



Come è nato l'Universo? Qual è la genesi chimica e biochimica dell'uomo? E in che modo questa genesi è connessa con l'Universo nel suo insieme? Le lezioni del corso di aggiornamento "L'Universo e l'origine della vita" tenutosi a Bologna nel 2001 e qui riportate, ma anche pubblicate in un libro, tentano di rispondere a queste domande. Buona lettura!

L'Universo e l'origine della vita

1. Presentazione
2. I miti delle origini
3. Il *Big Bang*
4. Le molecole organiche nella materia interstellare
5. Dinamica e formazione del sistema solare
6. I pianeti e la vita
7. Le molecole della vita
8. Prime tappe dell'evoluzione dei viventi
9. Evoluzione biologica dei viventi
10. L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni
11. I pianeti extrasolari
12. Seti italia: ricerca di intelligenze extraterrestri
13. Gli autori

Presentazione

Bruno Marano*

Nell'esperienza di chi incontra classi e insegnanti delle nostre scuole per discutere delle nostre conoscenze astronomiche e spaziali, è comune notare che esiste un denominatore comune, a volte inconsapevole, per molte delle domande che gli vengono rivolte: il Sole e la Terra sono un sistema unico nell'Universo, assolutamente peculiare nell'ospitare esseri che hanno coscienza della loro esistenza e dell'esistenza dell'Universo? O piuttosto siamo uno di tanti eventi simili, "normali" nell'evoluzione dell'Universo?

Questa questione, profondamente connaturata alla nostra autoconsapevolezza, non è sicuramente figlia della nostra epoca e preesiste all'esplorazione dello spazio operata con mezzi e tecnologie modernissimi. La ricerca delle "Origini", come uno degli obiettivi principali della ricerca fondamentale, ha assunto tuttavia nei tempi recenti la forza e la sintesi di uno slogan e viene regolarmente ripresa dai grandi mezzi di comunicazione.

L'argomento - non è una sorpresa - è fortemente interdisciplinare. Risulta quindi dotato di una notevole valenza educativa, non solo per la sua "forza" intrinseca, ma anche per il fatto che, nell'affrontarlo, si deve operare una sintesi di strumenti che, nell'ordinario percorso didattico degli studenti, provengono da materie d'insegnamento diverse e a volte lontane.

Questo "valore" risulta ancora maggiore se consideriamo che, nelle nostre scuole, si consuma una frammentazione delle conoscenze sulla struttura e storia dell'Universo, separandone la parte "fisica" da quella descrittiva, lasciata spesso isolata e appesa a nulla, come un episodio a sé stante, nell'ambito delle scienze naturali. È nostra speranza riuscire ad indicare un approccio che, generando un forte collegamento tra le diverse discipline, aiuti a superare quella cesura.

Si tratta di un tentativo che ha molti aspetti di novità anche per noi. Quanto qui raccolto è quindi sicuramente molto imperfetto e perfettibile, nel contenuto e nel bilanciamento delle parti. Si tratta però di un progresso che può avvenire solo raccogliendo reazioni e contributi da quanti sono destinatari del corso, in vista di una sua riproposizione futura.

Infine, un ringraziamento va a quanti si sono impegnati nel corso, con l'unica motivazione di esercitare una funzione di stimolo culturale, visto come valore e responsabilità primari dell'Università e degli enti di ricerca.

*Direttore dell'Osservatorio Astronomico di Bologna e del Dipartimento di Astronomia dell'Università di Bologna. Anno 2001

L'Universo e l'origine della vita

I miti delle origini

Fabrizio Bònoli

I miti delle origini

I miti delle origini

Letture

In principio fu **Χαος**, la Voragine, un vuoto oscuro, un abisso cieco, notturno, sconfinato, dove nulla può essere distinto.

Poi apparvero **Γαία**, la Terra, ed **Ερος**, l'Energia dell'Amore primordiale.

Gaia generò **Ουρανός**, il Cielo, e **Πόντος**, il Flutto marino.

Il primo dei figli maschi generati da **Γαία** e **Ουρανός** è il Titano **Ωκεανός**, l'Oceano che circonda l'universo girando su se stesso in un circuito chiuso; l'ultimo dei Titani è **Κρονός**.

Κρονός ucciderà il padre **Ουρανός** che giaceva perennemente sopra **Γαία**: si separa così la Terra dal Cielo e si crea uno "spazio libero" tra di loro, sopra il quale il cielo stellato rappresenta un "grande soffitto".

Poiché **Ουρανός** ha uguali dimensioni di **Γαία**, non esiste una sola parte della Terra dalla quale non si veda un angolo equivalente di Cielo.

Sono nati così il Giorno e la Notte ed è nato **Κοσμος**, come gli uomini lo vedono.

Κρονός consente, in questo modo, l'inizio dello "scorrere del tempo" e della nostra storia...

Come sono nati l'universo, il cielo, la Terra, gli uomini? E ancora: che cosa c'era prima? Che cosa ci sarà dopo? E ci sarà un dopo? E, soprattutto, perché tutto questo?

A queste domande l'uomo ha sempre cercato di dare una risposta, in tutte le epoche e in tutte le culture e a questi quesiti possiamo dire che, ancora oggi, cerca di trovare spiegazione: agli antichi racconti mitici si sono sostituiti i modelli scientifici, anche se, talvolta, un qualche ricordo di quei miti ancora rimane, sia nell'immaginario comune, che in quello scientifico.



Figura 1. Eros e Psiche: particolare di una scultura romana.
(Museo Capitolino, Roma)

Il mito greco dell'origine del Mondo e degli dèi, che abbiamo molto succintamente riassunto, così come molti altri aspetti della cultura greca, ha una profonda derivazione dall'ambito del Vicino Oriente. Ricordiamo, esempio tra i tanti che si potrebbero fare, il *Ciclo di Baal*, che comprende una raccolta di testi mitopoietici, provenienti da quella regione che si estende dal Sinai all'Eufrate, compresa tra il Mediterraneo e il deserto arabico, che era indicata dai greci con il termine complessivo di Siria. Scritti da copie anteriori o da antica tradizione orale tra il XV e il XIV secolo a.C., vennero ritrovati nell'antica Ugarit, vicino all'odierna Latakīja (Laodicea), considerata una delle prime città del mondo, insieme a Ur e Uruk. Il *Ciclo* narra la lotta del dio Baal, signore della fertilità, con il dio Jamm, signore del mare e con Mut, divinità del mondo sotterraneo, e vi viene ricordato il principio delle cose:

*Senza confini e senza tempo era l'Aria
ed un Vento ruotava incessantemente.
Ed il Vento divenne l'amante del suo Principio
e si riavvolse su se stesso.
E da questo nacque il Desiderio.
Il Desiderio è stato il Principio di tutto.*¹

Riconosciamo, così, in questo Vento incessante e nel suo atto d'amore, il Caos e l'Energia dell'Amore primordiale presenti nel successivo mito greco, ma soprattutto emerge una sostanziale differenza tra queste idee cosmogoniche e quelle di altre culture.

*In principio Dio creò il cielo e la terra. Ora la terra era informe e deserta e le tenebre ricoprivano l'abisso e lo spirito di Dio aleggiava sulle acque.
Dio disse: "Sia la luce!". E la luce fu.
Dio vide che la luce era cosa buona e separò la luce dalle tenebre e chiamò la luce giorno e le tenebre notte. E fu sera e fu mattina: **primo giorno**.
Dio disse: "Sia il firmamento in mezzo alle acque per separare le acque dalle acque". Dio fece il firmamento e separò le acque, che sono sotto il firmamento, dalle acque, che sono sopra il firmamento. E così avvenne.*

Dio chiamò il firmamento cielo. E fu sera e fu mattina: **secondo giorno**.

Dio disse: "Le acque che sono sotto il cielo, si raccolgano in un solo luogo e appaia l'asciutto". E così avvenne. Dio chiamò l'asciutto terra e la massa delle acque mare. E Dio vide che era cosa buona. E Dio disse: "La terra produca germogli, erbe che producono seme e alberi da frutto, che facciano sulla terra frutto con il seme, ciascuno secondo la sua specie". E così avvenne: la terra produsse germogli, erbe che producono seme [...] e alberi che fanno ciascuno frutto con il seme[...]. Dio vide che era cosa buona. E fu sera e fu mattina: **terzo giorno**.

Dio disse: "Ci siano luci nel firmamento del cielo, per distinguere il giorno dalla notte; servano da segni per le stagioni, per i giorni e per gli anni e servano da luci nel firmamento del cielo per illuminare la terra". E così avvenne: Dio fece le due luci grandi, la luce maggiore per regolare il giorno e la luce minore per regolare la notte, e le stelle. Dio le pose nel firmamento del cielo per illuminare la terra e per regolare giorno e notte e per separare la luce dalle tenebre. E Dio vide che era cosa buona. E fu sera e fu mattina: **quarto giorno**.

Dio disse: "Le acque brulichino di esseri viventi e uccelli volino sopra la terra, davanti al firmamento del cielo". Dio creò i grandi mostri marini e tutti gli esseri viventi che guizzano e brulicano nelle acque, secondo la loro specie, e tutti gli uccelli alati [...]. E Dio vide che era cosa buona. Dio li benedisse: "Siate fecondi e moltiplicatevi e riempite le acque dei mari; gli uccelli si moltiplichino sulla terra". E fu sera e fu mattina: **quinto giorno**.

Dio disse: "La terra produca esseri viventi secondo la loro specie: bestiame, rettili e bestie selvatiche [...]". E così avvenne: Dio fece le bestie selvatiche [...] e il bestiame [...] e tutti i rettili del suolo [...]. E Dio vide che era cosa buona.

E Dio disse: "Facciamo l'uomo a nostra immagine, a nostra somiglianza, e domini sui pesci del mare e sugli uccelli del cielo, sul bestiame, su tutte le bestie selvatiche e su tutti i rettili che strisciano sulla terra".

Dio creò l'uomo a sua immagine; a immagine di Dio lo creò; maschio e femmina li creò. [...]

E così avvenne. Dio vide quanto aveva fatto, ed ecco, era cosa molto buona. E fu sera e fu mattina: **sesto giorno**.²

Come risulta, infatti, dal confronto fra le prime parole della *Genesi*, nell'*Antico Testamento*, ed i miti (greco ed ugaritico) ricordati prima, mentre nelle grandi religioni monoteiste un dio preesiste alla creazione, nella maggior parte delle altre religioni - soprattutto delle più antiche - la "teogonia", la storia della nascita degli dèi, viene spesso preceduta dalla "cosmogonia", la storia della nascita del Tutto, e le stesse divinità sono immaginate essere generate da un elemento primordiale, da un "principio creatore", sia esso il Desiderio, l'Albero della Vita, l'Uovo cosmico, l'Acqua, il Vuoto, il Caos, il Vento.



Figura 2. Guido Reni (1575-1642): *La separazione del Giorno dalla Notte*. (Parigi, Louvre)

In uno dei più antichi testi letterari conosciuti, l'indiano *Rigveda*, composto tra 4000 e 3500 anni fa - quasi contemporaneo, quindi, al *Ciclo di Baal* - si trovano già invocati tali principi creatori. L'Albero cosmico, simbolo della crescita e dell'espansione del Mondo e contemporaneamente della sua unicità, si ritrova in India, in Mesopotamia e in Scandinavia. Il Desiderio è presente sia nei Fenici che nei Maori, l'Uovo nei Veda e nei Dogon, il gigante P'an-kou in Cina e la Volta celeste nel mito di Orfeo.

Presenti, quindi, in quasi tutte le culture, tali principi generatori appaiono come degli archetipi del pensiero cosmogonico, simboli primitivi e universali che appartengono all'inconscio collettivo, il che spiega le apparenti analogie che si ritrovano in diversi di questi miti, senza necessariamente introdurre la necessità di un'unica cultura - terrestre o extraterrestre - che preesistesse a tutte le altre oggi conosciute. Come sostenne Frazer, uno dei fondatori dell'antropologia sociale, nel suo classico studio sulla magia e la religione, *Il ramo d'oro*, tali analogie "sono effetto di cause simili, che agiscono in maniera analoga sulla costituzione della mente umana in diversi paesi e sotto diversi cieli".



Figura 3. La creazione biblica in sei giorni. Dall'Atlas historique et géographique di Claude Buy de Mornas, Parigi, 1761.

Per trovare quelle cause simili è sufficiente, infatti, cercare di guardare con uno sguardo lontano dal nostro quotidiano, di cittadini di un Occidente evoluto, a quello che poteva essere una volta il rapporto dell'uomo con la natura: con la volta stellata, con la nascita delle piante e degli animali, con il vento e la pioggia e la neve, con le acque, con il fuoco. Da una parte, la necessità di cercare di sopravvivere a quegli elementi, al buio imminente dopo il tramonto del Sole, alla forza degli uragani, alla violenza del mare, agli incendi delle boscaglie o della savana. Dall'altra, il desiderio, sempre presente, di cercare di utilizzare la natura per i propri bisogni: osservare il cielo per misurare il tempo, studiare i venti per percorrere il mare, conoscere le variazioni stagionali per le attività agricole e pastorali, usare e dominare il fuoco. Dall'altra parte, ancora, la speranza che quelle conoscenze, che faticosamente consentivano di sopravvivere alla natura, non venissero rese vane da improvvise modificazioni nel loro aspetto, così ansiosamente osservato, registrato, studiato; modificazioni che non potevano avvenire se non per cause esterne all'uomo e riposte, perciò, in qualcos'altro, o qualcun altro, che quegli aspetti della natura era in grado di dominare meglio ancora dell'uomo: un essere superiore, una divinità. Ecco, allora, l'impulso di proiettare le proprie aspettative e le proprie certezze, o incertezze, verso queste divinità, intese, quindi, come messaggeri o itinerari verso l'ignoto, verso quella natura così poco conosciuta e nello stesso tempo così mutevole e ostile.

Molti di questi miti, come si diceva, hanno lasciato traccia nella nostra cultura e talora, in modo più o meno cosciente e più o meno esplicito, finiscono per riaffiorare, ovviamente, anche nella cultura di coloro che si occupano di scienza e, in particolare, di coloro che si occupano proprio di quei problemi scientifici che appaiono più vicini ai tentativi di dare una risposta "certa" a quelle domande fondamentali che proponevamo poc'anzi.



Figura 4. Creazione del Mondo dal nulla mediante soffio divino. Dal Liber de nichilo (Amiens, 1510) del neoplatonico Charles de Bouelles. (Parigi, BnF, Réserve des livres rares, Rés. 155, f° 63)

Cosa c'è di profondamente e consciamente diverso dalla ricerca di un universo immobile ed eterno nella "costante cosmologica", introdotta nel 1917 da Einstein nelle equazioni della Relatività generale? Quanto la frammentazione di un "atomo primitivo", prevista da Georges Lemaître nel 1931 e che aveva quasi in nuce la teoria del Big Bang, è diversa dall'idea dell'esplosione di un Uovo cosmico iniziale? E la creazione continua di materia, al ritmo di un atomo di idrogeno per metro cubo di spazio, prevista dal "modello dello stato stazionario", avanzato nel 1948 da Hermann Bondi e Thomas Gold in opposizione alla teoria del Big Bang, non ha forse in sé qualcosa degli antichi miti che narravano di divinità perpetuamente immanenti nella creazione? Il Mondo non generato e non distruttibile di Aristotele non si oppone qui, forse, al Cosmo del *Timeo* platonico, che ha avuto un inizio ed avrà una fine, così come lo stato stazionario si oppose al Big Bang?

Esula, certamente, dagli stretti spazi di questo intervento un esame ed una discussione complessiva, sia della vastissima storia dei pressoché infiniti miti sull'origine, sia della loro altrettanto vasta influenza sulla cultura dei tempi nei quali i vari miti sono emersi e sulle culture successive, fino alla nostra. Ci pare, tuttavia, importante

sottolineare come il termine greco $\mu\upsilon\theta\omicron\varsigma$, che noi usiamo per identificare tutte quelle idee che nel tempo ci hanno parlato di qualcuno (o qualcosa) che ha presieduto alla creazione del Mondo e della vita e ne ha guidato gli sviluppi successivi, voglia dire semplicemente - e non per caso - *racconto*. Come tale, infatti, e senza una necessaria immedesimazione, finiva per essere usato da coloro che tali "miti" raccontavano - dalla *Teogonia* di Esiodo alle *Metamorfosi* di Ovidio - e, molto probabilmente, anche recepito da coloro ai quali questi "racconti" erano diretti. È solo nelle religioni monoteiste che il "racconto" sull'origine perde la configurazione di "mito" per divenire "verità rivelata"; verità dalla quale poi realmente far

discendere tutta la conoscenza. Ma questo non deve stupire, se ricordiamo come queste religioni abbiano avuto la loro culla in quel Vicino Oriente nel quale la separazione tra il "racconto" delle cose avvenute, anche fantastiche, e la realtà del vissuto quotidiano non era (e talora non è ancora oggi) così netta e comprensibile come, al contrario, appare divenire sempre di più nel mondo greco. In particolare, dopo la fioritura di quelle correnti di pensiero, disperse nella vasta culla della Magna Grecia e che per semplicità di periodizzazione storica si fanno iniziare nel VII-VI secolo a.C., con Talete e con la Scuola ionica. Allora, per la prima volta, appare nel mondo occidentale un modo diverso di sentire e cercare di comprendere le cose della natura: un tentativo di separare il "mito", il "racconto", dall'osservazione dei fenomeni e dal tentativo di spiegazione degli accadimenti.

I primi animali furono prodotti nell'umidità e furono coperti di un tegumento villosa; col passare del tempo si diffusero sulla Terra. [...] Quando l'involucro si aprì, cambiarono subito il loro modo di vivere; le creature viventi nacquero dall'elemento umido fatto evaporare dal Sole. Dapprima l'uomo somigliava ad un altro animale, cioè ad un pesce.³

Così spiegava l'origine della vita Anassimandro, nel VI secolo a.C. (200 anni dopo Esiodo), e questo non è sicuramente un "mito"! Vediamo qui, pur nella semplicità - e anche nell'ingenuità - della descrizione, un primo tentativo di elaborare un concetto di evoluzione. Si pensi a quanto è stato detto riguardo alle idee di Darwin, alle accuse che ha ricevuto ben ventiquattro secoli dopo Anassimandro e alle critiche cui ancora oggi vengono sottoposte alcune idee evoluzioniste da parte di coloro che ritengono ineliminabile la presenza, nel nostro Universo, di un qualche intervento di creazione. Sia esso avvenuto solo "in principio", lasciando che poi "il caso" o "la necessità" (per parafrasare il titolo di un celebre libro di Jacques Monod) agissero ad agglutinare elementi semplici sino a costituire l'*Homo sapiens*. Sia, invece, questo intervento continuo e quasi quotidiano a guidare l'evoluzione lungo una strada che "doveva" portare a vedere l'universo come è oggi. Un universo nel quale le leggi della fisica, che noi conosciamo e che continuiamo ancora a cercare di conoscere meglio, non potessero dare modo alla nostra Galassia, al nostro Sole, alla Terra, all'atmosfera di formarsi in modo sia pure di poco diverso. Pena, l'impossibilità di arrivare alla nascita (o alla creazione?) della vita e dell'uomo e... se ci si consente l'immodestia di un uso esageratamente integralista del finalismo profondamente presente in certe posizioni, pena l'impossibilità di arrivare a consentire oggi a noi di scrivere queste righe e al lettore di leggerle.⁴



Figura 5. Statue di divinità sumere. (Museo archeologico dell'Iraq, Baghdad)

Ritornando al mito greco ricordato all'inizio, va sottolineata l'importanza, al suo interno, svolta dalla figura di **Κρονος**, il Tempo. Emerge dal breve racconto come il "tempo" venga creato dopo altri personaggi, ma come sia la sua presenza (e il suo atto di parricidio) a dare origine allo "spazio" e agli eventi successivi. Naturalmente, anche il problema dell'origine del tempo è stato uno dei problemi discussi dalle cosmogonie e non tutte le culture lo hanno affrontato e tentato di risolvere nello stesso modo.

Esisteva il tempo prima della creazione delle altre cose, spazio e divinità creatrice compresa? Scorre il tempo in modo lineare, simile ad una freccia, come considerato nella cultura occidentale? Oppure si avvolge intorno a se stesso, simile ad un serpente, come in alcune culture dell'India? E, in entrambi i casi, ha avuto un'origine? Se esisteva prima della creazione del Mondo, allora fa parte o meno del Mondo stesso, qualunque sia ora il senso del suo scorrere?

Sant'Ambrogio, nel IV secolo, scrisse nell'*Hexameron* che Dio creò il Cielo e la Terra all'inizio del tempo e, quindi, il tempo non sarebbe esistito prima del Mondo e più tardi, nel XIII secolo, Guglielmo d'Auvergne, nel *De Universo*, sostenne che, come il Mondo comprende tutto lo spazio e non esiste un "di fuori", il tempo, iniziato a scorrere all'atto della creazione, non ha un "prima", poiché contiene tutti i tempi. Dunque, nel "tempo che ha preceduto l'inizio del tempo" - si chiedeva Guglielmo, affermando contemporaneamente l'inconsistenza della domanda - esisteva qualcosa? Porsi tali questioni equivale, da un punto di vista concettuale, a chiedersi oggi: cosa c'era prima del Big Bang? In quale spazio si sta espandendo il nostro Universo? La cosmologia moderna non evita questa domanda, ma, poiché la nostra scienza non ama lasciare dei paradossi insoluti, ecco che la risposta, molto semplicemente, è: l'Universo coincide con lo spazio-tempo e la sua origine non può essere considerata come un fenomeno temporale.

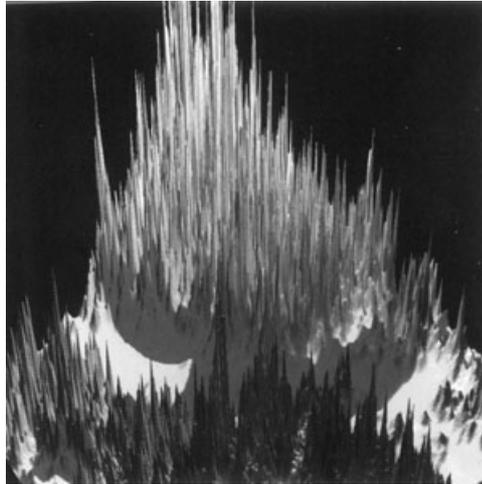


Fig. 6. Simulazione al computer per visualizzare la nascita dello spazio-tempo: secondo la teoria dell'inflazione caotica, il vuoto quantico è esploso alla fine dell'era di Planck generando uno o più universi in rapida espansione. (A. Linde, Stanford University)

In qualche modo, ammantati dalla Relatività generale e dalla meccanica quantistica, siamo, allora, tornati daccapo ai nostri miti sulle origini. Anche la scienza moderna ha, così, creato un suo mito cosmogonico, nonostante risuonasse da lontano il divieto di Tommaso d'Aquino nella *Summa theologiae*: "Che il Mondo abbia avuto un principio è oggetto di fede, indimostrabile, e non oggetto di scienza". Divieto ribadito da Alberto Magno nella *Physica*: "Il principio del Mondo per creazione non è affatto fisico e non può essere provato dalla fisica".

Temo che non se ne esca; proviamo, quindi, a concludere con altre parole dal *Ciclo di Baal* ricordato all'inizio:

*E da esso [il Desiderio] nacque il Verbo,
marciame di una miscela umida.
Il Verbo apparve con l'aspetto di un Uovo
e da esso uscirono esseri incoscienti,
poi coscienti
e contemplatori dei Cieli!*

Vi si ritrovano, come abbiamo visto, sia le tracce originarie di alcune delle più antiche cosmogonie, sia, nella "miscela umida", la reminiscenza dell' "elemento umido fatto evaporare dal Sole" dal quale Anassimandro fa nascere le creature viventi, ma soprattutto - e per questo ci piace qui ricordarlo - appare estremamente significativa l'ultima frase, laddove vengono ricordati esseri nati dall'Uovo, dapprima incoscienti, poi coscienti. E quale primo atto di coscienza, ecco la "contemplazione dei cieli". È dunque sin dai primi, più antichi miti che hanno formato la nostra cultura che, come primo gesto di autoaffermazione dell'*Homo sapiens*, compare il suo sguardo rivolto al cielo, a porsi quelle domande che ricordavamo all'inizio e a cercare di rispondervi, per seguire la "virtute e conoscenza" dell'Ulisse dantesco, nonostante ed oltre i vani tentativi di tutti coloro che hanno cercato - e cercano ancora - di porre dei limiti invalicabili a quella "virtute" e anche a quella "conoscenza".

¹M. LACHIÈZE-REY, J.-P. LUMINET; *Figures du ciel de l'harmonie des sphères à la conquête spatiale*, Bibliothèque nationale de France, Seuil, 1998.

²Da La Bibbia di Gerusalemme, Centro Editoriale Dehoniano, Bologna, 1991

(decima edizione): il testo biblico concorda con la editio princeps, 1971.

³A. MADDALENA; Ionici. Testimonianze e frammenti, La Nuova Italia, Firenze, 1963.

⁴Si ricorda ai lettori del *Giornale di Astronomia* che una più ampia discussione su alcuni di questi argomenti si può trovare in alcuni articoli recentemente comparsi nella rivista.

Riguardo ai problemi delle relazioni tra teologia e cosmologia, si veda: G. Tanzella-Nitti; *Visione realista dell'universo e teologia della creazione*, vol. 25, n. 4, 1999, pag. 14; A. Masani; *A proposito di un articolo di don Tanzella Nitti. Problematiche spirituali della cosmologia moderna*, vol. 25, n. 4, 1999, pag. 21; G. Tanzella-Nitti; *Risposta ad Alberto Masani*, vol 25, n. 4, 1999, pag. 27; G. Tanzella-Nitti; *Rivoluzioni scientifiche e teologia*, vol. 26, n. 2, 2000, pag. 16. Riguardo alle leggi fisiche che regolano l'universo si veda: V. Castellani, S. Degl'Innocenti; *Principio antropico e leggende metropolitane: cronache stellari da un Universo a doppia gravità*, vol. 25, n. 4, 1999, pag. 3

L. Paternò; *Commento all'articolo 'Principio antropico e leggende metropolitane' di Vittorio Castellani e Scilla Degl'Innocenti*, vol. 26, n. 2, 2000, pag. 2.

I miti delle origini

Fabrizio Bònoli

Letture

I miti delle origini

Letture

Calasso R.; *Le nozze di Cadmo e Armonia*, Adelphi, Milano, 1991;

Calasso R.; *Ka*, Adelphi, Milano, 1999;

Campbell J.; *Le figure del mito*, Edizione CDE, Milano, 1992;

*De Santillana G., von Dechend H.; *Il mulino di Amleto : saggio sul mito e sulla struttura del tempo*, Adelphi, Milano, 2000;

*Frazer J.G.; *Il ramo d'oro. Studio sulla magia e la religione*, Bollati Boringhieri, Torino, 1998 (edizione ridotta in un volume dall'autore, nel 1922, dall'edizione originale in 12 volumi editi tra il 1890 e il 1915);

Garfagnini G.C.; *Cosmologie Medievali*, Loescher, Torino, 1978;

Harrison E.; *Le maschere dell'universo*, Rizzoli, Milano, 1989;

Lachière-Rey M., Luminet J.-P.; *Figures du ciel de l'harmonie des sphères à la conquête spatiale*, Bibliothèque nationale de France, Seuil, 1998;

*Mondolfo R.; *L'infinito nel pensiero dell'antichità classica*, La Nuova Italia, Firenze, 1967;

Pettinato G.; *La scrittura celeste*, Mondadori, Milano, 1998;

Repellini F.F.; *Cosmologie Greche*, Loescher, Torino, 1980;

Rinaldi G.; *Letterature antiche del Vicino Oriente*, Sansoni, Firenze, 1968;

*Thorndike L.; *A history of magic and experimental Science*, New York, 1953, 6 voll;

Vernant J.-P.; *L'universo, gli dèi, gli uomini. Il racconto del mito.*, Einaudi, Torino, 2000.

I volumi contrassegnati dall'asterisco costituiscono letture di approfondimento

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

Introduzione

Introduzione

Il problema dell'origine e della struttura dell'universo è stato affrontato per millenni da mitologie, religioni e sistemi filosofici delle diverse civiltà umane, ma soltanto nel XX secolo è divenuto oggetto di indagine scientifica e la cosmologia costituisce oggi un'importante disciplina dell'astrofisica. Come vedremo il progresso scientifico, pur cancellando la rassicurante visione antropocentrica prevalsa per millenni, ha anche messo in luce il sottile ma profondo legame fra la nostra esistenza e le proprietà fisiche fondamentali del cosmo.

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Lettere

"Oh jeunesse oh
jeunesse alors à
cette table
Où le néant
bouffait le déjeuner
instable
Des possibles
confits en une
identité
Survint la loi
tranchante et
indécomposable
Qui lança des trous
d'être en
l'indéfinité"
Raymond Queneau,
Petite Cosmogonie
Portative

I primi ad affrontare il problema dell'origine (*arché*) senza fare appello agli dei o al soprannaturale, ma in termini di leggi naturali, furono i filosofi ionici. Secondo Anassimandro, ad esempio, tutta la materia deriva da un principio primo, da lui chiamato *apeiron* ("illimitato"). Secondo Leucippo e Democrito i mondi si formano e si disgregano, e la materia è costituita da particelle indivisibili, gli atomi. I Greci scoprirono la sfericità della Terra, e descrissero il movimento dei pianeti con modelli sempre più complessi. Aristarco di Samo propose nel III secolo a.C. il modello eliocentrico ma, in assenza di una corretta fisica del moto, e anche per ragioni filosofiche, prevalse il modello geocentrico, che durante il Medioevo si inserì in modo naturale nella visione antropocentrica del cristianesimo. Il sistema eliocentrico fu riproposto soltanto nel 1543, anno della pubblicazione del *De Revolutionibus Orbium Coelestium* di Copernico, e si impose grazie ai lavori di Tycho Brahe, Keplero, e Galileo. Con l'affermazione del sistema copernicano risultò evidente che le stelle erano altrettanti soli, forse infiniti, con infiniti mondi abitati (come sostenuto da Giordano Bruno, bruciato sul rogo per eresia nel 1600).

Nei *Principia Mathematica* (1687), Isaac Newton formulò la celebre legge di gravitazione universale, secondo la quale la forza di attrazione di due corpi è proporzionale al prodotto delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Per la prima volta veniva scoperta una legge fisica valida ovunque, sia sulla Terra che nello spazio (di qui la sua qualifica di universale). Oggi sappiamo che la gravità è una delle quattro forze fondamentali presenti in natura; le altre sono l'elettromagnetismo, l'interazione forte e quella debole. La gravità è in realtà la meno intensa delle quattro (basti notare che la forza di repulsione elettromagnetica fra due elettroni è circa 10^{40} volte superiore alla loro attrazione gravitazionale), ma le interazioni forte e debole hanno un raggio di azione limitato, e l'elettromagnetismo ha cariche opposte che tendono a neutralizzarsi. Ecco perché il moto dei corpi celesti è dovuto alla gravità. Il tentativo di applicare la legge di gravitazione all'universo intero, edificando in tal modo una cosmologia newtoniana, si urta però a dei limiti importanti. Una distribuzione inizialmente statica e finita di stelle nello spazio sarebbe destinata a "crollare" su se stessa, e l'universo non potrebbe dunque essere né *stabile* né *eterno*. A Newton parve allora naturale supporre una distribuzione

uniforme di stelle nello spazio infinito. In tal caso, però, non è possibile ottenere una descrizione matematicamente coerente nell'ambito della fisica newtoniana.

Per avere una descrizione dinamica dell'universo occorre anche sapere come è distribuita la materia nello spazio ma, se a partire dal 1838 fu possibile misurare le distanze delle stelle più vicine, fino agli inizi del XX secolo non fu possibile determinare né la distanza né la natura delle nebulose, in particolare di quelle a spirale. Per questi motivi, mentre da un lato la meccanica newtoniana conobbe, nel XVIII e XIX secolo, una serie di straordinari successi, portando alla previsione del ritorno delle comete periodiche, alla scoperta di Nettuno, al calcolo delle orbite dei pianetini, dall'altro non si ebbe invece la nascita di una cosmologia scientifica, anche se vi furono le importanti osservazioni da parte di William Herschel, mirate a determinare la struttura della Via Lattea e la natura delle nebulose. Herschel, almeno in un primo tempo, si convinse che le nebulose fossero sistemi stellari come la Via Lattea. Questa ipotesi era stata già avanzata, insieme ad altre speculazioni cosmologiche, da Thomas Wright e da Immanuel Kant. Degna di nota è inoltre la concezione dell'universo come ammasso omogeneo di sistemi stellari, nato in seguito alla frammentazione di una particella primordiale, che viene descritta da Edgar Allan Poe nel suo poema in prosa *Eureka* (1848); si tratta sostanzialmente di una versione newtoniana dell'atomo primitivo di Lemaitre, di cui tratteremo più avanti.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

L'universo in espansione

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

Il progresso della cosmologia moderna fu determinato da vari fattori, legati al progresso tecnologico e teorico. Nella seconda metà del XIX secolo, cominciarono ad essere applicate all'astronomia la fotografia e la spettroscopia, mentre nel XX secolo si ebbe la costruzione di telescopi a specchio (riflettori) di sempre maggiori dimensioni, unitamente allo sviluppo di strumentazione e rivelatori sempre più sensibili, grazie ai quali si rese possibile l'analisi della luce proveniente da lontani sistemi stellari. Parallelamente, all'inizio del XX secolo ebbero luogo delle vere e proprie rivoluzioni nella fisica fondamentale, rappresentate dalla teoria della relatività, ristretta e generale, e dalla meccanica quantistica.

La teoria della relatività ristretta, pubblicata da Albert Einstein nel 1905, ha portato all'abbandono dei concetti newtoniani di spazio e tempo assoluti, e alla concezione di una nuova entità fisica, lo spazio-tempo, ma esse vale soltanto per sistemi di riferimento che si muovono di moto rettilineo uniforme (sistemi inerziali). Successivamente, con la formulazione definitiva della relatività generale da parte dello stesso Einstein nel 1916, l'azione della gravità dovuta alla massa dei corpi ha trovato una rappresentazione geometrica come curvatura dello spazio-tempo. La relatività generale ha permesso di superare le limitazioni newtoniane, consentendo per la prima volta una descrizione matematica coerente anche di un universo infinito, omogeneo e isotropo.

Attraverso la soluzione delle equazioni della relatività generale, a partire da alcune ipotesi semplificatrici, si ottengono dei modelli matematici che descrivono la dinamica dell'universo. I modelli standard assumono che la distribuzione della materia nell'universo possa essere descritta come un fluido omogeneo. L'omogeneità implica che volumi uguali di spazio, indipendentemente dalla loro posizione, devono contenere la stessa quantità di materia; in essi noi dobbiamo contare ad esempio lo stesso numero di galassie. Palesemente ciò non è vero per l'universo locale, dove osserviamo una gerarchia di strutture che va dalle stelle alle galassie, e dalle galassie agli ammassi di galassie. Si ritiene, però, che, considerando regioni di universo abbastanza grandi, attorno a qualche centinaio di milioni di anni-luce, l'universo divenga davvero omogeneo; come vedremo, vi sono diverse osservazioni che confermano questa ipotesi, detta "*principio cosmologico*".

Assumendo questo principio, Einstein ottenne nel 1917 il primo modello relativistico, nel quale l'universo ha un volume finito, ma non ha limiti; una situazione che possiamo visualizzare in due dimensioni con la superficie di una sfera, che possiede un'area finita ma illimitata. L'idea di uno spazio curvo era già stata ipotizzata da Gauss, Riemann ed altri. Mi pare interessante notare che anche Giacomo Leopardi aveva probabilmente intuito la possibilità di un universo finito e illimitato. In questo senso ritengo si possa interpretare il seguente passo dello Zibaldone, scritto a Firenze il 20 settembre 1827:

"Il credere l'universo infinito, è un'illusione ottica: almeno tale è il mio parere. [...] Quando io guardo il cielo, mi diceva uno, e penso che al di là di qué corpi ch'io veggio, ve ne sono altri ed altri, il mio pensiero non trova limiti, e la probabilità mi conduce a credere che sempre vi sieno altri corpi più al di là, ed altri più al di là. Lo stesso, dico io, accade al fanciullo, o all'ignorante, che guarda intorno da un'alta torre o montagna, o che si trova in alto mare. Vede un orizzonte, ma sa che al di là v'è ancor terra o acqua, ed altra più al di là, e poi altra; e conchiude, o conchiuderebbe volentieri, che la terra o il mare fosse infinito."

Il modello di Einstein appariva dunque come la brillante sintesi della millenaria contrapposizione dialettica fra spazio finito e spazio infinito, ma non evitava il problema della stabilità dell'universo. Einstein si rese infatti conto che il suo modello avrebbe subito il collasso gravitazionale e, poiché riteneva che l'universo dovesse essere statico, fu costretto ad introdurre nelle sue equazioni la famosa costante cosmologica, la quale, se positiva, equivale ad una forza repulsiva. L'equilibrio così ottenuto fra attrazione e repulsione è però instabile e l'universo è prima o poi destinato a contrarsi o ad espandersi. Le soluzioni più generali furono invece ottenute dal russo Alexander Friedmann nel 1922, e indipendentemente dal belga Georges Lemaître nel 1927, ma rimasero per diversi anni ignorate dalla maggior parte degli astronomi.

Nel caso dei modelli relativistici classici, senza costante cosmologica, la storia dell'universo è legata alla geometria e dipende direttamente dalla densità di materia (si veda la figura 1). Se la densità è molto elevata, superiore ad una soglia critica, allora l'universo è destinato in futuro a rallentare e fermare la propria espansione, per poi collassare su se stesso, e il suo volume è finito e illimitato, come nel caso dell'universo di Einstein: l'universo è "chiuso". Se l'universo ha invece una densità inferiore alla densità critica, allora è destinato ad espandersi per sempre, la sua geometria è detta iperbolica, e lo spazio è infinito: per questo viene detto "universo aperto". Infine, se l'universo ha esattamente la densità critica, allora esso è infinito e destinato ad espandersi per sempre, come nel caso precedente, ma ha in questo caso la familiare geometria euclidea, ed è chiamato per questo motivo "universo piatto".

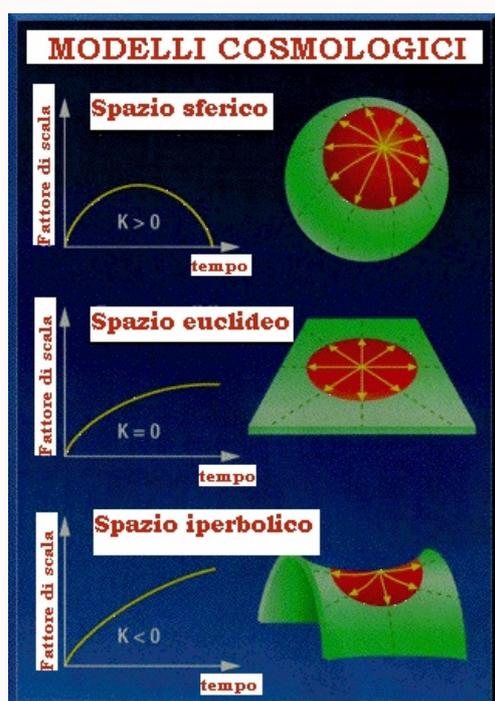


Figura 1. Evoluzione dei modelli di universo senza costante cosmologica

In presenza di una costante cosmologica, la relazione fra geometria e destino dell'universo non è più così semplice, e si può avere ad esempio un universo geometricamente chiuso ma destinato ad espandersi per sempre: tale era ad esempio il modello preferito di Lemaître.

I modelli cosmologici relativistici sarebbero rimasti delle semplici curiosità matematiche, se gli astronomi non fossero riusciti, nello stesso periodo, a comprendere quale fosse la natura e la distanza delle nebulose. All'inizio del XX secolo la maggior parte degli astronomi riteneva che tutte le nebulose osservate appartenessero alla nostra galassia. Nel 1924 l'astronomo americano Edwin Hubble, osservando al telescopio di 2,5m del monte Wilson, che era allora il più grande del mondo, riuscì ad identificare alcune Cefeidi nella nebulosa di Andromeda. Le Cefeidi sono una particolare classe di stelle variabili: dal periodo di variazione della luce di una Cefeide si può ricavare la sua luminosità intrinseca, e dal rapporto fra la luminosità intrinseca e il flusso luminoso osservato si ottiene la sua distanza. Con questo metodo, Hubble fu in grado di dimostrare che Andromeda è un sistema stellare al di fuori della Via Lattea, e più in generale che tutte le nebulose a spirale sono galassie come la nostra.

A questa scoperta, di per sé già fondamentale, ne seguì un'altra ancora più sorprendente e inaspettata.

A partire dal 1912, l'astronomo Vesto Slipher aveva cominciato ad ottenere gli spettri delle galassie più vicine. Ricordiamo che lo spettro di una sorgente luminosa è la scomposizione della sua luce nelle varie lunghezze d'onda, le quali sono percepite dall'occhio come diversi colori; la luce rossa corrisponde a lunghezze d'onda più grandi e la luce blu a lunghezze d'onda più piccole. Gli atomi di un dato elemento, come ad esempio l'idrogeno, possono assorbire o emettere luce solo a determinate lunghezze d'onda; ad esempio, gli atomi che si trovano in una atmosfera stellare, assorbendo la luce proveniente dagli strati interni della stella, causano la presenza di righe scure nel suo spettro. Queste righe si ritrovano nello spettro di una galassia, la cui luminosità è generalmente dovuta all'insieme delle stelle che la costituiscono. Le osservazioni di Slipher mostravano che le lunghezze d'onda delle righe degli elementi identificati nelle galassie erano sistematicamente superiori alle lunghezze d'onda delle stesse righe misurate in laboratorio. Tale spostamento verso lunghezze d'onda maggiori, dunque verso il rosso, è noto con il termine inglese di *redshift*.

Il fenomeno fu interpretato dagli astronomi come una conseguenza dell'effetto Doppler, che consiste in un aumento della lunghezza d'onda nel caso di una sorgente in allontanamento e in una diminuzione della lunghezza d'onda nel caso di una sorgente in avvicinamento. Lo sperimentiamo quotidianamente nel caso delle onde sonore, con la sirena di un'ambulanza, il cui suono risulta più acuto quando l'ambulanza si avvicina e più grave quando si allontana. La formula classica nel caso delle onde luminose è la seguente:

$$z = \frac{(\lambda - \lambda_0)}{\lambda_0} = \frac{V}{c}$$

dove λ è la lunghezza d'onda osservata, λ_0 è la corrispondente lunghezza d'onda misurata in laboratorio, V è la velocità della sorgente e c è la velocità della luce.

Nel 1929 un articolo di Hubble convinse gli astronomi che la velocità di allontanamento V delle galassie è direttamente proporzionale alla loro distanza D da noi:

$$V = H \times D$$

dove H è chiamata costante di Hubble (H è costante nello spazio, ma varia nel tempo).

L'interpretazione più naturale di questa relazione, pienamente confermata dalle osservazioni successive, è che l'universo intero sia in espansione: la separazione fra le galassie aumenta col tempo. Nel caso di un universo chiuso, possiamo riprendere l'analogia bidimensionale con un palloncino che si gonfia (si veda la figura 2). Naturalmente l'espansione non ha un centro, così come non hanno centro una superficie sferica o un piano infinito che si dilatano. Si tenga inoltre presente che non sono le galassie che si stanno allontanando con una loro velocità, ma è lo spazio stesso che si sta espandendo. Non tutto però si espande! Ad esempio non si allontanano l'una dall'altra le galassie che fanno ad esempio parte dello stesso gruppo, e sono tenute insieme dalla loro forza di gravità, né si dilatano la Terra, o i nostri corpi.

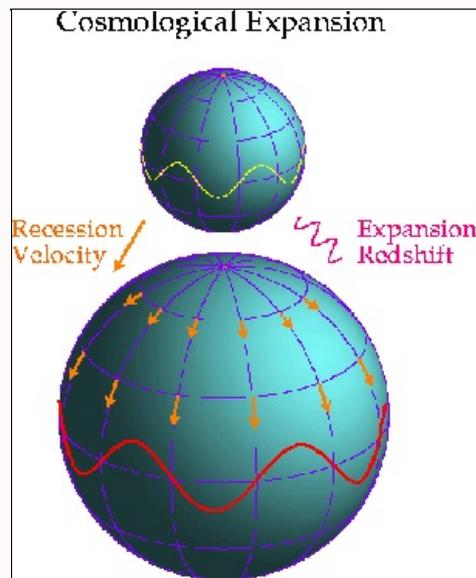


Figura 2. Rappresentazione bidimensionale dell'espansione di un universo chiuso, e del fenomeno dello spostamento verso il rosso (redshift).

L'espansione è dunque descritta in modo naturale dai modelli relativistici che, come abbiamo visto, prevedono un universo non statico, anche se non avremmo potuto stabilire *a priori*, senza le osservazioni, se l'universo fosse attualmente in una fase di espansione o di contrazione. La relatività generale non ci dice poi neanche *perché* l'universo si sta espandendo.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

L'Universo caldo del Big Bang

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

L'espansione implica che la densità dell'universo sta diminuendo. Viceversa, nel passato l'universo doveva essere più denso e più caldo. In linea di principio, andando abbastanza indietro nel tempo possiamo raggiungere l'istante nel quale le dimensioni dell'universo si annullano, densità e temperatura divengono infinite, e si ha una singolarità. Se l'espansione fosse avvenuta a velocità costante, l'inverso della costante di Hubble misurata attualmente, $1/H_0$, darebbe direttamente il tempo trascorso a partire da quell'istante iniziale.

Georges Lemaître per primo suggerì, nel 1931, che l'intero universo potesse essere nato a partire da un atomo primordiale. La fisica dell'epoca non era matura per affrontare il problema, e l'idea di Lemaître fu ripresa soltanto dopo la seconda guerra mondiale. Nel 1948 il fisico Gamow e i suoi collaboratori studiarono le reazioni nucleari che avrebbero potuto verificarsi quando l'universo era caldo e denso.

Che l'universo non fosse eterno appariva però ancora inaccettabile a diversi fisici ed astronomi; nel 1949, nel corso di un popolare programma radiofonico della BBC, l'ipotesi di un'origine dell'universo fu battezzata sprezzantemente "idea del *Big Bang*" dall'astrofisico inglese Fred Hoyle, il quale propose in alternativa, contemporaneamente ai colleghi Bondi e Gold, un universo in espansione ma immutabile, senza un'origine nel passato, e con densità costante nel tempo: per compensare la diminuzione di densità dovuta all'espansione, Hoyle ipotizzò la creazione continua di nuova materia. In questo caso, dunque, stelle e galassie nascono, invecchiano e muoiono, ma vengono regolarmente sostituite da altre. L'universo ha pertanto le stesse proprietà non solo nello spazio, come nel caso del *Big Bang*, ma anche nel tempo: questa è l'essenza del cosiddetto *principio cosmologico perfetto*. Le due teorie si sono fronteggiate per diversi anni, ma le osservazioni hanno alla fine confermato la validità del *Big Bang*.

È forse bene chiarire prima che cosa si intende oggi per teoria del *Big Bang*. Essa non pretende di descrivere l'istante iniziale, ma è in grado di spiegare in che modo dalla fase ad alta densità e temperatura in cui si trovava l'universo nei primi secondi di vita si è arrivati all'universo che noi osserviamo. In effetti sappiamo che la relatività generale non è più idonea a descrivere l'universo negli istanti iniziali, quando la scala dell'universo era confrontabile con la cosiddetta lunghezza di Planck, 10^{-33} cm, ovvero quando l'universo aveva un'età di

10^{-43} secondi, dobbiamo prendere in considerazione gli effetti quantistici; purtroppo non disponiamo ancora di una teoria che unifici meccanica quantistica e relatività generale, e non è ancora possibile sapere se la nuova teoria eliminerà o no la singolarità iniziale. La miglior candidata a questo ruolo appare essere la teoria delle supercorde, ma è difficile al momento attuale prevederne gli sviluppi.

Una prima conferma del *Big Bang* viene dal confronto fra l'età delle stelle più vecchie e l'età dell'universo, stimata a partire dall'inverso della costante di Hubble (occorre in realtà scegliere anche un modello cosmologico). Si ottengono infatti età comprese fra i 12 e i 15 miliardi di anni: il che rappresenta un ottimo accordo, considerando gli errori sulle osservazioni e le incertezze sui vari parametri.

Il successo più importante della teoria del *Big Bang* rimane comunque la spiegazione delle abbondanze degli elementi. Attorno al primo secondo di vita, l'universo era composto da protoni, neutroni, elettroni, fotoni, e neutrini. Per qualche minuto, finché temperatura e densità furono abbastanza elevate, una serie di reazioni nucleari portò alla formazione di nuclei di elio (due protoni e due neutroni legati dalle forze nucleari) e, in misura minore, di altri elementi leggeri. Le abbondanze previste dalla teoria del *Big Bang* sono in buon accordo con le osservazioni, che mostrano come l'elemento più diffuso nell'universo sia l'idrogeno (75%), seguito dall'elio, mentre gli elementi più pesanti rappresentano soltanto una frazione trascurabile della densità totale. Con il procedere dell'espansione, e la conseguente diminuzione di densità e temperatura, la nucleosintesi primordiale si è arrestata. Gli elementi più pesanti che ritroviamo in abbondanza sulla Terra e che sono essenziali per la vita, come il carbonio, l'azoto o l'ossigeno, sono stati invece prodotti dalla fusione nucleare all'interno delle stelle. Le stelle risplendono infatti per gran parte del tempo trasformando idrogeno in elio, e solo nell'ultima parte della loro vita esse sintetizzano elementi più pesanti. Le prime stelle più massicce — quelle, cioè, che consumano il loro combustibile nucleare più in fretta — hanno diffuso nello spazio interstellare gli elementi pesanti da loro sintetizzati esplodendo come supernovae. Questi elementi sono poi finiti nel gas che, per contrazione gravitazionale, ha dato origine ad altre stelle, come il nostro Sole. Vedremo meglio in seguito la problematica aperta dalla relazione fra le proprietà osservate dell'universo e la vita, ma si può già sottolineare il fatto che la nostra esistenza appare legata ad una straordinaria catena di coincidenze, che si possono far risalire in ultima analisi ai valori delle costanti fisiche fondamentali.

Dopo la nucleosintesi, vi è stato un altro evento importante che costituisce un'ulteriore conferma della validità del *Big Bang*. Alcune centinaia di migliaia di anni dopo l'istante iniziale, la temperatura si abbassò fino a poche migliaia di gradi, permettendo ad elettroni e protoni di legarsi in modo stabile, formando atomi neutri di idrogeno: è l'epoca della ricombinazione. Soltanto allora la luce cominciò a propagarsi liberamente nello spazio: l'universo divenne così "trasparente". Con l'espansione, la lunghezza d'onda di quei fotoni è via via aumentata, e la loro energia diminuita: noi oggi ci ritroviamo ancora immersi in un oceano cosmico di fotoni, la cui temperatura equivale soltanto a 2,73 gradi sopra lo zero assoluto. Si tratta della cosiddetta radiazione cosmica di fondo, osservata per la prima volta nel 1965 da Penzias e Wilson; le osservazioni successive a varie lunghezze d'onda, e in particolare quelle del satellite della NASA COBE (*COsmic Background Explorer*), hanno confermato che essa ha le caratteristiche previste dalla teoria del *Big Bang*. Non solo: con il *Very Large Telescope* europeo in Cile sono state recentemente compiute osservazioni di una lontana nube di gas ad un *redshift* superiore a 2. Poiché la velocità della luce è finita, quanto più è lontano un oggetto, tanto maggiore è il tempo che la sua luce impiega per raggiungerci. Dunque le suddette osservazioni mostrano come era la nube nel lontano passato, quando l'universo aveva un'età di pochi miliardi di anni, e permettono di stimare quale fosse allora la temperatura della radiazione di fondo, che risulta effettivamente più elevata di quella attuale, come previsto dalla teoria del *Big Bang*.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

Materia oscura ed energia del vuoto

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

La temperatura della radiazione di fondo risulta essere fortemente isotropa, ovvero il suo valore rimane quasi costante in qualunque direzione la si misuri. Ciò costituisce una conferma dell'ipotesi che la materia nell'universo sia distribuita uniformemente: altrimenti, se al momento della ricombinazione la materia fosse stata molto disomogenea, avrebbe dovuto causare delle significative fluttuazioni di temperatura nella radiazione di fondo.

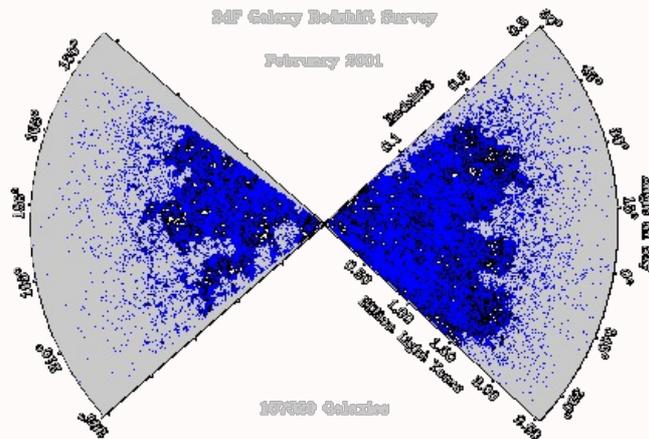


Figura 3. Questa mappa dell'universo vicino, nella quale ogni punto rappresenta una galassia, è stata ottenuta da un gruppo anglo-australiano (2dF survey) e include più di 140.000 oggetti. È evidente che la distribuzione delle galassie non è uniforme, e che esistono strutture molto estese. Uno dei problemi principali della cosmologia è quello di spiegare la formazione di queste strutture.

