

UN PASSATO CHE SCOTTA

L'UNIVERSO NEI SUOI PRIMI ISTANTI

0 10^{-43} sec $T=10^{32}$ K

L'Universo è così caldo, denso e compatto che la sua descrizione sfugge alle possibilità della fisica.

1 0.01 sec $T=10^{11}$ K

Miscuglio indifferenziato di materia e radiazione in equilibrio termico, 1 particella nucleare su un miliardo di fotoni.

2 0.11 sec $T=3 \times 10^{10}$ K

Riduzione della densità di energia: più neutroni si trasformano in protoni che viceversa.

3 13.82 sec $T=3 \times 10^9$ K

La densità di energia scende sotto la soglia per la creazione di coppie e^- e e^+ .

4 3 min e 2 sec $T=10^9$ K

Formazione dei primi nuclei He^3 , H^3

5 3 minuti e $3/4$ $T=0.9 \times 10^9$ K

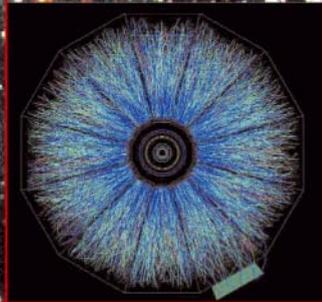
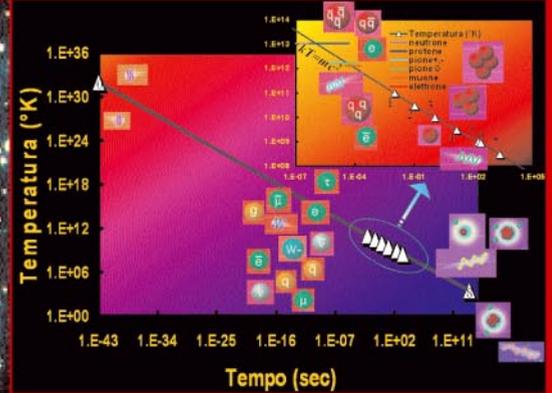
Formazione dei nuclei di elio.

6 34 min 40 sec $T=3 \times 10^8$ K

Termine dei processi nucleari. Le particelle nucleari si presentano come nuclei di idrogeno o come nuclei di elio (25% del totale).

7 300000 anni

La temperatura è abbastanza bassa ($T=3000$ K) perché nuclei ed elettroni possano cominciare a formare atomi stabili.



INTERAZIONE DI IONI PESANTI NELL'ESPERIMENTO RHIC (RELATIVISTIC HEAVY ION COLLIDER). VIENE STUDIATO IL PLASMA DI QUARK E GLUONI, SIMILE A QUELLO ESISTENTE NEI PRIMI TEMPI DELL'UNIVERSO, PRIMA DELLA FORMAZIONE DEI NUCLEI ATOMICI.

DAL DISORDINE ALL'ORDINE, DAL SEMPLICE AL COMPLESSO

Esiste un limite superiore alla temperatura che un sistema fisico può raggiungere? Il tentativo di rispondere a questa domanda ci porta ai primi istanti di storia dell'Universo, iniziata 13.7 miliardi di anni fa. Ai suoi inizi l'Universo era molto più compatto di quanto non sia nel presente, e il gas di radiazione molto più caldo, forse 10^{32} K. La materia che componeva l'Universo era così calda da rendere impossibile la sua "condensazione" in stelle e galassie. Addirittura non era possibile nemmeno la formazione di atomi e di nuclei atomici ed essa si presentava solo nella forma dei suoi costituenti elementari.

