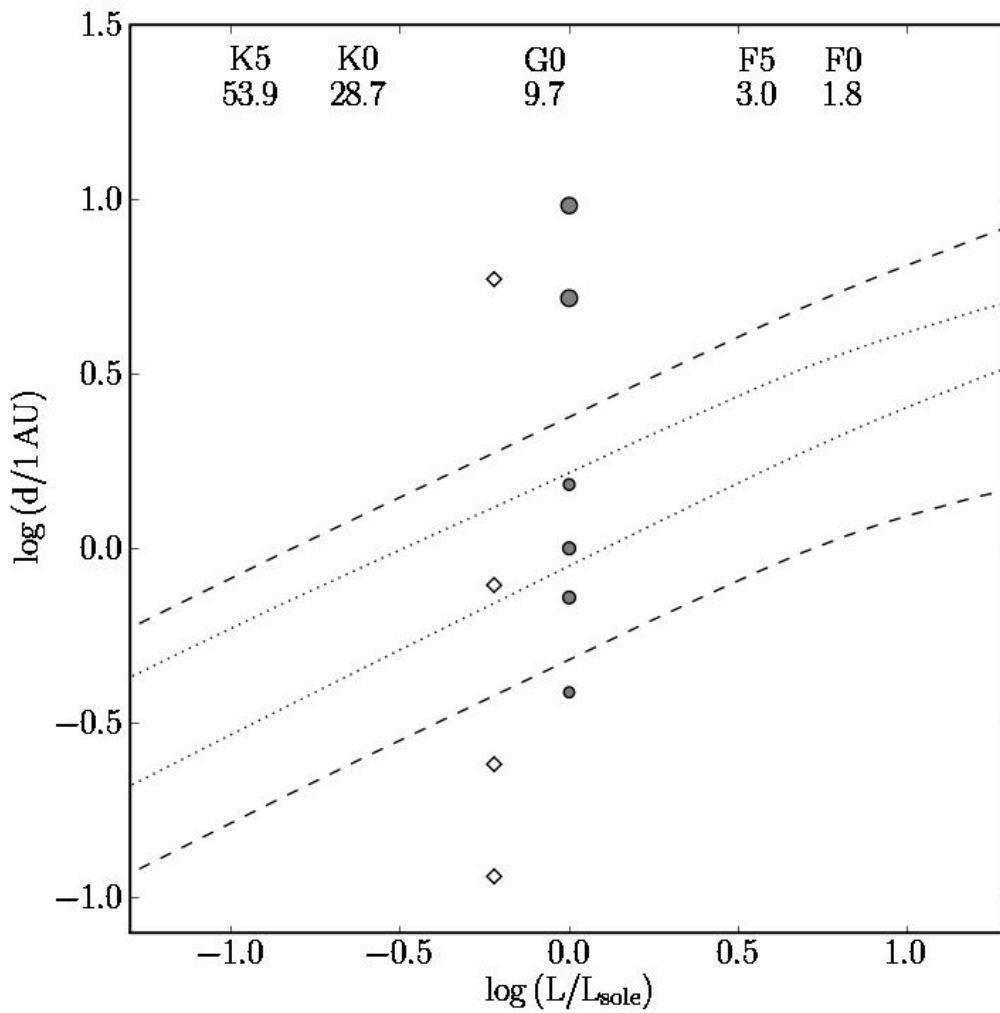


Figura 2.5: Limiti inferiori e superiori della zona abitabile circumstellare in funzione della luminosità di stelle sulla sequenza principale. I limiti di abitabilità sono calcolati con un'espressione che tiene conto della copertura nuvolosa del pianeta [106]; linea punteggiata: nessuna copertura nuvolosa; linea tratteggiata: copertura del 100%. Le scritte in alto indicano il tipo spettrale della stella centrale [4] e il suo tempo di permanenza (in miliardi di anni) sulla sequenza principale [13]. Cerchi grigi: pianeti del Sistema Solare; dal basso verso l'alto: Mercurio, Venere, Terra, Marte, Giove e Saturno. Rombi: pianeti scoperti attorno a 55 Cnc [43]; dal basso verso l'alto: b, c, f, d.

maxwelliana delle velocità molecolari raggiungono la velocità di fuga ad un livello dell'atmosfera dove il cammino libero medio è comparabile con l'altezza di scala. Affinchè tale meccanismo non faccia perdere l'atmosfera del pianeta bisogna che sia soddisfatta la condizione

$$\int_{v_{\text{fuga}}}^{\infty} f_v(T, \mu) dv \ll 1 \quad (2.13)$$

dove  $f_v(T, \mu)$  è la distribuzione maxwelliana delle velocità delle molecole atmosferiche, che dipende dalla temperatura atmosferica,  $T$ , e dalla massa delle molecole,  $\mu$ ; l'integrazione è estesa a partire dalla velocità di fuga superficiale dal pianeta,

$$v_{\text{fuga}} = \left( \frac{2GM_p}{R_p} \right)^{\frac{1}{2}} = \left( \frac{8}{3}\pi G \varrho_p \right)^{\frac{1}{2}} R_p, \quad (2.14)$$

che può essere utilmente espressa in funzione della densità media del pianeta,  $\varrho_p$ . Dall'espressione della distribuzione maxwelliana

$$f_v(T, \mu) = \frac{4}{\sqrt{\pi}} v^2 \left( \frac{\mu}{2kT} \right)^{3/2} e^{-\mu v^2/(2kT)} \quad (2.15)$$

si può dedurre che la coda di alta velocità delle molecole è tanto più popolata quanto più alto è il rapporto  $T/\mu$ . Il meccanismo di *Jean escape* è dunque più efficiente per molecole leggere e atmosfere di alta temperatura. È facile calcolare da queste espressioni che la Luna non può trattenere un'atmosfera di  $H_2$ . L'ultimo termine dell'Eq. (2.14) ci mostra la dipendenza della velocità di fuga dal raggio planetario per pianeti aventi una densità media costante. Questa relazione vincola il raggio di pianeti rocciosi con densità media simile a quella terrestre. Al diminuire del raggio la condizione (2.13) tende a non essere più soddisfatta in quanto l'integrale si estende su di un intervallo via via più grande. Al di sotto di un raggio critico il pianeta non riuscirà a trattenere l'atmosfera.

Oltre al meccanismo termico di *Jeans escape* esistono altri meccanismi di perdita di atmosfera quali la fotodissociazione radiativa e le collisioni con particelle di alta energia di molecole negli strati atmosferici esterni.

La fotodissociazione radiativa, dovuta all'effetto di fotoni stellari, può rivestire un ruolo importante qualora molecole di  $H_2O$  vengano trasportate negli strati atmosferici più alti per effetto di un eccesso di evaporazione. L'idrogeno creato per fotodissociazione tenderebbe facilmente a sfuggire dall'atmosfera a causa del suo basso peso molecolare. Si ritiene che questo processo possa aver avuto luogo nell'atmosfera primordiale di Venere [63].

Le collisioni di molecole negli strati esterni atmosferici con particelle di alta energia di origine stellare (vento stellare) o Galattica (raggi cosmici) tendono ad erodere le atmosfere planetarie. L'esistenza di un campo magnetico planetario tende a deviare tali particelle ed esercita dunque un importante ruolo di protezione dell'atmosfera e, in ultima analisi, della vita. Pertanto anche i parametri geofisici che determinano l'intensità del campo magnetico planetario sono importanti per l'abitabilità.

## FATTORI PLANETARI: COMPOSIZIONE CHIMICA ATMOSFERICA

L'importanza dell'effetto serra nel determinare la temperatura media superficiale implica che la composizione chimica atmosferica giochi un ruolo essenziale per l'abitabilità. I principali gas serra comunemente presi in considerazione sono  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ . Modelli realistici di climi di esopianeti devono pertanto tenere in conto della composizione chimica atmosferica. Come vedremo, le osservazioni di pianeti extrasolari cominciano a essere in grado di vincolare le abbondanze atmosferiche di tali composti, quantomeno per i pianeti giganti.

## FATTORI PLANETARI: ALBEDO

L'albedo superficiale dipende dalla presenza di oceani e continenti e dallo loro eventuale copertura da parte di neve e ghiacci. L'albedo planetaria è però anche influenzata dall'eventuale copertura nuvolosa dell'atmosfera. Nella banda visibile l'albedo è alta se la superficie è coperta di nubi, neve o ghiacci ( $A \simeq 0.8/0.9$ ), mentre ha valori più bassi per superfici rocciose o sabbiose ( $A \simeq 0.25$ ). Sulla Terra anche la presenza di vegetazione altera il valore d'albedo. Ciò dimostra che, in generale, la presenza stessa di vita può introdurre forme di *feedback* che influenzano condizioni climatiche del pianeta. Da tener presente infine che l'albedo dipende anche dal tipo spettrale della stella come evidenziato in alcuni studi ([106] e letteratura ivi citata).

## FATTORI PLANETARI: CAPACITÀ TERMICA SUPERFICIALE

La capacità termica superficiale è tenuta in conto in modelli di bilancio energetico più raffinati rispetto al semplice modello di bilancio globale considerato nell'Eq. (2.5). Ad esempio, gli *energy balance model* unidimensionali, che tengono conto della diffusione del calore lungo fasce latitudinali del pianeta [125, 9], contengono un termine di capacità termica.

La presenza di oceani influenza il clima mediante l'alto valore di capacità termica dell'acqua, che fornisce un importante meccanismo di mitigazione del climatico. I continenti sono invece caratterizzati da valori più bassi di capacità termica e dunque da maggiori escursioni termiche. Modelli di climi planetari dovrebbero pertanto tenere in considerazione la frazione di superficie coperta da continenti e oceani.

## FATTORI PLANETARI: PRESENZA DI OCEANI

Oltre agli effetti sulla capacità termica e sull'albedo, la presenza di oceani influenza l'abitabilità anche in un altro modo. Infatti l'acqua allo stato solido ha una densità minore rispetto allo stato liquido, e questo non succede in altre sostanze. Questo fatto può avere implicazioni interessanti per la sostenibilità della vita in ambienti di bassa temperatura. In tali ambienti è vi può essere acqua in fase liquida al di sotto di uno strato ghiacciato. Questa sembra essere la situazione sul satellite Europa.

L'alta capacità termica e la minor densità dei ghiacci rappresentano dunque proprietà dell'acqua favorevoli alla vita a livello di abitabilità. Tali proprietà vanno aggiungersi alla lista delle proprietà dell'acqua favorevoli alla vita a livello biochimico (Capitolo 1.2).

#### FATTORI GEOFISICI: FLUSSO DI CALORE INTERNO PLANETARIO

Il flusso di calore geotermico che raggiunge la superficie (termine  $\epsilon_g$  in Eq. 2.5) può essere molto piccolo anche in presenza di un calore interno totale estremamente elevato. Ciò è vero in particolare per i pianeti rocciosi a causa della bassa efficienza del trasporto di calore interno che non può avvenire per radiazione, ma solo per conduzione ed eventualmente per convezione.

Nel caso della Terra, come abbiamo visto, l'attuale flusso di calore geotermico,  $\epsilon_g = 0.082 \text{ W m}^{-2}$ , è completamente trascurabile rispetto a quello in arrivo dal Sole,  $S = 1366 \text{ W m}^{-2}$ . Non è detto però che il flusso di calore interno sia trascurabile in altri pianeti o in altre epoche della storia della Terra. A tal scopo è istruttivo esaminare il bilancio del calore geotermico terrestre [81].

La principale sorgente di calore interno terrestre al momento attuale è il decadimento radioattivo di isotopi con tempi di decadimento molto lunghi ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$  e  $^{232}\text{Th}$ ). Tali isotopi sono principalmente concentrati nella crosta continentale, che produce circa il 20% del calore interno. Sono meno concentrati nel mantello terrestre, che comunque, a causa del suo maggiore volume rispetto alla crosta, contribuisce a circa il 55% di questo bilancio. Il nucleo terrestre non contiene quantità significative di elementi radiogenici. Tuttavia, la cristallizzazione del nucleo esterno produce un calore latente che contribuisce per circa il 10% al calore interno. Il rimanente 15% di calore geotermico deriva dalla dissipazione dell'energia fossile di accrescimento della Terra.

Nella Terra primitiva il calore di formazione doveva essere sicuramente maggiore, così pure come il contributo radiogenico, data la maggior disponibilità di isotopi radioattivi che non erano ancora decaduti. Quindi il calore geotermico  $\epsilon_g$  poteva contribuire significativamente al bilancio energetico nella prime fasi evolutive della Terra.

Sulle basi di queste considerazioni è probabilmente ragionevole trascurare il flusso di calore interno per pianeti di tipo terrestre, purchè tali pianeti siano sufficientemente evoluti. Nelle primissime fasi dell'evoluzione planetaria sarebbe però opportuno prendere in considerazione il flusso geotermico nell'equazione di bilancio energetico (2.5). In generale, il calore interno potrebbe essere non trascurabile anche in fasi successive dell'evoluzione planetaria. Ad esempio, nel caso di Giove il flusso di calore interno è molto maggiore di quello terrestre ed è prevalente rispetto al flusso solare che è circa  $\simeq (1/25) S$ .

Un'altra possibile sorgente di calore interno è il *tidal flexing*, causato da forze mareali eventualmente presenti tra il pianeta e la stella centrale, oppure tra un satellite naturale e il suo pianeta. Un esempio del secondo caso è l'interazione mareale tra il satellite Io e Giove, ritenuta responsabile dei violenti fenomeni di attività vulcanica osservati su Io. Calore rilasciato

dal *tidal flexing* è anche osservato nel sistema Terra-Luna, seppure in misura trascurabile [15]. Anche per questo effetto il contributo al calore interno doveva essere maggiore nella Terra primitiva, assumendo che in tale epoca la Luna fosse molto più vicina alla Terra, come predetto da simulazioni della formazione del sistema Terra-Luna [57, 65].

#### FATTORI GEOFISICI: VULCANISMO E FENOMENI TETTONICI

Vulcanismo e fenomeni tettonici possono influenzare il clima in vari modi. L'immissione in atmosfera di gas vulcanici, come il  $\text{CO}_2$ , altera la composizione chimica atmosferica e pertanto l'intensità dell'effetto serra. La creazione di crosta continentale e la subduzione di crosta oceanica alterano costantemente l'equilibrio chimico e termico della superficie planetaria, creando scambi con l'interno del pianeta. I fenomeni tettonici alterano la frazione di continenti emersi e, di conseguenza, la capacità termica della superficie planetaria. Nel loro insieme, vulcanismo e fenomeni tettonici sembrano dar luogo a meccanismi di stabilizzazione del clima, quantomeno nel caso della Terra.

#### FATTORI GEOFISICI: NUCLEO METALLICO FUSO E ROTAZIONE

Anche la struttura interna più profonda di un pianeta può giocare un ruolo importante riguardo la sua abitabilità superficiale. Questo lo si può capire dal fatto che i campi magnetici planetari, che proteggono l'atmosfera planetaria da raggi cosmici e venti stellari, hanno origine negli strati profondi. Nel caso della Terra il campo magnetico è probabilmente il risultato delle correnti elettromagnetiche create dai moti relativi tra la parte interna (solida) e la parte esterna (liquida) del nucleo metallico, dove sono anche presenti moti convettivi [81]. La rotazione deve anche giocare un ruolo importante riguardo all'esistenza di tali moti. Si ritiene pertanto che campi magnetici in pianeti di tipo terrestre possano essere presenti solamente quando il pianeta possiede un nucleo metallico (parzialmente) liquefatto. In assenza di tale condizione il pianeta è completamente esposto agli effetti del vento stellare e dei raggi cosmici Galattici.

## Effetti di retroazione (*feedback*)

Lo studio dell'abitabilità planetaria è complesso a causa della dipendenza del clima da molti processi tra loro interdipendenti che generano degli effetti di retroazione (*feedback*). Se gli effetti di retroazione sono negativi, portano a stabilizzare il clima, se positivi portano a instabilità climatiche.

#### MECCANISMI CHE CREANO INSTABILITÀ CLIMATICHE

L'aumento della temperatura planetaria può portare all'evaporazione di gas con effetto serra. La copertura di neve e ghiacci tende ad aumentare quando le temperature sono basse, facendo

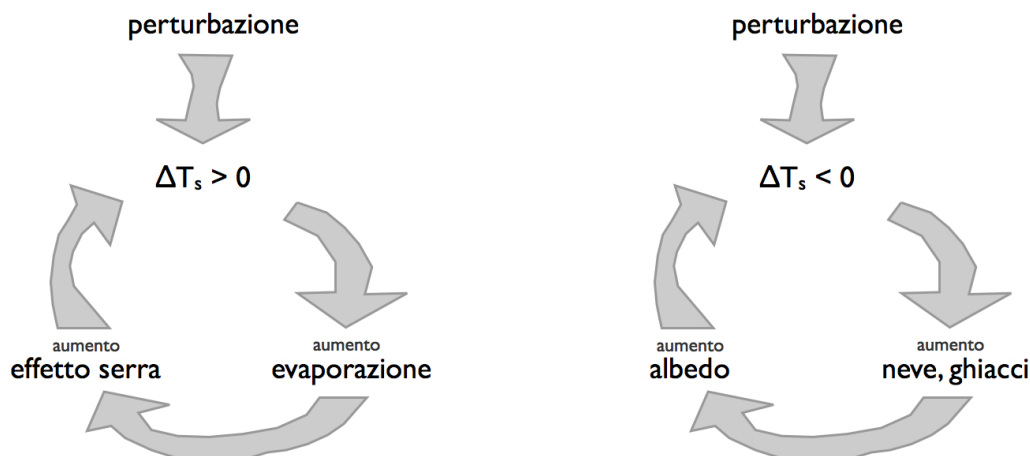


Figura 2.6: Esempi di instabilità climatiche planetarie. Nell'esempio a sinistra una perturbazione  $\Delta T_s > 0$  della temperatura superficiale genera una reazione a catena di riscaldamento globale, indotta dall'effetto serra. Nell'esempio a destra una perturbazione  $\Delta T_s < 0$  genera una reazione a catena di raffreddamento, indotta dalla variazione di albedo. Le perturbazioni potrebbero essere indotte da cause interne o esterne, come ad esempio da una variazione del flusso stellare.

così aumentare l'albedo. Il concatenamento di tali effetti può portare a delle retroazioni positive che innescano dei fenomeni di instabilità climatica quali quelli illustrati in Fig. 2.6. Il caso illustrato nella parte sinistra della figura si pensa possa essere rappresentativo di quanto successo in passato su Venere. Tale pianeta ha attualmente un effetto serra  $\Delta T_s \simeq 500^\circ \text{K}$ . Il caso illustrato a destra potrebbe aver avuto luogo in una epoca di glaciazione totale della Terra ("snow-ball Earth") la cui esistenza è sostenuta da alcuni autori.

#### MECCANISMI DI STABILIZZAZIONE DEL CLIMA

La persistenza della vita sulla Terra nell'arco di alcuni miliardi di anni ci fa ritenere che debba esistere qualche meccanismo di stabilizzazione del clima. In particolare si ritiene che esista un ciclo di carbonati e silicati che svolge tale funzione stabilizzatrice [63] grazie a un effetto di retroazione negativa sulla temperatura superficiale. In tale ciclo il  $\text{CO}_2$  è rimosso dall'atmosfera dalla degradazione (*weathering*) di silicati di calcio e magnesio presenti nelle rocce in superficie. I prodotti dissolti dal *weathering* sono portati dai fiumi negli oceani, dove una parte di essi viene trasformata in carbonato di calcio ed affossata nei sedimenti di carbonati. Prendendo  $\text{CaSiO}_3$  come esempio di roccia di silicato, la reazione complessiva di rimozione di  $\text{CO}_2$  dall'atmosfera e precipitazione sul fondo degli oceani può essere schematizzata nel seguente modo:



Tale reazione, per quanto lentamente, porterebbe a rimuovere il carbonio dal sistema atmosfera/oceano in circa 400 milioni di anni. Deve pertanto esistere un processo che riporti il carbonio in circolo al fine di mantenere uno stato stazionario. Si ritiene che tale processo sia il metamorfismo di carbonati che ha luogo quando il fondo oceanico viene subdotto dai movimenti tettonici. Quando ciò avviene i sedimenti di carbonati sono esposti ad alte temperature e pressioni. In tali condizioni la reazione (2.16) avviene in senso inverso: si riforma il silicato di calcio e viene rilasciato  $\text{CO}_2$ , che raggiunge l'atmosfera mediante sfatatoi vulcanici. Il motivo per cui questo ciclo ha una funzione stabilizzatrice del clima sta nella dipendenza del weathering dalla temperatura e dalla presenza di acqua. Se la temperatura dovesse diventare troppo bassa e l'acqua congelare, il weathering diminuirebbe e ci sarebbe un aumento del  $\text{CO}_2$  nell'atmosfera. Poichè il  $\text{CO}_2$  è un gas serra, questo porterebbe ad aumentare la temperatura, contrastando la diminuzione iniziale di temperatura. Tale retroazione negativa funzionerebbe pertanto da meccanismo stabilizzatore.

## Abitabilità continua

La scala di tempo dell'evoluzione della vita terrestre dai microrganismi agli organismi più complessi è dell'ordine di alcuni miliardi di anni (si veda il Capitolo 4). Tale scala di tempo lunga pone dei vincoli di *abitabilità continua*, o *abitabilità a lungo termine* per pianeti nei quali ci si aspetti di trovare forme di vita evolute. Il requisito di abitabilità continua pone vincoli stringenti sui vari fattori astronomici e geofisici che influenzano l'abitabilità planetaria.

### STABILITÀ DELLE ORBITE PLANETARIE

La dipendenza dell'abitabilità continua da fattori astronomici entra mediante il termine  $S_\star \equiv L_\star/(4\pi d^2)$  che tiene in conto della distanza tra il pianeta e la stella centrale,  $d$ . Consideriamo innanzitutto la dipendenza da  $d$ .

Se l'orbita è eccentrica,  $d$  varia tra i valori  $a(1 - e)$  e  $a(1 + e)$  nel corso di un periodo orbitale, dove  $a$  ed  $e$  sono il semiasse maggiore e l'eccentricità dell'orbita. Se vogliamo che il pianeta si trovi costantemente entro i limiti  $d_{\min}$  e  $d_{\max}$  della zona abitabile circumstellare, devono essere soddisfatte simultaneamente le condizioni [80]:

$$e \leq \frac{d_{\max}}{a} - 1 \quad (2.17)$$

$$e \leq 1 - \frac{d_{\min}}{a} \quad . \quad (2.18)$$

Queste condizioni delimitano una regione di *abitabilità orbitale continua* nello spazio dei parametri  $a$  ed  $e$ . All'aumentare di  $e$  il pianeta può rimanere costantemente nella zona abitabile solo per un intervallo sempre più piccolo di valori di  $a$ , tendenti al valore  $a = (1/2)(d_{\max} + d_{\min})$ . Allorché l'eccentricità supera un valore critico,  $e > (d_{\max} - d_{\min})/(d_{\max} + d_{\min})$ , il pianeta non può rimanere permanentemente nella zona abitabile qualunque sia il suo semiasse maggiore  $a$ .

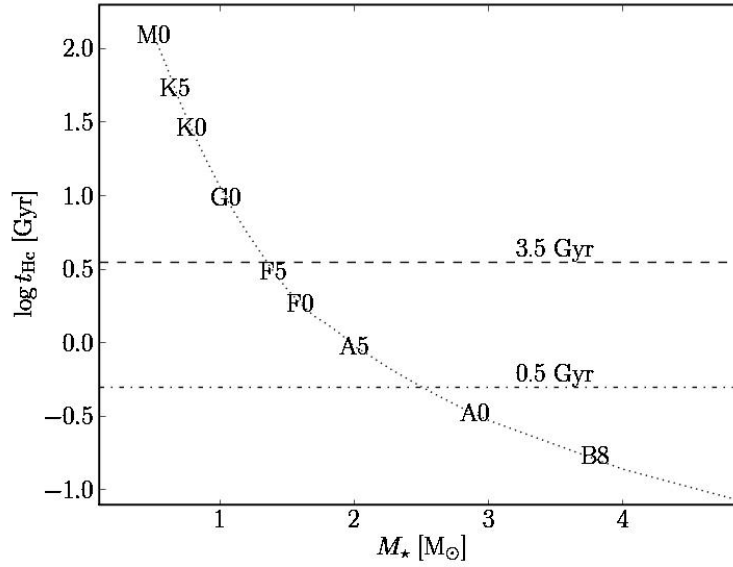


Figura 2.7: Confronto tra il tempo di permanenza di una stella nella fase di sequenza principale e alcune scale di tempo di interesse astrobiologico. Curva punteggiata: tempo di bruciamento dell'idrogeno verso massa stellare [13]; il tipo spettrale della stella [4] è indicato sulla curva. Le linee orizzontali rappresentano le scale di tempo dell'origine e dell'evoluzione della vita terrestre.

Solo uno studio dettagliato del clima del pianeta può dirci se il pianeta resta parzialmente abitabile anche quando non sono soddisfatte le condizioni (2.17) e (2.18).

La distanza dalla stella può anche variare come conseguenza di perturbazioni gravitazionali indotte da altri pianeti del sistema planetario o, in linea di principio, indotte dal passaggio ravvicinato di una stella perturbatrice. Quest'ultima possibilità è generalmente trascurabile, considerati i valori tipici di densità stellare Galattica, ma potrebbe non essere trascurabili se la stella centrale si venisse a trovare in una regione di altissima densità stellare.

#### STABILITÀ DELLA LUMINOSITÀ STELLARE

Consideriamo ora la stabilità del termine  $S_* \equiv L_*/(4\pi d^2)$ , tenendo conto che la luminosità della stella  $L_*$  cambia nel corso dell'evoluzione stellare. La fase più stabile, di maggior interesse per l'astrobiologia, è quella di sequenza principale. L'abitabilità nel corso della sequenza principale dipende dal tempo di bruciamento dell'idrogeno nel nucleo stellare. Come illustrato in Fig. 2.7, tale tempo di vita dipende a sua volta dalla massa e dal tipo spettrale della stella [4, 13]. Da tale figura si vede che se vogliamo condizioni stabili di luminosità per almeno 1 miliardo di anni, la stella centrale deve avere un tipo spettrale più tardo di A5. Stelle più fredde di F5 sono stabili abbastanza a lungo da permettere l'evoluzione biologica che ha portato alla formazione di organismi complessi sulla Terra. Stelle più calde di A0 non consentirebbero un'evoluzione biologica significativa e forse nemmeno la possibilità di originare vita.

In questo discorso bisogna anche tener conto del fatto che durante la fase di sequenza principale la stella aumenta la propria luminosità, sebbene in maniera graduale. Questo fatto, a parità di altri fattori, provoca un aumento graduale di  $d_{\max}$  e  $d_{\min}$ , ovvero sia un allontanamento dalla stella della zona di abitabilità. Poiché il semiasse maggiore dell'orbita non cambia, se vogliamo che un pianeta resti entro la zona abitabile per tutto il corso dell'evoluzione stellare, il vincolo sui possibili valori di  $d$  diventa molto stringente.

Alla fine della fase di sequenza principale, si ha un brusco aumento di luminosità, corrispondente alla transizione a gigante rossa. A questo corrisponde un altrettanto brusco spostamento verso l'esterno della zona abitabile. Pertanto pianeti che erano abitabili nel corso delle lunghe scale di tempo caratteristiche della fase di sequenza principale, si trovano all'improvviso fuori dalla zona di abitabilità.

#### FATTORI GEOFISICI DI STABILITÀ CLIMATICA

A giudicare da quanto avviene sulla Terra, il vulcanismo e i movimenti tettonici possono giocare un ruolo importante nel contesto dell'abitabilità planetaria, dando luogo al ciclo di carbonati e silicati [63] che ha un effetto di stabilizzazione del clima. Affinchè tale ciclo funzioni in altri pianeti è essenziale la presenza di attività geologica, con movimenti tettonici e vulcanismo che permettano sia la subduzione dei carbonati che la reimmissione di  $\text{CO}_2$  in atmosfera. Quindi solo pianeti attivi geologicamente potrebbero beneficiare degli effetti di stabilizzazione del clima offerto da questo meccanismo.