L'universo che osserviamo attraverso i nostri telescopi non appare però affatto omogeneo. Innanzitutto le galassie si trovano in gruppi ed ammassi; inoltre sono state osservate strutture ancora più grandi e complesse, come enormi vuoti, filamenti e "muraglie" di galassie, su scale dell'ordine di 100 milioni di anni-luce (come si può vedere in figura 3). È dunque inevitabile supporre che, all'epoca della ricombinazione, vi fossero piccole fluttuazioni di densità nel gas primordiale. In tal modo le zone in cui la densità era un po' più alta, esercitando un'attrazione gravitazionale superiore, hanno progressivamente inglobato la materia circostante sino a formare stelle e galassie, a coronamento di un processo durato alcune centinaia di milioni di anni. Le fluttuazioni di densità, a loro volta, hanno generato piccole fluttuazioni nella temperatura della radiazione di fondo, che sono state effettivamente rivelate nel 1992 da COBE (figura 4). Le variazioni sono però di appena un centomillesimo rispetto alla temperatura media, e anche 15 miliardi di anni non sarebbero apparentemente bastati per formare le galassie e le altre strutture osservate. Si tenga presente che la gravità è in competizione con l'espansione, la quale

rallenta il processo di accrescimento gravitazionale della materia.

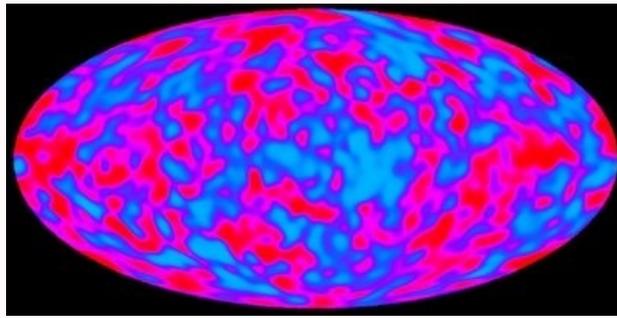


Figura 4. Mappa del cielo che mostra le variazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo, misurate per la prima volta da COBE, un satellite della NASA, nel 1992. Queste variazioni sono la traccia fossile delle fluttuazioni di densità esistenti quando l'universo aveva poche centinaia di migliaia di anni, che hanno poi portato alla formazione delle galassie

Allo scopo di risolvere questo problema, gli astrofisici hanno fatto ricorso alla materia oscura. In effetti, sappiamo che nell'universo vi è una gran quantità di materia "invisibile", di cui non riusciamo ad osservare una radiazione elettromagnetica, né come luce visibile, né come onde radio o raggi X e gamma. La materia oscura però esiste, in quanto ne vediamo gli effetti gravitazionali sul moto delle stelle e del gas nelle galassie, e delle galassie stesse negli ammassi. Si stima che nelle galassie vi sia 10 volte più massa di quella che noi possiamo osservare sotto forma luminosa, e che negli ammassi di galassie vi sia una massa almeno 100 volte superiore.

Che cos'è dunque la materia oscura? È improbabile che si tratti soltanto di stelle poco luminose o di buchi neri, ovvero di materia sotto forme a noi note, composta da particelle familiari come protoni, neutroni e elettroni, in quanto ci sono dei forti limiti alla quantità di tali particelle che possono essersi formate nell'universo primordiale. I neutrini sono un candidato possibile per la materia oscura, e potrebbero effettivamente essere dotati di massa, ma questa risulta troppo piccola per dare un contributo cosmologico dominante; inoltre le simulazioni effettuate al computer mostrano che neanche con i neutrini è possibile riprodurre le caratteristiche delle strutture osservate. Si deve dunque supporre che esistano particelle più massicce, come suggeriscono le teorie di grande unificazione della fisica. I candidati però sono tanti, e l'esistenza di almeno una di queste particelle è ancora tutta da dimostrare.

Dal punto di vista della formazione delle galassie, le fluttuazioni di densità della materia oscura potevano essere sufficientemente grandi da permettere la formazione delle strutture osservate senza alterare l'isotropia della temperatura della radiazione cosmica di fondo. La formazione delle galassie è descritta nel capitolo seguente: qui vogliamo soprattutto sottolineare come la presenza di materia oscura influisca sulla geometria dello spazio e sul destino dell'universo. Infatti, come abbiamo visto, quanto più alta è la densità di materia nell'universo, tanto più forte è l'attrazione gravitazionale che rallenta l'espansione. Anche se consideriamo il contributo della materia oscura nelle galassie e negli ammassi di galassie arriviamo soltanto a un terzo della densità necessaria per chiudere l'universo. Fino a poco tempo fa, si pensava che la densità critica potesse essere raggiunta lo stesso, qualora la materia oscura fosse distribuita in modo diverso da quella luminosa. Gli studi e le osservazioni più recenti mostrano però che la densità di materia è davvero inferiore alla densità critica, e suggeriscono un quadro ancora più sorprendente: la materia di qualunque tipo, sia essa luminosa od oscura, non è la

componente principale dell'universo! Infatti le analisi dei risultati dell'esperimento italo-americano *Boomerang* (si tratta di osservazioni effettuate da un telescopio a bordo di un pallone che ha volato ad un'altezza di 38 km sull'Antartico), mostrano in modo convincente che le fluttuazioni nella radiazione di fondo hanno le caratteristiche aspettate nel caso di un universo con densità uguale a quella critica, vale a dire con geometria piatta. Ma se, come si è visto, la densità di materia, tenendo conto sia di quella luminosa che di quella oscura, non può essere superiore ad un terzo della densità critica, che cos'è che si nasconde nello spazio e contribuisce ai rimanenti 2/3 della densità dell'universo? Un'informazione utile per rispondere a questo interrogativo ci viene dalle osservazioni di supernovae lontane, le quali indicano che l'espansione dell'universo sta accelerando, e non rallentando. Questa accelerazione è la caratteristica di una costante cosmologica positiva, la quale agisce come una forza repulsiva e contribuisce con la sua densità di energia alla densità totale dell'universo (ricordiamo che in relatività materia ed energia sono equivalenti). Da un punto di vista fisico, si ritiene che questo effetto sia riconducibile all'energia del vuoto. Nella fisica moderna, infatti, lo spazio vuoto non corrisponde affatto al "nulla" filosofico; in esso, grazie al principio di indeterminazione di Heisenberg, appaiono e scompaiono coppie di particelle-antiparticelle che sono virtuali, ma che hanno effetti tangibili: è proprio grazie a loro, infatti, che il vuoto può avere una densità di energia non nulla ed esercitare un effetto gravitazionale che si manifesta come una costante cosmologica. Il risultato sorprendente di queste ricerche, affascinante ma che non deve essere considerato come definitivamente acquisito, è che l'universo non è dominato dalla materia, neppure da una materia oscura sotto forme a noi ancora ignote, ma dall'energia dello spazio vuoto! E il destino del nostro universo sembra essere, a questo punto, quello di un'espansione senza fine.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

Oltre il Big Bang

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

Nonostante i numerosi successi, sappiamo che la teoria del *Big Bang* lascia senza risposta alcuni interrogativi fondamentali: ci costringe infatti ad imporre delle condizioni iniziali particolari per spiegare certe proprietà dell'universo. Qual è la causa delle fluttuazioni di densità che hanno dato origine alle galassie? Perché la temperatura della radiazione di fondo proveniente da regioni di cielo situate in direzioni opposte è così simile, visto che tali regioni non hanno mai potuto comunicare tra di loro? È poi una coincidenza sospetta il fatto che l'universo abbia una densità così vicina (se non uguale) alla densità critica. Occorre poi spiegare perché non siano mai stati rivelati sperimentalmente monopoli magnetici, mentre in teoria nell'universo primordiale se ne dovrebbe essere formato un numero enorme.

Tutte queste domande trovano una risposta se nelle prime fasi di vita dell'universo, e per un brevissimo periodo di tempo, l'espansione è stata enormemente più rapida di quella attuale, ovvero se è avvenuta in modo esponenziale: è l'ipotesi dell'*inflazione*. In tal caso, una regione microscopica di spazio si sarebbe gonfiata sino ad assumere la scala attuale dell'universo. Le fluttuazioni quantistiche, necessariamente presenti su scale microscopiche, avrebbero così assunto dimensioni macroscopiche, originando le fluttuazioni di densità che hanno dato origine alle galassie. Le diverse regioni dell'universo osservabile sarebbero state in contatto nel passato, e questo spiegherebbe l'alto grado di isotropia della radiazione cosmica di fondo. Inoltre, l'espansione rapidissima reso piatta la geometria dell'universo. Questo fenomeno può essere chiarito riprendendo l'analogia del pallone: la superficie di un pallone di calcio ci appare evidentemente curva, ma se immaginiamo di gonfiare il pallone fino a fargli assumere le dimensioni della Terra, la sua curvatura non è più immediatamente percepibile (non a caso l'umanità per lungo tempo ha creduto che la Terra fosse piatta). Infine, i monopoli magnetici, per quanto numerosi, sarebbero stati enormemente diluiti, mentre la materia che è oggi presente nell'universo si sarebbe formata al termine dell'espansione esponenziale. Ci si aspetta inoltre che in origine vi fosse soltanto un'unica forza fondamentale; col diminuire della temperatura, l'universo sarebbe passato attraverso delle transizioni di fase, in corrispondenza delle quali si sarebbe separata prima la forza di gravità, poi quella forte, infine l'elettromagnetismo e la forza debole.

Nella figura 5 sono sintetizzate le fasi principali dell'evoluzione dell'universo.

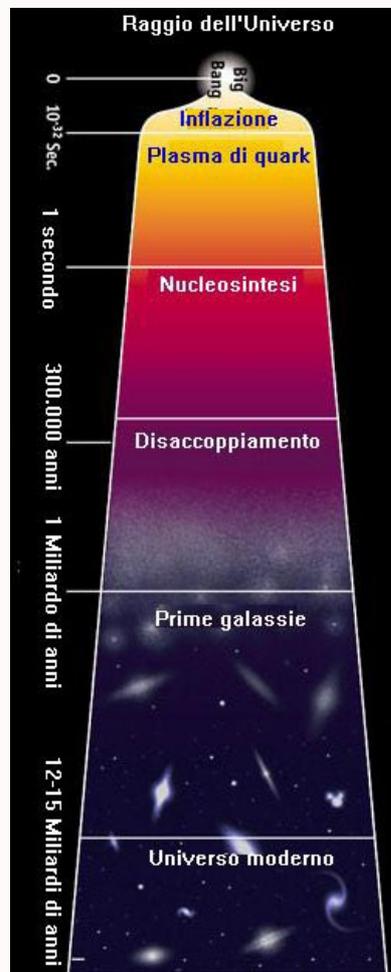


Figura 5. Principali tappe dell'evoluzione dell'universo.

Se questo quadro generale ha una sua giustificazione fisica nelle moderne teorie di Grande Unificazione, occorre sottolineare che l'inflazione non ne discende necessariamente. Non sono ancora chiari i meccanismi attraverso i quali l'inflazione comincia e, soprattutto, finisce, e così sono stati prodotti diversi scenari di inflazione, ognuno dei quali non è esente da difetti. Per di più le possibili verifiche sperimentali di tali scenari non sono immediate. Resta il fatto che l'andamento delle fluttuazioni di temperatura nella radiazione cosmica di fondo è in accordo con quanto previsto dall'inflazione, l'unica idea sinora proposta che sia in grado di dare una risposta ai problemi precedentemente elencati.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

L'universo e la vita: caso o necessità?

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

Dal punto di vista storico, la visione del rapporto tra uomo e cosmo ha subito tre importanti rivoluzioni. Nel XVI secolo, in seguito alla rivoluzione copernicana, l'umanità ha perso la sua posizione privilegiata al centro dell'universo. Nel XIX secolo, la teoria di Darwin ha mostrato che la specie umana è il risultato di un processo evolutivo *non finalizzato*; le diverse e complesse forme di vita, il cui adattamento all'ambiente era visto un tempo come il risultato della Divina Provvidenza, si sono in realtà esse stesse adattate all'ambiente circostante. Infine, la cosmologia del XX secolo ha compiuto la terza rivoluzione, con la scoperta che l'universo stesso non è immutabile, ma è in evoluzione.

La presenza della vita sulla Terra — e ancor più di una civiltà tecnologicamente avanzata — ci appare dunque un evento casuale e contingente, anche se si è probabilmente verificato altrove nell'universo. Questa considerazione ci conduce però ad una revisione del principio copernicano. La nostra esistenza richiede infatti condizioni assai speciali (ad esempio, non tutte le stelle hanno dei pianeti, e non tutte quelle con un sistema planetario hanno pianeti come la Terra). Appare dunque ragionevole affermare che i valori di tutte le quantità fisiche e cosmologiche non sono ugualmente probabili, ma sono vincolati dal fatto che devono esistere luoghi in cui la vita basata sul carbonio ha potuto evolvere, e che l'universo deve essere abbastanza vecchio da averne consentito l'evoluzione: questo è l'enunciato del cosiddetto *principio antropico debole*.

Più controversa è senz'altro la formulazione *forte* del principio antropico: essa afferma che l'universo *deve* avere quelle proprietà che consentono lo sviluppo della vita intelligente in qualche momento della sua storia. Questo principio nasce dalla constatazione che non solo le costanti fondamentali hanno valori particolari, non deducibili da alcuna teoria fisica attuale, ma anche che quei valori appaiono *critici*: se fossero diversi, seppur di poco, non si determinerebbero più le condizioni necessarie alla nascita della vita.

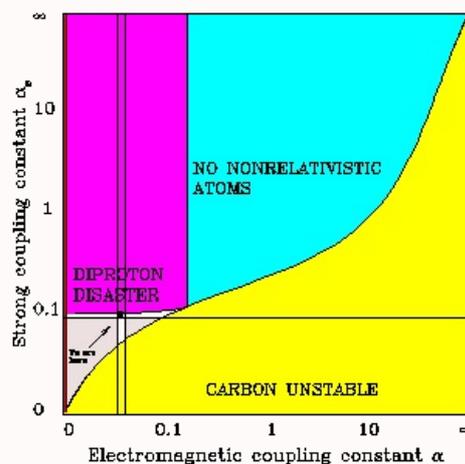


Figura 6: Questa figura mostra che variando anche di poco l'intensità della forza elettromagnetica (sulle ascisse) e della forza gravitazionale (sulle ordinate), le proprietà dell'universo cambiano drasticamente, e che solo in una ristretta zona del grafico i valori permettono l'esistenza della vita; in quella zona è indicato il punto corrispondente ai valori misurati (da M. Tegmark, Annals of Physics, 1998, vol. 270, pp. 1-51).

La figura 6 mostra ad esempio che cosa succederebbe se si variasse l'intensità dell'interazione elettromagnetica e di quella forte. Perché, dunque, di tutti i valori immaginabili, le costanti fondamentali hanno assunto proprio quelli che permettono lo sviluppo della vita e dell'intelligenza? Un'ipotesi attualmente di moda fra i cosmologi è che esista un insieme di universi dove le costanti fisiche assumono effettivamente valori diversi. Questa ipotesi si può inserire in uno scenario inflazionario, nel quale il nostro universo è soltanto una "bolla" fra tante altre. Il nostro sarebbe semplicemente uno fra gli universi possibili, magari rarissimo, ma con le caratteristiche necessarie per la nostra esistenza: naturalmente, gli universi che non hanno quelle caratteristiche non potranno mai essere osservati da nessuno.

Un tale dibattito si colloca evidentemente ai confini (spesso anche al di là) della scienza. L'obiettivo di una spiegazione ultima dell'universo, nella sua totalità, attraverso la formulazione di una Teoria del Tutto, che rappresenta ormai il Sacro Graal della fisica, è un obiettivo ancora lontano, se mai raggiungibile. La storia induce ad un atteggiamento umile e prudente. Dopotutto, fino al XVI secolo si pensava che l'universo fosse racchiuso entro la sfera delle stelle fisse e la sfera delle stelle fisse è andata in frantumi. Fino agli inizi del XX secolo si riteneva che la Via Lattea rappresentasse l'intero universo stellare e invece sono state scoperte altre galassie (e non a caso furono inizialmente chiamate universi-isola). Ora si considera la possibilità che ciò che chiamiamo universo non sia davvero l'Universo, inteso come totalità di ciò che esiste, obbligandoci a coniare neologismi quale quello di "Multiverso". Senza contare che la nostra descrizione fisica dell'universo non include la nostra coscienza, ma allora il discorso ci porterebbe troppo lontano.

Che l'universo osservabile sia in espansione e che fosse nel passato in uno stato ad alta densità e temperatura, più di 10 miliardi di anni fa, appare un dato incontrovertibile e rappresenta una grande scoperta della scienza del XX secolo. Ma davvero l'Universo ha avuto un'origine? Ha ancora un senso la nozione di tempo nell'universo primordiale? La cosmologia è destinata a compiere grandi progressi nel XXI secolo: sono entrati in funzione da pochi anni grandi telescopi a Terra con specchi fino a 10 metri di diametro e sono già in fase di studio nuovi telescopi fino a 100 metri di diametro, mentre sarà lanciato un nuovo telescopio spaziale di 8 metri. La fisica teorica ci riserva senz'altro nuove straordinarie sorprese riguardanti il mondo microscopico e l'universo primordiale. Nonostante ciò, appare improbabile che si riesca a levare definitivamente il velo che nasconde alla nostra comprensione l'origine ultima dell'Universo, ma forse, come nel caso del Sacro Graal, ciò che importa non è tanto arrivare alla meta, quanto ciò che si apprende cercando di raggiungerla.

L'Universo e l'origine della vita

Il Big Bang

Alberto Cappi

Letture

Introduzione

L'Universo in espansione

L'Universo caldo del Big Bang

Materia oscura ed energia del vuoto

Oltre il Big Bang

L'universo e la vita: caso e necessità

Letture

Letture

J.D.Barrow, *Teorie del Tutto. La ricerca della spiegazione ultima*, Adelphi, Milano, 1992;

Cappi A., 2001, "La scoperta dell'universo in espansione", in *Viaggio nell'universo*, Fabbri Editore, Milano, 2001;

S. Hawking, *Dal Big Bang ai Buchi Neri*, Rizzoli, Milano, 1988;

F. Lucchin (a cura di), "Cosmologia", in *Le Scienze quaderni*, n.117, 2000;

M. Rees, *Prima dell'inizio*, Raffaello Cortina Editore, Milano, 1998;

L. Smolin, *La vita del cosmo*, Einaudi, Torino, 1998;

S. Weinberg, *I primi tre minuti*, Mondatori, Milano, 1986.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Premessa

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Il concetto d'integrazione disciplinare è presente da tempo nel dibattito sulla didattica. Se l'applicazione di questo concetto è fecondo in generale, lo è forse in misura maggiore nell'insegnamento delle materie scientifiche. La presentazione separata delle discipline scientifiche nell'insegnamento curricolare rischia di generare, infatti, un'immagine non corretta dell'evoluzione del sapere scientifico nel suo complesso. In questo contesto, purtroppo, la situazione attuale è tale per cui l'Astronomia, per quanto rappresenti un dato culturale importante in senso generale e per quanto rappresenti una parte non trascurabile rispetto al concetto di unità del sapere scientifico (continui sono e sono stati nel passato gli apporti reciproci tra astronomia, fisica, matematica), non viene presentata in modo adeguato. Frammenti di astronomia vengono trattati, infatti, nell'insegnamento della fisica, con particolare enfasi alla gravitazione universale ed al ruolo delle particelle elementari nelle prime fasi dell'Universo. Altri aspetti dell'astronomia, (la maggior parte, a partire dalla cosiddetta geografia astronomica) vengono trattati nell'ambito dell'insegnamento delle Scienze naturali.

I nuovi cicli scolastici di prossima attivazione introducono, tuttavia, un ripensamento nello svolgimento dei programmi. La parola d'ordine è: bando al nozionismo e spazio ai nuclei fondanti dei saperi. Per quanto riguarda le discipline scientifiche, questo vuol dire sollecitare gli studenti a cogliere i fondamenti degli statuti disciplinari ed anche le connessioni tra le varie discipline scientifiche.

Abbastanza di recente, dall'astronomia, in seguito alle osservazioni della presenza di molecole organiche (*i mattoni della vita*) nelle nubi interstellari, viene un contributo importante al dibattito sulla comparsa della vita sulla Terra e in altre regioni dell'Universo. Il quadro interpretativo coinvolge, oltre che l'astronomia, discipline quali la fisica e la chimica. Alla biologia il compito, non facile, di dare un significato biologico alla congerie di dati teorici e sperimentali disponibili. Emerge da questo contesto un concetto didatticamente significativo. Quello cioè della partecipazione degli oggetti naturali ad un processo evolutivo su scala universale del quale sono protagonisti le stelle, le galassie e gli stessi esseri viventi.

Nel seguito viene esposta la problematica in termini del tutto generali, quale indicazione di un possibile percorso didattico, lasciando l'approfondimento delle varie parti di essa agli specialisti

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

La teoria di Darwin, che è oggi accettata senza dissensi significativi, è la pietra angolare della biologia moderna. I nostri legami anche con le forme più semplici della vita microbica si possono considerare ben dimostrati. Da un punto di vista biochimico, la differenza fra l'uomo e il microbio è relativamente banale. Al livello chimico più rudimentale la vita, in tutta la sua varietà di forme e di espressioni, implica semplicemente l'interazione tra due gruppi di sostanze biochimiche: gli acidi nucleici e le proteine. La miriade di possibili disposizioni e redistribuzione di queste sottostrutture fondamentali compongono la vasta varietà delle forme di vita presenti sul nostro pianeta.

Un primo interrogativo riguarda l'origine di questi fondamentali blocchi da costruzione biochimici della vita. Il materiale rozzo che costituisce i mattoni della vita consiste degli elementi chimici della tavola periodica degli elementi. Studi della crosta terrestre, degli oceani e dell'atmosfera ci danno informazioni sull'abbondanza di questi elementi sulla Terra. Meteoriti e campioni lunari forniscono una valida conoscenza della composizione del nostro Sistema solare. L'analisi spettroscopica delle atmosfere stellari rivela la natura degli elementi chimici che le compongono. Da questo quadro osservativo emerge una sostanziale uniformità per quanto riguarda la composizione chimica. Le abbondanze relative degli elementi sono chiamate "*abbondanze cosmiche*". La Tabella 1 mostra il numero relativo di atomi di ciascuna specie atomica rispetto all'idrogeno fino al ferro.

elemento	n. atomi / H	energia ioniz. (eV)
H	1	13,6
He	1.2×10^{-1}	24,6
C	3.7×10^{-4}	11,3
N	1.2×10^{-4}	14,6
O	6.8×10^{-4}	13,62
Ne	6.3×10^{-4}	21,6
Mg	3.4×10^{-5}	7,7
Si	3.2×10^{-5}	8,2
S	2.8×10^{-5}	10,4

Fe	2.6×10^{-5}	7.9
Na	1.3×10^{-6}	5.2
Ca	1.6×10^{-6}	6.1

Tabella 1. Le abbondanze cosmiche

Dopo l'elio, che non gioca nessun ruolo nella chimica interstellare, il gruppo degli elementi comprendente l'ossigeno, il carbonio e l'azoto costituisce 1/1000 in numero di atomi relativamente all'idrogeno. Il successivo gruppo più abbondante, quello costituito dal magnesio, silicio e ferro, ha un'abbondanza relativa più bassa di un fattore 10. Lo zolfo è anche relativamente abbondante. Pertanto, nello spazio gli elementi che sono richiesti per le molecole organiche sono i più abbondanti.

È noto che i processi di nucleosintesi che hanno dato luogo alla formazione di elementi via via più pesanti avvengono nelle stelle durante le fasi evolutive, fatta eccezione per l'idrogeno ed una frazione di elio formati nelle prime fasi dell'Universo. Le teorie di Gamow ed Hoyle hanno permesso di delineare, nel quadro dell'evoluzione stellare, lo schema generale di formazione dei vari elementi attraverso una serie di processi "a gradino" (Fig. 1). Fusione dell'idrogeno, dell'elio e di elementi più pesanti (fino al ferro) in fasi successive; catture di neutroni nel materiale espulso da stelle di grande massa quando esplosero come supernovae sono i processi invocati per spiegare la nucleosintesi di tutti gli elementi noti. L'organizzazione della materia, a livello di complessità atomica, è quindi un processo che è avvenuto ed avviene tuttora su scala cosmica.

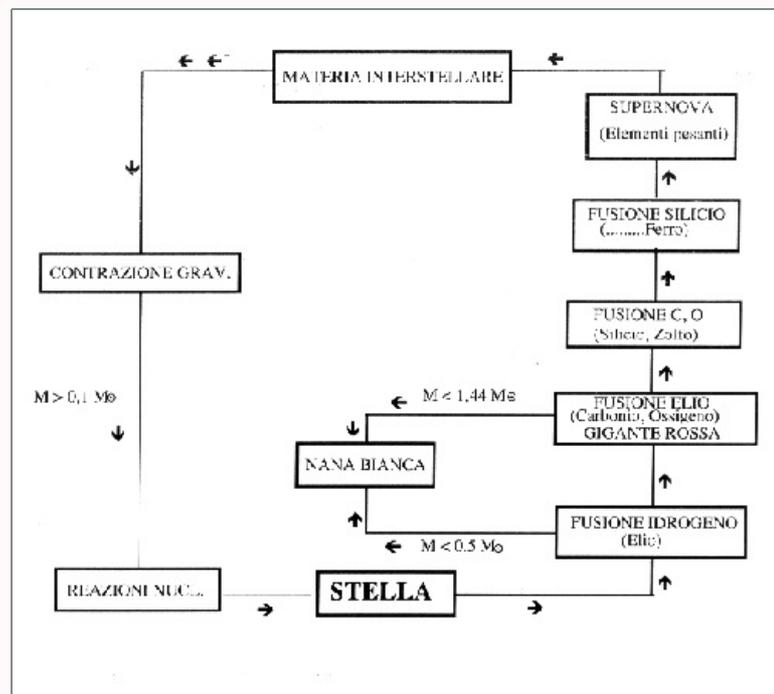


Figura 1. Ciclo di formazione ed evoluzione stellare. A partire dalla contrazione di una nube interstellare, si forma una stella allorché si innescano le reazioni di fusione dell'idrogeno, con produzione di elio. Successivamente, le fasi evolutive fanno sì che negli interni stellari si formino elementi via via più pesanti sino al ferro, a seconda della massa iniziale della stella. Quando questa è inferiore a 1,44 masse solari l'evoluzione si conclude con la fase di nana bianca. La fase di supernova interviene per le stelle più massicce, con espulsione degli strati superficiali della stella, dando vita a nuova materia interstellare, più ricca di elementi pesanti di quella iniziale, "pronta" per una successiva generazione stellare. [Clicca sulla figura per](#)

Fino a qualche decennio fa si supponeva che la fase di organizzazione successiva, ossia un'organizzazione a livello molecolare che comportava associazioni di singoli atomi per formare i complessi blocchi da costruzione della vita (molecole ricche di carbonio, come gli *amminoacidi*, impiegati dalle cellule per sintetizzare le proteine) fosse stata una questione riguardante esclusivamente l'ambiente terrestre. Nel 1953 Miller attuò un esperimento mediante il quale venne dimostrato che si potevano formare amminoacidi da una miscela di gas, che ricalcava la composizione dell'atmosfera primordiale della Terra, assoggettata a stimoli energetici. Si ritenne, allora, che energia prodotta dall'azione di scariche elettriche prodotte da fulmini o dalla radiazione ultravioletta (UV) irraggiata da Sole avesse potuto costruire amminoacidi in un "brodo primordiale". In seguito processi evolutivi chimico-biologici avrebbero dato origine alla vita.

Sebbene l'esperimento di Miller fosse interessante, esso non fu esente da critiche. La prima è quella che gli amminoacidi prodotti sono solo cinque (*alanina, valina, leucina, glicina, acido aspartico*) sui venti che costituiscono il patrimonio degli organismi viventi; la seconda è che gli amminoacidi prodotti sono di entrambe le forme, destrorsa e sinistrorsa, mentre invece gli organismi viventi possiedono solo amminoacidi della forma sinistrorsa.

Nuove scoperte, che hanno una relazione profonda col problema dell'origine della vita, sono divenute disponibili solo di recente, da una cooperazione tra varie discipline: astronomia, fisica, chimica e ovviamente biochimica. Il punto di partenza è stata la scoperta, grazie principalmente alla radioastronomia, di numerose molecole organiche nelle nubi interstellari, cioè catene molecolari di H, C, N, O.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Le nubi interstellari

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

L'osservazione ottica col telescopio mette in evidenza il fatto che non tutta la materia dell'Universo è condensata in stelle o pianeti. Si osservano nei bracci a spirale delle galassie (Fig. 2), compresa la nostra Galassia, grandi nubi di *materia interstellare*, nelle quali l'analisi spettroscopica mette in evidenza l'esistenza di polveri i cui grani sono delle dimensioni di qualche micron e gas con densità bassissime, dell'ordine di un atomo per centimetro cubo. Per confronto si pensi al fatto che l'aria, al livello del mare, ne contiene in un centimetro cubo circa 50 miliardi di miliardi.



Figura 2. La galassia a spirale NGC 2997, simile alla nostra Galassia.

Alcune di queste nubi sono oscure e possono vedersi per il fatto che intercettano, su vaste aree di cielo, la luce delle stelle retrostanti. Si parla in questi casi di *nebulose oscure*. Esempi di nebulose oscure si trovano un po' dovunque lungo la Via Lattea, nella Croce del Sud (Fig.3), in Ofiuco, nel Sagittario, in Orione (Fig.4), nel Cigno. La stessa Via Lattea si spezza in due tronconi a sud dell'Aquila, per l'interposizione di dense nubi oscure, particolarmente spesse nel Sagittario (Fig.5).

Stelle 90%
Nubi 10%

di cui il 99% di gas e l'1% di polveri

Tabella 2. Dati sulla materia relativi ad una galassia, rispetto alla massa totale



Figura 3. Gruppi di nubi oscure sono visibili nella nebulosa ad emissione IC 2948 in prossimità della Croce del Sud. Si tratta dei cosiddetti "Sacchi di carbone", possibili sedi di formazione stellare. Il più grande di essi contiene abbastanza materia per dar vita a svariate stelle con massa pari a quella solare.



Figura 4. Questa curiosa nube oscura nella costellazione di Orione, detta Testa di cavallo a motivo della sua forma, è una delle più note immagini astronomiche. La forma a testa di cavallo è un'estensione di una grande nube di polveri, nella parte bassa dell'immagine.



Figura 5. Immagine grandangolare della Via Lattea, centrata verso il centro della nostra Galassia, totalmente oscurato da polveri, come appare dall'emisfero sud. Sono visibili anche alcune nebulose ad emissione.

Non sempre però questi agglomerati di polveri e gas sono oscuri. Avviene spesso che all'interno o nelle loro vicinanze

vengano a trovarsi delle stelle. Le particelle solide, i granuli contenuti in queste nubi ne diffondono la luce. La nebulosa presenta allora un colore azzurrasto, più intenso in vicinanza delle stelle di cui essa riflette la luce. Tali nubi vengono dette *nebulose a riflessione*. Oppure i gas della nube, eccitati dall'energia della radiazione elettromagnetica emessa dalle stelle, irradiano luce propria. Si parla allora di *nebulose a emissione* o *nebulose lucide* (Fig.6).



Figura 6. La Nebulosa di Orione è famosa per molte ragioni. È la nebulosa lucida più vicina a noi (1500 a.l.), nonché in uno stadio molto attivo di formazione stellare. I gas della nebulosa emettono in quanto eccitati da piccoli ammassi di stelle nella parte più brillante della nebulosa stessa.



Figura 7. La Crab nebula, una delle più intense radiosorgenti, è costituita da gas in espansione dopo l'evento supernova osservato dagli astronomi cinesi nel 1054. Al centro della nebulosa vi è una pulsar, associata ad una stella di neutroni in rapida rotazione, nocciolo residuo della supernova.

Materia non condensata in stelle sono anche i *residui di supernova*, gas stellari espulsi nella fase di esplosione di una supernova (Fig.7) e le *nebulose planetarie*, stelle circondate da un alone di gas dovuto alla perdita di massa cui vanno incontro successivamente alla fase di gigante rossa (Fig.8).



Figura 8. La nebulosa planetaria Helix è una delle più

vicine nebulose planetarie, distante da noi solo 400 a.l.. Il suo diametro è di circa mezzo grado, lo stesso del Sole, avendo un diametro lineare di circa 150 unità astronomiche (150 volte la distanza Terra — Sole).

	nubi diffuse	nubi oscure
COMPOSIZIONE	atomi	molecole
H ₂ /H	0.05 - 10 ²	10 ² - 10 ⁵
DENSITÀ (particelle/cm ³)	10 - 10 ³	10 ³ - 10 ⁷
TEMPERATURA (°K)	50 - 300	7 - 50
CAMPO UV	importante	assente o quasi
IONE PRINCIPALE.	C ⁺	S ⁺ , Mg ⁺ , ioni metallici
POLVERE	scarsa	1% in massa
PROFONDITÀ OTTICA	trasparente	opaca

Tabella 3. Caratteristiche delle nubi interstellari

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Le osservazioni

Premessa

Lo studio quantitativo del mezzo interstellare iniziò dopo che la spettrografia rese possibile l'analisi dettagliata della luce proveniente dalle stelle.

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Nel 1904 Franz Hartmann suggerì che la riga in assorbimento del calcio ionizzato, visibile nello spettro di alcune stelle brillanti, avesse la sua origine nello spazio interstellare. In seguito si trovò che anche il sodio neutro era un costituente del mezzo interstellare.

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Nel 1937 si scoprì che l'idrogeno è l'elemento più abbondante dell'Universo e che perciò doveva costituire la maggior parte del mezzo interstellare. Si riteneva che l'idrogeno fosse presente più come atomo singolo che come molecola biatomica H_2 . Sempre nel 1937 fu scoperta la prima molecola interstellare, il radicale chimico di carbonio e idrogeno (CH).

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Il radicale ionizzato CH^+ ed il radicale cianogeno CN furono identificati nel corso dei quattro anni seguenti negli spettri di alcune stelle brillanti di tipo O e di tipo B: spesso si trattava delle stesse stelle davanti alle quali si erano osservate le nubi con righe dovute al calcio ed al sodio.

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Fu nel 1951 che la situazione, per quanto riguarda le osservazioni di molecole interstellari, ebbe un impulso con l'avvento della radioastronomia. Uno dei maggiori trionfi di questa tecnica fu infatti la scoperta della riga alla lunghezza d'onda di 21cm (1420 Mhz) dovuta a transizione iperfina dello spin dell'idrogeno atomico. Si comprese in fretta che le osservazioni nel campo radio potevano penetrare completamente attraverso la Galassia, perché le radioonde non sono assorbite in maniera apprezzabile dalle polveri interstellari. Negli anni immediatamente seguenti, la riga dell'idrogeno a 21cm venne usata per studiare il comportamento del gas diffuso nella Galassia e fu possibile tracciarne l'intera struttura a spirale, sfruttando l'effetto Doppler dovuto alla velocità di rotazione delle varie parti. Prima la si era appena intuita attraverso i conteggi stellari ad opera di Herschel.

Da quel momento fu un susseguirsi di scoperte, rese possibili dallo sviluppo strumentale. Nel 1963 fu la volta della scoperta dell'ossidrile OH in emissione in regioni H II. Nel 1968 avvenne la scoperta della prima molecola composta da più di due atomi, avvenuta ad opera di Townes ed altri. Si trattava della molecola dell'ammoniaca NH_3 , presente in numerose nubi interstellari in direzione del Centro galattico.

Questa scoperta alterò profondamente il concetto di chimica interstellare, per cui il 1968 può dirsi l'anno di nascita dell'astrochimica, nuova branca dell'Astronomia. Fino a quel

momento infatti si riteneva che la bassa densità del mezzo interstellare rendesse difficile, se non impossibile, la combinazione di più di due atomi. Si prevedeva di trovare nello spazio interstellare al più molecole biatomiche e che anche queste avessero una vita breve a causa degli effetti distruttivi della radiazione UV e dei raggi cosmici.

A partire da quell'anno fu un susseguirsi di scoperte di molecole sempre più complesse, fino a tredici atomi. Nel 1970 fu la volta della scoperta in nubi interstellari della molecola di H₂ e così via, fino ai giorni nostri. In Appendice viene presentato un elenco incompleto di molecole organiche osservate, con l'indicazione dell'anno della scoperta e della banda elettromagnetica nella quale sono eseguite le osservazioni. Sul sito Internet <http://www.cv.nrao.edu/~awootten/allmols.html> è disponibile, invece, un elenco aggiornato: al 24/1/2001 ne sono riportate 121.

Nel corso di questi anni la Galassia è stata intensamente osservata alle lunghezze d'onda caratteristiche dell'OH, della formaldeide H₂CO e dell'ossido di carbonio CO. Le osservazioni hanno mostrato che queste molecole, così come l'idrogeno atomico, sono fortemente concentrate in direzione del piano centrale della Galassia, in uno strato che in prossimità del Sole ha uno spessore di 1000 anni luce. Le molecole sembrano essere distribuite uniformemente nel disco e raggiungono concentrazioni maggiori nelle vicinanze del Centro galattico. La formaldeide e l'ossido di carbonio sono distribuiti allo stesso modo, mentre la maggior parte delle altre molecole interstellari si osserva solo in pochissime regioni, o perché probabilmente assenti o perché si trovano in uno stato non eccitato, per cui non emettono né assorbono segnali misurabili.

Un grande "serbatoio" di molecole è anche costituito dalla Nebulosa di Orione. Una grande nuvola di CO esce dalla nebulosa ed entra nella nube di H circostante. Simile è la distribuzione dell'OH. Nubi di dimensioni minori di acido cianidrico HCN si trovano nella parte centrale della nebulosa. Nelle immediate vicinanze degli oggetti infrarossi si osservano forti concentrazioni di formaldeide H₂CO, alcol metilico CH₃OH, solfuro di carbonio CS, cianogeno CN, ammoniaca NH₃ e cianoacetilene HC₃N.

Altra regione ricca di molecole è la nube nota come *Sagittario B2*. Tale regione è caratterizzata dall'enorme densità (fino a 10⁸ particelle/cm³) e dalle sue dimensioni di circa 20 anni luce. Una significativa frazione del materiale interstellare è comunque contenuto in nubi giganti del tipo di *Sagittario B2*. La densità in tali nubi è mediamente di 10² - 10³ H/cm³ mentre la temperatura è bassa (dell'ordine di 10 °K). La caratteristica più importante di tali nubi è tuttavia costituita dalle dimensioni, fino a 100 parsec, e dalla loro massa fino a 2 x 10⁵ masse solari.

È noto quali siano i processi che fanno sì che un gas atomico emetta o assorba energia, producendo righe osservabili nello spettro visibile: si tratta in buona sostanza di transizioni tra diversi livelli energetici discreti, conseguenti ad eccitazioni o a ricaduta spontanea a livelli più bassi dopo l'eccitazione. Nella banda radio dello spettro elettromagnetico, la riga dell'idrogeno a 21cm di lunghezza d'onda è dovuta ad una transizione tra i due livelli energetici caratterizzati dalla diversa orientazione dello spin elettronico (da parallelo ad anti-parallelo). La piccola differenza fra i due livelli energetici (*transizione iperfina*) fa sì che i processi di emissione o di assorbimento diano luogo ad onde elettromagnetiche a frequenza minore di quelle caratteristiche del visibile e quindi osservabile nel dominio radio dello spettro elettromagnetico, mediante l'utilizzo di radiospettrografi.

Le particolari righe spettrali che indicano la presenza di molecole nelle nubi interstellari, si formano quando esse, o gli elettroni che le formano, modificano il loro stato energetico.

Ogni molecola tende a ruotare intorno al proprio asse di simmetria. Cambiamenti nella rotazione la fanno irraggiare o assorbire energia elettromagnetica a lunghezze d'onda che si trovano normalmente nella banda delle microonde: radio o infrarosso (lunghezze d'onda comprese fra 1mm e 6cm).

Anche il moto vibrazionale può cambiare, provocando l'irraggiamento o l'assorbimento, da parte della molecola, di radiazione infrarossa. Il solfuro di carbonio, CS, è l'esempio del più semplice tipo di molecola: una molecola lineare biatomica. Nei livelli più bassi di energia elettronica e vibrazionale (gli unici stati popolati nello spazio interstellare), i moti possibili della molecola sono il semplice movimento in una direzione ed una rotazione continua. I livelli energetici sono definiti dai numeri quantici J, che sono una misura del momento di rotazione della molecola. Una volta eccitata e poi lasciata a se stessa la molecola emette spontaneamente un fotone e cade nel livello fondamentale in un tempo medio di quattro ore. Il tempo che la molecola passa nei livelli energetici più alti è minore. Nelle nubi interstellari si osserva il CS nei livelli eccitati: quindi ci deve essere qualche meccanismo che mantiene le molecole di CS in questi livelli e che si oppone alla tendenza di decadere spontaneamente: campi di radiazione o collisioni?

Altro esempio è costituito dalla molecola di ammoniaca NH₃ a forma di tetraedro con un atomo di azoto nel vertice, al di sopra del piano formato da tre atomi di idrogeno. L'atomo di idrogeno può oscillare da una parte all'altra del piano. Come risultato ciascun livello di energia rotazionale J è diviso in due livelli ravvicinati (una situazione simile a quella cui si è accennato nel caso della transizione iperfina da parte dell'H a 21cm). Le transizioni tra i due livelli sono transizioni di inversione e si hanno alla lunghezza d'onda di 1,3cm, osservabili quindi in radio, sempre mediante l'utilizzo di radiospettrografi.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Le ipotesi generali

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Una prima ipotesi per spiegare l'esistenza di molecole organiche, catene di idrogeno, carbonio, ossigeno ed azoto, nella materia interstellare è quella che le fa derivare dalla degradazione di grani di polveri nello spazio interstellare. Tuttavia questa ipotesi non regge ad un esame più approfondito per almeno due motivi:

Le nubi interstellari

- può spiegare meno dell'1% rispetto a quanto richiesto dai dati osservati;
- nello spazio interstellare interviene una rapida dissociazione delle molecole per effetto della radiazione UV.

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Una seconda ipotesi è quella relativa all'espulsione delle molecole organiche da parte di stelle "fredde" (1000-2000 °K). Gli spettri delle atmosfere di stelle "fredde" mostrano, infatti, bande molecolari. In particolari fasi evolutive, caratterizzate da perdita di massa da parte di una stella, la materia di cui è composta l'atmosfera stellare viene effettivamente dispersa nello spazio. Anche in questo caso, tuttavia, il campo di radiazione UV nello spazio interstellare provvederebbe ad una loro rapida dissociazione. In altre parole, la vita media di una molecola nello spazio interstellare non permette la sua definitiva collocazione in nubi generalmente molto distanti dalla stella stessa.

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Si può allora concludere che, a parte qualche eccezione locale, le molecole interstellari si sono formate *in situ* nelle nubi interstellari attraverso reazioni dirette in fase gassosa o per intervento delle polveri di cui le nubi, specie quelle molecolari, sono ricche. Gli atomi e gli ioni più abbondanti sono convertiti in molecole per mezzo di reazioni chimiche e che tali molecole, a loro volta, prendano parte a successive reazioni che conducono a molecole sempre più complesse.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Il problema chimico

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Un problema chimico è connesso al fatto che le basse temperature caratteristiche della materia interstellare non consentono di superare le barriere di attivazione per il verificarsi di qualunque reazione chimica ordinaria. Più in dettaglio, le particelle reagenti devono possedere una certa energia per "collegarsi" tra loro e formare una molecola. Per un gas che si trovi in condizioni di equilibrio, l'energia media delle particelle dipende dalla temperatura. Si può quindi dire se, statisticamente, in un gas sono possibili, o meno, certe reazioni chimiche. Alle temperature caratteristiche delle nubi interstellari, qualche decina di gradi Kelvin, l'energia cinetica delle particelle è estremamente ridotta, per cui tutti i processi chimici noti (*reazioni termiche*) procedono a velocità talmente basse da non poter in alcun modo spiegare le abbondanze molecolari suggerite dalle osservazioni.

Occorre prendere, allora, in considerazione reazioni tra specie ionizzate (*reazioni non termiche*). In questo caso la carica dello ione induce cariche elettriche di segno contrario negli atomi circostanti, con conseguente interazione elettrica di attrazione tra le due particelle. Questo meccanismo di attrazione agisce a distanze molto maggiori di quelle alle quali si fanno sentire le forze di attrazione tra particelle neutre. Le reazioni chimiche tra specie ionizzate presentano molti vantaggi, rispetto a quelle tra specie neutre:

- frequenze delle collisioni tra ioni e specie neutre da 100 a 1000 volte maggiori di quelle tra specie neutre;
- le forze attrattive, che si sviluppano quando uno ione ed una particella neutra si attraggono sino alla distanza di qualche raggio atomico, producono un'energia sufficiente a vincere la maggior parte delle soglie di attivazione. In altre parole, le reazioni tra ione ed una particella neutra hanno bassissime soglie di attivazione;
- alta efficienza delle reazioni ione-particella neutra, per cui le reazioni esotermiche tra uno ione ed una specie neutra avvengono con un'efficienza quasi unitaria;
- le velocità delle reazioni tra specie ionizzate sono largamente indipendenti dalla temperatura e sono più elevate di quelle tra specie neutre.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Il problema astrofisico

Premessa

Il problema astrofisico è ora quello di verificare se esistono e con quali modalità le condizioni per avere a disposizione ioni, in numero sufficiente, per i processi di formazione molecolare nelle nubi. Esistono situazioni diverse nelle nubi diffuse ed in quelle oscure.

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Negli spazi interstellari gli atomi vengono ionizzati dai raggi cosmici, dai raggi X e dalla radiazione UV proveniente dalle stelle del fondo galattico. I fotoni con energia maggiore di 13,6 eV vengono utilizzati nella ionizzazione dell'idrogeno, l'elemento più abbondante, che si trova nelle immediate vicinanze delle stelle. Lo ione H^+ è di fondamentale importanza, poiché costituisce uno dei punti di partenza della chimica in fase gassosa, tramite un tipo di reazione che va sotto il nome di *reazioni di trasferimento di carica*:



Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Pertanto, quando la radiazione UV raggiunge una nube, essa contiene solo fotoni con energia inferiore a 13,6 eV. Il flusso galattico UV, allorché investe una nube, non è in grado, quindi, di procedere alla ionizzazione di elementi presenti nella nube stessa, le cui energie di ionizzazione siano inferiori a 13,6 eV, quali H, He, O, N, Ne (v. Tabella 1). Questi atomi vengono ionizzati dai raggi cosmici o dai raggi X. Quelli invece con energie di ionizzazione superiori a 13,6 eV, tra cui C, S, Si, possono venire ionizzati anche dai fotoni UV, nei confronti dei quali le nubi diffuse sono trasparenti (v. Tabella 2).

Tuttavia, il flusso dei fotoni UV è maggiore di quello dei raggi cosmici e dei raggi X di un fattore $10^6 - 10^7$. Quindi lo ione più abbondante nelle nubi diffuse è C^+ , nonostante la modesta abbondanza del carbonio (rispetto all'idrogeno), comunque superiore a quella di S e Si. Questo spiega il fatto che tra le diverse chimiche organiche possibili, nella materia interstellare è privilegiata quella che si basa sulla chimica del carbonio: è lo ione più abbondante dopo l'idrogeno e l'elio (che tuttavia è inerte), seguito da azoto ed ossigeno (v. Tabella 3). In alcuni racconti di fantascienza si fa riferimento a esseri viventi costruiti sulla chimica del silicio, anziché su quella del carbonio come è invece sulla Terra. In linea di principio, non vi sarebbero controindicazioni, stante la capacità del silicio di sostituire il carbonio nelle catene molecolari. Rimane tuttavia il fatto che il silicio è meno abbondante di un fattore 10 del carbonio, in quanto può essere formato nelle stelle in fasi evolutive successive a quella che produce carbonio (*giganti rosse*) e quindi in stelle più massicce e conseguentemente più rare. In conclusione la chimica del carbonio è la più probabile.

Non esplicitiamo qui le reazioni in fase gassosa (non è

competenza dell'astronomo) tra specie ionizzate che possono rendere ragione delle molecole osservate e nelle abbondanze osservate. Questo è compito della chimica, o meglio dell'astrochimica. Come è compito della chimica, ed in particolare della *cinetica chimica*, studiare le velocità delle reazioni e le concentrazioni molecolari prodotte. In uno schema di reazione $A + B \rightarrow M$, la velocità con cui cambia la concentrazione di $n(M)$ di M nel tempo è proporzionale alle concentrazioni $n(A)$ ed $n(B)$ delle specie A e B secondo una costante di proporzionalità detta "coefficiente di velocità" e dipende anche da una "velocità di distruzione", coefficiente che fornisce il numero di molecole prodotte che vengono tuttavia distrutte per effetto del campo di radiazione UV, X e raggi cosmici. L'equilibrio viene raggiunto quando, in dipendenza dei due coefficienti, tante molecole si formano quante se ne distruggono nell'unità di tempo. Nella chimica interstellare è di interesse la valutazione del "coefficiente di velocità" in via teorica o sperimentale, relativamente alle diverse reazioni tra le specie presenti nelle nubi in forma elementare ed ai diversi tipi di reazione, così come i meccanismi di distruzione dei prodotti ed il valore della "velocità di distruzione" al fine di ottenere valori di $n(M)$ corrispondenti alle osservazioni.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Nel caso delle nubi oscure, la densità della nube è tale che essa si autoschermi progressivamente nei confronti del flusso UV. Nelle parti più interne il flusso UV è del tutto trascurabile e i processi di ionizzazione, necessari per la chimica tra specie ionizzate, sono affidati unicamente ai raggi cosmici. Pertanto la frazione di ioni presenti è minore di quella che si riscontra nelle nubi diffuse di un fattore che varia da 100 a 1000.

Questo fatto potrebbe far pensare che all'interno di queste nubi le reazioni chimiche tra specie ionizzate risultino rallentate. Tuttavia, a causa della alta densità della nube, il libero cammino medio delle particelle risulta assai ridotto, mentre è sensibilmente più lunga la loro vita media, per l'assenza (o quasi) del flusso di radiazione che comporta dissociazione. Ne consegue la possibilità di reazioni che formano molecole anche nelle nubi oscure. Ad esempio, nel corso della condensazione cui va incontro una nube diffusa per divenire molecolare, una gran parte degli ioni C^+ viene trasformata in CO attraverso una serie di reazioni, alla luce delle quali la molecola CO risulta la più abbondante dopo quella dell'idrogeno ($CO/H = 10^{-4}$).

Nelle nubi oscure hanno grande importanza i grani di polvere dei quali tali nubi sono ricche (v. Tabella 4). Su tali grani è possibile una chimica di superficie, che spiega, ad esempio, la formazione della molecola H_2 , la quale, formata a partire da due atomi di idrogeno, è fortemente instabile e, appena formata, decade quasi immediatamente nei due atomi reagenti.

Diametro : 0.1—0.3 micron

Densità spaziale media : 1 particella per $100 m^3$

Composizione : grafite, silicati di magnesio, carburo di silicio (SiC), magnetite (Fe_2O_3), carbonato di magnesio ($MgCO_3$), carbonato di calcio ($CaCO_3$) ferro, ghiacci (NH_3, CH_4)

Tabella 4. I grani di polveri

Questo fatto ha reso per molto tempo inspiegabile la presenza abbondante di H_2 nelle nubi interstellari. Se tuttavia tale reazione avviene su una superficie, come i grani di polvere, l'energia in eccesso della molecola al momento della sua formazione può essere ceduta alla superficie prima che intervenga la dissociazione. In tal modo la molecola H_2 si

stabilizza.

A parte l' H_2 , la chimica di superficie si rivela capace di formare molecole ben più complesse.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Conclusioni

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

A conclusione si può dire che chimica in fase gassosa, chimica di superficie, fotolisi dei grani di polvere sembrano al momento vie capaci di spiegare la sintesi, nella materia interstellare, di molecole anche alquanto complesse, tra cui HCO, HNC, H₂CO, HCONH₂, HCOOH e, in alcuni casi, anche glicina, alanina, altri aminoacidi, basi di acidi nucleici, urea e persino zuccheri. Nell'Universo sono dunque disponibili i "mattoni" della vita in grande abbondanza.

Il processo di formazione del Sistema solare a partire da una nube interstellare produsse, oltre al Sole ed ai pianeti, corpi di piccole dimensioni quali le comete e gli asteroidi. Tali corpi minori non hanno conosciuto le trasformazioni cui sono andati incontro i pianeti e quindi conservano le tracce della nube originaria. È certo che osservazioni di comete quali quella di Halley, la Hale-Bopp e la Hyakutake hanno rivelato in esse una grande abbondanza di composti organici. Quando una cometa attraversa la regione relativamente calda del Sistema solare interno, il suo strato superficiale si vaporizza in gas e polvere che, in parte, vengono attratti dal campo gravitazionale terrestre. Si stima che la polvere interstellare che cade sulla Terra apporta ogni giorno circa 30 tonnellate di materiale organico. Per quanto riguarda i frammenti di asteroidi che colpiscono il nostro pianeta sotto forma di meteoriti, essi sono costituiti per lo più da rocce e composti metallici, ma alcuni contengono anche sostanze organiche come basi degli acidi nucleici, ammine e ammidi.

Della grande varietà di composti organici estratti dalle meteoriti, quelli che hanno maggiormente attirato l'attenzione sono le 70 varietà di amminoacidi, di cui otto appartenenti al gruppo dei 20 impiegati dalle cellule per sintetizzare le proteine. Ma quello che più conta, con una prevalenza di amminoacidi sinistrorsi, caratteristica questa di quelli degli organismi viventi.

