

JOHN ROBERT BRUCATO*

Ricerca di segni di vita nello spazio

Lo studio dell'origine, l'evoluzione e la distribuzione della vita nell'Universo è un tema scientifico che negli ultimi anni sta riscontrando un interesse sempre crescente. Questo studio, necessariamente interdisciplinare ha mostrato di poter raccogliere gli interessi di un'ampia comunità scientifica e ha evidenziato nuovi e interessanti linee di sviluppo, necessariamente basate su competenze e conoscenze appartenenti a diversi ambiti culturali come ad esempio la biologia, la genetica, la chimica e l'astrofisica. Questa nuova scienza, che prende il nome di astrobiologia, mostra di avere importanti implicazioni in vari ambiti della ricerca ma anche nello sviluppo di nuovi strumenti tecnologici dedicati all'esplorazione spaziale.

La presenza della vita sulla Terra è direttamente correlata all'origine ed evoluzione del Sistema Solare e alle condizioni iniziali presenti nella nube molecolare interstellare dalla quale il nostro pianeta ha avuto origine. La vita, così com'è conosciuta sulla Terra, è originata da complesse reazioni basate sulla chimica del carbonio, probabile risultato dell'interazione di molecole organiche e materiale inorganico. Tuttavia, le condizioni ambientali in cui la vita si è sviluppata sulla Terra primordiale non sono note, e le tracce della più antica storia del nostro pianeta sono state, purtroppo, cancellate dall'attività tettonica. Ancora oggi mancano le prove definitive della composizione dell'atmosfera primordiale, della temperatura superficiale, il pH oceanico, e di tutte le altre condizioni ambientali generali e locali importanti per la comparsa dei primi organismi viventi sulla Terra. Nonostante i resti di rocce dell'Archeano precoce siano scarsi, i dati recenti, provenienti dallo studio di cristalli di zirconio, ci suggeriscono che l'acqua liquida era presente sulla Terra fin dall'inizio

* *INAF - Osservatorio Astrofisico di Arcetri*

già 4,4 miliardi di anni fa (Wilde et al., 2001; Mojzsis et al., 2001). I segni chimici più antichi della presenza di vita sulla Terra risalgono a 3,86 miliardi di anni fa e sono stati trovati analizzando grani di apatite, provenienti dalla regione a sud-ovest della Groenlandia, contenenti inclusioni di grafite ricche di carbonio leggero ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C} \sim -35$ a -60 ppm) (Mojzsis et al., 1996). L'associazione grafite-apatite suggerisce che i microrganismi si siano trasformati in grafite, mentre il fosforo di tali microbi si sia convertito in apatite (fosfato di calcio). Tuttavia, le recenti analisi (Fedo & Whitehouse, 2002) mettono in discussione la natura sedimentaria della formazione rocciosa, suggerendo che il carbonio isotopicamente più leggero non può essere di origine biogenica. L'origine biologica dei resti fossili di 3,5 miliardi di anni ritrovati in sedimenti degli Apex australiani (Schopf, 1993; Schopf et al., 2002) è stata recentemente contestata (Brasier et al., 2002). Questi autori sostengono che le strutture interpretate come simili a microfossili fotosintetici sono, in realtà, o di natura non-biologica oppure sono i resti fossili di una comunità microbica connessa a un sistema idrotermale presente nei fondali marini (Brasier et al., 2002). Mentre è possibile che i sedimenti degli Apex australiani non corrispondano a un ambiente tipico di acque poco profonde, l'origine biologica di queste strutture non è preclusa, e quindi possono ancora essere considerati come i più antichi microfossili conosciuti (Schopf et al., 2002).

Mentre si continua a dibattere se l'origine della vita sulla Terra risalgia a 3,86 miliardi di anni fa, i dati isotopici di campioni contenenti carbonio organico proveniente da rocce sedimentarie ci forniscono la prova che un ciclo del carbonio biologico già era attivo circa 3,6 miliardi di anni fa. A ogni modo è difficile spiegare quale potesse essere l'esatta natura della vita in quel momento della storia della Terra. Oggi, quindi, si cerca di concentrare gli sforzi sullo studio in laboratorio dei meccanismi chimico-fisici di interesse per le prime fasi evolutive terrestri e attive nello spazio. In particolare si cerca di individuare quali percorsi chimici siano stati seguiti dal materiale organico nelle fasi precedenti alla formazione del Sistema Solare e quale sia stato il materiale prebiotico trasportato sulla superficie terrestre attraverso gli impatti di asteroidi o comete.

Pertanto, per comprendere le linee evolutive seguite nello spazio dalla materia organica che hanno portato alla nascita della vita sulla Terra, ed eventualmente su altri corpi del Sistema Solare, è importante studiare le interazioni tra il materiale organico primordiale e l'ambiente circostante analizzando, così, le trasformazioni chimiche subite dalla materia primordiale.

In questo contesto, stabilire se la vita sia mai esistita, o sia ancora attiva da qualche altra parte nell'Universo, è una delle questioni scientifiche che ancora

oggi attendono una risposta. Nel tentativo di definire una strategia che sia efficace per la ricerca di vita, ad esempio su Marte, un approccio sul quale oggi la comunità scientifica è d'accordo è quello di affrontare all'inizio separatamente il problema di determinare se la vita è estinta o presente sul pianeta rosso, e solo successivamente cercare un filo conduttore che possa suggerire un modo comune per affrontare entrambi i casi.

LA TEORIA ETERTROFA E IL BRODO PRIMORDIALE

La mancanza di vincoli sui parametri riguardanti l'origine della vita ha portato a teorie alternative e concorrenti per quanto riguarda l'emergere dei primi sistemi viventi e delle caratteristiche che definiscono i primi organismi. Sebbene sovente si ripresentino discussioni sulla panspermia, cioè il trasferimento di microrganismi da un pianeta all'altro, questo approccio non fa che spostare altrove il problema dell'origine della vita. È importante sottolineare che la vita come noi la conosciamo è un fenomeno chimico, e la chimica è il problema centrale dell'origine della vita. Ci sono diverse teorie in competizione tra loro su come questa chimica possa sorgere. Nonostante la loro diversità, le teorie del brodo primordiale, dei camini idrotermali sottomarini, o dell'origine extraterrestre hanno tutte come presupposto l'idea comune che i composti organici abiotici siano un preambolo necessario per la comparsa di vita. Questo è il principio fondamentale dell'ipotesi eterotrofa per l'origine della vita, in primo luogo proposto da Oparin e Haldane nel 1920, secondo cui le forme di vita non erano in grado di sintetizzare i composti stessi, ma si sono formati da composti organici preesistenti di origine abiotica (Oparin, 1924).