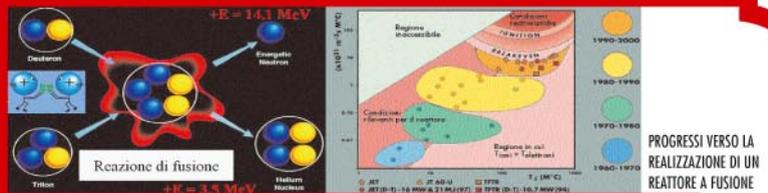
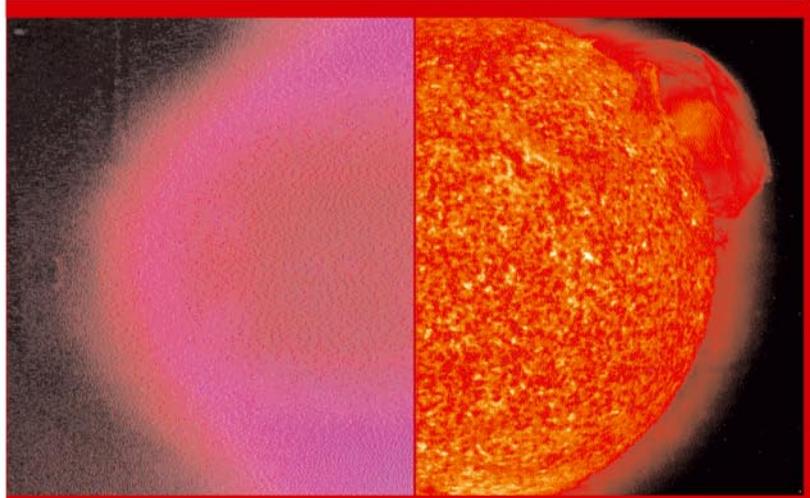
In quell'epoca primordiale la maggior parte dell'energia dell'Universo era contenuta nella radiazione, tanto energetica da essere in grado di trasformarsi in materia, secondo la già citata relazione di Einstein. D'altra parte a temperature così elevate la materia stessa tende a comportarsi come radiazione. Per descrivere questa singolare situazione i fisici dicono che radiazione e materia erano accoppiate, cioè descritte dalla stessa temperatura,

trasferiscono energia da uno all'altra e i membri di una delle due popolazioni si trasformano nell'altra secondo un perfetto equilibrio di scambi. Questi scambi erano così frequenti che l'Universo era opaco: nessun raggio di luce poteva viaggiare a lungo senza subire trasformazioni. Espandendosi il gas di radiazione ha progressivamente perduto la propria energia, e anche la possibilità di mantenere l'intenso regime di scambi di energia con la materia. Da quel momento l'Universo è diventato trasparente. La luce ha cominciato a viaggiare nello spazio e nel tempo portando con sé le immagini di questo incredibile spettacolo. Circa 14 miliardi di anni dopo ha trovato uno spettatore curioso: l'uomo.



LA STELLA IN LABORATORIO

- 1920** Eddington ipotizza la fusione nucleare nell'interno delle stelle.
- 1938** O. Hahn e F. Strassman realizzano le prime reazioni di fissione, in cui un nucleo pesante, bombardato da neutroni, si scinde in due nuclei più leggeri.
- 1939** L. Meitner e O. Frisch forniscono l'interpretazione degli esperimenti di fissione, calcolando l'energia che ne viene liberata: 1 grammo di uranio che subisce fissione equivale a bruciare 2.5 tonnellate di carbone. Bethe formula la teoria delle reazioni di fusione nucleare.
- 1942** Enrico Fermi realizza il primo reattore a fissione.
- 1945** Il progetto Manhattan porta alla costruzione della bomba atomica