Ciò sta a significare che reazioni chimiche che producono composti organici di interesse biologico sempre più complessi continuano ad avvenire nei ghiacci che costituiscono le comete e nelle regioni più fredde del Sistema solare. Esula dalla panoramica generale fin qui mostrata l'analisi di tali processi, i quali costituiscono un campo di ricerca attuale, interessante ed affascinante e che coinvolge in egual misura astronomi, chimici e biologi, in merito ai quali rimandiamo alla vasta letteratura esistente, sia specialistica che divulgativa.

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Home

Alcune molecole nelle nubi interstellari

Premessa

Il materiale "rozzo": gli elementi chimici

Le nubi interstellari

Le osservazioni

Le ipotesi generali

Il problema chimico

Il problema astrofisico

Le reazioni gassose nelle nubi oscure

Conclusioni

Appendice

Molecola	Denominazione usuale (all'occorrenza)	Data della scoperta	Lunghezza d'onda della riga (valori arrotondati)
CH		1937	visibile: banda: 430 nm etc.
CN	cianogeno	1940	visibile: banda: 387,5 nm etc.
CH ⁺		1941	visibile: banda: 423,2 nm etc.
OH	ossidrile	1963	radio: 18 cm
NH ⁺	ammoniacca	1968	radio: 1,3 cm
H ₂ O	acqua	1968	radio: 1,4 cm
H ₂ CO	formaldeide	1969	radio: 6,2 cm
CO	ossido di carbonio	1970	radio: 2,6 mm
HCN	cianuro di idrogeno	1970	radio: 3,4 mm
HC ₃ N	cianoacetilene	1970	radio: 3,3 cm
H ₂	idrogeno	1970	ultravioletto: 101,3-110,8 nm
CH ₃ OH	alcool metilico	1970	radio: 36 cm
HCO ₂ H	acido formico	1970	radio: 18 cm
HCO ⁺	ione	1970	radio: 3,4 mm
HCONH ₂		1971	radio: 6,5 cm
CS	monosolfuro di carbonio	1971	radio: 2,0 mm
SiO	monossido di silicio	1971	radio: 2,3 mm
OCS	solfuro di carbonile	1971	radio: 2,7 mm
CH ₃ CN	metilcianuro	1971	radio: 2,7 mm
HNCO	acido isocianico	1971	radio: 3,4 mm
CH ₃ C ₂ H	metilacetilene	1971	radio: 3,5 mm
CH ₃ CHO	acetaldeide	1971	radio: 28 cm
H ₂ CS	tioformaldeide	1971	radio: 9,5 cm
HNC	isocianuro di idrogeno	1971	radio: 3,3 mm
H ₂ S	idrogeno solforato	1972	radio: 1,8 mm
H ₂ CNH		1972	radio: 5,7 cm
SO	monossido di zolfo	1973	radio: 3,0 mm
N ₂ H ⁺		1974	radio: 3,2 mm
C ₂ H	etimile	1974	radio: 3,4 mm
CH ₃ NH ₂	metilammina	1974	radio: 3,5;4,1 mm
(CH ₃) ₂ O	etere dimetile	1974	radio: 9,6 mm
CH ₃ CH ₂ OH	alcool etilico	1974	radio: 2,9;3,5 mm
SO ₂		1975	radio: 3,6 mm
SiS	solfuro di silicio	1975	radio: 2,8;3,3 mm
H ₂ CCHCN	acrilonitrina	1975	radio: 22 cm
HCOOCH ₃	formiato di metile	1975	radio: 18 cm
NS	solfito d azoto	1975	radio: 2,6 mm
NH ₂ CN	cianamide	1975	radio: 3,7 mm
HC ₃ N	cianodiacetilene	1976	radio: 3,0 mm
HCO	formile	1976	radio: 3,5 mm
C ₂ H ₂	acetilene	1976	infrarosso: 2,4 μm
HC ₃ N		1977	radio: 3,0 cm
C ₄ N		1977	radio: 3,4 mm
H ₂ C ₂ O	chetene	1977	radio: 3,0 mm
HNO	nitrosile	1977	radio: 3,7 mm
CH ₃ CH ₂ CN	cianuro d'etile	1977	radio: 2,6 a 3,4 mm
CH ₄	metano	1977	radio: 3,9 mm
HC ₉ N		1978	radio: 3,0 cm

Da J. C. Pecker: *Capire l'Astronomia*, Hoepli, Milano, 1985

Le molecole organiche nella materia interstellare

Francesco Saverio Delli Santi

Home

Lecture

Premessa

Lecture

Il materiale
"rozzo": gli
elementi chimici

M. Ageno, *Dal non vivente al vivente*, Edizioni Theoria, Roma-Napoli, 1991

Le nubi
interstellari

M. P. Bernstein, S. A. Sanford, L. J. Allamandola, "Dallo spazio le molecole della vita", in *Le Scienze*, n. 373, 1999

Le osservazioni

*W. W. Duley, D. A. Williams, *Interstellar Chemistry*, Academic Press, 1984

Le ipotesi generali

F. Hoyle, C. Wickramasinghe, *La nuvola della vita*, Mondadori, 1979

Il problema
chimico

*Singh, P. (a cura di), *Astrochemistry of Cosmic Phenomena*, IAU Symp. N. 150, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1992

Il problema
astrofisico

B. E. Turner, "Le molecole interstellari", in *Le Scienze*, n. 58, Milano, 1973

Le reazioni gassose
nelle nubi oscure

*Vardya, M.S.; Tarafaldar, P. (a cura di), *Astrochemistry*, IAU Symp. N. 120, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1986.

Conclusioni

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

Appendice

Lecture

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Introduzione

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Conclusioni

L'astronomia planetaria si dedica essenzialmente allo studio dei corpi celesti nel Sistema solare. Per molto tempo l'attenzione degli astronomi e dei fisici si è concentrata nello studio dei moti dei pianeti, ma, con l'inizio degli anni Sessanta, si è aperta una fruttuosa stagione di esplorazione del Sistema solare che ha raggiunto il suo apice con le missioni Voyager verso i pianeti esterni. Non sono certo mancate le missioni di sonde spaziali dirette anche verso i pianeti interni, alcune delle quali, come la Mars Global Surveyor, ancora in corso. La quantità di dati raccolta è enorme ed ha aperto la strada a nuove discipline relative allo studio dei pianeti: climatologia, geologia e planetologia comparata. È stata però la scoperta di nuovi sistemi planetari, in stelle della Via Lattea, che ha dato nuovo impulso allo studio dei meccanismi che presiedono alla formazione del Sistema solare

Già in un precedente articolo "La genesi del Sistema solare" — pubblicato in *Leggere il Cielo*, Supplemento n. 1 al Giornale di Astronomia del marzo 2000 contenente le lezioni di un corso di aggiornamento per insegnanti — abbiamo descritto, sia dal punto di vista storico che astronomico, le teorie di formazione del Sistema solare. Non ci ripeteremo dunque sugli aspetti già trattati bensì, a completamento di quanto esposto, approfondiremo la dinamica del moto dei pianeti e lo stretto legame con le teorie di formazione stellare.

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Il Sistema solare

Introduzione

Prima di affrontare il problema della formazione planetaria ricordiamo alcune delle principali proprietà del Sistema solare.

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

I pianeti interni (Mercurio, Venere, Terra e Marte) sono costituiti da un nucleo metallico circondato da uno strato di silicati. Nel passato tutti e quattro sono stati modificati dall'attività vulcanica e tettonica e dall'impatto dei meteoriti, ma oggi solo la Terra è tettonicamente attiva, anche se i gas prodotti dai vulcani hanno formato le atmosfere di Venere e di Marte.

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

I pianeti esterni sono separati da quelli interni dalla cintura degli Asteroidi, frammenti di roccia con diametri che variano da alcune migliaia a pochi chilometri. I quattro pianeti giganti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) contengono il 99 % del materiale del Sistema solare, escluso il Sole. Sono degli sferoidi di gas d'idrogeno ed elio, con miscugli di metano, ammoniaca ed acqua, nel cui interno l'idrogeno si è condensato in idrogeno liquido, ed hanno, probabilmente, un nucleo costituito da metalli, silicati ed acqua. Tre dei pianeti giganti irradiano più calore di quanto ne ricevano dal Sole, mentre, curiosamente, solo Urano non presenta quest'eccesso di calore ed ha una rotazione retrograda.

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Nella parte più esterna del Sistema solare si trova Plutone con il suo satellite Caronte, grande la metà del pianeta principale. Plutone ha una sottile atmosfera di gas metano e, come il suo satellite, è probabilmente costituito di ghiaccio e metano. Le comete, composte anch'esse principalmente di ghiaccio, orbitano, intrappolate dal campo gravitazionale del Sole, ai limiti del Sistema solare. Esse percorrono delle orbite "aperte" oppure "chiuse" ritornando periodicamente, in quest'ultimo caso, a passare in prossimità dei pianeti.

Conclusioni

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Le leggi di Keplero

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Conclusioni

Nella seconda metà del Seicento, pur tra mille difficoltà, il modello eliocentrico si andò sostituendo al modello geocentrico. La concezione copernicana offre una più accettabile visione fisica ed abolisce il privilegio di centralità conferito alla Terra. Discriminare tra le due concezioni, quella geocentrica e quella eliocentrica, poté essere fatto solo compiendo accurate osservazioni delle posizioni dei pianeti, del Sole e della Luna ed elaborando i risultati con animo scevro da pregiudizi; anche a costo di rivedere dalle fondamenta le idee correnti sulla fisica.

In questo programma di lavoro spiccano i nomi di Johannes Kepler (1571-1630), Galileo Galilei (1564-1642) ed Isaac Newton (1642-1727). Scrive Thomas Kuhn ne *La Rivoluzione Copernicana*, che "il *De Revolutionibus* di Copernico costituì la miccia di una rivoluzione che esso aveva a mala pena delineato. È un testo che provoca una rivoluzione più che un testo rivoluzionario".

I primi ed importanti contributi verso una nuova definizione del Sistema del Mondo vennero da Keplero, che poté utilizzare osservazioni di Marte molto precise realizzate dal suo maestro Tycho Brahe (1546-1601). Dopo vari tentativi, attuati nel corso di dieci anni di lavoro, Keplero pervenne in modo empirico alla formulazione delle tre leggi che portano il suo nome:

I^a legge: i pianeti descrivono intorno al Sole delle orbite ellittiche, di cui il Sole occupa uno dei fuochi;

II^a legge: le aree descritte dal raggio vettore di ciascun pianeta sono proporzionali ai tempi impiegati a descriverle; ossia, il raggio vettore di un pianeta descrive aree uguali in tempi uguali;

III^a legge: i quadrati dei tempi di rivoluzione dei pianeti intorno al Sole sono proporzionali ai cubi dei semiassi maggiori delle rispettive orbite.

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

La meccanica celeste

Introduzione

Le leggi di Newton costituiscono la base su cui si fonda la meccanica celeste, la scienza che studia gli effetti delle interazioni gravitazionali tra corpi celesti ed ha come conseguenza diretta le leggi di Keplero. Con l'utilizzo della forza di gravitazione universale

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

$$F = G \frac{m_1 \cdot m_2}{d^2}$$

(m_1 ed m_2 le masse di due corpi gravitanti, d la loro distanza, F la forza agente e G la costante di gravitazione universale) e della seconda legge della dinamica di Newton

Le orbite dei pianeti

$$F = m \cdot a$$

(attenzione, qui a è l'accelerazione del corpo di massa m soggetto alla forza F) si possono ritrovare ed estendere i risultati empirici riassunti nelle tre leggi di Keplero.

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

In particolare, la forma delle orbite di un corpo intorno ad un altro risulta essere più in generale una conica, cioè un'ellisse o una parabola o un ramo di iperbole, a seconda delle condizioni iniziali per la posizione e la velocità. Più precisamente, i due corpi descrivono una conica intorno al baricentro comune, verificando, così, la prima legge di Keplero. Se tuttavia uno dei due corpi è molto più massiccio dell'altro, il baricentro coincide in pratica con la sua posizione e si può parlare di moto di un corpo intorno all'altro.

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

La terza legge di Keplero viene precisata da Newton nella forma

$$P^2 (m_1 + m_2) = K \cdot d^3$$

con d che rappresenta il semiasse maggiore dell'orbita e la costante $K = 4 \cdot \pi^2 / G$, assumendo con m_1 la massa di un pianeta e con m_2 quella del Sole.

Conclusioni

Nel Sistema solare la somma delle due masse, in prima approssimazione, si considera praticamente uguale alla sola massa solare, data la relativa piccola massa dei pianeti, quindi una costante. Nel caso di sistemi binari di stelle, nei quali le masse stellari possono essere dello stesso ordine di grandezza, la terza legge di Keplero va utilizzata nella forma generalizzata di Newton.

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Le orbite dei pianeti

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Conclusioni

Vediamo in maggiore dettaglio gli elementi che permettono di configurare l'orbita di un pianeta. La definizione del piano dell'orbita, l'orientazione dell'orbita, la forma dell'orbita e gli elementi meccanici del moto, visualizzati nella figura 1, sono gli elementi che caratterizzano il problema dell'orbita dei pianeti.

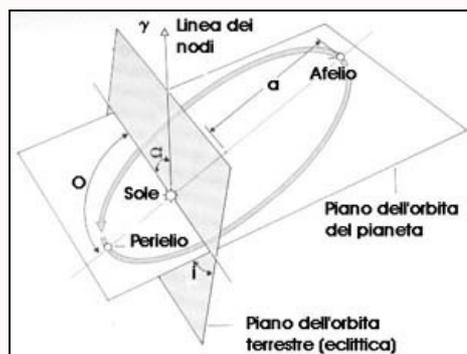


Figura 1.

Per orientare l'orbita sul piano è sufficiente individuare la direzione del suo asse maggiore oppure fissare la direzione del perielio P , cioè l'angolo o , detto anche distanza angolare tra perielio e nodo. Determinare la forma dell'orbita vuol dire fissare la lunghezza del suo semiasse maggiore a e l'eccentricità e . In definitiva, quindi, i *6 elementi orbitali*, necessari a definire un'orbita, sono: il semiasse maggiore a , l'eccentricità e , l'inclinazione i , la longitudine del nodo ascendente Ω , la distanza angolare tra perielio e nodo o e l'istante T del passaggio al perielio. Per individuare un'orbita sono necessarie almeno tre osservazioni che fissino tre coppie di valori (tre coordinate nel sistema eclitticale). Con questi dati è possibile trovare i sei elementi orbitali, incogniti, anche se la soluzione di questo problema è molto complicata ed esula dagli scopi di questo corso.

Le orbite sono descritte rispetto ad un piano di riferimento. Per i pianeti questo è il piano dell'orbita terrestre (l'eclittica); per i satelliti è il piano che contiene l'equatore dei rispettivi pianeti. I due punti in cui l'orbita interseca il piano di riferimento sono detti nodi. Il nodo ascendente è definito dal passaggio da posizioni sotto al piano di riferimento (negative) a posizioni sopra al piano di riferimento (positive). Il nodo discendente è definito, al contrario, come il punto di passaggio da posizioni positive a posizioni negative, mentre la linea che congiunge i nodi è detta linea dei nodi.

Per definire l'orbita, si fissa prima di tutto l'angolo di

inclinazione i tra il piano dell'orbita e il piano di riferimento,
poi si fissa l'angolo Ω , detto longitudine del nodo, contato
dal punto gamma al nodo ascendente

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Conclusioni

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

I primi modelli di formazione del Sistema solare cercarono di rendere conto, in modo qualitativo, dei principali dati osservativi. Le orbite dei pianeti sono prossime al piano orbitale terrestre, il piano dell'eclittica; le orbite non sono fortemente ellittiche (esclusa l'orbita di Plutone, scoperto nel 1929); tutti ruotano nello stesso senso che è pure quello di rotazione del Sole, a eccezione di Urano che ha un moto di rotazione retrogrado; infine, le distanze eliocentriche presentano una certa regolarità espressa da una relazione empirica trovata da Titius e Bode nel XVIII secolo.

Alla fine del XIX secolo, inoltre, i fisici teorici dedicarono particolare attenzione al *problema del momento angolare* nel Sistema Solare.

Per momento angolare in fisica si intende una quantità che misura l'intensità della rotazione di un corpo attorno al proprio asse. Supponiamo di avere un corpo rigido di massa M che ruota su se stesso, ad una velocità angolare ω , nel campo gravitazionale determinato dalla sua stessa massa. Ebbene, senza entrare nel dettaglio fisico matematico, se il nostro corpo solido è "isolato", vale la legge di conservazione del momento angolare:

$$\frac{dN}{dt} = 0$$

dove

$$N = k \cdot M \cdot R^2 \cdot \omega$$

è il momento angolare del corpo, R il raggio del corpo solido e k un opportuno fattore numerico.

Supponiamo che il corpo rigido rappresenti la nube protoplanetaria. Nel caso che esista solo la forza di gravitazione e non esistano forze esterne, cioè che la nube protoplanetaria sia "isolata", vale la precedente legge di conservazione del momento angolare che, risolta, dà :

$$N = k \cdot M \cdot R^2 \cdot \omega = 0$$

Il momento angolare originario deve mantenersi costante anche se si può ripartire nei momenti di rotazione dei pianeti attorno al proprio asse, di rivoluzione dei pianeti attorno al Sole ed infine nel momento di rotazione del Sole attorno al proprio asse.

Quello che si osserva "ora" nel Sistema Solare è che:

Il Sole contiene il 99% della massa del Sistema Solare ma possiede solo il 2% del momento angolare posseduto dagli altri pianeti !

Questo dato osservativo non è di poco conto. Il dilemma nasce dal fatto che è alquanto singolare come "ora", pur essendo la grandissima parte della massa confinata nel Sole, l'intensità della rotazione e della rivoluzione (in questo modo possiamo tradurre il concetto fisico di momento angolare) sia invece distribuita prevalentemente nei corpi a più piccola massa, quali i pianeti. In altri termini, questo vuol dire che il Sole, adesso, dovrebbe avere, per mantenere la conservazione del momento angolare originario, una rotazione su se stesso, di 0,5 giorni, invece di quella osservata di 26 giorni! Si aprono due possibilità:

1. se il Sole ed i pianeti si sono formati contemporaneamente bisogna individuare un meccanismo che sottragga momento angolare al Sole;
2. oppure bisogna supporre che sin dall'inizio la nascita e l'evoluzione dei pianeti siano state separate da quella del Sole.

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti

L'età del Sistema solare e la durata del processo di formazione

La formazione del protosole

La nube protoplanetaria

Le reazioni termonucleari nel protosole; il ciclo protone-protone

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Dalla metà del XX secolo le teorie riguardanti la formazione stellare insieme alla determinazione delle età dei vari corpi minori, ad esempio i meteoriti, fornirono nuovi elementi di riflessione per le nuove e più moderne teorie cosmogoniche. Sebbene il problema della formazione planetaria sia solo parzialmente risolto, si è riusciti comunque a costruire un quadro sufficientemente coerente dei vari processi fisici e chimici che sovrintendono ad essa.

L'efficacia dei modelli di formazione del Sistema solare risiede essenzialmente nella loro capacità di rispondere a due domande: ammesso che il Sole ed i pianeti si siano formati assieme, dove e quando ciò è avvenuto? il Sistema solare si è formato da materiale interstellare freddo o da materiale solare riprocessato dalle reazioni termonucleari avvenute nel suo interno?

A queste due possibilità le evidenze osservative permettono di dare una risposta esauriente con un elevato grado di accuratezza. Per far questo è necessario affrontare il problema dell'età delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti ed indagare su come avviene la formazione stellare nella Galassia.

La datazione delle rocce terrestri, lunari e dei meteoriti

Il principio base della datazione, e quindi della stima delle età geologiche, si fonda sulla misura degli elementi radioattivi presenti nelle rocce sottoposte ad esame. Al fine di misurare l'età del Sistema solare, si utilizzano degli "orologi" a lungo termine derivati dal decadimento di alcune specie fisiche trovate nei meteoriti.

Ad esempio consideriamo il caso di due meteoriti (indicati con le lettere a e b), in cui l'abbondanza degli isotopi del piombo era la stessa al momento della formazione del Sistema solare.

Dopo un tempo t la formazione delle specie isotopiche è specificata dalla relazione:

$$\left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_a - \left(\frac{{}^{206}\text{Pb}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_b = \left[\left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_a - \left(\frac{{}^{238}\text{U}}{{}^{204}\text{Pb}}\right)_b \right] \cdot (e^{\lambda \cdot 238t} - 1)$$

che collega le abbondanze isotopiche del ${}^{206}\text{Pb}$ e dello ${}^{238}\text{U}$

al tempo t in funzione della costante di decadimento λ ^{238}U dell' ^{238}U .

Se tutti i meteoriti hanno lo stesso rapporto iniziale ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) allora hanno la stessa età e, sulla base di questa ipotesi, non è troppo complicato calcolare il valore di t e quindi risalire all'età di formazione del Sistema solare. Per completezza diamo, nella figura 2, le principali reazioni di decadimento radioattivo con i tempi caratteristici corrispondenti.

Elemento primario	Elemento secondario	Costante di decadimento λ per anno	Semidurata
^{87}Rb (rubidio)	^{87}Sr (stronzio)	$1.391 \cdot 10^{-11}$	49.82 miliardi di anni
^{187}Re (renio)	^{187}Os (osmio)	$1.613 \cdot 10^{-11}$	42.97 miliardi di anni
^{232}Th (torio)	^{208}Pb (piombo)	$4.990 \cdot 10^{-11}$	13.89 miliardi di anni
^{238}U (uranio)	^{206}Pb (piombo)	$1.537 \cdot 10^{-10}$	4.49 miliardi di anni
^{40}K (potassio)	^{40}Ar (argon)	$5.8 \cdot 10^{-11}$	1.25 miliardi di anni
^{235}U (uranio)	^{207}Pb (piombo)	$9.728 \cdot 10^{-10}$	723 milioni di anni
^{129}I (iodio)	^{127}I (iodio)	$4.082 \cdot 10^{-8}$	16.97 milioni di anni

Figura 2.

La datazione di reperti storici di età non geologica viene fatta tramite il metodo del carbonio 14 che è associato a tempi di decadimento radioattivo di alcune migliaia di anni.

L'età del Sistema solare e la durata del processo di formazione

Le misure fatte con questi elementi su campioni di meteoriti mostrano che l'età del Sistema solare è approssimativamente 4,55 miliardi di anni.

Inoltre, le misure delle abbondanze del ^{244}Pu (Plutonio) e dello ^{129}I (Iodio), che hanno dei tempi di decadimento più corti, danno un'indicazione del tempo di condensazione del materiale planetario. Esse indicano che non sono stati necessari più di 100 milioni di anni per la formazione dei pianeti dopo che il materiale originario si è isolato da quello interstellare.

La formazione del protosole

La discussione relativa alla formazione planetaria non può prescindere da quella della formazione stellare, ed in particolare solare. (Fig. 3)

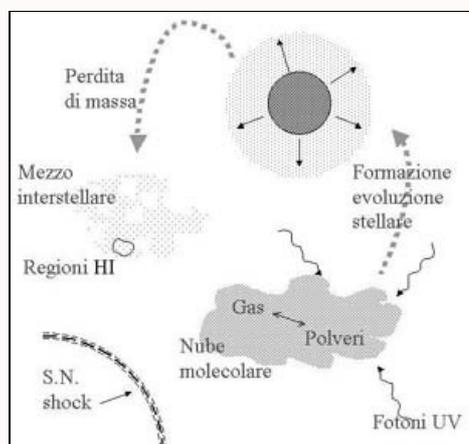


Figura 3.

Le stelle si formano dal mezzo interstellare costituito da polveri e gas. Se nelle nubi interstellari, per un qualche meccanismo fisico, si determina un accumulo locale di gas o polveri, ecco che si può produrre un'instabilità dal cui collasso gravitazionale si origina una stella.

In realtà i dettagli di questo processo sono ancora in parte sconosciuti e tutto il meccanismo di formazione stellare è ben lungi dall'essere compreso. Seppur in modo grossolano, si può affermare che il collasso gravitazionale avviene quando, nella nube protostellare, l'energia potenziale gravitazionale eccede il doppio dell'energia cinetica. È possibile calcolare questo valore critico della densità delle concentrazioni locali di gas e polveri tramite il teorema del viriale, che rende irreversibile l'innesco della contrazione gravitazionale.

Diversi sono i meccanismi che possono instaurare la fluttuazione di densità da cui parte il collasso gravitazionale. Tra questi ne ricordiamo due:

- 1 - l'esplosione di una supernova, la cui onda d'urto comprime il mezzo interstellare sino a renderlo instabile gravitazionalmente;
- 2 - il passaggio di una nebulosa attraverso uno dei bracci a spirale della Via Lattea.

L'analisi degli elementi e dei rapporti isotopici nei meteoriti è utilizzabile come metodo per determinare la durata ed il tipo del processo di formazione e quindi fornirci un'indicazione su quale, di questi due meccanismi, è quello più probabile.

Si è riscontrato che, nei meteoriti, un certo numero di elementi quali l'ossigeno, il magnesio, ed il neon hanno abbondanze anomale che suggeriscono la presenza, nella "nebulosa molecolare primitiva", di "grani presolari" dovuti a materiale espulso da supernovae, novae o da stelle di tipo Wolf-Rayet. In particolare l'eccesso di ^{26}Mg si può spiegare solo con la presenza di ^{26}Al nei grani presolari direttamente espulsi non solo da una esplosione stellare ma anche da forte attività stellare, poiché il decadimento radioattivo ad essi associato (^{26}Al che si trasforma in ^{26}Mg) è molto breve: solo 700.000 anni! L'ipotesi della formazione del nostro sistema planetario in seguito al passaggio della nebula primordiale attraverso la Via Lattea, trova ulteriore conferma nelle misure delle abbondanze del ^{244}Pu (Plutonio), e dello ^{129}I (Iodio)

Il meccanismo dell'esplosione di una supernova, per quanto accettabile, quindi non è strettamente necessario. È ragionevole ipotizzare che il Sole ed i pianeti si siano formati contemporaneamente, durante il passaggio in una parte della Galassia sicuramente più densa e piena di polveri.

La nube protoplanetaria

La nube protoplanetaria era costituita da gas di idrogeno ed elio e da grani di polvere contenenti carbonio solido, silicati, metalli e materiale volatile come acqua, anidride carbonica, metano ed ammoniaca. L'instabilità gravitazionale può avere avuto luogo a partire da questi piccoli frammenti, di circa un centesimo di massa solare, formatisi in seguito all'attività di stelle di poche masse solari!

Una volta innescato il meccanismo di formazione, all'interno della nube molecolare si forma una nebula in contrazione e la rotazione della nube produce il confinamento del materiale gassoso formando un disco nebulari, mentre all'interno di questo disco, si produce ulteriore accumulo di materiale. (Fig. 4)



Figura 4.

Le reazioni termonucleari nel protosole; il ciclo protone-protone

Quando la temperatura, nella nebulosa centrale, arriva a diversi milioni di gradi si innescano nel suo interno le reazioni termonucleari e si forma il protosole.

Nella figura 5 descriviamo il principale meccanismo di produzione dell'energia legato alle reazioni termonucleari: quello della catena protone-protone.

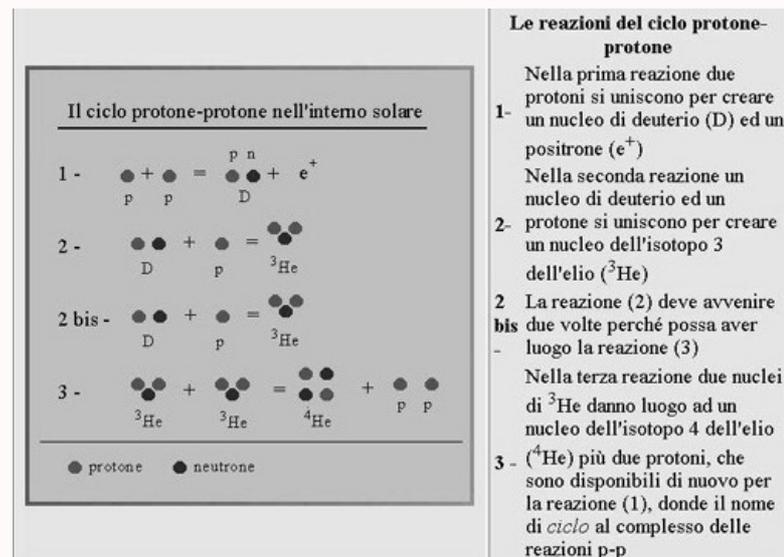


Figura 5.

La fusione nucleare è il processo attraverso il quale si producono nuclei di elementi più pesanti a partire dalla fusione di nuclei di elementi più leggeri. Nei processi di fusione nucleare la massa del nuovo nucleo formato non è pari alla somma di quella dei nuclei atomici che hanno partecipato alla fusione, ma leggermente inferiore. È per tale difetto di massa che, in base alla legge di Einstein $E = m c^2$, si sviluppa energia E a processo avvenuto. Nella formula m è il difetto di massa e c è la velocità della luce nel vuoto pari a

300.000 km/s.

Nell'interno del Sole avviene, anche oggi, la fusione di quattro nuclei di idrogeno (protoni) in un nucleo di elio, secondo lo schema della figura 5. Il nucleo di elio ha un difetto di massa m di 0,007 rispetto alla somma delle masse dei quattro nuclei di idrogeno. Su questa base è facile calcolare, dalla legge di Einstein, che, se solo un decimo della massa di idrogeno contenuta nel Sole partecipa alle reazioni termonucleari per formare elio, si sviluppa un'energia di $9,2 \cdot 10^{43}$ joule, la quale, consumata al tasso di $3,86 \cdot 10^{26}$ J/s (che rappresenta la luminosità solare), risulta sufficiente per circa 7,5 miliardi di anni, ben oltre l'età della Terra.

La misura del rapporto deuterio/idrogeno nei pianeti giganti

Uno dei più interessanti problemi connessi con l'innesco delle reazioni termonucleari del ciclo protone-protone nel protosole riguarda la combustione del deuterio. Quest'ultimo è presente nel mezzo interstellare, ma viene distrutto nelle stelle in seguito alle reazioni termonucleari. Il tempo in cui avviene la reazione che trasforma il deuterio è molto più breve (circa 1 minuto) delle altre reazioni (con tempi di 1 milione di anni).

Ci si chiede, allora, che fine ha fatto il deuterio presente nella nebulosa protosolare, anche se è possibile osservare ancora oggi deuterio residuo di quello originario. Nei pianeti giganti, il valore del rapporto D/H è maggiore di quello prevalente nel mezzo interstellare per cui è lecito supporre che l'abbondanza di tale rapporto possa essere collegata a quella del mezzo interplanetario all'origine del Sistema solare, cioè 4,55 miliardi di anni fa.

Se il materiale planetario fosse un tributo del materiale solare, l'abbondanza di deuterio sarebbe uguale a zero, come nel Sole. Dal momento, però, che il deuterio venne distrutto dentro il Sole appena iniziarono le reazioni nucleari, ciò può indicare che i pianeti non si sono formati da materiale trasformatosi nell'interno del Sole in seguito alle reazioni termonucleari e che, quindi, la fase di formazione planetaria è successiva alla formazione del protosole.

Ne consegue che le teorie mareali vanno scartate poiché ammettono che il materiale da cui si sono formati i pianeti è di origine solare. Potrà essere quindi attendibile solo una versione migliorata della teoria nebulare in accordo con questi dati osservativi.

Parametri e tempi caratteristici	
Nebulosa primitiva	La quantità del materiale a disposizione per la formazione planetaria è il 10% di quella totale
Struttura del disco	Il disco protoplanetario è spesso almeno 1/10 delle sue dimensioni lineari che sono almeno di 30 U.A.
Limite di Roche	Il criterio sul limite di Roche porta ad aumentare il valore della massa iniziale a circa 100 Masse solari. Ne consegue che al modello a piccola massa è preferito il modello di grande massa
Formazione dei grani	In circa un'ora si formano grani grandi 1 micron
Collasso dei grani sul piano equatoriale	I grani si dispongono sul piano equatoriale in circa 100 anni
Formazione dei planetoidi (o planetesimi)	I grani possono formare corpi solidi di alcune centinaia di km in 100 milioni di anni
Il vento solare primordiale	Il <i>vento solare primordiale</i> era sufficientemente intenso per spazzare via le particelle di dimensioni minori di 1 cm. Ne consegue che l'eventuale massa eccessiva può essere stata rimossa dal disco protoplanetario.

Figura 6.

Riassumiamo nella figura 6, le principali tappe del processo di condensazione, e rimandiamo all'articolo citato nell'introduzione per un'analisi dettagliata dei diversi punti qui elencati.

Il problema del momento angolare

Rimane da risolvere il problema del momento angolare, la vera pietra di paragone per la costruzione di un buon modello di formazione planetaria. Questo problema è ancora in parte aperto, anche se sono stati fatti dei passi avanti e, a tale scopo, sono state determinanti sia le teorie di evoluzione stellare sulle fasi iniziali di vita delle stelle, che la teoria dinamica del campo magnetico.

Una stella rotante, dotata di vento stellare e di un forte campo magnetico iniziale, tende a diminuire la sua rotazione per un effetto di "frenamento" dovuto al flusso delle particelle del vento lungo le linee di forza del campo magnetico. Questo può determinare un trasporto delle particelle ad una distanza a maggiore del raggio R della stella.

Anche una piccola perdita di massa può produrre una grande perdita di momento angolare in quanto proporzionale ad $(a/R)^2$. In questo modo, se la perdita di massa è solo 0,003 masse solari per anno, questo meccanismo è sufficiente per rallentare la forte rotazione iniziale del Sole. Quest'ipotesi è confermata dal fatto che nelle stelle giovani, del tipo T-Tauri, si misura una forte perdita di massa associata ad un'intensa attività magnetica e quindi un forte decremento del periodo di rotazione. Il Sole altro non è se non un esempio dell'evoluzione di questi tipi di stelle giovani!

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Conclusioni: lo stato corrente della nostra conoscenza della formazione del Sistema solare

Introduzione

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

La meccanica celeste

Le orbite dei pianeti

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

Conclusioni

Sebbene nessuno scenario sia oggi universalmente accettato, ci sono numerosi punti di consenso ed accordo riguardanti la formazione del Sistema solare.

I modelli più credibili sono quelli che derivano da quello nebulare di Kant e Laplace. I metodi di datazione basati sul decadimento degli elementi radioattivi ritrovati nei meteoriti fissano il momento della nascita del Sistema solare a 4,55 miliardi di anni fa.

La formazione del Sistema solare ha avuto luogo quando la nube molecolare primordiale ha attraversato uno dei bracci a spirale della Galassia. L'ultimo arricchimento della nube, attraverso la Galassia, potrebbe essere avvenuto utilizzando il materiale sintetizzato per nucleosintesi nelle stelle e restituito al mezzo interstellare. Il metodo dello ^{129}I suggerisce che l'ultimo passaggio è avvenuto almeno 100 milioni di anni prima della formazione, e questo determina la durata del processo di formazione planetaria.

I metodi di datazione con ^{16}O , ^{26}Al e ^{20}N suggeriscono che la nube protoplanetaria sia stata arricchita da materiale proveniente da vento stellare da stelle del tipo Wolf-Rayet, quindi non è necessario ipotizzare l'esplosione di una supernova avvenuta nelle vicinanze.

L'attuale lenta rotazione del Sole e riduzione del suo momento angolare può essere spiegata tramite fenomeni magneto-idrodinamici che si osservano pure in stelle di tipo spettrale (F, G e K) analoghe alla nostra stella.

È comunemente accettato il modello di formazione planetaria a piccola massa di 0.01 masse solari. In questo modello la nube collassa su di un disco, le particelle cadono nel piano equatoriale in poche centinaia di anni ed accrescono per collisione ad un ritmo di 1cm all'anno. I processi che portano all'accumulo di materiale sino alla formazione dei planetesimi sono ben noti e ricostruiti dettagliatamente.

Durante le prime fasi di vita il Sole aveva un vento solare molto intenso che ha espulso le particelle, di dimensioni superiori al centimetro, che non si sono conglomerate nei planetesimi. Questo spiega la diversa composizione dei pianeti interni rispetto a quella dei pianeti esterni.

Dinamica e formazione del Sistema solare

Roberto Bedogni

Home

Lecture

Introduzione

Lecture

Il Sistema solare

Le leggi di Keplero

B. Bertotti, "L'esplorazione del sistema di Saturno", in *Le Scienze*, n. 334, 1996

La meccanica celeste

N. Booth, *Sistema Solare. Un viaggio di pianeta in pianeta*, De Agostini, Novara, 1996

Le orbite dei pianeti

A. Braccesi, G. Caprara, M. Hack, *Alla scoperta del Sistema Solare*, Mondadori, Milano, 1993

L'importanza delle orbite nella determinazione di un modello di formazione planetaria

G. Briggs, F. Taylor, *Atlante Cambridge dei pianeti*, Zanichelli, Bologna, 1997

T. Encrenaz, J.-P. Birbing, M. Blanc, *The Solar System*, Springer Verlag, Berlin, 1995

*D.L. Goodstein, J.R. Goodstein, *Il moto dei pianeti intorno al Sole: una lezione inedita di R. Feynmann*, Zanichelli, Bologna, 1997

Vincoli teorici ed osservativi alla costruzione di un modello di formazione del Sistema solare

P. Kennet, *Guide to the Sun*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992

K.R. Lang, C.A. Whitney, *Vagabondi nello spazio: ricerche e scoperte nel Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1987

Conclusioni

D.H. Menzel, J.M. Pasachoff, *Stelle e pianeti*, Zanichelli, Bologna, 1990

Lecture

E. Nesme-Ribes, S.L. Baliunas, D. Sokoloff, "La dinamo stellare", in *Le Scienze*, n. 338, 1996

M. Rigutti, *Comete, meteoriti e stelle cadenti*, Giunti, Firenze, 1997

R. Smoluchowski, *Il Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1989.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono lecture di approfondimento

L'Universo e l'origine della vita

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

Introduzione

Introduzione

Confinata in una piccola frazione del diametro terrestre, la biosfera del nostro pianeta è dimora di un numero straordinariamente vario di organismi. Durante un lunghissimo ciclo di estinzioni e diversificazioni, miliardi di specie sono evolute dall'apparire della vita sulla Terra, ma al di là delle pur importanti conoscenze fornite dallo studio delle tracce fossili, la maggior parte dei problemi legati all'insorgere ed alla storia della vita rimane irrisolto.

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Quali sono le condizioni in cui la vita poté nascere e svilupparsi? La vita ha avuto origine per inseminazione dall'esterno o si è sviluppata da processi avvenuti sulla Terra? Come possono semplici composti organici organizzarsi nei complessi sistemi metabolici degli organismi viventi? Possiamo realisticamente aspettarci che condizioni adatte all'origine ed all'evoluzione della vita esistano fuori della Terra, nel nostro o in altri sistemi solari che andiamo scoprendo attorno alle stelle?

Secondo Christian de Duve, premio Nobel per la medicina nel 1974, la vita è un "imperativo cosmico", inevitabile risultato dell'evoluzione dell'universo. Concludeva infatti un suo articolo pubblicato su *American Scientist* dell'ottobre 1995 con le seguenti parole:

Ho cercato di passare in rassegna alcuni dei fatti e delle idee che, al momento attuale, si considera possano spiegare le prime fasi della nascita spontanea della vita sulla Terra. Non si sa quanto di queste ipotesi resisterà alla prova del tempo, ma si può sicuramente affermare, a prescindere dalla reale natura dei processi che hanno generato la vita, che questi devono essere stati altamente deterministici. In altri termini, questi processi furono inevitabili alle condizioni che esistevano sulla Terra prima della vita. Per di più, questi processi sono destinati ad avvenire allo stesso modo dove e quando condizioni uguali si verificano. Deve essere così, perché i processi sono chimici e sono pertanto governati dalle leggi deterministiche che governano le reazioni chimiche e le rendono riproducibili. [...]

Tutto questo porta a concludere che la vita è una manifestazione obbligatoria della materia, destinata a nascere laddove le condizioni sono adatte. Sfortunatamente, la tecnologia disponibile non ci permette di scoprire quanti siti offrano tali condizioni nella nostra galassia e tanto meno nell'universo. Secondo la maggior parte degli esperti che hanno considerato il problema, specialmente in relazione al progetto per la ricerca di intelligenze extraterrestri, ci dovrebbero essere moltissimi siti di tal genere, forse qualcosa come un milione per galassia. Se hanno ragione, e se io sono nel giusto, devono esserci altrettanti "focolai" di vita nell'universo. La vita è un imperativo cosmico e l'universo è traboccante di vita.

A questi problemi cerca di dare risposta una scienza recente che si avvale del contributo interdisciplinare di ricercatori di

molti settori della scienza tradizionale: l'astrobiologia.

L'Universo e l'origine della vita

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

L'inizio della vita sulla Terra

Introduzione

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Durante il primo periodo della sua storia la Terra, come tutti gli altri pianeti del Sistema solare, è stata sottoposta ad un intenso bombardamento di materiale che per effetto della gravità è andato a formare i protopianeti. Fu durante questo periodo, circa 4,5 miliardi di anni fa, che si formò la Luna, probabilmente a causa di una collisione fra la Terra primitiva ed un corpo delle dimensioni del pianeta Marte. Sulla Luna, su Mercurio, su Marte e su molti corpi minori del Sistema solare è rimasta una traccia, nelle loro superfici fortemente craterizzate, di questo periodo che è terminato circa 3,8 miliardi di anni fa. Le superfici di questi corpi si sono poco alterate da allora, a causa della mancanza di atmosfera e della scarsa attività endogena. Venere e la Terra, al contrario, sono state completamente trasformate da eventi geologici: il vulcanismo per Venere e la tettonica a zolle e l'erosione da parte dell'acqua e degli eventi atmosferici per la Terra.

Sul nostro pianeta questi eventi hanno avuto effetti contrastanti, positivi e negativi, sull'origine e lo sviluppo della vita. Durante l'intenso bombardamento, la maggior parte dell'acqua e molti elementi volatili, necessari per lo sviluppo della vita (carbonio, azoto, fosforo, ecc.) sono stati vaporizzati e quindi perduti dal pianeta in accrescimento. Gli elementi necessari allo sviluppo della vita si sono probabilmente aggiunti dopo per effetto dell'impatto di comete di piccola taglia, quando il pianeta si era ormai raffreddato a sufficienza per trattenerli. È possibile, anche, che in questo periodo gli ultimi impatti con corpi ghiacciati abbiano portato precursori semplici di composti organici necessari per l'origine della vita. Sono state fatte stime che fanno arrivare la quantità di questi materiali a 10.000 tonnellate di composti organici per anno. Ancora oggi la Terra ne raccoglie dallo spazio più di 300 tonnellate per anno.

Era necessario poi un rifornimento stabile di acqua allo stato liquido ad una temperatura inferiore a 100°C perché si potessero formare molecole organiche complesse. Le condizioni adatte si sono probabilmente verificate fra 4,2 e 4,4 miliardi di anni fa, nell'epoca in cui il bombardamento era in declino. Certamente forme avanzate di vita erano già presenti 3,5 miliardi di anni fa, epoca cui risalgono le più antiche testimonianze fossili. Inoltre sono stati trovati depositi di carbonio particolarmente ricchi di C¹² rispetto all'isotopo più abbondante C¹³, segno di assimilazione di carbonio organico, e ciò testimonia l'inizio della vita in un periodo ancora più antico. D'altra parte per effetto del vulcanismo e del bombardamento il nostro pianeta è rimasto inospitale per la vita per circa mezzo miliardo d'anni dalla sua nascita (avvenuta circa 4,5 miliardi di anni fa) e ciò lascia un periodo di 200-300 milioni di anni per lo sviluppo delle prime forme di vita.

Questa durata sembra decisamente troppo breve per la creazione di un organismo complesso come la cellula vivente. Da qui il suggerimento che germi di vita possano

essere giunti sulla Terra dallo spazio esterno assieme alla polvere cometaria o, come ha proposto Francis Crick (anziano professore del *Salk Institute for Biological Studies*, premio Nobel per la medicina nel 1962 e scopritore della doppia elica del DNA) mediante una nave spaziale inviata da qualche lontana civiltà extraterrestre. Non esistono prove di tali affermazioni ed anche le ragioni che hanno sostenuto le proposte sono ormai obsolete. Attualmente c'è un accordo generale fra gli scienziati che la vita sia sorta in loco attraverso processi naturali spontanei e a questo dobbiamo attenerci, se vogliamo rimanere in ambito scientifico.

Un controllo importante da fare, se si vuole indagare sulla possibilità di insorgenza della vita nel Sistema solare interno, è quello della quantità di energia irradiata dal Sole primordiale. Ci sono buone ragioni per credere che, durante il periodo iniziale di vita dei pianeti, il Sole fosse dal 25 al 30 per cento meno luminoso di oggi. Sulla Terra primitiva, a causa della presenza di un'atmosfera ricca di ossidi di carbonio, gli effetti sulla superficie della Terra furono fortemente influenzati dall'effetto serra, che intrappolava la radiazione solare e portava la temperatura superficiale a valori adatti alla stabilità dell'acqua allo stato liquido. In quelle condizioni probabilmente la zona ospitale per la vita si estendeva all'interno del Sistema solare fino a comprendere Venere.

L'Universo e l'origine della vita

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

Acqua su Venere?

Introduzione

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Le informazioni sul pianeta Venere le abbiamo soprattutto dalle molte sonde Venera inviate dai sovietici fra il 1967 e il 1983 e dalle missioni statunitensi *Pioneer Venus*, lanciata nel 1980 e attiva fino al 1992, e *Magellan*, che tra il 1990 e il 1994 ci ha fornito una mappa dettagliata della superficie del pianeta.

Attualmente la superficie di Venere è oscurata da dense nubi di acido solforico sospese in una atmosfera composta quasi totalmente da anidride carbonica. Le immagini radar di Magellano ci fanno vedere una superficie quasi completamente riplasmata dalle massicce eruzioni dei vulcani più grandi ed insoliti di tutto il Sistema solare. Sebbene la superficie venusiana sia oggi estremamente calda e secca, ci sono segni indiretti che indicano che l'acqua fu un tempo presente nell'atmosfera sotto forma di vapore e sufficientemente abbondante da poter formare oceani. Lo strumento fondamentale usato per investigare la storia passata del clima di Venere è costituito dallo studio delle abbondanze isotopiche degli elementi. Molti processi naturali privilegiano l'uno o l'altro isotopo nelle reazioni chimiche, e questo provoca variazioni nelle abbondanze isotopiche degli elementi e ci permette quindi di inferire le condizioni passate.



Figura 1. Venere è ricoperta da dense nubi di acido solforico spesse molti chilometri. Sono bene in evidenza in questa immagine, ripresa nell'infrarosso dalla sonda Galileo il 10 febbraio 1990 da una distanza di 96.600 km.

Durante la missione *Pioneer Venus*, la navicella in orbita attorno al pianeta ha fatto misure di deuterio, un isotopo dell'idrogeno, nell'alta atmosfera di Venere. Le misure del rapporto fra la quantità di questo isotopo e la quantità di

idrogeno normale hanno rivelato che, rispetto a quello che si misura nell'atmosfera terrestre, il deuterio è 150 volte più abbondante. Ciò dimostra che una grande quantità di idrogeno è andata perduta nello spazio. Il fenomeno si spiega ipotizzando, che all'aumentare graduale della luminosità del Sole primordiale, e quindi dell'energia emessa, l'idrogeno prodotto dalla dissociazione delle molecole d'acqua si sia dissipato nello spazio. L'anidride carbonica, immessa nell'atmosfera dalle eruzioni vulcaniche, ha poi intrappolato la radiazione solare per effetto serra ed ha fatto salire la temperatura superficiale del pianeta agli altissimi valori attuali (~ 450°C).

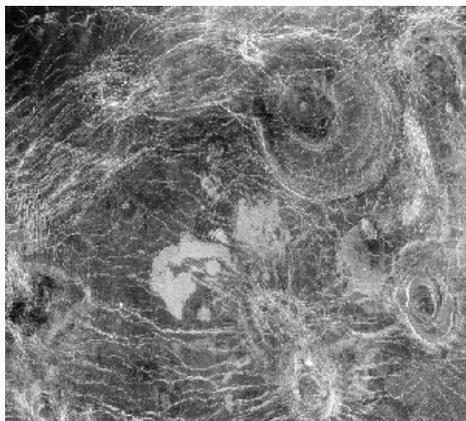


Figura 2. Queste strutture, dette aracnoidi, sono caratteristiche della superficie di Venere. Sono strutture di forma grossolanamente ellittica ad anelli concentrici solcate da una complessa rete di fratture che si estendono verso l'esterno. Si sono formate a causa del raffreddamento del magma affiorato in superficie. Hanno dimensioni che vanno da 50 a 230 km.

È quindi pensabile che nei primi periodi di vita di Venere l'acqua fosse abbondante sulla sua superficie e che la vita possa avere avuto inizio anche su questo pianeta. Se ciò è avvenuto, la vita si è comunque successivamente estinta a causa delle sopravvenute condizioni ambientali proibitive di cui abbiamo parlato sopra. Probabilmente le tracce di tali eventi lasciate sulle rocce sono poi andate perdute a causa della massiccia evoluzione della crosta dovuta all'intenso vulcanismo e ai fenomeni tettonici.

Venere però non è l'unico pianeta al di fuori della Terra in cui la vita ha potuto avere un inizio. Anche Marte ha vissuto la prima fase della sua evoluzione all'interno della zona abitabile e potrebbe ospitare tuttora acqua allo stato liquido al di sotto del suolo ghiacciato.

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

Alla ricerca della vita marziana

Introduzione

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Nel 1976 le missioni *Viking* posarono due sonde sul suolo marziano alla ricerca di organismi viventi. Gli esperimenti biologici a bordo hanno affrontato il problema da aspetti diversi. Quello principale era diretto semplicemente alla ricerca di molecole organiche sulla superficie del pianeta rosso. Il risultato è stato del tutto negativo: non è stato rivelato un solo composto del carbonio, sebbene lo strumento fosse in grado di rivelare molecole organiche con una concentrazione di uno su un miliardo. Gli altri esperimenti hanno cercato tracce di attività metabolica aggiungendo acqua e nutrienti a campioni di suolo. Sebbene siano stati ottenuti alcuni risultati interessanti, sono tutti stati spiegati con processi inorganici.

Questo non deve sorprendere, se teniamo conto che la pressione atmosferica su Marte è meno dell'uno per cento di quella terrestre, molto lontana da quella necessaria per l'esistenza di acqua allo stato liquido in quantità ragionevoli. Oltre a ciò, l'atmosfera non contiene ossigeno e quindi è assente lo strato di ozono che protegge la superficie dalle radiazioni ultraviolette, estremamente dannose per ogni forma vivente. Questa radiazione, che giunge fin sulla superficie, è stata senza dubbio un fattore importante nel produrre il caratteristico colore rosso del pianeta e nella produzione di perossidi, che sono molto efficienti nel distruggere i composti organici.

L'accordo fra gli scienziati nell'affermare che la superficie di Marte sia sterile è ormai praticamente generale, però si pensa che possano esistere zone, con presenza di acqua allo stato liquido, al di sotto della superficie, dove la temperatura e la pressione siano sufficientemente alte. Una sfida importante per le future missioni di esplorazione sarà quella di accedere a strati abbastanza profondi per poter esaminare il problema. Dovremo probabilmente aspettare qualche decennio, perché un'impresa di questo tipo non potrà essere effettuata in modo completo se non con la presenza dell'uomo.

Le immagini dei *Viking Orbiters* e dei loro predecessori *Mariner* rivelarono che l'antica e craterizzata superficie marziana era ricca di canali prodotti da acqua scorrente sulla superficie molto tempo fa. Così, mentre i veicoli atterrati, i *lander*, escludevano la presenza di vita attuale, quelli rimasti in orbita, gli *orbiter*, aprivano la possibilità di ipotizzare la presenza di vita sul pianeta in epoche remote.

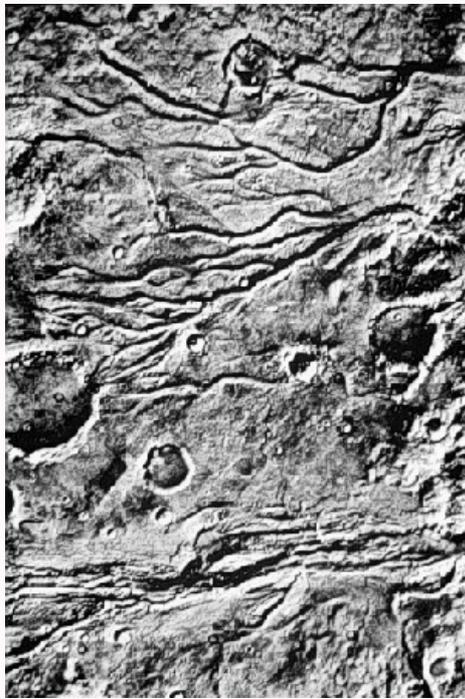


Fig. 3 - Il sistema di canali della parte superiore di questa immagine costituisce la Maja Vallis che si estende per una lunghezza di circa 180 km, sul pianeta Marte. Probabilmente è stato prodotto dall'acqua discesa dal Juventae Chasma, che si trova alcune centinaia di km più a sud. Nella parte inferiore della foto si vede la Vedra Vallis. L'area rappresentata ha un larghezza di 150 km.