ORIGINE AUTOTROFA DELLA VITA

Alcune teorie propongono un'origine alternativa, ovvero autotrofa della vita, vale a dire che i primi organismi erano in grado di fissare CO_2 e sintetizzare i composti organici necessari al loro mantenimento. L'ipotesi autotrofa più citata deriva dal lavoro di Günter Wächtershäuser, il quale sostiene che la vita sia iniziata per mezzo di un sistema metabolico bidimensionale chemolitrofico auto catalitico basato sulla pirite, un minerale a base di ferro e zolfo.

La reazione $\text{FeS} + \text{H}_2\text{S} = \text{FeS}_2 + \text{H}_2$ è altamente esoergonica con una variazione di energia libera standard di $-9,23 \text{ kcal / mol}$, che corrisponde a un po-

tenziale di riduzione = -620 mV. Così, la combinazione $\text{FeS}/\text{H}_2\text{S}$ è un agente con un forte potenziale di riduzione, e ha dimostrato di fornire non solo una fonte efficiente di elettroni per la riduzione dei composti organici a pressione atmosferica e temperature inferiori a 100 °C, ma anche di promuovere la formazione di legami peptidici che derivano dalla attivazione di amminoacidi con monossido di carbonio e $(\text{Ni}, \text{Fe}) \text{S}$, nonché la fissazione di monossido di carbonio attivo in acido acetico da una miscela di $\text{NiS} / \text{Fe} / \text{S}$ (Huber & Wächtershäuser, 1998).

Nessuno di questi esperimenti (che si verificano in un mezzo acquoso) dimostra da sé che sia gli enzimi che gli acidi nucleici sono il risultato evolutivo di un metabolismo limitato da una superficie, come ipotizzato da Wächtershäuser (1988). Questi risultati però sono compatibili con un modello modificato di un “brodo primordiale” in cui la pirite è vista come fonte importante di elettroni per la produzione di composti organici ridotti. I risultati sperimentali finora raggiunti usando la combinazione $\text{FeS}/\text{H}_2\text{S}$ sono coerenti con un’origine della vita eterotrofa.

CHIMICA PREBIOTICA

La formazione di composti organici in condizioni che possono essere accettate come primitive, è un ambito studiato intensamente. L’elenco delle possibili reazioni chimiche comprende la reazione di Strecker di alanina da acetaldeide, ammoniaca e acido cianidrico, e la sintesi di Butlerov di zuccheri da formaldeide. Solo nel 1953 è stata compiuta da parte di Miller la prima sintesi efficace di composti organici in condizioni primordiali plausibili. Attraverso l’azione di scariche elettriche, che furono lasciate agire per una settimana in una miscela di CH_4 , NH_3 , H_2 , e H_2O , venne osservata la formazione di miscele racemiche di amminoacidi, nonché idrossiacidi, urea, e altre molecole organiche (Miller, 1953; Miller & Urey, 1959). L’esperimento di Miller del 1953 fu seguito pochi anni dopo dalla dimostrazione della sintesi di adenina dalla polimerizzazione acquosa di HCN in condizioni basiche (Orò & Kimball, 1961, 1962). Il ruolo di HCN nella chimica prebiotica è stato ulteriormente sostenuto dalla scoperta che l’idrolisi di polimeri di HCN porta a diversi amminoacidi, purine, e acido orotico, che è un precursore biosintetico della pirimidina uracile, un costituente di RNA (Ferris et al., 1978). Un potenziale percorso prebiotico per la sintesi con alte rese di citosina è fornito dalla reazione di cianoacetaldeide con urea, specialmente quando la concentrazione di quest’ultimo è alta simulando, così, un bacino acquifero in

evaporazione (Miller & Lazcano, 2002). Inoltre, è interessante notare come si sia osservato che l'adsorbimento selettivo di composti organici da parte delle superfici di vari minerali sia in grado di promuovere la concentrazione e la polimerizzazione di vari monomeri (Ferris et al., 1996).

La facilità di formare amminoacidi, purine, pirimidine e altri precursori biologici semplici in condizioni prebiotiche suggerisce che questi componenti erano certamente presenti nell'ambiente prebiotico terrestre o marziano. Esperimenti di laboratorio ci suggeriscono che è possibile sintetizzare altri prodotti prebiotici come urea, alcoli, acidi carbossilici, zuccheri, e una grande varietà di idrocarburi alifatici e aromatici, acidi grassi ramificati e lineari, alcuni dei quali sono in grado di formare vescicole. La lista include anche diversi derivati altamente reattivi dell'acido cianidrico (HCN), come cianammide (H_2NCN) e il suo dimero ($H_2NC(NH)NH-CN$), dicianammide (NC-NH-CN), e del cianogeno (NC-CN), che sono noti per catalizzare reazioni di polimerizzazione (Orò et al., 1990).

Il motivo per il quale vengono condotti esperimenti di simulazione di chimica prebiotica è giustificato dal fatto che è stata rivelata nella meteorite di Murchison, condrite carbonacea formata 4,6 miliardi di anni fa, la presenza di una vasta gamma di amminoacidi sia proteici che non proteici, acidi carbossilici, purine, pirimidine, idrocarburi, e altre molecole organiche rilevanti per la vita. Questi composti meteoritici rendono plausibile un apporto di materia giunto dallo spazio e che, quindi, la natura renda facile percorrere i primi passi nel campo della chimica prebiotica.

FONTI EXTRATERRESTRI DI COMPOSTI ORGANICI

Le sintesi abiotiche di amminoacidi, purine, pirimidine, e altri composti sono molto efficienti se l'ambiente in cui avvengono le reazioni è fortemente riducente. Tuttavia, la possibilità che l'atmosfera primitiva fosse non riducente, come oggi gli astrofisici sostengono, non crea problemi insormontabili, poiché anche in queste condizioni si pensa che il brodo primordiale è possibile che si sia formato. Per esempio, è possibile che l'idrogeno sia stato prodotto per mezzo della pirite. Infatti, uno ione solfuro (SH^-) sarebbe stato convertito in un ione disolfuro (S^{2-}) in presenza di composti ferrosi, liberando così l'idrogeno molecolare. Inoltre è anche possibile che gli impatti dovuti ad asteroidi ricchi di ferro abbiano migliorato le condizioni riducenti dell'atmosfera primordiale, e che le collisioni cometarie abbiano creato localmente ambienti favorevoli alla sintesi organica.