- 1951** 24 marzo. Juan Peron, presidente dell'Argentina, annuncia che il suo paese ha realizzato un dispositivo a fusione nucleare in grado di produrre energia. L'annuncio viene smentito alcuni mesi dopo. Negli stessi anni scienziati in Gran Bretagna (Thomson, Ware), nell'Unione Sovietica (Artsimovich, Sacharov) e negli Stati Uniti (Spitzer, Teller) iniziano indipendentemente e in completa segretezza le ricerche per la realizzazione di un reattore a fusione nucleare.
- 1952** Soprattutto a opera di Edward Teller nasce la prima bomba termonucleare in cui la reazione di fusione (più potente) viene provocata dalla reazione di fissione (più facile da innescare)-
- 1953** 12 agosto. Primo test della bomba H in URSS (Sacharov).
- 1956** Igor Kurchatov, direttore delle ricerche nucleari in URSS, durante una visita ai laboratori di Harwell (UK) annuncia che anche l'URSS ha in corso ricerche per l'uso della fusione nucleare a scopo di produzione di energia.
- 1958** In occasione della Conferenza di Ginevra sull'uso pacifico dell'energia atomica viene rimosso il vincolo della segretezza alle ricerche nucleari.
- 1969** Dopo quasi 20 anni di insuccessi, Artsimovich (URSS) con l'aiuto di una equipe inglese (D. Robinson) e del suo apparato per la misura della temperatura, dimostra che la configurazione magnetica detta Tokamak, proposta da Sacharov e Tamm diversi anni prima, è finalmente in grado di ottenere prestazioni di temperatura (10 milioni di gradi) e confinamento dell'energia significativi per la fusione. Si tratta di un passo avanti fondamentale verso il reattore a fusione. A seguito di questo risultato numerosi esperimenti di tipo tokamak vengono realizzati in tutto il mondo (URSS, USA, Europa, Giappone).
- 1991** Primi esperimenti con produzione di energia da fusione nucleare realizzati nel tokamak europeo JET mediante l'utilizzo di una miscela deuterio-trizio.
- 1997** Il JET realizza valori record di produzione di potenza (16MW) e di energia (20MJ) da fusione nucleare. Viene raggiunta una temperatura di circa 350 milioni di gradi. Il rapporto tra potenza prodotta e potenza impiegata è del 65%.
- 2002** Il JET raggiunge valori di densità, temperatura e di confinamento dell'energia adeguati per la realizzazione di un reattore prototipo.