## Altri tipi di abitabilità planetaria

Lo studio della biosfera terrestre ci mostra che la vita può svilupparsi non solo in superficie, ma anche in ambienti sotterranei, nelle profondità sottomarine e nella stessa atmosfera. Nello studiare l'abitabilità planetaria dobbiamo tener in conto queste possibilità, così pure come del fatto che ambienti abitabili possono esistere non solo nei pianeti, ma anche in corpi minori, quali ad esempio i satelliti naturali dei pianeti.

#### ABITABILITÀ SOTTO LA SUPERFICIE

La presenza di gradienti termici negli interni planetari può far sì che ambienti sotto la superficie possano godere di condizioni favorevoli alla vita anche nel caso in cui la superficie stessa non sia abitabile. Se c'è una sorgente di calore interno, come spesso accade, può succedere che sotto ad una superficie troppo fredda per essere abitabile vi sia, ad una opportuna profondità, uno strato con condizioni di temperatura e pressione appropriate perché vi sia acqua in fase liquida. Pianeti con superfici ghiacciate potrebbero avere nel loro interno strati di acqua liquida. Da notare che quest'ultima situazione è possibile solamente grazie a una delle particolare proprietà di cui gode l'acqua, e cioè quella per cui la fase solida ha una densità minore di quella liquida. Per altri liquidi questo non è in generale possibile.

Il satellite Europa è un esempio di corpo celeste in cui sembra essere presente un intero oceano di acqua liquida al di sotto di uno strato superficiale di ghiaccio. La possibile esistenza di vita sotto le superfici planetarie è una delle motivazioni per ricerche di esobiologia nel Sistema Solare. Nel caso dei sistemi planetari extrasolari l'abitabilità sotterranea o sottomarina sarebbe però difficile da provare sperimentalmente. È infatti naturale aspettarsi che eventuali forme di vita di tale tipo potrebbero difficilmente influenzare le condizioni esterne del pianeta al punto da essere rilevabili mediante biomarcatori.

#### ABITABILITÀ NELL'ATMOSFERA DI PIANETI GIGANTI

I pianeti giganti gassosi sono privi di superficie abitabile. Infatti, la superficie del nucleo roccioso eventualmente presente in tali pianeti si troverà in generale in condizioni estreme di temperatura e pressione. Nonostante l'assenza di una superficie abitabile possiamo chiederci se in tali pianeti esistano strati atmosferici la cui temperatura e pressione permettano l'esistenza di acqua liquida. Nel caso di Giove i gradienti radiali di temperatura e pressione permettono l'esistenza di uno strato con tali proprietà che rientra dunque, in linea di principio, nella definizione di abitabilità. Nella pratica, però, l'acqua e gli eventuali organismi viventi dovrebbero rimanere sospesi in tale strato onde evitare di precipitare in strati non abitabili. Per quanto improbabile, secondo alcuni autori tale tipo di situazione non può essere completamente scartata *a priori* [99]. Questo esempio è utile per ricordarci la difficoltà di pervenire a conclusioni definitive riguardo la presenza o assenza di vita anche in pianeti che, come Giove, si trovino fuori dalla zona abitabile circumstellare.

## Fonti di energia

L'esistenza di fonti di energia per gli organismi viventi è un requisito essenziale di abitabilità. Nello studio di tali fonti di energia in ambienti diversi da quello terrestre è sufficiente limitarsi agli organismi autotrofi. Gli organismi eterotrofi eventualmente presenti acquisirebbero, per definizione, la loro energia dall'assimilazione degli organismi autotrofi. Come al solito, utilizziamo la vita terrestre come punto di partenza per le nostre considerazioni.

Come abbiamo visto, gli organismi autotrofi terrestri usano principalmente la luce e reazioni di ossido-riduzione come fonti di energia. Anche in ambienti fuori dalla Terra tali fonti di energia potrebbero essere importanti, sebbene adattate alle condizioni fisico/chimiche locali. Ad esempio, la fotosintesi dovrebbe adattarsi alla distribuzione spettrale della radiazione della stella centrale che, in generale, potrà avere uno spettro diverso da quello solare.

Non possiamo inoltre escludere che forme di vita non terrestri utilizzino fonti alternative alla luce e alle reazioni di ossido-riduzione. Ancora una volta l'esempio terrestre ci può fornire un'indicazione in tal senso. Sappiamo infatti che le cellule terrestri sono capaci di utilizzare svariate forme di energia, come si può dedurre dal fatto che sono sensibili al calore, al tocco, a stiramenti, convezione di fluidi, gravità e pressione [15]. Mediante diversi sistemi di trasduzione, gli organismi terrestri utilizzano tutti questi stimoli per interagire con l'ambiente

esterno, sebbene non per acquisire energia. Il fatto che la vita terrestre utilizzi solo la chimica e la fotosintesi, ma non altre forme di energia, può essere dovuto all'abbondanza di luce e ambienti con capacità di ossido-riduzione sulla Terra. È dunque possibile che, in ambienti con diverso tipo di disponibilità energetica, la vita sviluppi capacità di acquisire altre forme di energia mediante un uso opportuno di sistemi di trasduzione. Studi dettagliati suggeriscono che gradienti termici, ionici e osmotici, nonché l'energia cinetica di fluidi in movimento possano essere valide fonti energetiche alternative [103, 15].

## Protezione da radiazioni ionizzanti

Qualsiasi pianeta, ovunque si trovi, sarà esposto ai raggi cosmici Galattici. In aggiunta, i pianeti abitabili saranno esposti alle radiazioni ionizzanti e alle particelle cariche di origine stellare. Infatti, l'equazione (2.5) ci dice che, per definizione di pianeta abitabile, dev'essere  $S_* \approx S$  e pertanto il pianeta sarà necessariamente esposto alle radiazioni ionizzanti provenienti dalla stella, in maniera simile a quanto la Terra è esposta alle radiazioni ionizzanti di origine solare. Pertanto la presenza di un'atmosfera è un requisito importante per la protezione della vita superficiale dai danni inferti dalle radiazioni ionizzanti. L'eventuale esistenza di ossigeno atmosferico porterebbe alla creazione di uno strato di ozono che assorbirebbe le radiazioni ultraviolette. La presenza di un campo magnetico planetario, oltre a proteggere l'atmosfera, permetterebbe di deflettere attorno al pianeta il flusso di particelle cariche di alta energia.

In assenza di atmosfera, organismi viventi potrebbero essere presenti in strati al di sotto della superficie, che potrebbero offrire riparo dalle radiazioni. Pertanto l'esistenza di un'atmosfera è un requisito di abitabilità superficiale, ma non di abitabilità al di sotto della superficie.

Tabella 2.1: Quadro sinottico dei principali fattori che influenzano l'abitabilità planetaria.

| Fattore                                  | Implicazione fisica                                                                                              | Implicazione per l'abitabilità                                                                                                                                  |
|------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Proprietà della stella</b>            |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |
| Luminosità                               | Flusso in arrivo sul pianeta                                                                                     | Temperatura superficiale                                                                                                                                        |
| Massa                                    | Tempo di vita in sequenza principale<br>Periodo orbitale del pianeta                                             | Abitabilità continua<br>Frequenza delle stagioni                                                                                                                |
| Tipo spettrale                           | Albedo                                                                                                           | Temperatura media                                                                                                                                               |
| <b>Proprietà delle orbite planetarie</b> |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |
| Semiasse maggiore                        | Flusso in arrivo sul pianeta                                                                                     | Temperatura superficiale                                                                                                                                        |
| Eccentricità                             | Variazione stagionale del flusso                                                                                 | Variazione stagionale del clima                                                                                                                                 |
| Inclinazione                             | Variazione stagionale del flusso                                                                                 | Variazione stagionale del clima                                                                                                                                 |
| Periodo orbitale                         |                                                                                                                  | Frequenza della stagioni                                                                                                                                        |
| <b>Proprietà del sistema planetario</b>  |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |
| Pianeta gigante                          | Stabilizzazione delle orbite<br>Cattura di corpi minori                                                          | Abitabilità continua<br>Protezione da collisioni                                                                                                                |
| Satellite naturale                       | Stabilizzazione asse rotazione<br>Cattura di corpi minori<br><i>Tidal flexing</i>                                | Stabilità climatica<br>Protezione da collisioni<br>Calore interno planetario                                                                                    |
| <b>Proprietà del pianeta</b>             |                                                                                                                  |                                                                                                                                                                 |
| Periodo di rotazione                     | Campo magnetico planetario<br>Diffusione del calore in superficie                                                | Protezione da "space weather"<br>Clima                                                                                                                          |
| Massa e raggio                           | Velocità di fuga<br>Tempo dissipazione calore interno                                                            | Presenza di atmosfera<br>Persistenza di vulcanismo/tettonica                                                                                                    |
| Atmosfera                                | Effetto serra<br>Diffusione del calore in superficie<br>Filtro ultravioletto<br>Albedo<br>$P_s > 660 \text{ Pa}$ | Temperatura superficiale<br>Temperatura superficiale<br>Protezione da radiazioni ionizzanti<br>Temperatura superficiale<br>Possibilità di acqua in fase liquida |
| Oceani                                   | Capacità termica della superficie<br>Albedo                                                                      | Stabilizzazione climatica<br>Temperatura superficiale                                                                                                           |
| Biosfera                                 | Composizione chimica atmosferica<br>Albedo                                                                       | Effetto serra, temperatura sup.<br>Temperatura superficiale                                                                                                     |
| Attività tettonica/vulcanica             | Ciclo di silicati e carbonati<br>Sorgenti di energia e composti chimici                                          | Stabilizzazione climatica<br>Sostenibilità organismi autotrofi                                                                                                  |
| Abbondanza di radioisotopi               | Calore interno                                                                                                   | Temperatura superficiale                                                                                                                                        |
| Nucleo metallico                         | Campo magnetico planetario                                                                                       | Protezione da "space weather"                                                                                                                                   |

## Capitolo 3

### Origine della vita

L'approccio scientifico al problema dell'origine della vita consiste nell'ipotizzare l'esistenza di una sequenza di processi fisico-chimici spontanei che porti alla formazione dei primi organismi viventi a partire da composti chimici non biologici. L'insieme dei processi che portano all'origine della vita viene chiamato *abiogenesi*. Lo studio dell'abiogenesi occupa una posizione centrale in ambito astrobiologico: la comprensione dell'abiogenesi terrestre è infatti cruciale per poter valutare la possibilità se la vita possa originarsi o no in ambienti fuori dalla Terra.

Dal punto di vista sperimentale lo studio dell'origine della vita è estremamente difficile in quanto non esistono evidenze osservative dirette dei processi di abiogenesi. Ciononostante, esistono svariati approcci sperimentali che ci permettono di porre vincoli significativi su tali processi. Alcuni di questi approcci procedono a ritroso nello studio dell'evoluzione biologica, della quale esiste invece una notevole evidenza sperimentale, al fine di gettar luce sulla natura dei primi organismi viventi. Tale approccio a ritroso, di tipo *top-down*, è generalmente perseguito in ambito biologico e geologico. Parallelamente, esistono studi della crescita della complessità a livello chimico che possa aver portato all'origine delle prime molecole biologiche. Tale approccio, di tipo *bottom-up*, è perseguito in ambito chimico e anche astrofisico.

È bene precisare che, dal punto di vista concettuale, il trattare separatamente l'origine e l'evoluzione della vita è in qualche modo fuorviante. È infatti ragionevole ritenere che non vi sia una soluzione di continuità tra i processi di abiogenesi e quelli evolutivi. Dal punto di vista pratico, data la complessità di questi argomenti è senz'altro giustificato esporli separatamente. C'è anche da dire che esistono notevoli differenze metodologiche tra gli studi sull'origine della vita e quelli sulla sua evoluzione: ciò è dovuto in parte al fatto che solo per i secondi esistono evidenze sperimentali dirette.

Iniziamo dunque a introdurre gli studi sull'origine della vita. Nella prima parte del capitolo accenniamo alle principali problematiche affrontate dagli studi dell'abiogenesi terrestre. Nella seconda parte discutiamo la possibilità di esistenza di processi di abiogenesi in ambienti diversi da quello terrestre.

## 3.1 Abiogenesi terrestre

### L'origine *in situ* come ipotesi di lavoro

Negli studi sull'origine della vita si assume implicitamente che la vita terrestre si sia originata sulla Terra. A rigore, tale ipotesi non è dimostrabile sperimentalmente in maniera diretta. Sulla base di questo ed altri motivi, alcuni autori sostengono che la vita che conosciamo sia giunta sulla Terra dallo spazio [123]. Le considerazioni sull'origine della vita qui svolte sono basate sull'ipotesi di un'origine terrestre. Tale ipotesi è preferibile all'ipotesi esogena per vari motivi. Il primo è che *l'ipotesi terrestre permette di vincolare i processi che hanno dato luogo alla vita, usando come quadro di riferimento le condizioni fisico/chimiche della Terra primitiva*; viceversa, *l'ipotesi extraterrestre sposta il problema in un luogo e tempo sconosciuti, precludendo ogni possibilità di vincolare sperimentalmente i processi di abiogenesi*. Il secondo motivo è che l'ipotesi terrestre richiede un minor numero di assunzioni: infatti, a differenza dell'ipotesi esogena, non richiede assunzioni riguardo il trasporto della vita dal luogo d'origine alla superficie terrestre, passando per lo spazio. C'è infine da dire che non esistono evidenze sperimentali convincenti dell'arrivo di vita dallo spazio. Procediamo dunque ad accennare ad alcuni dei temi di ricerca relativi all'origine della vita terrestre, nell'ipotesi che l'abiogenesi abbia avuto luogo sulla Terra. Nella seconda parte del capitolo torneremo brevemente sull'ipotesi di un'origine extraterrestre.

### Vincoli temporali sull'origine della vita terrestre

Dall'ipotesi dell'origine *in situ* possiamo ricavare dei vincoli temporali riguardo all'epoca in cui ha avuto luogo l'origine della vita terrestre. In pratica la cronologia dei processi formativi della Terra e quella delle più antiche evidenze biologiche terrestri ci forniscono rispettivamente un limite superiore e uno inferiore sull'epoca in cui deve essersi originata la vita.

#### CRONOLOGIA DELLA FORMAZIONE DELLA TERRA

È possibile datare con precisione l'età di formazione del Sistema Solare e della Terra mediante tecniche di radiodatazione [10]. Per tale tipo di misura si utilizzano radioisotopi con diversi tempi di decadimento,  $\tau_d$ . Per datare l'età di formazione della Terra si confrontano le abbondanze di radioisotopi con tempo di decadimento lunghi, come ad esempio  $^{238}\text{U}$  ( $\tau_d = 4.5 \times 10^9 \text{ yr}$ ) e  $^{235}\text{U}$  ( $\tau_d = 7.0 \times 10^8 \text{ yr}$ ), con le abbondanze dei loro prodotti di decadimento stabili.

L'età di formazione del Sistema Solare si ottiene confrontando le età dei meteoriti più antichi. L'oggetto più antico è il meteorite *Allende*, di tipo CV, che ha un'età di 4.57 miliardi di anni. Dall'analisi di campioni di rocce lunari stimiamo l'epoca di formazione del sistema Terra-Luna a  $\simeq 4.50$  miliardi di anni fa [50].

La fine dell'accrezione della Terra ha avuto luogo attorno 4.45 miliardi di anni fa. Sebbene non si siano preservate porzioni di crosta terrestre così antiche, è possibile gettar luce sui processi geochimici avvenuti in tali epoche dallo studio di cristalli di zirconio intrappolati in rocce sedimentarie meno antiche. L'analisi isotopica di *zirconi* detritici scoperti a Jack Hills (Australia) mostra le evidenze più antiche riguardo presenza di acqua liquida terrestre: l'età di tali zirconi mostra un picco attorno a 4.2 miliardi di anni fa, con un caso datato a 4.4 miliardi fa [124].

Lo studio delle età dei crateri di impatto lunari dimostra l'esistenza di un picco molto intenso di bombardamento meteoritico attorno a 3.9 miliardi di anni fa [97], comunemente chiamato *late heavy bombardment*. L'origine di tale cataclisma non è certa, sebbene sia possibile spiegarlo come un episodio delle fasi finali di formazione del Sistema Solare [90]. In concomitanza con il bombardamento della Luna deve essere avvenuto un analogo bombardamento della Terra. Tale fenomeno potrebbe aver avuto effetti catastrofici sulla Terra, ma è difficile quantificare le conseguenze in termini di abitabilità [97].

#### PRIME EVIDENZE DI VITA SULLA TERRA

Le evidenze più antiche di vita sulla Terra sono nella forma di tracce di fossili mineralizzati scoperte nel contesto di ricerche geologiche [122]. È estremamente difficile trovare tracce della crosta terrestre più antica a causa dell'attività di tettonica che ricicla costantemente la crosta [1]. Non esistono tracce dei primi 500 milioni di anni, probabilmente anche a causa del *late heavy bombardment*. Esiste pochissimo materiale risalente a 4.0 – 3.5 miliardi di anni fa, generalmente alterato da metamorfismo e difficile da decifrare. Il primo materiale di crosta ben conservato risale a 3.5 – 3.2 miliardi di anni fa.

Oltre alla difficoltà di trovare campioni di crosta terrestre antica, vi è quella di rivelare tracce delle prime forme di vita, necessariamente microscopiche, in tali campioni. Esistono diversi metodi per rivelare fossili microscopici, tra cui studi di evidenze morfologiche e misure di rapporti isotopici. Le evidenze morfologiche si possono preservare grazie alla mineralizzazione della materia organica di origine biologica. In alcuni casi la morfologia può essere rivelatrice di un'origine biologica. Le evidenze morfologiche possono però portare ad interpretazioni ambigue e vanno corroborate con altri tipi di prove. Per quanto riguarda i rapporti isotopici, citiamo il  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$ . Come sappiamo, gli organismi terrestri utilizzano il  $^{12}\text{C}$ , ma non il  $^{13}\text{C}$  e pertanto ci aspettiamo che i fossili di microrganismi abbiano un rapporto  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  più alto rispetto ad un opportuno valore di riferimento non biologico.

Le prime possibili evidenze di vita datano a circa 3.8 miliardi di anni fa e si trovano nelle rocce sedimentarie nella *greenstone belt*<sup>1</sup> di Isua, nel sud-ovest della Groenlandia. Tali evidenze non sono però robuste. Il rapporto isotopico  $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$  è consistente con un'origine

---

<sup>1</sup>Le *greenstone belts* sono zone in cui si trovano rocce vulcaniche, variamente metamorfosate, associate a rocce sedimentarie. Possono estendersi per decine o centinaia di chilometri. Sono associate alle regioni più antiche della crosta terrestre.

biologica, ma c'è possibilità di contaminazione con batteri endolitici recenti. L'evidenza morfologica è presente, ma è difficile escludere che sia dovuta a fenomeni di metamorfismo.

I sedimenti più antichi meglio conservati, con evidenze morfologiche convincenti hanno 3.2 – 3.5 miliardi di anni e si trovano nelle *greenstone belt* di Barberton, in Sud Africa, e Pilbara, nel nord-ovest dell'Australia. Tali sedimenti sono ben preservati e mostrano evidenze diffuse della presenza di vita in litorali con acqua poco profonda. Le morfologie dei microfossili comprendono filamenti, bastoncini, bastoncini ricurvi e strutture ovali o sferiche. Si ipotizza che i primi organismi fossero di tipo termofilo e anaerobico [122].

#### FINESTRA TEMPORALE PER L'ORIGINE DELLA VITA

È opinione diffusa che la vita terrestre possa essersi originata solo successivamente alla fine del *late heavy bombardment*, conclusosi circa 3.9 miliardi di anni fa. In tal caso la vita deve essersi originata tra tale data e 3.5 miliardi di anni fa, l'età delle evidenze più robuste di microfossili. Anche volendo ignorare le evidenze più antiche ma meno certe, datate 3.8 miliardi di anni, è chiaro che la vita deve essersi originata *prima* di 3.5 miliardi di anni fa. Infatti il ritrovamento di tracce di vita diffusa in tale età suggerisce che fosse già trascorso tempo dal momento della formazione delle prime forme di vita, presumibilmente impossibili da rivelare.

Tenendo conto di queste considerazioni l'origine della vita deve aver luogo in una finestra temporale con durata inferiore a  $\approx 400$  milioni di anni, grossomodo tra 3.5 e 3.9 miliardi di anni fa, attorno alla fine dell'adeano e l'inizio dell'archeano (Fig. 4.1).

Se però, contrariamente all'opinione comune, il *late heavy bombardment* non fosse stato così catastrofico [97], i processi di abiogenesi avrebbero potuto iniziare già nell'adeano e la finestra temporale disponibile per la formazione della vita potrebbe essere stata maggiore.

## Condizioni ambientali all'epoca della formazione della vita

#### TEMPERATURA DELLA TERRA PRIMITIVA

Le nostre conoscenze sul processo di formazione stellare e planetaria suggeriscono che il Sistema Solare si sia formato mentre il Sole era nella fase T Tauri, precedente il suo arrivo sulla sequenza principale nel diagramma HR [83]. I vincoli temporali sopra accennati suggeriscono che l'origine della vita debba aver avuto luogo poco dopo l'arrivo del Sole sulla sequenza principale. I modelli di evoluzione stellare indicano che, al momento di arrivo sulla sequenza principale, il Sole doveva avere una luminosità circa 70% del valore attuale [13]. All'epoca dell'origine della vita la "costante solare"  $S$  doveva pertanto essere poco più del 70% del valore attualmente misurato. Inserendo tale valore basso di irradiazione nell'Eq. (2.5), e ammettendo che l'effetto serra terrestre fosse efficiente quanto quello attuale, si può facilmente calcolare che la Terra primitiva avrebbe dovuto essere ghiacciata. Al contrario, l'evidenza geologica

suggerisce che l'acqua fosse allo stato liquido già 4.4 miliardi di anni fa. Questa discrepanza va' sotto il nome di *faint young Sun paradox* [98].

Il modo comunemente accettato di risolvere questo paradosso è quello di invocare un più intenso effetto serra nella Terra primitiva. Ciò è plausibile, in quanto si ritiene che l'atmosfera della Terra in tali epoche dovesse essere particolarmente ricca di CO<sub>2</sub>, uno dei principali gas serra. Anche il calore geotermico primordiale doveva essere molto maggiore di quello attuale, contribuendo forse, in qualche misura, a risolvere il paradosso. Resta il fatto che le evidenze geologiche non indicano presenza di glaciazioni in tali epoche. Le poche evidenze relative alla temperatura terrestre attorno a 3.5 miliardi di anni sono ottenute dall'analisi di rocce sedimentarie. Tali evidenze, indicative delle temperature oceaniche, forniscono dei valori di alcune decine di gradi Celsius (si veda ad esempio [12], pag. 205).

#### L'ATMOSFERA DELLA TERRA PRIMITIVA

Conoscere la composizione chimica dell'atmosfera della Terra primitiva ci aiuta a vincolare i possibili percorsi chimici che devono aver portato all'origine della vita. La nostra concezione dell'atmosfera terrestre primitiva è cambiata nel corso del tempo, seguendo l'evoluzione dei modelli di formazione della Terra ritenuti via via più attendibili.

Nei vecchi modelli si riteneva che l'atmosfera primordiale fosse *altamente riducente*, contenendo H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e NH<sub>3</sub>. Tali gas volatili si sarebbero sprigionati dall'interno terrestre dopo esserne stati intrappolati durante la formazione della Terra. Attualmente si prende in considerazione un diverso scenario: la Terra si sarebbe formata con un interno caldo che non avrebbe permesso di trattenere tali gas volatili. Si pensa che alla fine del bombardamento meteoritico l'atmosfera terrestre fosse *debolmente riducente*, essendo dominata da CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, con tracce di CO e H<sub>2</sub>.

#### L'ACQUA NELLA TERRA PRIMITIVA

Come nel caso dell'atmosfera, anche l'origine dell'acqua sulla Terra è stato oggetto di un lungo dibattito a sostegno di diverse ipotesi [91]. Secondo l'ipotesi di *degassing* l'acqua, incorporata dalla nebulosa protosolare insieme ad altri volatili, si sarebbe liberata dall'interno della Terra al momento della sua formazione [96]. Un'ipotesi alternativa prevede invece che il grosso dell'acqua sia stato portato da planetesimi catturati dalla Terra nello stadio finale della sua formazione [84].

Per verificare o falsificare tali ipotesi si confronta il rapporto isotopico D/H misurato negli oceani terrestri,  $D/H = 1.56 \times 10^{-4}$ , con quello nella nebulosa protosolare, nei meteoriti e nelle comete. Nel confrontare tali misure occorre tener presente che il rapporto D/H può essere alterato da processi chimici di *frazionamento isotopico*. Di fatto, tale rapporto era più alto nelle regioni più esterne della nebulosa protosolare.

Alla luce delle attuali conoscenze l'ipotesi di *degassing* è difficile da accettare in quanto il

rapporto isotopico della nebulosa protosolare,  $D/H \simeq 0.21 \times 10^{-4}$ , è molto più basso del valore oceanico. Si ritiene che composti volatili come l'acqua difficilmente avrebbero potuto essere incorporati durante l'accrescimento degli strati interni terrestri a causa dell'alta temperatura presente alla distanza eliocentrica della Terra.

L'ipotesi della cattura di planetesimi ricchi di composti volatili è quella attualmente più accreditata. Tra i possibili candidati si considerano le condriti carboniose idrate, di origine asteroidale, e le comete. Le misure sembrano favorire un'origine negli asteroidi, in quanto le condriti carbonacee hanno un valor medio  $D/H \simeq 1.49 (\pm 0.06) \times 10^{-4}$ , simile a quello degli oceani, sebbene con una notevole dispersione tra 1.28 e  $1.80 \times 10^{-4}$  [91]. Le misure nelle comete indicano, generalmente, un rapporto isotopico all'incirca doppio di questo valore, suggerendo che il contributo cometario debba essere stato inferiore al 10%. Gran parte di tali misure sono però state effettuate in comete originatesi nella Nube di Oort e pertanto non si può escludere che altri tipi di comete possano avere un diverso valore di  $D/H$ . Recentemente si è ottenuto il valore  $D/H \simeq 1.61 (\pm 0.24) \times 10^{-4}$  nella cometa 103P/Hartley 2, probabilmente originata nella Cintura di Kuiper. Tale risultato, in accordo con il valore oceanico [51], apre la possibilità che tale tipo di comete possa aver contribuito significativamente alla formazione dell'acqua oceanica.

In ogni caso, gli zirconi trovati nelle rocce sedimentarie delle Jack Hills testimoniano che gli oceani fossero presenti sulla Terra 4.4 miliardi di anni fa [124]. Tale risultato porta ad escludere una terza ipotesi, avanzata nel passato, che l'acqua oceanica sia stata apportata gradualmente nel corso della storia della Terra.

## Sintesi di precursori biologici

Dopo aver accennato alle condizioni fisico/chimiche presenti sulla Terra all'epoca dell'origine della vita, cerchiamo ora di capire quali stadi di evoluzione chimica, precedenti l'abiogenesi vera e propria, possano aver portato alla sintesi spontanea di materiale prebiotico. Per materiale prebiotico intendiamo molecole organiche, di diverso grado di complessità, utili alla formazione delle macromolecole biologiche che attualmente conosciamo. Esistono due possibili scenari di sintesi di precursori biologici: sulla Terra primitiva e nello spazio. L'uno non esclude l'altro.

### SINTESI DI MATERIALE PREBIOTICO SULLA TERRA

L'ipotesi che la sintesi di materiale prebiotico sia avvenuta sulla Terra viene studiata mediante esperimenti di laboratorio. Non vi è infatti altro modo di esplorare tali tipi di percorsi chimici, che non possono aver lasciato tracce dirette nel record geologico terrestre.

L'idea di base degli esperimenti di laboratorio è quella di riprodurre in piccola scala le condizioni fisico/chimiche della Terra primitiva e di far procedere reazioni chimiche in maniera spontanea al fine di vedere se tra i prodotti di reazione si trovino precursori biologici.