Naturalmente, la questione non è tanto quella di capire quale sia la fonte dei composti organici, ma in che misura abbiano contribuito le varie sorgenti di materia extraterrestre. Ad esempio, sebbene la quantità totale di formaldeide, acetaldeide, cianoacetaldeide e altri composti prebiotici in una data nube interstellare sia elevata, i composti che sono sopravvissuti alla formazione del sistema solare hanno raggiunto la Terra come costituenti minori di comete, meteoriti ricche di carbonio o particelle di polvere interplanetaria. Il meteorite Murchison contiene circa il 3% di carbonio organico, la maggior parte del quale è un polimero insolubile. Allo stesso tempo, sono stati estratti circa 100 ppm di amminoacidi che rappresentano, ipotizzando una porosità del 10% e una densità di circa 2 g cm^{-3} , una concentrazione di 0,1 g di amminoacidi per kg di meteorite, o $\sim 200 \text{ mM}$ di amminoacidi (Miller & Lazcano, 2002).

Qualsiasi teoria sull'origine della vita basata sulla evoluzione di un sistema genetico autoreplicante si basa sulla presenza di composti chimicamente stabili e di micro-ambienti stabilizzanti. Dalle conoscenze che fino a oggi si hanno, la chimica del HCN fornisce un percorso preferenziale per la sintesi prebiotica di purine e pirimidine. In alternativa, la formammide (HCONH_2) in presenza di catalizzatori inorganici come i minerali è in grado di sintetizzare purine e pirimidine; quest'ultimo potrebbe rappresentare un percorso prebiotico più efficiente della chimica del HCN (Saladino et al., 2001).

CHIRALITÀ E L'ORIGINE DELLE SOSTANZE ORGANICHE

Una caratteristica fondamentale della vita è la omochiralità (fig. 1) presente nella maggior parte dei suoi elementi costitutivi. Le teorie proposte per spiegare la sua origine sono molteplici e la maggior parte di esse richiedono che sia attivo un sistema di amplificazione chimico che può differire per il meccanismo iniziale usato: fluttuazione casuale, effetto di interazione elettrodebole, o apporto extraterrestre. Eccessi enantiomerici sono stati trovati nelle meteoriti (Engel & Macko, 1997; Cronin e Pizzarello, 1997; Pizzarello & Cronin, 1998, 2000), ma ancora oggi vengono cercati in altri materiali extraterrestri come le micrometeoriti (ad esempio Vandenabeele-Trambouze et al., 2001) e nelle comete (Thiemann & Meierhenrich, 2001).

I primi approcci sperimentali sulle sintesi di composti organici inizialmente non ebbero molta fortuna nel produrre molecole chirali (Miller e Urey, 1953). Alcuni, quindi, ne hanno dedotto che i meccanismi abiotici proposti per l'origine delle molecole chirali sulla Terra primitiva non possono verificarsi in natura (Bonner et al., 1999). L'assenza di chiralità nei prodotti ottenuti

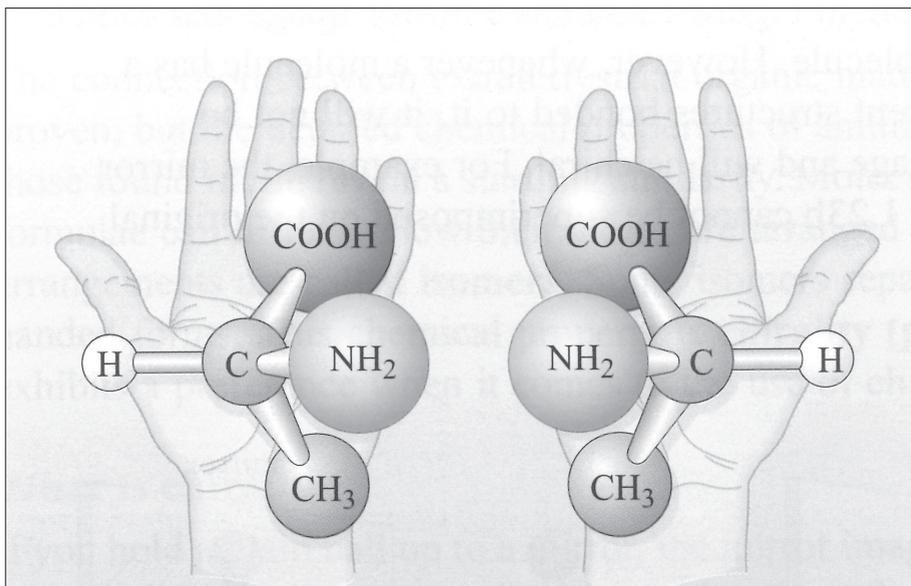


Fig. 1 Molte molecole biologiche possono esistere in due forme chirali destra, di tipo D, o sinistra, di tipo L (Credito Bada J.L.)

da esperimenti di chimica prebiotica rafforza la presunzione che la sintesi naturale abiotica produca invariabilmente miscele racemiche. Però nel 1997, Cronin e Pizzarello riuscirono a vedere modesti eccessi enantiomerici di tipo L che andavano dal 2 a 9% in alcuni amminoacidi estratti dal meteorite Murchison. Questo risultato fu possibile perché si cercò di evitare tutte le possibili contaminazioni durante l'analisi dell'acido 2-ammino-2,3-dimethylpentanoico, acido α -metil norvalina e isovalina. Bailey et al. (1998) suggerirono che gli eccessi enantiomerici osservati potrebbero essere stati indotti dalla luce polarizzata circolarmente derivante dalla dispersione di polvere in regioni di formazione stellare. Questa ipotesi è stata recentemente dimostrata attraverso un esperimento in cui sono state irraggiate molecole semplici a 80 K con luce ultravioletta polarizzata circolarmente. Le molecole che sono state sintetizzate hanno mostrato di possedere un lieve eccesso enantiomerico (Nuevo et al., 2006). Tuttavia, bisogna tener conto che gli amminoacidi sono composti molto fragili e che sono distrutti facilmente da particelle cariche o da fotoni di bassa energia (Ehrenfreund et al., 2001). Pertanto, l'origine extraterrestre della chiralità è fortemente dibattuta. A ogni modo, miscele racemiche di amminoacidi possono essere trasformate da un meccanismo di amplificazione in miscele con dominanza di chiralità di tipo L o D.