Dal punto di vista della possibilità di presenza di vita, la storia del clima di Marte è quasi esattamente l'opposto di quella del clima di Venere: Marte era un tempo relativamente caldo rispetto al clima estremamente rigido di oggi. Questa affermazione sembra in contraddizione col fatto che il Sole ha aumentato la sua luminosità col tempo e che quindi la quantità di radiazione che arriva sul pianeta è aumentata; ma dobbiamo tenere in considerazione un altro fattore importante che entra nella questione: l'evoluzione della sua atmosfera. Su Marte l'antica atmosfera ricca di anidride carbonica e di altri "gas serra" ha portato la temperatura superficiale del pianeta a valori abbastanza elevati per permettere la presenza di acqua allo stato liquido sulla superficie. Le interazioni dell'atmosfera con le rocce e le perdite nello spazio a causa della bassa velocità di fuga hanno poi provocato il declino della pressione. Sulla Terra tali perdite sono state controbilanciate dal riciclaggio della crosta, dovuto alle interazioni col mantello, e dal conseguente rilascio di grandi quantità di gas nell'atmosfera durante le eruzioni vulcaniche. Su Marte tale riciclaggio è avvenuto in quantità molto inferiore, mancando una intensa attività vulcanica.

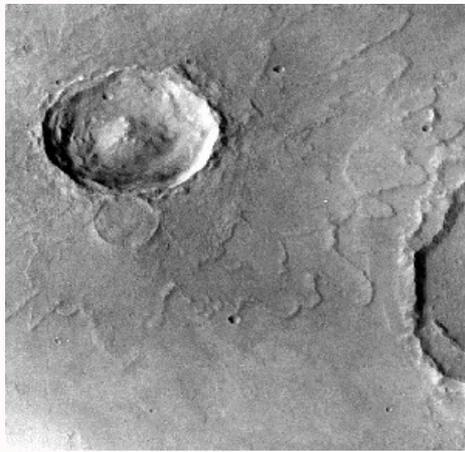


Fig. 4 - Il materiale espulso dall'impatto che ha formato il cratere Yuty ha generato questi caratteristici lobi per il fatto che l'energia dell'impatto ha riscaldato e quindi fuso il ghiaccio che si trovava sotto la superficie, provocando l'emissione di materiale fluido. Strutture di questo tipo sono molto comuni in crateri che si trovano all'equatore e alle medie latitudini di Marte. Il cratere Yuty ha un diametro di 18 km.

Circa 3 miliardi di anni fa Marte era già probabilmente un pianeta estremamente freddo e l'acqua allo stato liquido residua si era già ritirata sotto la superficie portando eventualmente con sé l'emergente biosfera. È possibile pensare che la vita, originatasi su Marte nel periodo di clima clemente, con acqua allo stato liquido sulla superficie, si sia ritirata in oasi profonde dove continua ad essere ancora presente oggi? Oppure in alternativa: è possibile ipotizzare l'insorgere della vita in queste oasi? In entrambi i casi, possiamo pensare che siano presenti tracce fossili nelle rocce della crosta?

Il ritrovamento, in Antartide nel 1984, della meteorite marziana ALH84001, potrebbe fornire informazioni per tentare di rispondere a queste domande. Nell'agosto del 1996 un gruppo di ricercatori della Nasa pubblicava sulla rivista *Science* la notizia della scoperta di possibili tracce di vita marziana nella meteorite. Che essa sia originata da Marte si è capito al di là di ogni ragionevole dubbio, confrontando la composizione isotopica dell'ossigeno e dei gas atmosferici intrappolati con i dati ottenuti dai *lander* della missione *Viking*. Non è possibile sapere da quale parte di Marte provenga, comunque è vecchia di 4,5 miliardi di anni ed è quindi un campione dell'antica crosta. Questa meteorite contiene idrocarburi complessi intrappolati nei carbonati che si sono formati circa 3,9 miliardi di anni fa quando, verso la fine di un periodo di intenso bombardamento, su Marte erano presenti condizioni che hanno permesso l'infiltrazione di fluidi acquiferi attraverso fratture nelle rocce della crosta. Questi eventi sono contemporanei all'apparizione della vita sulla Terra. In tempi più recenti, circa 17 milioni di anni fa, la roccia fu lanciata nello spazio a causa della collisione con un grosso meteorite ed è rimasta in orbita solare fino a che, 13.000 anni fa, è caduta in Antartide.

Al bordo dei globuli di carbonati contenuti in ALH84001 sono state trovate strutture simili a quelle di batteri fossili terrestri, anche se molto più piccole. Alcune di queste strutture si sono poi rivelate artefatti dovuti alla preparazione dei campioni per la microscopia elettronica ed altre possono essersi formate per interazione con l'atmosfera terrestre durante la permanenza sulla Terra, ma ne rimangono alcune che non sono dovute a questi fattori e non sono facilmente interpretabili mediante processi non biologici. Restano, tuttavia, molti dubbi e se, per ora, la presenza di tracce di vita fossile in ALH84001 non può

ancora essere dimostrata, gli studi continuano e non è detto che il futuro non ci riservi interessanti sorprese.

A differenza di Venere e della Terra, su Marte si sono conservate ampie regioni della crosta primordiale che probabilmente contengono ancora tracce della storia primitiva del pianeta rosso. L'eventuale raccolta di informazioni sulla chimica prebiotica, cruciali per comprendere il sorgere della vita sulla Terra, può essere altrettanto importante della scoperta stessa di forme di vita marziana. È per questo che molti scienziati insistono perché, nonostante i recenti gravi insuccessi, le missioni di esplorazione di Marte continuino.

In anni recenti sul fondo degli oceani terrestri sono state trovate sorgenti calde assai ricche di vita. Queste sorgenti idrotermali si formano quando due placche oceaniche si allontanano e la lava che fuoriesce sostituisce il fondo oceanico. In queste aree sgorgano sorgenti fluide estremamente calde e ricche di minerali. Al contatto con l'acqua fredda dell'oceano si raffreddano rapidamente, depositano i minerali e formano una sorta di camini che si innalzano dal fondo. Tali ambienti sono considerati i più importanti per lo sviluppo delle prime forme di vita sulla Terra e probabilmente anche quelli in cui la vita ha avuto inizio. Questi habitat ospitano diverse comunità di organismi che non hanno bisogno della luce solare per supportare la fotosintesi, ma prosperano sintetizzando composti organici dai materiali inorganici forniti dalle sorgenti. Ci chiediamo: possono semplici comunità di questo tipo essersi sviluppate, in associazione con sorgenti idrotermali, in altre parti del Sistema solare?

Su Marte habitat molto simili potrebbero essersi prodotti e mantenuti da sorgenti interne di calore, generate dall'energia degli impatti e dal decadimento di sorgenti radioattive. Sistemi di circolazione di acqua calda erano inoltre probabilmente diffuse durante la storia primitiva di Marte, particolarmente sui fianchi dei vulcani e dei grandi crateri da impatto e sul fondo delle grandi fosse tettoniche. Per esplorare la possibilità di trovare tracce di questa antica vita marziana dobbiamo innanzitutto localizzare i depositi che, con maggiore probabilità, hanno conservato memorie fossili. Il primo passo è quello di realizzare mappe dettagliate della mineralogia e della composizione chimica della superficie. In questi anni le sonde orbitanti attorno al pianeta, in particolare *Mars Global Surveyor*, che ha terminato la sua missione primaria alla fine del 2000, e *Mars Odyssey* il cui lancio è avvenuto il 7 aprile 2001, dovranno fornire immagini ad alta risoluzione del pianeta che ci permettano di guidare i futuri veicoli destinati ad atterrare verso rocce nelle quali sia più probabile trovare tracce di vita passata. Si dovrebbe poter localizzare depositi sedimentari contenenti acqua sugli altipiani fortemente craterizzati, che si sono formati nelle fasi più antiche della storia del pianeta, quando l'acqua era presente in abbondanza. Inoltre, per poter perforare la crosta alla ricerca di tali strati con presenza di acqua allo stato liquido - e quindi, possibilmente, di vita - occorrono rilevamenti topografici ad alta risoluzione per localizzare concentrazioni di vapore acqueo o di gas idrotermali nell'atmosfera, dove l'acqua del sottosuolo è più vicina alla superficie.

Ripartire a terra campioni di tali zone fornirà materiale per ulteriori ricerche di composti chimici prebiotici o fossili. Ad ogni modo, in questo tipo di ricerche è di fondamentale importanza evitare la contaminazione dell'ambiente: occorre individuare metodiche sicure che ci garantiscano sia dalla contaminazione dei campioni da parte di organismi terrestri, sia dall'introduzione di organismi alieni nella biosfera terrestre. Studi in questo senso sono in corso e coinvolgono l'intera comunità scientifica internazionale: per poter trasferire in sicurezza campioni da Marte sulla Terra il lavoro da compiere è ancora molto.

L'Universo e l'origine della vita

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

Il Sistema solare esterno

Introduzione

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Se ci spostiamo dal Sistema solare interno a quello esterno la situazione, dal punto di vista della possibile presenza di vita, è molto diversa: il calore necessario per la presenza di acqua allo stato liquido non dipende più principalmente dall'energia ricevuta dal Sole, ma da quella prodotta all'interno per effetto della forza gravitazionale e del decadimento radioattivo. All'interno di alcuni satelliti dei pianeti giganti (i cosiddetti satelliti di ghiaccio), dove le forze di marea indotte dal pianeta stirano e distorcono la crosta causando l'innalzamento della temperatura oltre il punto di fusione, può essere presente acqua allo stato liquido .

Probabilmente la manifestazione più spettacolare di tali fenomeni mareali è il satellite di Giove Io, che è di gran lunga l'oggetto col maggior numero di vulcani attivi di tutto il Sistema solare, almeno allo stato attuale. Dal suo interno sgorga continuamente zolfo allo stato liquido a causa delle imponenti deformazioni provocate dalle maree dovute all'attrazione gravitazionale di Giove. Difficilmente l'ambiente di Io può essere pensato come ospitale per la vita, ma non è così per gli altri tre satelliti maggiori: Europa, Ganimede e Callisto.

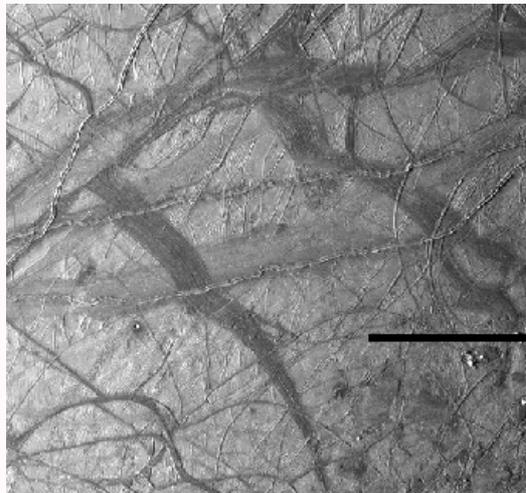


Figura 5 - Questa immagine mostra un'area, solcata da fratture e creste, di circa 200 km di lato sul satellite di Giove Europa. Queste strutture fanno pensare che alcune zone della superficie del satellite siano recenti e si siano formate mediante processi simili a quelli che hanno formato il fondo dei mari terrestri.

La superficie di Europa è poco accidentata e praticamente priva di crateri da impatto, il che fa pensare che sia completamente rinnovata da processi endogeni. Le spettacolari immagini riprese dalla sonda *Galileo* rivelano complesse fratture crostali contornate da materiale più scuro: fratture di età diversa che si incrociano l'una con l'altra e vaste regioni suddivise in blocchi, alcuni dei quali sembrano galleggiare come iceberg su una distesa di

ghiaccio. Si sono trovati anche segni di ghiaccio giovane, fuoriuscito dal sottosuolo, che ricopre le vecchie strutture superficiali. Mentre gli scienziati discutono sul come si possono essere formate queste strutture, una ipotesi interessante si fa strada, che il ghiaccio, ricco di minerali e di materiale organico, si sia formato per l'affioramento di acqua nelle fratture fra le placche. Nonostante i molti problemi irrisolti, questa ipotesi suggerisce la presenza, nel sottosuolo, di un oceano ricco di composti organici, generato dal riscaldamento provocato dalle forze mareali. Dove c'è acqua ed il giusto miscuglio di molecole organiche, ci può essere vita. Alcuni ricercatori hanno poi ventilato la possibilità che sul fondo dell'oceano di Europa possano esistere sorgenti idrotermali analoghe a quelle che si trovano sulla Terra nel fondo delle fosse oceaniche. Sappiamo che sulla Terra tali sorgenti brulicano di vita e possono sostenere colonie di forme complesse. Forse in futuro si potrà dimostrare che ciò è vero anche per Europa! Anche se ciò non avvenisse, è comunque possibile che il ghiaccio contenga prove di chimica prebiotica o tracce fossili di antichi viventi.



Figura 6. Terreni misti assieme ad un grande cratere da impatto nella regione di Uruk Sulcus su Ganimede. Alcune strutture sono simili a quelle trovate su Europa. L'immagine rappresenta un'area di 55x35 km.

La massa di Ganimede è costituita per circa la metà di acqua. Simile ad Europa, è anch'esso ricoperto da una crosta di ghiaccio fratturata ed in movimento. Catene montuose con creste aguzze solcano la superficie per centinaia di chilometri, testimoni di una antica attività tettonica. Ci si domanda: anche Ganimede ospita al suo interno zone di acqua allo stato liquido nelle quali l'evoluzione chimica può aver prodotto la vita? Domande simili ce le possiamo porre anche per la maggior parte degli altri satelliti di ghiaccio del Sistema solare esterno come Callisto, Encelado, satellite di Saturno, e Tritone, di Urano, che mostrano tutti caratteristiche simili. Come Marte, anche i pianeti esterni e le loro lune possono essere considerati come una sorta di importante laboratorio naturale mediante il quale cercare di capire l'evoluzione chimica che ha portato alla comparsa ed alla prima evoluzione della vita sulla Terra.



Figura 7. Un disegno di fantasia che mostra la sonda Huygens che scende sulla superficie di Titano caratterizzata da ampie distese di metano liquido.

Da questo punto di vista, è interessante prendere in considerazione Titano, il maggiore dei satelliti di Saturno. La sua atmosfera, circa il 50% più densa di quella della Terra, interagisce con le particelle del vento solare intrappolate dal campo magnetico di Saturno. Tale interazione innesca catene di reazioni nell'atmosfera che spaccano le molecole dell'azoto (N_2) e del metano (CH_4), e dalla ricombinazione dei prodotti si formano molecole organiche complesse. (Si pensa che processi di questo tipo siano quelli che hanno dato origine alla vita sulla Terra). Le reazioni che avvengono nell'atmosfera possono creare catene molecolari sufficientemente pesanti da "piovere" sulla superficie di Titano. A $-179^\circ C$, la superficie è certamente troppo fredda per ospitare la vita. Ma c'è chi ha speculato che, fra qualche miliardo di anni, quando il Sole avrà terminato di bruciare il suo idrogeno e si espanderà fino ad inglobare i pianeti più interni, la superficie di Titano diventerà una vera oasi, nella quale potrà avere di nuovo origine la vita. Intanto la sonda *Cassini*, partita il 15 ottobre 1997, ha appena superato il sistema di Giove ed è in viaggio verso Saturno, che raggiungerà all'inizio di luglio del 2004. Nel novembre dello stesso anno lancerà attraverso l'atmosfera di Titano la sonda *Huygens*, che ci fornirà preziose informazioni sul satellite.

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

[Home](#)

Conclusioni

[Introduzione](#)

[L'inizio della vita sulla Terra](#)

[Acqua su Venere?](#)

[Alla ricerca della vita marziana](#)

[Il Sistema solare esterno](#)

[Conclusioni](#)

La raccolta di ulteriori e più approfondite conoscenze sui pianeti e i satelliti, che abbiamo descritto come probabili candidati ad ospitare forme di vita, continua, ma richiederà tempi molto lunghi. Nel frattempo, soprattutto a partire dagli ultimi due decenni, la ricerca, sulla Terra, della presenza di esseri viventi in ambienti estremi continua e la connessione con la ricerca di vita su altri pianeti è evidente. Sappiamo, ad esempio, che anche sulla Terra possiamo trovare plaghe che possono simulare abbastanza bene il clima freddo e secco di Marte. Certe valli antartiche e i loro laghi permanentemente coperti di ghiaccio possono ricordare da vicino la situazione passata di Marte. Solo recentemente sono stati scoperti abitanti della Terra che vivono nella crosta a molti chilometri di profondità; le loro possibili controparti marziane potrebbero essere quanto resta di una biologia un tempo molto più estesa.

Quando guardiamo con meraviglia comunità di misteriosi bivalvi e di vermi esotici che prosperano attorno ai camini vulcanici nelle profondità dell'oceano, siamo colpiti dal fatto che sopravvivono senza utilizzare l'energia che viene dal Sole; ma, forse, nel profondo e oscuro oceano di Europa o di altri satelliti di ghiaccio, tali comunità possono essere la norma. Saremo più preparati a riconoscerli e a studiarli se le nostre menti si saranno aperte attraverso lo studio della biologia terrestre. A questo proposito sarà cruciale capire se questi ambienti estremi sono in grado di mantenere la vita sufficientemente a lungo per poter ipotizzare che su altri pianeti eventuali esseri viventi possano essersi sviluppati in tempi lunghi. Fino a tempi piuttosto recenti il parere della comunità scientifica era negativo. Ora, man mano che si trovano fossili sempre più antichi, stiamo convincendoci che la vita sia nata e si sia sviluppata in un periodo straordinariamente breve e ciò può significare che abbiamo fortemente sovrastimato il periodo di tempo necessario perché la vita sorga e si sviluppi. Inoltre vi sono indizi che ci fanno pensare che la vita nel nostro pianeta possa aver avuto origine in un ambiente caldo, ricco di zolfo e privo di ossigeno: ambiente che oggi potremo solo definire "estremo"!

L'Universo e l'origine della vita

I pianeti e la vita

Pierluigi Battistini

Letture

Introduzione

L'inizio della vita sulla Terra

Acqua su Venere?

Alla ricerca della vita marziana

Il Sistema solare esterno

Conclusioni

Letture

Libri

Vari articoli sono stati pubblicati negli ultimi tempi nelle tre principali riviste italiane di divulgazione astronomica:

l'Astronomia

(edizioni Media Presse s.r.l., via Nino Bixio 30, 20129 Milano),

Coelum Astronomia

(edizioni Scientifiche Coelum, via Appia 18, 30170 Venezia-Mestre, internet: <http://www.coelum.com>),

Nuovo Orione

(Sirio s.r.l., via Bronzino 3, 20133 Milano, internet: <http://www.orione.it>).

In particolare citiamo un bell'articolo di rassegna di Cesare Guaita: "L'acqua su Marte: tutta la verità", in *Nuovo Orione*, n.102, 2000, pp.32-45;

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Introduzione

Introduzione

Carboidrati

Amminoacidi e proteine

Acidi nucleici

Glossario

La maggior parte delle molecole presenti nelle cellule animali e vegetali, a parte l'acqua, è costituita da sistemi di grosse dimensioni (*macromolecole*), dove centinaia o migliaia di atomi sono connessi da legami chimici.

Nonostante l'enorme complessità dei sistemi biologici e il numero elevato di elementi chimici disponibili sul pianeta, queste macromolecole sono composte principalmente da idrogeno, carbonio, azoto e ossigeno. Sebbene presenti in minore quantità, anche fosforo e zolfo giocano ruoli fondamentali nella struttura e nel metabolismo cellulare. Oltre a questi sei elementi, solo piccole quantità di metalli o alogeni entrano nella costruzione delle molecole biologiche, le quali possono essere classificate in quattro categorie principali: *carboidrati*, *proteine*, *acidi nucleici* e *lipidi*.

I *carboidrati* sono le molecole organiche più abbondanti in natura. Essi sono costituiti, fondamentalmente, da strutture idrocarburiche alle quali sono legati molti gruppi polari (essenzialmente gruppi OH) che rendono queste molecole altamente solubili in acqua. I carboidrati sono spesso rappresentati da grossi polimeri, noti come *polisaccaridi*, le cui unità *monomere* hanno struttura ciclica (anelli a cinque o sei membri come glucosio e fruttosio) legate fra di loro a formare lunghe catene lineari o ramificate. Le funzioni svolte dai carboidrati sono molteplici: essi rappresentano *una riserva di energia chimica* (glucosio, amido, glicogeno), sono parti essenziali delle *strutture di supporto* delle piante (cellulosa), così come delle pareti cellulari batteriche, e rappresentano *componenti fondamentali degli acidi nucleici* (D-ribosio e 2-deossi-D-ribosio).

Le *proteine* costituiscono un altro importantissimo gruppo di polimeri biologici con una grande versatilità di funzioni. Gli *enzimi*, ad esempio, sono una classe di molecole proteiche estremamente specializzate, con la funzione di catalizzare e regolarizzare le reazioni cellulari. Altre proteine sono deputate a funzioni di trasporto: l'emoglobina trasporta ossigeno dai polmoni alle zone dell'organismo che lo richiedono. Un ruolo analogo è svolto dalle emocianine nel caso, ad esempio, degli artropodi. Vi sono poi proteine che svolgono la funzione di supporti strutturali: il collagene, ad esempio, è la proteina principale del tessuto connettivo e delle ossa.

Gli *acidi nucleici* sono certamente le macromolecole di maggiori dimensioni presenti nella cellula. Queste molecole, che hanno la funzione di replicare e trascrivere l'informazione genetica, sono costituite da polimeri di due tipi: *acidi deossiribonucleici (DNA)* e *acidi ribonucleici (RNA)*. Il DNA può essere definito come la molecola dell'eredità ed è il depositario dell'informazione genetica nelle cellule. Esso tuttavia non viene utilizzato direttamente nella sintesi delle proteine. Questa funzione è invece assolta dall'RNA che ha il compito di effettuare la trascrizione e la traduzione di questa informazione. Il flusso dell'informazione genetica può quindi essere diviso in due stadi fondamentali: DNA \Rightarrow (trascrizione) \Rightarrow RNA \Rightarrow (traduzione) \Rightarrow Sintesi

delle proteine. Una interessante eccezione a questo meccanismo è rappresentata da alcuni virus (retrovirus), nei quali l'informazione genetica è immagazzinata sotto forma di RNA anziché di DNA.

Infine, ricordiamo brevemente i *lipidi*, anche se questi non verranno trattati in dettaglio nelle successive sezioni. I *lipidi*, rappresentano una classe eterogenea di composti organici presenti in natura, che vengono raggruppati non tanto sulla base di gruppi funzionali specifici, quanto sulla base di proprietà comuni di solubilità. Essi hanno pochissima tendenza a essere solubili in acqua, ma sono fortemente solubili in solventi organici aprotici (per esempio dietilere e acetone). Da questo punto di vista, dunque, il loro comportamento è molto diverso da quello di carboidrati, acidi nucleici e amminoacidi, che sono praticamente insolubili in solventi organici. Si possono suddividere i lipidi in due gruppi principali. Il primo gruppo è costituito dai lipidi strutturalmente caratterizzati da una porzione non-polare di grosse dimensioni (*parte idrofobica*) e da una porzione più piccola polare (*parte idrofila*). I triacilgliceroli, i fosfolipidi, le prostaglandine e le vitamine idro-solubili fanno parte di questo primo gruppo. Il secondo gruppo è invece costituito da composti che contengono il cosiddetto nucleo steroideo, un sistema tetraciclico di anelli che caratterizza, ad esempio, il colesterolo, gli ormoni steroidei e gli acidi biliari.

Nei paragrafi successivi esamineremo in dettaglio soprattutto la chimica di carboidrati e proteine, mentre descriveremo solo parzialmente gli acidi nucleici, facendo soprattutto riferimento alla struttura del DNA e al suo meccanismo di replicazione.

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Carboidrati

Introduzione

Carboidrati

1. Struttura dei carboidrati: monosaccaridi

2. Struttura dei disaccaridi

3. Polisaccaridi

Amminoacidi e proteine

Acidi nucleici

Glossario

I carboidrati sono una classe di composti costituiti da idrogeno, carbonio e ossigeno, il cui nome è dovuto al fatto che esso venne suggerito inizialmente per indicare un gruppo di composti organici, isolabili da sostanze naturali, di formula generale $C_n(H_2O)_m$, formalmente corrispondenti a idrati del carbonio. Dal punto di vista chimico i carboidrati corrispondono a *polidrossialdeidi* o *polidrossichetoni* oppure a composti in grado di produrre queste molecole per idrolisi. Questa definizione identifica immediatamente i gruppi funzionali presenti: gruppo *aldeidico* (CHO), gruppo *chetonico* (C=O) e *funzioni alcoliche* OH. La presenza simultanea dei gruppi OH e del gruppo aldeidico o chetonico, tuttavia, fa sì che la forma effettiva prevalente sia quella *emiacetalica* o *emichetalica* come vedremo nel seguito. Nella nomenclatura usualmente utilizzata per questi composti, vengono indicati come *monosaccaridi* o *monosi* i carboidrati che non sono in grado, per idrolisi, di dar luogo a zuccheri più semplici, il termine *disaccaride* indica uno zucchero in grado di fornire due unità monosaccaridiche, il termine *trisaccaride* tre unità monosaccaridiche e così via. I termini *oligosaccaride* e *polisaccaride* indicano, invece, zuccheri che, idrolizzati, danno da 2 a 10 molecole di monosaccaride o più di 10 rispettivamente. Esempi di monosaccaridi fortemente diffusi in natura sono il glucosio e il fruttosio, disaccaridi molto comuni sono il saccarosio (il comune zucchero da tavola) che può essere scisso in una molecola di glucosio e una di fruttosio e il maltosio che invece, idrolizzato, dà due unità di glucosio. Un polisaccaride estremamente diffuso è la cellulosa. La cellulosa, come anche l'amido, non è altro che un polimero del glucosio. Entrambi, sottoposti a idrolisi, danno molte unità di glucosio.

I monosaccaridi si possono classificare in base

- al numero di atomi di carbonio presenti nella molecola (si utilizzano i termini *triosi*, *tetrosi*, *pentosi*, *esosi*, per indicare tre, quattro, cinque, sei atomi di carbonio rispettivamente) oppure
- in base alla funzione aldeidica (*aldosi*) o chetonica (*chetosi*) presente.

Le due diverse terminologie si possono combinare tra di loro; così, un monosaccaride con sei atomi di carbonio e una funzione aldeidica diventa un *aldoesoso*, mentre se gli atomi di carbonio sono cinque e la funzione è di tipo chetonico si parla di *chetopentoso*

Struttura dei carboidrati: monosaccaridi

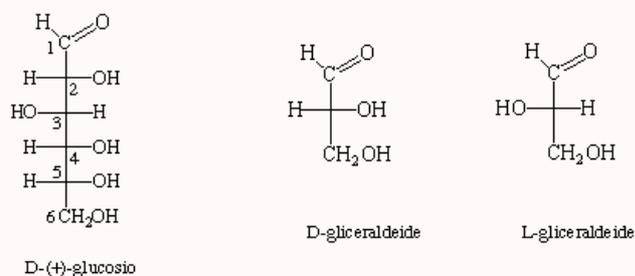


Figura 1. Struttura lineare del D-(+)-glucosio (secondo la proiezione di Fisher) e rappresentazione dei due enantiomeri D e L della gliceraldeide.

Esaminiamo in dettaglio la struttura del monosaccaride più diffuso in natura: il D-(+)-glucosio, un aldoseso, mostrato in Figura 1. Il simbolo (+) indica che questo zucchero, come gli altri monosaccaridi, è otticamente attivo e ha la capacità di ruotare in senso orario il piano della luce polarizzata. Il simbolo D fa riferimento all'ultimo carbonio chirale (C5) e indica che la configurazione di quest'ultimo è la stessa del carbonio chirale della D-gliceraldeide. I due enantiomeri D e L della gliceraldeide sono mostrati anch'essi in Figura 1. La configurazione D o L della gliceraldeide può essere collegata facilmente a quella dei monosi, poiché tutti i monosi possono essere preparati a partire da questa molecola mediante una serie di allungamenti successivi della catena di atomi di carbonio (sintesi di Kiliani-Fisher). Per questo motivo si dice che un monosaccaride è di *serie D* o *serie L* a seconda che l'ultimo atomo di carbonio chirale della catena abbia la stessa configurazione della D o della L-gliceraldeide.

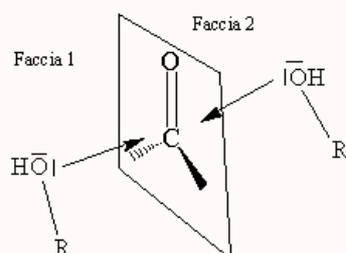


Figura 2. Rappresentazione schematica dell'attacco da parte del gruppo OH di un alcool sul carbonio carbonilico: l'attacco può avvenire su entrambe le facce del piano molecolare e porta alla formazione di due atomi di carbonio chirali con configurazione opposta. R indica lo scheletro residuo della molecola contenente la funzione alcolica.

La forma prevalente nella quale si trova il glucosio non è, in realtà, quella lineare corrispondente alla proiezione di Fisher e mostrata in Figura 1, ma una struttura ciclica, corrispondente, da un punto di vista chimico, ad un *emiacetale*. La struttura ciclica emiacetale si forma in seguito all'attacco da parte dell'ossigeno (nucleofilo) della funzione alcolica (gruppo OH) legata al carbonio 5 sul carbonio carbonilico (elettrofilo) della funzione aldeidica CHO. Poiché il carbonio carbonilico, caratterizzato da una ibridizzazione sp^2 , ha una struttura planare (i tre leganti del carbonio e il carbonio stesso stanno tutti sul medesimo piano), l'attacco da parte del gruppo OH può avvenire su entrambe le facce del piano della molecola (i due possibili attacchi sono schematizzati in Figura 2). Questo ha una conseguenza molto importante: il nuovo *centro chirale* che si forma in seguito all'attacco, può avere due diverse configurazioni a seconda della faccia sulla quale tale attacco è avvenuto. Per questo motivo le corrispondenti forme cicliche risultanti non sono altro che due diversi *diastereoisomeri* che differiscono per la sola configurazione del nuovo centro chirale che si è formato (la configurazione

di tutti gli altri centri chirali rimane invariata rispetto alla forma aperta). Esse vengono indicate con il termine specifico di *anomeri*: *anomero α* e *anomero β* . I due anomeri sono rappresentati in Figura 3 secondo due diverse convenzioni. La prima rappresentazione (in alto) è stata ottenuta utilizzando le formule di Haworth. Come si vede nel caso dell'anomero α il gruppo OH legato al carbonio emiacetalico (C1) è in posizione *cis* rispetto al gruppo OH adiacente, mentre nel caso dell'anomero β esso si trova in posizione *trans*. Una migliore rappresentazione, che riproduce in modo più realistico l'effettiva struttura tridimensionale della molecola, è costituita dalle strutture a sedia riportate in basso in Figura 3. Da queste strutture, che rappresentano le conformazioni più stabili dei due anomeri, è evidente come i gruppi più ingombranti attaccati agli atomi di carbonio dell'anello (OH e CH₂OH) siano in posizione equatoriale. Fa eccezione il gruppo OH del carbonio C1 (carbonio anomero) che è equatoriale nel caso dell'anomero β , ma diventa assiale nel caso dell'anomero α . La posizione assiale del gruppo OH è responsabile della minore stabilità dell'anomero α rispetto a quello β . La diversa energia dei due anomeri fa sì che in soluzione il β -D-glucosio sia notevolmente più abbondante (circa 64%) dell' α -D-glucosio (circa 36%). In realtà in soluzione si instaura un equilibrio fra le due forme emiacetaliche e la forma aperta aldeidica che è presente in una percentuale molto bassa (circa 0,02%).

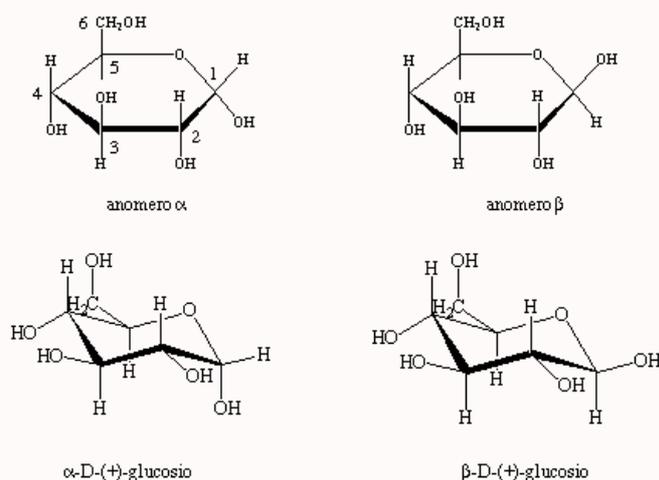


Figura 3. Proiezioni di Haworth (in alto) e conformazioni a sedia (in basso) dei due anomeri α e β del D-(+)-glucosio.

Questo equilibrio è responsabile di un fenomeno caratteristico di molti zuccheri detto *mutarotazione*. Il D-(+)-glucosio può essere isolato in due forme cristalline diverse corrispondenti a ciascuno dei due anomeri: α -D-glucosio e β -D-glucosio. I due anomeri, in quanto diastereomeri, sono caratterizzati da proprietà fisiche diverse: il primo, ad esempio, ha un punto di fusione di 146 °C e il secondo di 150 °C. Anche il *potere rotatorio specifico* delle soluzioni dei due anomeri appena preparate è diverso: nel primo caso esso è di +112°, nel secondo caso di +18,7°. Il fatto curioso che però contraddistingue questa proprietà fisica è il seguente: per entrambe le soluzioni acquose ottenute dai due anomeri separati, essa cambia nel tempo fino a raggiungere in entrambi i casi lo stesso valore di +52,6°. Questo fenomeno viene interpretato sulla base dell'equilibrio fra le due forme anomeriche e la forma aperta. L'anomero α contenuto nella prima soluzione si converte lentamente, attraverso la forma aperta, nell'anomero β fino a che i due anomeri non raggiungono l'equilibrio. Lo stesso succede per la seconda soluzione ottenuta a partire dall'anomero β . Il potere rotatorio finale misurato, pari a 52,6°, è quello della miscela finale di equilibrio dei due anomeri.

Un altro monosaccaride molto diffuso è il D-(-)-fruttosio. Il fruttosio è caratterizzato da un gruppo funzionale chetonico e da una catena di sei atomi di carbonio (si tratta quindi di un *chetoesoso*). La forma aperta di questo monosaccaride è rappresentata sotto forma di proiezione di Fisher in Figura 4. Anche in questo caso la presenza di funzioni alcoliche e di un gruppo carbonilico dà luogo alla formazione di strutture cicliche emiacetaliche. Oltre alla forma ciclica a sei membri descritta nel caso del glucosio, si forma in questo caso anche una struttura emiacetalica a cinque membri che deriva da un attacco del gruppo OH legato al carbonio C5 sul carbonio carbonilico (gruppo C=O). Anche in questo caso si possono avere due diverse forme anomere a seconda della direzione d'attacco del gruppo OH e della risultante configurazione del carbonio emiacetalico (C2). Le due forme anomere sono rappresentate, in Figura 4. Insieme alle strutture cicliche a sei membri esse sono in equilibrio con la forma aperta chetonica al centro.

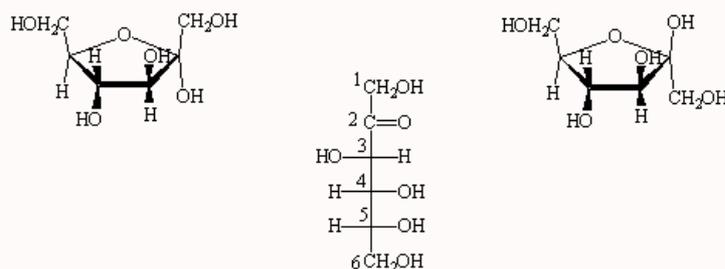


Figura 4. Rappresentazione del D-(-)-fruttosio in forma aperta chetonica (proiezione di Fisher) e delle due forme emiacetaliche furanosiche α -D-(-)-fruttofuranosio e β -D-(-)-fruttofuranosio.

Per indicare le dimensioni del ciclo è stato proposto per gli zuccheri un sistema di nomenclatura che utilizza il termine *piranosio* per l'anello a sei membri e il termine *furanosio* per l'anello a cinque membri (i due termini derivano dal nome dei due composti eterociclici ossigenati Pirano e Furano). Utilizzando questo tipo di nomenclatura i nomi completi per i due anomeri del glucosio sono α -D-(+)-glucopiranosio e β -D-(+)-glucopiranosio; quelli per le quattro forme emiacetaliche del fruttosio sono α -D-(-)-fruttofuranosio e β -D-(-)-fruttofuranosio (anelli a cinque termini) e α -D-(-)-fruttopiranosio e β -D-(-)-fruttopiranosio (anelli a sei termini).

La presenza all'equilibrio di una certa percentuale, per quanto ridotta di forma aperta aldeidica o chetonica, è responsabile del fatto che sia il D-glucosio che il D-fruttosio vengano ossidati dagli stessi reattivi in grado di ossidare le aldeidi e gli α -idrossichetoni. I reattivi generalmente usati per ossidare i monosi sono i reattivi di Benedict e di Tollens, l'acqua di bromo e l'acido nitrico. Il reattivo di Tollens, ad esempio, è costituito da una soluzione acquosa di nitrato d'argento e ammoniaca. In questa soluzione è presente il complesso $\text{Ag}(\text{NH}_3)_2^+$, un agente ossidante blando in grado di ossidare il gruppo aldeidico a gruppo carbossilato COO^- . L'argento contemporaneamente si riduce dallo stato +1 ad argento metallico (stato di ossidazione 0), che si deposita sulle pareti della provetta utilizzata per il saggio, formando uno specchio d'argento. Gli zuccheri che danno saggio positivo con i reattivi di Tollens o Benedict sono tutti i carboidrati caratterizzati dalla presenza di un gruppo emiacetalico (come il glucosio) o emichetalico (come il fruttosio). Questi zuccheri sono noti con il termine di *zuccheri riducenti*.

Un monosaccaride può essere convertito in *glicoside* facendolo reagire con un alcool in presenza di un acido. Un glicoside non è altro che la forma *acetale* di uno zucchero e come qualsiasi acetale si ottiene per reazione, catalizzata da

acidi, della forma emiacetalica con un alcool. Il glicoside del glucosio si chiama *glucoside*, quello del fruttosio *fruttoside*.

Le due forme α e β del glicoside del glucosio ottenute per reazione con alcool metilico (metil- α -D-glucoside e metil- β -D-glucoside) sono rappresentate in Figura 5. È importante mettere in evidenza che, mentre per un monosaccaride in soluzione acquosa si ha sempre equilibrio fra i due anomeri e la forma aperta, lo stesso non accade per un glicoside. Un glicoside α o β , in quanto acetale, è stabile in soluzione acquosa e non si converte nell'altro anomero. È quindi evidente che uno zucchero, se trasformato in forma glicosidica (acetale) non può dare mutarotazione, non essendo presente all'equilibrio la forma aldeidica (o chetonica) libera. Per lo stesso motivo i carboidrati che contengono gruppi acetalici (o chetalici) non possono venire ossidati dai reattivi di Benedict e Tollens. Per questo sono detti *zuccheri non riducenti*.

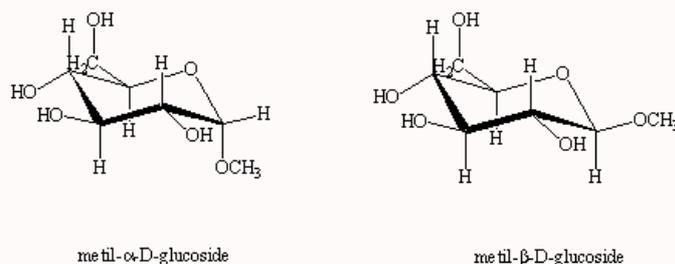


Figura 5. Conformazioni a sedia del metil- α -D-glucoside e metil- β -D-glucoside.

Struttura dei disaccaridi

Nei disaccaridi il legame che unisce le due unità monosaccaridiche è di tipo glicosidico e coinvolge il carbonio C1 di una unità (carbonio anomero) e una funzione alcolica dell'altra unità. Esempi di disaccaridi importanti sono il *maltosio*, il *saccarosio* e il *lattosio*.

Il *maltosio* deve il proprio nome al fatto che è presente nel malto, il liquido che si ottiene dalla fermentazione dell'orzo e di altri cereali. Per idrolisi acida il maltosio fornisce due unità di D-(+)- glucosio le quali sono unite da un legame glicosidico che coinvolge il carbonio C1 (anomero) di una unità e il carbonio C4 dell'altra unità. La struttura del maltosio è rappresentata in Figura 6. Il maltosio esiste sotto forma di due diverse forme anomere che differiscono per la configurazione del carbonio emiacetalico della seconda unità di glucosio e sono caratterizzate da due diversi valori del potere rotatorio specifico (α -maltosio $> +168^\circ$, β -maltosio $> +112^\circ$). Come nel caso del glucosio e del fruttosio, la presenza di un carbonio emiacetalico fa sì che i due anomeri siano in equilibrio fra di loro attraverso la forma aldeidica aperta della seconda unità di glucosio. Il maltosio è quindi caratterizzato dal fenomeno della mutarotazione ed è uno zucchero riducente.

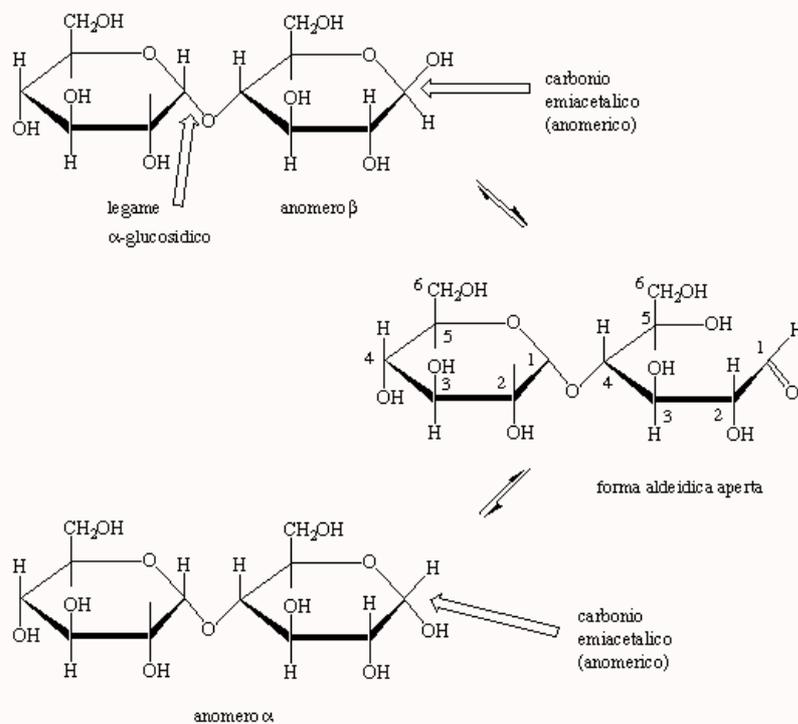


Figura 6. Anomeri α e β del maltosio in equilibrio con la forma aldeidica aperta.

Il saccarosio, che costituisce il normale zucchero da tavola, è ottenuto per estrazione dalla canna da zucchero e dalla barbabietola. Il saccarosio fornisce per idrolisi acida una miscela equimolare di D-glucosio e D-fruttosio. La struttura di questo disaccaride è mostrata in Figura 7. I carboni carbonilici di entrambi i monosaccaridi (C1 del glucosio e C2 del fruttosio) sono impegnati nella formazione di legami glicosidici e sono quindi carboni di tipo acetalico (legame α -glucosidico e β -fruttosidico). Per questo motivi il saccarosio è uno zucchero non riducente. Esso è stabile in soluzione acquosa e non dà quindi mutarotazione.

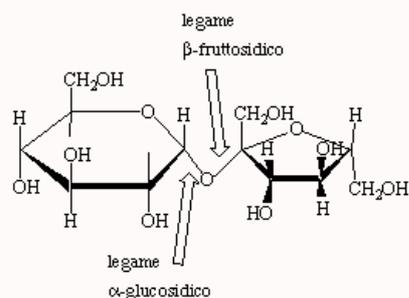


Figura 7. Struttura del (+)-saccarosio.

Per idrolisi parziale della cellulosa si ottiene il cellobosio. Questo disaccaride differisce dal maltosio solo per la configurazione del legame glicosidico: le due unità di glucosio che lo costituiscono sono infatti unite da un legame β -glucosidico come risulta evidente dalla Figura 8, dove è rappresentato l'anomero β . Come il maltosio anche il cellobosio, poiché contiene un carbonio emiacetalico, è uno zucchero riducente ed è caratterizzato dal fenomeno della mutarotazione.

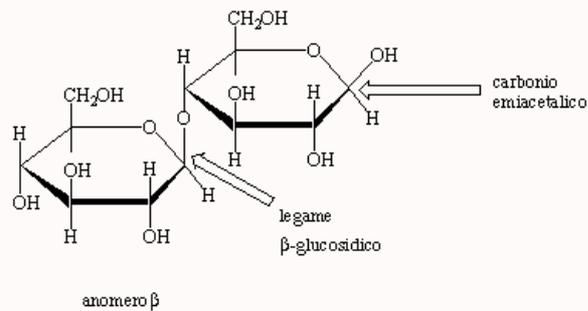


Figura 8. Struttura dell'anomero β del cellobosio.

Polisaccaridi

Un polisaccaride è un composto la cui molecola è costituita da molte unità (centinaia e, a volte, migliaia) monosaccaridiche tenute insieme da legami glicosidici.

La cellulosa, oltre ad essere il polisaccaride più abbondante, è anche il composto organico più diffuso in natura. Stime approssimative indicano che ogni anno ne vengono sintetizzate circa 10^{11} tonnellate. Basta ricordare che il legno, ad esempio, è composto da circa il 50% di cellulosa e il cotone da circa il 90%. L'idrolisi completa della cellulosa (effettuata con una soluzione di HCl al 40%) dà soltanto molecole di D-glucosio, mentre l'idrolisi parziale fornisce cellobosio. Questo indica che il legame che collega le varie unità monosaccaridiche è di tipo β -glucosidico. Anche se il disaccaride cellobosio è uno zucchero riducente e dà mutarotazione, questo non è vero per la cellulosa. Ciò può essere spiegato con il fatto che la probabile presenza di atomi di carbonio emiacetalici solo alla fine di lunghe catene polisaccaridiche (circa 14000 unità) non è sufficiente per osservare le reazioni tipiche associate alla presenza di un carbonio emiacetalico. Una rappresentazione schematica di un tratto di catena di cellulosa è dato in Figura 9.

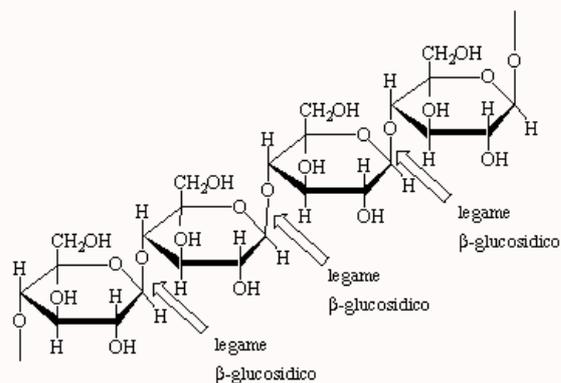


Figura 9. Struttura della cellulosa.

La struttura lineare delle catene di cellulosa fa sì che i gruppi OH, data la loro collocazione equatoriale sull'anello, siano uniformemente diretti verso l'esterno della catena. L'orientazione dei gruppi alcolici fa sì che le varie catene si possano associare saldamente fra di loro grazie alla formazione di legami idrogeno (ogni legame idrogeno coinvolge l'atomo di ossigeno del gruppo OH di una catena e l'idrogeno del gruppo OH di una catena parallela). Queste interazioni attrattive determinano un impaccamento delle varie catene di cellulosa dando luogo a un polimero rigido, fibroso, assai poco solubile e che possiede la resistenza ideale per costruire le pareti delle cellule vegetali.

Il polisaccaride più abbondante dopo la cellulosa è l'amido,

anch'esso formato da unità di glucosio: è presente nelle piante sotto forma di granuli nelle radici, nei tuberi e nei semi. L'amido può essere separato in due polisaccaridi principali: *amilosio* e *amilopectina*. L'amilosio è costituito da catene continue, non ramificate, di unità di D-glucosio (se ne possono avere fino a 4000) e si differenzia dalla cellulosa poiché le varie unità sono legate fra di loro da legami α -glicosidici. L'amilopectina è un polisaccaride strutturalmente più complesso. Esso è caratterizzato da una struttura molto ramificata e contiene due tipi diversi di legami glicosidici: (a) un legame α -glicosidico fra il carbonio C1 di una molecola di glucosio e il carbonio C4 della molecola successiva come nel caso dell'amilosio; (b) un legame α -glicosidico fra gli atomi di carbonio C1 e C6 di due unità di glucosio. I due diversi legami sono mostrati in Figura 10 per un frammento di polimero di amilopectina.

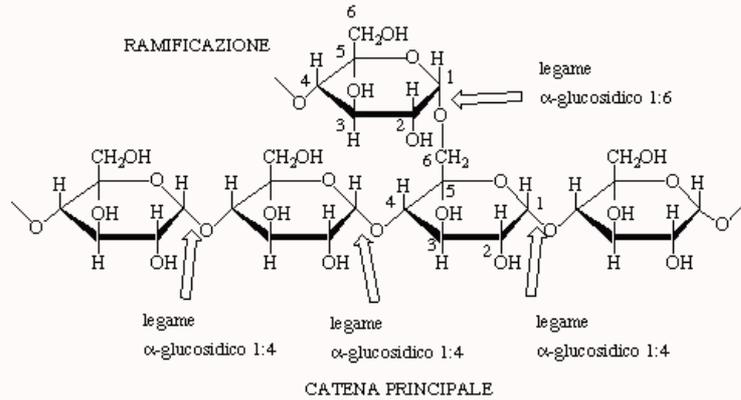


Figura 10. Struttura ramificata dell'amilopectina.

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Amminoacidi e proteine

Introduzione

Carboidrati

Amminoacidi e
proteine

Acidi nucleici

Glossario

Da un punto di vista chimico le proteine non sono altro che delle *poliammidi* dove le unità monomere sono costituite da α -amminoacidi. Gli amminoacidi che si ottengono dall'idrolisi acida o basica delle proteine (una ventina) sono tutti caratterizzati, a parte la glicina che è il più semplice di essi, da un carbonio chirale al quale sono legati i due gruppi funzionali NH_2 e COOH . Questo carbonio ha sempre configurazione L. Tale tipo di notazione, come già fatto notare nel caso degli zuccheri, sta a indicare che il carbonio α degli amminoacidi ha la stessa configurazione del carbonio chirale della L-gliceraldeide. La formula generica di un α -amminoacido è mostrata in Figura 11, dove la configurazione del centro chirale è messa in evidenza tramite una proiezione di Fisher ed è paragonata a quella della L-gliceraldeide.

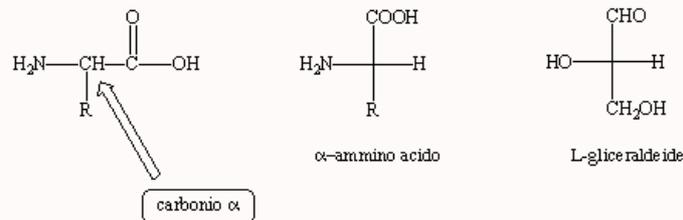


Figura 11. Formula generale di un α -amminoacido. La configurazione del carbonio chirale (carbonio α) è messa in evidenza nella proiezione di Fisher e paragonata a quella della L-gliceraldeide.

Le cellule utilizzano i diversi α -amminoacidi per sintetizzare le proteine necessarie. Gli amminoacidi, a loro volta, possono essere sintetizzati da tutti gli organismi viventi. Tuttavia alcune specie biologiche, fra cui l'uomo, non sono in grado di sintetizzare alcuni degli amminoacidi che compongono le rispettive catene proteiche. Questi amminoacidi *essenziali* devono quindi essere recuperati dall'ambiente esterno tramite la dieta. Le proteine (animali e vegetali) che vengono così ingerite, sono idrolizzate e gli amminoacidi ottenuti vengono ricombinati nell'ordine richiesto per la sintesi delle proteine necessarie. Nel caso degli umani gli amminoacidi essenziali sono otto: Valina (Val), Leucina (Leu), Isoleucina (Ile), Fenilalanina (Phe), Triptofano (Trp), Treonina (Thr), Metionina (Met), Lisina (Lys). La loro struttura è mostrata in Figura 12. Entro parentesi è riportato il simbolo con il quale questi amminoacidi vengono comunemente indicati.

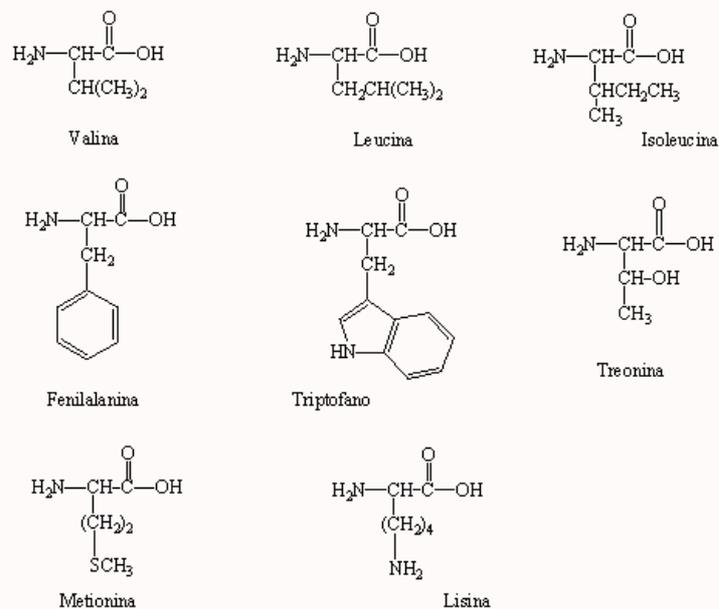


Figura 12. Struttura degli amminoacidi essenziali.