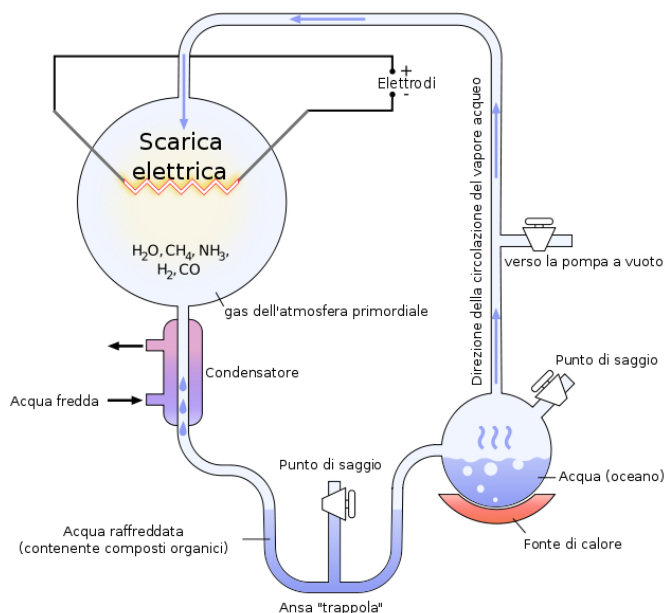


Figura 3.1: Schema dell'esperimento di Miller e Urey (fonte della figura: [130]).

Il primo e più famoso *esperimento* di questo tipo è quello di *Urey-Miller*, pubblicato nel 1953 come risultato di un lavoro di tesi di Stanley Miller [18], svolto sotto la supervisione di Harold Urey. Tale esperimento riproduceva le condizioni della Terra primitiva ritenute valide in quegli anni. Per simulare l'atmosfera si prendeva pertanto una miscela di gas riducenti, ricca di  $H_2$ ,  $CH_4$  e  $NH_3$ . Tale miscela veniva fatta circolare su dell'acqua, a simulare l'effetto dell'oceano, e sottoposta a scariche elettriche, a simulare scariche elettriche atmosferiche. Dopo poche ore dall'inizio dell'esperimento si raccolse materiale organico contenente materiale prebiotico, tra cui svariati amminoacidi. Tale risultato ha fornito la prima evidenza della possibilità di sintesi di materiale prebiotico sulla Terra. Come abbiamo accennato sopra, nel corso degli anni ci si è accorti che l'atmosfera terrestre non era fortemente riducente, ma debolmente riducente. L'esperimento è stato pertanto ripetuto utilizzando un'atmosfera molto meno ricca di idrogeno. Seppur con meno efficienza, l'esperimento riesce a produrre una certa quantità di amminoacidi anche in tali condizioni [71].

#### SINTESI NELLO SPAZIO

Le osservazioni di molecole interstellari dimostrano l'esistenza di molecole relativamente complesse nelle regioni più dense e fredde delle nubi interstellari [52]. Il fatto che tali molecole siano organiche conferma la particolare capacità del carbonio a formare strutture poliatomiche. La formazione di tali molecole è favorita dalla presenza di grani di polvere interstellare, che agiscono da catalizzatori della sintesi molecolare e, al tempo stesso, proteggono le molecole dai fotoni interstellari ultravioletti. Oltre a essere presenti in fase gassosa, parte delle molecole interstellari sono incorporate negli stessi grani di polvere. Nelle nubi più fredde i grani

sono ricoperti da ghiacci di semplici molecole quali  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ , e  $\text{CH}_3\text{OH}$ , identificabili dall'osservazione delle loro bande vibrazionali nel vicino infrarosso.

Durante le fasi di formazione stellare e planetaria le molecole organiche interstellari e i ghiacci depositati sui grani subiscono un forte processamento chimico [38]. Tale processamento è causato dal riscaldamento del gas, conseguente alla contrazione gravitazionale della nube protostellare, e dall'esposizione dei grani al campo di radiazione della protostella. Al tempo stesso, i grani si addensano e coagulano nel disco protoplanetario, dando così inizio al processo di formazione dei planetesimi, da cui nasceranno i pianeti. Nel corso di queste fasi di processamento chimico, tuttora poco conosciute, si ritiene si formi materiale organico ancora più complesso di quello osservato nelle nubi interstellari [53].

Sebbene le fasi di formazione planetaria siano estremamente difficili da osservare direttamente, le prove dell'esistenza di materiale organico processato nella nebulosa solare le troviamo nelle comete e negli asteroidi. Tali corpi astronomici rappresentano una sorta di "fossili" delle primissime fasi di formazione planetaria. La composizione chimica delle comete può essere dedotta mediante osservazioni astronomiche delle code di gas e polveri da esse rilasciate e, recentemente, anche mediante l'analisi di campioni raccolti nello spazio. La composizione degli asteroidi può essere dedotta indirettamente dai loro spettri di riflessione e, con altissima precisione, dall'analisi dei meteoriti che riescono a raggiungere la superficie terrestre. Infatti, la maggior parte di tali meteoriti non sono altro che frammenti di asteroidi.

Durante la formazione della Terra, comete e meteoriti devono aver contribuito in maniera significativa al trasporto sulla sua superficie (*delivery*) di materiale organico sintetizzato e processato nello spazio. Gli studi della composizione chimica delle comete e dei meteoriti permettono di gettar luce sul loro contenuto di composti organici e pertanto sul loro possibile contributo di materiale prebiotico sulla Terra primitiva.

Uno degli esempi meglio studiati [34] è quello del *meteorite di Murchison*, così chiamato dal nome della città in Australia presso cui è caduto nel 1969. In tale meteorite sono state trovati ben 74 amminoacidi e tutte e 5 le basi degli acidi nucleici. Analisi dettagliate hanno escluso che gli amminoacidi fossero dovuti a contaminazione biologica terrestre. L'origine non terrestre è supportata da vari tipi di evidenze. Una è che gran parte degli amminoacidi non sono i 20 amminoacidi codificati dal DNA terrestre. Gli amminoacidi biologici trovati nel Murchison sono infatti solo 11 su 74.

Un altro esempio di meteorite rilevante per questo discorso è quello del lago Tagish. Lo studio di tale meteorite dimostra che alcune delle molecole prebiotiche si formano durante le fasi di alterazione acquosa del meteorite [53].

Gli studi di meteoriti e comete dimostrano dunque che materiale organico complesso di origine spaziale può essere stato trasportato sulla Terra da planetesimi catturati nell'epoca precedente l'origine della vita. Lo studio dei crateri di impatto nel Sistema Solare ci indica che gli impatti meteoritici dovevano essere molto più frequenti in tale l'epoca rispetto all'epoca attuale. Resta da capire se tale materiale organico di origine spaziale possa aver raggiunto la Terra primitiva senza degradarsi durante l'attraversamento dell'atmosfera in quantità sufficienti

da aver contribuito in maniera significativa alle fasi di chimica prebiotica.

#### L'ORIGINE DELL'OMOCHIRALITÀ COME DIAGNOSTICO DELLA CHIMICA PREBIOTICA

L'origine dell'omochiralità delle molecole biologiche è un punto centrale degli studi sull'origine della vita [79, 58, 26]. Vari tipi di fenomeni fisici sono stati invocati per spiegare un eccesso di omochiralità nel mondo prebiotico che possa aver originato l'omochiralità osservata nelle molecole biologiche. I fenomeni presi in considerazione sono generalmente in grado di creare un lieve eccesso enantiomerico che deve poi trovare il modo di essere amplificato [58]. Una volta che la vita sceglie, per così dire, un determinato tipo di enantiomero, l'omochiralità viene infine fissata.

Tra le varie possibilità prese in considerazione, ci limitiamo qui a citare l'ipotesi che un lieve eccesso chirale a livello di materiale prebiotico sia stato originato fuori dalla Terra. Tale ipotesi ha un riscontro sperimentale, in quanto si sono effettivamente trovati lievi eccessi enantiomerici di tipo L negli amminoacidi trovati nel meteorite Murchison. Tale eccesso è stato trovato in particolare, negli amminoacidi non biologici del Murchison, non sospetti di contaminazione terrestre [34]. Come abbiamo detto, l'enantiomero L è quello che si trova negli amminoacidi biologici terrestri (Fig. 1.5). Rianalisi recenti confermano l'esistenza di tali eccessi enantiomerici nel Murchison [37].

Una possibile interpretazione per spiegare l'eccesso enantiomerico misurato è quella che le molecole organiche interstellari, prima di essere incorporate nei meteoriti, si siano formate in presenza di un campo di radiazione interstellare contenente luce polarizzata. L'analisi di altri campioni di origine meteoritica è fondamentale per vagliare questa ipotesi, così pure come misure di eccessi enantiomerici in molecole organiche prodotte in ambiente di laboratorio esposto a luce polarizzata. L'eventuale conferma di tale scenario interpretativo implicherebbe che il trasporto di materiale dallo spazio può aver giocato un ruolo fondamentale nell'evoluzione chimica prebiotica che ha preceduto l'origine della vita.

## Le prime macromolecole biologiche

Da quanto sopra esposto, esistono numerosi possibili percorsi di chimica prebiotica. Il compito di individuare quali tra tali percorsi chimici possano aver giocato un ruolo determinante nella chimica prebiotica terrestre è senz'altro arduo. Ciononostante non vi sono particolari problemi concettuali riguardo alla formazione spontanea di molecole organiche prebiotiche fino allo stadio di amminoacidi o di nucleotidi. Il primo scoglio concettuale lo troviamo invece al livello successivo di complessità, cioè nella formazione delle prime macromolecole con funzionalità biologiche a partire da tale materiale prebiotico. Il problema non riguarda tanto la formazione di strutture molecolari con funzionalità simili a quelle delle attuali membrane biologiche. Sappiamo infatti che strutture di questo tipo si possono formare in maniera spontanea grazie alle proprietà di molecole anfifiliche immerse in un solvente polare come l'acqua (Fig. 1.4).

Molto più complesso è capire come si possano essere formate le prime macromolecole con funzionalità metaboliche e genetiche.

Nelle attuali cellule viventi le funzioni metaboliche e genetiche sono svolte rispettivamente dalle proteine e dagli acidi nucleici. Sebbene abbiano funzionalità diverse, tali macromolecole sono strettamente dipendenti l'una dall'altra: la sintesi degli acidi nucleici è catalizzata da enzimi, che non sono altro che proteine; a loro volta gli enzimi sono sintetizzati usando l'informazione contenuta negli acidi nucleici. Questa situazione pone problemi concettuali riguardo la formazione delle prime macromolecole. Come poteva il primo acido nucleico sintetizzarsi in assenza delle prime proteine? Come potevano le prime proteine essere sintetizzate in assenza del primo acido nucleico? Chi è nato prima dei due?

Nel corso dell'ultimo mezzo secolo sono state avanzate svariate teorie sull'origine della vita che hanno cercato, in diversi modi, di affrontare il problema sopra menzionato [5, 8]. Molte di tali teorie sono riconducibili a due ipotesi: (1) le funzioni genetiche, e dunque gli acidi nucleici, sono nate per prime ( "*genes-first*" ); (2) le funzioni metaboliche, e dunque le proteine, sono nate per prima ( "*metabolism-first*" ). Recentemente vi è la tendenza a cercare teorie ibride che vadano oltre all'approccio puramente metabolico o puramente genetico. Una delle teorie di questo tipo attualmente più accreditate è quella del *mondo RNA*.

## IL MONDO RNA

Un modo per aggirare il problema di "chi è nato prima?" consiste nell'ipotizzare l'esistenza di macromolecole dotate, al tempo stesso, di capacità catalitiche e genetiche. Tale idea, già intuita da Francis Crick e Leslie Orgel alla fine degli anni '60 dello scorso secolo [33, 87] ha acquisito un riscontro sperimentale a seguito della scoperta dei *ribozimi*, macromolecole di RNA che mostrano entrambe le capacità [68, 49]. Sulla base di questa idea è stato coniato da Walter Gilbert [46] il termine di *RNA world*, per indicare l'esistenza di un ipotetico "mondo RNA", attraverso il quale sarebbe nata la vita, costituito da macromolecole di RNA con capacità autocatalitiche. Secondo l'ipotesi del mondo RNA le prime forme di vita sarebbero state basate esclusivamente sull'RNA e avrebbero preceduto gli attuali organismi viventi. Il mondo RNA si sarebbe evoluto a quello attuale a causa dei notevoli vantaggi in termini di stabilità genetica, derivanti dall'affiancare il DNA al RNA, e in termini di flessibilità, derivanti dall'introdurre le proteine per svolgere le funzionalità metaboliche. Gli attuali ribozimi sarebbero una sorta di fossili molecolari dell'antico mondo RNA.

Sebbene non esista una prova definitiva dell'esistenza passata del mondo RNA, è un fatto che molecole RNA funzionali con un'origine comune siano presenti in tutte le attuali forme di vita terrestri. Una delle migliori evidenze che le molecole RNA devono aver giocato un ruolo fondamentale nel passato proviene dagli studi di Ada Yonath, che hanno portato alla scoperta di un apparato di RNA con funzionalità di ribozima tuttora attivo nella regione interna degli attuali ribosomi [127].

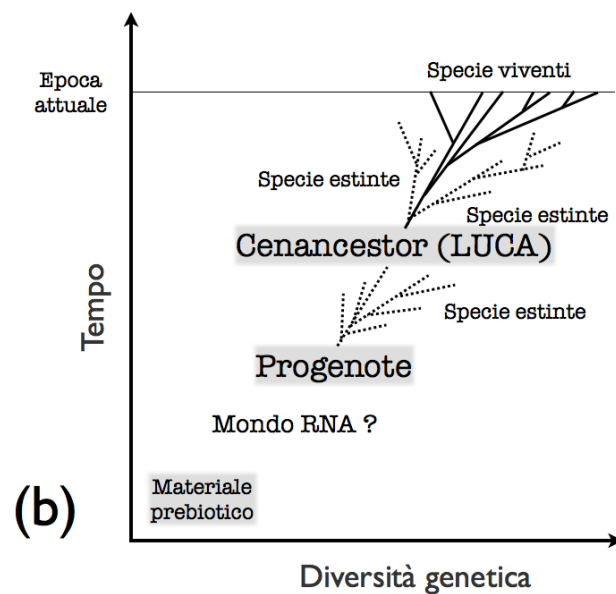
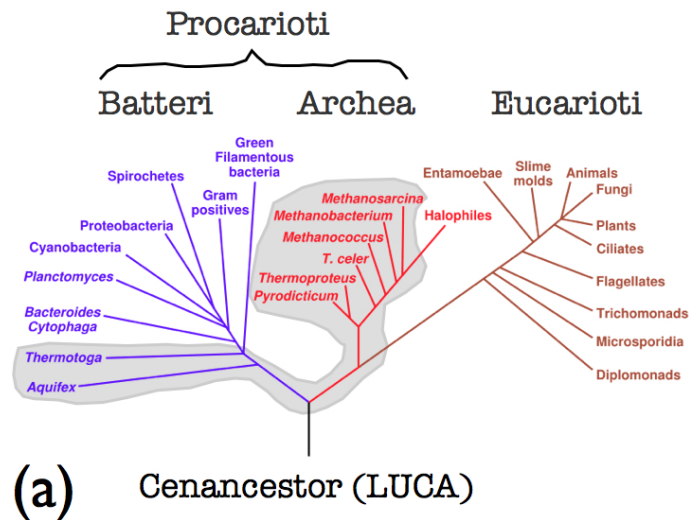


Figura 3.2: Esempi schematici di albero filogenetico. (a) Esempio che mostra i tre domini della vita terrestre, il grado di parentela di alcune specie e l'ultimo antenato comune (cenancestor); gli organismi termofili sono cerchiati in grigio. (b): Schema che mostra l'albero filogenetico, l'ultimo antenato comune, il progenote e gli stadi precedenti di abiogenesi; le linee tratteggiate rappresentano ipotetici percorsi evolutivi delle specie estinte delle quali non abbiamo alcuna informazione.

## I primi organismi viventi

Finora abbiamo accennato a studi che seguono un approccio di tipo *bottom-up*, mirato a produrre strutture molecolari via via più complesse e funzionali, a partire da semplici molecole prebiotiche. Ulteriori vincoli sull'origine della vita si possono ricavare *procedendo a ritroso*, dalle specie più complesse a quelle meno complesse. Tale approccio, di tipo *top-down*, è basato sullo studio degli attuali organismi viventi. Come esempi di tale tipo di ricerche consideriamo quella mirata a identificare l'*antenato comune* degli attuali organismi e la ricerca un *organismo minimale*.

### RICERCA DELL'ANTENATO COMUNE

Nel corso dell'evoluzione, le specie viventi si differenziano, arricchendosi di nuovi geni. Invertendo idealmente tale percorso evolutivo, ci aspettiamo di trovare un minor numero di specie, con meno geni, antenate delle specie attuali. Procedendo fino al limite di tale percorso a ritroso si può cercare di identificare l'ultimo antenato comune delle specie viventi, che va sotto il nome di *Cenancestor* oppure *LCA* (*Last Common Ancestor*), o anche *LUCA* (*Last Universal Common Ancestor*). Tale organismo sarà il più vicino, dal punto di vista evolutivo, ai primi organismi viventi e potrà pertanto gettar luce sulle loro caratteristiche.

La ricerca dell'antenato comune utilizza il confronto tra sequenze genetiche presenti nel genoma di tutte le specie. Tale tecnica è stata utilizzata per la prima volta da Carl Woese [126], che ha studiato una particolare sequenza di *RNA mitocondriale*, chiamata "16s". Mediante tale confronto è possibile ricostruire un *albero filogenetico* della vita terrestre. In Fig. 3.2a ne mostriamo un esempio. L'albero filogenetico rappresenta il grado di parentela delle attuali specie viventi. La differenza tra due specie visualizzata nel grafico è proporzionale alle differenze nella sequenza genetica esaminata. L'ultimo antenato comune è rappresentato graficamente come la "radice" dell'albero.

Dal punto di vista dell'origine della vita, uno dei risultati più interessanti dello studio dell'albero filogenetico è che gli organismi in prossimità della radice sono archeobatteri ed eubatteri estremofili di tipo *termofilo*. Se l'ultimo antenato comune fosse rappresentativo dei primi organismi, questo risultato indicherebbe che la vita terrestre si è originata in ambienti caldi. Ad esempio, la vita potrebbe essersi originata nelle profondità oceaniche, dove tuttora troviamo archeobatteri termofili. Le condizioni in tali ambienti potrebbero essere rimaste immutate nel tempo e tali ambienti potrebbero essere gli stessi in cui è nata la vita.

Per quanto importanti siano questi risultati, la loro interpretazione va però presa con cautela, per almeno due motivi. Il primo è che siamo in grado di tracciare l'evoluzione solo per le specie attualmente viventi, e non per quelle che si sono estinte nel passato. Il vero albero filogenetico contiene presumibilmente un gran numero di percorsi evolutivi a noi sconosciuti, relativi a tali specie estinte. Non possiamo pertanto sapere quale sia la vera radice dell'albero, in corrispondenza della quale verrebbero a trovarsi il primo organismo vivente, chiamato *progenote* (Fig. 3.2b).

Il secondo motivo di cautela riguarda la possibilità che vi sia stato scambio di materiale genetico tra batteri o archea, in aggiunta alla trasmissione di geni mediante discendenza. Esistono infatti diversi meccanismi in grado di produrre tale tipo di scambio genetico, indicati genericamente come *horizontal gene transfer*. Nell'albero filogenetico tale trasferimento genetico può essere raffigurato mediante linee orizzontali che connettono diversi tipi di batteri e archea. In presenza di tale fenomeno l'interpretazione dell'effettivo grado di parentela filogenetica diventa complessa.

C'è infine da dire che non è attualmente possibile convertire le distanze tra sequenze genetiche in una scala di tempo assoluto. Nonostante queste limitazioni, le informazioni ricavate dallo studio dell'ultimo antenato comune rappresentano un tassello importante nel rompicapo sull'origine della vita.

#### RICERCA DI UN ORGANISMO MINIMALE

Un altro approccio utile a gettar luce sui primi stadi della vita consiste nella ricerca di una struttura cellulare che contenga il minimo numero di geni possibili, pur conservando le funzionalità vitali [16]. Uno degli scopi di questo tipo di ricerca è capire quali sia il minimo numero di geni che permette ad una cellula di rimanere in vita.

Questo tipo di ricerca può essere svolto in vari modi. Una possibilità è basata sul confronto di sequenze genetiche di organismi prossimi all'ultimo antenato comune. Contando i geni comuni in tale sequenze, e aggiungendo un numero di altri geni indispensabili per il funzionamento degli organismi, si ottiene un numero di circa 250 geni [85].

Un altro metodo di ricerca di un organismo minimale consiste nel disabilitare gradualmente specifici geni di organismi prossimi all'ultimo antenato comune, procedendo fintantoché si ottengono cellule in grado di sopravvivere. Anche questo metodo, di carattere sperimentale, fornisce l'indicazione che il numero minimo di geni dev'essere dell'ordine di 250 [56]. La realizzazione di una cellula minimale, attualmente in fase di sperimentazione, porterà nuovi vincoli sui possibili percorsi evolutivi in grado di portare all'abiogenesi.

## 3.2 Abiogenesi nell'Universo

Nonostante i progressi nella comprensione della chimica prebiotica, delle prime macromolecole biologiche e dell'ultimo antenato comune, il problema dell'origine della vita terrestre è tuttora lontano dall'essere chiarito. In tale situazione è difficile fare predizioni su come potrebbe originarsi la vita in altri ambienti dell'Universo. Ciononostante, alcune lezioni possono essere tratte dallo studio dell'abiogenesi terrestre.

## Lezioni tratte dall'abiogenesi terrestre

### CONDIZIONI DI ABIOGENESI

Come abbiamo visto, la scala di tempo dell'abiogenesi terrestre è dell'ordine di alcune centinaia di milioni di anni. Tale scala di tempo è breve rispetto alle scale di tempo cosmiche, quali l'età dell'Universo e il tempo di bruciamento dell'idrogeno delle stelle di bassa massa.

Il fatto che la vita terrestre si sia originata in tempi relativamente brevi viene talvolta interpretato come un'evidenza che l'abiogenesi possa aver luogo facilmente purché l'ambiente sia abitabile. È bene chiarire che tale conclusione non è al momento avallata da alcuna evidenza sperimentale. In ogni caso non è lecito confondere la *velocità* con cui si sviluppa il processo di abiogenesi, con la *probabilità* che tale processo possa aver effettivamente luogo. In linea di principio, il processo di abiogenesi potrebbe essere poco probabile, pur essendo relativamente veloce.

Per capire quanto sia probabile il processo di abiogenesi bisognerebbe conoscere l'insieme dei meccanismi fisico/chimici che ne permettono la realizzazione. Nonostante i notevoli progressi negli studi di chimica prebiotica, siamo però lontani dal capire quali, tra i tanti possibili percorsi chimici, possono aver portato all'origine della vita terrestre. Di conseguenza non siamo in grado di sapere se il processo di abiogenesi richieda delle condizioni fisico/chimiche particolari in aggiunta alle condizioni di abitabilità, quali la presenza di acqua liquida e di sorgenti di energia. Per quanto ne sappiamo, le condizioni fisico/chimiche di abitabilità potrebbero non essere sufficienti, e forse solo in parte necessarie, per l'abiogenesi.

Il sospetto che le condizioni di abitabilità possano non essere sufficienti ad originare la vita è, per certi versi, supportato dall'uniformità della vita terrestre. Si può pervenire a tale conclusione mediante il seguente ragionamento. Supponiamo, come *ipotesi di lavoro*, che *l'abiogenesi abbia luogo con alta probabilità e in tempi brevi, purché l'ambiente sia abitabile*. Vediamo se tale ipotesi regge al vaglio sperimentale. Se l'ipotesi fosse vera dovrebbero essere esistiti sulla Terra numerosi episodi di abiogenesi, tra loro indipendenti, avvenuti nel corso degli ultimi 4 miliardi di anni di abitabilità della Terra. Come conseguenza dell'indipendenza di tali processi, ci aspetteremmo di trovare organismi terrestri con differenze significative a livello molecolare e genetico. Tale aspettativa è però contraddetta dalla notevole uniformità della vita terrestre testimoniata, tra l'altro, dall'omochiralità delle molecole biologiche e dall'unicità del codice genetico. Tale contraddizione suggerisce che l'ipotesi di lavoro sia errata. Un possibile errore è, per l'appunto, che l'abiogenesi richieda delle condizioni fisico/chimiche specifiche in aggiunta alle condizioni di abitabilità.

Esistono altri modi per non cadere nella contraddizione esposta nel precedente ragionamento. Li accenniamo brevemente.

(1) La vita che conosciamo potrebbe essere nata per prima e aver poi eliminato altre forme di vita prodotte da successivi episodi di abiogenesi. In questo caso l'uniformità che osserviamo sarebbe il risultato di un processo di eliminazione di forme di vita diverse da parte dall'unico tipo di vita che conosciamo. Questa possibilità è forse quella più accettata

generalmente, sebbene sia raramente discussa in maniera esplicita. Da notare però che tale possibilità contraddice, per certi versi, una delle prime fondamentali conclusioni delle scienze biologiche, dell'ottocento, ovverosia la negazione che possa esistere *generazione spontanea*.

(2) Microrganismi terrestri sostanzialmente diversi da quelli che conosciamo potrebbero esistere, ma non sarebbero stati ancora scoperti in quanto la vita microscopica terrestre è in gran parte inesplorata. Questa spiegazione contraddirebbe l'idea che la vita terrestre è uniforme a livello molecolare. Tale possibilità è stata avanzata da Paul Davies [36], che ha coniato il termine di *shadow biosphere*, per indicare un'ipotetica biosfera di organismi terrestri diversi da quelli che conosciamo. Non gode, per il momento, di supporto sperimentale.

L'affermazione che il processo di abiogenesi possa aver luogo purché l'ambiente sia abitabile richiede dunque la dimostrazione di una delle due ipotesi sopra esposte. In assenza di prove che dimostrino tali ipotesi bisogna tener in considerazione la possibilità che il processo di abiogenesi richieda un insieme di condizioni specifiche, più stringenti di quelle di abitabilità. Le condizioni di abiogenesi dovrebbero essere state presenti solo in un primo periodo della storia della Terra. Se infatti tali condizioni fossero rimaste presenti per un lungo periodo, dovrebbero essere esistiti successivi episodi di abiogenesi. In tal caso ci troveremmo ad affrontare nuovamente il problema dell'assenza di forme di vita alternative a quella terrestre.

In conclusione, se escludiamo le possibilità (1) e (2) di cui sopra, un possibile quadro di abiogenesi potrebbe essere il seguente. Nella Terra primitiva erano presenti delle condizioni fisico/chimiche specifiche che hanno permesso l'abiogenesi, in aggiunta alle condizioni di abitabilità. Successivamente, tali condizioni di abiogenesi sono cessate, pur rimanendo quelle di abitabilità. A questo punto la vita così originata si sarebbe differenziata mantenendo però la notevole uniformità a livello molecolare che conosciamo, grazie alla sua origine comune.

Uno vaglio accurato di tutte le possibilità sopra esposte è necessario prima di poter trarre delle indicazioni generali riguardo alla possibilità che abbia luogo il processo di abiogenesi in ambienti diversi da quello terrestre. Non è lecito assumere che la vita possa aver origine in altri ambienti con sola condizione che tali ambienti siano abitabili.

## Abiogenesi nel Sistema Solare

Il miglior modo per gettar luce sul processo di abiogenesi sarebbe quello di scoprire forme di vita originatesi in maniera completamente indipendente su di un pianeta o satellite del Sistema Solare. Tale possibilità è, in linea di principio, verificabile sperimentalmente mediante l'impiego di sonde spaziali. Nella pratica, tale tipo di verifica, basata sull'analisi di campioni superficiali raccolti *in situ*, è particolarmente difficile, oltre che costosa.