Ci sono, senza dubbio, molte domande su questo argomento che sono

ancora senza risposta e i problemi posti sono ben lungi dall'essere risolti. Tuttavia, la possibilità di accoppiare i composti organici extraterrestri con le condizioni ambientali getta nuova luce sull'importanza della omochiralità e il ruolo che l'apporto di materia organica proveniente dallo spazio ha avuto per l'origine della vita.

PROSPETTIVE NEL CAMPO DELLE BIOTECNOLOGIE E NANOTECNOLOGIE

La ricostruzione degli eventi critici che stanno alla base dell'origine della vita è una sfida che l'uomo ha da tempo deciso di intraprendere. Poiché non è rimasta alcuna traccia geologica nota della chimica prebiotica terrestre è evidente che siamo di fronte a un problema. Nonostante abbiamo a disposizione vari modelli suggestivi che possano in qualche modo giustificare sia la presenza che l'abbondanza di composti organici sulla Terra primitiva e avendo, inoltre, una conoscenza dettagliata della moderna biochimica, oggi abbiamo a disposizione solo lo strumento della speculazione per guidare la nostra comprensione sui passi che la chimica ha dovuto compiere per collegare questi due regni ancora distinti. Infatti, sappiamo ancora poco sugli stadi intermedi che sono esistiti tra questi due estremi.

L'ipotesi del "Mondo a RNA" assume che il primo sistema apparso avesse la capacità di auto-replicazione (Gesteland et al., 1999), il "Mondo a lipidi" assume invece che i comparti siano stati i primi a comparire (Segre et al., 2001), mentre il "Mondo a proteine" ritiene che per prima siano apparse microstrutture di proteine (Fox, 1988) e, infine, il "Mondo a tioesteri" considera che sia stato il metabolismo il primo a comparire sulla Terra (de Duve, 1991). La verità è che abbiamo cominciato solo oggi a capire le relazioni fondamentali ad esempio tra le varie unità presenti in una cellula vivente, o sulla distribuzione delle proprietà comuni tra le specie, o quali siano i fattori principali che costituiscono le forme di vita. Non ci può essere alcun dubbio che tale approccio comporta una valutazione critica e una messa a punto di modelli che avvenga in modo continuo e che richieda un miglioramento costante del nostro pensiero sulle origini della vita.

Dal punto di vista teorico, possiamo notare che c'è stata un'esplosione di simulazioni al computer e di modelli analitici che cercano di descrivere comportamenti collettivi complessi di miscele chimiche prebiotiche (Dyson, 1985). La maggior parte delle versioni più popolari tendono a essere variazioni del concetto originale di Eigen di iperciclo (Eigen & Schuster, 1979), dove la caratteristica generale è un modello composto da reazioni e diffusioni

di una miscela complessa di bio-molecole organiche. La miscela complessa iniziale dovrebbe essere sufficientemente varia, così che certi composti molecolari possano catalizzare la formazione di altri. In una regione dello spazio dei parametri, la catalisi e la diffusione reciproca porterà ad auto-alimentare reti autocatalitiche che possono contenere informazioni, unirsi, dividersi e riprodursi. Così procedendo, la vita dovrebbe seguire spontaneamente. C'è un collegamento interessante che rende l'approccio teorico, non solo rilevante per l'origine degli studi sulla vita, ma anche per lo sviluppo di nuove tecnologie. Nel campo della genomica e della bioinformatica, progetti come E-cell (<http://www.e-cell.org>) si sforzano di riprodurre le caratteristiche di un organismo vivente in un modello riprodotto al computer. I modelli di E-cell necessitano di una attenta calibrazione per mezzo di dati sperimentali, ma possono offrire una prova virtuale delle condizioni chimiche necessarie alla vita.

Possono i modelli al computer servire anche come strumenti di progettazione razionali per la preparazione di sistemi che si autosostengono ab initio? Se sì, questo potrebbe contribuire alla nostra comprensione delle reti chimiche complesse che stanno alla base della vita e l'origine della vita sulla Terra o su altri pianeti.

La capacità che oggi abbiamo di realizzare nano-materiali ha portato a una nuova prospettiva riguardante le origini della vita. Per esempio, ci sono connessioni evidenti tra la progettazione di un sistema vivente e una capsula che permette la somministrazione di farmaci. Entrambi devono essere in grado di auto-propagarsi, riconoscere un target, e dare una risposta. Quindi è interessante notare come gli stessi metodi possano essere utilizzati in entrambi i campi, con reciproco vantaggio fornendo così nuove opportunità (Szostak et al., 2001).

L'ACQUA NEL SISTEMA SOLARE

Un altro aspetto fondamentale che ha un impatto significativo nell'esplorazione dello spazio è la ricerca della presenza di acqua. Cercare segni di vita nel Sistema Solare o altrove, si fonda su un'assunzione fondamentale cioè che la vita sia così come la conosciamo sulla Terra. Quindi è facile comprendere come la presenza di acqua sia un prerequisito essenziale.