COME SI CREANO LE CONDIZIONI PER LA FUSIONE?

<p>Campi magnetici Tokamak</p> <p>Dimensioni: 10 m Densità del plasma: $10^{20} - 10^{25}$ Onde plasmamagnetiche Riscaldamento ohmico Iniezione di neutroni (flussi di atomi di idrogeno) Compressione Energia dei prodotti di fusione</p>	<p>Inerzia Fusione fasci laser</p> <p>Dimensioni: 10^{-4} m Durata del plasma: $10^{-9} - 10^{-7}$ s Compressione (meccanica laser o di ioni, precompressione trigger X che squassa fasci, produzione precompressione materiali opportuni) Energia dei prodotti di fusione</p>
--	---

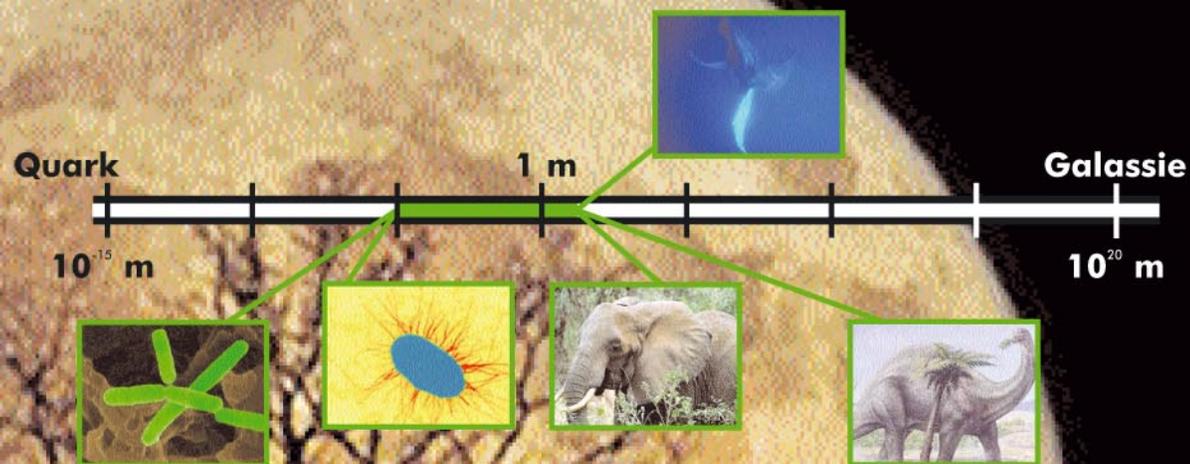


La ricerca sulle alte temperature è intimamente connessa con i processi fisici che possono liberare enormi quantità di energia. L'invenzione delle macchine termiche, come il dominio delle reazioni nucleari, ha segnato in modo irreversibile la storia del rapporto dell'uomo con la realtà. Una conoscenza che consegna nelle mani dell'uomo un potere enorme di costruire ma anche di distruggere. La scoperta del segreto che accende le stelle ha introdotto il livello ultimo in questa dinamica di conoscenza e di potere sulle cose, e allo stesso tempo ne ha messo in evidenza il limite: 50 anni di ricerche hanno evidenziato quanto resta ancora da fare per imbrigliare l'energia delle stelle e realizzarne una sulla Terra. Mostrando ancora più chiaramente quanto sfuggente sia la realtà che ci circonda, e quanto sorprendentemente fruttuoso e affascinante sia lo sforzo di comprenderla.

"...i fisici progettavano queste fantastiche macchine, e succedeva che non funzionavano come dovevano. E questo perché nelle leggi della fisica classica e dell'elettromagnetismo c'è posto per molti fenomeni ai quali non avevamo pensato..." (Harold Furth, fisico)



LE DIMENSIONI DELLA VITA



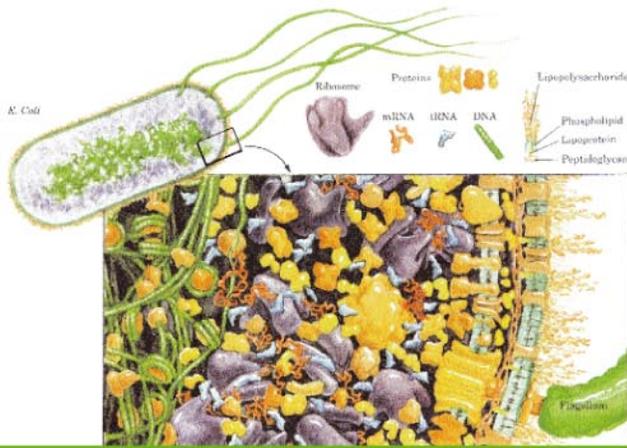
Quali sono le estreme condizioni fisiche compatibili con il mondo vivente? Per quanto riguarda la densità, gli organismi condividono con la maggior parte dei solidi esistenti in natura valori non troppo diversi da quelli della densità atomica. Per i viventi la densità è particolarmente costante e vicina a quella dell'acqua. Ben più vaste appaiono le variazioni in dimensione e temperatura. Gli organismi unicellulari hanno dimensioni dell'ordine del micron, mentre le maggiori balene raggiungono la lunghezza di decine di metri e arrivano a pesare oltre 120 tonnellate. Oggi conosciamo microorganismi esotici il cui habitat richiede temperature di -15 gradi centigradi, e altri che vivono a temperature altissime, intorno a 200 gradi.

Ma per quanto sorprendenti, questi valori sono lontanissimi dai confini fisici del mondo subatomico o del macrocosmo, così come dal caldo stellare o dallo zero assoluto. La natura ha scelto dimensioni intermedie per la vita.

**PERCHÉ QUESTO SUCCEDDE?
CHE COSA FA SÌ CHE LE CONDIZIONI DI CUI HANNO
BISOGNO GLI ESSERI VIVENTI SIANO CONTENUTE IN
INTERVALLI BEN PRECISI DI VALORI MODERATI?**



NE' TROPPO PICCOLI!



QUANTO PICCOLA PUÒ ESSERE UNA CELLULA?