Nel caso che i campioni siano analizzati *in situ*, la strumentazione d'analisi è fortemente limitata dai costi legati al suo trasporto e dispiegamento nell'ambito della missione spaziale. Le limitazioni nella strumentazione si ripercuotono negativamente sulla capacità di rivelare l'eventuale presenza di forme di vita o di resti di microfossili.

La capacità di analisi dei campioni è molto maggiore se si ha la possibilità di riportare

sulla Terra i campioni prelevati *in situ* e di analizzarli quindi nei più attrezzati laboratori terrestri. In questo caso, però i costi aggiuntivi della missione spaziale, già alti, diventano ancora maggiori, a causa della necessità di riportare a Terra i campioni.

Considerate queste limitazioni, le prospettive di misure di questo tipo sono attualmente limitate ai corpi astronomici più vicini. Tenendo anche in conto l'aspetto dell'abitabilità, i corpi del Sistema Solare su cui si concentra attualmente l'attenzione per questo tipo di ricerca sono Marte e il satellite Europa, in orbita attorno a Giove. L'eventuale scoperta di microrganismi in tali ambienti indicherebbe che il processo di abiogenesi può essere abbastanza diffuso nell'Universo. Viceversa, la mancanza di vita in tali ambienti indicherebbe che le condizioni di abiogenesi devono essere molto specifiche e non facili da riprodurre.

## Ipotesi di un'origine extraterrestre della vita

La possibilità che la vita terrestre sia giunta dallo spazio è stata presa in considerazione da alcuni autori. Esistono teorie molto diverse tra loro in proposito. Alcune, come quella del "panspermia", postulano la possibilità di trasporto della vita a livello interstellare. Altre considerano la possibilità di trasporto a livello interplanetario. Esaminiamo brevemente entrambe le ipotesi.

### TEORIE DI PANSPERMIA

Data la notevole complessità dei sistemi viventi, microrganismi compresi, alcuni autori ritengono che poche centinaia di milioni di anni non possano essere stati sufficienti per la formazione della vita e che, pertanto, la vita che conosciamo si sia formata in epoche remote fuori dalla Terra, dove sarebbe giunta dallo spazio. Tale teoria viene detta del "panspermia".

Il concetto che la vita possa diffondersi nello spazio è stato proposto da molti autori del passato, tra cui Lord Kelvin e Hermann von Helmholtz, nell'ottocento, e Svante Arrhenius, all'inizio del novecento. Una delle idee prese in considerazione è che spore batteriche sospinte dalla pressione di radiazione interstellare si possano diffondere nello spazio e inseminare in tal modo pianeti della Galassia, tra cui la Terra. Negli anni '60 del novecento tale teoria è stata riproposta in termini moderni da Fred Hoyle e Chandra Wickramasinghe, dopo che tali autori avevano trovato evidenza di materia organica nello spazio interstellare [123].

Benchè l'evidenza di materiale organico interstellare abbia continuato ad accumularsi nel corso del tempo, e la possibilità di sopravvivenza di batteri nello spazio sia dimostrata da casi come il *Deinococcus Radiodurans*, la teoria del panspermia riscuote pochissimi consensi nella comunità scientifica. Al momento attuale, non esistono evidenze sperimentali che forme microscopiche di vita stiano giungendo sulla Terra dallo spazio.

Come abbiamo detto, uno degli argomenti addotti dai sostenitori della teoria del panspermia è la scala di tempo dell'origine della vita, che sarebbe troppo breve nell'ipotesi di origine terrestre. Questa obiezione non ha però un fondamento preciso: non possiamo infatti

escludere che i processi di abiogenesi, per quanto rari, possano procedere su una scala di tempo anche molto inferiore a  $10^8$  anni, una volta trovato il percorso chimico adeguato. Inoltre è possibile che il *late heavy bombardment* non sia stato così catastrofico come comunemente si assume [97]. In tal caso, la finestra temporale per l'origine della vita terrestre potrebbe estendersi di alcune centinaia di milioni di anni in più.

Un argomento usato contro la teoria della panspermia è il fatto che procedendo a ritroso nell'evoluzione della vita terrestre troviamo organismi via via più semplici, anche a livello cellulare; se la vita si fosse sviluppata altrove, potrebbe essere giunta sulla Terra già in uno stato evolutivo avanzato [16].

C'è infine da dire che accettare la teoria della panspermia equivarrebbe a spostare il problema dell'origine della vita a un luogo e un tempo imprecisati. In tal caso qualsiasi teoria sull'origine della vita sarebbe aleatoria, data la completa mancanza di conoscenza delle condizioni al contorno fisico/chimiche che potrebbero aver accompagnato tale evento.

#### TRASPORTO DI VITA A LIVELLO INTERPLANETARIO

Negli ultimi anni sta prendendo piede un'ipotesi di trasporto di vita a livello interplanetario, da non confondersi con la teoria della panspermia. In pratica, l'idea è che la vita possa essersi originata su Marte e quindi trasportata sulla Terra. A differenza delle teorie della panspermia tale ipotesi è, in qualche misura, verificabile sperimentalmente.

Dal punto di vista strettamente dinamico, il trasporto occasionale di materiale da Marte alla Terra è certamente possibile, come dimostrato dal ritrovamento di meteoriti di origine marziana sul suolo terrestre [82]. Il trasporto è reso possibile da una combinazione di fattori, tra cui il fatto che Marte ha una velocità di fuga relativamente bassa che permette l'espulsione di frammenti di superficie come conseguenza di un impatto meteoritico. Una volta espulsi da Marte c'è una probabilità non trascurabile che, a lungo andare, tali frammenti finiscano per avvicinarsi alla Terra ed esserne catturati.

Riguardo alla possibilità di un'abiogenesi marziana non siamo attualmente in grado di dire molto, salvo il fatto che Marte era probabilmente abitabile nelle prime fasi della sua storia, come vedremo nel Capitolo 5. Se la vita si fosse formata rapidamente su Marte, prima che il pianeta avesse perso le sue caratteristiche di abitabilità, la possibilità di un'abiogenesi marziana non sarebbe esclusa. Futuri studi di campioni superficiali prelevati direttamente su Marte potranno darci una risposta in questo senso. In tale momento si potrà valutare con maggior cognizione di causa l'ipotesi di trasporto di vita marziana sulla Terra.



## Capitolo 4

# Evoluzione della vita e del proprio ambiente

In questo capitolo presentiamo alcuni aspetti dell'evoluzione della vita terrestre e del proprio ambiente rilevanti in ambito astrobiologico. Riassumiamo quindi i principali insegnamenti che si possono trarre dall'esempio terrestre riguardo all'evoluzione biologica in ambienti abitabili.

## 4.1 Evoluzione della vita terrestre

Lo studio dell'evoluzione è in buona parte basato sulla datazione degli strati geologici in cui si trovano le tracce dei fossili degli organismi viventi. La disposizione degli strati ci offre la possibilità di datarli uno relativamente all'altro. Mediante tecniche di radiodatazione si possono ottenere datazioni assolute, talvolta molto accurate [132].

Lo studio *geochimico* degli strati permette di dedurre le condizioni ambientali in cui si trovavano a vivere gli organismi di cui troviamo le tracce fossili. Le misure geochimiche permettono inoltre di evidenziare tracce di attività biologica passata, anche in assenza di fossili macroscopici.

Gli studi più recenti dell'evoluzione utilizzano anche i confronti di sequenze genetiche da cui costruire alberi filogenetici (Fig. 3.2). L'analisi filogenetica non è in grado di offrire una scala dei tempi assoluta, ma riveste un'importanza fondamentale per tracciare il percorso dell'evoluzione a livello molecolare.

L'insieme di questi studi permette di porre in relazione l'evoluzione della vita con quella del proprio ambiente nel corso delle diverse epoche geologiche. La corrispondenza tra epoche geologiche e scala di tempo assoluta è riportata in Fig. 4.1.

## Principali tappe dell'evoluzione

Riassumiamo alcuni degli eventi più importanti che hanno avuto luogo nel corso dell'evoluzione della vita terrestre successivamente all'origine dei primi organismi, che erano verosimilmente microscopici e autotrofi.

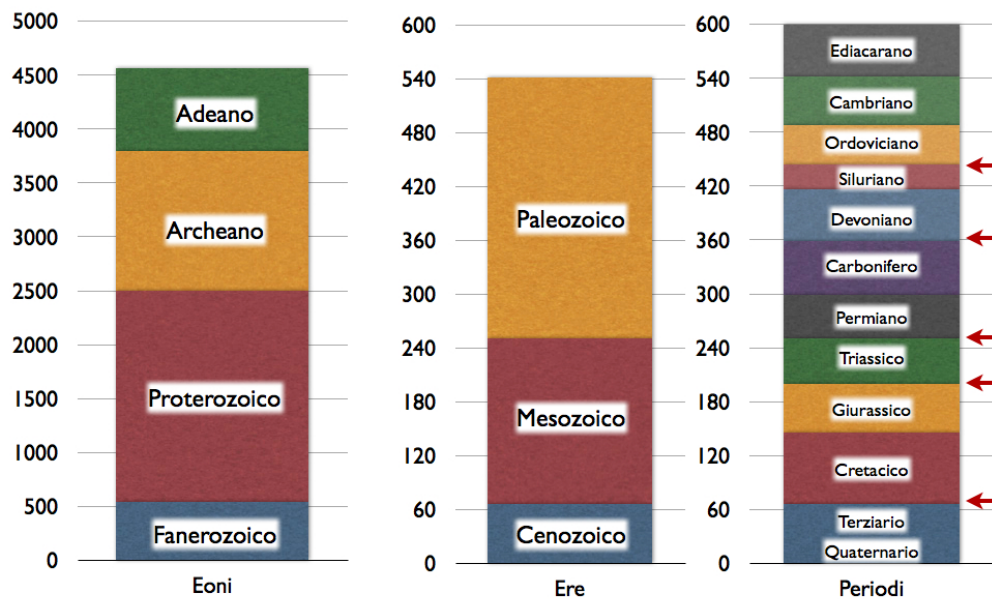


Figura 4.1: Scala di tempo geologica. I valori sono espressi in milioni di anni prima del presente. Fonte dei dati: [132]. Le due scale a destra rappresentano le ere e i periodi del fanerozoico. Gli eoni precedenti il fanerozoico vengono collettivamente indicati come “precambriano”. Il periodo ediacarano corrisponde alla fine del precambriano (fine del proterozoico). Le frecce indicano le principali estinzioni di massa.

### EVOLUZIONE DELLA FOTOSINTESI

L'acquisizione di energia dall'ambiente esterno mediante fotosintesi è stata sicuramente una tappa fondamentale dell'evoluzione di vita. Grazie alla fotosintesi la vita autotrofa raggiunge una possibilità di sostentamento illimitata nel tempo e indipendente dalla disponibilità di risorse chimiche in determinate nicchie ambientali.

Nonostante la notevole complessità del meccanismo di fotosintesi, i primi sistemi fotosintetici si erano già sviluppati attorno alla metà dell'archeano. I primi organismi fotosintetici

erano prevalentemente batteri e la fotosintesi era di tipo anossigenico. Studi filogenetici suggeriscono che i batteri purpurei siano stati tra i primi a sviluppare la fotosintesi [12].

La fotosintesi ossigenica nasce presumibilmente ad opera dei *cianobatteri*. Vi sono evidenze geologiche convincenti della loro presenza attorno a 2.9 miliardi di anni fa [86], ma la loro apparizione potrebbe risalire a molto prima, fino a 3.5 miliardi di anni fa [12].

L'ossigeno prodotto dalla fotosintesi viene inizialmente consumato dall'ossidazione dei minerali presenti sulla superficie terrestre. Pertanto il livello di ossigeno atmosferico non aumenta in maniera significativa, rimanendo attestato a un livello inferiore a  $\simeq 10^{-5}$  PAL<sup>1</sup> per un lungo periodo di tempo [88, 12].

Tra a 2.5 e 2.0 miliardi di anni fa il livello di ossigeno nell'atmosfera sale in maniera improvvisa, portandosi a un livello maggiore di  $10^{-2}$  PAL, per poi continuare a crescere, attestandosi attorno a  $\simeq 10^{-1}$  PAL circa 1.5 miliardi di anni fa [12]. L'aumento improvviso del livello di ossigeno, chiamato *great oxidation event* [54], è uno dei più importanti eventi dell'evoluzione della vita sulla Terra. Tra le principali conseguenze di tale evento citiamo la nascita di forme di vita aerobiche e la formazione di un primo, debole *strato di ozono* atmosferico. A questo punto la vita sulla superficie della Terra diventa protetta dalle radiazioni ultraviolette.

#### EVOLUZIONE DELL'ORGANIZZAZIONE CELLULARE

Negli strati geologici più antichi dell'archeano e della maggior parte del proterozoico le tracce dei fossili sono scarse e mancano evidenze di organismi macroscopici. Si ritiene che in tale periodo, che copre circa tre miliardi di anni, la vita si sia manifestata unicamente in forma di organismi unicellulari. In tale lasso di tempo l'organizzazione interna delle cellule è però progredita in maniera significativa, permettendo la transizione dalle cellule dei procarioti (batteri e archea), alle cellule più complesse e funzionali degli eucarioti.

Una delle differenze più significative tra cellule di procarioti ed eucarioti riguarda la disposizione e compattazione del DNA. Nei procarioti il DNA ha una struttura circolare e contiene l'intero genoma in un solo cromosoma; tale struttura non è separata dal resto della cellula. Negli eucarioti il DNA è compattato in forma di cromosomi racchiusi in un *nucleo* che separa il genoma dal resto della cellula.

Oltre al nucleo, la cellula degli eucarioti mostra *organelli* con caratteristiche funzionali ben precise. Alcuni di tali organelli sono fortemente reminiscenti di batteri. Si ritiene che l'evoluzione da procarioti a eucarioti abbia avuto luogo mediante un fenomeno di *endosimbiosi*, ovverossia inglobando stabilmente all'interno della cellula eucariotica batteri con specifiche proprietà funzionali. Ad esempio, le cellule eucariotiche avrebbero derivato i *cloroplasti* dai cianobatteri e i *mitocondri* dai batteri purpurei [12]. In tal modo gli eucarioti avrebbero ereditato specifiche capacità metaboliche dai batteri.

È difficile datare la nascita delle cellule eucariotiche, anche perchè tale processo è

---

<sup>1</sup>L'acronimo PAL (*Present Atmospheric Level*) indica l'attuale livello atmosferico.

probabilmente avvenuto in maniera graduale. Esistono evidenze certe di eucarioti attorno a 2.6-2.7 miliardi di anni fa, ma alcuni autori ritengono che possano essere esistiti anche prima [12]. Si ritiene che la specializzazione a livello interno cellulare si sia sviluppata parallelamente con la maggior disponibilità di un metabolismo di tipo ossigenico, più efficiente, che ha permesso la crescita delle cellule al livello raggiunto dagli eucarioti.

#### COMPARSА DEGLI ORGANISMI MACROSCOPICI

Sebbene siano in grado di formare colonie macroscopiche, i procarioti sono unicamente unicellulari e quindi microscopici. Perché nascano singoli organismi macroscopici bisogna attendere lo sviluppo delle cellule eucariotiche, le uniche che hanno dato luogo a organismi pluricellulari. Apparentemente, l'organizzazione e specializzazione delle cellule eucariotiche sono state necessarie per la formazione di organismi complessi. Anche il livello di ossigeno deve aver giocato un ruolo significativo. Dopo che l'ossigeno atmosferico raggiunge livelli relativamente alti, il metabolismo ossigenico diventa sufficientemente disponibile da permettere la formazione di strutture pluricellulari.

Gli organismi pluricellulari sono apparsi probabilmente attorno 800-1000 milioni di anni fa, verso la fine del proterozoico. Tali forme di vita sono rimaste di dimensioni relativamente piccole per qualche centinaia di milioni di anni. Le più antiche evidenze fossili di organismi macroscopici risalgono all'incirca a 650 milioni di anni fa, nel periodo ediacarano, alla fine del proterozoico.

#### EVOLUZIONE DEGLI ORGANISMI MACROSCOPICI

All'incirca 600 milioni di anni fa una fase di riscaldamento fa seguito a una glaciazione molto estesa. Tale fase coincide con una notevolissima diversificazione di strutture e stili di vita di organismi macroscopici. I reperti fossili diventano molto abbondanti a partire da  $\approx 540$  milioni di anni fa, all'inizio del periodo cambriano, il primo periodo del fanerozoico. Tale transizione viene talvolta indicata come *esplosione cambriana* per sottolineare l'aumento improvviso nel numero dei fossili ritrovati.

Una delle principali caratteristiche di tutto il fanerozoico è il proliferare di un gran numero di organismi complessi. Di fatto già nel periodo cambriano si sviluppano rapidamente tutte le specie attuali. I diversi periodi del fanerozoico, indicati nel pannello a destra in Fig. 4.1, sono definiti sulla base della presenza di fossili di diverso tipo. Durante le transizioni tra un periodo e il successivo c'è evidenza di scomparsa di specie del periodo precedente. Quando la frazione di specie scomparse diventa significativa, si parla di *estinzione di massa*. Il succedersi di tali estinzioni di massa è un'altra caratteristica saliente del fanerozoico.

Tra le principali tappe evolutive dell'ultima era geologica citiamo l'apparizione dei pesci nel cambriano, la colonizzazione delle terre emerse da parte delle piante nel siluriano, l'apparizione dei mammiferi nel giurassico. Solo alla fine del cenozoico,  $\approx 5$  milioni di anni fa, compaiono i primi ominidi, antenati delle forme di vita autocosciente quale la nostra.

## I meccanismi dell'evoluzione

I meccanismi alla base dell'evoluzione sono la selezione naturale e i mutamenti genetici. Tali meccanismi sono una combinazione di *caso* e *necessità*. Il caso è rappresentato dalla casualità dei mutamenti genetici, la necessità dalla selezione naturale, che filtra tali mutamenti. Per approfondimenti sul ruolo del caso e della necessità nei fenomeni vitali rinviando alla celebre monografia di Jacques Monod [19].

### SELEZIONE NATURALE

Il concetto di selezione naturale è stato introdotto da Charles Darwin<sup>2</sup> sulla base di una mole notevolissima di dati sperimentali da lui raccolti e successivamente vagliati nel corso di decenni [17]. Tale concetto può essere sintetizzato nel seguente modo. Gli individui di una popolazione con tratti biologici più adatti a sopravvivere in un determinato ambiente hanno maggior probabilità di riprodursi e di trasmettere i loro tratti a future generazioni. Questo processo produce gradualmente un adattamento della popolazione di una data specie al proprio ambiente. L'accumulazione di tali variazioni nel corso del tempo porta all'origine di nuove specie.

Come si vede, il concetto di selezione naturale è strettamente legato a quello delle condizioni ambientali. Questo fatto riveste una notevole importanza in astrobiologia, in quanto implica che le variazioni delle condizioni fisico/chimiche degli ambienti abitabili, ormai alla portata delle osservazioni astronomiche, influenzano l'evoluzione della vita.

### MUTAMENTI GENETICI

Uno degli ingredienti dell'evoluzione è la capacità di accumulare mutamenti genetici. La natura di tali mutamenti a livello molecolare era sconosciuta ai tempi di Darwin. Oggi sappiamo che i mutamenti possono avvenire mediante mutazioni o ricombinazioni dei geni codificati nel DNA.

Le *mutazioni* genetiche possono avvenire mediante disaccoppiamento spontaneo o mediante agenti esterni. Tra gli agenti esterni citiamo le radiazioni ionizzanti e gli agenti chimici di vario tipo. Le *ricombinazioni* genetiche possono avvenire mediante trasferimento di geni, trasposizione di geni, *crossing-over* e altri meccanismi. Il trasferimento di geni può avvenire a livello di organismi unicellulari. Il *crossing-over* ha luogo in organismi più evoluti, nel corso della *meiosi*, ed è uno scambio di materiale genetico di tipo sessuale.

## Evoluzione del clima terrestre

L'esistenza di vita sulla Terra su di un arco di tempo dell'ordine di almeno 3.5 miliardi di anni presuppone una complessiva stabilità climatica a lungo termine. D'altra parte, i numerosi

---

<sup>2</sup>Tale concetto era stato avanzato indipendentemente anche da Alfred Russel Wallace.

episodi di estinzione testimoniano l'esistenza di numerosi episodi di instabilità.

#### STABILITÀ A LUNGO TERMINE DEL CLIMA TERRESTRE

Una delle condizioni di stabilità climatica è che la costante solare  $S$  non vari nel corso del tempo. Questa condizione è soddisfatta se la luminosità solare e il semiasse maggiore dell'orbita terrestre restano costanti nel tempo. La stabilità dinamica del Sistema Solare sembra al momento garantire che la distanza Terra-Sole non subisca variazioni secolari, nè le abbia subite per gran parte del suo passato. La luminosità solare è approssimativamente costante grazie al fatto che il Sole si trova nella sequenza principale del diagramma HR. Gli studi di evoluzione stellare ci indicano tuttavia che ci deve essere stato un incremento graduale della luminosità solare nel corso della fase di sequenza principale. Non possiamo poi escludere che altri fattori che contribuiscono a determinare la temperatura superficiale possano essere variati nel corso dei miliardi di anni della vita sulla Terra. Data la sensibilità del clima a variazioni di temperatura (si pensi ad esempio alla variazione di albedo con l'aumentare della copertura di neve e ghiacci) si pensa che debbano esistere dei meccanismi che hanno permesso alla Terra di stabilizzare il proprio clima su lunghi periodi. Uno dei meccanismi di stabilizzazione presi in considerazione è il ciclo di  $\text{CO}_2$  inorganico, cui abbiamo già accennato nel Capitolo 2.

#### INSTABILITÀ CLIMATICHE ED ESTINZIONI

Il record dei fossili dimostra che le estinzioni hanno giocato un ruolo fondamentale nell'evoluzione delle specie terrestri. Per capire se l'evoluzione può seguire un percorso simile anche in altri pianeti è utile prendere in esame le cause di tali estinzioni.

Le principali estinzioni di massa sono indicate con una freccia in Fig. 4.1. La percentuale di specie estinte varia tra circa il 60% e il 90%. Tra quelle più intense citiamo quella alla fine del periodo ordoviciano e quella alla fine del permiano.

L'intervallo temporale tra una estinzione e la successiva è tipicamente di alcune decine di milioni di anni. Le estinzioni *maggiori* sono intervallate di un centinaio di milioni di anni. Non esiste una evidenza netta di una periodicità regolare, sebbene sia stata cercata in diversi studi.

Si suppone che le estinzioni siano provocate da cambiamenti relativamente rapidi delle condizioni chimico/fisiche ambientali. Le specie che non riescono a sopravvivere a tali cambiamenti si estinguono, mentre quelle maggiormente adatte alle nuove condizioni si diffondono. Si tratta dunque di capire quali fattori possano alterare rapidamente le condizioni climatiche.

## Cause di instabilità climatica

Instabilità climatiche possono avvenire a causa di *feedback* positivi tra i diversi fattori che influenzano il clima, come negli esempi che abbiamo schematizzato in Fig. 2.6. Tali instabilità possono portare a episodi di riscaldamento o raffreddamento relativamente rapidi, seppure non improvvisi.

Altri tipi di instabilità, più repentine, potrebbero essere causate da fattori di origine geofisica o astronomica. Tra i fattori geofisici, si stanno accumulando evidenze di *eruzioni vulcaniche* di vastissime proporzioni. Tali eruzioni avrebbero potuto causare le estinzioni osservate tra il Permiano e il Triassico e tra il Triassico e il Giurassico [8]. Tra i fattori astronomici vengono presi in considerazione esplosioni stellari e impatti di meteoriti. Passiamo rapidamente in rassegna tali cause di origine astronomica.

### ESPLOSIONI STELLARI

Diversi studi hanno considerato la possibilità che esplosioni stellari di diverso tipo possano essere state la causa di una o più estinzioni di massa. Tra i tipi di esplosione sono state considerate sia le *supernove* [40, 45] che i *lampi di raggi gamma* [101, 113].

Le stime effettuate in vari studi indicano che l'esplosione di una supernova potrebbe avere effetti catastrofici se avviene entro una distanza di circa 10 pc dalla Terra. Le principali conseguenze dirette della radiazione ionizzante riguarderebbero l'atmosfera [45, 107, 39]. Negli scenari peggiori lo strato di ozono verrebbe distrutto e la ionosfera potrebbe portarsi fino al livello del suolo. In tali condizioni la vita in superficie verrebbe improvvisamente esposta alle radiazioni ionizzanti. Se la supernova esplode entro  $\simeq 8$  pc, il resto di supernova comprime l'eliopausa<sup>3</sup> entro una distanza minore di 1 AU, esponendo direttamente la Terra agli effetti della supernova [42].

Per capire se un'esplosione di supernova possa essere una causa plausibile di estinzione, bisogna calcolare la frequenza di esplosione entro una data distanza. Tale calcolo è necessariamente statistico e si basa su tassi medi di esplosione di supernove Galattiche. Stime ottenute in tal modo indicano che un'esplosione di supernova entro 10 pc potrebbe avvenire circa ogni  $\approx 3 \times 10^8$  anni. È dunque possibile che una delle estinzioni di massa avvenute dal cambriano fino a oggi ( $5.4 \times 10^8$  anni) possa essere stata innescata da una supernova. Le incertezze in tale stime statistiche non permettono di arrivare a una conclusione certa in tal senso. D'altra parte, possiamo affermare che alcuni di tali eventi devono essere avvenuti nel corso dei circa 3 miliardi di anni delle ere precambriane e possono aver influenzato le prime fasi dell'evoluzione della vita terrestre.

I lampi di raggi gamma, meglio noti come *gamma ray burst* (GRB) sono molto più rari, ma anche più energetici rispetto alle esplosioni di supernove. L'esplosione nei GRB è convogliata in un fascio conico collimato. Qualora un pianeta si trovasse entro tale cono,

---

<sup>3</sup>L'eliopausa è l'interfaccia tra il vento solare e il mezzo interstellare.

potrebbe subire effetti distruttivi anche a distanze di 1 o 2 kpc. Le conseguenze sarebbero simili a quelle dell'esplosione di una supernova vicina: distruzione di gran parte dello strato di ozono e aumento della radiazione ionizzante in superficie. Calcoli dettagliati indicano una forte produzione di  $\text{NO}_2$  nell'atmosfera con conseguente precipitazione di nitrati, nonché una diminuzione della luce visibile in arrivo in superficie con conseguente raffreddamento. Alcuni autori sono giunti ad associare la fenomenologia osservata nella transizione tra l'ordoviciano e il siluriano come risultato di un evento di questo tipo [113]. Tale fenomenologia comprende un periodo di glaciazione di difficile interpretazione, che potrebbe essere stata una conseguenza del raffreddamento, e la colonizzazione delle terre emerse da parte delle piante, che potrebbe essere stata stimolata dall'eccesso di nitrati. Non è però possibile confermare tale scenario. Il calcolo della frequenza statistica dei GRB è molto più incerto rispetto al caso delle supernove, sia a causa della minor statistica disponibile e sia a causa dell'incertezza nel valore dell'angolo solido del fascio collimato.

#### COLLISIONI CON CORPI MINORI

Gli impatti di meteoriti di grandi dimensioni sulla Terra possono produrre, in casi estremi, alterazioni momentanee del clima globale con significativi effetti biologici. L'energia cinetica di un meteorite di diametro  $D$  e densità media  $\rho$  che impatta la Terra ad una velocità  $V$  è

$$\mathcal{E} \approx 2.2 \times 10^4 \left( \frac{\rho}{3.5 \text{ g cm}^{-3}} \right) \left( \frac{D}{1 \text{ km}} \right)^3 \left( \frac{V}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^2 \text{ megaton} \quad (4.1)$$

dove la densità indicata nell'espressione è rappresentativa dei silicati. L'unità di misura di 1 megaton =  $4.184 \times 10^{15}$  J è equivalente all'energia liberata da  $10^6$  tonnellate di tritolo. La caduta di un meteorite di alcuni chilometri di diametro potrebbe produrre una nube di polveri capace di oscurare il pianeta per vari mesi. Ciò provocherebbe una forte estinzione di organismi fotosintetici molti dei quali sono alla base della catena alimentare degli organismi eterotrofi.