La storia dell'acqua nel Sistema solare è ancora oggi oggetto di dibattito. È, tuttavia, utile avere un'idea di base della storia dell'acqua nel Sistema Solare. Le idee presentate di seguito sono una breve panoramica di alcune delle

ipotesi più recenti, che hanno guadagnato una certa popolarità. Le molecole di H_2O e OH sono presenti nell'universo fin dalle prime fasi in cui le stelle hanno completato il loro ciclo di vita e rilasciato ossigeno nel mezzo interstellare. Infatti l' H_2O è una delle molecole più abbondanti nella materia interstellare. Quindi, man mano che il collasso della nebulosa protosolare procede, l'acqua presente prevalentemente sotto forma di ghiaccio, è sottoposta, come tutti gli altri composti presenti nella nebulosa, a un aumento della pressione e temperatura che le permette di passare in fase vapore. Solamente nelle zone più esterne del Sistema Solare, probabilmente a circa la stessa distanza in cui oggi troviamo Giove $\sim 5,2$, AU, l'acqua può nuovamente condensare. La "snow line", come è solitamente chiamata, ovvero il confine oltre il quale le temperature sono sufficientemente basse da permettere la presenza di ghiacci, è stata popolata da un gran numero di corpi ghiacciati, responsabili a sua volta della rapida formazione di Giove. Quei corpi che sono riusciti a sfuggire all'attrazione di Giove, essenzialmente le comete, si sono resi disponibili a svolgere un ruolo importante nella distribuzione di acqua all'interno del Sistema Solare che, invece, è nato arido. Da una parte la forza di attrazione solare che ha costretto le comete a rallentare e cadere verso l'interno del Sole e dall'altra la migrazione della "snow line" verso l'interno del Sistema Solare fino a circa 3 AU, hanno fatto sì che l'acqua potesse ridistribuirsi verso le zone interne del Sistema Solare dove i pianeti terrestri si stavano formando. Gran parte dell'acqua che successivamente è entrata a far parte dell'inventario attuale del Sistema Solare interno, può essere stata raccolta e trasportata non solo dalle comete ma anche dagli asteroidi. Esiste un metodo molto efficace per sapere qual è stata l'origine dell'acqua nel Sistema Solare. Questo consiste nel misurare la distribuzione di deuterio all'interno del Sistema Solare. L'acqua originaria del mezzo interstellare (ISM) è arricchita in deuterio, ciò è dovuto a una chimica che coinvolge ioni e molecole a bassissima temperatura tipica del mezzo interstellare. Di contro il deuterio è distrutto all'interno delle stelle che quindi hanno impoverito di deuterio le regioni più interne del Sistema Solare.

Un caso di particolare rilievo è Marte, obiettivo principale di molte missioni spaziali condotte dalla NASA e dall'ESA con l'obiettivo di cercare segni di vita e di capire se l'ambiente marziano possa avere o avere avuto ambienti ideali a sostenere la vita. Oggi si conoscono varie fonti possibili di acqua su Marte. È possibile che una certa quantità di acqua si sia condensata da una primordiale atmosfera, dopo che il pianeta si è raffreddato; l'acqua potrebbe essere stata emessa dalle regioni interne attraverso un'attività vulcanica; l'acqua potrebbe essere stata portata dagli asteroidi con composizione simili

alle meteoriti condriti carbonacee; infine, potrebbe essere stata trasportata da impatti di comete avvenuti durante la parte finale del periodo di grande bombardamento, che anche la Terra ha subito, circa 3.8 miliardi di anni fa.

Le prime stime che riguardano la quantità di acqua presente su Marte sono ottenute dallo studio delle immagini restituite dalle missioni spaziali. Numerosi studi sulle caratteristiche morfologiche della superficie marziana, come i canali di deflusso e i resti di bacini, ci lascia pensare che siano dovuti alla presenza di oceani, con profondità stimate che vanno da alcune decine di metri fino a 440 metri (Carr, 1986; Baker et al., 1991). I primi indizi che riguardano la composizione isotopica dell'idrosfera marziana sono stati ottenuti da osservazioni spettroscopiche condotte da telescopi della atmosfera (Owen et al., 1988). Tali misure hanno mostrato che l'acqua atmosferica è più ricca in deuterio rispetto a quella dell'atmosfera terrestre di un fattore di circa sei. Supponendo che l'atmosfera sia stata strettamente accoppiata all'idrosfera, questo mostra che l'acqua su Marte non ha avuto la stessa composizione di quella terrestre, o che attraverso alcuni meccanismi si sia evoluta diversamente portando a una composizione isotopica distinta.

Se la vita è mai sorta sul pianeta rosso, probabilmente questo è accaduto quando Marte era un pianeta più caldo e umido, si pensa questo sia avvenuto all'incirca entro il primo miliardo di anni successivi alla sua formazione. Le condizioni allora erano simili a quelle terrestri. Entrambi i pianeti erano abitabili, nel senso che possedevano le necessarie condizioni ambientali e i vari ingredienti per poter sostenere la vita, cioè, acqua liquida, carbonio, e altri elementi essenziali, così come fonti di energia. La vita potrebbe essersi presentata in luoghi più idonei come, ad esempio, in prossimità di attività idrotermali. Marte è oggi un obiettivo primario per la ricerca di segni di vita nel nostro Sistema Solare.

La strategia per trovare tracce della passata attività biologica si basa sul presupposto che le eventuali tracce superstiti possano essere conservate nell'ambiente geologico sotto forma di resti sepolti, di materiale organico adsorbito su minerali, oppure di comunità fossili. Allo stesso modo, poiché le condizioni superficiali di Marte sono ostili per gli organismi viventi così come li conosciamo, la metodologia di ricerca che ad esempio L'ESA sta seguendo si basa su indagini di nicchie protette come, ad esempio, nel sottosuolo e all'interno di affioramenti superficiali. Il Rover ExoMars che verrà lanciato presumibilmente nel 2018 dall'ESA sarà dotato di uno strumento indispensabile, un trapano in grado di perforare la superficie per ben due metri e raccogliere campioni dal sottosuolo da analizzare con sofisticati strumenti analitici posti a bordo del Rover. La figura 2 presenta una visione artistica del Rover e del



Fig. 2 *Visione artistica del Rover ExoMars. È possibile vedere il trapano in grado di prelevare campioni a una profondità di 2 metri nel suolo marziano (Credito ESA)*

trapano sulla superficie di Marte. Il Rover sarà in grado di monitorare e controllare la coppia, la spinta, la profondità di penetrazione, e la temperatura della punta del trapano. Il trapano è inoltre dotato di uno spettrometro IR

per permettere di studiare la composizione mineralogica all'interno del foro. In attesa che ExoMars sia lanciato, sta completando il suo viaggio verso Marte il rover Curiosity della NASA nell'agosto del 2012 è atterrato su Marte per studiare le condizioni ambientali marziane e, in particolare, se queste siano state idonee a sostenere la vita.