La sequenza con cui i vari amminoacidi si susseguono lungo la catena proteica costituisce la *struttura primaria della proteina*. Quando le catene polimeriche che si ottengono dall'unione dei vari amminoacidi non sono molto lunghe (peso molecolare inferiore a 10.000) si utilizza il termine *polipeptide*, anziché quello di proteina. Più precisamente una molecola formata da due amminoacidi legati da un legame ammidico si chiama *dipeptide*, se gli amminoacidi sono tre (quindi con due legami ammidici presenti) si usa il termine *tripeptide*, e così via fino a dieci. Per un numero di amminoacidi compreso fra dieci e venti si usa il termine *oligopeptide*, mentre il termine *polipeptide* è riservato a molecole formate da molte decine di amminoacidi. La successione di amminoacidi, saldati fra di loro da legami ammidici (comunemente indicati con il termine di *legami peptidici*) viene precisata utilizzando in sequenza i simboli caratteristici dei vari amminoacidi. Per convenzione i vari amminoacidi vengono scritti a partire da sinistra cominciando dall'amminoacido che ha il gruppo NH_2 libero (ovvero non impegnato in un legame peptidico) e procedendo verso destra in direzione dell'amminoacido con il gruppo COOH libero. L'amminoacido a sinistra (NH_2 libero) viene indicato come amminoacido *N-terminale*, mentre quello a destra (gruppo COOH libero) è detto amminoacido *C-terminale*.

La sequenza Gly-Ser-Ala, ad esempio, indica un tripeptide in cui una molecola di glicina (amminoacido N-terminale) è legata ad una molecola di serina (in posizione centrale) e questa, a sua volta, ad una molecola di alanina (amminoacido C-terminale). I legami peptidici coinvolti sono ovviamente due: Gly-Ser e Ser-Ala. La struttura del tripeptide Gly-Ser-Ala è mostrata in Figura 13, con l'indicazione dei legami peptidici presenti.

trascurabile carattere di doppio legame (il che spiega il legame insolitamente corto) e l'azoto avrà una struttura più o meno planare, con angoli vicini a 120° , necessaria per permettere la coniugazione del doppietto elettronico. L'accentuato carattere di doppio legame presente nel legame peptidico impedisce di fatto una libera rotazione attorno all'asse C-N e mantiene questi due atomi e i quattro atomi ad essi legati tutti sullo stesso piano. È invece libera la rotazione attorno ai legami fra il carbonio carbonilico e il carbonio tetraedrico (chirale) e fra quest'ultimo e l'atomo di azoto. Queste caratteristiche strutturali sono di importanza fondamentale nel determinare la struttura secondaria del polipeptide o della proteina.

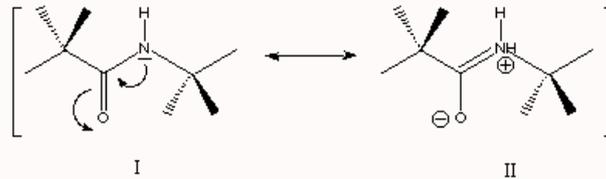


Figura 14. Strutture limiti che descrivono il legame peptidico.

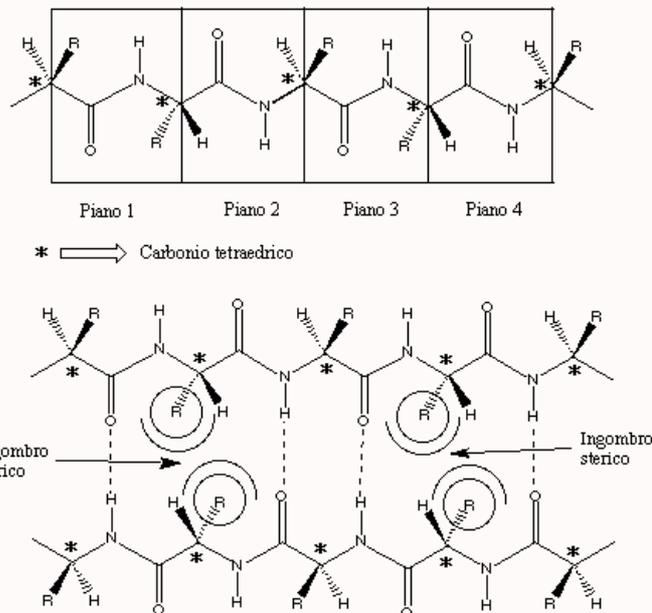


Figura 15. Ipotetica struttura planare di catene polipeptidiche. Nella parte in basso è messa in evidenza l'interazione di due catene, o due segmenti della stessa catena, tramite legami idrogeno.

La *struttura secondaria* riguarda l'orientazione nello spazio dei vari amminoacidi in regioni localizzate di una catena polipeptidica. Consideriamo una ipotetica catena di cui rappresentiamo in Figura 15 (in alto) un breve tratto composto da cinque generici amminoacidi, mettendo in evidenza per ogni monomero l'orientazione corretta dei vari legami. Come si vede la struttura complessiva corrisponde ad una successione di piani (un piano per ogni legame peptidico) tutti coincidenti con il piano del foglio e separati dai gruppi CHR (carbonio tetraedrico chirale). Poiché l'ossigeno del carbonile e l'idrogeno del gruppo NH sono in posizione relativa trans, i gruppi R si trovano alternativamente da una parte e dall'altra rispetto al piano generale dell'intera struttura. Poiché la catena si snoda nello spazio con successivi ripiegamenti (una specie di nastro ripetutamente ripiegato su se stesso), immaginiamo che due segmenti della stessa catena si dispongano paralleli accoppiandosi tramite la formazione di legami idrogeno fra l'atomo di idrogeno del gruppo NH di un segmento e l'ossigeno del gruppo carbonilico dell'altro segmento. Si

ottiene in questo modo la struttura riprodotta in basso in Figura 15. Nonostante l'effetto stabilizzante dei legami idrogeno, tuttavia, la struttura completamente planare mostrata non esiste nelle proteine naturali a causa delle repulsioni steriche che essa comporta fra i gruppi R dei due segmenti di catena affacciati. Nella realtà le catene si contraggono attraverso rotazioni più o meno significative attorno ai legami singoli N-C* e C*-C(carbonilico) che permettono di allontanare i gruppi R ingombranti e allentare la repulsione. A causa di queste rotazioni la struttura da planare diventa corrugata dando luogo a quella che è nota come *struttura β a pieghe* o *configurazione β* . Questo tipo di struttura secondaria è rappresentata schematicamente in Figura 16. Come si vede la struttura tridimensionale della configurazione β può essere assimilata nel suo complesso a una sorta di porta a soffietto (o fisarmonica) nella quale, sugli spigoli formati dai vari piani, si trovano posizionati i carboni tetraedrici C*. In realtà, questo tipo di struttura è in grado di accomodare gruppi R non troppo voluminosi. Questo è quello che accade, per esempio, nel caso della *fibroina*, la proteina della seta, nella quale è presente il 48% di glicina (R=H) e il 38% di serina (R=CH₂OH) e alanina (R=CH₃).

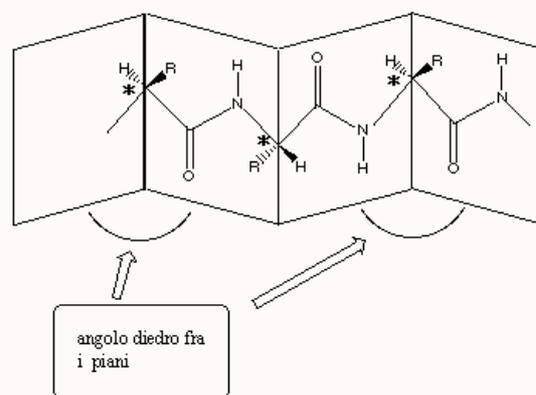


Figura 16. Struttura β a pieghe o configurazione β di una catena proteica.

Se i gruppi R diventano più ingombranti la struttura secondaria preferita è quella indicata con il termine α elica, certamente la struttura secondaria più importante per le proteine naturali. In essa la catena polipeptidica è avvolta a spirale a formare un'elica destrorsa con 3,6 amminoacidi per ogni giro (il termine *destrorsa* sta a indicare che se si gira l'elica in senso orario, questa si avvita allontanandosi dall'osservatore). Questa struttura, riportata in figura 17, è stabilizzata da due fattori:

- Ogni gruppo ammidico della catena forma legami idrogeno con un gruppo ammidico sovrastante e uno sottostante lungo l'elica a una distanza di tre amminoacidi (per la precisione per ogni legame peptidico il gruppo N-H punta verso il basso approssimativamente parallelo all'asse dell'elica e il gruppo C=O in direzione opposta in modo da ottimizzare l'interazione O...H);
- i gruppi R ingombranti sono orientati verso l'esterno dell'elica per minimizzare le repulsioni.

Un esempio di α -elica è dato dalla α -cheratina che costituisce la proteina dei peli, delle unghie e della lana. Un altro esempio è la *miosina* che è la proteina dei muscoli.

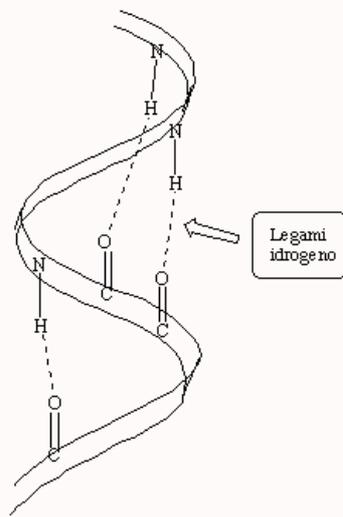


Figura 17. Struttura del tipo α -elica. Sono evidenziati i legami idrogeno fra i gruppi C=O e N-H.

La *struttura terziaria* fa riferimento al ripiegamento nello spazio dell'intera catena proteica. Anche se non esiste una separazione netta fra struttura secondaria e struttura terziaria, si può dire che la prima fa riferimento alla configurazione spaziale degli amminoacidi vicini l'uno all'altro, mentre la seconda tiene conto della distribuzione spaziale di tutti gli atomi di una catena. Così alcuni tratti della catena possono essere presenti sotto forma di α -elica e altri come configurazione β , a seconda del tipo di amminoacidi presenti, mentre i residui segmenti polipeptidici sono caratterizzati da strutture non periodiche, diversamente dalle due precedenti, chiamate *conformazioni a spira* o *ad ansa*. L'intera catena è poi avvolta in modo più o meno complesso a formare la *struttura terziaria*.

Interazioni di varia natura giocano un ruolo importante nel determinare la struttura terziaria:

1. I ripiegamenti della catena proteica avvengono in modo tale da orientare il maggior numero possibile di gruppi polari (*gruppi idrofili*) verso l'ambiente esterno acquoso e i gruppi non polari (*gruppi idrofobi* come quelli di valina, leucina, isoleucina, fenilalanina) verso le zone interne della proteina, il più lontano possibile dalle molecole d'acqua circostanti.
2. Interazioni elettrostatiche fra siti positivi (come ione ammonio) e siti negativi (come ioni carbossilato).
3. Legami idrogeno.
4. Legami disolfuro.

Questi ultimi si formano fra i gruppi CH_2SH di due molecole di cisteina. I gruppi SH si ossidano per formare un legame disolfuro -S-S- fra due segmenti avvolti della stessa catena o fra due catene, come accade, per esempio, nell'*insulina* umana. Questa proteina, in particolare, è costituita da due catene polipeptidiche: le catene A e B formate da 21 e 30 amminoacidi rispettivamente. Due legami -S-S- connettono le due catene in due diverse posizioni: un legame coinvolge la cisteina di A in posizione 7 e la cisteina di B nella stessa posizione, l'altro legame connette le due posizioni 20 e 19 di A e B rispettivamente. Inoltre un legame si instaura all'interno della catena A fra le posizioni 6 e 11. I legami sono indicati schematicamente in Figura 18.

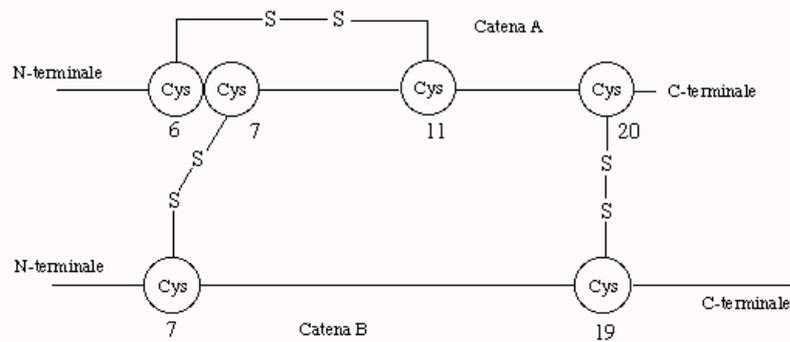


Figura 18. Rappresentazione schematica dell'insulina umana. Sono messi in evidenza i ponti disolfuro intra-catena e inter-catene.

Alcune proteine, dette *proteine globulari*, sono avvolte in modo molto complesso a formare una specie di gomitolo di forma approssimativamente sferica. Un esempio di proteina globulare è la *mioglobina*, una proteina preposta, insieme all'*emoglobina*, suo analogo strutturale, al trasporto e all'immagazzinamento dell'ossigeno nei vertebrati (l'emoglobina lega l'ossigeno molecolare nei polmoni e lo trasporta alla mioglobina nei muscoli; quest'ultima immagazzina l'ossigeno fino a quando esso non viene richiesto per le ossidazioni metaboliche). La struttura tridimensionale della mioglobina è stata determinata in dettaglio. Per questo lavoro fu assegnato il premio Nobel nel 1962 ai due ricercatori britannici J.C. Kendrew e M.F. Perutz. Questa proteina è costituita da una singola catena polipeptidica formata da 153 amminoacidi avvolta su se stessa a formare una specie di scatola. Sono presenti lungo la catena otto sezioni di α -elica, separate da ripiegamenti (anse) della catena, i quali includono circa il 75% del numero complessivo di amminoacidi. Il ripiegamento della catena è tale da orientare verso l'interno i gruppi idrofobi di fenilalanina, valina, isoleucina e metionina, mentre la superficie esterna della molecola è rivestita di catene idrofile come lisina, arginina e serina.

Oltre ad appartenere alla classe delle proteine globulari, la mioglobina, come l'emoglobina, viene anche classificata come *proteina coniugata*. Le proteine coniugate includono una parte non proteica, che può essere, per esempio, uno zucchero, detto *gruppo prostetico*. Nel caso di mioglobina e emoglobina il gruppo prostetico è il gruppo *eme* che occupa una cavità della molecola. L'eme è costituito da uno ione Fe^{2+} che forma quattro legami di coordinazione con gli atomi di azoto di una molecola di porfirina (vedi Figura 19) e un quinto legame, approssimativamente perpendicolare al piano dell'anello porfirinico, con l'azoto dell'anello imidazolico di una istidina appartenente alla catena polipeptidica. Il sesto sito di coordinazione rimane così libero per coordinare una molecola di ossigeno, come mostrato a destra in Figura 19.

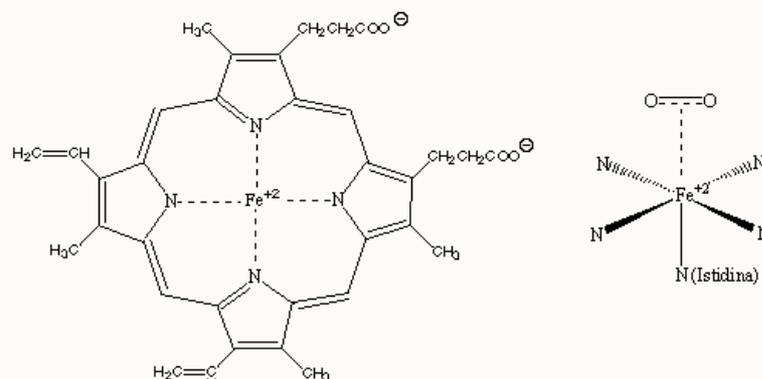


Figura 19. Anello porfirinico con al centro uno ione Fe^{+2} (a sinistra). Coordinazione complessiva dello ione

Fe^{+2} nell'eme (a destra).

Molte proteine di elevato peso molecolare sono in realtà degli aggregati di due o più catene proteiche e sono caratterizzate da una *struttura quaternaria* che corrisponde alla disposizione tridimensionale delle varie catene nell'aggregato. Un esempio di struttura quaternaria è dato nuovamente dall'emoglobina che è costituita da quattro catene separate: due di queste sono costituite da 141 amminoacidi e le rimanenti da 146 amminoacidi ciascuna. Le quattro catene, ognuna delle quali possiede un gruppo eme che può coordinare l'ossigeno, sono disposte in una struttura globale di tipo tetraedrico nella quale l'aggregazione delle quattro unità è stabilizzata principalmente da effetti idrofobici.

L'Universo e l'origine della vita

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Acidi nucleici

Introduzione

Carboidrati

Amminoacidi e proteine

Acidi nucleici

1. La struttura primaria degli acidi nucleici

2. Struttura secondaria del DNA

3. La replicazione del DNA

Glossario

Vi è una certa analogia strutturale fra acidi nucleici e proteine. Così come le proteine sono polimeri lineari di amminoacidi, gli acidi nucleici sono polimeri lineari i cui mattoni costituenti sono i *nucleotidi*. Queste unità monomere possono essere ottenute per degradazione in condizioni blande degli acidi nucleici, mentre un'idrolisi completa (acida, basica o enzimatica) ne fornisce i componenti fondamentali: questi sono rappresentati da uno zucchero (il D-ribosio nel caso dell'RNA e il deossiribosio nel caso del DNA, entrambi in forma furanosica), una base eterociclica (purinica o pirimidinica) e uno ione fosfato. La struttura del β -D-ribosio e del β -2-deossi-ribosio è mostrata in Figura 20 (il termine deossi sta semplicemente a indicare che il gruppo OH in posizione 2 è sostituito da un idrogeno).

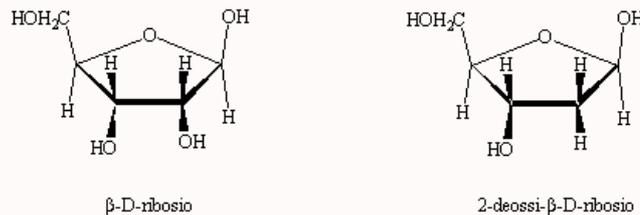


Figura 20. Struttura del β -D-ribosio (RNA) e del 2-deossi- β -D-ribosio (DNA).

Le quattro basi che si ottengono per idrolisi del DNA sono invece mostrate in Figura 21.

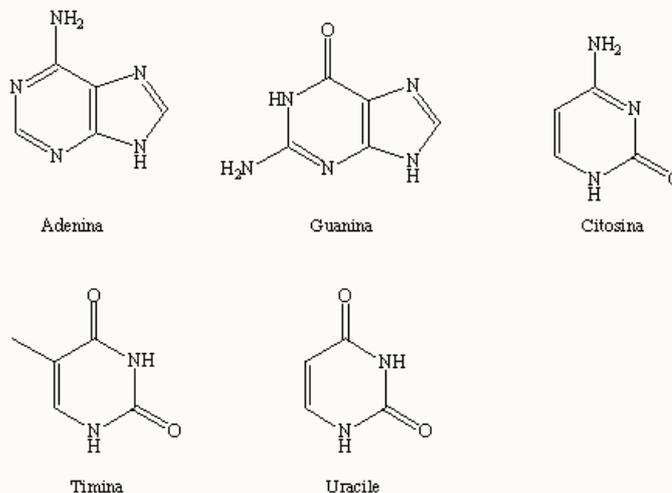


Figura 21. Le basi presenti nel DNA e RNA.

Esse sono l'*adenina*, la *guanina*, la *citosina* e la *timina*. Le basi che si ottengono dall'RNA sono le stesse eccettuata la *timina* che è sostituita dall'*uracile*, anch'esso mostrato in Figura 21. Un *nucleoside* si ottiene combinando una

molecola di D-ribosio (RNA) o di 2-deossiribosio (DNA) con una base eterociclica azotata tramite un legame β -N-glicosidico.

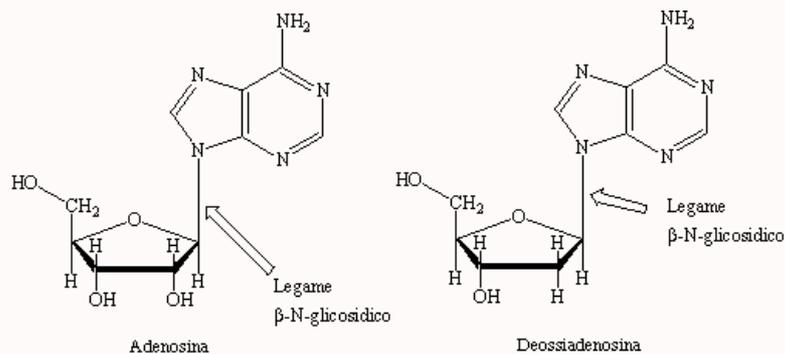


Figura 22. Struttura di due nucleosidi: adenosina (RNA) e deossiadenosina (DNA).

In Figura 22 sono mostrate le strutture di due nucleosidi: uno derivato dall'RNA ed uno dal DNA. Il primo (adenosina) contiene infatti come unità mosaccaridica il D-ribosio legato alla base adenina e il secondo (deossiadenosina) contiene il 2-deossi-D-ribosio legato alla medesima base. Gli altri nucleosidi associati al DNA sono la deossiguanosina (2-deossi-D-ribosio + guanina), la deossicitidina (2-deossi-D-ribosio + citosina), la deossitimidina (2-deossi-D-ribosio + timina). Analogamente, i rimanenti nucleosidi per l'RNA sono la guanosina (D-ribosio + guanina), la citidina (D-ribosio + timina) e l'uridina (D-ribosio + uracile). Un *nucleotide*, che costituisce la vera unità monomera dell'acido nucleico, può essere ottenuto da un nucleoside esterificando una molecola di acido fosforico con un ossidrile libero della componente monosaccaridica, normalmente l'ossidrile attaccato al carbonio C3' o C5' (nei nucleotidi gli atomi di carbonio dello zucchero sono indicati con i numeri 1', 2', 3', ...). La struttura generale di un nucleotide del DNA, in cui l'esterificazione è avvenuta sul gruppo OH in posizione 5', è mostrata in Figura 23.

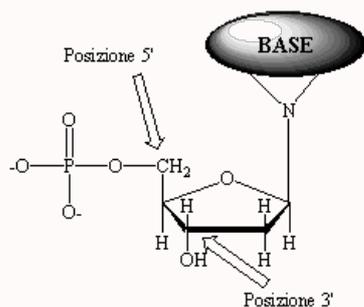


Figura 23. Struttura generale di un nucleotide. Sono messe in evidenza le posizioni 3' e 5' sulle quali può avvenire l'esterificazione.

Nel seguito di questa sezione focalizzeremo la nostra attenzione soprattutto sul DNA di cui esamineremo a grandi linee la struttura fondamentale e il meccanismo di replicazione.

1. La struttura primaria degli acidi nucleici

Esaminiamo ora la sequenza con cui i vari monomeri si succedono lungo la catena di un acido nucleico a formare lo *scheletro covalente* o *struttura primaria* del polimero. Se consideriamo un filamento di DNA, lo scheletro è costituito da unità alternate di deossiribosio legato ad una base

(nucleoside), e di fosfato. L'acido fosforico è doppiamente esterificato e forma un ponte fra il carbonio C3' di un nucleoside e il carbonio C5' di un altro nucleoside. Le basi eterocicliche, legate al carbonio anomero C1', si distaccano dall'ossatura del polimero costituita dall'alternarsi di unità di acido fosforico e di zucchero. Una rappresentazione schematica della struttura primaria di un tratto di filamento di DNA è riportata in Figura 24. La *sequenza delle basi*, ovvero l'ordine con cui le varie basi si succedono lungo la catena, può essere specificato elencando semplicemente le lettere che indicano le singole basi, partendo, a sinistra, dall'estremità della catena con il gruppo OH in posizione 5' libero e procedendo verso destra in direzione della posizione 3' libera. I simboli che vengono utilizzati per le varie basi sono le lettere (maiuscole) iniziali del nome: A=adenina, G=guanina, C=citosina, T=timina, U=uracile.

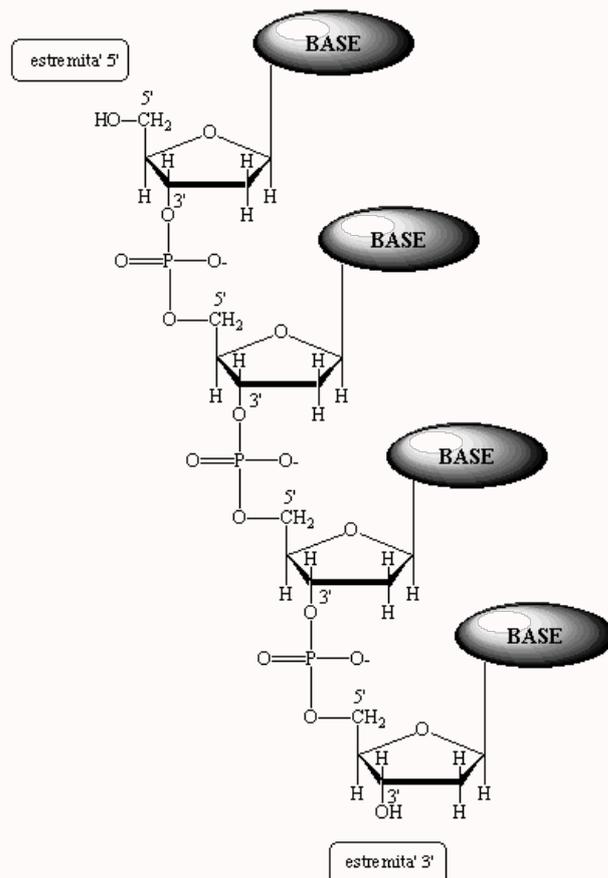


Figura 24. Struttura primaria del DNA. La base può essere citosina, timina, adenina, guanina.

2. Struttura secondaria del DNA

Come nel caso delle proteine anche gli acidi nucleici sono caratterizzati da una *struttura secondaria*. Un modello per la struttura secondaria del DNA fu proposto nel 1953 da J.D. Watson e F.H.C. Crick e fu confermato nel 1962 da M. Wilkins tramite tecniche ai raggi X. Secondo questo modello due lunghe catene di DNA sono avvolte in una *doppia elica* attorno allo stesso asse. Le due catene polimeriche sono disposte parallelamente l'una all'altra, ma corrono in direzione opposta: questo significa che a entrambe le estremità della doppia elica è presente l'estremità 5' di un filamento e l'estremità 3' dell'altro filamento. Le due eliche destrorse sono orientate in modo tale da avere lo scheletro di zucchero e fosfato nella parte esterna della struttura con le basi rivolte verso l'interno. Legami idrogeno fra le basi tengono insieme la doppia elica. L'ampiezza massima della spirale è di 20 Å. Dieci coppie successive di nucleotidi, con dieci coppie di basi, danno luogo ad un giro completo della

spirale. Due diverse rappresentazioni molto schematiche dei due filamenti della doppia elica che corrono paralleli, ma in senso opposto, con le varie basi accoppiate fra di loro, sono date in Figura 25.

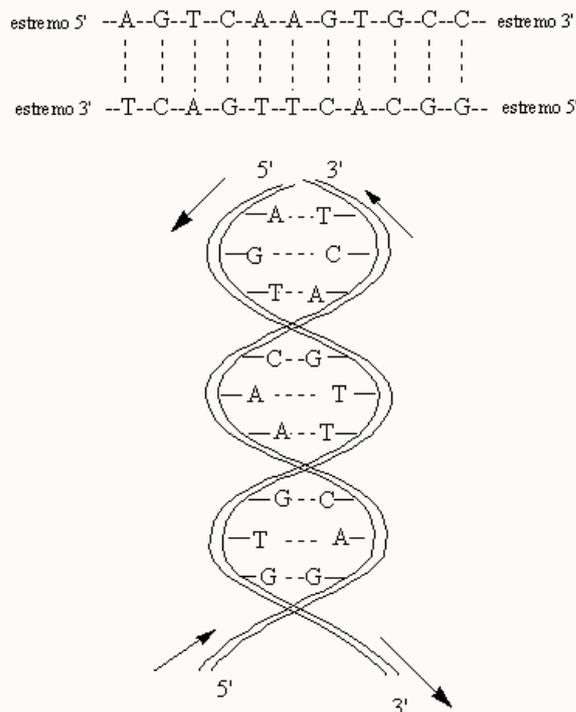


Figura 25. Due rappresentazioni schematiche del modello a doppia elica del DNA. Sono evidenti gli accoppiamenti fra le varie basi.

I legami idrogeno che tengono insieme la doppia elica non possono formarsi in modo casuale, ma devono formarsi solo fra specifiche coppie di basi. Le coppie consentite nel caso del DNA sono: *adenina-timina* (A-T) e *citosina-guanina* (C-G). Le due basi adenina e timina possono interagire tramite due forti legami idrogeno, mentre citosina e guanina possono formare tre legami idrogeno. L'effetto stabilizzante complessivo dovuto a queste interazioni è di circa 10 kcal/mol nel primo caso e circa 17 kcal/mol nel secondo. Le due coppie di basi considerate con l'indicazione dei legami idrogeno e i valori dei relativi parametri strutturali sono mostrate in Figura 26. Altri accoppiamenti non sono consentiti perché, o si avrebbero coppie di basi troppo voluminose o i legami idrogeno che si verrebbero a formare non sarebbero altrettanto forti e stabilizzanti. Questo fatto fa sì che le due catene della doppia elica siano del tutto complementari: ogni volta che una molecola di adenina (A) compare in una catena, una timina (T) deve essere presente nella corrispondente posizione sulla catena opposta. In modo analogo una guanina (G) da una parte implica la presenza di una citosina (C) dall'altra. Questo carattere complementare delle catene è evidente dai due schemi di Figura 25.

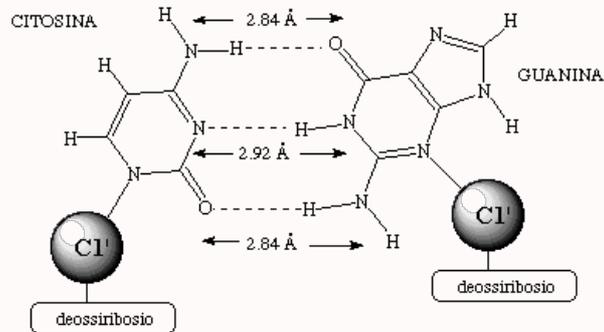
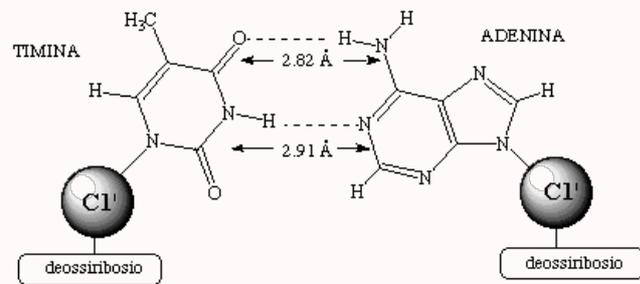


Figura 26. Legami idrogeno per le due coppie di basi adenina-timina e citosina-guanina. È indicato per ogni base il legame con il C1' dell'unità di deossiribosio.

3. La replicazione del DNA

Il DNA immagazzina, come già detto, il codice genetico nelle cellule viventi. L'informazione genetica è codificata nelle sequenze particolari di basi presenti che determinano, a loro volta, l'esatta sequenza in cui i vari amminoacidi devono comparire nelle proteine sintetizzate come, ad esempio, un enzima. La trasmissione del codice genetico da una cellula all'altra avviene attraverso una duplicazione esatta della catena del DNA. La replicazione del DNA implica la separazione dei due filamenti della doppia elica, ognuno dei quali funziona come un vero e proprio stampo che determina la sequenza di basi dei due nuovi filamenti che si vanno formando. Immediatamente prima della divisione cellulare, la doppia elica di DNA comincia a svolgersi ad una delle due estremità e su ciascuna delle due catene iniziano a formarsi le due catene complementari. Questo tipo di replicazione, schematizzata in Figura 27, è considerata di tipo *conservativo* poiché in ognuna delle due nuove doppie eliche è presente un filamento proveniente dall'elica originale. In realtà, la replicazione implica una serie piuttosto complessa di reazioni catalizzate da enzimi diversi. A titolo di esempio, l'enzima DNA-polimerasi catalizza la reazione di addizione di nuovi nucleotidi alla catena in crescita.

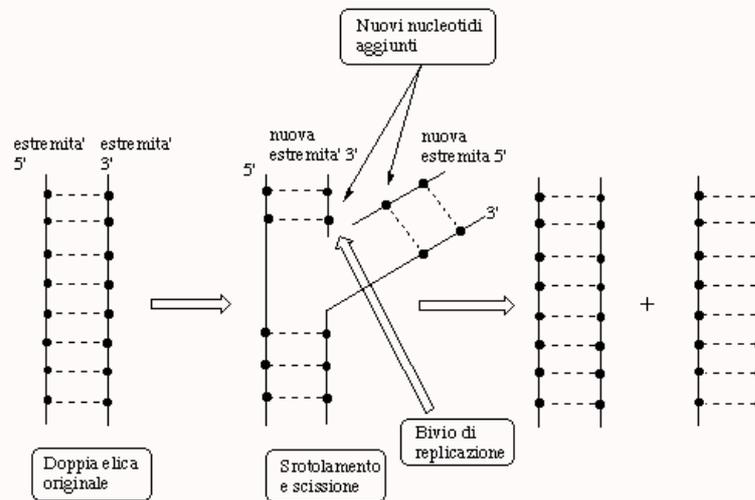


Figura 27. Il processo di replicazione del DNA.

La sintesi di entrambe le due nuove catene di DNA avviene nella direzione (estremità 5') \Rightarrow (estremità 3'). Ricordando che le due catene originali corrono parallele, ma in direzioni opposte, si ha come conseguenza che al bivio di replicazione (vedi Figura 27) una delle due nuove catene deve presentare libero un OH all'estremità 3' e l'altra nuova catena un OH all'estremità 5'. È interessante notare che, mentre il complementare del filamento 3' \Rightarrow 5' viene sintetizzato come una catena continua senza interruzioni, il complementare dell'altro filamento viene prodotto come una serie di corte catene. Enzimi specifici provvedono poi a saldare fra di loro questi segmenti e a formare il nuovo filamento completo di DNA.

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Glossario

Introduzione

Carboidrati

Amminoacidi e
proteine

Acidi nucleici

Glossario

Acetale. Una classe di composti organici caratterizzati da un gruppo funzionale costituito da un atomo di carbonio al quale sono legati due gruppi -OR. Gli acetali sono composti stabili in ambiente acquoso, mentre vengono idrolizzati in ambiente acquoso acido per dare un aldeide (o un chetone) e due molecole di alcool. Nel caso si ottenga un chetone si parla più propriamente di chetali.

Aldeidi. Una classe di composti organici caratterizzati dal gruppo funzionale -CH=O

Ammidi. Una classe di composti organici caratterizzati dal gruppo funzionale -C(NRR')=O (R=H o gruppo alchilico)

α -idrossichetoni. Chetoni caratterizzati dalla presenza di un gruppo OH legato al carbonio in posizione α rispetto al gruppo carbonilico (il carbonio α è quello immediatamente adiacente al carbonio carbonilico).

Chetoni. Una classe di composti organici caratterizzati dal gruppo funzionale C=O .

Carbonio chirale. Un atomo di carbonio con quattro sostituenti diversi fra di loro. Il termine **carbonio asimmetrico** è equivalente

Chetale. Vedi acetale.

Diastereoisomeri. Due stereoisomeri (vedi più avanti) che non sono l'uno l'immagine speculare dell'altro.

Elettrofilo. Una specie chimica (atomo, molecola o ione) in grado di accettare una coppia di elettroni per la formazione di un nuovo legame.

Emiacetale, Emichetale. Un composto organico caratterizzato da un gruppo funzionale costituito da un carbonio al quale sono legati un gruppo OH e un gruppo OR. Gli emiacetali e gli emichetali si ottengono per reazione di un alcool con aldeide o un chetone rispettivamente.

Enantiomeri. Due stereoisomeri (vedi più avanti) che sono l'uno l'immagine speculare dell'altro. L'unica proprietà fisica per la quale due enantiomeri si differenziano, è la loro capacità di ruotare il piano della luce polarizzata: se un enantiomero ruota tale piano di un angolo α in senso orario (+), l'enantiomero opposto lo ruota dello stesso valore, ma in senso antiorario (-).

Nucleofilo. Una specie chimica con una coppia di elettroni disponibile che può essere donata ad una specie povera di elettroni per formare un nuovo legame.

Ossidazione. Cessione di elettroni. Se un atomo si ossida, aumenta il numero che definisce il suo stato di ossidazione.

Potere rotatorio specifico. Questa grandezza rappresenta la rotazione in gradi provocata da un grammo di sostanza

otticamente attiva sciolto in un ml di soluzione con un tubo polarimetrico lungo un decimetro. I poteri rotatori specifici sono di norma riportati ad una temperatura di 25°C utilizzando la riga D della lampada al sodio (lunghezza d'onda = 5896 Å).

Proiezione di Fisher. Un modo convenzionale per rappresentare su una superficie bidimensionale la configurazione di un centro chirale. Il centro chirale è rappresentato dall'incrocio di due linee. I segmenti verticali che si dipartono dal centro indicano due legami che si allontanano dall'osservatore, mentre i due segmenti orizzontali indicano due legami diretti verso l'osservatore.

Riduzione. Acquisizione di elettroni. Se un atomo si riduce, diminuisce il numero che definisce il suo stato di ossidazione.

Stereoisomeri. Si tratta di molecole che hanno la stessa formula bruta e nelle quali i vari atomi sono legati fra di loro nello stesso ordine, ma sono orientati diversamente nello spazio. Le diverse orientazioni non possono essere interconvertite le une nelle altre per semplice rotazione attorno ai legami, ma soltanto previa rottura di questi. Due stereoisomeri sono quindi due strutture non sovrapponibili.

L'Universo e l'origine della vita

Le molecole della vita

Andrea Bottoni

Lecture

Introduzione

Carboidrati

Amminoacidi e
proteine

Acidi nucleici

Glossario

Lecture

Lecture

*H. Dugas, *Bio-organic chemistry. A chemical Approach to Enzyme Action*, Springer-Verlag, New York, 1999;

*A. Fersht, *Struttura e meccanismi d'azione degli enzimi*, Zanichelli, Bologna, 1989;

*R.H. Abeles, P.A. Frey, W.P. Jencks, *Biochimica*, Piccin;

*M. Page, A. Williams, *Organic and Bio-organic Mechanisms*, Longman, London, 1997;

*R.J. Fessenden, J.S. Fessenden, *Chimica Organica*, Piccin;

*R.H. Garret, C.M. Grisham, *Biochimica*, Zanichelli, Bologna, 1998.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Introduzione

Introduzione

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Letture

Tra i fenomeni che caratterizzano il pianeta Terra, il più complesso e imponente è sicuramente il fenomeno "vita". Al momento non siamo in grado di definire in modo esaustivo tale fenomeno; possiamo solamente descriverlo in termini funzionali, sufficienti, tuttavia, a consentirci di separare nettamente le strutture viventi da tutte le altre.

Le strutture viventi condividono una serie di caratteristiche complessivamente esclusive (anche se le stesse possono comparire singolarmente in altre strutture non viventi, come ad esempio nei cristalli): sono tutte dotate d'individualità, sono cioè strutture delimitate rispetto all'ambiente, pur non essendone isolate; sono tutte in grado di ottenere energia attraverso l'assimilazione e la trasformazione chimica d'idonee sostanze presenti nell'ambiente; sono tutte in grado di produrre copie di loro stesse; tendono ad esprimere un basso tasso d'alterabilità e sono capaci di trasmetterlo alla propria discendenza; infine, tutte le strutture viventi cessano di funzionare qualora sia introdotto nel loro ambiente, interno o esterno, un fattore incompatibile con la loro esistenza. In definitiva, la funzionalità dei viventi sembra poter essere ricondotta a tre caratteri fondamentali, che si esprimono come:

1. **autoconservazione**, la capacità di mantenersi in vita, con la nutrizione, l'assimilazione e la produzione d'energia biologica;
2. **autoreplicazione**, la capacità di propagare la vita attraverso la replicazione cellulare e la riproduzione;
3. **autoregolazione**, la capacità di dirigere se stessi con la coordinazione, la sincronizzazione, la regolazione ed il controllo delle reazioni biologiche, interne ed esterne.

La più elementare delle strutture in grado di compiere queste funzioni è la **cellula vivente**, elemento costitutivo di tutti gli organismi viventi, dal più piccolo dei batteri alla più grande delle balene.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Strutture e funzioni della cellula vivente

Introduzione

In che modo la cellula è in grado d'autoconservarsi, autoriprodursi ed autoregolarsi? Per rispondere a questa domanda è necessario analizzare alcune delle strutture che la caratterizzano:

Membrana cellulare

La membrana cellulare circonda la cellula e le dà individualità. Si tratta di una struttura molto complessa che ha il compito di regolare gli scambi di materiale con l'ambiente, rendendo la cellula un sistema energetico aperto, circoscritto nella sua organizzazione strutturale ma in continuo rapporto con l'esterno.

Citoplasma

È la sostanza che riempie lo spazio interno alla cellula e che circonda gli organuli cellulari. Trasparente, traslucido, gelatinoso, ha soprattutto il compito di dare turgore alla cellula e di favorire lo svolgimento di alcune importanti reazioni biologiche.

Cloroplasti

Sono organelli cellulari tipici delle cellule vegetali. Rappresentano le strutture all'interno del quale avviene la *fotosintesi clorofilliana*, processo che consente alle piante di sintetizzare quegli zuccheri che saranno successivamente utilizzati, nei mitocondri, per ottenere energia. La capacità di autosintesi di sostanze nutritive è esclusiva dei cosiddetti *organismi autotrofi*; al contrario, quegli organismi che sono costretti a nutrirsi di sostanza organica già sintetizzata, come gli animali o i funghi, sono definiti *eterotrofi*.

Mitocondri

Organelli cellulari al cui interno avvengono quelle reazioni che permettono la trasformazione delle sostanze nutritive (zuccheri) in energia chimica utilizzabile dalla cellula.

Questo processo prende il nome di *respirazione cellulare*.

Esso permette di sintetizzare molecole di *ATP*

(adenosintrifosfato), l'unico compost energetico utilizzabile nei processi di sintesi cellulare.

Nucleo

Il nucleo rappresenta la centrale operativa delle cellule. Esso è presente solo negli organismi definiti *eucarioti*. Al suo interno sono custodite tutte le informazioni necessarie alla costruzione delle proteine indispensabili alla vita. Tale archivio biochimico è rappresentato dal *DNA* nucleare. Negli organismi privi di nucleo (*procarioti*) il DNA è disperso nel citoplasma sotto forma di un unico filamento circolare.

Ribosomi

Sono particolari organelli cellulari che hanno il compito di costruire le *proteine*, a partire dagli *amminoacidi*, sulla base delle informazioni contenute nel DNA.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lecture

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Autoconservazione e processi energetici

Introduzione

Un principio fisico universale vuole che tutte le strutture organizzate siano incalzate dalla disorganizzazione; la grandezza fisica che misura questo grado di disordine progressivo è l'*entropia*.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Gli organismi viventi rappresentano le strutture più complesse e organizzate che si conoscano. Per lottare contro gli effetti dell'entropia, che conducono alla morte, la cellula ha un bisogno continuo di energia fresca, che è assunta sotto forma di alimenti. L'energia chimica in essi contenuta proviene, direttamente o indirettamente, dal Sole e, quindi, gli alimenti possono essere considerati come energia solare in conserva.

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Senza il Sole, la vita sulla Terra sarebbe impossibile. Ma in che modo ci giunge quest'energia? Il Sole irradia continuamente nello spazio circostante delle radiazioni elettromagnetiche (ultravioletti, luce visibile, infrarossi, ecc.) che viaggiano sotto forma di "pacchetti energetici" detti fotoni. Il processo di cattura e utilizzazione dell'energia contenuta nei fotoni prevede due tappe: la *fotosintesi clorofilliana* e la *respirazione cellulare*. La prima di queste due tappe avviene nei *cloroplasti* delle cellule vegetali. In questi organuli è presente una specie di "mulino solare" le cui pale sono date dalle molecole di una sostanza verde: la *clorofilla*. Per comprendere come questo mulino sia in grado di girare e produrre energia bisogna spostarsi a livello atomico.

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Tutti gli atomi delle sostanze sono formati da un nucleo centrale attorno al quale girano delle particelle cariche negativamente dette *elettroni*. Gli elettroni gravitano attorno ai nuclei ad una distanza ben definita, corrispondente ad un determinato livello di energia. Se gli elettroni di un atomo sono colpiti da un raggio luminoso (e quindi energetico) sono in grado di svincolarsi maggiormente dall'attrazione del nucleo e di allontanarsi, portandosi su un'orbita più lontana, e quindi più energetica (*livello dell'elettrone eccitato*). Si tratta, tuttavia, di un livello instabile e, dopo poco tempo, questi elettroni ricadono al livello energetico di partenza, restituendo, sotto forma di un altro fotone, l'energia che avevano ricevuto.

Glossario

Lecture

Nella fotosintesi clorofilliana, queste cadute sono canalizzate all'interno di strutture adeguate (*sistemi di trasportatori di elettroni*) che consentono di recuperare l'energia liberata dagli elettroni in ricaduta e di utilizzarla in un processo di sintesi di sostanze organiche a partire da sostanze inorganiche. Gli elettroni degli atomi che formano le molecole di clorofilla sono facilmente eccitabili alla luce del Sole. Questo fa sì che in ogni molecola si producono, per ogni istante, migliaia e migliaia di salti elettronici. La debole corrente elettrica prodotta da queste migliaia di cadute

elettroniche, che possono essere paragonate al flusso di un torrente che fa girare le turbine di una centrale idroelettrica o al soffio del vento che muove le pale del mulino, viene utilizzata sia per costruire il cibo che per ricaricare parte delle riserve energetiche della cellula. In particolare, nel corso della fotosintesi, la cellula vegetale utilizza 6 molecole di anidride carbonica più 6 molecole di acqua, più energia solare, per sintetizzare uno zucchero a 6 atomi di carbonio, il *glucosio*. Come prodotto di "rifiuto" si liberano nell'aria 6 molecole di ossigeno (nel caso della fotosintesi aerobia). In sintesi:



Al contrario delle piante, gli organismi eterotrofi sono costretti a procurarsi le sostanze nutritive in forma già confezionata alimentandosi di piante o, come consumatori secondari, di altri animali vegetariani. In questo modo sono in grado di assicurarsi le sostanze zuccherine energetiche di cui hanno bisogno per i loro processi cellulari. Gli zuccheri ingeriti vengono trattati in modo da riestrarre "l'energia solare" che vi era stata imprigionata al momento della sintesi. Questa energia viene utilizzata per produrre molecole energetiche di ATP, l'unico combustibile utilizzabile dagli esseri viventi. Questo processo è noto come *respirazione cellulare* (da non confondere con la respirazione polmonare) ed avviene nei *mitocondri*, cui arrivano, trasportati dal sangue, sia gli zuccheri contenuti negli alimenti che ingeriamo, che l'ossigeno, assunto dai polmoni.

Il processo può essere distinto in due tappe:

1. inizialmente il glucosio viene frantumato, *in assenza di ossigeno*, in due frammenti a tre atomi di carbonio; questa reazione, analoga alla *fermentazione*, è detta *glicolisi* (letteralmente rottura del glucosio) e permette di ottenere, già in questa fase, una piccola quantità di energia;
2. successivamente, questi due frammenti a tre atomi di carbonio vengono inseriti in una specie di macina chimica, il cosiddetto *ciclo di Krebs*, che li tritura fino a trasformarli in composti elementari. Questa seconda tappa avviene *in presenza di ossigeno* e consente di *bruciare* la sostanza in modo da estrarre fino all'ultima "goccia" di energia chimica contenuta. Come sostanze di rifiuto si hanno anidride carbonica ed acqua:



È evidente che i prodotti finali della respirazione rappresentano i prodotti iniziali della fotosintesi. In molti organismi che vivono in assenza di ossigeno (*anaerobi*) il processo di respirazione cellulare si ferma alla prima tappa, cioè alla glicolisi. È questo il caso dei batteri fermentatori, tra i quali ricordiamo i batteri responsabili della fermentazione dell'alcol. In termini di resa energetica, la glicolisi è meno efficiente della respirazione cellulare completa, in quanto essa dà come prodotti finali due frammenti di zucchero a tre atomi di carbonio ancora ricchi di energia. In termini di rendimento energetico la respirazione cellulare consente di produrre una quantità di energia 18 volte superiore a quella ottenibile dalla semplice fermentazione.

Si è già accennato al fatto che questa energia, per essere utilizzata, deve essere immagazzinata in una molecola particolare, l'ATP o *adenosintrifosfato*. Si tratta di una molecola "riciclabile" che, quando è carica, è in grado di cedere rapidamente l'energia in essa contenuta trasformandosi in ADP o *adenosindifosfato*. L'energia liberata nel corso della respirazione cellulare viene utilizzata, appunto per "ricaricare" l'ADP ritrasformandolo in ATP.

Utilizzando ATP, la cellula può svolgere tutte le sue funzioni

vitali comportandosi come una vera e propria industria chimica. Un'industria, però, molto particolare. Infatti la cellula deve autocostruirsi le strutture (*proteine strutturali*), gli operai (*enzimi*) e le materie prime (*molecole organiche*) di cui ha bisogno. Per fare questo, deve essere anche in grado di curare la manutenzione del proprio apparato e di controllare i propri cicli di produzione. Tutte queste attività sono sotto il controllo degli acidi nucleici: *DNA* ed *RNA*. Grazie a questo controllo e alle sue capacità di gestione, la cellula può *autoregolare* l'insieme delle sue attività chimiche e funzionali (*metabolismo*). In che modo?

Per rispondere a queste domande è indispensabile analizzare il differente funzionamento di una macchina automatica a comando rigido e di una macchina a comando flessibile, un "servomeccanismo", cioè un meccanismo in grado di modificare da solo il suo comportamento in funzione delle informazioni che riceve dall'ambiente circostante. Un sistema di semafori è un classico esempio di macchine a comando rigido. Esse si modificano secondo una serie di eventi prestabiliti (ad esempio la sequenza e la durata dei colori). La sequenza delle operazioni si svolge secondo cicli identici. Un servomeccanismo lavora in modo diverso. Prendiamo ad esempio una capsula spaziale che debba effettuare un appuntamento orbitale con una stazione planetaria. Una volta in orbita la capsula si muove per mezzo di piccoli getti prodotti da ugelli orientati. La distanza che la separa dal suo obiettivo viene valutata per mezzo di radar. I dati vengono trasmessi ad un computer che valuta automaticamente lo scarto esistente tra la distanza e la direzione reale e la distanza e la direzione desiderata. Gli aggiustamenti vengono ottenuti azionando i getti. In pratica la capsula è in grado di dirigersi da sola sull'obiettivo e di procedere per errori e aggiustamenti successivi. Essa è, cioè, in grado di modificare il suo comportamento in funzione dell'informazione che riceve: non lavora secondo un ciclo prestabilito. Questi sistemi possiedono dunque una certa autonomia nel compiere il loro lavoro e l'impressione di intelligenza che ci lasciano è dovuto ad una loro proprietà fondamentale: la *retroazione* o *feed-back*.

In genere, le macchine compiono il loro lavoro secondo sequenze logiche in cui la causa precede gli effetti e non li segue mai. È il caso del semaforo, in cui la programmazione della centralina (causa) stabilisce gli intervalli di colore (effetto). Nelle macchine servoassistite, al contrario, gli effetti sono collegati alle loro cause e possono precederle determinandole. La navicella aziona i getti orientati (causa) e si muove (effetto). Tuttavia lo spostamento, quindi l'effetto, viene analizzato in modo da stabilire se sia necessario o meno azionare di nuovo i getti. Quindi, in questo caso, l'effetto precede e regola la causa. Questo legame tra effetto e causa si chiama retroazione. È evidente che ciò che circola in un sistema retroattivo è un'informazione, un segnale suscettibile di scatenare un'azione. Questa informazione può correre lungo un filo elettrico, un tubo, un'onda radar, ma può essere trasportata altrettanto bene da una molecola.

In una cellula la regolazione delle reazioni biochimiche è sotto controllo enzimatico. L'insieme di queste reazioni, in definitiva l'attività complessiva della cellula, rappresenta il metabolismo cellulare (causa). I prodotti dell'attività metabolica vengono detti metaboliti (effetti). Quando la concentrazione di una determinata sostanza (di un determinato metabolita) raggiunge, nella cellula, il giusto livello di concentrazione, le catene di montaggio devono poter essere bloccate. In altri termini la produzione deve essere arrestata quando l'offerta supera la domanda o avviata di nuovo nel caso opposto. Questo può avvenire sia agendo sugli enzimi che regolano il processo, sia sul tratto di DNA che fornisce le informazioni necessarie a quel tipo di produzione. Questo sistema cellulare autoregolante è strutturato secondo le stesse leggi della retroazione. In questo modo la cellula adatta in permanenza la sua produzione ai suoi bisogni; in definitiva la cellula

rappresenta un complesso sistema servoassistito in cui tutto retroagisce su tutto, in modo tale che la cellula possa dirigersi da sola.