Si ritiene che un impatto di questo tipo abbia avuto luogo nella transizione K-T tra il cretaceo e il cenozoico, 65.5 milioni di anni fa. Questo fatto è testimoniato dalla presenza di uno strato ricco di iridio rinvenuto in svariati siti terrestri e attribuito alla deposizione di polvere di origine meteoritica. Il cratere di  $\sim 100$  km di diametro ed età 65.0 milioni di anni localizzato a Chicxulub (Yucatan, Messico) potrebbe essere stato prodotto da tale impatto. Esiste un certo consenso in letteratura riguardo al fatto che tale evento possa essere correlato con l'estinzione di massa K-T. Non si escludono però altre concause, anche in considerazione della non perfetta concordanza temporale tra l'età del cratere e la data dell'estinzione. In effetti, nello stesso periodo hanno avuto luogo eruzioni vulcaniche estremamente intense. Tali eruzioni potrebbero aver contribuito in maniera significativa alle alterazioni climatiche responsabili dell'estinzione K-T.

Una stima indiretta della frequenza di collisioni catastrofiche può essere ottenuta dallo studio dei crateri d'impatto della superficie lunare. Impatti sufficientemente energetici da

creare crateri lunari di un centinaio di km di diametro sono avvenuti 800 e 109 milioni di anni fa [8]. È chiaro dunque che fenomeni catastrofici di questo tipo possono avvenire anche sulla Terra con una frequenza dell'ordine del centinaio di milioni di anni. Interessante notare, per inciso, che Luna diminuisce il tasso di collisioni con la Terra catturando una frazione di corpi minori.

## 4.2 Evoluzione della vita nell'Universo

### Lezioni tratte dalla storia della vita terrestre

L'evoluzione della vita terrestre ci offre alcuni insegnamenti che hanno una validità generale e che ci permettono di formulare delle aspettative riguardo al tipo di evoluzione che può aver luogo in ambienti abitabili dell'Universo. Vediamo alcuni esempi.

#### LA SELEZIONE NATURALE COME MECCANISMO UNIVERSALE

Il meccanismo di selezione naturale è indipendente dall'esatto tipo di processo che crea la diversità genetica a livello molecolare. A tal proposito è significativo che Darwin avesse dedotto la sua teoria dell'evoluzione, basata sulla selezione naturale, senza essere a conoscenza delle strutture molecolari che racchiudono l'informazione genetica. È pertanto ragionevole aspettarsi che il meccanismo di selezione naturale sia valido universalmente, anche per forme di vita che utilizzino un diverso tipo di chimica, macromolecole e codice genetico. L'unico requisito è che le molecole che contengono l'informazione genetica possano subire mutazioni e che tali mutazioni possano essere tramandate. In presenza di cambiamenti ambientali, le mutazioni portatrici di tratti biologici utili per l'adattamento ai cambiamenti tenderanno a fissarsi nel patrimonio genetico (Fig. 4.2). L'accumulazione di tali mutazioni porterà alla nascita di nuove specie. Pertanto, una volta formata la vita in un ambiente abitabile dell'Universo, essa tenderà ad evolvere mediante selezione naturale.

#### CONVERGENZA EVOLUTIVA

Lo studio dell'evoluzione biologica terrestre dimostra l'esistenza del fenomeno di *convergenza evolutiva*, che riveste un particolare interesse in astrobiologia ([5], [16], [15]). Specie diverse sono dette convergenti allorché, sulla spinta delle stesse pressioni ambientali, si evolvono per selezione naturale sviluppando strutture e abilità simili. La similitudine può essere osservata a livello morfologico e comprovata a livello genetico.

Esistono numerosi esempi di convergenza evolutiva sia tra forme di vita attualmente presenti in diverse aree geografiche, che tra specie fossili appartenenti a diverse epoche geologiche. Ne citiamo solamente due. La pressione ambientale ad acquisire la capacità di

volare ha fatto sviluppare le ali, *mediante percorsi evolutivi indipendenti*, a farfalle, uccelli e pipistrelli. La necessità di riconoscere efficacemente l'ambiente e le sue risorse ha fatto sviluppare gli organi della vista a svariate specie, anche in questo caso mediante percorsi evolutivi completamente indipendenti tra loro.

La convergenza evolutiva ci dice che, nonostante la componente *aleatoria*, intrinseca ai mutamenti biologici, l'evoluzione può portare a risultati in qualche misura *deterministici*. È pertanto ragionevole aspettarsi che eventuali forme di vite evolutesi in ambienti extraterrestri potrebbero aver sviluppato strutture e abilità simili a quelle degli organismi terrestri sotto la pressione della selezione naturale. Una diversità delle condizioni ambientali porterebbe a uno specifico tipo di adattamento. Ad esempio, il fatto che la nostra vista sia perfettamente adattata alla finestra di lunghezze d'onda della luce visibile è certamente la conseguenza della presenza di una finestra di trasparenza atmosferica in tale banda di lunghezze d'onda, dove è anche massima l'emissione dello spettro solare. È ragionevole aspettarsi che in un ambiente con un'atmosfera con spettro di trasmissione diverso dal nostro, illuminata da un campo di radiazione stellare con distribuzione spettrale diversa da quella solare, gli organi della vista di eventuali organismi complessi troverebbero il modo di adattarsi a una banda di lunghezze d'onda diversa dalla nostra. La convergenza evolutiva dovrebbe portare a un simile risultato per tutte le specie che riescano a formare gli organi della vista in tale ambiente.

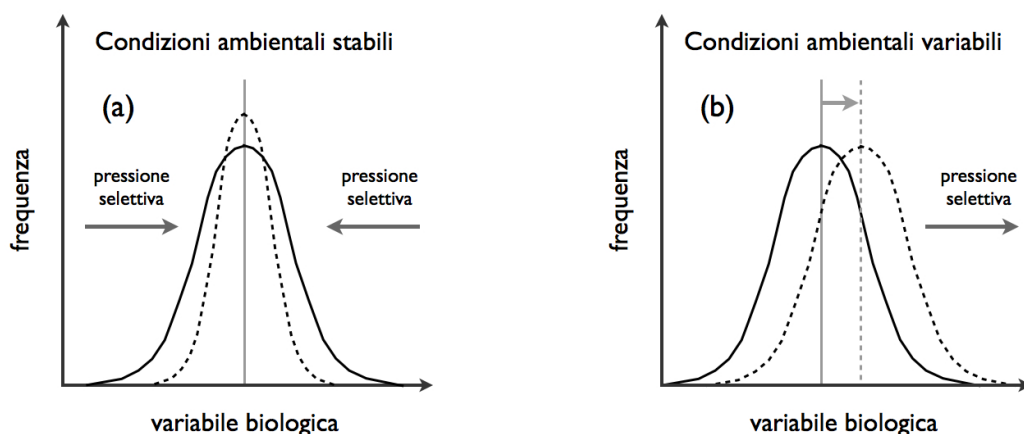


Figura 4.2: Effetti di differenti tipi di condizioni ambientali sulle caratteristiche biologiche degli organismi di una popolazione. Gli effetti sono illustrati dai cambiamenti della distribuzione di frequenza di un determinato tratto biologico in risposta a differenti forme di pressione selettiva. (a) Quando le condizioni ambientali sono stabili il valore ottimale della variabile biologica è costante (linea verticale); la pressione selettiva tende a scartare i valori più lontani da quello ottimale, restringendo la distribuzione di frequenza senza spostarne il centro. (b) Quando le condizioni ambientali sono variabili il valore ottimale della variabile biologica cambia (linee verticali); la pressione selettiva tende a selezionare i valori che seguono quello ottimale, spostando la distribuzione di frequenza.

### CAMBIAMENTI AMBIENTALI E TASSO DI EVOLUZIONE

I cambiamenti ambientali accelerano il tasso di evoluzione. Questo effetto è illustrato nella Fig. 4.2. Date determinate condizioni ambientali esistono valori ottimali delle variabili biologiche che permettono l'adattamento a tali condizioni. Ad esempio, dato un valore di temperatura media ambientale, esiste un valore ottimale dello spessore della pellicia di un animale che si adatta a tale ambiente. In condizioni ambientali stabili il valore ottimale della variabile biologica non si sposta (Fig. 4.2a), mentre se le condizioni sono variabili il valore ottimale si sposta in maniera opportuna (Fig. 4.2b). La distribuzione della frequenza del tratto biologico d'interesse seguirà lo spostamento del valore ottimale.

Queste considerazioni, del tutto generali, ci portano alle seguenti conclusioni. Condizioni ambientali stabili non portano a cambiamenti evolutivi. Il tasso di evoluzione biologica sarà in generale correlato positivamente con la variabilità delle condizioni ambientali.

### DIMENSIONE E COMPLESSITÀ DEGLI ORGANISMI

Nonostante la crescita della complessità nel corso dell'evoluzione, la grandissima maggioranza degli organismi terrestri ha mantenuto piccole proporzioni e un grado relativamente basso di complessità in tutte le epoche della vita terrestre. Questo fatto non è probabilmente casuale, come si può dedurre dalle seguenti considerazioni.

La prima considerazione riguarda le dimensioni delle cellule. Il rapporto superficie/volume di una qualsiasi struttura è inversamente proporzionale alla sua dimensione. I processi fisiologici dipendono in maniera critica dallo scambio di materiale attraverso il bordo del sistema, rappresentato dalle membrane biologiche nel caso della vita terrestre. *Cellule di piccole dimensioni sono favorite* in quanto (1) il maggior rapporto superficie/volume facilita gli scambi con l'esterno e (2) la minor distanza dal centro al bordo della cellula facilita il trasporto del materiale mediante diffusione, la più semplice forma di trasporto.

La seconda considerazione riguarda la complessità degli organismi, legata alla loro organizzazione in strutture pluricellulari. È innegabile che la complessità porti a dei vantaggi: gli organismi pluricellulari possono raggiungere notevoli funzionalità che permettono loro di affrontare al meglio particolari tipi di situazioni ambientali. D'altra parte la pluricellularità richiede un maggior consumo di energia, la necessità di maggiori spazi e quella di estrarre maggiori risorse dall'ambiente. La densità di organismi complessi tende pertanto ad autolimitarsi sulla base della disponibilità di tali risorse.

Le terza considerazione riguarda la flessibilità degli organismi ad adattarsi a cambiamenti ambientali. Una volta che l'evoluzione ha portato un organismo pluricellulare a una struttura molto complessa, la possibilità che future mutazioni possano alterare tale struttura diventa molto limitata [5]; detto in altri termini, la specializzazione non è reversibile. Ciò non è vero per organismi semplici, le cui mutazioni possono alterare in maniera significativa la loro organizzazione interna. Ne consegue che gli organismi complessi hanno una minor flessibilità di adattamento a cambiamenti ambientali rispetto agli organismi più semplici.

Sulla base di queste considerazioni, del tutto generali, è ragionevole aspettarsi che la maggior parte dei sistemi viventi, in qualsiasi ambiente abitabile, siano organismi semplici e microscopici. Organismi complessi e macroscopici sarebbero più rari e meno adattabili.

#### SCALA DI TEMPO DELLA NASCITA DI UNA CIVILTÀ TECNOLOGICA

La scala di tempo,  $\tau_t$ , che intercorre tra l'origine delle prime forme di vita unicellulari e la nascita di una civiltà tecnologica con capacità di comunicazione riveste una particolare importanza in astrobiologia. Ad esempio, il confronto tra tale scala di tempo e l'età della Via Lattea,  $\tau_{MW} \simeq 12 \text{ Gyr}$ , ci dà un'indicazione di quanto potrebbero essere diffuse civiltà tecnologiche nella nostra galassia. Nel caso dell'evoluzione terrestre  $\tau_t \simeq 3.7 \text{ Gyr}$ , ma non sappiamo se questo valore sia simile al valore tipico,  $\overline{\tau}_t$ , di altre forme di vita eventualmente presenti in ambienti abitabili della Galassia. Se il valore tipico fosse  $\overline{\tau}_t \ll \tau_{MW}$  ci sarebbe stato il tempo, in linea di principio, per lo sviluppo di altre civiltà. Se, viceversa, il valore tipico fosse  $\overline{\tau}_t \gtrsim \tau_{MW}$ , la nostra sarebbe un caso raro di civiltà tecnologica. Assumendo che il valore terrestre sia quello tipico, ci sarebbe senz'altro stato il tempo per la nascita di altre civiltà in pianeti abitabili formati prima della Terra. Questo ragionamento ci indica l'importanza di cercare di stimare  $\overline{\tau}_t$ . In particolare, sarebbe utile stimare tale scala di tempo in funzione delle proprietà evolutive dell'ambiente. In tal modo potremmo, in linea di principio, vincolare l'evoluzione della vita all'evoluzione dell'abitabilità dei pianeti, che potrà sempre meglio essere vincolata grazie alle *surveys* osservative di pianeti extrasolari.

## Capitolo 5

# Ricerche di vita e ambienti abitabili nell'Universo

In quest'ultimo capitolo accenniamo alle ricerche di vita e di ambienti abitabili fuori dalla Terra. Iniziamo con il Sistema Solare, nel cui caso le osservazioni astronomiche da Terra possono essere affiancate da osservazioni e misure *in situ* ottenute da sonde spaziali. Nella seconda parte del capitolo trattiamo le ricerche di abitabilità e di biomarcatori in pianeti extrasolari, attualmente in fortissimo sviluppo. Concludiamo il capitolo accennando agli studi di abitabilità Galattica.

## 5.1 Ricerche nel Sistema Solare

Le ricerche di vita e abitabilità nel Sistema Solare riguardano corpi celesti situati sia all'interno che all'esterno della zona abitabile circumstellare. Trattiamo separatamente questi due casi.

### Ricerche nella zona abitabile circumstellare

Come abbiamo spiegato nel Capitolo 2, la zona abitabile circumstellare si riferisce all'abitabilità superficiale. La Terra è l'unico pianeta del Sistema Solare con distanza eliocentrica ben centrata nella zona abitabile circumstellare. La Luna, pur trovandosi alla stessa distanza eliocentrica, non è abitabile in quanto priva di atmosfera. Venere e Marte si trovano ai bordi della zona abitabile circumstellare. Esaminiamoli separatamente, tenendo conto che i limiti di tale zona abitabile possono variare nel tempo, seguendo variazioni della luminosità stellare e delle condizioni chimiche e fisiche del pianeta.

## VENERE

Tra i pianeti rocciosi, Venere è interessante a causa della sua forte somiglianza con la Terra per quanto riguarda massa, densità media e vicinanza nel Sistema Solare [131]. Venere si trova prossima al limite inferiore della zona abitabile circumstellare. Alla distanza eliocentrica media di Venere la “costante solare”,  $S = 2.61 \text{ kW m}^{-2}$ , è solo 1.9 volte maggiore rispetto a quella terrestre. Utilizzando l'Eq. (2.5) si può facilmente dimostrare che, in assenza di effetto serra, la temperatura superficiale di Venere potrebbe essere comparabile o addirittura inferiore a quella della Terra. L'altissima temperatura misurata in superficie,  $T_s = 735 \text{ K}$  [67], indica la presenza di un effetto serra estremamente elevato, che innalza la temperatura superficiale di circa 500 gradi. L'atmosfera di Venere è effettivamente ricca di vari gas serra, principalmente  $\text{CO}_2$ , ed è estremamente densa, con una pressione superficiale  $P = 92 \text{ bar}$  [67]. Si ritiene che Venere abbia subito un aumento catastrofico di effetto serra (*runaway greenhouse effect*) simile a quello rappresentato nello schema a sinistra in Fig. 2.6, probabilmente già all'inizio della sua storia evolutiva. Non si ritiene pertanto che abbia mai avuto condizioni di abitabilità.

## MARTE

Marte si trova vicino al limite superiore della zona abitabile circumstellare. All'epoca attuale i valori medi di temperatura e pressione superficiale di Marte sono rispettivamente di  $210 \text{ K}$  ( $-63^\circ\text{C}$ ) e  $636 \text{ Pa}$  ( $6.4 \text{ mB}$ ). Tali valori sono riportati nel diagramma di fase dell'acqua in Fig. 2.1. Uno sguardo a tale figura ci indica che su Marte non vi può essere attualmente acqua in fase liquida. La pressione superficiale media è infatti leggermente inferiore alla pressione del punto triplo dell'acqua ( $611.6 \text{ Pa}$ ). Questo significa, ad esempio, che riscaldando ghiaccio eventualmente presente in superficie si avrebbe una sublimazione a vapore senza passare per la fase liquida. In tali condizioni, Marte non è attualmente abitabile. Si ritiene però che lo sia stato nelle prime fasi successive alla sua formazione. Vi sono infatti evidenze che Marte avesse un'atmosfera e acqua liquida in epoche remote. Sintetizziamo brevemente le principali evidenze in tal senso accumulate nel corso di numerose missioni spaziali motivate dalla ricerca di acqua e vita su Marte.

Un'evidenza della presenza di un *atmosfera densa* nel passato è data dalla statistica dei diametri dei crateri d'impatto generati dalla collisione di corpi minori sulla superficie di Marte. Tale statistica mostra un deficit di crateri di piccolo diametro antichi rispetto a quelli recenti [8]. La presenza di un'atmosfera densa in epoca remota può aver causato tale deficit mediante due diversi effetti: (1) la fusione di meteoroidi di piccolo diametro per attrito nel corso del loro attraversamento dell'atmosfera; (2) l'erosione di crateri meno profondi da parte di agenti atmosferici.

Si ritiene che l'atmosfera primordiale di Marte fosse ricca di  $\text{CO}_2$  generato da attività vulcanica. L'esistenza di attività vulcanica passata è dimostrata dalla presenza di svariati vulcani marziani di notevoli dimensioni, attualmente inattivi. L'atmosfera primordiale ricca di  $\text{CO}_2$  avrebbe innalzato la temperatura media superficiale mediante effetto serra. In tali condizioni di maggior pressione e temperatura rispetto all'epoca attuale, la superficie di

Marte sarebbe stata in grado di ospitare acqua in fase liquida. Che l'acqua su Marte fosse effettivamente presente è provato da svariate evidenze di tipo geomorfologico. Un esempio è rappresentato dall'esistenza di reti di vallate simili a quella scavate dai fiumi terrestri [8].

Parte dell'acqua presente in epoche remote dovrebbe essersi trasformata in ghiaccio all'atto della successiva diminuzione della temperatura superficiale. Che esista ghiaccio d'acqua all'epoca attuale è suggerito da varie evidenze osservative. Sebbene le calotte polari di Marte siano principalmente composte da ghiaccio di  $\text{CO}_2$ , la calotta Nord deve contenere anche una frazione di ghiaccio d'acqua per poter spiegare perchè tale calotta riesca a persistere in parte durante l'estate marziana, quando il ghiaccio  $\text{CO}_2$  sublima in atmosfera. Una evidenza recente della presenza di acqua viene dalle mappe di distribuzione di idrogeno superficiale prodotte dalla sonda *Mars Odyssey*. Tali mappe suggeriscono che alle alte latitudini marziane esista uno vasto strato di ghiaccio d'acqua localizzato immediatamente sotto la superficie.

Il ghiaccio presente al momento attuale potrebbe rappresentare solo una piccola frazione dell'acqua presente nel passato. La maggior parte sarebbe sublimata in atmosfera e ne avrebbe poi seguito il destino. Esistono infatti evidenze che si sia persa almeno il 90% dell'acqua superficiale nel corso della perdita dell'atmosfera di Marte [82].

La presenza di acqua liquida nelle prime fasi evolutive di Marte lascia aperta la possibilità che possano essersi originate forme di vita in tali epoche, ammettendo che su Marte vi fossero condizioni favorevoli al processo di abiogenesi. Dal momento che sulla Terra la vita si è originata in  $\lesssim 5 \times 10^8$  anni, non si può escludere che la vita su Marte si possa essere formata anche nel caso che l'acqua liquida fosse ivi presente solo per tale lasso di tempo. Il confronto con le scale di tempo dell'evoluzione della vita terrestre suggerisce che, se la vita si fosse formata su Marte, non avrebbe avuto abbastanza tempo per evolvere a forme complesse.

Ricerche di vita su Marte sono state condotte già nel 1976 mediante esperimenti biologici effettuati da *lander* sbarcati sul suolo marziano nell'ambito delle missioni spaziali delle sonde Viking 1 e 2. Alcuni di tali esperimenti hanno prodotto risultati positivi, non confermati però dagli altri esperimenti della stessa missione [8]. Si ritiene che i falsi positivi siano stati causati da reazioni chimiche sviluppate dal campione di suolo marziano esaminato, simili alle reazioni chimiche metaboliche che si tentava di rilevare. Questo risultato indica come sia difficile dimostrare la presenza di vita e come sia importante trovare definizioni operative pratiche atte a discriminare tra campioni biologici e non biologici.

Recentemente sono state rivelate, in determinate regioni di Marte, delle righe spettrali infrarosse con variabilità stagionale, attribuite a fuoriuscite superficiali di metano [117]. Il meccanismo che potrebbe originare tale metano è sconosciuto, lasciando aperte sia l'ipotesi geochimica che quella biologica. Se il risultato venisse confermato, sarebbe comunque indicativo della presenza di attività sotterranea su Marte. Alcuni autori hanno però avanzato dubbi sulla corretta identificazione delle righe osservate e sull'interpretazione dei risultati [128].

Concludiamo questa breve rassegna citando gli studi effettuati su alcuni meteoriti di origine marziana raccolti sulla Terra. Alcuni di tali meteoriti suggeriscono che acqua liquida fosse presente su Marte intorno (o fino a) 1 miliardo di anni fa. Il caso più famoso è quello

del meteorite ALH 84001, raccolto ad *Allan Hills* nell'Antartide, che contiene tracce della storia di Marte risalenti fino a 4.5 miliardi di anni fa. All'interno di tale meteorite sono state trovati globuli carbonati, con associati idrocarburi policiclici aromatici, datati  $3.9 \times 10^9$  anni. L'analisi al microscopio elettronico di tali globuli ha rivelato, al loro interno, strutture con morfologie che sembravano suggerire un'origine biologica. L'ipotesi di un'origine biologica non è però supportata dalle piccole dimensioni di tali strutture biomorfe, che sono comprese tra i 20 e i 100 nm. Il limite minimo affinché una forma vivente possa sviluppare un metabolismo sembra infatti essere di 200 nm [8].

## Ricerche fuori dalla zona abitabile circumstellare

Come abbiamo spiegato nel Capitolo 2, se non ci limitiamo a considerare l'abitabilità superficiale, ambienti abitabili possono esistere al di fuori della zona abitabile circumstellare. Nel Sistema Solare i casi di maggior interesse astrobiologico sono due *satelliti* dei pianeti giganti, Europa e Titano.

### EUROPA

Europa è uno dei 4 satelliti di Giove scoperti da Galileo nel 1610, il secondo in ordine di distanza dal pianeta. La superficie di Europa non è abitabile, come dimostrato dalla sua bassa temperatura media, 103 K, e bassissima pressione, dell'ordine dei  $10^{-6}$  Pa. Cionostante, si ritiene che vi siano acqua liquida e sorgenti di energia nel suo interno, tali da rendere Europa uno dei corpi più interessanti dal punto di vista delle ricerche di astrobiologia nell'ambito del Sistema Solare.

Europa è stato l'oggetto di numerose osservazioni, le più dettagliate delle quali ottenute dalla sonda NASA *Galileo*, lanciata nel 1989, durante il passaggio ravvicinato al satellite, avvenuto attorno al 1997. Riassumiamo brevemente i principali risultati ottenuti dalle osservazioni di Europa.

La superficie del satellite è costituita da uno strato di ghiaccio d'acqua. Non si conosce esattamente lo spessore di tale strato, ma si ritiene che possa essere profondo tra qualche kilometro e decine di kilometri. La morfologia superficiale, con pochissimi crateri d'impatto, suggerisce che la superficie sia costantemente rimodellata. La superficie mostra diversi tipi di strutture morfologiche, tra le quali spiccano striature incrociate, enfatizzate dal loro basso valore di albedo rispetto al ghiaccio circostante. Nonostante la presenza di tali strutture, la superficie di Europa è una delle più lisce di tutti i corpi del Sistema Solare.

Si ritiene comunemente che sotto lo strato di ghiacci vi sia un oceano di acqua liquida. Il supporto sperimentale a favore di questa ipotesi è basato su misure magnetometriche effettuata dalla sonda *Galileo*, che indicano la presenza di uno strato interno con conduttività elettrica simile a quella dell'acqua salata [64]. I dati osservativi mostrano un buon accordo con un sale di tipo  $\text{MgSO}_4$  piuttosto che  $\text{NaCl}$ .

Sebbene l'evidenza sperimentale a favore dell'oceano di acqua liquida sia alquanto indiretta, l'esistenza di tale oceano è perfettamente plausibile sulla base di considerazioni teoriche. Tali considerazioni suggeriscono l'esistenza di un gradiente positivo di temperatura con la profondità, indotto da calore interno dovuto a forze mareali. L'esistenza di tale gradiente implica che vi sia un passaggio di fase, dal ghiaccio alla superficie, all'acqua liquida ad una opportuna profondità.

L'esistenza di calore interno di origine mareale è a sua volta suggerita dalle osservazioni del satellite Io, il più vicino a Giove e prossimo ad Europa. Su tale satellite sono stati infatti scoperti fenomeni di attività vulcanica superficiale estremamente intensi. Tali fenomeni sono probabilmente indotti da interazioni mareali ed elettromagnetiche con Giove, che ha un fortissimo campo magnetico. Data la sua prossimità ad Io, è plausibile che anche Europa abbia forme di attività e calore interno, seppure su di una scala ridotta a causa della maggior distanza da Giove.

Al di sotto degli strati d'acqua, l'interno di Europa è in gran parte roccioso, con un nucleo centrale metallico. La densità media di Europa,  $\rho = 3.0 \times 10^3 \text{ kg m}^{-3}$ , è simile a quella dei silicati. All'interfaccia tra gli oceani e la parte rocciosa è probabile che vi siano fenomeni vulcanici indotti dalla necessità di smaltire il calore interno.

Lo scenario dei fondali oceanici di Europa sopra descritto è reminiscente delle sorgenti idrotermali presenti sulle dorsali oceaniche terrestri, dove sono stati scoperti ecosistemi in grado sopravvivere in assenza di luce solare. Parte dei microrganismi trovati in tali ecosistemi sono termofili e si collocano in prossimità dell'ultimo antenato comune (LUCA) nell'albero filogenetico (Fig. 3.2). Per questo insieme di motivi gli oceani di Europa rappresentano uno degli ambienti più promettenti per la ricerca di vita nel Sistema Solare. È stato anche ipotizzato che la vita potrebbe esistere al di sotto del ghiaccio superficiale, in un ambiente simile a quello presente sulla Terra sul fondo del Lago Vostok, in Antartide.

Un ulteriore elemento di interesse è la presenza di zolfo sulla superficie ghiacciata di Europa, la quale mostra striature rossastre dovute a diversi composti, tra i quali sali di solfato e acido solforico. La loro presenza suggerisce che vi sia scambio di materiale tra la superficie e gli strati sottostanti, compresi quelli liquidi [94]. La possibilità che tale zolfo abbia un'origine biologica viene presa in considerazione dal momento che, nella vita terrestre, lo zolfo può essere prodotto biologicamente. Sono in fase di studio metodologie per rivelare eventuali tracce di attività biologica dallo studio dei percorsi chimici in grado di formare tali composti sulla superficie di Europa [21]. In linea di principio, l'analisi del rapporto isotopico  $^{32}\text{S}/^{34}\text{S}$  potrebbe essere in grado di discriminare tra un'origine biologica ed una non biologica [5].

Le motivazioni di interesse astrobiologico per una missione spaziale su Europa sono dunque molto forti e hanno portato a progettare diverse missioni. Quella che attualmente ha maggior probabilità di concretizzarsi è la *Europa Jupiter System Mission* (EJSM), che dovrebbe essere svolta congiuntamente da NASA ed ESA per l'esplorazione delle lune di Giove.