CAMPIONI RIPORTATI A TERRA DA MISSIONI SPAZIALI

I programmi di esplorazione spaziale oltre all'invio di rover sulla superficie di oggetti del Sistema Solare, hanno come obiettivo a medio termine (10-20 anni per missioni su asteroidi, comete, lune di Marte e Luna) e lungo termine (30 anni per missioni su Marte), riportare a terra campioni extraterrestri. In un contesto internazionale in continua evoluzione, le missioni spaziali di Sample Return, ovvero che hanno come obiettivo quello di raccogliere e riportare a terra campioni extraterrestri, stanno ottenendo un interesse sempre maggiore sia da parte della comunità scientifica internazionale che di quella industriale. Lo studio in laboratorio di materiale extraterrestre raccolto da asteroidi primitivi o da Marte fornirà nuove opportunità di progresso della conoscenza su temi fondamentali come la nascita e l'evoluzione del Sistema Solare o l'origine della vita sulla Terra. Inoltre, lo sviluppo di tecnologie innovative che permetteranno, in maniera autonoma, di atterrare su un corpo del Sistema Solare, di scegliere e raccogliere il materiale dal suolo e di riportarlo a Terra è considerato prioritario per l'Europa.

Stardust della NASA è stata la prima missione che, il 15 gennaio 2006, è riuscita a portare a Terra (http://www.nasa.gov/mission_pages/stardust/main/index.html) campioni di polvere raccolti dalla cometa Wild 2 (fig. 3). Successivamente, nel giugno 2010 sono stati riportati a Terra i campioni extraterrestri prelevati da un asteroide roccioso per mezzo della missione Hayabusa realizzata dall'agenzia spaziale giapponese (JAXA) (www.isas.ac.jp/enterprise/missions/hayabusa/index.shtml). Nel frattempo è già stata selezionata il sequel, Hayabusa 2 che avrà l'obiettivo di raccogliere e riportare a terra campioni prelevati da un asteroide di tipo C, ovvero ricco di carbonio. La NASA prevede di inviare nel 2016 la missione OSIRIS-REx su un asteroide di tipo B, anch'esso ricco di materiale organico che sarà raccolto e riportato a terra nel 2023. Infine, l'Agenzia Spaziale Europea (ESA) ha in corso lo studio nell'ambito del programma Cosmic Vision della missione MarcoPolo-R (Barucci et al., 2012). L'obiettivo principale è la raccolta e il rientro a terra, per la

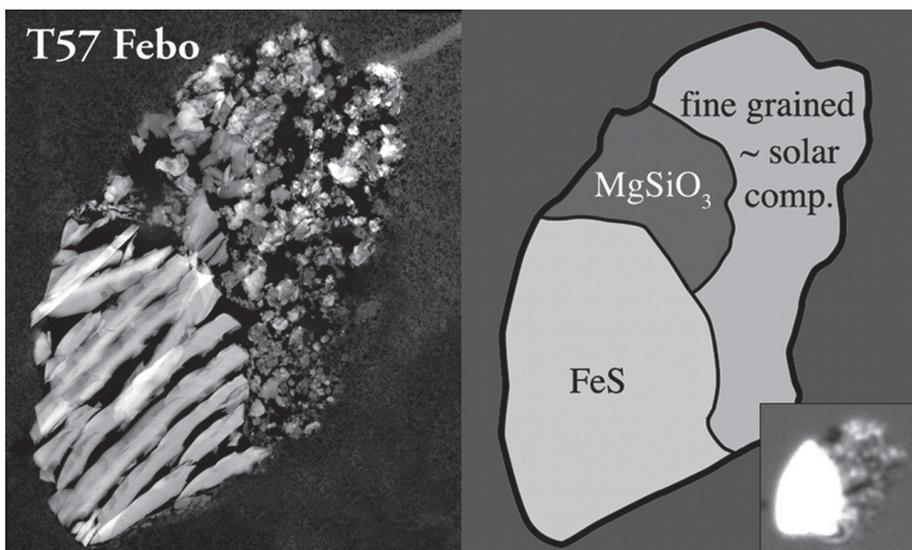


Fig. 3 Un grano di polvere raccolto dalla sonda Stardust della NASA dalla cometa Wild 2. Le dimensioni del grano sono di 8 micrometri. Le analisi in laboratorio hanno mostrato la presenza di tre componenti: pirrotite, enstatite e materiale poroso con composizione simile alla meteoriti condritiche (Brownlee et al., 2006). Si osserva un fenomeno inaspettato, cioè che materiali che si sono formati in zone diverse del Sistema Solare coesistono in un unico grano di polvere

prima volta in Europa, di materiale prelevato da un asteroide primitivo ricco di carbonio, di tipo C, con un lancio previsto nel 2022 e un rientro nel 2029 (sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=108). Questo studio vede una vasta partecipazione e interesse sia della comunità scientifica italiana che delle industrie italiane attive nel settore aerospaziale. Infine è in preparazione la missione “Mars Sample Return” che selezionerà e riporterà a terra campioni della superficie marziana per le analisi di laboratorio.

Nei prossimi 20 anni, quindi, un gran numero di campioni extraterrestri saranno riportati a terra da missioni spaziali e sarà, quindi, necessario che in Europa si realizzi un centro dove poter conservare, manipolare, analizzare e distribuire i campioni. Ma perché riportare a terra campioni extraterrestri? Molte delle risposte alle domande che la scienza sta tentando di risolvere, come l'origine del Sistema Solare o la presenza di vita nello spazio verranno date da misure di alta precisione e sensibilità condotte in laboratorio su materiali extraterrestri. Questo perché le capacità degli strumenti spaziali hanno dei vincoli dovuti alle limitazioni sulle dimensioni, massa, potenza, velocità di trasmissione dati e durata. Ciò è dovuto ad aspetti pratici delle missioni