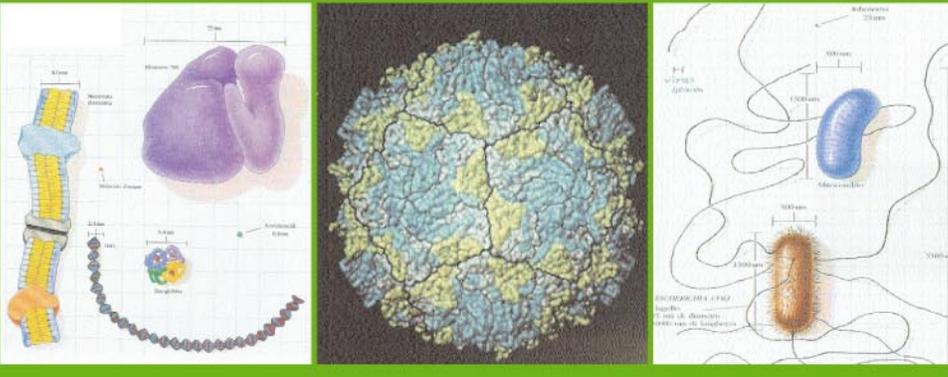
Due sono i tipi di molecole indispensabili per la vita: le proteine e gli acidi nucleici. Le proteine sono i "pezzi" che compongono il "macchinario" cellulare, dato che virtualmente ogni funzione della cellula è sostenuta da un tipo definito di proteina. Gli acidi nucleici immagazzinano invece il "progetto" biologico che sta alla base dell'esistenza della cellula: le istruzioni per la sintesi di tutte le proteine. Esistono due tipi di acidi nucleici, l'acido deossiribonucleico (DNA) e l'acido ribonucleico (RNA), che si differenziano per piccoli ma importanti aspetti strutturali. Entrambi sono capaci di immagazzinare informazione, anche se negli organismi più evoluti è invariabilmente il DNA ad adempiere questa funzione. Ogni tratto di DNA che codifica una proteina è detto gene. Altro essenziale componente cellulare sono i ribosomi, ottenuti dall'assemblaggio di proteine e di RNA, e che presiedono alla sintesi delle proteine decodificando l'informazione contenuta nei rispettivi geni. Tutte le cellule contengono dunque questi componenti fondamentali, sia quelle più evolute, che presentano diversi compartimenti separati l'uno dall'altro da membrane, sia quelle più primitive, in cui tutti i componenti sono contenuti in un unico compartimento. Gli organismi pluricellulari sono formati da cellule del primo tipo, e il loro diametro è di norma attorno a 20 μm . Al secondo tipo appartengono le cellule batteriche, con dimensioni lineari attorno a 1-2 μm . In tutti i casi, l'interno delle cellule risulta straordinariamente sovraffollato di molecole e di aggregati molecolari di ogni genere. Le cellule batteriche sono dunque le più piccole forme viventi? Non sembra che sia così. Innanzitutto, nel mondo biologico esistono i virus, con dimensioni lineari comprese tra

0.04 e 0.1 μm . Ma i virus non sono altro che "pacchetti" di materiale genetico, per lo più DNA, racchiusi in un involucro proteico, e capaci di infettare determinati tipi di cellule. Una volta che il DNA viene iniettato nella cellula, questa si mette a "lavorare per il virus", riproducendo il virus stesso in molteplici copie. Pertanto i virus non sono dotati di vita autonoma, ma dipendono dalla capacità replicativa della cellula infettata.

In tempi recenti è emersa una novità di grande interesse in merito alle dimensioni minime degli organismi viventi. Sono state infatti scoperte forme di vita molto più piccole dei convenzionali batteri, e denominate **nanobatteri**, le cui dimensioni lineari sono comprese tra 0.06 e 0.2 μm . Ciò comporta che il loro volume sia da 1000 a 25000 volte minore di quello dei batteri convenzionali. Ma cosa impone il limite inferiore delle dimensioni di un essere unicellulare? Un simile organismo deve possedere un numero adeguato di proteine per sostenere almeno le funzioni metaboliche più elementari, e naturalmente una dotazione di DNA che le codifichi.