Acidi nucleici: DNA e RNA

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Acidi nucleici: DNA e RNA

Introduzione

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lecture

Grazie alle scoperte di J. D. Watson, F. H. C. Crick ed M. H. F. Wilkins, premi Nobel per la medicina nel 1962, oggi noi sappiamo che l'immensa quantità di informazioni necessarie alla "costruzione" degli esseri viventi è iscritta, a livello molecolare, in un lungo filamento doppio, formato da vari composti chimici noto come *DNA* o *acido desossiribonucleico*. Tutta la particolarità di questa molecola risiede nella sua capacità di autoduplicarsi o di fornire delle copie di suoi tratti particolari. Analizziamone la struttura di base utilizzando un modellino per comprendere l'importanza di questo meccanismo (Fig. 1).

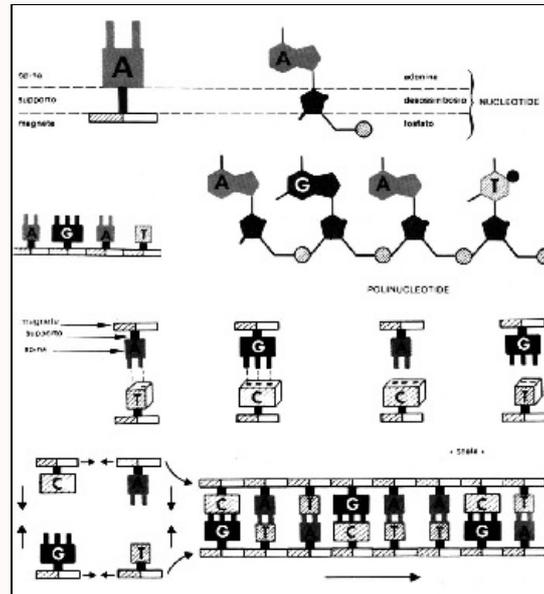


Figura 1. Schema strutturale del DNA.

Consideriamo delle spine e delle prese doppie e triple. Immaginiamo che queste prese o spine siano dotate di una base magnetica caratterizzata da due poli in grado di esercitare una debole attrazione nei riguardi delle basi contigue. Mettendo alla giusta distanza molti di questi elementi è possibile ottenere un filamento di prese e spine affiancate. Volendo creare un secondo filamento complementare al primo, la nostra libertà di azione sarà limitata dal fatto che, in corrispondenza della presa doppia del primo filamento, potremo usare, nel secondo filamento, solo la spina doppia e non la tripla. Quest'ultima potrà essere usata solo in corrispondenza della spina tripla. E viceversa. In pratica in questo modo è possibile ottenere una specie di scala in cui i supporti magnetici formeranno i montanti laterali, mentre i pioli saranno rappresentati dalle prese e dalle spine complementari. Se chiamiamo G la spina tripla, C

la presa tripla, A la spina doppia e T la presa doppia, gli unici accoppiamenti possibili saranno tra la G di un filamento e la C dell'altro (o viceversa) e tra la T di un filamento e la A dell'altro (o viceversa). Nessun limite è posto alla lunghezza del filamento. In questo modo è possibile ottenere, ad esempio, un filamento formato da G-T-A-C-T-T che avrà come filamento complementare C-A-T-G-A-A. Si vede subito che la sequenza delle singole lettere può servire da base per un codice, esattamente come una serie di punti e linee rappresenta la base del codice Morse.

Il DNA è strutturato secondo un modello analogo. Il composto è infatti formato da due lunghissimi filamenti ottenuti dall'unione di quattro elementi detti *basi*: la *Guanina*, la *Citosina*, la *Timina* e l'*Adenina*. Queste sono ancorate ad un supporto chimico rappresentato da un zucchero, il deossiribosio, e ad un composto chimico ricco di energia (un fosfato). Il fosfato, grazie alla sua energia, collega tra di loro le molecole di zucchero in modo da formare i montanti della scala. Le basi, invece, si susseguono nei due filamenti a formare i pioli della scala disponendosi in modo tale che la Guanina abbia sempre di fronte la Citosina e che la Timina abbia di fronte, sul filamento complementare, l'Adenina. Le basi sono unite da un debole legame chimico. I due filamenti così formati sono avvolti tra di loro a formare una doppia elica spirale (Fig. 2). In pratica, per visualizzare una molecola di DNA, basta immaginare una scala che, presa per le due estremità, venga ritorta nei due sensi. Lo zucchero, il fosfato ed una base, uniti tra di loro costituiscono un *nucleotide*. I filamenti di DNA sono quindi formati da una successione di nucleotidi. La successione delle basi lungo il filamento identifica un codice genetico di 4 lettere, G, C, T, A. La lettura di questo codice avviene per gruppi di tre lettere. Ad esempio, volendo leggere la successione delle basi lungo il filamento T-A-G-C-A-A, dovremmo considerare che, a partire dal punto inizio lettura, T-A-G rappresenta un'informazione e C-A-A un'altra informazione. Questi gruppi di tre lettere vengono detti *triplette*. Considerando la lunghezza dei filamenti di DNA, è facile immaginare le migliaia di triplette che in esso si susseguono e, conseguentemente, le migliaia di informazioni. L'insieme delle informazioni contenute in un particolare tratto di DNA identifica un *gene*. I geni contengono le informazioni relative a tutti i caratteri propri di quel determinato organismo (*genotipo*). Ma in che modo l'informazione contenuta nei geni si manifesta, a livello strutturale e funzionale, nell'organismo vivente? Qual è il meccanismo che consente di mantenere pressoché inalterata questa informazione, generazione dopo generazione?

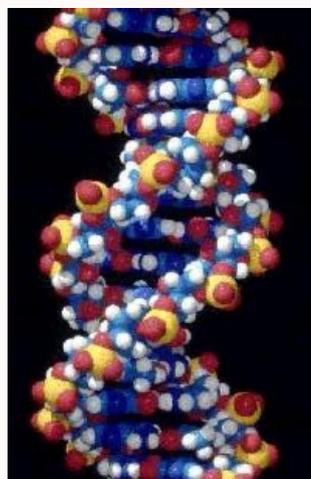


Figura 2. Rappresentazione grafica del DNA.

Immaginiamo di aprire i due filamenti di DNA in modo da poterli successivamente completare con altri nucleotidi liberi presenti nel nucleo. Questi andranno ad appaiarsi ai singoli filamenti aperti secondo la regola delle basi: Citosina con

Guanina (e viceversa), Adenina con Timina (e viceversa). È evidente che rispettando l'appaiamento tra basi complementari, dal filamento originale di DNA se ne possono ottenere 2 uguali, in quanto i singoli filamenti originali fungono da matrice per la costruzione di filamenti complementari.

Grazie a questa capacità di autoreplicarsi, il DNA è in grado di produrre copie di se stesso o copie di suoi tratti a seconda se sia necessario duplicare integralmente l'informazione in esso contenuta o fornire un'informazione parziale, quella, ad esempio, utile a consentire la sintesi di una determinata proteina.

Oltre al DNA, nella cellula è presente un altro tipo di acido nucleico: l'*RNA* o *acido ribonucleico*. Esistono diversi tipi di RNA, per i nostri scopi è tuttavia sufficiente analizzarne solo due: l'*RNA messaggero (mRNA)* e l'*RNA di trasferimento (tRNA)*. A differenza del DNA, l'RNA è un acido nucleico a filamento singolo; è costituito da una catena di nucleotidi analoga a quella del DNA ma una delle basi, la Timina, è sostituita da una base differente: l'*Uracile*. Gli RNA svolgono un ruolo importantissimo nella traduzione del messaggio contenuto nel DNA e nella conseguente sintesi delle proteine.

Amminoacidi e proteine

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Home

Amminoacidi e proteine

Introduzione

Fondamentalmente l'informazione contenuta nel DNA viene utilizzata per assemblare proteine.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Esistono due diversi tipi di proteine, le *proteine strutturali*, che rappresentano i materiali di costruzione della cellule, e le *proteine enzimatiche*, che svolgono il ruolo di regolatori dei processi cellulari (le proteine enzimatiche non solo guidano, ma rendono anche possibili certe reazioni chimiche che normalmente non avverrebbero a livello cellulare). Per quanto diversi possano essere questi due tipi di proteine o le loro funzioni, tutte sono costituite dagli stessi elementi di base: gli *amminoacidi*. Nei viventi esistono venti amminoacidi differenti, tutti però dotati, alle estremità, di un sistema di ancoraggio chimico identico: un sito posteriore chimicamente acido ed un sito anteriore chimicamente basico (amminico). Per unirsi tra di loro gli amminoacidi fanno reagire il loro gruppo acido terminale con il gruppo amminico dell'amminoacido seguente. In questo modo si forma un legame solido e possono costituirsi lunghe catene (*catene polipeptidiche*).

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

A questo punto possiamo cominciare a mettere insieme tutti gli elementi fin qui esaminati per dare alcune risposte a domande tipo: perché è così importante la struttura del DNA? Qual è il significato del codice genetico e delle singole triplette? Quali sono i rapporti del DNA con l'RNA e qual è la funzione dei diversi tipi di RNA? In che modo vengono sintetizzate le proteine?

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Sintesi delle proteine

Lecture

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Sintesi delle proteine

Introduzione

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lecture

Abbiamo visto che le informazioni sono scritte sul DNA utilizzando un "alfabeto" di quattro lettere (le basi) che specifica, di volta in volta, parole di tre lettere (le triplette). Una tripletta identifica un amminoacido. Gli amminoacidi si uniscono a formare le proteine. Questo processo avviene nel citoplasma, quindi al di fuori del nucleo, ma il DNA non abbandona mai il nucleo. Questa informazione viene veicolata dal DNA nucleare al citoplasma dall'RNA messaggero. Vediamo come.

Ipotizziamo che la cellula abbia la necessità di costruire una determinata proteina. Vi è quindi bisogno di sapere quali amminoacidi utilizzare. Il primo passaggio prevede che la doppia elica del DNA si apra in corrispondenza del tratto (gene) contenente le triplette che codificano gli amminoacidi necessari. A questo punto, grazie a dei meccanismi chimici e alla presenza di basi isolate presenti nel nucleo, la cellula costruisce uno stampo in negativo di quel particolare tratto di DNA. La costruzione di questo stampo è resa possibile proprio dalla particolare struttura del DNA e dal fatto che l'unione tra le basi è di tipo obbligato; se il tratto considerato di DNA comprende la tripletta CGC, questa verrà trascritta come GCG. Si ottiene cioè un filamento che rappresenta una sorta di fotocopia in negativo del messaggio positivo del DNA. Questo filamento costituisce l'RNA messaggero (mRNA) (da notare che nell'mRNA la base complementare dell'Adenina è l'Uracile e non la Timina). L'mRNA abbandona il nucleo e si porta nel citoplasma. Qui viene affiancato da un ribosoma che, dopo aver individuato una tripletta particolare, che non specifica per un amminoacido, ma che indica il punto di inizio lettura, comincia a scorrerlo nel senso della lunghezza. Il ribosoma legge le singole triplette e le attiva. Nel citoplasma circostante si trovano filamenti di un altro tipo di RNA, l'RNA di trasferimento (tRNA), e amminoacidi liberi. L'attivazione delle triplette specificate nell'RNA messaggero fa sì che gli RNA di trasferimento vadano a cercare, tra i tanti presenti nel citoplasma, gli amminoacidi corrispondenti.

Questi vengono portati sul ribosoma e uniti a formare la catena proteica. Di volta in volta il ribosoma si sposta, di tripletta in tripletta, e il processo termina nel momento in cui compare la tripletta che ha il significato di "fine lettura". A questo proposito, bisogna dire che con un codice di quattro lettere si possono ottenere 64 triplette, quindi si potrebbero specificare 64 amminoacidi; tuttavia se ne conoscono soltanto 20 e, anche considerando un certo numero di triplette con significato di "inizio" e "fine", si ha comunque una certa abbondanza di triplette rispetto agli amminoacidi esistenti. Tale fenomeno è noto come *ridondanza genica* e fa sì che triplette diverse specifichino lo stesso amminoacido. In pratica, ogni amminoacido è identificato da una singola tripletta, ma più triplette possono specificare lo stesso

amminoacido. Il significato della ridondanza genica risiede nel fatto che in questo modo è possibile limitare al massimo le conseguenze derivanti da eventuali errori operati sia in fase di trascrizione del messaggio, che in fase di lettura, oppure conseguenti a piccole mutazioni che possono avvenire nel codice genetico. Tenendo presente che è solo l'ordine di assemblaggio degli amminoacidi che determina le caratteristiche delle proteine, è facile comprendere come la cellula possa costruire migliaia di proteine aventi significati strutturali e funzionale differenti.

Meccanismi di replicazione

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Meccanismi di replicazione

Introduzione

La divisione cellulare è quel processo che consente, a partire da una cellula detta *cellula madre*, la formazione di due cellule figlie ad essa identiche. Il processo è noto come *mitosi*.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Negli organismi unicellulari che si riproducono senza l'intervento dei due sessi (*riproduzione asessuata*) la mitosi coincide con la *riproduzione*. Negli organismi pluricellulari la mitosi consente la costruzione di un individuo formato da miliardi di cellule a partire da una singola cellula fecondata. In questi organismi, inoltre, la divisione cellulare, permette di sostituire le cellule usurate per cause naturali o accidentali (ad esempio nei processi di cicatrizzazione).

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Il processo di divisione cellulare avviene attraverso varie fasi che comportano la duplicazione del DNA e la sua successiva suddivisione in due cellule figlie. In questo modo il flusso di informazione tra generazioni cellulari successive resta costante. Nel corso della riproduzione sessuale, due cellule (*cellule germinali ogameti*) si fondono tra loro in una cellula figlia che, nel caso di organismi pluricellulari, darà origine ad un nuovo individuo (*zigote*). Se queste due cellule germinali fossero uguali a tutte le altre cellule dell'organismo, dalla loro fusione si originerebbe un organismo con un contenuto di DNA doppio rispetto alla norma. In natura questo non accade, in quanto queste cellule subiscono una trasformazione iniziale che dimezza il loro contenuto di DNA. Il processo, detto *meiosi*, viene reso possibile dal fatto che il genotipo di un organismo è dato dalla somma di due serie geniche identiche che si manifestano, a livello nucleare, prima di ogni divisione, sotto forma di *coppie di cromosomi (corredo diploide)*. In pratica le informazioni relative ad un determinato carattere sono presenti in duplice copia su due cromosomi uguali ma distinti.

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lecture

Con la meiosi, attraverso le cellule germinali, ogni genitore trasmette una sola serie cromosomica (*corredo aploide*) in modo tale da ricostituire, al momento della fecondazione, il normale corredo diploide tipico di quella specie. L'individuo che si svilupperà dalla cellula fecondata, tuttavia, pur essendo dotato di un corredo genetico quantitativamente uguale a quello dei genitori, presenterà caratteristiche genetiche qualitativamente differenti, sia perché è il frutto di una fecondazione incrociata, sia perché, nel corso della formazione delle cellule germinali, intervengono processi di rimescolamento genetico (*crossing over*), che favoriscono la comparsa di caratteri variati nella discendenza. A questa variabilità, inoltre, può aggiungersi una variabilità indotta da fenomeni di mutazione genica casuale (sia a livello di singole basi che a livello cromosomico) che possono comportare la comparsa di caratteri assolutamente originali (non necessariamente favorevoli).

Grazie a questi meccanismi la vita può manifestarsi in forme individuali assolutamente originali e differenti. Gli organismi che si riproducono asessualmente generano figli assolutamente uguali a loro stessi e la loro variabilità è unicamente determinata dalla comparsa di mutazioni geniche.

Teorie sull'origine della vita

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Teorie sull'origine della vita

Introduzione

Abbiamo visto che la funzionalità cellulare utilizza due sistemibologici, il sistema genetico ed il sistema metabolico; il primo si basa sugli acidi nucleici, *DNA* e *RNA*, il secondo sulle *proteine*. I due sistemi sono entrambi indispensabili alla vita, tuttavia, quale dei due si sia formato per primo, quando e attraverso quali modalità sono tra i temi più dibattuti e controversi della biologia evolutiva, nel momento in cui questa cerca di fornire teorie circa l'origine della vita.

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Se escludiamo a priori, perché scientificamente indimostrabile, la *teoria creazionista*, secondo la quale la vita sarebbe stata creata da un ente soprannaturale, le due principali ipotesi riguardanti l'origine della vita fanno riferimento alla possibilità che essa sia stata importata sulla Terra dallo spazio, sotto forma di germi o spore (*ipotesi cosmozoica* o della *panspermia*) (Arrhenius, 1907) o che si sia originata, sul nostro pianeta, spontaneamente e direttamente da materiale non vivente (*teoria della generazione spontanea*).

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

La teoria del fisico svedese Svante Arrhenius, ripresa alla fine degli anni Settanta dall'astrofisico Fred Hoyle (comete come vettori di vita nell'universo), estremizzata addirittura dal premio Nobel Francis Crick (*teoria della panspermia guidata*, secondo la quale la vita sarebbe stata trasportata sul nostro pianeta da extraterrestri a bordo di navicelle spaziali), si limita a spostare l'ambito di origine del fenomeno, ma non fornisce una risposta circa la sua origine assoluta. Nel contempo, la teoria della generazione spontanea della vita, già espressa da Aristotele nel III sec. a. C., pur avendo goduto di largo seguito per quasi duemila anni è stata definitivamente confutata, nel 1863, da Louis Pasteur, che ha dimostrato come qualsiasi forma di vita, anche la più microscopica, non può che originarsi da altra vita. Ma è sempre stato così?

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lettere

Un approccio di tipo "abiogenetico" (vita originata dalla non vita) sembra essere indispensabile almeno per caratterizzare le prime fasi di sviluppo del fenomeno. Infatti, tutte le teorie attuali cercano di definire uno scenario inorganico, all'interno del quale collocare elementi chimici primordiali dalle cui interazioni il fenomeno può aver avuto origine. A questo approccio "abiogenetico" è necessario, tuttavia, aggiungere la coscienza dell'esistenza di una fenomenologia "evolutiva" che solo recentemente è stata acquisita. Tale coscienza consente, infatti, di immaginare una "vita in evoluzione" non statica e immutabile (*teorie fissiste*), una vita che nasce e si sviluppa, una vita che cambia nel corso di un tempo enorme. Il merito di aver offerto alla Scienza un'organica teoria evolutiva e di aver individuato per essa un meccanismo immanente (*Selezione Naturale*) mediante il quale tale evoluzione avrebbe potuto avvenire, va attribuito al genio di un naturalista inglese, Charles-Robert Darwin

(1809-1892).

Nella visione evoluzionista (visione che ha avuto, nel frattempo, notevoli sviluppi sia concettuali che sperimentali) la vita sulla Terra non si manifesta attraverso forme immutabili e statiche, ma in forme dinamiche e mutevoli. Nel corso di un tempo enorme (della cui vastità non si è avuta coscienza fino al XIX secolo) queste forme sono cambiate, diversificate, via via modulandosi sempre più all'ambiente chimico-fisico che le accoglie, anch'esso caratterizzato da un estremo dinamismo.

Ma in che modo la vita può riaffermare la propria esistenza in un ambiente mutevole che può rendere limitante quello che ieri era premiante e viceversa? Attraverso la sua capacità di offrire, generazione dopo generazione, varianti di se stessa, varianti in grado di proporsi come ulteriori alternative di vita all'ambiente. La valenza adattativa, in termini di sopravvivenza, di queste varianti viene sottoposta al vaglio della Selezione Naturale, vero motore evolutivo, che seleziona, tra le innumerevoli variabili, solo le più idonee a cui viene consentito di sopravvivere e di svilupparsi fino a quando le variazioni indotte nell'ambiente dalle leggi chimico-fisiche e dalla stessa attività biologica non imporranno un nuovo mutamento (appare chiaro, in tale contesto, l'enorme importanza, in termini evolutivi, della riproduzione sessuale). In questo continuo inseguimento la vita cambia, potendo raggiungere livelli strutturali e funzionali di sempre maggiore complessità o comunque di equilibrio rispetto alla pressione selettiva.

Ripercorrendo a ritroso questo processo, seguendone le tracce nella documentazione fossile, nella dinamica geologica della Terra, nelle strutture e nella funzionalità che caratterizzano le forme viventi attuali, ci accorgiamo che la vita si è mossa lungo linee filetiche che legano tra loro tutti gli organismi viventi e che convergono in un punto che rappresenta la prima manifestazione del fenomeno. La visione evoluzionistica, quindi, ci costringe a risalire nel tempo verso forme di vita sempre più semplici e questo ci conduce necessariamente alla scoperta, almeno sul piano concettuale, della prima "cellula vivente".

Tuttavia, una tale conquista concettuale impone di considerare anche una serie di paradossi di non facile soluzione, che ricordano un po' quello famoso dell'uovo e della gallina. Se spingiamo lo sguardo fino al limite di ciò che noi chiamiamo vita, cioè le più semplici strutture biologiche in grado di esprimere il fenomeno, osserviamo che questa struttura vivente (ad esempio un batterio) presenta comunque una funzionalità metabolica e genetica molto complessa, che si basa sul possesso di molecole organiche essenziali ma che sono esse stesse il frutto di tale funzionalità. Zuccheri, grassi, proteine, acidi nucleici sono attualmente fabbricati solo da sistemi viventi: come sono potuti comparire prima dei sistemi viventi di cui rappresentano la struttura o il prodotto funzionale? Sappiamo che gli organismi animali (eterotrofi) non sono in grado di sopravvivere senza gli alimenti sintetizzati dalle piante (autotrofi); sembrerebbe quindi legittimo cercare l'origine della vita tra i vegetali primitivi (alghe autotrofe). Questi organismi, tuttavia, necessitano di un sistema di estrazione dell'energia solare e di un sistema di utilizzazione di questa energia estremamente complicato, per essere considerato nel corredo funzionale dei primi viventi. Inoltre, l'elemento essenziale a tale processo è la clorofilla, altro prodotto di esclusiva sintesi dei viventi.

Tutte le attuali reazioni vitali sono regolate da enzimi, a loro volta informati dal DNA, a sua volta montato da enzimi: chi è stato il primo? Tenendo conto di tutti questi paradossi e della visione evoluzionistica, negli anni Trenta il biochimico russo Aleksandr Ivanovic Oparin e il biologo inglese John Burdon Sanderson Haldane formularono la prima delle cosiddette "teorie chimico-biologiche", secondo le quali la vita si è

sviluppata sul nostro pianeta per evoluzione a partire da molecole non biologiche. Nella loro teoria i due studiosi cercarono di superare molti dei circoli viziosi prima esposti.

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Introduzione

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lettere

Secondo Oparin e Haldane la Terra di circa 4 miliardi di anni fa era molto diversa dall'attuale. Era un pianeta ad alto contenuto energetico (energia endogena ed esogena), con un'atmosfera primitiva caratterizzata dall'assenza di ossigeno e anidride carbonica ma ricca in idrogeno, metano, ammoniaca e vapore acqueo; quindi fortemente riducente. Queste condizioni chimico-fisiche consentirono la formazione di una grande quantità di molecole organiche che, accumulandosi nei mari primitivi (in quantità tale da giustificare l'espressione "brodo primordiale"), poterono reagire tra loro in modo da originare una grande varietà di molecole biologiche importanti per la vita. Successivamente queste molecole si associarono nei primi sistemi macromolecolari in grado di esprimere una primitiva funzionalità vivente, accrescimento e autoriproduzione.

Un tale scenario consente di superare il primo e più importante paradosso e riabilitare, anche se per un breve attimo iniziale, la teoria della generazione spontanea della vita: dei composti organici poterono, in teoria, formarsi in assenza di esseri viventi. Una tale disponibilità di materia organica in continua sintesi ha rappresentato, secondo Oparin e Haldane, il cibo per i primi sistemi viventi in grado di assimilarlo. I primi organismi furono dunque degli eterotrofi in grado di assumere combustibile chimico direttamente nel mezzo ambiente. In questa ipotesi, quindi, invece di immaginare un sistema vivente complesso (autotrofo) che sfrutta semplici elementi ambientali (luce, acqua e anidride carbonica, peraltro assente nella loro ipotetica atmosfera primitiva) si ipotizza un sistema vivente semplice in un mezzo ambiente complesso, già ricco di alimenti. È così possibile superare altri paradossi. Infine, secondo Oparin e Haldane, questi sistemi viventi, per quanto semplici, ma tuttavia completi, furono sottoposti, durante milioni di anni, alla Selezione Naturale che ne determinò il destino avendo come unica alternativa quella di "essere o non essere". All'inizio l'ipotesi di Oparin-Haldane non venne unanimemente accettata dal mondo scientifico per la mancanza di adeguate prove sperimentali che la convalidassero pienamente.

Negli anni Cinquanta, Harold C. Urey, premio Nobel per la Chimica nel 1934, e Stanley Miller, un suo allievo, riuscirono ad ottenere alcune conferme sperimentali. A quel tempo Urey era interessato alle differenti teorie riguardanti l'origine del Sistema solare e, in particolare, alla composizione chimica dell'atmosfera che avrebbe dovuto circondare la Terra primitiva. Urey arrivò alla stessa conclusione di Oparin, cioè che il primitivo involucro gassoso della Terra dovesse essere riducente. Stanley Miller, nel 1953, ebbe l'idea di ricostruire in laboratorio queste presunte condizioni ambientali: pose in un pallone una

miscela di gas simile a quella ipotizzata per la Terra primitiva, composta da idrogeno (H_2), metano (CH_4), ammoniaca (NH_3) e vapore d'acqua (H_2O), sottopose la stessa a continue scariche elettriche (per simulare i fulmini) e, dopo una settimana, analizzò i prodotti di sintesi (Fig. 3). Non senza sorpresa si accorse che si erano formati numerosissimi composti organici, tra i quali amminoacidi. Dopo Miller, molti autori hanno compiuto esperimenti analoghi, variando di volta in volta sia la composizione dei gas che la sorgente di energia (calore, radiazioni ultraviolette, ecc.). I risultati ottenuti dimostrano che quasi tutti i monomeri biologici possono essere prodotti in modo abiologico, in assenza di ossigeno, partendo da materiale inorganico.

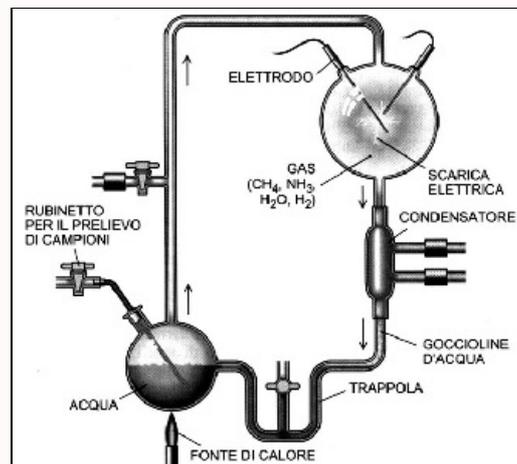


Figura 3. L'apparecchiatura ideata da Miller per simulare le condizioni prebiotiche sulla Terra.

Tuttavia, esistono dei problemi. Non tutte le molecole sintetizzate da Miller sono presenti nei viventi (ad esempio, dei tre amminoacidi del gruppo dell'alanina ottenuti, solo uno è effettivamente presente negli organismi) e non tutti i composti utili alla vita possono essere facilmente sintetizzati utilizzando quei protocolli (un esempio fra tutti è rappresentato dalla sintesi endoergonica dell'ATP). Un altro grosso problema è rappresentato dall'uniformità chirale dei composti organici di origine biologica. Tramite gli esperimenti di Miller si ottengono miscele racemiche dei possibili enantiomeri, ma sulla Terra esistono, ad esempio, solo L-amminoacidi e D-zuccheri. Nessuno riesce a spiegare perché.

Qualcuno ipotizza una possibile origine extraterrestre di molti composti organici. La loro uniformità racemica si spiegherebbe sulla base di presunti processi di *molecular-tunnelling* a bassa temperatura o a distruzione differenziata degli enantiomeri; per gli amminoacidi destrorotatori, si è ipotizzata, ad esempio, una distruzione selettiva operata da radiazioni ultraviolette polarizzate circolarmente, forse prodotte da stelle di neutroni. Tali ipotesi sono, in parte, sostenute dalla scoperta che certi amminoacidi di origine extraterrestre rinvenuti sul meteorite di Murchinson (Australia) hanno natura racemica. Un ultimo punto da considerare è che le sintesi di Miller necessitano di una forte presenza di CH_4 e NH_3 . Tuttavia, oggi sono in molti a sostenere che l'atmosfera primitiva abbia perso molto velocemente il suo carattere riducente e che fosse composta prevalentemente da CO_2 . Un tale scenario rende praticamente impossibile molte delle sintesi milleriane e quindi rende lecita l'ipotesi che l'origine di molti composti sia da ricercarsi nell'apporto esogeno.

Indipendentemente dalla natura endogena o esogena dei composti organici di base (scartando l'ipotesi che la vita sia giunta sulla Terra già sotto forma di organismo vivente), bisogna necessariamente ipotizzare una fase prebiologica in

cui le molecole organiche si sono organizzate a costituire dei prevenienti. A questo proposito sono state formulate diverse teorie.

In senso storico, le prime sono quelle cosiddette *fenotipiche*, che tendono a considerare la formazione delle strutture cellulari (involucro cellulare, proteine, ecc.) precedenti la formazione dell'informazione genetica. La più famosa di queste teorie si deve ad Oparin che, nel formularla, utilizzò le sue osservazioni sui *coacervati*. Soluzioni acquose di due o più polimeri (proteici, glucidici o lipidici) segregano due fasi, una ricca e una povera di colloidali. La prima tende ad organizzarsi in minuscole goccioline dette coacervati.

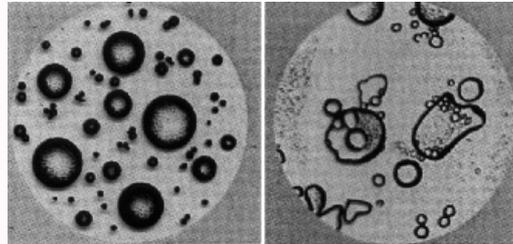


Fig. 4. I coacervati di Oparin.

Il fenomeno della coacervazione era noto da molto tempo; merito di Oparin fu quello di mostrarlo sotto una nuova luce, nel contesto delle ipotesi sull'origine della vita. I coacervati (Fig. 4) mostrano interessanti proprietà sia strutturali che funzionali. Sono delimitati da una pseudomembrana bistratificata, sono in grado di attirare certe macromolecole (polipeptidi e polinucleotidi) e di respingerne altre, dimostrano, inoltre, un rudimentale metabolismo. Se si aggiunge glucosio-1-fosfato nel mezzo ambiente di un coacervato, contenente l'enzima fosforilasi, esso assumerà il composto producendo amido, mentre il fosfato verrà espulso esternamente. Se oltre alla fosforilasi è presente anche un'amilasi, il coacervato sarà in grado non solo di produrre amido, ma anche di idrolizzarlo in segmenti di maltosio (dimero) i quali saranno poi espulsi insieme al fosfato residuo. Altri esperimenti dimostrano che alcuni coacervati, dotati di opportuno corredo biochimico, sono in grado di effettuare una specie di fotosintesi primitiva e possono subire una specie di selezione naturale (ad esempio, i coacervati in grado di operare un metabolismo primitivo sono più stabili di quelli privi di tale capacità).

Analoghe strutture pseudocellulari furono ottenute, alla fine degli anni Settanta, da Sidney Fox. Convinto, al contrario di Oparin, che la probabilità di formazione di macromolecole fosse maggiore sulla terraferma che in acqua, Fox partì da miscele di amminoacidi, che si presupponeva fossero presenti nel brodo primordiale, le pose su pezzi di lava riscaldati a temperature variabili tra i 75 e i 175 °C e ottenne dei *proteinoidi*, lunghe catene contenenti parecchie centinaia di amminoacidi. Immaginando un'azione di dilavamento delle lave primordiali su cui si fossero formati dei proteinoidi, Fox continuò la sua sperimentazione ponendo gli stessi in acqua. Ottenne in questo modo delle microsferule che chiamò *protocellule* (Fig. 5). Le microsferule di Fox sono dotate di proprietà molto interessanti: sono delimitate da una membrana semipermeabile, operano movimenti, sono dotate di capacità enzimatiche (sono in grado, ad esempio, di idrolizzare l'ATP e sono capaci di assimilare altri proteinoidi), riescono a produrre al loro interno altre sferule che vengono successivamente espulse, sono in grado di unirsi tra loro e di dividersi. In definitiva, entrambe le ipotesi si basano sul convincimento che, ai fini dello sviluppo della vita, la nascita dell'individualità abbia rappresentato la prima grande conquista.

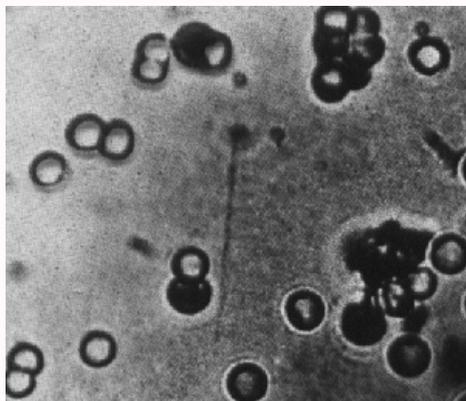


Fig. 5. Le microsfele (protocellule) di Fox.

Altri autori pensano che un primitivo metabolismo avrebbe potuto innescarsi anche in strutture non delimitate da membrane, ma su substrati minerali in grado di adsorbire e concentrare molecole organiche. Queste ipotesi costituiscono la base delle cosiddette *teorie minerali*. Barnal ha osservato che alcune argille che si depositano sui fondali adsorbono proteine ed acidi nucleici meglio dei coacervati; Cairns-Smith ha addirittura suggerito che i primi "sistemi di informazione genetica" fossero rappresentati da argille autoreplicanti. La distribuzione delle cariche elettriche su uno strato avrebbe indotto la formazione di uno strato complementare formato da particelle aventi carica elettrica uguale ed opposta. Tale sistema avrebbe successivamente adsorbito composti carboniosi e dato inizio all'evoluzione biologica.

Alcuni ricercatori pensano che la vita non avrebbe avuto inizio da strutture protocellulari, ma da primitivi ammassi di materiale genetico. Successivamente, questi "geni nudi" avrebbero costruito una struttura protocellulare di protezione del genoma e di sintesi di altro genoma.; in pratica le cellule altro non sarebbero che "macchine create dal DNA per produrre altro DNA". Queste *teorie genotipiche*, tuttavia, non godono di grosso credito, essendo troppo dispendiosa l'ipotesi di una formazione primitiva di DNA, una macromolecola la cui sintesi e funzionalità è troppo legata alla presenza di proteine.

Uno dei risultati più importanti conseguiti dalla scienza nella soluzione del problema dell'origine della vita si deve a T.R. Cech, premio Nobel per la Chimica nel 1989, che, nei primi anni Ottanta, ha dimostrato che molecole di RNA possono avere attività enzimatica (promuovendo reazioni chimiche autonome, senza l'intervento di enzimi proteici) e sono in grado di compiere una primitiva autoreplicazione usando come stampo una subunità interna. Tali funzioni enzimatiche, peraltro osservabili nell'RNA di organismi viventi attuali, potrebbero essere la testimonianza di un primitivo "mondo a RNA", nel quale tutti gli organismi dovevano essere costituiti solo da RNA e dal quale si sarebbe solo successivamente evoluto il mondo attuale costituito da DNA e proteine, con funzioni rispettivamente genetiche e metaboliche. Come si sarebbe originato l'ipotizzato "mondo a RNA" di Cech? Il chimico tedesco Eigen e successivamente Orgel hanno dimostrato che, in presenza di enzimi proteici, miscele di nucleotidi possono dar luogo a RNA capace di replicarsi (riprodursi), di mutare e di competere con altre molecole di RNA. Secondo questi autori, la vita sulla Terra potrebbe aver avuto origine proprio a partire da popolazioni di molecole di RNA-simili ("quasi specie") i cui individui, capaci di competizione, si sarebbero associati con popolazioni proteiche, dapprima stabilendo con esse un rapporto parassitario, quindi un equilibrio stabile: l'attuale "divisione del lavoro" tra acidi nucleici e proteine!

L'ipotesi di un mondo ancestrale a RNA, sebbene molto affascinante, solleva dubbi sia di tipo chimico che

probabilistico. Per quanto riguarda i primi, nessun ricercatore è riuscito sinora a proporre un modello secondo il quale negli oceani e nell'atmosfera primitiva si siano potute formare adeguate quantità di RNA, essendo la sintesi di questo composto troppo laboriosa ed incerta. Il secondo dubbio riguarda la possibilità che molecole di RNA in grado di replicarsi e di competere possano essere state abbastanza stabili, nel tempo, da evolversi successivamente in "organismi" più complessi. L'RNA come precursore dei viventi, quindi, rimane al momento un'ipotesi molto dispendiosa.

Così, se è pur vero che sempre più studiosi pensano che il DNA, come depositario dell'informazione genetica, sia stato preceduto dall'RNA, è forse altrettanto plausibile che forse neppure quest'ultimo ha rappresentato la prima molecola informativa autoreplicante comparsa sulla Terra. Questa primitiva molecola con significato genico avrebbe dovuto possedere tre capacità ed avere a disposizione un ambiente chimico favorevole:

- 1) capacità di contenere informazione genetica;
- 2) capacità di indirizzare la propria sintesi a partire da elementi di base (monomeri);
- 3) capacità di essere più stabile del suo tasso di decomposizione.

Tutto questo avendo larga disponibilità di monomeri nel mezzo ambiente. Se immaginiamo un mondo primordiale RNA-simile, considerando le prerogative e le necessità prima espresse, dobbiamo necessariamente pensare, come ha fatto Joyce, che la nascita dell'autoreplicazione sia stata preceduta da un'evoluzione chimica che ha prodotto profonde alterazioni chimiche ambientali, il che può aver consentito la nascita di una molecola non RNA-simile in grado di favorire la sintesi di una sostanza RNA-simile. In questa fase potrebbero aver svolto un ruolo molto importante gli "organismi" argilla, grazie alle loro capacità di sia di concentrazione delle sostanze che catalitiche. È probabile, tuttavia, che tale sostanza RNA-simile fosse strutturalmente meno esigente, nel processo di sintesi, rispetto al complesso e dispendioso chimismo dell'attuale RNA.

Infine, è perfettamente lecito pensare che il mondo primordiale abbia visto la nascita contemporanea e indipendente di sistemi biologici di tipo strutturale (*corpi cellulari*) e di sistemi genetici "nudi" (*protogenomi*), anche se oggi essi appaiono perfettamente integrati all'interno della cellula. A tale proposito è stato osservato che l'eventuale unione tra sistemi di membrana e sistemi genetici avrebbe espresso un elevato valore adattativo potendo, quindi, essere favorita dalla selezione naturale.

Glossario

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi

Antonio Bonfitto

Glossario

Introduzione

Strutture e funzioni della cellula vivente

Autoconservazione e processi energetici

Acidi nucleici: DNA e RNA

Amminoacidi e proteine

Sintesi delle proteine

Meccanismi di replicazione

Teorie sull'origine della vita

Ipotesi sulla fase biochimica e prebiologica

Glossario

Lettere

Acidi nucleici. Molecole giganti che fungono da supporto per l'informazione genetica.

Amminoacidi. Molecole di base delle proteine.

ATP. Adenosintrifosfato; l'unica molecola energetica utilizzabile dagli organismi viventi nei processi vitali; la sua forma scarica è rappresentata dall'ADP, adenosindifosfato. La fotosintesi clorofilliana, la fermentazione cellulare e la respirazione cellulare consentono di ricaricare, in varia misura, molecole di ADP ritrasformandole nella forma energeticamente attiva di ATP.

Autotrofo. Organismo in grado di sintetizzare i propri alimenti in modo autonomo a partire da composti non organici. Si contrappone ad **eterotrofo**, organismo non in grado di compiere tale sintesi e quindi costretto a nutrirsi di alimenti già sintetizzati.

Basi del DNA. Adenina, citosina, guanina e timina. Composti chimici elementari la cui sequenzialità è alla base del codice genetico; gruppi di tre basi specificano un amminoacido. L'unione di una base con uno zucchero ed un atomo di fosfato rappresenta un **nucleotide**, elemento di base degli acidi nucleici. Nell'RNA (vedi oltre) la timina è sostituita dall'uracile.

Cloroplasto. Organulo cellulare esclusivo degli organismi vegetali; al suo interno avviene la **fotosintesi clorofilliana**, processo che consente di sintetizzare glucosio utilizzando energia solare, anidride carbonica e acqua.

Cordati. Organismi animali pluricellulari provvisti permanentemente o transitoriamente di un organo assile dorsale di sostegno detto corda o notocorsa. Vi si annoverano, tra gli altri, i vertebrati.

Crossing-over. Scambio di materiale genetico tra cromosomi omologhi nel corso della meiosi.

DNA. Acido desossiribonucleico; acido nucleico formato da un doppio filamento avvolto a spirale su cui è scritta l'informazione genetica complessiva (**genoma**) della cellula.

Enzima. Proteine in grado di catalizzare una reazione chimica metabolica.

Eucariote. Organismo dotato di nucleo cellulare contenente il DNA; si contrappone a **procariote**, organismo privo di nucleo cellulare e con DNA disperso nel citoplasma.

Glicolisi. Reazione chimica nel corso della quale il **glucosio**, zucchero a sei atomi di carbonio, viene spezzato in due frammenti a tre atomi di carbonio 6, una reazione che

avviene in assenza di ossigeno ed è analoga alla **fermentazione**.

Gameti o cellule germinali. Cellule specializzate che rendono possibile la fecondazione incrociata e quindi la riproduzione.

Metabolismo. L'insieme delle attività energetiche e funzionali che avvengono nella cellula o in un organismo pluricellulare.

Mitocondri. Organuli cellulari all'interno dei quali avviene la **respirazione cellulare**, nel corso della quale viene prodotta energia (ATP) attraverso la combustione del glucosio, in presenza di ossigeno, che viene ridotto ad anidride carbonica ed acqua.

Mitosi. Processo di divisione cellulare che consente la formazione di due cellule figlie a partire da una singola cellula madre; quando la mitosi avviene in un organismo unicellulare coincide con la riproduzione.

Meiosi. L'insieme dei fenomeni che interessano il nucleo nel corso della formazione di cellule (come i gameti) contenenti un corredo genetico pari alla metà di quello della cellula di partenza.

RNA. Acido ribonucleico; è un acido nucleico a filamento singolo che viene impiegato nei processi di sintesi delle proteine. Ne esistono vari tipi, tra i più importanti l'RNA messaggero (**mRNA**), che trasferisce l'informazione genetica dal DNA agli organuli cellulari deputati alla sintesi delle proteine (**ribosomi**) e l'RNA di trasferimento (**tRNA**) che veicola, verso gli stessi organuli, gli amminoacidi necessari.

Lecture

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi/ Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

Home

Lecture

Prime tappe
dell'evoluzione dei
viventi

Lecture

Evoluzione
biologica dei
viventi

E. Balletto, *Zoologia evolutiva*, Zanichelli, Bologna, 1995

M. Rizzotti, *Prime tappe dell'evoluzione cellulare: dalla
comparsa della prima cellula agli organismi di tipo moderno*,
Zanichelli, Bologna, 1995.

Lecture

Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

**Il Precambriano:
dalla formazione
della Terra fino a
590 milioni di anni
fa**

**Paleozoico: da 590
a 248 milioni di
anni fa**

**Mesozoico o Era
Secondaria: da 225
a 65 milioni di anni
fa**

**Cenozoico: gli
ultimi 65 milioni di
anni**

Lecture

Il Precambriano: dalla formazione della Terra fino a 590 milioni di anni fa

Esistono prove documentali che dimostrano come l'atmosfera in cui si svolsero le prime tappe dell'evoluzione degli organismi viventi fosse riducente o, quantomeno, non ossidante, con condizioni virtualmente anossiche. Prove induttive, derivanti dall'analisi dell'attuale biochimica dei viventi, mostrano, altresì, che molte delle vie metaboliche che conducono alla sintesi di composti ad elevato contenuto di carbonio (ad esempio, gli acidi grassi) rappresentano il risultato finale di un lungo processo il cui le singole tappe ossidative configurano altrettante aggiunte, caratteristiche di organismi man mano più evoluti, rese possibili da una crescente disponibilità ambientale di ossigeno.

Oggi si crede che la vita sulla Terra sia comparsa molto precocemente, poco più di 500 milioni di anni dopo la sua formazione, quindi circa 4 miliardi di anni fa. Indipendentemente dalle differenti scuole di pensiero circa l'origine della vita, è opinione pressoché comune che i primi organismi viventi (protobionti) fossero microscopici, unicellulari, procarioti, simili agli attuali batteri sferoidali (cocchi) (Fig. 1). Probabilmente formavano un sottile strato vivente sul fondo di bassi mari epicontinentali, dove si nutrivano di sostanza organica continuamente formata per via non biologica e direttamente disponibile nel mezzo ambiente. Si trattava, quindi, di organismi eterotrofi che, vivendo in condizioni pressoché anossiche, erano costretti a operare la fermentazione delle sostanze assorbite dall'ambiente. Tuttavia, un processo evolutivo basato su un organismo eterotrofo è messo in crisi nel momento in cui il tasso di produzione delle sostanze organiche è superato dal tasso di utilizzazione delle stesse. È molto probabile che molto presto, in seno a queste comunità eterotrofe, sia sorta una stirpe di organismi autotrofi. Questo, probabilmente, avvenne nel momento in cui la competitività nell'approccio alle risorse, ormai prossime all'esaurimento, rese premiante, in termini adattativi, la capacità di sintetizzare autonomamente le sostanze nutritive necessarie alla sopravvivenza. Si sviluppò, quindi, la fotosintesi, la più plausibile delle forme di autotrofismo. Le prime forme autotrofe operavano, tuttavia, una fotosintesi anaerobia, analoga a quella operata da certi batteri attuali. Nel corso di questo tipo di fotosintesi non viene prodotto ossigeno come elemento secondario della reazione (viene liberato zolfo ed acqua) ed essa non può avvenire in sua presenza. Alcune rocce provenienti dalla formazione di Isua (Groenlandia), datate circa 3,8 miliardi di anni, mostrano già un rapporto tra gli isotopi stabili del Carbonio che è indice della presenza di organismi fotosintetizzanti. Poco più tardi, da questi batteri anaerobi si originarono i primi organismi in grado di operare una fotosintesi aerobia (in pratica i precursori dei moderni Cianobatteri). L'ossigeno liberato nel corso di

questa nuova fotosintesi costrinse i fotosintetizzanti anaerobi a sottrarsi all'azione tossica del gas, rifugiandosi negli strati più profondi della colonna d'acqua, dove ancora permanevano quelle condizioni di anossia indispensabili alle loro modalità fotosintetizzanti. Gli aerobi scalarono, quindi, gli anaerobi dal vertice di queste prime comunità, relegandoli in ambiti marginali, scarsamente illuminati, lontani dalla luce necessaria al processo fotosintetico. Ancor oggi molti batteri fotosintetizzanti anaerobi occupano questi habitat.

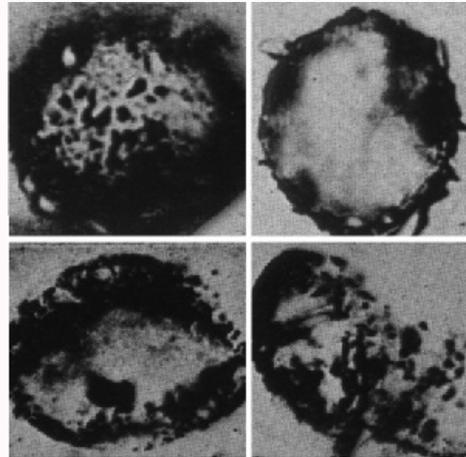


Figura 1. Microfossili di procarioti sferoidali provenienti (in alto) dalla formazione di Fig Tree (Swaziland, Sud Africa) (3,1 miliardi di anni) e (in basso) dalla formazione di Witwatersband (Transvaal, Sud Africa) (2,7 miliardi di anni).

Cosa sappiamo di queste prime forme di vita? Molto poco. I fossili precambriani sono rari, poco conosciuti e, addirittura, restano dubbi sulla natura biologica di molte delle strutture interpretate come fossili. Tra le più antiche forme di vita descritte (per alcune delle quali sussistono, appunto, dubbi), vi sono alcune forme filamentose o sferoidali interpretate come batteriche e provenienti dalla formazione di Pilbara (Australia Nord occidentale), e dalla formazione di Fig-Tree (Swaziland, Sud Africa), risalenti a circa 3,5-3,1 miliardi di anni fa. Meno problematica risulta l'interpretazione delle cosiddette stromatoliti, fossili costituiti da lamine di selce impilate che sembra siano il risultato del metabolismo di colonie batteriche filamentose (Fig. 2). Ancor oggi tali strutture si formano in alcune zone dell'Australia (Shark Bay) come risultato dell'azione biologica di colonie di Cianobatteri fotosintetizzanti. Stromatoliti fossili sono presenti sia nella formazione di Pilbara che in quella di Fig-Tree. Studi compiuti sui sedimenti che le contengono hanno evidenziato la presenza di catene carboniose derivate dalla demolizione di sostanze componenti le clorofille. Quindi, colonie formate da organismi fotosintetizzanti aerobi hanno iniziato a immettere ossigeno nell'ambiente già a partire da circa 3 miliardi di anni fa. Tuttavia, per molto tempo, la presenza nell'ambiente di minerali in grado di reagire con l'ossigeno, come il ferro, impedì che esso potesse accumularsi nell'atmosfera. Significative al riguardo sono le imponenti formazioni di minerali sedimentari la cui genesi è strettamente legata alla concentrazione di ossigeno nell'ambiente. Un esempio in tal senso è rappresentato dall'Uraninite (UO_2) che si rinviene in depositi formati nei letti di alcuni corsi d'acqua precambriani. In presenza di ossigeno questo minerale si ossida facilmente (in U_3O_8) sciogliendosi. È stato dimostrato che questi depositi non avrebbero potuto formarsi in presenza di una concentrazione di ossigeno superiore all'1%. I depositi di uraninite sono più vecchi di 2 miliardi di anni e non si rinvengono mai in depositi più recenti. Questo potrebbe indicare che, a partire da quella data, la concentrazione di ossigeno nell'ambiente sia stata tale da impedire la formazione dei depositi di

uraninite. Circa 2 miliardi di anni fa compaiono altre formazioni minerali molto interessanti, si tratta di formazioni ferrose note come *red beds* (letti rossi), formati da ossidi di ferro trivalente (limonite Fe_2O_3), che non compaiono in sequenze più antiche. Prima della scoperta delle più antiche stromatoliti si pensava che i *red beds* fossero il risultato di un processo ossidativo non biologico del ferro bivalente. Oggi si ritiene, al contrario, che l'ossigeno utilizzato sia di origine biologica. La prova mineralogica più convincente, tuttavia, sembra essere rappresentata da un altro tipo di deposito di ferro: le formazioni a bande. Si tratta di miliardi di tonnellate di ossidi di ferro, inclusi in una matrice ricca di silice, che si sono depositati in un tempo di poche centinaia di milioni di anni, a cominciare da poco prima di due miliardi di anni fa. Solo una larga disponibilità di ossigeno ambientale avrebbe potuto consentire questa deposizione. Possiamo immaginare che negli oceani primitivi, anossici, il ferro esistesse in forma bivalente (ferroso), quindi solubile, disciolto in acqua di mare. La comparsa della fotosintesi aerobia rese disponibile ossigeno biologico, la cui concentrazione iniziò ad aumentare soprattutto negli strati più superficiali della colonna d'acqua. Qui cominciò a reagire con il ferro disciolto, trasformandolo in ferro trivalente (ferrico) e dando origine a ossidi di ferro idrati insolubili che precipitando, si accumularono assieme alla silice sul fondo degli oceani. Solo quando tutto il ferro non ossidato, o materiali analoghi, fu precipitato, la concentrazione dell'ossigeno atmosferico cominciò a salire.

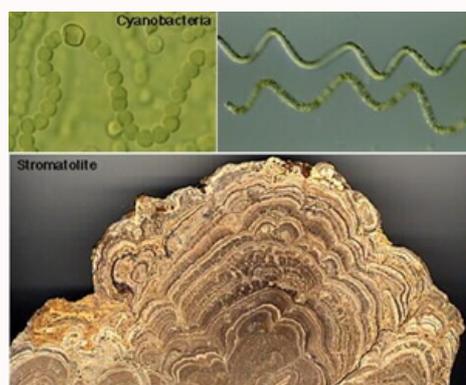


Figura 2. Sezione di Stromatolite e (a destra) fossile di microalga filamentosa risalente a 2 miliardi di anni fa, proveniente dalla formazione di Gunflint (Ontario, Canada).

I Cianobatteri fotosintetizzanti, tuttavia, non erano i soli microrganismi presenti nei mari primitivi; altri, e forse più numerosi, procarioti operavano vari tipi di chemiosintesi, tra cui la fissazione dell'azoto, ed è forse tra questi che vanno ricercati i primi organismi aerobi. La respirazione aerobia fu possibile solo quando la concentrazione di ossigeno atmosferico raggiunse il cosiddetto "punto di Pasteur", pari a 1/100 dell'attuale concentrazione, un livello che è sufficiente a rendere vantaggiosa la vita aerobia. Tale soglia fu raggiunta probabilmente a partire da 2,8 miliardi di anni fa; per circa un miliardo di anni, tuttavia, la concentrazione di O_2 si mantenne molto bassa (1-2 % dell'attuale) per l'azione di tamponamento operata dai minerali ferrosi. Con l'esaurirsi del ferro disciolto, forse 1,9-1,8 miliardi di anni fa, una grande quantità di ossigeno si rese disponibile e questo determinò, probabilmente, l'estinzione di numerose forme di vita anaerobie per le quali era tossico. Alcune trovarono rifugio in ambienti marginali o estremi che si mantengono costantemente anossici, altri svilupparono forme di resistenza, come le eterocisti, strutture biologiche interpretate in tal senso, molto comuni tra gli strati di quel periodo, strati che testimoniano anche la grande diffusione raggiunta, a quell'epoca, sia dagli stromatoliti che dai procarioti in generale. In questo periodo si svilupparono anche i primi eucarioti, gli acritarchi, organismi planctonici,

eterotrofi, simili agli attuali dinoflagellati. La sempre più massiccia presenza di organismi fotosintetizzanti e non determinò un sensibile calo dell'anidride carbonica e un aumento dell'ossigeno tale da consentire la formazione di uno strato di ozono che, frapponendosi alle letali radiazioni ultraviolette, favorì ulteriormente lo sviluppo della vita.