## TITANO

Titano è il maggior satellite di Saturno, con un raggio di 2576 km, pari al 40% del raggio terrestre. Le osservazioni astronomiche da Terra avevano già evidenziato una delle sue principali caratteristiche, ovverosia la presenza di un'*atmosfera densa*, caso unico tra tutti i satelliti del Sistema Solare. Titano è stato osservato dalle sonde NASA *Pioneer 11* e *Voyager 1* e *2* tra il 1979 e il 1981 e successivamente dal telescopio spaziale *HST*. Tali osservazioni non erano riuscite a scoprire dettagli della sua superficie, nascosti dall'atmosfera, fatte salve alcune strutture macroscopiche con diverso valore di albedo.

Il grande balzo in avanti nella caratterizzazione di Titano è avvenuto a partire dal 2004, grazie ai dati ottenuti dalla missione spaziale *Cassini-Huygens*, realizzata congiuntamente dalla NASA e dalla ESA. Nel corso di vari passaggi ravvicinati, la sonda *Cassini* ha prodotto mappe superficiali dettagliate, mentre il modulo *Huygens* è atterrato sulla superficie nel 2005. L'insieme dei risultati ottenuti ha portato a considerare Titano un corpo di particolare interesse per le ricerche astrobiologiche nel Sistema Solare.

Con una temperatura media superficiale di 94 K, Titano non rientra nel criterio di abitabilità basato sull'acqua liquida. D'altra parte la sua atmosfera densa presenta alcune similitudini a quella terrestre. La pressione atmosferica superficiale è di  $1.47 \times 10^5$  Pa, leggermente superiore a quella della Terra. Il principale composto atmosferico è  $N_2$ , come nel caso della Terra. Ma ciò che rende particolarmente interessante Titano è la presenza di grandi quantità di molecole organiche in fase liquida che formano laghi superficiali di idrocarburi quali metano ( $CH_4$ ) ed etano ( $C_2H_6$ ). Tali laghi sono stati scoperti dalla sonda *Cassini* e, con maggior dettaglio, nel sito di atterraggio del modulo *Huygens*.

Il metano e l'etano riescono a rimanere in fase liquida alle basse temperature di Titano grazie ai loro bassi punti di fusione (Tabella 1.2). La presenza di grandi quantità di tali molecole organiche in fase liquida fa' di Titano un laboratorio ideale per sondare la possibilità che possano esistere forme di vita basate su solventi diversi dall'acqua. In realtà sia il metano che l'etano sono molecole *non polari*. Come solventi avrebbero pertanto proprietà opposte a quelle dell'acqua, la cui molecola è polare. Non sappiamo se sia possibile l'esistenza di una vita basata su un solvente non polare. Alcuni autori hanno preso in considerazione questa possibilità [15].

In ogni caso, la presenza di grandi quantità di materiale organico rende possibile la formazione di materiale organico complesso su Titano. Simulazioni di laboratorio dell'atmosfera hanno dimostrato la possibilità di formazione di materiale prebiotico, tra cui amminoacidi e i nucleotidi degli acidi nucleici [55]. C'è infine da dire che, sebbene non esistano attualmente evidenze di acqua, non si può escludere la presenza di acqua liquida in strati al di sotto della superficie. Per tutti questi motivi Titano rimarrà sicuramente al centro di progetti spaziali futuri. Tra le missioni prese in considerazione citiamo la *Titan Saturn System Mission*, diretta verso Titano ed Encelado. Al momento tale missione non è stata approvata, anche a causa di considerazioni economiche legate alla maggior durata del viaggio rispetto alla missione *Europa Jupiter System Mission*.

## 5.2 Pianeti extrasolari

Le osservazioni di pianeti extrasolari, iniziate attorno al 1995, hanno aperto un nuovo, promettente campo di ricerca nell'ambito degli studi di astrobiologia [116]. Lo studio delle proprietà orbitali e fisiche degli esopianeti permette di verificarne l'*abitabilità*. L'analisi di spettri di atmosfere di esopianeti ci permetterà in futuro di cercare evidenze di *biomarcatori* atmosferici fuori dal Sistema Solare. Esaminiamo separatamente tali aspetti. Per quanto riguarda l'abitabilità considereremo solamente la distanza pianeta-stella e alcune proprietà fisiche del pianeta. Un quadro più completo dei vari fattori che influenzano l'abitabilità planetaria è presentato in Tabella 2.1. Per approfondimenti sulle metodologie osservative e i principali risultati statistici di pianeti extrasolari rinviando ad articoli di *review* [116].

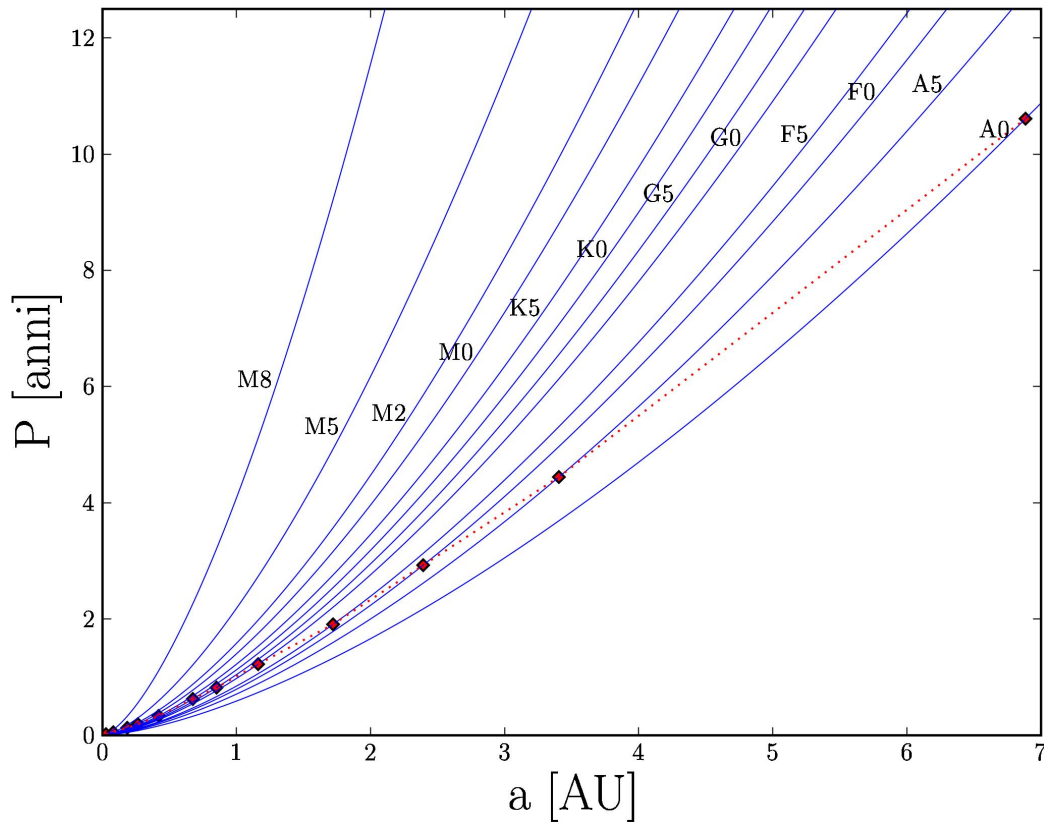


Figura 5.1: Linee curve: relazione tra periodo,  $P$ , e semiasse maggiore,  $a$ , per pianeti orbitanti attorno a stelle di sequenza principale aventi diversi tipi spettrali, indicati nella figura. Le curve sono state ottenute inserendo nell'Eq. (5.1) le masse stellari corrispondenti ai tipi spettrali [4]. Simboli: semiasse maggiore e periodo di pianeti posizionati al centro della zona abitabile degli stessi tipi di stelle. La posizione dei pianeti abitabili è stata ottenuta assegnando il valore di 1 AU per una stella di tipo solare, e inserendo le temperature efficaci e i raggi stellari [4] nell'Eq. (2.11).

## Ricerche di pianeti nella zona abitabile circumstellare

Il principale parametro utile a stabilire se una pianeta si trova nella zona abitabile circumstellare è il semiasse maggiore dell'orbita planetaria,  $a$ . I metodi osservativi indiretti di esopianeti ci permettono determinare  $a$  mediante la terza legge di Keplero

$$P^2 = \frac{4 \pi^2 a^3}{G (M_* + M_p)} \quad . \quad (5.1)$$

Per misurare  $a$  si assume che la massa del pianeta sia trascurabile rispetto a quella della stella, ovverosia che  $M_p \ll M_*$ . La massa della stella si determina da uno studio spettroscopico e da modelli di evoluzione stellare. Il periodo orbitale,  $P$ , viene determinato dall'analisi del segnale osservato. La natura di tale segnale dipende dal metodo osservativo utilizzato. Il segnale può essere di tipo temporale, spettroscopico, fotometrico e di posizione angolare, rispettivamente per i metodi del *timing* delle pulsar, delle velocità radiali, dei transiti e astrometrico.

Per tutti questi metodi indiretti esiste un bias osservativo relativo alla *baseline* temporale delle osservazioni: per poter determinare  $P$  bisogna che le osservazioni campionino il segnale per un tempo comparabile allo stesso periodo. Poiché è più facile campionare il segnale per periodi brevi, per la legge di Keplero (5.1) questo significa che vengono più efficientemente scoperti pianeti vicini alla propria stella. Per scoprire un analogo al sistema Terra-Sole il segnale va campionato per circa un anno, mentre per scoprire un analogo al sistema Giove-Sole la *baseline* osservativa dev'essere dell'ordine di un decennio.

Fortunatamente, la necessità di una baseline temporale comparabile al periodo orbitale non pone particolari problemi per la ricerca di pianeti *nella zona abitabile circumstellare*. Questo fatto lo si può vedere dalla Fig. 5.1, dove i simboli a forma di diamante indicano la posizione del centro della zona abitabile per diversi tipi di stelle in sequenza principale. Solo per stelle di tipo A0, o più calde, la scoperta di un pianeta abitabile richiede un campionamento lungo, maggiore di una decina di anni. Queste stelle non sono di particolare interesse in astrobiologia a causa del tempo di vita relativamente breve da loro trascorso sulla sequenza principale che renderebbe improbabile la presenza di forme di vita evolute (Fig. 2.7). Anche dal punto di vista strettamente osservativo sono preferibili stelle più fredde in quanto più numerose a parità di volume osservato. Per scoprire pianeti abitabili attorno a stelle con tipi spettrali tra F5 e A5 basterebbe un campionamento di qualche anno, non impossibile da realizzare. Il segnale di pianeti abitabili in stelle più fredde del Sole è decisamente più facile da campionare temporalmente.

Se la baseline temporale non rappresenta un problema, purtroppo vi sono vari effetti selettivi che rendono particolarmente difficile scoprire pianeti abitabili. Tali difficoltà sono di diverso tipo, a seconda della tecnica osservativa utilizzata. Discutiamo brevemente questa problematica per ciascuno dei principali metodi osservativi.

Non prendiamo in considerazione il metodo di *timing* delle pulsar né quello di *microlensing* gravitazionale, in quanto tali metodi hanno possibilità di applicazione molto specifiche che permettono di studiare un numero molto limitato di pianeti.

## IMMAGINE DIRETTA

L'osservazione dell'immagine diretta (*imaging*) di un pianeta extrasolare permette, in linea di principio, di misurare la separazione angolare stella-pianeta

$$\vartheta = \arctan \frac{d}{\ell} \quad , \quad (5.2)$$

e di ricavare la distanza stella-pianeta,  $d$ , nota la distanza della stella dall'osservatore,  $\ell$ . In questo caso, si assume  $a \simeq d$ , e si usa l'equazione (5.1) per ricavare indirettamente il periodo orbitale  $P$ , che può essere anche di centinaia di anni.

L'*imaging* di un pianeta extrasolare è estremamente difficile a causa dell'altissimo contrasto di luminosità e della piccolissima separazione angolare  $\vartheta$ . Il contrasto è di un fattore  $\simeq 10^9 - 10^{10}$  nel visibile e  $\simeq 10^6 - 10^7$  nell'infrarosso ( $\simeq 10 \mu\text{m}$ ). La separazione angolare è dell'ordine di una frazione di arcsec, inferiore al *seeing* delle osservazioni astronomiche condotte da terra. Ad esempio, la separazione Terra-Sole vista da 20 pc è di 50 mas.

L'Eq. (5.2) indica che  $\vartheta \sim \ell^{-1}$ , ovverosia che la separazione angolare scala con l'inverso della distanza della stella dall'osservatore. Questo fatto introduce un *bias* osservativo che favorisce la scoperta di *pianeti in stelle vicine*. Attualmente il metodo dell'immagine diretta è limitato a *pianeti di grandi dimensioni, massicci, luminosi e lontani dalla propria stella centrale*. Poiché la luminosità intrinseca del pianeta decade dopo la sua formazione, con tale tecnica osservativa si scoprono più facilmente *pianeti giovani* (appena formati) piuttosto che quelli vecchi. Le stime della massa e del raggio del pianeta richiedono l'utilizzo di un modello dell'evoluzione della sua luminosità.

Osservazioni con immagine diretta, oltre a essere poco rappresentative dell'insieme degli esopianeti, sono attualmente molto scarse. Un esempio è il pianeta Formalhaut b, scoperto nel 2008 da una rianalisi di dati HST [61]. Il semiasse maggiore della sua orbita,  $a \simeq 120 \text{ AU}$ , e la sua massa,  $M_p \simeq M_J$ , indicano che il pianeta non è abitabile.

Se elenchiamo i diversi tipi pianeti in ordine di difficoltà crescente per la loro osservabilità mediante immagine diretta otteniamo la seguente sequenza: pianeti giganti giovani, giganti vecchi, pianeti tipo Nettuno, pianeti rocciosi lontani dalla zona abitabile, e infine pianeti rocciosi abitabili.

Con l'attuale strumentazione da terra si pensa sia possibile scoprire qualche decina di giganti giovani e qualche raro caso di giganti vecchi. Simili risultati ci si aspetta di ottenere dallo spazio con il JWST (James Webb Space Telescope). Per fare di meglio bisognerebbe avere un telescopio spaziale di 1.5 m con coronografo. Con tale strumentazione si riuscirebbe a scoprire decine di giganti giovani e vecchi, decine di Nettuni e qualche raro caso di pianeta roccioso lontano dalla zona abitabile. Con la futura strumentazione da terra, tipo ELT (Extremely Large Telescope), si potrebbero scoprire centinaia di pianeti giganti giovani e vecchi, numerosi Nettuni e pianeti rocciosi esterni alla zona abitabile.

Nessun progetto strumentale tra quelli previsti attualmente sarà in grado di trovare pianeti rocciosi nella zona abitabile. Per realizzare tale risultato osservativo servirebbe strumentazione

spaziale con coronografi, camere infrarosse e possibilmente specchi multipli tra loro accoppiati in modo interferometrico. Aldilà della capacità strumentali, il limite futuro per la scoperta di pianeti di piccola massa con il metodo dell'*imaging* diretto potrebbe essere la presenza di luce diffusa da polvere interplanetaria, analoga alla luce zodiacale presente nel Sistema Solare. Tale luce disturberebbe la rivelazione di quella emessa dal pianeta.

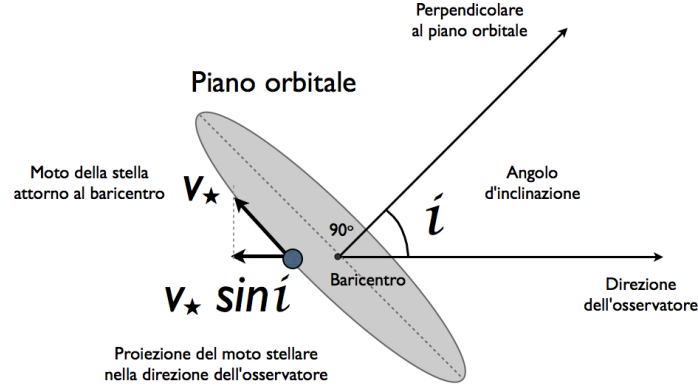


Figura 5.2: Configurazione geometrica delle osservazioni indirette di pianeti extrasolari. Il pianeta non è generalmente distinguibile. La sua presenza viene dedotta dal moto della stella attorno al baricentro del sistema (“reflex motion”), schematizzato in figura. L'angolo di inclinazione,  $i$ , è l'angolo tra la direzione dell'osservatore e la perpendicolare al piano orbitale, ovverosia l'angolo tra il piano del cielo e il piano orbitale.

#### METODO DELLE VELOCITÀ RADIALI

Il metodo osservativo di maggior successo nella scoperta di pianeti extrasolari è quello delle velocità radiali, anche chiamato “metodo Doppler”. Al momento attuale (aprile 2011) sono stati scoperti 495 esopianeti con tale metodo [129]. La configurazione geometrica delle osservazioni è schematizzata in Fig. 5.2. Il metodo consiste nel misurare la velocità radiale della stella a diversi istanti, che campionino il periodo orbitale. Da tale misura si costruisce una *curva di velocità radiale* da cui si ricavano i parametri orbitali e un limite inferiore alla massa del pianeta.

Assumendo orbite circolari, la velocità radiale del moto della stella attorno al baricentro (“reflex motion”), è data da [30]:

$$K = v_* \sin i = \frac{M_p \sin i}{M_* + M_p} \sqrt{\frac{G(M_* + M_p)}{a}} \quad (5.3)$$

Combinando questa equazione con la terza legge di Keplero (5.1) si ottiene

$$K = \left( \frac{2\pi G}{P} \right)^{1/3} \frac{M_p \sin i}{(M_* + M_p)^{2/3}} . \quad (5.4)$$

Assumendo  $M_p \ll M_*$ , e tenendo in conto anche dell'eccentricità orbitale,  $e$ , si ricava l'espressione

$$M_p \sin i \simeq K \left( \frac{P}{2\pi G} \right)^{1/3} M_*^{2/3} (1 - e^2)^{1/2} . \quad (5.5)$$

Dalle curve di velocità radiale si ricavano la semiampiezza,  $K$ , e il periodo,  $P$ . Note queste, e da una stima di  $M_*$ , si ricava un limite inferiore alla massa del pianeta,  $M_p \sin i$ . Un'analisi accurata delle curve di velocità radiale permette di ricavare anche l'eccentricità. Poichè la semiampiezza del segnale,  $K$ , è direttamente proporzionale a  $M_p$  il metodo rivela preferibilmente *pianeti massicci*.

Le velocità radiali del *reflex motion* stellare sono estremamente piccole e difficili da misurare. Ad esempio, il moto del Sole indotto da Giove è di 12.4 m/s, mentre quello indotto dalla Terra di 8.9 cm/s. L'attuale limite di accuratezza delle misure di velocità radiale è dell'ordine di  $\approx 0.4$  m/s. Tale limitazione non consente attualmente la rivelazione di pianeti di massa terrestre orbitanti attorno a stelle di tipo solare, ma permette già di scoprire pianeti tipo *super-terre*, con una decina di masse terrestri.

A causa delle limitazioni osservative, l'attenzione delle surveys osservative è concentrata su stelle per le quali il metodo offre maggiori facilità di scoprire pianeti. Dall'Eq. (5.3) si vede che la semiampiezza della curva di velocità radiale scala come

$$K \sim (a M_*)^{-1/2} . \quad (5.6)$$

Questa espressione ci dice che, a parità di tipo di orbita planetaria, il segnale Doppler è *più facile da rivelare in stelle di piccola massa*. Le osservazioni sono attualmente concentrate sulla ricerca di pianeti orbitanti stelle M, che hanno masse comprese tra 0.5 e 0.06 masse solari. Il vantaggio della minor massa stellare si combina con quello della minor distanza della zona abitabile dalla stella. Come abbiamo mostrato con l'Equazione (2.11), la zona abitabile di una stella M è rispettivamente tra  $\simeq 5$  e 40 volte più vicina alla stella rispetto alla zona abitabile del Sole. Dall'equazione (5.6) ne consegue che, a parità di massa planetaria, il segnale Doppler di un pianeta nella zona abitabile di una stella M è tra  $\approx 3$  e 30 volte più forte di quello che si avrebbe nel caso di una stella di tipo solare [105].

Apparentemente, l'accuratezza del metodo delle velocità radiali non dipende dalla distanza tra osservatore e la stella,  $\ell$ , che non compare nell'Eq. (5.3). In realtà, il flusso stellare osservato va come  $\ell^{-2}$ , e pertanto il rapporto segnale/rumore dello spettro, che va con la radice quadrata del numero di fotoni raccolti, va come  $\ell^{-1}$ . Pertanto, a parità di tempo di osservazione, le misure di velocità radiale sono più accurate in stelle più vicine.

Sono in fase di sviluppo miglioramenti tecnologici atti ad aumentare sia *l'accuratezza* che *la stabilità* delle misure di velocità radiali per lunghi periodi di tempo. La stabilità è

fondamentale per misurare parametri orbitali di pianeti a lungo periodo. Uno dei progressi più importanti in questo campo è l'introduzione della tecnica del *laser frequency comb* [22] per la calibrazione in lunghezza d'onda degli spettri.

In linea di principio, con l'applicazione di nuove tecniche, sarà possibile raggiungere una accuratezza dell'ordine di 0.1 m/s, sufficiente a rivelare un analogo Terra-Sole. In pratica, i limiti di applicazione del metodo sono legati alla compresenza di segnali spuri, dovuti a fenomeni di attività e variabilità stellare, che possono mascherare il segnale Doppler indotto dal pianeta. Esempi di tali fenomeni sono le pulsazioni intrinseche stellari e l'attività magnetica delle atmosfere stellari (macchie e brillamenti).

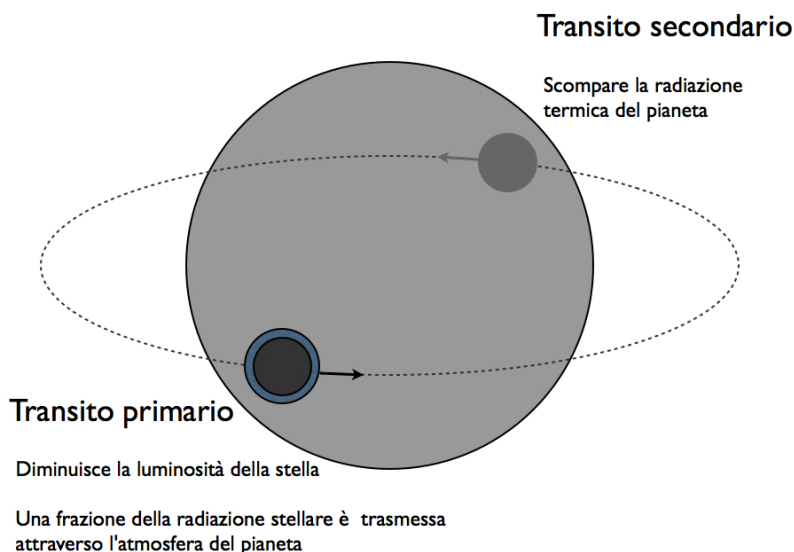


Figura 5.3: Osservazione di pianeti extrasolari con il metodo dei transiti. Il disco di diametro maggiore rappresenta la stella. I due dischi minori rappresentano un pianeta osservato durante un transito primario (di fronte alla stella) e secondario (dietro alla stella). L'anello circolare attorno al pianeta di fronte alla stella rappresenta l'atmosfera del pianeta, che nel corso del transito primario assorbe una frazione della radiazione stellare.

#### METODO DEI TRANSITI

Se la linea di vista è allineata con il piano orbitale ( $i \approx 90^\circ$ ) il pianeta transiterà periodicamente di fronte e dietro alla propria stella. La configurazione geometrica delle osservazioni dei transiti è schematizzata in Fig. 5.3, dove si distingue tra *transito primario*, durante il quale il pianeta passa davanti alla stella, e *transito secondario*, durante il quale il pianeta è eclissato dalla stella. Le osservazioni permettono di ottenere il flusso combinato dei fotoni della stella e del pianeta, che non sono separabili spazialmente. Le misure fotometriche del flusso combinato in

funzione del tempo ci permettono di costruire la *curva di luce*. I transiti producono variazioni fotometriche nella curva di luce, caratterizzate dalla presenza di minimi che si ripetono con periodicità  $P$ , pari al periodo orbitale. Lo studio della curva di luce permette di scoprire e caratterizzare il pianeta stesso. Dato che stella e pianeta non sono separabili spazialmente, si può affermare che la caratterizzazione del pianeta viene ottenuta separando il conteggio dei fotoni nel tempo, anziché nello spazio,

Dopo il metodo delle velocità radiali, il metodo dei transiti è quello più efficiente nella scoperta di pianeti extrasolari. Al momento attuale (aprile 2011) sono stati scoperti 125 esopianeti con tale metodo [129]. La *profondità dei minimi* nella curva di luce e la *probabilità geometrica* di osservare un transito sono tra i principali fattori che determinano i limiti di utilizzo di tale tecnica osservativa.

La profondità del minimo nella curva di luce dipende dai raggi della stella e del pianeta,  $R_*$  e  $R_p$ . Trascurando il flusso emesso dal pianeta e l'oscuramento al bordo del disco stellare (*limb darkening*), la variazione relativa di flusso ricevuto dall'osservatore durante il transito primario è data da

$$\Delta F = \frac{F - F_{\text{tr}}}{F} = \left( \frac{R_p}{R_*} \right)^2, \quad (5.7)$$

dove  $F$  è il flusso ricevuto fuori dal transito e  $F_{\text{tr}}$  il flusso osservato al minimo della curva di luce. Ad esempio, l'osservazione remota del Sistema Solare nel piano dell'eclittica produrrebbe un segnale fotometrico di  $\approx 1\%$  per il transito di Giove davanti al Sole e  $\approx 0.01\%$  per il transito della Terra. La precisione fotometrica è pertanto essenziale nelle misure di transiti.

Poiché il segnale di transito cresce quadraticamente con  $R_p/R_*$ , ne consegue l'esistenza di un bias osservativo che favorisce il rilevamento di pianeti giganti orbitanti stelle di piccola dimensione. Questo bias osservativo è simile a quelli del metodo Doppler, con il quale è più facile rilevare pianeti massicci orbitanti stelle di piccola massa.

Oltre che dall'intensità del segnale fotometrico, la possibilità di scoprire un pianeta dipende dalla probabilità che l'allineamento tra osservatore e sistema planetario sia favorevole all'osservazione del transito. Chiamiamo  $\mathcal{P}_{\text{tr}}$  tale probabilità geometrica. Assumendo che le orbite siano orientate casualmente, l'andamento di tale probabilità è del tipo

$$\mathcal{P}_{\text{tr}} \sim R_*/a, \quad (5.8)$$

dove  $a$  il semiasse maggiore dell'orbita planetaria. Il calcolo di tale probabilità nel caso in cui  $R_p \ll R_*$  e l'eccentricità dell'orbita sia trascurabile [29] dà il valore

$$\mathcal{P}_{\text{tr}} \simeq 0.0045 \times \left( \frac{1 \text{ AU}}{a} \right) \left( \frac{R_*}{R_\odot} \right). \quad (5.9)$$

Ad esempio, le probabilità che un osservatore lontano, posto in una direzione casuale, possa osservare i transiti della Terra e di Giove attorno al Sole sono rispettivamente  $\approx 1/220$  e  $\approx 1/1150$ .