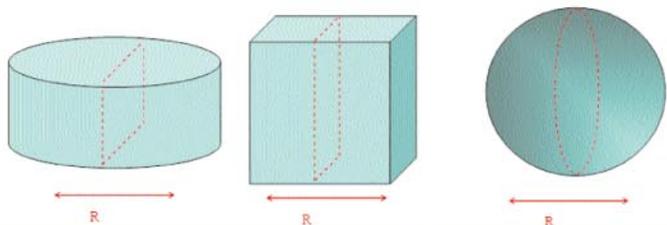
È stato stimato che il numero minimo di tipi diversi di proteine debba essere di circa 250. Inoltre è necessario un adeguato numero di ribosomi. Il contenuto di ribosomi è critico nel determinare le dimensioni di una cellula poiché si tratta di strutture "ingombranti" a livello molecolare, e nelle convenzionali cellule batteriche il loro numero è compreso tra 10000 e 60000. I ribosomi rappresentano quasi la metà della massa secca di una cellula. Per limitare le dimensioni di una cellula, la prima esigenza è dunque ridurre il numero di ribosomi. È probabilmente quanto accade nei nanobatteri, ma ciò ha delle conseguenze: infatti la velocità di replicazione di una cellula è strettamente correlata alla velocità con cui vengono sintetizzate le proteine, e quindi al numero dei ribosomi. In effetti, nei nanobatteri la velocità di replicazione è minore di addirittura 10000 volte rispetto a quella dei batteri convenzionali. È quindi plausibile che i nanobatteri possiedano poche decine di ribosomi.

Sebbene molti aspetti restino oscuri in merito all'origine, alla diffusione e alle funzioni dei nanobatteri, la loro recente scoperta promette sviluppi di grande interesse circa le teorie sull'origine della vita. È infatti possibile che essi siano gli organismi più simili alle forme di vita primordiali. Sembra inoltre che siano diffusissimi in natura e che abbiano colonizzato gli habitat più diversi.



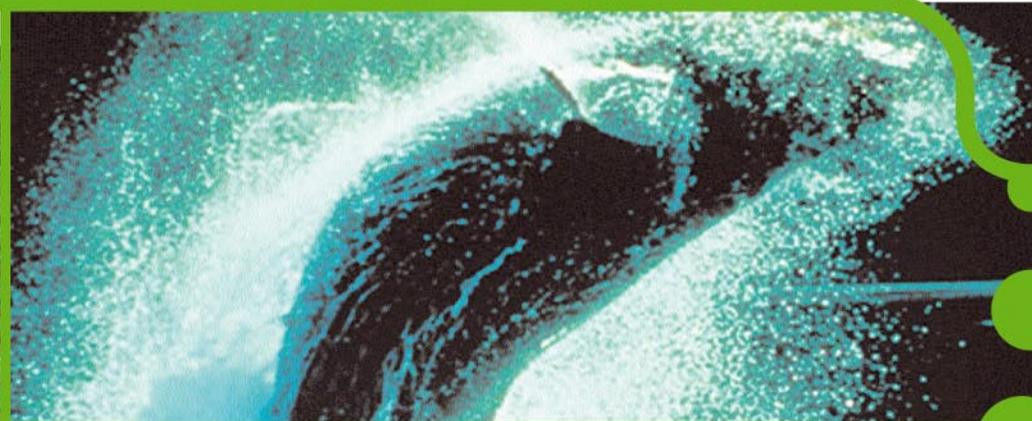
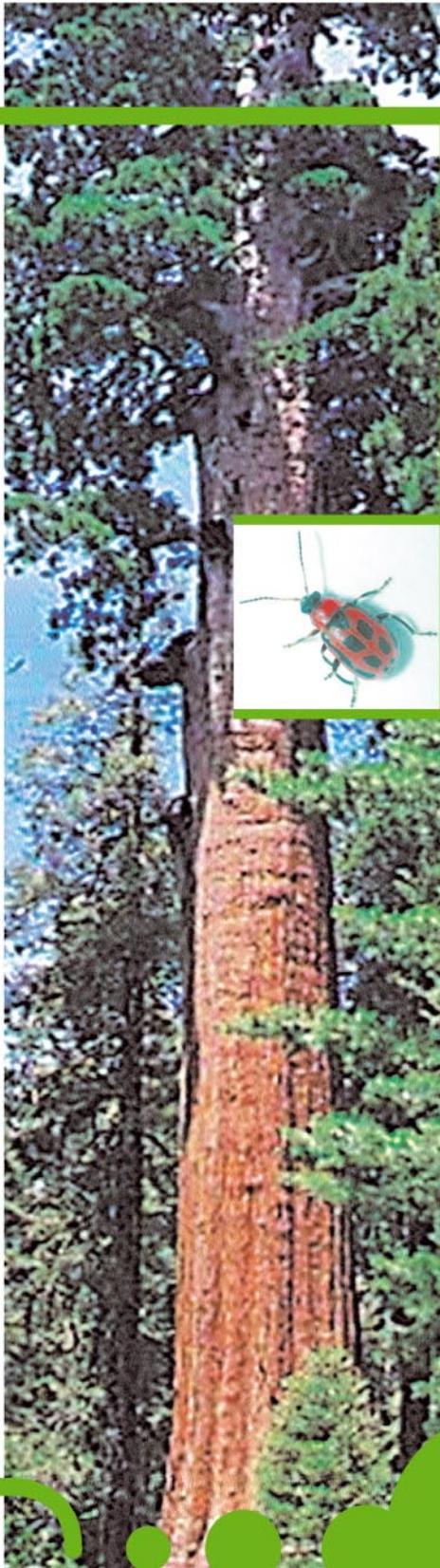
...NÉ TROPPO GRANDI!