Circa un miliardo di anni fa si verificò quello che può essere considerato uno degli eventi più importanti nella storia della Vita sulla Terra: la comparsa della respirazione cellulare che, operando la combustione completa delle sostanze nutritive, consente una produzione di energia biologica 18 volte superiore a quella ottenibile con la semplice glicolisi anaerobia. La respirazione cellulare consentì di chiudere il ciclo del carbonio.

I processi di respirazione cellulare avvengono nei mitocondri. Questi organuli cellulari sono dotati di un proprio corredo genetico (analogamente ai cloroplasti). Questo particolare aspetto ha consentito di formulare la cosiddetta *teoria endosimbiontica* per spiegare l'origine delle cellule eucariote. In pratica, si immagina che l'attuale funzionalità cellulare sia il frutto di apposizioni successive di strutture biologiche, in grado di operare singole funzioni che si sono integrate in unica struttura, la cellula appunto, ricevendone vantaggio reciproco. Nel caso particolare dei mitocondri, si immagina che un primitivo procariote, in grado di fagocitare grandi quantità di nutrimento, sia entrato in associazione simbiotica con "protomitocondri" liberi capaci di operare la respirazione cellulare, ma con scarse capacità nutrizionali. È evidente che l'associazione tra queste due tipologie di organismi è estremamente vantaggiosa in termini di bilancio energetico: il procariote poteva fornire grandi quantità di nutrimento al protomitocondrio le cui capacità consentivano al primo un migliore recupero energetico. Numerosi dati molecolari sembrano confermare la bontà della teoria endosimbiontica, anche per altre strutture (ad esempio i cloroplasti); tra l'altro, forme di associazione tra organismi differenti sono osservabili anche al giorno d'oggi: un classico esempio è costituito dai licheni che risultano dall'associazione di un fungo con una alga.

Comunque, l'acquisizione della respirazione cellulare, con le sue implicazioni in termini di sfruttamento delle risorse, determinò anche la comparsa di una nuova fenomenologia ambientale: la predazione. Dal punto di vista energetico, la predazione rappresenta una sorta di investimento. Un organismo non in grado di sfruttare completamente le risorse disponibili (organismo fermentatore) non trova vantaggioso operare forme di predazione che comportino la ricerca attiva del cibo, perché rischia di spendere più energia di quella ricavabile dalla preda. Al contrario, per un organismo in grado di utilizzare al meglio l'energia contenuta in qualsiasi preda, l'attività di predazione diviene selettivamente vantaggiosa. La respirazione cellulare indusse, quindi, anche cambiamenti nei rapporti esistenti tra questi primi microrganismi. Dalle pacifiche comunità di procarioti, prive di qualsiasi forma di competizione diretta, si passò a forme di interazione e competizione diretta, interindividuali. Mentre tra i procarioti eterotrofi fermentatori la competitività nell'approccio alla risorsa era essenzialmente operata tramite un miglioramento di una funzionalità strutturale e metabolica che consentisse di nutrirsi il più possibile di un alimento abbondante e in continua sintesi (senza alcun timore di pascolare accanto ad un altro fermentatore), la comparsa della respirazione cellulare rese tutti potenziali prede. In pratica, nacque "l'omicidio" a scopo alimentare e si definirono i rapporti tra produttori primari e consumatori, tra autotrofi ed eterotrofi, tra predatori e prede.

L'ultima grande conquista della Vita fu sicuramente l'acquisizione della pluricellularità. Essa fu favorita per gli indubbi vantaggi che garantiva in termini di stabilità

strutturale (aumento delle dimensioni, aumento delle capacità rigenerative, allungamento della vita) e di funzionalità (divisione del lavoro tra differenti ceppi cellulari riuniti in organi e tessuti). Questa condizione fu sicuramente acquisita attorno a 800 milioni di anni fa, periodo da cui ci pervengono microfossili di organismi interpretati come animali (Chitinozoi), rinvenuti in alcuni siti americani, dell'Arabia e della Groenlandia. Con quest'ultima acquisizione si completa il corredo fenomenologico della Vita ed essa potrà esprimere, nelle ere successive, una potenzialità ben lungi dall'essere, ad oggi, interamente compresa.

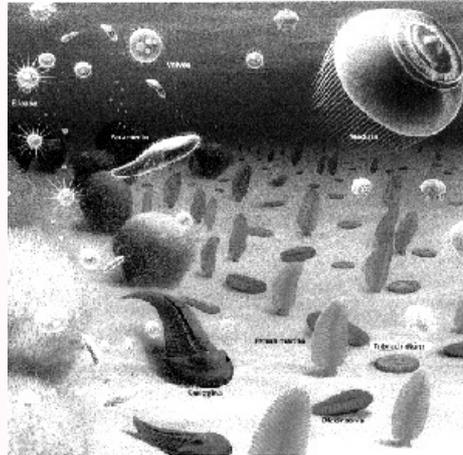


Figura 3. Fauna precambriana di Ediacara.

I più antichi resti di organismi sicuramente appartenenti ad animali pluricellulari furono scoperti, nel 1947, nella Formazione di Ediacara (Australia meridionale), risalente al tardo Precambriano e datata tra i 670 e i 580 milioni di anni fa. La fauna di Ediacara (Fig. 3) è rappresentata da organismi dal corpo molle, privi di parti dure, tra cui dominano forme medusoidi, pennatulate e altre che sono considerate antenate di gruppi quali celenterati, anellidi, artropodi ed echinodermi. Pur essendo rappresentata da qualche decina di specie, la fauna di Ediacara denuncia una complessità strutturale tale da far supporre un'origine più antica, di cui non esiste documentazione. Infatti, tra questi primitivi organismi mancano rappresentanti di quei gruppi animali che caratterizzeranno fortemente le faune marine della successiva era Paleozoica, come molluschi e brachiopodi; inoltre, anche tra gli artropodi, o presunti tali, rinvenuti ad Ediacara nessuno è un chiaro antenato dei trilobiti, uno dei gruppi guida del Paleozoico. Alcuni paleontologi, tuttavia, ritengono scorretto il tentativo di classificare la fauna di Ediacara usando gruppi animali attuali. Al contrario, essi andrebbero considerati come una serie di "tentativi evolutivi", in gran parte falliti, di definire architetture animali poi abbandonate nel corso dell'evoluzione. Solo alcuni di questi esperimenti sarebbero stati in grado di originare ulteriori rappresentanti, mentre la maggior parte di essi sarebbero finiti in vicoli ciechi dell'evoluzione. In ogni modo, queste faune (rinvenute in seguito anche in Africa, Inghilterra e nella Siberia settentrionale) documentano comunque l'esistenza, nel tardo Precambriano, di organismi pluricellulari ben strutturati e, probabilmente, più differenziati, come numero di specie, di quanto la documentazione fossile lasci supporre.

Paleozoico: da 590 a 248 milioni di anni fa

Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

**Il Precambriano:
dalla formazione
della Terra fino a
590 milioni di anni
fa**

**Paleozoico: da 590
a 248 milioni di
anni fa**

**Mesozoico o Era
Secondaria: da 225
a 65 milioni di anni
fa**

**Cenozoico: gli
ultimi 65 milioni di
anni**

Glossario

Lecture

Paleozoico: da 590 a 248 milioni di anni fa

L'era Paleozoica è divisa in 6 periodi: *Cambriano* (590-505 milioni di anni fa), *Ordoviciano* (505-438 milioni di anni fa), *Siluriano* (438-408 milioni di anni fa), *Devoniano* (408-360 milioni di anni fa), *Carbonifero* (360-286 milioni di anni fa) e il *Permiano* (286-248 milioni di anni fa). L'inizio dell'era della "Vita antica" o Paleozoico si fa coincidere con la comparsa dei primi organismi dotati di gusci duri o scheletri. Non sono stati ancora chiariti del tutto i motivi che hanno determinato, all'inizio del Cambriano, l'acquisizione, da parte degli organismi, di strutture scheletriche. Quel che è certo è che la maggior parte dei gruppi viventi in quel periodo ne erano provvisti. Alcuni Autori hanno suggerito che nei mari precambriani non vi fosse sufficiente calcio in soluzione o che vi fosse troppa anidride carbonica ad aumentarne la solubilità, per consentire un adeguato sviluppo del metabolismo del calcio negli organismi: una prova sarebbe fornita dal fatto che le conchiglie di alcuni gruppi, come i brachiopodi, hanno aumentato il proprio contenuto in calcio nel corso di tutto il Cambriano, man mano aumentava la sua disponibilità. Questa ipotesi sembra tuttavia smentita dalla presenza di stromatoliti. Più adeguata appare l'ipotesi che individua nei vantaggi morfo-meccanici, legati al possesso di uno scheletro, la determinante favorevole ad una sua selezione; lo scheletro avrebbe consentito una maggiore capacità di movimento e, quindi, più adeguate forme di difesa o di attacco. Ciò sembra essere confermato dal fatto che animali di quel periodo possedevano già organi di senso ben sviluppati, come antenne e occhi composti, del tutto simili a quelli posseduti dagli attuali artropodi.

Durante il Cambriano, si ebbe una poderosa trasformazione della superficie del globo. Inizialmente tutte le terre emerse erano riunite in un unico supercontinente, il *Pangea I*. Nel corso del periodo questo si frammentò, dando origine a quattro masse continentali che, a causa di un abbassamento del loro livello, vennero successivamente invase dalle acque. Si formarono così vasti mari caldi di tipo tropicale, profondi meno di 150 m.

Da questi mari ci provengono resti fossili di organismi esclusivamente marini, che documentano uno dei più grandi mutamenti mai avvenuti della storia degli animali: la comparsa di un enorme numero di gruppi, ognuno dei quali caratterizzato da un differente e diversificato piano architettonico. Questa *radiazione adattativa* è nota come *esplosione cambriana*. Anche se molte delle forme rinvenute appaiono ancora come esperimenti evolutivi senza futuro, è certo che la comparsa di uno scheletro duro - che ha indubbiamente determinato un aumento della documentazione fossile, per cui secondo alcuni questa esplosione sarebbe più apparente che reale - permettendo lo sviluppo di diversi tipi di locomozione, ha consentito a questi

animali di occupare nicchie ecologiche non sfruttate. Indicativo in tal senso è il dato riferito al mondo vegetale che non sembra esprimere la stessa tendenza al punto che, nei primi trenta milioni di anni del Cambriano, le piante continuano ad essere rappresentate solo da poche forme algali.

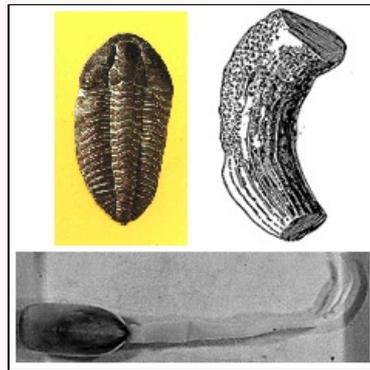


Figura 4. Trilobite, Archeociato e (in basso) il brachiopode *Lingula*, vero fossile vivente.

I più caratteristici rappresentanti della fauna cambriana furono i trilobiti (Fig. 4 in alto a sinistra), gli archeociati e i brachiopodi (Fig. 4 in alto a destra e in basso). Dotati di un corpo tripartito (da cui il nome), i trilobiti rappresentano il gruppo guida del Paleozoico; erano dotati di occhi composti e seppero diversificarsi in numerosissime forme con dimensioni variabili da pochissimi centimetri fino a mezzo metro. I brachiopodi, organismi dotati di un guscio formato da due valve, prosperarono per tutto il Paleozoico; le poche forme attualmente sopravvissute, come la *Lingula* (Fig. 4 in basso), un vero e proprio fossile apparentemente immutato da circa 450 milioni di anni, sono da considerarsi relictte. Gli archeociati, animali simili a spugne o a coralli, furono i più importanti costruttori di scogliere dei caldi mari cambriani e si estinsero alla fine del periodo. Tuttavia, il gruppo di fossili forse più interessante del Cambriano, estremamente indicativo del grande processo di differenziazione faunistica in atto, è stato rinvenuto nella formazione delle Burgess Shales, nella Columbia Britannica (America settentrionale), una zona fossilifera del Cambriano medio, nota da una settantina d'anni ma studiata a fondo solo in anni recenti. La varietà di forme estratta dalle Burgess Shales (Fig. 5) è impressionante, soprattutto se confrontata con lo sparuto numero di piani organizzativi noti alla fine del Precambriano. Gli animali di Burgess Shales hanno forme curiosissime e, se per alcuni appare lecita una collocazione all'interno di gruppi attualmente noti (crostacei, anellidi, molluschi ecc.), altri rappresentano delle morfologie assolutamente originali ed uniche che testimoniano dei tentativi della Vita di "provare" differenti alternative morfologiche e funzionali, solo alcune delle quali, tuttavia, costituiscono le radici di linee evolutive giunte fino a noi. Tra queste, la linea dei Cordati, rappresentata dal genere *Pikajja*, all'interno della quale è contenuta quella dell'uomo.

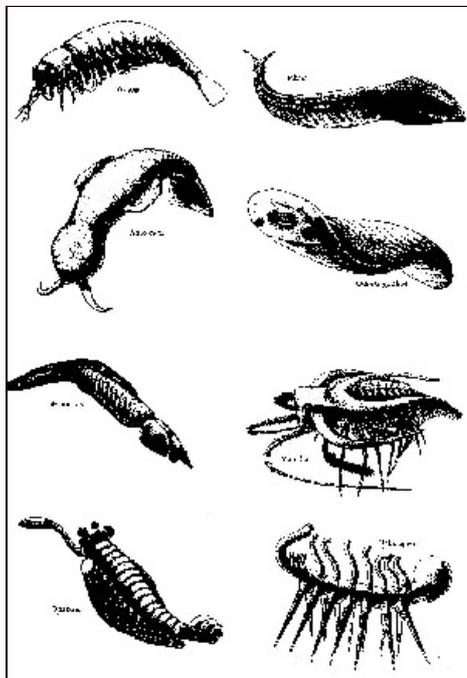


Figura 5. Alcuni generi rappresentanti della fauna cambriana di Burgess Shale.

Anche il periodo successivo, l'Ordoviciano, fu caratterizzato da drammatici mutamenti ambientali. All'inizio le vaste pianure del Canada e dell'Asia furono sommerse dai caldi mari cambriani ancora in avanzamento. Nell'ordoviciano medio, al contrario, vi fu una contrazione dei mari interni che determinò la comparsa di vaste aree basse e asciutte che furono riallagate solo alla fine del periodo. I mutamenti ambientali influenzarono profondamente la vita animale. L'evoluzione delle faune ordoviciane avvenne, infatti, all'insegna della diversificazione e della specializzazione. Tra i gruppi più importanti ricordiamo i molluschi (bivalvi e cefalopodi), gli echinodermi (che raggiunsero in questo periodo il loro massimo livello di diversificazione), i briozoi e i brachiopodi che occuparono progressivamente le barriere coralline, assieme ai coralli tabulati e rugosi. Nell'Ordoviciano comparvero anche gli Agnati, pesci primitivi, dotati di una struttura assile dorsale di sostegno (vertebrati), privi di mascelle mobili, di taglia media, sprovvisti di pinne pari e dotati di una lunga coda flessibile. Non erano dei buoni nuotatori e, probabilmente, vivevano in acque basse dove si nutrivano di piccoli invertebrati di fondo.

Durante il breve periodo successivo, il Siluriano, si svilupparono e stabilizzarono soprattutto le comunità legate alle scogliere coralline e proseguì l'evoluzione dei vertebrati. Dai primi agnati, che si muovevano pigramente sul fondo nutrendosi per filtrazione, si originarono le prime forme di pesci provvisti di un paio di mascelle mobili. I primi Gnatostomi (vertebrati dotati di bocca mobile) furono i Placodermi. Questa nuova struttura, che deriva dalla trasformazione del primo paio di archi branchiali, rappresentò un evento sconvolgente all'interno delle comunità acquatiche. La comparsa di una bocca mobile, in grado di mordere sia in attacco che in difesa, determinò una pressione selettiva favorevole sia all'aumento delle dimensioni che allo sviluppo di strutture difensive; i placodermi devono il loro nome alle robuste placche ossee che ne ricoprivano il corpo e seppero esprimere forme gigantesche, lunghe fino a 7 metri. L'origine dei placodermi è probabilmente da localizzarsi tra le comunità ittiche dulciacquicole o salmastre; più tardi, tuttavia, una linea di discendenti tornò al mare dando origine a tutti i moderni pesci marini. I placodermi, in poco tempo, soppiantarono quasi del tutto gli agnati che sono riusciti a giungere fino a noi solo con poche specie ectoparassite (lamprede e

missine). Si estinsero fra la fine del Carbonifero e l'inizio del Permiano, dopo aver originato due gruppi estremamente importanti dal punto di vista evolutivo: i pesci cartilaginei (codroitti) e i pesci ossei (osteoiitti).

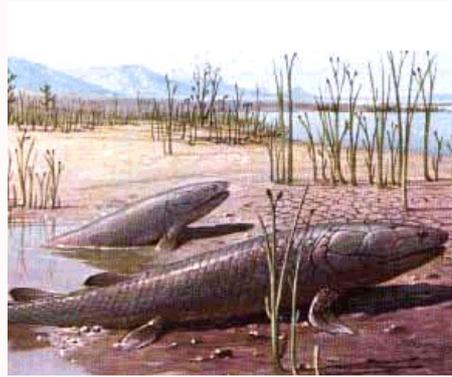


Figura6. Il pesce devoniano *Eusthenopteron*

Nel corso del Siluriano si ebbero, oltre al proseguimento dell'attività tettonica, numerose fluttuazioni di livello delle acque, dovute a una serie di glaciazioni (estensione dei ghiacci polari) e disgeli successivi, che crearono fenomeni di siccità, in alcuni casi anche molto estesi. In tali circostanze, furono fortemente favoriti gli organismi in grado di resistere all'asciutto quando laghi o mari si ritiravano. Nel tardo Siluriano, comparvero le prime piante terrestri (derivate da alghe) dotate di fusti di sostegno (piante vascolari), che, pur essendo ancora legate all'acqua per la riproduzione, furono in grado di colonizzare il grande ambiente, fino ad allora deserto, delle terre emerse. La presenza di piante terrestri creò le condizioni adatte per la conquista animale della terraferma. Al loro seguito si mossero i primi animali terrestri, rappresentati da "vermi" simili ai millepiedi (archipolipodi). Erano caratterizzati da grandi occhi composti (come quello degli insetti) e da un robusto scheletro esterno (esoscheletro) munito di appendici spinose. Questa prima invasione delle terre emerse fu resa possibile proprio dalla presenza, in questi organismi primitivi, di uno scheletro esterno rigido, sclerificato ed impermeabile. Questa struttura garantiva isolamento idrico (impedendo il disseccamento dei liquidi interni) e sufficiente rigidità per sollevare il corpo in un ambiente in cui nulla si opponeva alla forza di gravità. In questo modo iniziarono a formarsi, in luoghi prossimi all'acqua, le prime semplici comunità pioniere terrestri.

Fu soprattutto nel periodo successivo, il Devoniano, che questi ecosistemi pionieri si svilupparono e si differenziarono. Con la proliferazione delle piante terrestri (comparvero licopodi, equiseti e felci), agli animali furono offerte nuove possibilità ambientali sempre più distanti dall'acqua. Le nuove piante fornirono ombra, diminuirono l'effetto del vento, conservarono l'umidità e offrirono detriti organici direttamente utilizzabili. In questi nuovi ambienti si affermarono probabilmente gli insetti, presenti forse già nelle paludi tropicali del Siluriano anche se i più antichi fossili di insetti sono stati rinvenuti in rocce del Devoniano medio scozzese e del Devoniano inferiore in Canada. Nel mare, intanto, fiorivano e si differenziavano le ammoniti, molluschi cefalopodi predatori, ma soprattutto i pesci che erano derivati dai placodermi. Questi ultimi, verso la fine del Siluriano avevano dato origine a due linee evolutive una delle quali, quella relativa ai pesci ossei, subì, nel corso del Devoniano, un'ulteriore differenziazione in tre gruppi: i Paleoniscoidi, dai quali derivarono i pesci moderni (teleostei), i Dipnoi (pesci dotati di una sorta di sacco polmonare che consente loro di sopravvivere in ambiente subaereo nei periodi di siccità), oggi rappresentati da solo tre generi relitti, e i Crossopterygi, gruppo attualmente rappresentato da un'unica specie, *Latimeria chalumnae*, ma

che diede origine ai primi anfibi. Nel corso del Devoniano, la pressione selettiva operata dai continui mutamenti ambientali (fasi di prosciugamento) e soprattutto la disponibilità di nuove nicchie ecologiche terrestri indussero vertebrati dotati di opportuni caratteri predativi a spostarsi verso gli ecosistemi terrestri. Questi vertebrati furono i Crossopterigi Ripidisti. Questo gruppo di pesci presentava caratteristiche strutturali potenzialmente in grado di trasformarsi in strutture utili alla vita in ambiente terrestre e quindi di originare i primi tetrapodi (organismi con quattro zampe) terrestri. Erano dotati di pinne lobate sostenute da uno scheletro interno con muscoli, al contrario delle pinne di altri pesci che sono sostenute da semplici raggi; inoltre, avevano coane aperte, cioè canali "nasali", in collegamento con una sacca polmonare interna. Un rappresentante tipico è *Eusthenopteron* (Fig. 6), un ripidista del gruppo degli Osteolepiformi (Devoniano superiore) che funge un po' da modello cui riferire, comparativamente, la struttura dei primi tetrapodi terrestri: gli Anfibi Stegocefali Labirintodonti. La forma di transizione tra questi due gruppi di vertebrati è esemplificata da *Ichthyostega*, uno dei più antichi anfibi fossili conosciuti, descritto nel 1937 nelle arenarie del Devoniano superiore della Groenlandia. *Ichthyostega*, pur essendo uno stegocefalo, mostra ancora caratteri tipici dei ripidisti, accanto a novità adattative conseguenti ad uno stile di vita francamente più terrestre. In particolare, il braccio in miniatura di *Eusthenopteron* viene completato con le ossa terminali delle dita (laddove vi erano i raggi del lobo della pinna), l'orientamento di questi "arti" non è più posteriore ma diretto perpendicolarmente al terreno, le vertebre si modificano in modo da acquisire una funzionalità legata alla necessità di sostenere un corpo in un ambiente privo di spinta idrostatica, vengono acquisiti un cinto scapolare e uno pelvico per adeguare il collegamento degli arti alla colonna vertebrale, in modo da consentire un sostegno dorsale agli stessi nel movimento (nei pesci, soprattutto il cinto pelvico è libero e affondato nei muscoli, privo di qualsiasi funzione di sostegno), viene migliorata la funzionalità respiratoria "riciclando" le coane e migliorando la primitiva sacca respiratoria dei dipnoi e dei crossopterigi. A partire dalla primitiva copertura di scaglie ereditata dai pesci, il tegumento si modificò in modo da renderlo più adatto a impedire un'eccessiva perdita di liquidi interni e si svilupparono strutture uditive come l'orecchio medio, che consente di percepire le vibrazioni dell'aria. Tuttavia, *Ichthyostega* presenta ancora tracce di linea laterale (organo sensoriale tipico dei pesci) ed è dotato di una coda "pisciforme" con pinna dorsale ed anale. Era quindi un tetrapode terrestre ancora fortemente legato all'acqua. Per questo, alcuni autori ritengono che la spiegazione dell'origine degli anfibi facente appello a ricorrenti siccità non sia soddisfacente e suggeriscono che *Ichthyostega* vivesse per la maggior parte del tempo in acque basse e paludose. In tal senso sembra plausibile che la sua architettura costituisse un buon compromesso tra il nuoto e lo spostamento sul fondo, in modo non dissimile da quanto accade per alcuni anfibi attuali, ad esempio i tritoni. La conquista della terraferma, secondo questo modello, sarebbe stata stimolata dalla competizione per il cibo nell'acqua e dall'abbondanza di quest'ultimo sulla terraferma, dove erano ormai presenti vari artropodi, che divennero sempre più abbondanti durante il Carbonifero. Gli anfibi, tuttavia, non hanno mai risolto del tutto i problemi legati alla conquista dell'ambiente subaereo: la loro copertura poco sclerificata non gli consente di affrancarsi del tutto da ambienti acquatici o comunque molto umidi e, soprattutto, tutti gli anfibi hanno la necessità di compiere i primi stadi del loro sviluppo in acqua.

Il completo adattamento dei vertebrati alla vita terrestre si ebbe solo successivamente, con la comparsa dei primi rettili che erano dotati di una pelle coperta di squame e, soprattutto, erano in grado di deporre uova dotate di guscio e quindi resistenti al disseccamento. Questo consentì ai rettili di occupare ambienti anche lontani dall'acqua, perché

veniva eliminata la necessità di un periodo di vita larvale acquatico.

Questo salto di qualità avvenne forse già nel Carbonifero, periodo in cui, tuttavia, le condizioni climatiche e ambientali favorirono enormemente la diffusione e la diversificazione degli anfibi. Così come il Devoniano può essere indicato come il "periodo dei Pesci", il Carbonifero può essere ricordato come il "periodo degli Anfibi". Già a partire dalla fine del Devoniano, le condizioni geoclimatiche (tra l'altro la massa europea si fuse con la massa continentale nordamericana) favorirono lo sviluppo di enormi paludi, circondate da foreste in cui sorsero le prime piante con semi, le conifere (attualmente rappresentate da pini, larici, abeti, ecc.). Con lo sviluppo dei semi, anche le piante si affrancarono dalla necessità assoluta dell'acqua per la riproduzione. Il Carbonifero si caratterizzò, quindi, in ampie zone della Terra, per un clima caldo e umido costante tutto l'anno che consentì lo sviluppo di estese coperture forestali i cui resti andarono a costituire gli immensi depositi di combustibile fossile, da cui il periodo prende il nome. Le estese foreste e le paludi fornirono a molti animali ampie possibilità di diffusione. Fra gli artropodi, proliferarono particolarmente ragni, centopiedi, millepiedi, scorpioni e insetti tra i quali comparvero le prime forme alate. La radiazione evolutiva nell'ambiente aereo, evidentemente favorita dalla mancanza di competizione, fu subito notevole, con la produzione delle più svariate forme volatrici; tra queste ricordiamo *Meganeura*, una libellula gigante con un'apertura alare di 70 cm.

Nel periodo successivo, il Permiano, si ebbe la formazione di *Pangea II*, unico supercontinente che raccoglieva tutte le terre emerse, e il ritiro finale dei mari interni del Paleozoico. Si vennero a creare vaste zone asciutte che segnarono il declino degli anfibi, gruppo che aveva precedentemente dominato le terre emerse. Il clima del Permiano fu geograficamente e cronologicamente variegato, caratterizzato da un forte raffreddamento nella parte iniziale del periodo e da un riscaldamento finale. I resti più caratteristici delle faune permiane riguardano gli insetti, che svilupparono le prime forme "moderne" a metamorfosi completa, le ammoniti, che continuarono la loro progressiva complicazione, e i rettili.

Il Permiano si chiuse con una grande estinzione di massa che segnò, 225 milioni di anni fa, il limite fra il Paleozoico e il Mesozoico. Circa la metà delle famiglie (qualcuno dice il 90%) di invertebrati marini di acque basse furono cancellate nel giro di pochi milioni di anni: i trilobiti, che già declinavano da tempo, si estinsero completamente; molti molluschi, tra cui i nautiloidi, si ridussero a una sola linea evolutiva; i brachiopodi furono decimati e sostituiti dai bivalvi, molluschi fino ad allora poco sviluppati.

Mesozoico o Era Secondaria: da 225 a 65 milioni di anni fa

Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

Home

**Il Precambriano:
dalla formazione
della Terra fino a
590 milioni di anni
fa**

**Paleozoico: da 590
a 248 milioni di
anni fa**

**Mesozoico o Era
Secondaria: da 225
a 65 milioni di anni
fa**

Lecture

Mesozoico o Era Secondaria: da 225 a 65 milioni di anni fa

L'era Secondaria comprende 3 periodi: *Triassico* (248-213 milioni di anni fa), *Giurassico* (213-144 milioni di anni fa) e *Cretaceo* (144-65 milioni di anni fa).

L'estinzione di massa che caratterizzò la fine dell'era Paleozoica rese disponibili risorse ambientali che furono utilizzate dai sopravvissuti per operare una grande radiazione adattativa. Fra gli animali marini, le ammoniti continuarono a sopravvivere e a diversificarsi per estinguersi solo alla fine del Mesozoico; tra gli artropodi, i crostacei aumentarono costantemente in numero e varietà, ma furono soprattutto gli insetti ad avere una vera esplosione evolutiva, parallela a quella delle piante con fiori (fanerogame), con le quali strinsero un rapporto di impollinatori specializzati. Dal punto di vista zoologico, l'era Mesozoica fu caratterizzata dal predominio dei grandi rettili, durato più di 150 milioni di anni, un periodo di tempo straordinariamente lungo. Tale predominio si manifestò con l'occupazione di quasi tutte le nicchie ecologiche disponibili: vi furono forme marine completamente acquatiche, come i plesiosauri e gli ittiosauri del Giurassico - i primi vivipari noti (in grado cioè di partorire piccoli già formati) - e forme volanti, come gli pterosauri, dello stesso periodo, che volavano grazie a membrane alari che si sviluppavano tra gli arti anteriori ed il corpo, molto simili a quelle dei pipistrelli attuali; vi furono gigantesche forme erbivore (triceratopi, diplodochi, ecc.) e temibili carnivori (carnosauri). Inizialmente il successo dei rettili fu determinato dal possesso di caratteri adattativi forti che consentirono loro di svincolarsi completamente dall'ambiente acquatico: l'epidermide squamosa fortemente sclerificata e l'uovo amniotico chiuso in un guscio. Il primo carattere consentì loro di conquistare anche ambienti aridi (un grosso vantaggio sugli anfibi, che possedevano una pelle non ispessita e quindi erano costretti a vivere solo in ambienti fortemente umidi o acquatici) e di produrre strutture ectodermiche accessorie (come le corna, gli scudi cranici, ecc.) funzionali in molti rapporti interspecifici, come quelli predatore-preda. Con "l'invenzione dell'uovo" i rettili ebbero la possibilità di ricreare un ambiente acquatico attorno all'embrione, che poteva, quindi, compiere le prime fasi di sviluppo anche in ambiente subaereo al riparo dai pericoli di disseccamento (il grosso problema degli anfibi). Grazie a queste due moderne acquisizioni adattative, i rettili possono essere considerati i primi vertebrati francamente terrestri .

I primi rettili comparvero probabilmente nel carbonifero, originati da un gruppo di anfibi sconosciuto. Per lungo tempo si è pensato che un gruppo di anfibi stegocefali, i Seymouriomorfi, potesse essere considerato il gruppo di transizione. Tuttavia, anche se l'anfibio *Seymouria* mostra notevoli affinità con il rettile *Diadectes* (entrambe le forme

provengono dal Permiano superiore), recenti scoperte hanno convinto i paleontologi che i seymouriomorfi rappresentino una linea filetica tronca, che non è proseguita oltre. Comunque, già alla fine del permiano i rettili erano ben differenziati ed avviati al predominio. I più importanti rettili permiani furono i Pelicosauri (famosi per l'enorme cresta dorsale; genere caratteristico *Dimetrodon*) e i Terapsidi, gruppo che originò, nel Triassico, i primi mammiferi. Soprattutto quest'ultimo gruppo di rettili seppe esprimere, tra la fine del Permiano e l'inizio del Triassico, una buona diversificazione; tuttavia già verso la fine del Triassico fu eclissato da quelli che saranno i veri dominatori del Mesozoico: i Dinosauri. Cosa abbia consentito una tale superiorità è oggetto di discussione, soprattutto se si considera il fatto che, nel Triassico, oltre ai dinosauri si originarono anche i primi mammiferi. Tuttavia, questi ultimi, nonostante il possesso di alcuni caratteri sicuramente vincenti sul piano adattativo (omeotermia, viviparità) furono relegati in nicchie assolutamente marginali, non riuscendo ad avere il sopravvento su animali che si pensava fossero meno performanti sia a livello fisiologico (si consideravano eterotermi), sia a livello riproduttivo (dovevano comunque deporre delle uova, al contrario dei mammiferi che trattenevano "le uova" in grembo). Oggi noi sappiamo che tutto questo poté avvenire perché molti dinosauri furono probabilmente a sangue caldo, quindi in grado di esprimere un forte dinamismo fisiologico anche a basse temperature (di notte, per esempio); inoltre, non erano così "tonti" come certa iconografia datata ce li ha mostrati, al contrario, seppero esprimere comportamenti sociali e operare forme di cooperazione nelle attività di predazione; per ultimo, erano grossi, al contrario dei mammiferi. Se, infatti, vi furono anche dinosauri piccoli (come ad esempio quelli dai quali derivarono gli uccelli), nella media essi furono più grandi dei mammiferi loro contemporanei; questo avrebbe consentito ai grandi dinosauri un vantaggio enorme, sia in termini di rapporti interspecifici (competizione) sia in termini fisiologici, dato che un animale di grandi dimensioni ha paradossalmente meno necessità energetiche di un organismo di piccole dimensioni. I mammiferi, tuttavia, sopravvissero alla schiacciante superiorità dei dinosauri; erano omeotermi, dotati di pelo (oggi si pensa che anche molti dinosauri ne fossero provvisti), erano vivipari, erano dotati di un diaframma (quindi in grado di operare una respirazione più funzionale), presentavano una maggiore efficienza dell'emoglobina con la specializzazione dei globuli rossi nel trasportare ossigeno; per ultimo, le piccole dimensioni e le abitudini notturne li mettevano relativamente al riparo dalla predazione dei grandi sauri. La convivenza dei due gruppi durò sino alla scomparsa dei dinosauri, alla fine del Mesozoico. Il passaggio tra l'era secondaria e l'era terziaria è infatti segnato da una spettacolare estinzione di massa (estinzione K-T) di cui i dinosauri sono solo le vittime più famose. Infatti, questo evento segnò fortemente quasi tutte le componenti faunistiche e floristiche del tempo, sia in terra che in mare. Il 38% dei generi di organismi marini scomparve, sulla terra si raggiunsero punte molto superiori, in qualche caso del 100%. Per comprendere la drammaticità di questi numeri bisogna considerare che la scomparsa di un singolo genere implica la scomparsa di migliaia di individui appartenenti forse a centinaia di specie. Nei mari, i gruppi più colpiti furono i foraminiferi, le spugne e i ricci di mare, mentre scomparvero del tutto gruppi marini fino ad allora dominanti, come i rettili marini (plesiosauro, mosasauro e ittiosauro) e le ammoniti. Sulla terraferma, oltre ai dinosauri, numerose vittime si contarono tra altri rettili, mammiferi (non ne sopravvisse praticamente nessuno di peso superiore ai dieci chilogrammi) e anfibi. Curiosamente alcuni gruppi si salvarono, ad esempio, coccodrilli, alligatori, rane, salamandre. Per quanto riguarda la flora, la documentazione fossile sembra testimoniare un minor impatto dell'evento sul mondo vegetale, anche se si registra un forte cambiamento nella composizione floristica, che vede le rigogliose foreste mesozoiche sostituite da comunità più opportunistiche dominate da felci, quindi comunità in qualche modo pioniere.

Ma quanto durò questo evento? Non è facile rispondere; secondo alcuni, milioni di anni e la loro apparente subitanità è dovuta alla incompleta documentazione fossile. Altri paleontologi ritengono, al contrario, che gli eventi hanno impiegato poche centinaia, forse decine, di migliaia di anni per compiersi. Nel 1978 Walter Alvarez, figlio di Luis Alvarez, premio Nobel per la fisica, formulò una delle più affascinanti teorie in proposito, quella del meteorite assassino (Fig. 7). Secondo Alvarez, 65 milioni di anni fa la Terra fu colpita da un asteroide di 10 km di diametro che produsse un'esplosione in grado di liberare energia equivalente a 10.000 volte l'intero arsenale atomico oggi esistente. Per formulare la sua teoria Alvarez si basò su osservazioni compiute in Italia, in particolare nella Gola del Bottaccione, vicino a Gubbio, dove identificò uno strato molto insolito, risalente appunto a 65 milioni di anni fa, contenente un'alta concentrazione di iridio (un metallo abbondantissimo nelle meteoriti, ma raro in natura) che testimonierebbe l'impatto di un enorme asteroide con la Terra. Il cataclisma avrebbe innescato un incendio planetario, sollevato nell'atmosfera un'immensa nube ricca di iridio che, oscurando il cielo, avrebbe impedito la fotosintesi clorofilliana e determinato il disgregamento delle catene alimentari. Questa teoria sembra confermata da dati provenienti da diverse parti del mondo e qualcuno crede di aver individuato anche il punto d'impatto: le coste settentrionali dello Yucatan.



Figura 7. Il meteorite "assassino" nella rappresentazione di un'artista americano.

Oltre all'ipotesi del meteorite assassino, tuttavia, sono state avanzate altre teorie: raffreddamento del clima, aumento delle radiazioni cosmiche, malattie, progressiva sostituzione, a partire dal Cretaceo, delle gimnosperme (piante senza fiore apparente) con le angiosperme (le moderne piante con fiori). Probabilmente, come quasi tutti i grandi eventi evolutivi, questa estinzione fu, in realtà, dovuta al concorso di numerose cause differenti. Certo è che, con l'inizio del Terziario, si assiste all'esplosiva radiazione adattativa dei mammiferi che, assieme agli uccelli, occuparono progressivamente le nicchie ecologiche lasciate libere dai rettili. Proprio gli uccelli sono considerati gli eredi dei dinosauri; addirittura qualche autore (Bakker) pensa che i dinosauri non si siano mai estinti, ma abbiano continuato la loro evoluzione come uccelli. Tuttavia, recenti ritrovamenti fossili hanno aperto il campo ad altre ipotesi che sembrano riconsiderare la posizione di quello che finora era visto come l'anello di congiunzione tra i rettili e gli uccelli, il famoso *Archaeopteryx* del Giurassico bavarese.

Cenozoico: gli ultimi 65 milioni di anni

Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

Cenozoico: gli ultimi 65 milioni di anni

Il Precambriano:
dalla formazione
della Terra fino a
590 milioni di anni
fa

Paleozoico: da 590
a 248 milioni di
anni fa

**Mesozoico o Era
Secondaria:** da 225
a 65 milioni di anni
fa

**Cenozoico: gli
ultimi 65 milioni di
anni**

Lecture

L'era Cenozoica comprende gli ultimi 65 milioni di anni. È divisa in due periodi, il primo dei quali, il Terziario, durò fino a 2 milioni di anni fa. Il Terziario si divide a sua volta in varie epoche che, dalla più antica alla più recente, sono il *Paleocene* (65-55 milioni di anni fa), l'*Eocene* (55-38 milioni di anni fa), l'*Oligocene* (38-25 milioni di anni fa), il *Miocene* (25-5 milioni di anni fa) e il *Pliocene* (5-2 milioni di anni fa). Il secondo periodo, il Quaternario, ha avuto origine due milioni di anni fa e dura tuttora.

Il Terziario fu il periodo dei Mammiferi. Dopo aver vissuto per quasi 150 milioni di anni all'ombra dei Dinosauri, improvvisamente questo gruppo di vertebrati si trovò a disposizione un ambiente assolutamente privo di competitori e una grande varietà di nicchie ecologiche lasciate libere dai grandi rettili. Fu una vera e propria esplosione di vita mammaliana; sulla terra ferma si svilupparono erbivori provvisti di zoccoli e carnivori predatori, nell'aria i pipistrelli, le balene nei mari. Tutto questo in meno di 15 milioni di anni. Oltre che dalla disponibilità di risorse ambientali, la grande radiazione adattativa dei mammiferi fu favorita da fenomeni di deriva continentale che, isolando masse fino ad allora unite, favorirono eventi di speciazione per isolamento geografico. In pratica, i continenti costituirono altrettanti laboratori evolutivi, più o meno separati, in cui si svilupparono molte specie isolatamente l'una dall'altra, che poi ebbero la possibilità di diffondersi in altre aree allorché la mutevole geografia lo consentiva. Interscambi faunistici ebbero soprattutto tra le masse continentali settentrionali (Nordamerica ed Eurasia) fino all'inizio dell'Eocene; successivamente si ebbe divergenza per la separazione del Nord America dall'Europa e di quest'ultima dall'Asia. Nell'Oligocene queste due masse continentali furono riconnesse consentendo l'invasione dell'Europa da parte di forme asiatiche. Le faune continentali meridionali ebbero delle storie più indipendenti. Dei gruppi più importanti di Mammiferi terrestri che si sparsero attraverso il globo nel Cretaceo e nel Terziario, solo i Marsupiali e i Monotremi (mammiferi primitivi depositori di uova) raggiunsero l'Australia prima della sua separazione e del suo slittamento verso il Nord dell'Antartide. Sottraendosi alla competizione con i mammiferi placentati, i Marsupiali poterono diversificarsi notevolmente occupando nicchie altrove occupate dai placentati con forme straordinariamente simili dal punto di vista morfologico (convergenza adattativa). I Marsupiali si diversificarono anche in Sud America, ma qui furono successivamente eclissati dai vari placentati che vi giunsero all'indomani dell'emersione dell'istmo di Panama, nel Pliocene. Oggi sopravvivono solo due gruppi di marsupiali americani.

Alla rapida evoluzione dei mammiferi terziari contribuirono anche i notevoli cambiamenti climatici che si verificarono in

questo periodo. In particolare, il sopravvenire di climi più freddi e asciutti, che si verificò dall'Oligocene in avanti, promosse la diffusione delle savane erbose, specialmente in Asia e in Nord America. Queste costituirono le zone di sviluppo e proliferazione massiccia degli attuali Ungulati da pascolo come i rinoceronti, i cammelli, i bovidi e i cavalli. Proprio il quadro evolutivo dei cavalli può essere portato ad esempio di evoluzione indotta da mutamenti ambientali. Da forme di piccole dimensioni, adattate alla vita in ambiente boschivo, si passa, infatti, a forme di grandi dimensioni, adattate alla corsa in ambienti aperti e in grado di nutrirsi di vegetali via via più fibrosi. Nel frattempo, i rapporti interspecifici tra mammiferi predatori ed erbivori venivano strutturandosi in modo definitivo. La ben nota dote dei cavalli nella corsa veloce non è che uno dei risultati di queste interazioni. E probabile che tali relazioni siano anche largamente responsabili di un aspetto molto importante dell'evoluzione dei Mammiferi, il notevole sviluppo della massa cerebrale. Misurazioni della grossezza del cervello ottenute a mezzo dei calchi presi dalle parti interne dei crani fossili indicano un progressivo aumento di tale formazione, che corrispondeva all'aumento nelle dimensioni del corpo, sia nei carnivori che negli erbivori. In verità le masse cerebrali degli erbivori erano, e sono, in genere, più grosse di quelle dei Carnivori; in pratica ad un aumento delle potenzialità predatorie dei carnivori corrispondeva un aumento cerebrale degli erbivori che divenivano sempre più abili nello sfuggire loro. I Carnivori, dal canto loro, svilupparono una vasta gamma di armi offensive specializzate e ciò si verificò indipendentemente in parecchi gruppi di animali diversi. Per esempio, grosse specie predatrici con denti canini allungati a forma di lama, note come tigri dai denti a sciabola (Fig. 8), originarono più volte da gruppi differenti sia tra i mammiferi marsupiali che tra i mammiferi placentati. Gli erbivori rispondevano con una serie di dispositivi difensivi come la migliorata abilità nella corsa oppure con l'aumento delle dimensioni, fino ad arrivare a taglie inespugnabili, come negli elefanti, o come un colossale parente dei rinoceronti attuali, l'*Indricotherium* del Miocene, che misurava in piedi 6 metri di altezza. Altri svilupparono una varietà di corna, sebbene queste venissero comunemente impiegate per lotte interspecifiche per la conquista delle femmine, nella formazione dei branchi e nell'assegnazione gerarchica dei ruoli all'interno degli stessi.



Fig. 8. *Smilodon*, la tigre dai denti a sciabola.

Un'altra storia di successo dei grandi vertebrati terrestri nel Terziario è stata quella degli Uccelli. Come i Mammiferi, essi si diversificarono rapidamente: anzi si può ben dire che quasi la metà degli ordini ancor oggi viventi si era evoluta verso la fine dell'Eocene, comprese alcune specie particolarmente specializzate come i pinguini, gli avvoltoi, i gufi e una varietà di grossi uccelli incapaci di volare. Alcuni di questi ultimi, come *Diatryma*, gigante dell'Eocene del Nord America, godette localmente di un breve regno come principale carnivoro, contemporaneamente ai primi Mammiferi. Altre forme gigantesche, non volatrici, si svilupparono soprattutto in ambienti insulari.

In tutte queste interazioni ecologiche e nei cambiamenti

geoclimatici e geografici che caratterizzarono il Terziario si ritrovano anche le radici dell'evoluzione dell'uomo. La linea dei primati era già sorta da lungo tempo, addirittura nel Cretaceo; i fossili più antichi che si conoscano, risalenti a 70 milioni di anni fa, ci provengono dal Nord America. Erano forme arboricole (*Purgatorius*), non dissimili dagli attuali insettivori dai quali erano derivati. Si tratta, tuttavia, di forme nebulose, note solo per alcuni denti. I primi resti fossili di primati relativamente completi risalgono a circa 50 milioni di anni fa e sono rappresentati da proscimmie simili a lemuridi. Si pensa che anche queste forme conducessero vita arboricola, non entrando così in competizione con i roditori che, nello stesso periodo, occupavano con successo il suolo delle foreste. Attorno a 30 milioni di anni fa, comparvero le scimmie e di poco successivi sono i primi resti di antenati delle attuali scimmie antropomorfe (*Aegyptopethscus* da El-Fayum, Egitto settentrionale), e quindi anche dell'uomo.

Lecture

Prime tappe dell'evoluzione dei viventi/ Evoluzione biologica dei viventi

Antonio Bonfitto

Letture

Prime tappe
dell'evoluzione dei
viventi

Letture

Evoluzione
biologica dei
viventi

E. Balletto, *Zoologia evolutiva*, Zanichelli, Bologna, 1995

M. Rizzotti, *Prime tappe dell'evoluzione cellulare: dalla comparsa della prima cellula agli organismi di tipo moderno*, Zanichelli, Bologna, 1995.

L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni

Fiorenzo Facchini

Introduzione

Introduzione

I Dati

Problemi Aperti

Interpretazioni

Letture

Le origini dell'uomo esercitano un fascino su tutti. Conoscere il nostro passato, a quando risale la presenza dell'uomo sulla terra, quali forme viventi l'abbiano preceduto o preparato, quale poteva essere il suo stile di vita sono domande che sorgono spontaneamente, per non parlare di quelle di tipo esistenziale che riguardano l'uomo di tutti i tempi: perché l'uomo? quale significato ha la sua presenza sulla Terra?. A queste ultime sono chiamate a rispondere la riflessione filosofica e le concezioni religiose dell'uomo. La scienza cerca risposte alle domande circa il come, il quando, quelle che rientrano nel suo orizzonte di osservazione.

L'idea che l'uomo non sia sempre stato quello che vediamo oggi e che non sia sfuggito a quel processo di evoluzione che apparenta le diverse forme viventi è largamente diffusa da quando Buffon, Lamarck, Darwin e altri ancora hanno suggerito la teoria della evoluzione biologica.

Anche se non sono documentati tutti i passaggi e non sono adeguatamente conosciuti i vari meccanismi con cui è avvenuta l'evoluzione, la teoria evolutiva si dimostra coerente con le diverse scoperte avvenute negli ultimi decenni nel campo della biochimica, della genetica molecolare, della paleontologia, per cui è una teoria scientificamente fondata ed è diventata chiave interpretativa della biologia moderna.

La spiegazione del processo evolutivo indicata da Darwin nella interazione tra selezione naturale e mutazioni, per cui è la selezione stessa "a creare" le nuove specie utilizzando le variazioni del genoma (cf. Dobzhansky, Mayr, Ayala, ecc.) non è esente da critiche. A livello microevolutivo i meccanismi con cui si forma la biodiversità sono conosciuti; la loro estensione alla macroevoluzione, alla formazione delle grandi linee evolutive, per spiegare cioè la complessità crescente a livello di organismi biologici non è ritenuta sufficiente da vari studiosi, nel senso che dovrebbero essere ricercati altri modelli evolutivi.

Ciò premesso, gli studi sulla evoluzione umana dispongono attualmente di una documentazione che offre un quadro complessivamente ricco di dati, difficilmente spiegabile senza il processo evolutivo, anche se restano aperti molti problemi e vi è spazio per interpretazioni diverse.

I Dati

L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni

Fiorenzo Facchini

I Dati

Introduzione

I Dati

Le fasi dell'evoluzione umana

1. Gli Australopiteci

2. *Homo habilis*

3. *Homo erectus*

4. *Homo sapiens*

Problemi Aperti

Interpretazioni

Lecture

I dati sono rappresentati essenzialmente dai fossili che sono venuti alla luce negli ultimi 150 anni. Essi forniscono una documentazione abbastanza ricca e destinata da accrescersi sulle forme di Primati che hanno preceduto la comparsa dell'uomo sulla Terra e sulle prime forme umane, certamente diverse da quelle che vediamo oggi. La paleoantropologia mette anche in evidenza, oltre ai resti scheletrici, le tracce lasciate dall'uomo nella sua attività e nella sua vita, cioè i segni della cultura che presentano uno sviluppo nel tempo. Il suo rapporto con la natura e la organizzazione della sua vita cambiano, si modificano nel tempo, nel senso che l'uomo si dimostra sempre più in grado di padroneggiare l'ambiente con il quale ha sempre dovuto competere, come ogni altra specie, ma in questa competizione ha potuto ricorrere non soltanto a vantaggi biologicamente possibili, ma agli accorgimenti della cultura.

Oltre ai dati paleontologici lo studio della evoluzione umana si avvale, soprattutto a livello di interpretazione filetica, anche di quelli che possono essere forniti dalla biologia molecolare, tratti dalle comparazioni tra uomo e Primati non umani, come pure dalle ricerche sulle popolazioni viventi.

Le fasi dell'evoluzione umana

Nell'evoluzione umana si riconoscono concordemente una fase preumana, preparatoria, e diverse fasi successive alla comparsa dell'uomo attraverso le quali si giunge all'umanità attuale.

La fase preparatoria è rappresentata dagli Australopiteci. Essa non segue uno sviluppo lineare, ma è caratterizzata da diverse linee, fra le quali una potrebbe avere portato alle prime forme umane o potrebbe essere connessa a un antenato comune a quella umana. Effettivamente le scoperte recenti indicano una complessità di forme di ominidi in prossimità e in concomitanza con quella che viene ritenuta la più antica forma umana. Ben nove specie di Australopiteci sono state segnalate, anche se alcune potrebbero corrispondere a dei generi dal punto di vista tassonomico. Alcune sono decisamente lontane, sul piano filético, dall'uomo, altre meno. Alcune sono precedenti alla fase più antica umana (rappresentata da *Homo habilis* e *Homo erectus*), altre si accompagnano ad essa.

Le fasi che vengono identificate per il genere *Homo* sono le seguenti: *Homo habilis*, *Homo erectus*, *Homo sapiens*. Va però subito notato che la nomenclatura in uso, presa dalla sistematica biologica, più che un significato tassonomico (genere, specie) sta a indicare stadi morfologico - evolutivi, grossolanamente sovrapposti, come molti Autori moderni

1. Gli Australopiteci

La fase australopitecina è caratterizzata da Primati che avevano una capacità cranica nell'ordine delle Antropomorfe attuali, ma possedevano una struttura idonea al bipedismo, anche se ancora imperfetto, specialmente nelle forme più antiche. Questa struttura, certamente vantaggiosa in un ambiente aperto come quello che si formò nell'Africa orientale nel Miocene superiore e all'inizio del Pliocene, ha rappresentato il primo passo verso l'ominizzazione. L'avvicinamento alla forma umana, oltre che dalla struttura bipede, è documentato dalla dentatura (assenza di diastema, riduzione dei canini) certamente in correlazione con una dieta diversa da quella forestale delle Antropomorfe. I reperti sono localizzati in Africa in un periodo che va dai 4-5 milioni di anni fa a poco più di un milione di anni fa. Ricordo l'Australopiteco africano, segnalato dal Dart nel 1925 nell'Africa australe (a Taung) e i successivi rinvenimenti nella stessa regione riferibili alla forma gracile, come quella di Taung (Plesiantropo; *A. prometheus*), e alla forma robusta (*Paranthropus robustus*, *Paranthropus crassidens*); i reperti robusti dell'Africa orientale (*A. aethiopicus*, *A. boisei*) di 2-3 milioni di anni fa. Altri Australopiteci più antichi (*A. arcaici*, di 3-3,5 milioni di anni fa) provengono dall'Etiopia e dalla Tanzania e dal Kenya. Sono la ben nota "Lucy" (*A. afarensis*), trovata nel 1974 ad Hadar, in Etiopia, e a Laetoli in Tanzania, dove sono state pure rinvenute impronte di Ominidi risalenti a 3,5 milioni di anni fa. Alle forme arcaiche vengono riferiti i recenti rinvenimenti di *A.* (o *Ardipithecus ramidus*) di 4,4 milioni di anni fa in Etiopia, di *A. anamensis* di 3,9-4 milioni di anni fa (Kenya), di Bahr-el-gazahl nel Chad di 3,2 milioni di anni fa e di *A. afarensis* segnalato nel 1998 nel Sud Africa nella breccia calcarea di Sterkfontein risalente a 3,2-3,6 milioni di anni fa.