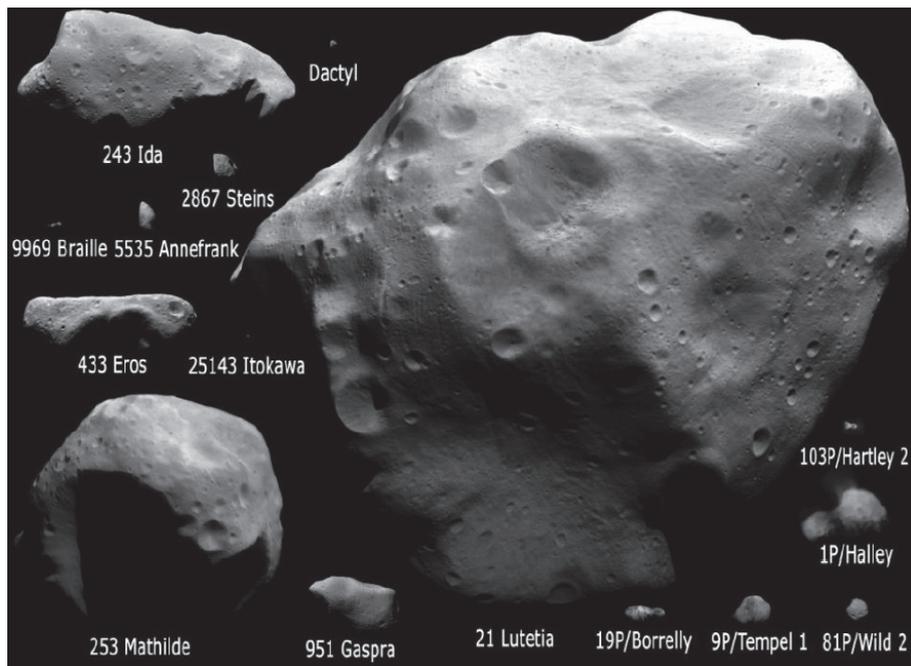


Fig. 4 Immagini in scala di asteroidi e comete visitate da missioni spaziali. È possibile notare la grande diversità in dimensioni, forme e proprietà superficiali (Credito ESA)

spaziali che, necessariamente, hanno risorse limitate. Le prestazioni di uno strumento da laboratorio non potranno mai essere eguagliate da un suo analogo miniaturizzato e adattato a un volo spaziale. Inoltre parte dei materiali riportati a terra saranno conservati all'interno di centri di cura Storage and Curation Facility per le generazioni future di scienziati e di strumentazioni.

I NEA (asteroidi che orbitano vicino alla Terra) sono gli obiettivi più accessibili per le missioni spaziali di sample return (fig. 4) e contengono materiali primitivi adatti alla ricerca scientifica. Essi offrono due vantaggi principali: i) la maggior parte di loro provengono dalla fascia degli asteroidi, che li rende rappresentativi della intera popolazione di asteroidi, e (ii) diversamente degli asteroidi più lontani della fascia principale, i NEA sono obiettivi altamente accessibili per le missioni spaziali. È possibile dimostrare che alcuni NEA sono più facili da raggiungere rispetto alla Luna. Anche se l'elenco degli accessibili NEA per le missioni spaziali contiene già molti oggetti, il loro numero è destinato a crescere notevolmente nel prossimo futuro, grazie a programmi osservativi in corso come Pan-STARR.

Lo studio della natura fisica dei NEA è rilevante anche per la valutazione del rischio potenziale di impatti che questi possono avere sul nostro pianeta. I NEA sono responsabili della maggior parte delle cadute di meteoriti e dei grandi eventi catastrofici da impatto. Qualunque sia lo scenario che si potrebbe presentare, è chiaro che la tecnologia necessaria per elaborare una strategia realistica che possa evitare un impatto da un asteroide dipende dalla conoscenza delle proprietà fisiche del corpo impattante. Utilizzare, ad esempio, una sorta di trattore gravitazionale per deviare la traiettoria di un NEA richiede che massa, forma e rotazione dell'oggetto sia nota con precisione. Il ritorno di un campione da un NEA e la sua successiva analisi di laboratorio non solo aiuterà a rispondere alle domande relative alla formazione dei pianeti, ma fornirà anche per la prima volta una buona conoscenza delle proprietà dei materiali di un potenziale pericolo spaziale.

Un obiettivo ancora più avvincente sarà quello di osservare la presenza di biomolecole nel materiale riportato a terra. Un campione proveniente da un NEA primitivo contenente componenti con diversi gradi di alterazione acquosa darebbe risposte definitive sui processi di formazione della materia organica nello spazio. Avendo a disposizione un campione senza contaminazione terrestre, ogni ambiguità di vita nello spazio sarebbe eliminata.

BIBLIOGRAFIA

- BAILEY J., CHRYSOSTOMOU A., HOUGH J.H., GLEDHILL T.M., MCCALL A., MENARD F. AND TAMURA M. (1998): *Circular Polarization in Star-Formation Regions: Implications for Biomolecular Homochirality*, «Science», 281, pp. 672-674.
- BAKER V.R., STROM R.G., GULICK V.C., KARGEL J.S., KOMATSU G., KALE V.S. (1991): *Ancient oceans, ice sheets and the hydrological cycle on Mars*, «Nature», 352, pp. 589-594.
- BARUCCI M.A., CHENG A.F., MICHEL P., BENNER L.A.M., BINZEL R.P., BLAND P.A., BÖHNHARDT H., BRUCATO J.R., CAMPO BAGATIN A., CERRONI P., DOTTO E., FITZSIMMONS A., FRANCHI I.A., GREEN S.F., LARA L.-M., LICANDRO J., MARTY B., MUINONEN K., NATHUES A., OBERST J., RIVKIN A.S., ROBERT F., SALADINO R., TRIGO-RODRIGUEZ J.M., ULAMEC S., ZOLENSKY M. (2012): *MarcoPolo-R near earth asteroid sample return mission*, «Experimental Astronomy», 33, pp. 645-684.
- BONNER W.A., GREENBERG J.M. AND RUBENSTEIN E. (1999): *The Extraterrestrial Origin of the Homochirality of Biomolecules – Rebuttal to a Critique*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 29, pp. 215-219.
- BRASIER M.D. et al. (2002): *Questioning the evidence for Earth's oldest fossils*, «Nature», 416, pp. 76-79.
- CARR M.H. (1986): *Mars: a water-rich planet?*, «Icarus», 68, pp. 187-216.
- CRONIN J.R. AND PIZZARELLO S. (1997): *Enantiomeric Excesses in Meteoritic Amino Acids*, «Science», 275, pp. 951-955.
- DE DUVE C. (1991): *The Nature and Origin of Life*, Burlington, Carolina Biological Supply.