Anche la probabilità geometrica di osservare un transito porta a dei bias osservativi. La relazione (5.8) ci dice infatti che, a parità di tipo di stella, sono fortemente favoriti pianeti

orbitanti in prossimità della stella. È interessante vedere lo stesso effetto dal punto di vista della temperatura planetaria, rilevante per l'abitabilità. Combinando l'Eq. (5.8) con la (2.10) si ottiene  $\mathcal{P}_{\text{tr}} \sim (T_p/T_*)^2$ , da cui si deduce che il bias osservativo tende a farci scoprire pianeti caldi. Se vogliamo aumentare la probabilità geometrica di scoprire pianeti con una temperatura prefissata, ottimale per l'abitabilità, dobbiamo pertanto concentrarci su *stelle più fredde*. Questo fatto è un'ulteriore vantaggio per studiare stelle di tipo M. Trovare transiti di pianeti abitabili in stelle più calde di quelle M non è impossibile, ma richiede l'analisi di un campione di stelle più numeroso al fine di contrastare il minor valore di  $\mathcal{P}_{\text{tr}}$ .

I bassi valori di probabilità geometrica indicano la necessità di osservare campioni numerosi di stelle per poter scoprire un numero congruo di transiti. In effetti, oltre a tale probabilità va anche tenuta in conto la probabilità che la stella ospiti effettivamente pianeti, che può essere dell'ordine di pochi percento [116]. Moltiplicando entrambe le probabilità si ottengono, tipicamente, numeri  $\lesssim 10^{-4}$ . Al fine di compensare tale basso valore di probabilità totale è pertanto necessario effettuare survey osservative contenenti parecchie migliaia di stelle. Tali survey devono essere condotte a lungo termine per coprire l'intervallo desiderato di periodi orbitali. Inoltre le osservazioni devono essere continuate, per non perdere il momento del transito, che è relativamente breve rispetto al periodo orbitale. Al fine di garantire una copertura temporale continua, le surveys condotte da terra sono generalmente coordinate tra osservatori astronomici posti a diverse longitudini. Le osservazioni spaziali permettono più facilmente la possibilità di osservazione continua.

I candidati pianeti scoperti con i transiti devono essere successivamente confermati da osservazioni di *follow-up* atte ad escludere la possibilità che il segnale osservato nella curva di luce non sia dovuto a qualche effetto spurio. Di particolare importanza sono osservazioni di *follow-up* delle curva di velocità radiale, che permettono di confermare la scoperta del pianeta e di ricavarne la massa.

## METODO ASTROMETRICO

Il metodo astrometrico consiste nella misura di variazioni del moto proprio della stella indotte dal moto stellare attorno al baricentro del sistema stella-pianeta. Contrariamente al segnale di velocità radiale, il segnale astrometrico è maggiore quando la linea di vista è perpendicolare al piano dell'orbita ( $\sin i \simeq 0$ ). La dipendenza delle variazioni del moto proprio dai parametri stellari, planetari e osservativi è del tipo

$$\delta\mu \sim \left( \frac{M_p}{M_*} \right) \left( \frac{a}{\ell} \right) \quad (5.10)$$

dove  $\ell$  è la distanza della stella. Da uno studio dettagliato della stella si ricavano  $M_*$  e  $\ell$ . Dalla ricostruzione dell'orbita della stella attorno al baricentro si ricavano il periodo  $P$  e i parametri orbitali  $a$  ed  $e$ . Noti gli altri termini, dall'analisi del segnale astrometrico si ricava  $M_p$ .

Il segnale astrometrico è estremamente debole. Ad esempio, una stima della variazione del moto proprio attesa per pianeti attorno a una stella di tipo solare situata a una distanza

$\ell = 10$  pc, è di  $500 \mu\text{as}$  for un pianeta tipo Giove, e di  $0.33 \mu\text{as}$  per un pianeta tipo Terra. Misurare tali variazioni rappresenta una grossa sfida tecnologica. Attualmente riusciamo misurare moti propri con precisioni astrometriche dell'ordine del millesimo di secondo d'arco. La recente affermazione della scoperta di un pianeta extrasolare in una stella vicina mediante il metodo astrometrico [93] non è stata confermata da una successiva analisi basata sul metodo delle velocità radiali [24].

Nonostante la difficoltà della rivelazione del segnale, il metodo astrometrico presenta alcuni vantaggi: è sensibile a pianeti con grandi valori del semiasse maggiore; è pressoché immune ai problemi di variabilità e attività stellare, che costituiranno il limite futuro di applicazione del metodo delle velocità radiali; è esente dai problemi di luce zodiacale, che potrebbero disturbare le misure di *imaging* diretto; può essere applicato a un gran numero di stelle non essendo particolarmente limitato dal valore dell'angolo  $i$ .

Il metodo astrometrico può essere utilizzato per cercare pianeti in stelle molto vicine e di bassa massa, per le quali ci si aspetta un segnale astrometrico relativamente alto. Questo metodo verrà pertanto utilizzato per la ricerca di pianeti attorno a stelle M che, a oltre ad avere bassa massa, hanno un'alta densità spaziale e pertanto sono numerose entro piccole distanze dal Sole.

Tra i progetti futuri finalizzati a rivelare un numero grande di pianeti con il metodo astrometrico citiamo la missione GAIA dell'ESA, che è finalizzata a ottenere precisioni di  $\sim 20 \mu\text{as}$ . Con tale missione si spera di riuscire a rivelare alcune decine di migliaia di pianeti.

Anche il metodo astrometrico, al di là delle capacità strumentali, ha dei limiti intrinseci per la rivelazione di pianeti di tipo terrestre. Basti pensare che in un sistema multiplo contenente pianeti terrestri e giganti, il segnale astrometrico dei pianeti giganti sarebbe estremamente più forte di quello dei pianeti terrestri e tenderebbe pertanto a mascherarlo. Sebbene il metodo favorisca la scoperta di pianeti con valori di  $a$  relativamente alti, e quindi la scoperta di pianeti abitabili in stelle di tipo solare o più calde, la necessità di osservazioni spaziali acuisce il problema della *baseline* temporale necessaria a rivelare tale pianeti (Fig. 5.1).

## Caratterizzazione dei pianeti

### IDENTIFICAZIONE DI PIANETI ROCCIOSI

Per analogia con il caso della Terra, l'interesse dal punto di vista astrobiologico è quello di scoprire pianeti di tipo roccioso piuttosto che pianeti giganti. Lo studio della densità media del pianeta,  $\rho = M_p / [(4/3)\pi R_p^3]$ , ci permette di stabilire se il pianeta è roccioso oppure no. Come riferimento, ricordiamo i valori di densità media dei pianeti del Sistema Solare [131]. Quella dei pianeti rocciosi è compresa tra il valore di Marte,  $\rho_{\text{Marte}} = 3.93 \text{ g cm}^{-3}$ , e quello della Terra  $\rho_{\text{Terra}} = 5.51 \text{ g cm}^{-3}$ ; Mercurio e Venere hanno valori molto simili a quello terrestre. I pianeti giganti gassosi hanno valori più bassi, con  $\rho_{\text{Saturno}} = 0.69 \text{ g cm}^{-3}$  e  $\rho_{\text{Giove}} = 1.33 \text{ g cm}^{-3}$ .

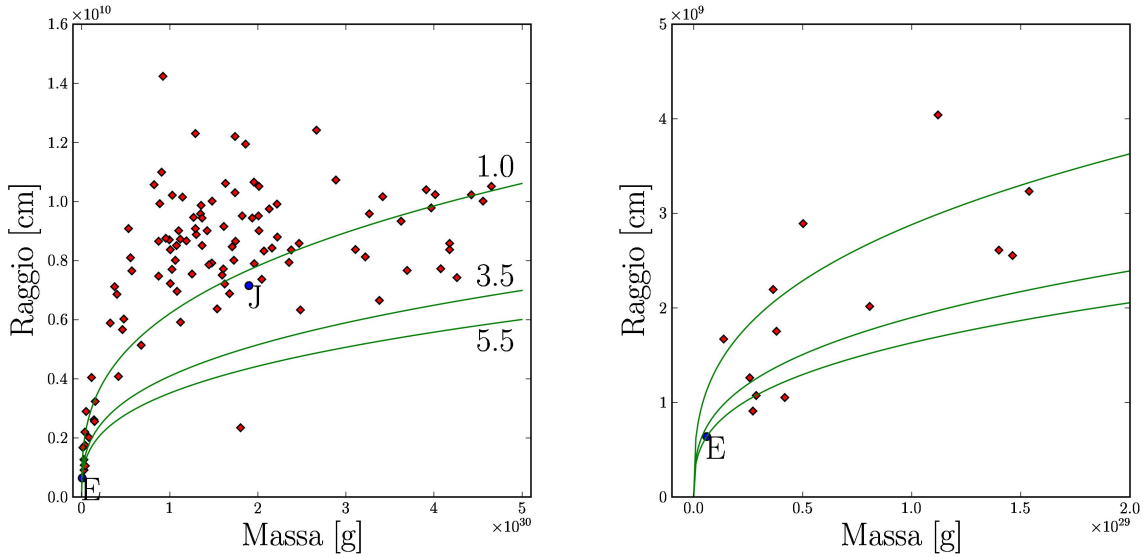


Figura 5.4: Raggi e masse di pianeti osservati con il metodo dei transiti. Dati ottenuti dal catalogo di pianeti extrasolari [129], aggiornati ad aprile 2011. Sono indicate le posizioni di Giove (J) e della Terra (E). Le curve rappresentano luoghi di ugual densità media, con valori indicati nella figura in unità di  $\text{g cm}^{-3}$ , rappresentativi della densità media della Terra, dei silicati e dell'acqua (dal basso verso l'alto). La figura destra è un ingrandimento di quella a sinistra che mette in evidenza le super-Terre finora scoperte.

Per misurare la densità media del pianeta è necessario osservarlo sia con il metodo delle velocità radiali che con il metodo dei transiti. Con il primo metodo si ricava  $M_p \sin i$  e con il secondo  $R_p$ . L'incertezza sul termine  $\sin i$  è molto piccola in quanto, data la configurazione geometrica che permette l'esistenza dei transiti, sappiamo che dev'essere  $\sin i \simeq 1$ .

La maggior parte dei pianeti finora scoperti ha valori di densità media  $\rho \approx 1 \text{ g cm}^{-3}$ , o minore (Fig. 5.4). Tali valori bassi di densità sono simili a quelli dei pianeti giganti del Sistema Solare. Questo fatto non sorprende, considerati gli effetti selettivi che tendono a far scoprire preferenzialmente pianeti giganti. Ciononostante, pianeti rocciosi cominciano ad essere scoperti, come si vede nel pannello a destra in Fig. 5.4. Uno dei primi esempi scoperti è CoRoT 7b, che ha una densità media  $\rho = 5.6 \text{ g cm}^{-3}$ , praticamente identica a quella della Terra [74]. Con una massa di 4.8 masse terrestri, tale pianeta è un esempio di "super-Terra". La distanza  $a = 0.017 \text{ AU}$  dalla sua stella centrale, di tipo G9V, indica che il pianeta non è abitabile (si vedano ad esempio le Fig. 2.7 e 5.1). Questo esempio dimostra che la scoperta di "super-Terre" rocciose nella zona abitabile è ormai prossima.

I bias osservativi sopra discussi, relativi alla rivelazione di esopianeti con il metodo Doppler e quello dei transiti, fanno prevedere che i primi pianeti abitabili rocciosi a essere scoperti saranno super-Terre orbitanti stelle di tipo spettrale M.

## Abitabilità attorno a stelle di tipo M

La spinta a cercare esopianeti attorno a stelle M è molto forte a causa dei numerosi bias osservativi che rendono più agevole la rivelazione di pianeti abitabili attorno a tale tipo di stelle. Mediante l'Eq. (2.11) si può facilmente calcolare che, per stelle con tipo spettrale compreso tra M0 e M8, la zona abitabile è centrata, rispettivamente, tra 0.26 e 0.03 AU. Tali distanze sono minori del semiasse maggiore dell'orbita di Mercurio,  $a = 0.387$  AU. L'estrema vicinanza alla stella M pone dubbi sull'effettiva esistenza di condizioni di abitabilità sulla superficie di tali pianeti, a causa di diversi motivi.

Uno dei possibili problemi di abitabilità è l'*attività stellare* che tende a essere più intensa nelle stelle più fredde, portando a effetti di *space weather* particolarmente intensi. Brillamenti stellari e radiazione UV potrebbero, ad esempio, erodere le atmosfere dei pianeti [69]. Sebbene l'attività stellare tenda a decadere con il tempo, la fase attiva delle stelle M può durare alcuni miliardi di anni [121].

Un altro potenziale problema è quello del *tidal locking*, cioè il fatto che, se il pianeta è troppo vicino alla stella, il suo periodo di rotazione si sincronizza con il suo periodo orbitale a causa degli effetti mareali. Come conseguenza del *tidal locking*, i pianeti avrebbero una zona perennemente esposta alla radiazione stellare, eccessivamente calda, e una perennemente buia, eccessivamente fredda. Se esiste un'atmosfera con pressione sufficientemente elevata il calore potrebbe essere redistribuito [59] e il pianeta potrebbe avere condizioni climatiche non troppo ostili. Il *tidal locking* porta però a bassi valori di velocità di rotazione e, conseguentemente, a bassi valori di campi magnetici. L'assenza del campo magnetico renderebbe più facile l'erosione dell'atmosfera dagli effetti di *space weather* indotti dall'attività stellare.

Dal punto di vista dei modelli di formazione planetaria è anche stata avanzata l'ipotesi che i pianeti molto vicini alle stelle M potrebbero non aver avuto il tempo di accrescere volatili, e dunque acqua, durante la loro formazione [76].

Il dibattito sull'abitabilità delle stelle M è in realtà molto più vasto [102, 112] e non trova tutti d'accordo. In ogni caso, è facile prevedere che le surveys osservative scopriranno e caratterizzeranno per primi pianeti vicini alle stelle M, in attesa che le tecniche osservative si spingano al punto tale da permettere la scoperta di pianeti abitabili in stelle un po' più calde e simili al Sole.

## Ricerca di biomarcatori atmosferici

Le tecniche osservative astronomiche sono recentemente arrivate al punto di permetterci di analizzare atmosfere di pianeti extrasolari. Tale possibilità dischiude la porta alla ricerca di composti chimici di origine biologica eventualmente presenti in tali atmosfere. Accenniamo brevemente ai metodi osservativi di atmosfere planetarie, ai principali risultati finora ottenuti e alle aspettative di studio di biomarcatori atmosferici.

## METODI OSSERVATIVI DI ATMOSFERE PLANETARIE

L'osservazione *diretta* dell'atmosfera di un pianeta è limitata ai rari casi di pianeti luminosi e lontani dalla propria stella centrale che si possono scoprire mediante immagine diretta. Come abbiamo visto, tali osservazioni sono attualmente poco numerose e limitate a pianeti lontani dalla zona di abitabilità circumstellare.

Le tecniche osservative più promettenti per lo studio delle atmosfere di esopianeti sono basate sul metodo dei transiti. È possibile ricavare informazione sull'atmosfera planetaria sia dallo studio del transito secondario che da quello primario.

L'osservazione del *transito secondario* permette di misurare la radiazione emessa dal pianeta, che scompare nel corso di tale transito (Fig. 5.3). Il flusso spettrale del pianeta è misurabile sottraendo al flusso totale, osservato subito prima del transito secondario, il flusso puramente stellare, osservabile durante il transito. La possibilità di effettuare tale tipo di misura è massima nella banda dell'infrarosso termico, dove il contrasto di luminosità stella/pianeta è minimo. Se il pianeta ha un'atmosfera otticamente spessa, l'emissione osservata nella banda infrarossa ci darà informazione sulla sua composizione e temperatura. L'emissione del pianeta nella banda visibile, se misurabile, ci dà informazione sull'albedo planetaria.

L'osservazione del *transito primario* permette di misurare lo spettro di assorbimento dell'atmosfera planetaria. Durante il transito primario l'atmosfera del pianeta, schematizzata come un anello attorno al pianeta in Fig. 5.3, assorbe una frazione della radiazione stellare. La frazione assorbita varierà con la lunghezza d'onda, a seconda della composizione chimica e dello stato fisico dell'atmosfera. Lo spettro di trasmissione dell'atmosfera planetaria può essere ottenuto dividendo lo spettro osservato durante il transito primario per lo spettro osservato fuori dal transito.

L'area effettiva dell'anello atmosferico che assorbe la luce stellare del transito primario è dell'ordine di  $\sim 2\pi h R_p$ , dove  $h$  è l'altezza di scala dell'atmosfera planetaria. Pertanto la frazione di assorbimento atmosferico rispetto all'emissione stellare scalerà come

$$\delta I \sim \frac{2 h R_p}{R_*^2} . \quad (5.11)$$

Il segnale dello spettro atmosferico è dunque maggiore per pianeti con valori di  $h$  e  $R_p$  relativamente alti e per stelle di piccolo raggio.

Data la difficoltà di questi tipi di misure, la modellizzazione delle atmosfere planetarie gioca un ruolo fondamentale per l'interpretazione dei dati osservativi. Esiste una gerarchia di modelli che vengono impiegati a tale scopo. I modelli semplici riescono spesso a descrivere i principali aspetti fisici e a dare supporto interpretativo. Modelli dettagliati e complessi possono essere poi utilizzati per supportare i risultati ottenuti dai modelli più semplici.

## RISULTATI DI STUDI DI ATMOSFERE PLANETARIE

I risultati di studi di atmosfere planetarie sono stati finora ottenuti per esopianeti di tipo *Hot Jupiter*, caratterizzati da piccoli semiassi maggiori ( $a \lesssim 0.05$  AU) e grandi masse ( $M_p \gtrsim M_J$ ). Questi pianeti sono così chiamati perchè i loro strati esterni sono riscaldati dall'intenso flusso stellare. Il grande valore del rapporto  $R_*/a$  rende più probabile la scoperta di transiti [Eq. (5.8)]. I loro grandi raggi e la grande estensione delle altezze di scala atmosferica facilitano lo studio delle loro atmosfere [Eq. (5.11)]. Menzioniamo alcuni risultati ottenuti [105].

Gli *Hot Jupiter* emettono notevolmente nell'infrarosso, in accordo con le predizioni di temperature superficiali dell'ordine di 1000 – 2000 K o persino maggiori da parte dei modelli. L'emissione infrarossa implica che assorbono efficacemente la luce visibile della stella. Ricerche della componente riflessa indicano in effetti un basso valore di albedo geometrica,  $A \lesssim 0.2$ .

Un'atmosfera planetaria di composizione solare scaldata a  $\approx 1000$  K dovrebbe essere dominata da molecole  $H_2$ ,  $H_2O$ , e, a seconda della temperatura e metallicità, CO e/o  $CH_4$ . I primi dati raccolti con segnale/rumore sufficientemente alto hanno comprovato la presenza di acqua, metano, CO e  $CO_2$  e di sodio atomico ([48],[111]). Le osservazioni sono state condotte principalmente con lo *Hubble Space Telescope*/NICMOS (Near Infrared Camera Multi-object Spectrometer) e lo *Spitzer Space Telescope*/IRS (Infrared Spectrograph).

Tali risultati non sono, per il momento, di interesse astrobiologico, nel senso che gli *Hot Jupiter* non offrono ambienti abitabili. D'altra parte queste osservazioni hanno aperto la strada a futuri studi della composizione chimica delle atmosfere di pianeti abitabili.

## PROSPETTIVE DI STUDI DI ATMOSFERE PLANETARIE

L'atmosfera della Terra è estremamente sottile rispetto a quella di un pianeta gigante, al punto che l'osservazione dell'atmosfera di un pianeta di tipo Terra non è fattibile nè con la strumentazione esistente nè con quella pianificata per il futuro. Per riuscire a rilevare il segnale dello spettro atmosferico è pertanto indispensabile cercare pianeti con valori di  $h$  e  $R_p$  maggiori di quelli terrestri orbitanti stelle di piccolo raggio [Eq. (5.11)].

In futuro si ritiene possibile ottenere spettri atmosferici di pianeti tipo *super-Terre* (*super-Earths*) orbitanti stelle M. Sebbene non esista una definizione precisa, il termine di super-Terra viene utilizzato per indicare pianeti con masse superiori fino a circa 10 volte quella terrestre. A parità di densità media, il loro raggio potrebbe essere circa il doppio di quello terrestre. I modelli di tali pianeti indicano che possano mostrare una grande diversità di atmosfere, compresi casi con altezza di scala  $h$  decisamente maggiori di quella terrestre. Il minor raggio delle stelle M faciliterebbe il rivelamento del segnale atmosferico.

Le Super-Terre attorno a stelle M sono la nostra unica speranza di misurare lo spettro atmosferico di pianeti abitabili a medio termine. Attualmente si conoscono circa una ventina di Super-Terre, quasi tutte con  $a < 0.07$  AU, ma ci si aspetta di trovarne altre a maggiori distanze dalla stella. Le super-Terre sono di particolare interesse anche perché non esistono controparti di tali oggetti nel Sistema Solare. Futuri progetti spaziali, quali ad esempio il

*James Webb Space Telescope* dovrebbero raggiungere la capacità di studiare atmosfere di super-Terre con un'accuratezza simile a quella attualmente raggiunta per i pianeti giganti.

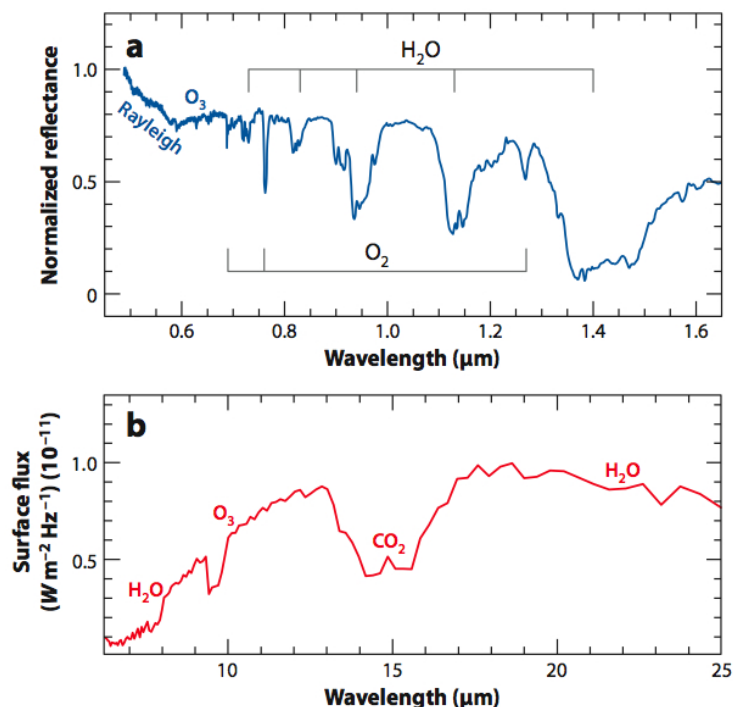


Figura 5.5: Esempi di spettri dell'atmosfera terrestre mediati su di un emisfero [105]. (a): Spettro nel visibile e vicino infrarosso ottenuto da misure di *earthshine*, luce terrestre riflessa dalla Luna [115]. (b): Spettro nel medio infrarosso osservato dalla sonda *Mars Global Surveyor* durante il suo viaggio verso Marte [89].

#### PROSPETTIVE DI MISURA DI BIOMARCATORI ATMOSFERICI

La possibilità di ottenere spettri di atmosfere planetarie dischiude la porta alla ricerca di biomarcatori atmosferici, ovverosia di composti atmosferici di possibile origine biologica. Lo spettro dell'atmosfera terrestre è un riferimento per capire cosa possiamo aspettare di trovarci nell'atmosfera di un pianeta abitato. Esempi di spettri dell'atmosfera terrestre sono visibili in Fig. 5.5. Dallo studio di tali spettri è possibile dedurre la presenza di CO<sub>2</sub>, vapor acqueo, ossigeno molecolare e ozono. Per confronto, gli spettri delle atmosfere di Venere e Marte mostrano anch'essi CO<sub>2</sub>, ma non mostrano vapor acqueo né ossigeno.

Come abbiamo spiegato nel Capitolo 4, l'ossigeno terrestre è di origine biologica e lo strato di ozono è, a sua volta, prodotto a partire dall'ossigeno di origine biologica. Nel caso della Terra, possiamo dunque affermare che l'ossigeno è sicuramente un biomarcatore. L'evoluzione del contenuto di ossigeno atmosferico terrestre ci insegna che, in assenza di un continua produzione biologica, l'ossigeno si sarebbe consumato mediante ossidazione delle rocce

superficiali. Questo argomento suggerisce che l'ossigeno possa considerarsi un biomarcatore anche in altre atmosfere planetarie. L'eventuale scoperta di ossigeno nell'atmosfera di un esopianeta abitabile renderebbe plausibile la presenza di vita in tale ambiente. Per averne una conferma bisognerebbe essere in grado di calcolare la composizione chimica di equilibrio dell'atmosfera del pianeta e dimostrare che l'ossigeno non è presente in condizioni di equilibrio. L'allontanamento da una condizione di equilibrio è proprio una delle caratteristiche della vita.

Il ragionamento fatto per l'ossigeno può essere esteso ad altri composti: la presenza di un composto fuori dall'equilibrio può far sospettare la presenza di processi biologici. Da quanto detto si evince la notevole importanza che stanno assumendo i modelli che calcolano la composizione chimica atmosferica degli esopianeti: le predizioni di tali modelli in condizione di equilibrio saranno il riferimento per stabilire se un determinato composto, come ad esempio l'ossigeno, sia di origine biologica oppure no.

## 5.3 Zona abitabile Galattica

Il concetto di *zona abitabile Galattica* (GHZ) è apparso in letteratura nel 2001 [47], come una sorta di estensione su scala galattica del concetto di zona abitabile circumstellare (CHZ). È bene chiarire subito che, al di là di alcune analogie, i due concetti sono notevolmente diversi.

Per capire le analogie ricordiamo che la CHZ deriva dal criterio che la temperatura e pressione superficiali permettano l'esistenza di acqua in fase liquida. Tale criterio introduce una dipendenza dell'abitabilità dalla distanza dalla stella centrale,  $d$ , mediante l'Eq. (2.5), nella quale  $S_* \propto d^{-2}$ . In maniera analoga, è possibile definire una zona abitabile Galattica cercando opportuni criteri di abitabilità che siano dipendenti dalla distanza galattocentrica o, più in generale, dalla posizione nella Galassia. Nella formulazione originale della GHZ l'abitabilità veniva posta in relazione con una serie di fattori astrofisici legati all'evoluzione chimica Galattica [47]. Poiché tali fattori presentano gradienti spaziali ed evolvono nel tempo, ne deriva la possibilità di definire una zona abitabile Galattica con posizione ed estensione variabili nel tempo.

Il concetto di GHZ presenta due importanti differenze rispetto a quello di CHZ. La prima differenza riguarda la definizione stessa di abitabilità. Infatti, mentre il criterio di acqua liquida, alla base della CHZ, si riferisce alla sostenibilità di qualsiasi forma di vita, i criteri della GHZ si riferiscono, come vedremo, alla sostenibilità di forme di vita complesse [47]. Ne consegue che la definizione di abitabilità galattica dipende dalla scala di tempo dell'evoluzione da organismi semplici a organismi complessi. La mancanza di conoscenza di tale scala di tempo in situazioni diverse da quella terrestre introduce un'incertezza nella definizione di abitabilità per forme di vita complesse. La scala di tempo dell'evoluzione biologica dev'essere introdotta come un parametro libero del problema.

La seconda differenza riguarda la quantificazione dei criteri di abitabilità. Nel caso della CHZ è possibile, in linea di principio, quantificare l'estensione della zona abitabile una volta

fissate tutte le proprietà del pianeta e della stella centrale. Nel caso della GHZ questo non è possibile: come vedremo i criteri di abitabilità vanno infatti intesi in senso probabilistico. Per chiarire questo punto esaminiamo dunque tali criteri.

## Criteri di abitabilità Galattica

I principali criteri presi in considerazione negli studi di abitabilità Galattica sono la metallicità e il tasso di esplosione di supernove [47, 75].

### METALLICITÀ

Il legame tra metallicità ed abitabilità di una determinata regione della Galassia è alquanto indiretto. L'ipotesi di base è che la probabilità di formazione di pianeti rocciosi sia una funzione crescente dell'abbondanza dei metalli. Tale ipotesi era stata suggerita da un risultato ottenuto dallo studio statistico degli esopianeti: la probabilità di trovare un pianeta è infatti maggiore in stelle di maggior metallicità [100, 70]. Sulla base di tale risultato alcuni lavori avevano stimato la probabilità di esistenza di pianeti rocciosi in funzione della metallicità, e prodotto in tal modo delle mappe spazio-temporali di abitabilità galattica [75].