La forza di gravità terrestre pone un limite alle massime dimensioni raggiungibili dagli organismi viventi. Le piante e gli animali non possono crescere indefinitamente perché, al crescere delle loro dimensioni, la coesione interna aumenta meno rapidamente del loro peso. Le dimensioni di una struttura che può autosostenersi e muoversi sulla Terra incontrano un limite di rottura dei legami intermolecolari. Questo è conseguenza del fatto che la coesione interna dipende dalle dimensioni di una sezione superficiale tipica dell'organismo (R^2), mentre il suo peso cresce con il volume (R^3).



INDIPENDENTEMENTE DAI DETTAGLI DELLA SUA FORMA, PURCHÉ SUFFICIENTEMENTE REGOLARE, IN UN SOLIDO IL RAPPORTO TRA IL VOLUME E LA SUPERFICIE (COSÌ COME IL RAPPORTO TRA IL VOLUME E UNA SUA TIPICA SEZIONE) AUMENTA IN PROPORZIONE ALLE SUE DIMENSIONI LINEARI.

RAGGIO: R
SEZIONE: R^2
SUPERFICIE: R^2
VOLUME (MASSA, PESO): R^3
RAPPORTO VOLUME/SEZIONE: R
RAPPORTO VOLUME/SUPERFICIE: R



Per una balena lunga 20 m il rapporto peso/sezione (e quindi la sua robustezza in paragone alla forza di gravità) sarà quindi circa 1000 volte più sfavorevole che per un insetto di 2 cm. Per questo motivo un insetto può cadere a terra da un'altezza di un metro (pari a circa 100 volte la sua dimensione) senza "rompersi". Ben diverse sarebbero le conseguenze se facessimo precipitare una balena da un'altezza 100 volte la sua dimensione, cioè da circa 2 km!

Si ritiene che i più grandi dinosauri (per esempio l'Apatosaurus, che pesava 85 tonnellate) fossero vicini al limite critico di rottura della loro struttura per la gravità: animali terrestri molto più grandi non potrebbero esistere perché sarebbero inesorabilmente fragili e inadatti alla sopravvivenza. Nell'ambiente subacqueo, tuttavia, grazie all'effetto della spinta di Archimede (quella che ci fa "sentire più leggeri" quando siamo immersi in acqua), tale limite di rottura è spostato verso dimensioni e masse maggiori. Non è un caso che le più grandi balene raggiungano 130 tonnellate e superino di gran lunga la stazza dei più grandi animali terrestri presenti e passati.

L'intensità relativa della forza di gravità e delle forze intermolecolari di origine elettromagnetica determinano a loro volta anche le dimensioni di un pianeta capace di ospitare la vita. Le dimensioni fisiche degli organismi dipendono dal rapporto tra le intensità delle forze fondamentali della natura.