- DYSON F. (1985): *Origins of Life*, Cambridge, Cambridge University Press.
- EIGEN M. AND SCHUSTER P. (1979): *The Hypercycle. A Principle of Natural Self-Organization*.
- ENGEL M.H. AND MACKO S.A. (1997): *Isotopic evidence for extraterrestrial non-racemic amino acids in the Murchison meteorite*, «Nature», 389, pp. 265-268.
- EHRENFREUND P., BERNSTEIN M.P., DWORKIN J.P., SANDFORD S.A. AND ALLAMANDOLA L.J. (2001): *The Photostability of Amino Acids in Space*, «Astrophys. J.», 550, pp. 95-99.
- FEDO C.M. AND WHITEHOUSE M. (2002): *Metasomatic Origin of Quartz-Pyroxene Rock, Akilia, Greenland, and Implications for Earth's Earliest Life*, «Science», 296, pp. 1448-1152.
- FERRIS J.P., JOSHI P.C., EDELSON E.H. AND LAWLESS J.G. (1978): *HCN: A plausible source of purines, pyrimidines and amino acids on the primitive earth*, «J. Mol. Evol.», 11, pp. 293-311.
- FERRIS J.P., HILL A.R., LIU R. AND ORGEL L.E. (1996): *Synthesis of long prebiotic oligomers on mineral surfaces*, «Nature», 381, pp. 59-62.
- FOX S.W. (1988): *The Emergence of Life: Darwinian Evolution from the Inside*.
- GESTELAND R.F., CECH T.R. AND ATKINS J.F. (1999): *The RNA World*, New York, Cold Spring Harbor Laboratory Press.
- HUBER C. AND WÄCHTERSCHÄUSER G. (1998): *Peptides by Activation of Amino Acids with CO on (Ni,Fe)S Surfaces: Implications for the Origin of Life*, «Science», 281, pp. 670-672.
- MILLER S.L. (1953): *A production of amino acids under possible primitive earth conditions*, «Science», 117, pp. 528-529.
- MILLER S.L. AND LAZCANO A. (2002): *Life's Origin: The Beginning of Biological Evolution*, ed. W Schopf, California, University of California Press.
- MILLER S.L. AND UREY H.C. (1959): *Origin of Life*, «Science», 130, pp. 245-251.
- MOJZSIS S.J., AHRRENIUS G., MCKEEGAN K.D., HARRISON T.M., NUTMAN A.P. AND FRIEND C.R.L. (1996): *Evidence for life on Earth before 3,800 million years ago*, «Nature», 384, pp. 55-59.
- MOJZSIS S.J., HARRISON T.M. AND PIDGEON R.T. (2001): *Oxygen-isotope evidence from ancient zircons for liquid water at the Earth's surface 4,300 Myr ago*, «Nature», 409, pp. 178-181.
- NUEVO M., MEIERHENRICH U.J., MUÑOZ CARO G.M., DARTOIS E., D'HENDECOURT L., DEBOFFLE D., AUGER G., BLANOT D., BREDEHÖFT J.-H., NAHON L. (2006): *The effects of circularly polarized light on amino acid enantiomers produced by the UV irradiation of interstellar ice analogs*, «Astronomy and Astrophysics», 457, pp. 741-751.
- OPARIN A.I. (1924): *Proiskhozhedenie Zhizni Moskva: Moskovskii Rabachii*, Reproduced Bernal J.D., *The Origin of Life*, London, Weidenfeld and Nicholson, 1967, pp. 199-234.
- ORÒ J. AND KIMBALL A.P. (1961): *Synthesis of purines under possible primitive earth conditions. I. Adenine from hydrogen cyanide*, «Arch. Biochem. Biophys.», 94, pp. 217-227.
- ORÒ J. AND KIMBALL A.P. (1962): *Synthesis of purines under possible primitive earth conditions: II. Purine intermediates from hydrogen cyanide*, «Arch. Biochem. Biophys.», 96, pp. 293-313.
- ORÒ J., MILLER S.L. AND LAZCANO A. (1990): *The origin and early evolution of life on Earth*, «Ann. Rev. Earth and Planetary Sci.», 18, pp. 317-356.
- OWEN T., MAILLARD J.P., DE BERGH C., LUTZ B.L. (1988): *Deuterium on Mars: the abundance of HDO and the value of D/H*, «Science», 240, pp. 1767-1770.

- PIZZARELLO S. AND CRONIN J.R. (1998): *Alanine enantiomers in the Murchison meteorite*, «Nature», 394, p. 236.
- PIZZARELLO S., HUANG Y., BECKER L., POREDA R.J., NIEMAN R.A., COOPER C. AND WILLIAMS M. (2001): *The Organic Content of the Tagish Lake Meteorite*, «Science», 293, pp. 2236-2239.
- SALADINO R., CRESTINI C., COSTANZO G., NEGRI R. AND DI MAURO E. (2001): *A possible prebiotic synthesis of purine, adenine, cytosine, and 4(3H)-pyrimidinone from formaldehyde: implications for the origin of life*, «Bioorg. Med. Chem.», 9, p. 1249.
- SEGRÈ D., BEN-ELI D., DEAMER D.W. AND LANCET D. (2001): *The lipid world*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 31, pp. 119-145.
- SCHOPF J.W. (1993): *Microfossils of the Early Archean Apex chert: new evidence of the antiquity of life*, «Science», 260, pp. 640-646.
- SCHOPF J.W., KUDRYAVTSEV A.B., AGRESTI D.G., WDOWIAK T.J. AND CZAJA A.D. (2002): *Laser-Raman imagery of Earth's earliest fossils*, «Nature», 416, pp. 73-76.
- SZOSTAK J.W., BARTEL D.P. AND LUISI P.L. (2001): *Synthesizing life*, «Nature», 409, pp. 387-390.
- THIEMANN W. AND MEIERHENRICH U. (2001): *ESA mission ROSETTA will probe for chirality of cometary amino acids*, «Origins of Life and Evolution of the Biosphere», 31, pp. 199-210.
- VANDENABEELE-TRAMBOUZE O. ET AL. (2001): *Frontiers of Life*, Acte des XIIeme rencontres de Blois.
- WAECHTERHAEUSER G. (1988): «Microbiological Rev.», 52, pp. 452-484.
- WILDE S.A., VALLEY J.W., PECK W.H. AND GRAHAM C.M. (2001): *Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago*, «Nature», 409, pp. 175-178.