In realtà il *trend* osservativo con la metallicità si applica ai pianeti giganti, che dominano la statistica degli esopianeti, piuttosto che ai pianeti rocciosi, di interesse per la loro abitabilità. Non c'è al momento attuale evidenza sperimentale che i pianeti di piccola massa, quali i pianeti rocciosi, siano più frequenti alle alte metallicità [108]. Al contrario, sulla base di alcuni modelli, la minor frequenza osservata di pianeti giganti alle basse metallicità potrebbe implicare addirittura una maggior quantità di materiale protoplanetario disponibile per formare pianeti di minor massa [92]. Pertanto le mappe spazio-temporali di GHZ prodotte utilizzando i primi risultati statistici di esopianeti sono da prendere con cautela.

È comunque plausibile che esista un limite di metallicità al di sotto del quale si inibisca il meccanismo di formazione di planetesimi e quindi di pianeti di tipo rocciosi. L'assenza di pianeti in ammassi globulari [119, 120] è per ora consistente con un'ipotesi di inibizione di formazione planetaria a bassa metallicità. Future misure statistiche sulla frequenza di pianeti rocciosi in altri ambienti di bassa metallicità potranno dare vincoli quantitativi utili a definire questo aspetto della GHZ.

### TASSI DI ESPLOSIONE DI SUPERNOVE

Il legame tra abitabilità e tasso di esplosione di supernove sta' nel fatto che l'esplosione di una supernova nella vicinanza di un pianeta abitato può portare a una sterilizzazione delle forme di vita complesse. Sulla base di questo argomento, l'abitabilità di zone della Galassia con alta densità stellare sarebbe in qualche modo compromessa a causa dell'alto tasso di esplosione di supernove in tali zone.

Come nel caso della metallicità, anche questo tipo di argomento è difficile da quantificare, anche perchè la sterilizzazione del pianeta potrebbe riguardare le forme di vita complesse, ma non quelle microscopiche [92]. In fasi successive all'evento distruttivo gli organismi microscopici sopravvissuti potrebbero riprendere la propria evoluzione portando all'origine di nuove specie complesse.

Gli studi dettagliati degli effetti di un'esplosione di supernova ravvicinata ( $d \lesssim 10$  pc) su di un pianeta di tipo terrestre indicano che verrebbe distrutto lo strato protettivo di ozono, lasciando pertanto esposta la superficie del pianeta alle radiazioni ultraviolette [45]. Un effetto simile verrebbe indotto da un'esplosione di un lampo di raggi gamma posto entro alcuni kiloparsec all'interno della Galassia, qualora il pianeta si trovi entro il fascio collimato in cui viene emessa l'energia dell'esplosione [113].

## Risultati e sviluppi futuri

Sia la metallicità che il tasso di esplosione di supernove hanno un gradiente positivo con la distanza galattocentrica. Regioni della Galassia troppo vicine al centro saranno eccessivamente esposte a esplosioni di supernove, mentre regioni troppo periferiche non avranno abbastanza metalli per formare pianeti rocciosi. Poichè le implicazioni in termini di abitabilità Galattica sono opposte, ne consegue che deve esistere una zona di distanze galattocentriche ottimale per la sostenibilità di vita complessa [75]. Come abbiamo visto è difficile tradurre tale risultato in termini quantitativi accurati. A tal scopo è necessario fare uno sforzo per affinare i criteri utilizzati nel definire la GHZ e per migliorare l'attendibilità dei calcoli dei parametri rilevanti per l'abitabilità.

Il concetto di GHZ è l'unico che ci permetta di fare delle predizioni statistiche sulla possibile distribuzione della vita nella Galassia anche in assenza di osservazioni dirette di pianeti extrasolari. Per tale motivo vale la pena affinarlo e svilupparlo in lavori futuri. Ciò sarà possibile grazie all'aumento dei vincoli osservativi e al progresso nel calcolo dei modelli.

Dal punto di vista osservativo sappiamo ad esempio che la frequenza di pianeti di tipo terrestre in diverse regioni della Galassia diventerà misurabile direttamente nel corso dei prossimi anni. Dal punto di vista dei modelli sono attualmente in fase di implementazione delle simulazioni numeriche a N corpi di tipo SPH (*smooth particle hydrodynamics*) di una galassia tipo Milky Way che evolve in ambito cosmologico. Tali simulazioni tengono conto dell'evoluzione chimica Galattica [114] e sono mirate a produrre mappe spaziali e temporali dei parametri rilevanti per l'abitabilità. La produzione di tali mappe non sarebbe possibile con i modelli classici di evoluzione chimica Galattica.

Anche dal punto di vista dei criteri di abitabilità è senz'altro possibile introdurre dei miglioramenti. Ad esempio, anzichè usare una probabilità di formazione di pianeti terrestri in funzione della metallicità è possibile considerare un valore di soglia al di sotto della quale la formazione di planetesimi rocciosi venga inibita [118].

Oltre ai criteri della metallicità e del tasso di esplosione di supernove, ve ne sono

sicuramente altri che meritano essere approfonditi. Citiamo, ad esempio, le perturbazioni gravitazionali indotte dal passaggio di un sistema planetario in una zona di alta densità stellare. Tali perturbazioni potrebbero innescare un bombardamento sui pianeti da parte di corpi minori residui della formazione del sistema, analogo al *late heavy bombardment*. In casi estremi le perturbazioni gravitazionali potrebbero ripercuotersi sulla stabilità delle orbite planetarie, facendo uscire un pianeta dalla zona abitabile circumstellare. Come nel caso delle esplosioni di supernove, l'abitabilità verrebbe maggiormente compromessa nelle zone di alta densità stellare.

# Bibliografia

## Testi generali e di consultazione

- [1] Anderson DL, 2007, *New Theory of the Earth*, Cambridge Univ. Press
- [2] Benenson W, Harris JW, Stocker H, Lutz H, (eds.) 2002, *Handbook of Physics*, AIP press, Springer-Verlag, New York
- [3] Berg J, Tymoczko JL, Stryer L, 2007, *Biochimica, Sesta edizione*, Zanichelli
- [4] Cox AN (ed.), 2000, *Allen's Astrophysical Quantities*, AIP press
- [5] Chela-Flores J, 2001, *The New Science of Astrobiology. From Genesis of the Living Cell to Evolution of Intelligent Behavior in the Universe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht
- [6] Draganic IG, Draganic ZD, Adloff J-P, 1990, *Radiation and radioactivity on earth and beyond*, Boca Raton, Fla., CRC Press
- [7] Jeffrey GA, Sanger W, 1991, *Hydrogen Bonding in Biological Structures*, Springer-Verlag, Heidelberg
- [8] Galletta G, Sergi V, 2005, *Astrobiologia: le frontiere della vita*, Hoepli, Milano
- [9] McGuffie K, Henderson-Sellers A, 2005, *A Climate Modelling Primer, Third edition*, Wiley & Sons,
- [10] Magill J, Galy J, 2005, *Radioactivity, Radionuclides, Radiation*, Springer, Germany
- [11] Raven PH, Johnson GB, 1992, *Biology*, Mosby-Year Book, St. Louis, Missouri
- [12] Rollinson H, 2007, *Early Earth Systems: A Geochemical Approach*, Blackwell Publishing
- [13] Salaris M, Cassisi S, 2005, *Evolution of Stars and Stellar Populations*, Wiley & Sons, England
- [14] Spitzer L, 1978, *Physical Processes in the Interstellar Medium*, Wiley, New York
- [15] Schulze-Makuch D, Irwin LN, 2004, *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, Springer-Verlag, Berlin
- [16] Ulmschneider P, 2003, *Intelligent Life in the Universe*, Springer-Verlag, Berlin

## Testi e articoli classici

- [17] Darwin C, 1859, On the Origin of Species by Means of Natural Selection, or the Preservation of Favoured Races in the Struggle for Life, John Murray, London
- [18] Miller SL, 1953, Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions, *Science*, 117, 528.
- [19] Monod J, 1971, Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology, New York, Alfred A. Knopf
- [20] Watson JD, Crick FHC, 1953, A Structure for Deoxyribose Nucleic Acid, *Nature* 171, 737

## Articoli

- [21] Abbas SH, Schulze-Makuch D, 2008, Amino acid synthesis in Europa's subsurface environment, *Int. J. of Astrobiology*, 7, 193
- [22] Araujo-Hauck C, Pasquini L, Manescau A, Udem T, Hänsch TW, et al., 2007, Future Wavelength Calibration Standards at ESO: the Laser Frequency Comb, *The Messenger*, 129, 24
- [23] Alexander M (ed.), 2001, Mars Transportation Environment Definition Document, *NASA/TM-2001-210935*, Mars GRAM, NASA
- [24] Bean JL, Seifahrt A, Hartman H, Nilsson H, Reiniers A, et al., 2010, The Proposed Giant Planet Orbiting VB 10 Does Not Exist, *ApJ*, 711L, 19
- [25] Boden MA, 2003, Alien life: how would we know?, *Int. J. of Astrobiology*, 2, 121
- [26] Cataldo F, 2007, Radiation-induced racemization and amplification of chirality: implications for comets and meteorite, *Int. J. AsB.*, 6, 1
- [27] Cess RD, 1976, Climate Change: An Appraisal of Atmospheric Feedback Mechanisms Employing Zonal Climatology, *J. of the Atmospheric Sciences*, 33, 1831
- [28] Chaplin MF, 2010, Water's hydrogen bond strength, *Water of Life: Counterfactual Chemistry and Fine-Tuning in Biochemistry*, eds. Lynden-Bell et al., CRC Press, Boca Raton, 69
- [29] Charbonneau D, Brown TM, Burrows A, Laughlin G, 2007, When Extrasolar Planets Transit Their Parent Stars, *Protostars and Planets V*, eds. Reipurth et al., 701
- [30] Cochran WD, Hatzes AP, 1996, Radial Velocity Searches for Other Planetary Systems: Current Status and Future Prospects, *Astroph. and Sp. Sci.*, 241, 43
- [31] Cleland CE, Chyba CF, 2002, Defining 'Life', *Or. Life Evol. Biosphere*, 35, 333
- [32] Chyba CF, Hand KP, 2005, ASTROBIOLOGY: The Study of the Living Universe, *ARA&A*, 43, 31

- [33] Crick FHC, 1967, Origin of the genetic code, *Nature*, 213, 119
- [34] Cronin JR, Pizzarello S, 1997, Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids, *Science*, 275, 951
- [35] Davies P, 2001, Physics and Life, *First Steps in the Origin of Life in the Universe*, eds. Chela-Flores et al., Kluwer, 13
- [36] Davies P, Benner SA, Cleland CE, Lineweaver CH, McKay CP, Wolfe-Simon F, 2009, Signatures of a Shadow Biosphere, *Astrobiology*, 9, 241
- [37] De Marcellus P, Meinert C, Nuevo M, Filippi J-J, Danger G, Deboffle D, et al., 2011, Non-racemic amino acid production by ultraviolet irradiation of achiral interstellar ice analogs with circularly polarized light, *ApJ*, 727, L27
- [38] Ehrenfreund P, Charnley SB, 2000, Organic Molecules in the Interstellar Medium, Comets, and Meteorites: a Voyage from Dark Clouds to the Early Earth, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 38, 427
- [39] Ejzak LM, Melott AL, Medvedev MV, Thomas BC, 2007, Terrestrial consequences of spectral and temporal variability in ionizing photon events, *ApJ*, 654, 373
- [40] Ellis J, Schramm DN, 1995, Could a nearby supernova explosion have caused a mass extinction?, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 92, 235
- [41] Emsley J, 2001, *Nature's Building Blocks*, Oxford Univ. Press, New York
- [42] Fields BD, Athanassiadou T, Johnson SR, 2008, Supernova collisions with the heliosphere, *ApJ*, 678, 549
- [43] Fischer DA, Marcy GW, Butler RP, Vogt SS, Laughlin G, et al., 2008, Five Planets Orbiting 55 Cancri, *ApJ*, 675, 790
- [44] Freedman WL, Madore BF, 2010, The Hubble Constant, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 48, 673
- [45] Gehrels N, Laird CM, Jackman CH, Cannizzo JK, Mattson BJ, Chen W, 2003, Ozone Depletion from Nearby Supernovae, *ApJ*, 585, 1169
- [46] Gilbert W, 1986, The RNA World, *Nature*, 319, 618
- [47] Gonzalez G, Brownlee D, Ward P, 2001, The Galactic Habitable Zone: Galactic Chemical Evolution, *Icarus*, 152, 185
- [48] Grillmair CJ, Burrows A, Charbonneau D, Armus L, Stauffer J, et al. 2008, Strong water absorption in the dayside emission spectrum of the planet HD189733b *Nature*, 456, 767
- [49] Guerrier-Takada C, Gardiner K, Marsh T, Pace N, Altman S, 1983, The RNA moiety of ribonuclease P is the catalytic subunit of the enzyme, *Cell*, 35, 849
- [50] Halliday AN, 2000, Terrestrial accretion rates and the origin of the Moon, *Earth and Plan. Sc. Letters*, 176, 17

- [51] Hartogh P, Lis DC, Bockelée-Morvan D, de Val-Borro M, Biver N, et al. 2011, Ocean-like water in the Jupiter-family comet 103P/Hartley 2, *Nature*, 478, 218
- [52] Herbst E, van Dishoeck EF, 2009, Complex Organic Interstellar Molecule, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, 47, 427
- [53] Herd CDK, Blinova A, Simkus DN, Huang Y, Taroza R, et al. 2011, Origin and Evolution of Prebiotic Organic Matter As Inferred from the Tagish Lake Meteorite, *Science*, 332, 1304
- [54] Holland HD, 2002, Volcanic gases, black smokers and the Great Oxidation Event, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 66, 3811
- [55] Horst S, Yelle RV, Buch A, et al., 2010, Formation Of Amino Acids And Nucleotide Bases In A Titan Atmosphere Simulation Experiment, *Bull. American Astron. Soc.*, Vol. 42, p.1068
- [56] Hutchison III CA, et al. 1999, Global transposon mutagenesis and a minimal mycoplasma genome, *Science*, 286, 2165
- [57] Ida S, Canup RM, Stewart GR, 1997, Lunar accretion from an impact-generated disk, *Nature*, 389, 353
- [58] Islas JR, Micheau JC, Buhse T, 2004, The origin of biomolecular chirality: Search for Efficient Chiroselective Autocatalytic Reactions, *Life in the Universe. From the Miller Experiment to the Search for Life in other Worlds*, eds. Seckbach et al., Kluwer Ac. Pub., Dordrecht
- [59] Joshi MM, Haberle RM, Reynolds RT, 1997, Simulations of the Atmospheres of Synchronously Rotating Terrestrial Planets Orbiting M Dwarfs: Conditions for Atmospheric Collapse and the Implications for Habitability, *Icarus*, 129, 450
- [60] Joyce GF, 1994, *The Origin of Life: The central concepts*, eds. Deamer & Fleischaker, (Jones & Bartlett, Boston)
- [61] Kalas P, Graham JR, Chiang E, Fitzgerald MP, Clampin M, et al., 2008, Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth, *Science*, 322, 1345
- [62] Kasting JF, Catling D, 2003, Evolution of a Habitable Planet, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 41, 429
- [63] Kasting JF, Whitmire DP, Reynolds RT, 1993, Habitable Zones around Main Sequence Stars, *Icarus*, 101, 108
- [64] Khurana KK, Kivelson MG, Stevenson DJ, Schubert G, Russell CT, Walker RJ, Polanskey C, 1998, Induced magnetic fields as evidence for subsurface oceans in Europa and Callisto, *Nature*, 395, 777
- [65] Kokubo E, Ida S, Makino J, 2000, Evolution of a Circumterrestrial Disk and Formation of a Single Moon, *Icarus*, 148, 419
- [66] Kolb VM, 2007, On the applicability of the Aristotelian principles to the definition of life, *Int. J. of Astrobiology*, 6, 51

- [67] Kliore AJ, Moroz VI, Keating GM, 1986, The Venus International Reference Atmosphere, *Advances in Space Research*, Vol. 5, 1, Pergamon Press, Oxford, (referred to as VIRA)
- [68] Kruger K, Grabowski PJ, Zaug AJ, Sands J, Gottschling DE, Cech TR, 1982, Self-splicing RNA: autoexcision and autocyclization of the ribosomal RNA intervening sequence of *Tetrahymena*, *Cell*, 31, 147
- [69] Lammer H, Lichtenegger HIM, Kulikov YN, Griemeier J-M, Terada N, et al., 2007, Coronal Mass Ejection (CME) Activity of Low Mass M Stars as An Important Factor for The Habitability of Terrestrial Exoplanets. II. CME-Induced Ion Pick Up of Earth-like Exoplanets in Close-In Habitable Zones, *Astrobiology*, 7, 185
- [70] Laws C, Gonzalez G, Walker KM, et al., 2003, Parent Stars of Extrasolar Planets. VII. New Abundance Analyses of 30 Systems, *AJ*, 125, 2664
- [71] Lazcano A, 2003, The 1953 Stanley L. Miller Experiment: Fifty Years of Prebiotic Organic Chemistry, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 33, 235
- [72] Lazcano A, 2008, Towards a Definition of Life: The Impossible Quest?, *Space Science Reviews*, 135, 5
- [73] Lederberg J, 1961, Exobiology: Experimental Approaches to Life beyond the Earth, *Science in Space*, eds. Berkner & Odishaw, New York, McGraw-Hill, 407
- [74] Léger A, Rouan D, Schneider J, Barge P, Fridlund M, et al., 2009, Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. VIII. CoRoT-7b: the first super-Earth with measured radius, *A&A*, 506, 287
- [75] Lineweaver CH, Fenner Y, Gibson BK, 2004, The Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky Way, *Science*, 303, 59
- [76] Lissauer JJ, 2007, Planets Formed in Habitable Zones of M Dwarf Stars Probably Are Deficient in Volatiles, *Ap. J.*, 660, 149
- [77] Lodders K, 2003, Solar System Abundances and Condensation Temperatures of the Elements, *ApJ*, 591, 1220
- [78] Lunine JI, 2005, Giant Planets, *Meteorites, Comets, and Planets*, ed. AM Davis, *Treatise on Geochemistry*, Vol. 1, p. 623, Elsevier-Pergamon, Oxford
- [79] Mac Dermott AJ, 1993, The weak force and the origin of life, *Chemical evolution: Origin of life*, eds. Ponnampurna & Chela-Flores, Hampton, Deepack Publishing, 85
- [80] Maris M, 2010, comunicazione al 3° Congresso della Società Italiana di Astrobiologia, *When Darwin meets Copernicus*, Duino (Ts), 26-28 maggio 2010
- [81] Martin H, 2006, Earth Structure and Plate Tectonics: Basic Knowledge, *Lectures in Astrobiology*, Vol. I, ed. Gargaud et al., Springer, 427

- [82] McSween05 HI, 2005, Mars, *Meteorites, Comets, and Planets*, ed. AM Davis, *Treatise on Geochemistry*, Vol. 1, p. 601, Elsevier-Pergamon, Oxford
- [83] Montmerle T, 2006, The Formation of Solar-type stars: Boundary conditions for the origin of life?, *Lectures in Astrobiology*, Vol. I, ed. Gargaud et al., Springer, 29
- [84] Morbidelli A, Chambers J, Lunine JI, Petit JM, Robert F, Valsecchi GB, Cyr KE, 2000, Source regions and time scales for the delivery of water to Earth, *Meteorit. Planet. Sci.*, 35, 1309
- [85] Mushegian AR, Koonin EV, 1996, A minimum gene set for cellular life derived by comparison of complete bacterial genomes, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 93, 10268
- [86] Noffke N, Hazen R, Nhleko N, 2003, Earth's earliest microbial mats in a siliclastic marine environment (2.9 Ga Mozzan Group, South Africa), *Geology*, 31, 673
- [87] Orgel LE, 1968, Evolution of the genetic apparatus, *J. Mol. Biol.*, 38, 381
- [88] Pavlov AA, Kasting JF, 2002, Mass-independent fractionation of sulphur isotopes in Archean sediments: strong evidence for an anoxic Archean atmosphere, *Astrobiology*, 2, 27
- [89] Pearl JC, Christensen PR, 1997, Mars Global Surveyor Thermal Emission Spectrometer: Observations of Earth, *J. Geophys. Res.*, 102, 10875
- [90] Petit JM, Morbidelli A, 2006, Chronology of Solar System Formation, *Lectures in Astrobiology*, Vol. I, ed. Gargaud et al., Springer, 62
- [91] Pinti DL, 2006, The Origin and Evolution of the Oceans, *Lectures in Astrobiology*, Vol. I, ed. Gargaud et al., Springer, 83
- [92] Prantzos N, 2008, On the "Galactic Habitable Zone", *Space Sc. Rev.*, Vol. 135, 313
- [93] Pravdo SH, Shaklan SB, 2009, An ultracool Star's Candidate Planet, *ApJ*, 700, 623
- [94] Prieto-Ballesteros O, Kargel JS, 2005, Thermal state and complex geology of a heterogeneous salty crust of Jupiter's satellite, Europa, *Icarus*, 173, 212
- [95] Pross A, 2003, The Driving Force for Life's Emergence: Kinetic and Thermodynamic Considerations, 2003, *J. Theor. Biol.*, 220, 393
- [96] Rubey WW, 1951, Geologic history of seawater: An attempt to state the problem. *GSA Bull.*, 62, 1111
- [97] Ryder G, 2003, Bombardment of the Hadean Earth: Wholesome or Deleterious?, *Astrobiology*, 3, 3
- [98] Sagan C, Mullen G, 1972, Earth and Mars: Evolution of Atmospheres and Surface Temperatures, *Science*, 177, 52
- [99] Sagan C, Salpeter EE, 1976, Particles, Environments, and possible Ecologies in the Jovian Atmosphere, *ApJS*, 32, 737

- [100] Santos NC, Israelian G, Mayor M, Rebolo R, Udry S, 2003, Statistical properties of exoplanets. II. Metallicity, orbital parameters, and space velocities, *A&A*, 398, 363
- [101] Scalo J, Wheeler JC, 2002, Astrophysical and Astrobiological implications of gamma-ray burst properties, *ApJ*, 566, 723
- [102] Scalo J, Kaltenegger L, Segura A, Fridlund M, Ribas I, et al, 2007, M Stars as Targets for Terrestrial Exoplanet Searches And Biosignature Detection, *Astrobiology*, 7, 85
- [103] Schulze-Makuch D, Irwin LN, 2002, Energy cycling and hypothetical organisms in Europa's ocean, *Astrobiology*, 2, 197
- [104] Schulze-Makuch D, Guan H, Irwin LW, 2002, Redefining life: an ecological, thermodynamic and bioinformatic approach, *Fundamentals of Life*, eds. Palyi et al., Elsevier, 169
- [105] Seager S, Deming D, 2010, Exoplanet Atmospheres, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 48, 631
- [106] Selsis F, Kasting JF, Levrard B, Paillet J, Ribas I, Delfosse X, 2007, Habitable planets around the star Gliese 581?, *A&A*, 476, 1373
- [107] Smith DS, Scalo J, Wheeler JC, 2004, Transport of ionizing radiation in terrestrial-like exoplanet atmospheres, *Icarus*, 171, 229
- [108] Sousa SG, Santos NC, Mayor M, Udry S, Casagrande L., et al. 2008, Spectroscopic parameters for 451 stars in the HARPS GTO planet search program. Stellar [Fe/H] and the frequency of exo-Neptunes, *A&A*, 487, 373
- [109] Spiegel DS, Menou K, Scharf CA, 2009, Habitable Climates: The Influence of Obliquity, *Ap.J.*, 691, 596
- [110] Struve O, 1955, Life on Other Worlds, *Sky and Telescope*, 14, 137
- [111] Swain MR, Vasisht G, Tinetti G, 2008, The presence of methane in the atmosphere of an extrasolar planet, *Nature*, 452, 329
- [112] Tarter JC, Backus PR, Mancinelli RL, Aurnou JM, Backman DE, et al. 2007, A Reappraisal of The Habitability of Planets around M Dwarf Star, *Astrobiology*, 7, 30
- [113] Thomas BC, Melott AL, Jackman CH, Laird CM, Medvedev MV, et al., 2005, Gamma-Ray Bursts and the Earth: Exploration of Atmospheric, Biological, Climatic, and Biogeochemical Effects, *ApJ*, 634, 509
- [114] Tornatore L, Borgani S, Dolag K, Matteucci F, 2007, Chemical enrichment of galaxy clusters from hydrodynamical simulations, *MNRAS*, 382, 1050
- [115] Turnbull MC, Traub WA, Jucks KW, Woolf NJ, Meyer MR, et al. 2006, Spectrum of a Habitable World: Earthshine in the Near-Infrared, *ApJ*, 644, 551
- [116] Udry S, Santos NC, 2007, Statistical Properties of Exoplanets, *Annu. Rev. Astron. Astrophys.*, 45, 397

- [117] Villanueva GL, Mumma MJ, Novak RE, 2009, Strong release of methane on Mars: Evidence of biology or geology?, *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 73, 1384
- [118] Vladilo G, 2004, Dust and planet formation in the early Universe, *Life in the Universe*, eds. Seckbach et al., p. 167, Kluwer Academic Publishers
- [119] Weldrake DTF, Sackett PD, Bridges TJ, Freeman KC, 2005, An Absence of Hot Jupiter Planets in 47 Tucanae: Results of a Wide-Field Transit Search, *ApJ*, 620, 1043
- [120] Weldrake DTF, Sackett PD, Bridges TJ, 2008 The Frequency of Large-Radius Hot and Very Hot Jupiters in  $\omega$  Centauri, *ApJ*, 674, 1117
- [121] West AA, Hawley SL, Bochanski JJ, Covey KR, Reid IN, et al., 2008, Constraining the Age-Activity Relation for Cool Stars: The Sloan Digital Sky Survey Data Release 5 Low-Mass Star Spectroscopic Sample, *Astron. J.*, 135, 785
- [122] Westall F, 2006, The Geological Context for the Origin of Life and the Mineral Signatures of Fossil Life, *Lectures in Astrobiology*, Vol. I, ed. Gargaud et al., Springer, 195
- [123] Wikramasinghe C, 2003, Panspermia according to Hoyle, *Astrophys. & Sp. Sci.*, 285, 535
- [124] Wilde SA, Valley JW, Peck WH, Graham CM, 2001, Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago, *Nature*, 409, 175
- [125] Williams DM, Kasting JF, 1997, Habitable Planets with High Obliquities, *Icarus*, 129, 254
- [126] Woese CR, 1987, Bacterial evolution, *Microbiol. Rev.*, 51, 221
- [127] Yonath A, 2011, An RNA apparatus with ribozyme capabilities is embedded and functions within the contemporary ribosome, Invited Lecture, Origins 2011, Montpellier
- [128] Zahnle K, Freedman RS, Catling DC, 2011, Is there methane on Mars?, *Icar.*, 212, 493

## Siti web

- [129] <http://exoplanet.eu>, The Extrasolar Planets Encyclopaedia, Schneider J, CNRS/LUTH, Paris Observatory
- [130] [http://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento\\_di\\_Miller-Urey](http://it.wikipedia.org/wiki/Esperimento_di_Miller-Urey), Descrizione dell'esperimento di Miller & Urey, *Wikipedia*
- [131] [http://ssd.jpl.nasa.gov/?planets\\_phys\\_par](http://ssd.jpl.nasa.gov/?planets_phys_par), Planets and Pluto: Physical Characteristics, *Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, NASA*
- [132] <http://www.stratigraphy.org>, *International Commission on Stratigraphy*
- [133] <http://www.iau-c51.org/>, *IAU commission 51, BioAstronomy*
- [134] <http://astrobiology.nasa.gov/nai/>, *NASA Astrobiology Institute*