VITA



PROFESSIONISTI DELL'ESTREMO

Immaginate di tuffarvi in una piscina rinfrescante. Ora pensate, invece, di saltare in una vasca d'acqua bollente o semigelata, oppure di immergervi in aceto, ammoniaca o acqua salata molto concentrata (anche 10 volte più concentrata dell'acqua del mare). L'esito sarebbe disastroso. Eppure vi sono molti organismi che fanno di questi ambienti proibitivi la propria residenza permanente. Per questa loro attitudine vengono detti estremofili. Diversi scienziati ritengono che siano stati i primi organismi viventi comparsi sul nostro pianeta e per questo motivo sono anche chiamati Archeani. Si tratta di microorganismi simili ai batteri, ma che da questi mostrano differenze genetiche tali da aver costretto il mondo scientifico a proporre per essi una nuova categoria dei viventi. Fino a poche decine di anni fa, tutti gli organismi erano raggruppati in cinque insiemi superiori, i Regni (Animali, Piante, Funghi, Protozoi e Batteri). Dopo la scoperta degli Archeani, il biologo Carl Woese dell'Università dell'Illinois propose una nuova categoria, i tre *Domini*: Archaea, Bacteria e Eucarya. Tra gli estremofili, gli organismi più conosciuti e studiati sono gli "amanti del caldo" o *termofili*. Questi crescono e si riproducono a temperature superiori a 45 °C (si tenga presente che il limite superiore di sopravvivenza dell'organismo umano è 50 °C); alcuni di essi, detti *ipertermofili*, prediligono temperature addirittura superiori a 80 °C e in alcuni casi prosperano perfino oltre 100 °C (punto di ebollizione dell'acqua a livello del mare).

MA DOMANDIAMOCI DOVE POSSONO VIVERE ORGANISMI SIMILI.

I termofili sono stati trovati in due tipi di habitat ritenuti sterili fino a trent'anni fa: presso le bocche idrotermali oceaniche (in corrispondenza del margine di congiungimento di due zolle tettoniche adiacenti) e negli equivalenti terrestri di queste ultime, geysir e getti di vapore proveniente dalle regioni interne della crosta.

Le bocche idrotermali sono ambienti caratterizzati da tre condizioni prima ritenute deleterie per la vita: alte pressioni, alto calore e assenza di luce. Le alte pressioni permettono di mantenere l'acqua allo stato liquido anche a temperature superiori a 100 °C (in certe regioni si sono misurati fino a 400 °C). Quando quest'acqua ricca di minerali ad altissima temperatura incontra l'acqua oceanica circostante (molto vicina a 0 °C), si crea una zona a 80 °C ricca di minerali che costituisce l'ambiente ideale per gli archeani ipertermofili. In assenza di luce, questi organismi traggono l'energia vitale dalla rottura dei legami delle molecole di solfuro di idrogeno e metano, che costituiscono gli elementi fondamentali del loro metabolismo.

Il fondo dell'oceano costituisce certamente un ambiente particolarmente protetto: per questo, gli ipertermofili vengono generalmente ritenuti la prima classe di organismi apparsi su un pianeta inospitale come doveva essere la Terra primitiva.

Oggi si conoscono una cinquantina di specie di ipertermofili. Di questi, *Pyrolobus Fumarum* è il più resistente al calore. Per riprodursi richiede temperature di circa 105 °C, con una tolleranza fino a 113 °C e smette di moltiplicarsi sotto 90 °C: sembra incredibile ma per lui fa troppo freddo!

A QUALCUNO PIACE CALDO...

ESISTE UN LIMITE SUPERIORE DI TOLLERABILITÀ PER LA VITA?

John Parkes dell'Università di Bristol (UK) ha recentemente isolato microbi intatti in una regione delle profondità oceaniche a una temperatura di 169 °C. Oggi la comunità scientifica ritiene che in condizioni di alte pressioni è possibile prevedere l'esistenza di microorganismi estremofili fino a temperature di 250 °C; oltre si comincerebbero a rompere i legami chimici molecolari decomponendo irreversibilmente i componenti cellulari.



VITA