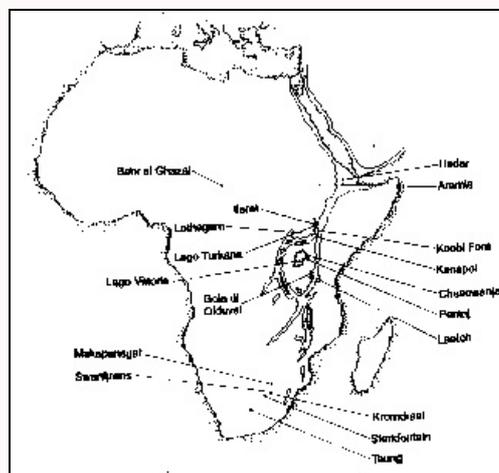


Figura 1. Località africane che hanno fornito resti di Australopitecine.

In una comune somiglianza di fondo, riconoscibile negli adattamenti al bipedismo, anche se associati a dimensioni cerebrali nell'ordine di un Panide, c'è da rilevare, nelle forme più antiche, una morfologia dell'apparato locomotore che denota buona capacità di arrampicamento e familiarità con l'ambiente arboreo, specialmente in *A. afarensis*, in *A. ramidus* e anche nell'*A. arcaico* di Sterkfontein.

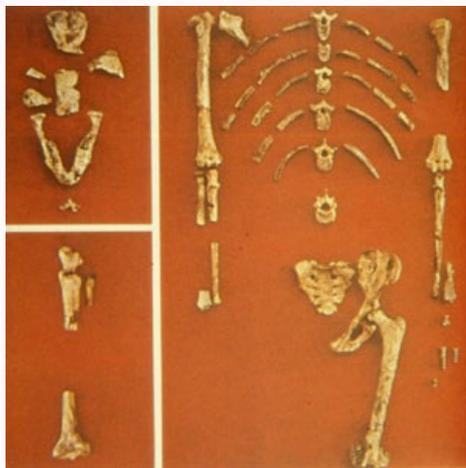


Figura 2. Resti scheletrici di "Lucy" (*Australopithecus afarensis*)

L'*A. anamensis* rivelerebbe invece una struttura più chiaramente orientata al bipedismo. Ad esso, più che alle altre forme arcaiche sarebbe da ricollegarsi secondo Senut la linea umana (*Homo habilis* e *rudolfensis*). Sembra dunque, secondo le recenti scoperte, che 3-5 milioni di anni fa vi fossero Australopiteci che praticavano sia il bipedismo che l'arrampicamento. Alcuni però sembrano più orientati verso il bipedismo, altri verso l'arrampicamento.¹

Le forme più antiche si sarebbero sviluppate nell'Africa orientale tra 4,5 e 3 milioni di anni fa. Esse si sarebbero diffuse non solo nelle regioni aperte a Est del Rift (come suggerisce Coppens), ma anche a Ovest, nel Chad, e si sarebbero spinte nel Sud Africa. Qui potrebbero avere dato origine sia ad Australopiteco africano che ad Australopiteco robusto, mentre a Est del Rift l'evoluzione della forma arcaica avrebbe portato ad *A. aethiopicus* e a *A. boisei*.



Figura 3. *Australopithecus robustus* e *Australopithecus aethiopicus*

Per l'epoca degli Australopiteci più recenti (2,5-2 milioni di anni fa) sono state segnalate anche pietre scheggiate, ma si ha l'impressione che non ci troviamo ancora di fronte a una lavorazione sistematica e progressiva della selce, quale si incomincia ad osservare con *Homo habilis*, per cui gli oggetti eventualmente manipolati non assumono il significato che hanno con l'uomo. Forse potrebbe parlarsi di una precultura. In ogni caso gli Australopiteci non vengono considerati di livello umano.

2. Homo habilis

A partire da 2,5-2 milioni di anni fa in Africa orientale e anche nell'Africa del Sud vissero accanto agli Australopiteci degli Ominidi che si distinguono da essi per una maggiore cerebralizzazione (secondo Tobias l'aumento della capacità cranica sarebbe di oltre il 40%) e per i segni di

comportamento culturale che ci hanno lasciato. È la fase di *Homo habilis*, documentata da vari reperti in Tanzania, Etiopia, Kenya e nel Sud Africa. Il recente rinvenimento di un frammento di mandibola nel Malawi, riferibile a *Homo habilis*, di circa 2,5 milioni di anni fa, potrebbe attestare una migrazione piuttosto antica dall'Africa orientale verso il Sud Africa.

La faccia appare meno prognata, la statura intorno a 140-150 cm.

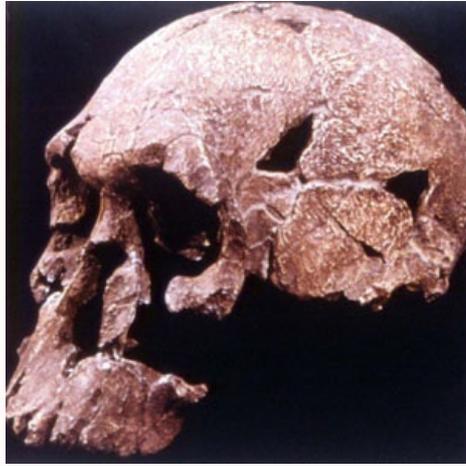


Figura 4. *Homo habilis* 1470 (Koobi Fora)

Come noto, la denominazione di *Homo habilis* è motivata da un certo sviluppo della capacità cranica (circa 650-680 cc in *Homo habilis* di Olduvai; 800 cc nella forma più cerebralizzata del Turkana denominata anche *Homo rudolfensis*), e dal fatto che insieme con i reperti sono stati trovati ciottoli lavorati, scheggiati lungo un margine di una o di entrambe le facce (chopper e chopping tools). Ci troviamo di fronte alla più antica lavorazione della pietra. Essa viene ritenuta intenzionale, espressione di un livello intellettuale che, secondo molti studiosi, corrisponde a quello dell'uomo. Inoltre con *Homo habilis* è attestata anche l'organizzazione del territorio: vengono identificate aree che corrispondono a capanne costruite e frequentate dall'uomo a scopo di abitazione o di lavorazione della selce e alla spartizione del cibo.

Un altro elemento di sicuro interesse è un certo sviluppo delle aree cerebrali del linguaggio articolato (area del Broca, per i muscoli della fonazione, e area del Wernicke, per la comprensione del linguaggio), che è stato desunto dal calco endocranico sul quale sono state identificate le relative impronte per l'emisfero sinistro. Sono questi diversi elementi che inducono molti Autori a ritenere che con *Homo habilis* sia stato raggiunto il livello umano.

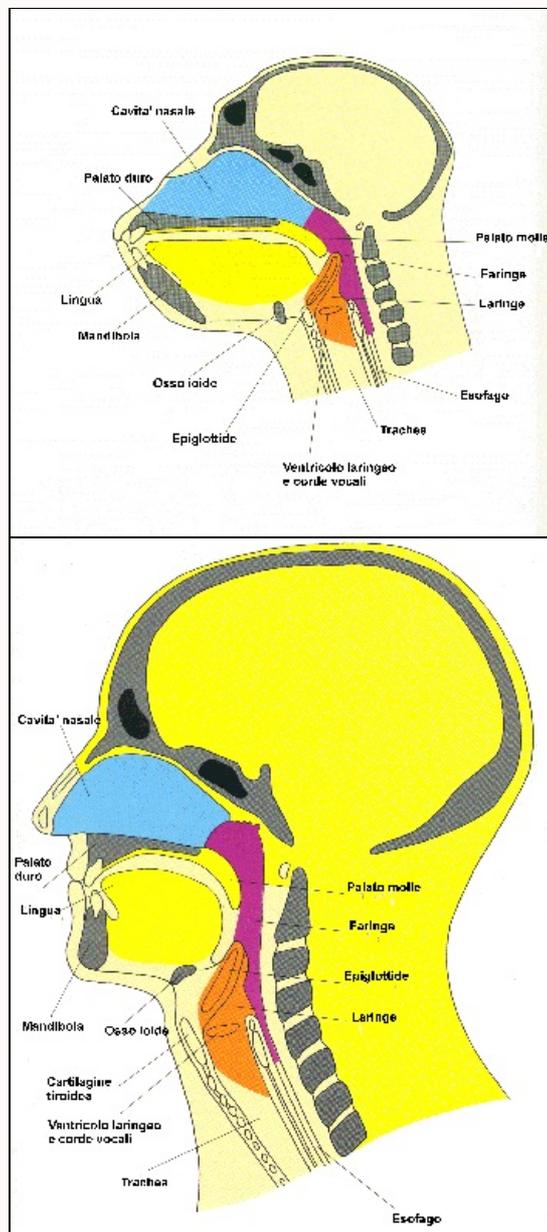


Figura 5. Organi della fonazione nello scimpanzé e nell'uomo.

3. Homo erectus

In sostanziale continuità con *Homo habilis* va vista la fase di *Homo erectus*, i cui più antichi rappresentanti vengono riconosciuti in Ominidi dell'Africa orientale, vissuti intorno a 1,6 milioni di anni fa. La loro evoluzione porterà alle forme arcaiche di *Homo sapiens*, la cui presenza viene riconosciuta tra 200.000 e 100.000 anni fa, sempre nel territorio africano e, in seguito, negli altri continenti.

Il cranio di *Homo erectus* ha tratti anche più massicci e robusti rispetto a *Homo habilis*, specialmente nelle formazioni sopraorbitarie e nell'occipitale (presenza di *torus*), ma è più cerebralizzato (da 800 a 1100 cc). Inoltre è accompagnato da manifestazioni culturali più progredite (industrie bifacciali, oltre a quelle su ciottolo, industrie su scheggia e, in fase più avanzata, manufatti di lavorazione Levallois). Per le prime forme di *Homo erectus* dell'Africa è stata proposta da Wood (1992) la denominazione di *Homo ergaster*.

Dalla culla dell'Africa orientale, dove *Homo erectus* è documentato da vari ritrovamenti in Etiopia e in Kenya, specialmente intorno al Lago Turkana e in Tanzania, egli si è diffuso nel Sud Africa (Swartkrans, Saldanha, Rhodesia) e

nell'Africa settentrionale (Atlantropo di Ternifine, Thomas, Salé, Sidi-abder-rhaman, Rabat).

Molto anticamente *Homo erectus* si è portato in Asia e in Europa. Per l'Asia i reperti più noti sono quelli di Giava, con i numerosi ritrovamenti di Pitecantropi avvenuti dal 1891 ai giorni nostri. Una parte della storia della paleontologia umana è legata alle scoperte dei Pitecantropi, che sono stati messi in luce in diversi strati (dal Pleistocene inferiore al Pleistocene superiore). Vi sono reperti di diversa morfologia, alcuni sicuramente non umani (Meganthropo), altri umani, con qualche aspetto primitivo che richiama le forme di *erectus* africane, ma con caratteristiche anche proprie.

L'epoca a cui risalgono le forme più antiche è ancora controversa (1,9 o 1,2 milioni di anni fa). La connessione con le forme africane è fuori discussione; al momento è ritenuta molto antica. Se ad essi si aggiungono i reperti del Sinantropo, rinvenuti nella grotta di Chou-kou-tien, non lontano da Pechino, a partire dal 1929 (risalenti a un'epoca tra 450.000 e 230.000 anni fa), e quelli di altre località della Cina (Longtandong, Jinniushan, Yuanmou, Yiyuan, Yiunxian, ecc.) si ha l'impressione di trovarsi di fronte a una evoluzione a carattere regionale, che ha seguito tappe e ritmi propri ed è sfociata nelle forme di *Homo sapiens* arcaico presenti nelle stesse regioni intorno a 200.000-100.000 anni fa.

Per l'Europa recenti scoperte ci portano ad epoche assai più antiche di quella a cui veniva fatto risalire *Homo erectus*, con la denominazione di *Homo heidelbergensis*, rappresentato dalla mandibola di Mauer, risalente a circa 600.000 anni fa. A Dmanisi, in Georgia, sono stati segnalati due crani e una mandibola risalenti a 1,6 milioni di anni fa. A Ceprano, nel Lazio, è stato scoperto un cranio di *Homo erectus* di 800.000 anni fa. Numerosi fossili umani trovati ad Atapuerca, in Spagna, attestano la presenza umana nella penisola iberica nella stessa epoca. Essi presenterebbero caratteristiche tali da differenziarli dall'*erectus* africano, pur derivando da esso, tanto che è stata proposta la denominazione di *Homo antecessor*. Queste forme potrebbero ritenersi antenati sia di *Homo heidelbergensis* e, attraverso di esso, dei Neandertaliani, sia della forma moderna europea.



Figura 6. Neandertaliano di "La Ferrassie" (Francia)

Ma, a parte le connessioni filitiche delle forme più antiche, la presenza di *Homo erectus* in Europa è ben documentata da numerosi reperti che si distribuiscono in varie località e in epoche diverse fino alle forme preneandertaliane di 100.000 anni fa (Tautavel, Bilzingsleben, Petralona, Steinheim, Swanscombe, Montmaurin, Fontéchévade, Castel di Guido, ecc.).

La cultura di *Homo erectus* denota un sicuro livello umano. Le industrie litiche, sia quelle bifacciali che su scheggia, attestano una lavorazione intenzionale secondo un preciso progetto. Si può notare l'accuratezza con cui vengono

ottenuti i manufatti acheuleani (Paleolitico inferiore), nei quali la lavorazione è estesa a entrambe le facce e ai margini con opportuni ritocchi. Si può cogliere, oltre alla funzionalità dello strumento, il concetto di simmetria che i costruttori di questa industria dovevano possedere. Vengono segnalati anche strumenti ricavati da ossa di animali. La lavorazione su scheggia dimostra un perfezionamento mediante la tecnica Levallois, con la quale veniva predeterminata sul nucleo la forma del manufatto che si voleva ottenere.

Con *Homo erectus* si ha anche la domesticazione del fuoco a partire da almeno mezzo milione di anni fa. Pare documentato il trattamento di crani per qualche rituale funerario, forse di antropofagia (ad esempio nel Sinantropo). L'organizzazione dello spazio abitato, sia all'aperto che in grotta, è bene attestata. L'economia, come in tutto il Paleolitico, si basa sulla caccia e sulla raccolta. La caccia ai grandi mammiferi doveva richiedere un'adeguata organizzazione (luoghi di monitoraggio, campi base).

4. Homo sapiens

Il passaggio delle forme di *erectus* a quelle di *Homo sapiens* non fu netto, ma graduale, tanto che alcuni reperti sono classificati tra gli *erectus* evoluti o tra i *sapiens* arcaici. Questo passaggio viene collocato tra i 200.000 e i 100.000 anni fa. Le forme più antiche di *sapiens* (*Homo sapiens* arcaico) non sono attualmente rappresentate. Tra queste vanno inclusi anche i Neandertaliani europei e del Vicino Oriente, vissuti tra 100.000 e 37.000 anni fa, i quali si sono estinti senza lasciare discendenza. Le radici dell'umanità attuale, o *Homo sapiens sapiens* (ben noto nei reperti del Paleolitico superiore europeo, quali Cro-Magnon, Chancelade, Combe Capelle, ecc.), vengono riconosciute in alcuni reperti di uomini vissuti intorno a 90.000 anni fa in Palestina, a loro volta derivanti da forme africane di *Homo sapiens* arcaico.

Lo sviluppo di *Homo sapiens sapiens* appare piuttosto rapido, quasi esplosivo: a partire da 35.000 anni fa esso è presente nei vari continenti, compresa l'America e l'Australia.

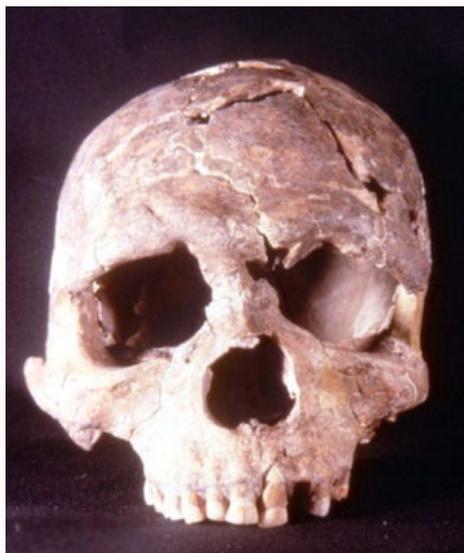


Figura 7. Cranio di *Homo sapiens sapiens* di di Qafzeh (Israele).

È interessante osservare che in alcune regioni la forma moderna si ritrova accanto a quella neandertaliana: così in Israele tra i 90.000 e 40.000 anni fa e in alcune regioni europee intorno a 35.000 anni fa. Comunque l'affermarsi della forma moderna non viene interpretato da molti Autori

in termini di evoluzione locale (almeno in senso generalizzato ed esteso a tutte le regioni della terra), ma viene riferito a diffusione da un centro africano.

La cultura della forma *sapiens* si presenta assai evoluta sia nelle industrie su pietra e anche su osso (specialmente nel Paleolitico superiore, queste ultime), sia nelle raffigurazioni dell'arte parietale e mobiliare, sia nelle pratiche funerarie di cui le più antiche inumazioni sono riconosciute a Skhul e Qafzeh, in Palestina, risalenti a 90.000 anni fa e con i Neandertaliani in Europa e nel Vicino Oriente.



Figura 8. Duplice sepoltura di una ragazza e di un bambino rinvenuta nella grotta di Qafzeh (Israele).

¹Nei mesi scorsi sono stati segnalati da Pickford e Senut alcuni reperti (frammenti di mandibola, omero, femore) ritrovati nel Kenya e risalenti a 6 milioni di anni fa, che rivelano qualche tendenza verso il bipedismo. Si tratterebbe di una linea diversa da quella degli Australopiteci conosciuti e potrebbe avere portato al gen. Homo (cf. Science, 23 feb., 2001)

Problemi aperti

L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni

Fiorenzo Facchini

Problemi Aperti

Introduzione

I Dati

Problemi Aperti

Interpretazioni

Lecture

Innanzitutto vanno ricordati problemi riguardanti le modalità e i meccanismi evolutivi ancora non pienamente definiti neppure per la formazione delle altre specie. Il dibattito fra *casualità* e *finalismo* è sempre aperto. La posizione del darwinismo è nota. Ma la casualità del processo evolutivo suppone sempre delle cause e degli orientamenti o linee che di fatto vengono a formarsi. Sul piano strettamente scientifico vi sono studiosi che hanno ammesso un finalismo globale, senza escludere la casualità di eventi accidentali. Non è necessario che ogni mutamento abbia un fine. Di fatto essi, o almeno alcuni di essi, hanno consentito o favorito il formarsi di direzioni privilegiate nella evoluzione. Alcuni studiosi invocano leggi o proprietà biologiche che ancora non conosciamo, se non molto vagamente, per spiegare fenomeni complessi (ad esempio, la morfogenesi, l'aumento della informazione genetica, il passaggio dalla microevoluzione alla macroevoluzione, la selezione che può realizzarsi sulla linea somatica oltre che su quella germinale, ecc.).

In ogni caso va notato che il problema del finalismo è filosofico e teologico prima che scientifico. Ganoczi (1997) ha osservato che mentre la teleonomia riconosce finalità particolari che si possono formare per processi evolutivi rispondenti a leggi di ordine fisico e chimico, anche non predicibili, "il discorso relativo a un fine ultimo della evoluzione non può assolutamente cadere nella sfera di competenza della scienza empirica". In ogni caso il finalismo dovrebbe essere visto come "a posteriori" non un "a priori".

Per quanto si riferisce propriamente all'uomo altri problemi si affacciano. Ad alcuni, come quelli relativi all'origine e alle connessioni della linea *Homo* con le Australopithecine, ho già accennato. Un altro grande interrogativo viene dalla rapidità del *processo di cerebralizzazione*, in forza del quale nel corso di poco più di due milioni di anni si è triplicato il volume dell'encefalo. Vengono invocati fattori di vario genere (genetici, nutrizionali con il cambiamento della dieta, culturali). In generale, nell'evoluzione umana, si ammettono rimaneggiamenti del genoma di una certa entità, che potrebbero riguardare l'apparato locomotore e l'encefalo. Ciò si accorderebbe con la teoria degli equilibri punteggiati, proposta da Gould e Eldredge, secondo la quale vi sarebbero stati momenti di rapide mutazioni seguiti da fasi di stasi evolutiva. In particolare, secondo Tobias (1983), un momento di rapida evoluzione si sarebbe avuto intorno a 2, 5 milioni di anni fa con la formazione di *Australopithecus boisei*, di *Australopithecus robustus* e *Homo habilis* dal ceppo di *Australopithecus africanus*. Dopo questo momento, l'evoluzione sarebbe andata avanti in modo graduale. Forse si potrebbe supporre un'accelerazione intorno ai 100.000 anni fa per il processo di cerebralizzazione, che ha portato alle caratteristiche dell'uomo moderno.

A questo particolare problema si riallaccia così quello più ampio dei *modelli evolutivi*. Si ammettono processi evolutivi graduali o anagenetici, ma anche momenti di cladogenesi che nella concezione evolutiva per salti (con fasi di rallentamento o di stasi e fasi di rapida speciazione) si fanno più evidenti. La loro individuazione resta però non facile.

Un altro problema è costituito dalle *origini dell'uomo moderno (Homo sapiens sapiens)*.

Due teorie si fronteggiano. Secondo la teoria della sostituzione, la forma moderna si sarebbe formata in Africa, da dove si sarebbe diffusa negli altri continenti intorno a 150.000-100.000 anni fa, sostituendo le popolazioni locali (*H. erectus*, i Neandertaliani in Europa) ivi presenti. È la teoria della "sostituzione" (o "dell'arca di Noè"). Questa teoria, proposta da alcuni paleoantropologi, si accorda con evidenze offerte dalla biologia molecolare, e precisamente dallo studio del DNA mitocondriale, da cui emerge la maggiore antichità del ceppo africano moderno, che si sarebbe diffuso negli altri continenti intorno a 150.000 anni fa. Si parla così di "Eva africana". Ad analoghe conclusioni pare si è giunti con analisi del DNA del cromosoma Y, per cui alcuni parlano di "Adamo africano".

L'altra teoria, quella della continuità (detta anche "del candelabro") sostiene invece la derivazione della forma moderna da *Homo erectus* nelle diverse regioni da popolazioni locali. A ciò inducono a pensare il dato paleontologico e anche le continuità culturali, specialmente in alcune regioni, come il lontano Oriente, come pure certi ritrovamenti dell'Est europeo.

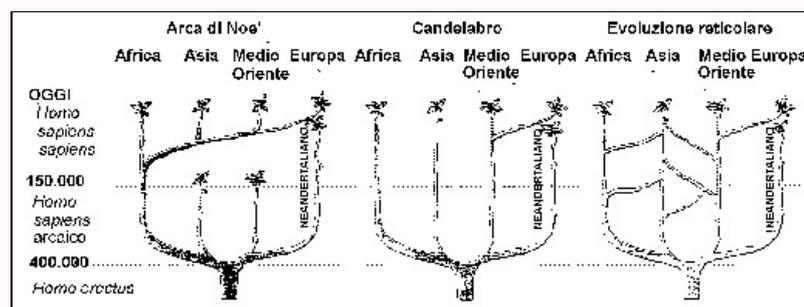


Figura 9. Tre ipotesi su l'origine di *Homo sapiens* (da V.Barriel in Dossier Pour la science n.22)

Il problema è complesso e vanno evitate le semplificazioni eccessive. Per quanto riguarda l'Europa, si ammette la sostituzione dei Neandertaliani con forme provenienti dal Vicino Oriente. A sostegno di questa ipotesi vengono anche portate recenti analisi del DNA di reperti neandertaliani, che escluderebbero i Neandertaliani dall'ascendenza dell'uomo moderno. Se questo è vero, sembra però da evitarsi una interpretazione troppo rigida della derivazione africana con totale sostituzione delle forme preesistenti. Pare da ammettersi qualche mescolanza, a volte limitata, altre volte in maggiore misura, con le forme esistenti sul territorio. Ciò può essere detto soprattutto per alcune regioni sia asiatiche che europee. In particolare vengono segnalati nel Paleolitico superiore per l'Europa orientale (Predmosti, Mladec), per il Portogallo (bambino di Velho), per l'Est asiatico e per l'Australia reperti di forma moderna con qualche aspetto arcaico. Del resto gli ultimi Neandertaliani sono stati coevi con le forme moderne e sono vissuti in aree finite.

Una teoria intermedia, che in qualche modo combina quelle precedenti, detta "teoria reticolare", ammette una continuità regionale ma con possibilità di flusso genico di popolazioni moderne.

Si può ritenere che dall'Africa siano partite diverse ondate di umanità nei periodi della preistoria. Inoltre debbono ammettersi cambiamenti microevolutivi locali in relazione ai

diversi fattori, specialmente geografici.

Uomini moderni (<i>Homo sapiens sapiens</i>)		Stadi isotopici 18 O ₂	28.000	Cro-Magnon
Neandertaliani	Neandertaliani «classici»	4-3	35.000	St.-Césaire La Chapelle-aux-Saints
	Proto-Neandertaliani	5	45.000 110.000 130.000	Saccopastore La Chaise, Abri Bourgeois-Delaunay
	Pre-Neandertaliani recenti	7-9	180.000	La Chaise, Abri Suard
	Pre-Neandertaliani arcaici	9-12	450.000 >350.000	Biache-st-Vaast Arago Petralona Atapuerca (S.H.)
I fossili arcaici europei <i>Homo erectus</i> o <i>heidelbergensis</i>		>13	570.000	Boxgrove Mauer
		18-20	700.000	Atapuerca (G.D.)
		22	800.000	Ceprano

Figura 10. Schema riassuntivo che illustra l'evoluzione delle popolazioni europee. (Da S. Condemi in Nuova Secondaria, maggio 1999)

Un altro problema ancora irrisolto è rappresentato dalle origini del linguaggio articolato. L'importanza di questa forma di comunicazione non può essere discussa. È una caratteristica bioculturale specifica dell'uomo che entra nella sua stessa definizione. Poiché il linguaggio non fossilizza, occorre fare riferimento a caratteristiche morfologiche che attestino la sua presenza. Vi sono Autori, come Lieberman, che attribuiscono il linguaggio articolato soltanto alla forma moderna in base alla morfologia di parti scheletriche connesse con la formazione dei suoni. Del medesimo parere sono anche alcuni archeologi che sembrano basarsi sul presupposto che manchino fino alla forma moderna manifestazioni di chiaro significato simbolico, come le rappresentazioni dell'arte. Non mancano però altri studiosi che in base ad alcune evidenze di ordine anatomico riconoscono forme di linguaggio anche prima dell'uomo moderno. Così l'abbassamento della laringe, che sarebbe riconoscibile già in *Homo erectus* dalla conformazione della base cranica, rappresenterebbe una condizione per la formazione dei suoni. Ad analoghe conclusioni giungono Falk e Tobias dallo studio del calco endocranico di *Homo habilis* che rivela un certo sviluppo delle aree cerebrali dell'emisfero sinistro connesse con il linguaggio (area di Broca nella corteccia frontale e area del Wernicke nella corteccia temporo-parietale, la prima come area motoria, la seconda per la comprensione dei suoni). Se a queste osservazioni si aggiungono le evidenze archeologiche (tecnologie, organizzazione del territorio, vita sociale, ecc.) che attestano uno psichismo riflesso (come si vedrà più avanti) e forme di comunicazione adatte a una trasmissione delle conoscenze, vi sono buoni argomenti per suggerire che forme di comunicazione linguistica simbolica fossero presenti fin dalle prime forme umane.

Interpretazioni

L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni

Fiorenzo Facchini

Interpretazioni

Introduzione

I Dati

Problemi Aperti

Interpretazioni

1. Identità biologica e culturale dell'uomo

2. Le origini dell'uomo e della cultura

3. Il posto dell'uomo nella natura

Letture

1. L'identità biologica e culturale dell'uomo

Chi è l'uomo? È questa la domanda che si pone non soltanto lo scienziato o il filosofo, ma ogni uomo. E il problema della identità dell'uomo, per la quale si può cercare una risposta anche basandosi sul comportamento dell'uomo, su ciò che lo caratterizza sul piano fenomenologico. Nell'uomo all'elemento biologico, comune a tutti i viventi, si accompagna l'elemento comportamentale di natura diversa, cioè la cultura.

Lo studio dell'evoluzione umana e dell'uomo preistorico non è solo lo studio delle modificazioni fisiche, ma anche della cultura. Tra l'uomo e il mondo animale vi è una continuità biologica che giustifica l'appartenenza della specie umana all'ordine dei Primati dal punto di vista tassonomico. Tale continuità non esclude novità e peculiarità sul piano biologico, che appaiono e possono essere interpretate come discontinuità. Attualmente non vi sono altri Primati che praticano il bipedismo. Lo sviluppo cerebrale umano, sia in senso quantitativo che qualitativo, è un fenomeno unico nel mondo dei viventi. Si ritiene che le differenze tra il genoma umano e quello dello scimpanzè siano dell'ordine del 5%, ma si tratta di vedere che cosa corrisponde a quel 5% sul piano biologico e comportamentale. (Le differenze sarebbero anche minori, nell'ordine dell' 1-2% se si fa riferimento alle proprietà biochimiche). Per quanto concerne i più antichi fossili umani, lo studio paleontologico mette in evidenza in *Homo habilis* alcuni elementi che fanno pensare a qualche discontinuità sul piano anche fisico (ad esempio l'aumento cerebrale del 40% rispetto agli Australopiteci). Ma non è facile parlare di discontinuità, non conoscendosi tutti i possibili passaggi intermedi. Mi sembra però che l'elemento di maggiore discontinuità sia rappresentato dal comportamento, cioè dalle attività che rivelano un'attitudine culturale e non sono riconducibili a fenomeni, proprietà o leggi di ordine biologico né a strutture biologiche. E quello che osserviamo con la cultura, la quale rientra in un campo extrabiologico.

Sul piano antropologico ritengo che due elementi caratterizzino la cultura: la progettualità e la simbolizzazione.

1. La progettualità significa la capacità di progettare, di agire intenzionalmente con certi comportamenti che tendono a raggiungere uno scopo che ci si prefigge. La progettualità rivela originalità, capacità innovative e creative, sia che si esprima nella lavorazione di una selce o nella costruzione di un riparo o nella manipolazione degli alimenti. È quello che avviene nella tecnologia, che può essere strumentale, abitativa, alimentare. La tecnica non è sconosciuta nel

mondo animale. Pensiamo al castoro che costruisce le dighe, o all'ape che costruisce celle esagonali di altissima perfezione, o agli uccelli che costruiscono il nido. Ma in questi casi non ci sono innovazioni, non c'è un progresso. Si tratta di comportamenti che appaiono fissati dal DNA o dall'imprinting. Manca una intelligenza di tipo astrattivo, che ha la capacità di proiettarsi nel futuro, di progettare, di innovare, di conservare.

2. La simbolizzazione è un'altra caratteristica essenziale della cultura. La capacità simbolica consiste nell'attribuire a un segno, a un suono, a un oggetto un valore, un significato che va oltre il segno (ad esempio, un grido, come reazione a uno stimolo doloroso). Mediante la simbolizzazione vengono arricchite di valori le realizzazioni della tecnica. La progettualità si lega alla simbolizzazione. Infatti ciò che viene ottenuto, oltre a rispondere a un progetto, assume un valore di segno o richiamo a qualche utilizzazione o impiego. Lo strumento acquista un valore in quanto strumento, perché richiama la funzione alla quale è destinato. Si può parlare di simbolismo funzionale, perché lo strumento assume un significato nella sua oggettività, in quanto rimanda, nell'intenzione di chi lo costruisce e nella mente di chi lo osserva, a una utilizzazione o funzione particolare o generale (ad esempio il tagliare, il raschiare).

Inoltre vi sono espressioni di simbolismo che consentono di comunicare, di stabilire delle relazioni non soltanto con riferimento immediato a stati emotivi, ma anche a situazioni lontane nel tempo (memoria dell'evento e proiezione sul futuro). Esse si collocano nella sfera del sociale, della comunicazione interpersonale. Ciò si realizza sia nelle risposte a bisogni biologici, che vengono arricchite di nuovi significati (l'abito ha funzione protettiva e di richiamo o estetica; la mensa è un modo per soddisfare bisogni biologici, ma anche di comunicazione, ecc.), sia in modo del tutto peculiare mediante il linguaggio, la scrittura e altre forme di comunicazione che costituiscono i sistemi simbolici di comunicazione, caratteristici delle società umane. Mediante la parola si realizza una comunicazione in assenza delle cose a cui ci si riferisce, astraendo da ciò che cade immediatamente sotto i sensi. È così che avviene la comunicazione del proprio mondo interiore e delle proprie esperienze. La comunicazione simbolica mediante il linguaggio rappresenta l'ambiente in cui si stringono i rapporti sociali e si formano nuovi sistemi di comunicazione. Queste forme di comunicazione rientrano in un simbolismo sociale.

Infine vi è un simbolismo in cui la comunicazione riguarda l'interiorità della persona senza particolari relazioni a bisogni o eventi. Si può trascendere la dimensione biologica e il bisogno sociale, quando ci si porta nella sfera dell'arte, della religione e dell'etica. In questi casi si può parlare di simbolismo spirituale. Possono esserci anche espressioni che hanno qualche riferimento alla vita biologica e sociale, ma si ha indipendenza e trascendenza rispetto al bisogno biologico e sociale.

La simbolizzazione avvolge la vita dell'uomo. Ciò va detto sia per l'uomo attuale che per l'uomo del passato. Giustamente Deacon (1997) parla dell'uomo come "specie simbolica".

Progettualità e simbolizzazione vanno viste congiuntamente, come espressioni dell'intelligenza umana astrattiva e dello psichismo umano. Esse costituiscono il nucleo essenziale della cultura. Inoltre, proprio in quanto espressioni creative, possono svilupparsi ed accrescersi nelle loro realizzazioni, che vengono trasmesse nella società per via extraparentale. Se questa è la cultura, dobbiamo anche ritenere che si ha solo nell'uomo, e quindi è un linguaggio improprio quello che attribuisce agli animali una cultura, ritenendo cultura qualunque comportamento appreso, anche per imitazione o per apprendimento casuale, e non ereditato biologicamente.

Ciò che caratterizza la cultura è espressione di uno

psichismo che è autocoscienza. Lo psichismo umano è anche percezione del tempo, non solo come memoria del passato (anche gli animali possono averla), ma come previsione e programmazione del futuro. La capacità previsionale è propria dell'uomo e porta alla conservazione e al miglioramento dei suoi prodotti. Essa significa apertura verso un futuro da conoscere e da costruire coscientemente e liberamente, anche predisponendo tecniche adeguate.

Questo atteggiamento interiore è rivelato dal comportamento, dai segni che ci fanno cogliere queste peculiarità dell'uomo, in una parola dalle manifestazioni culturali, in un approccio che potrebbe dirsi non filosofico, ma piuttosto fenomenologico o propriamente antropologico. Lo psichismo riflesso non fossilizza, ma se ne conservano le tracce, per l'uomo preistorico, come per l'uomo di oggi. E così che l'uomo si distingue dalle forme non umane, in cui non c'è progettualità né, simbolizzazione (anche se negli animali sono descritti atteggiamenti che simulano qualcosa di analogo).

2. Le origini dell'uomo e della cultura

Le origini della cultura come quelle dell'uomo sono avvolte in un certo mistero o oscurità. Quando nell'Ominide si manifesta la capacità di progetto e di simbolismo è segno che la scintilla dell'intelligenza si è accesa in lui. Ma quando ciò è avvenuto? Quando possiamo ritenere di trovarci di fronte a manifestazioni che lasciano intendere capacità di progetto e di simbolizzazione?

È il problema della individuazione della soglia umana, uno dei più ardui della paleoantropologia. Dobbiamo riconoscere che le origini dell'uomo e della cultura sono avvolte nell'oscurità più profonda. Teilhard de Chardin dice che l'uomo fa il suo ingresso sulla scena del mondo in punta di piedi. Quando lo vediamo è già una folla, senza dire che la documentazione che ci è pervenuta nelle sue fasi iniziali è certamente assai scarsa e frammentaria. Occorre fare riferimento ai reperti ossei e alle manifestazioni culturali.

Espressioni di cultura si trovano nella storia evolutiva dell'uomo non solo nelle fasi recenti con *Homo sapiens* che seppellisce i morti e affresca le pareti delle grotte, ma anche con *Homo erectus* e *Homo habilis*. Già sono state ricordate le manifestazioni culturali che accompagnano le forme umane più antiche. Esse sono costituite essenzialmente da industrie litiche, da testimonianze sul modo di vita che depongono per uno psichismo umano. L'uomo *faber* è anche *sapiens*, si rivela *sapiens* nell'essere *faber*, anche a partire dall'industria su ciottolo. Essa, nella sua varietà, rivela una progettualità e, indirettamente, anche una capacità astrattiva simbolica.

Quello che importa è il significato che lo strumento assume nell'immaginario del suo artefice, il quale non si accontenta dell'uso immediato, ma lo conserva e lo perfeziona. L'uomo tecnologico, costruttore di utensili, è anche inventore di simboli, *symbolicus* e *loquens*: la stessa tecnologia viene trasmessa mediante il linguaggio.

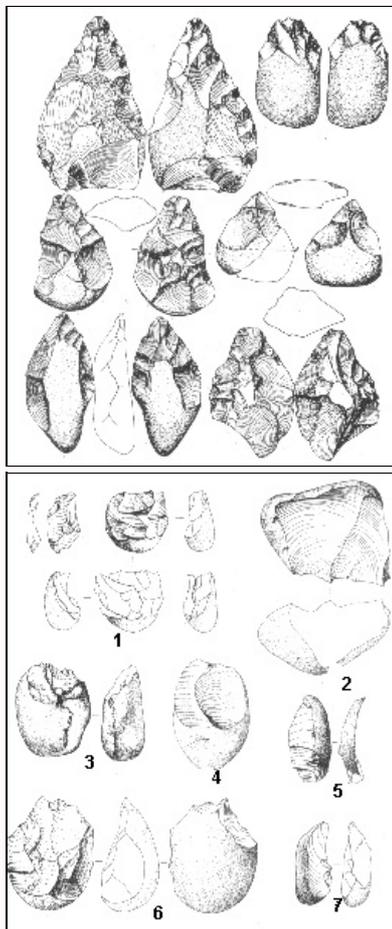


Figura 11. In alto. Bifacciali del giacimento di Castel di Guido, risalenti al Pleistocene medio (da F.Facchini in Nuova Secondaria, maggio 1999)
 In basso. Ca' Belvedere di Monte Poggiolo. Rimontaggio dallo strato 109 n. 1; schegge nn. 5,7 (str.107); ciottoli scheggiati nn.2 (str. 107),3 (str.108),4,6, (str.103). (da AA.VV., Il sito di Ca' Belvedere di Monte Poggiolo. In Quando Forlì non c'era, Abaco, Forlì,1996)

Quello che convince di più sull'antichità della forma umana, oltre allo strumento in sé (non c'è un "usa e getta", come in alcuni Primati che utilizzano pietre o bastoni), è il contesto in cui si realizzano e vengono utilizzate le tecniche, è la continuità e il progresso che si osservano nelle industrie litiche e nella organizzazione del territorio, nelle forme che si susseguono da *Homo habilis* a *Homo erectus* e *Homo sapiens*.



Figura 11. Bifacciale in selce del periodo Acheuleano. Al centro un fossile bivalve (Norfolk, Inghilterra).

La cultura entra come elemento determinante nei processi di adattamento, modificando l'ambiente e mediante accorgimenti che adattano l'organismo all'ambiente. Sia la capacità progettuale che il simbolismo - nella tecnologia, come nella vita e nell'organizzazione sociale e nel linguaggio - rappresentano fattori di adattamento dell'ambiente all'uomo e dell'uomo all'ambiente. Mediante la cultura si allenta la selezione naturale, anche se continua ad operare.

Rispetto alle altre specie l'uomo va controcorrente, perché innesta altre strategie adattative ed evolutive, contrastando, in qualche misura, la stessa selezione naturale ai fini della sopravvivenza. Se l'uomo è sopravvissuto rispetto agli Australopithecini, che si sono estinti, è stato grazie alla cultura (Coppens).



Figura 12. Frammento di tibia di elefante con segni intenzionali trovata nel sito di Bilzingsleben (Germania)

La cultura rappresenta l'*ambiente della specie umana*. L'uomo nasce, vive e cresce in una cultura. Realizza il suo rapporto con l'ambiente mediante la cultura. Essa rappresenta una vera specializzazione sul piano ecologico e caratterizza il rapporto trofico e funzionale della specie umana con l'habitat, cioè "la nicchia ecologica" della specie umana. In questo senso, emblematicamente, abbiamo proposto di definire la cultura "*nicchia ecologica dell'uomo*".

La cultura può essere vista anche come trascendimento evolutivo. L'idea si riallaccia al pensiero di Dobzhansky sulla linea della concezione di Teilhard de Chardin. Secondo l'Autore, è da ammettersi una discontinuità, un trascendimento evolutivo nel passaggio alla forma umana. Infatti le regole della società umana non sono più quelle biologiche, pur continuando le leggi di ordine biologico. Riteniamo che questa discontinuità sia da ricollegarsi essenzialmente alla cultura. Essa è stata preceduta, secondo Dobzhansky, da un primo trascendimento che si è avuto nel passaggio dal mondo inorganico alla struttura vivente. La singolarità dell'evento umano, proprio a motivo della cultura, viene riconosciuta anche da altri sostenitori del neodarwinismo, tra cui ricordo Ayala.

La cultura diventa rivelatrice dell'umano nell'uomo, di ciò che è specifico dell'uomo, e consiste nella sua attitudine alla cultura, resa possibile dallo psichismo riflesso, quali che siano le manifestazioni. Ciò può essere affermato sul piano fenomenologico. La spiegazione ultima di questo atteggiamento che esprime una discontinuità ontologica potrà essere ricercata in una visione filosofica dell'uomo aperta alla spiritualità.

3. Il posto dell'uomo nella natura

Nella concezione del darwinismo rigoroso, l'uomo, come ogni essere vivente che è determinato dalle piccole variazioni casuali delle specie, è un evento del tutto fortuito. L'uomo si

trova detronizzato dalla sua posizione al vertice del creato. Una visione fondata unicamente sulla casualità e sulla necessità, escludendo altri approcci scientifici e filosofici al fenomeno evolutivo, diventa una concezione totalizzante e mitica della evoluzione, che pretende di spiegare tutta la realtà, nel suo esistere e nel suo divenire, in termini unicamente meccanicistici. L'uomo viene visto come una delle tante specie del mondo animale in competizione con le altre o con l'ambiente nella lotta per l'esistenza. Ebbene questa riduzione dell'uomo a una delle tante specie, casualmente formatasi, male si accorda con la storia evolutiva che evidenzia nella linea umana una particolare direzione evolutiva, come sostenuto da molti studiosi e suggerito dal Principio antropico.

Se si guarda agli ultimi milioni di anni si vede che nell'evoluzione dei Primati si delinea una direzione evolutiva, caratterizzata da una maggiore complessità nella cerebralizzazione - come ha osservato Teilhard de Chardin - e culminante nella forma umana. Ha osservato Jean Piveteau (1983): "Se non si può affermare che il suo evento era inevitabile, esso è strettamente legato al movimento evolutivo, al suo sviluppo, alle sue caratteristiche. Non si può dire che questo movimento sia la causa dell'uomo, ma questi appare proprio come la sua conseguenza naturale". Tutto si svolge come se l'uomo rappresenti il punto culminante di tutta l'evoluzione cosmica e biologica.

Nota ancora a questo proposito il Piveteau in un'altra successiva opera (1996): "L'uomo aveva creduto un tempo di essere il centro del mondo; poi gli sembrò di non avere nessuna misura con la natura, trovandosi sperduto in un angolo dell'universo. La paleontologia gli restituisce, in una nuova forma, una preminenza in cui non credeva più ...".

Infine un'ultima osservazione. Non è solo la paleontologia che restituisce all'uomo una sua peculiarità nel mondo dei viventi, ma anche l'ecologia, in quanto essa chiama in causa la sua responsabilità in ordine a tutto l'ecosistema. La natura e le funzioni dell'essere umano differiscono da quelle di ogni altra specie per aspetti che non si legano direttamente al DNA. La cultura rappresenta la vera specializzazione dell'uomo e non è paragonabile a particolari organi con significato adattativo, quali si osservano nel mondo animale (ad esempio le pinne nei pesci o la proboscide dell'elefante), come qualcuno ha ritenuto. Con la cultura ci si trasferisce su un altro piano. Con l'uomo si è innescata nella storia dei viventi una modalità del tutto nuova, rappresentata dall'autocoscienza e dalla cultura. Di qui le sue responsabilità in ordine all'ambiente e al suo futuro. La paleontologia, come anche l'ecologia, ricollocano l'uomo in una posizione unica nella natura.

Lecture

L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni

Fiorenzo Facchini

Lecture

Introduzione

I Dati

Problemi Aperti

Interpretazioni

Lecture

*J.F.Ayala, "Biological Evolution: an introduction", in *An evolving dialogue: scientific, historical, philosophical and theological perspectives on evolution*, James B., Miller Editor, Washington, 1998, pp.10-53;

*J.F.Ayala, *Evolution and the uniqueness of humankind, Origins* . CNS documentary service, Feb.1998, pp. 567-574;

*J.F.Ayala, "Evolution and rationality: Natural Selection, Teleology and Novelty", in *Scienza e conoscenza. Verso un nuovo umanesimo*, (a cura di F.Facchini), Ed. Compositori, Bologna, 2000;

Y. Coppens, *Ominoidi, Ominidi, Uomini*, Jaca Book, Milano, 1988;

Y. Coppens, *Pre-amboli. I primi passi dell'uomo*, Jaca Book, Milano, 1990;

Y. Coppens, *Le genou de Lucie*, Odile Jacob, Paris, 1999;

T.W.Deacon, *The symbolic species. The co-evolution of language and the human brain*, Penguin Books, 1998;

Th. Dobzhansky, *Le domande supreme della biologia*, De Donato, Bari, 1969;

*D. Falk, *Cerebral cortices of east African early Hominids*, in *Science*, 222, 1983, pp. 1072-1074;

F.Facchini, *Il cammino dell'evoluzione umana*, Jaca Book, Milano, 1985 (II edizione);

F.Facchini, *Evoluzione umana e cultura*, Ed. La Scuola, Brescia, 1999;

F.Facchini, *Premesse per una Paleoantropologia culturale*, Jaca Book, Milano, 1991;

*F.Facchini , "Il simbolismo nell'uomo preistorico. Aspetti ermeneutici e manifestazioni", in *Rivista di Scienze Preistoriche*, 1998, XLIX, pp. 651-671;

*F.Facchini, "Le origini dell'uomo: vedute scientifiche attuali e istanze teologiche", in *Rivista di Teologia dell'Evangelizzazione*, IV, 7, 2000, pp. 127-145;

A. Ganoczi, *Teologia della natura*, Queriniana, Brescia, 1997;

*P. Lieberman, "On the evolution of human syntactic ability. Its preadaptive bases motor control and speech", in *Journal*

of human evolution, 14, pp. 668-675;

*J. Piveteau, *Origine et destinée de l'homme*, Masson, Paris, 1983;

J. Piveteau, *La comparsa dell'uomo*, Jaca Book, Milano, 1994;

*Ph. Tobias, "Recenti sviluppi nella conoscenza dell'evoluzione degli Ominidi con particolare riferimento all'encefalo e al linguaggio", in *L'Evoluzione dei Primati* a cura di C. Chagas, Jaca Book, Milano, 1987 (tr. da "Recent advances in the evolution of Primates", Città del Vaticano, 1983);

*Ph. Tobias, "The brain of Homo habilis: a new level of organisation in cerebral evolution", in *Journal of Human Evolution*, 1988, pp. 741-761;

*J. Jelinek, "Was Homo erectus already Homo sapiens?", in *Le processus de l'hominisation*, 85-90, Ed CNRS, 1981;

*B. Senut, "Les bipédies des Hominidés: origine et significations adaptatives, systématiques et phylogénétiques", in *The first human and their cultural manifestations* (Ed. by F. Facchini), Coll. VII and VIII, XIII Int. Congr. UISPP, Abaco, Forlì, 1996;

*B. Senut, D. Gommery, "Le bipédie degli Ominidi", in *Nuova Secondaria*, 15 maggio, 1999, 26-30.

Per un aggiornamento sull'evoluzione umana si rimanda anche al fascicolo "L'evoluzione umana" di *Nuova Secondaria*, 15 maggio 1999, curato da F. Facchini con contributi di Senut, Gommery, Condemi, Malgosa, pp. 21-39.

I volumi contrassegnati da asterisco costituiscono letture di approfondimento

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

Introduzione

Introduzione

Il nostro Sistema solare esiste! Da questo semplice ed irrefutabile fatto si può partire per chiedersi se nell'Universo, o almeno nella Galassia, esistano altri sistemi planetari. Fino a pochi anni fa, con la notevole eccezione della stella di Barnard, a cui accenneremo nel paragrafo seguente, l'esistenza dei pianeti extrasolari era relegata al regno della fantasia. Nonostante la mancanza di un'evidenza diretta, ci si può chiedere per quali motivi era ed è ragionevole ipotizzare l'esistenza di sistemi planetari esterni al nostro. Due sono le considerazioni alla base di quest'ipotesi e che fanno da premessa alla loro ricerca: la prima è puramente statistica, la seconda invece è operativa.

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

La motivazione statistica si basa sullo straordinario numero di possibilità che il nostro Universo offre per la nascita e lo sviluppo di sistemi planetari intorno a stelle singole o multiple. L'Universo contiene almeno cento miliardi di galassie ognuna delle quali possiede miliardi di stelle che, non è affatto improbabile, conterranno sistemi planetari simili al nostro. Combinando i fattori di questo calcolo statistico si arriva alla straordinaria cifra di 10^{20} sistemi planetari nell'intero Universo. Non solo ne possono esistere in un numero così grande ma, supponendo che il ritmo di formazione delle stelle e, attorno ad esse, dei pianeti sia uniforme nel tempo, avendo l'Universo un'età stimata di approssimativamente 15 miliardi d'anni ecco che, con un calcolo un po' ardito ma tutto sommato non troppo fantastico, si può giungere alla conclusione che ogni ora nascano un milione di sistemi planetari.

Ma torniamo con "i piedi per terra" (l'affermazione può anche essere presa nel suo significato letterale) e chiediamoci se è effettivamente possibile osservare dei pianeti extrasolari. L'astronomo rivolge la sua attenzione solo a ciò che è in grado di osservare per cui, essendo irraggiungibili i sistemi planetari delle galassie esterne, si limita ad una ricerca nei "dintorni del Sole": una regione della Via Lattea compresa in un raggio, al più, di 100 parsec. La possibilità d'osservazione di pianeti extrasolari, dopo un'attesa di circa 50 anni, ha avuto nel 1995 un nuovo straordinario impulso diventando uno dei più promettenti settori della ricerca astronomica.

La stella di Barnard

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

La stella di Barnard

Introduzione

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Prima di descrivere gli straordinari risultati di questi ultimi anni, dedichiamo un po' di attenzione al "caso" della Stella di Barnard. Nel settembre del 1916 apparve, dapprima sull'*Astronomical Journal* e, poco dopo, su *Nature*, un articolo riguardante la scoperta di una stella, apparentemente insignificante, che tuttavia mostrava un grande "moto proprio". Lo notò l'astronomo E.E. Barnard da cui la stella prese il nome. La stella di Barnard ha un moto proprio di 10,29 secondi d'arco per anno (cioè un moto angolare apparente sulla sfera celeste) e, come si vede nella Figura 1, la stella si è spostata in 47 anni in modo significativo sullo sfondo della sfera celeste. Dal momento che è la stella più vicina a noi dopo Alpha centauri, solo 5,97 anni luce, questa stella ricevette le attenzioni di Peter van de Kamp, un astronomo dello Sproul Observatory dello Swarthmore College. Iniziò un lunghissimo lavoro, con una serie di migliaia di lastre fotografiche prese in un arco di tempo di oltre 40 anni, dedicate alla ricerca di possibili variazioni nella sua traiettoria. Infatti — ed in questo consiste il "metodo astrometrico" — la presenza di ipotetici pianeti extrasolari ha un effetto indiretto sulla posizione apparente della stella attorno a cui orbitano. Dal *wobble* della stella, cioè da un leggero e minimo sfarfallio nella sua posizione apparente, è possibile dedurre la massa del pianeta o dei pianeti che orbitano attorno ad essa.

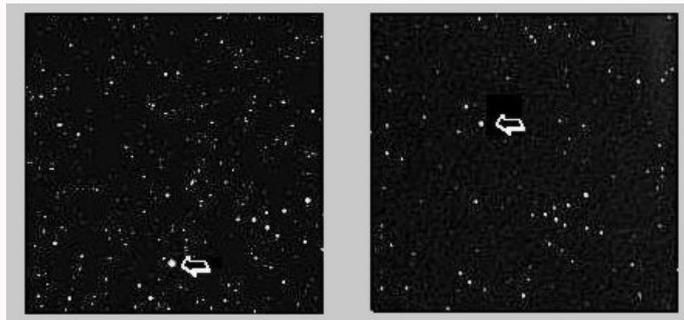


Figura 1. Nella foto a sinistra la posizione della stella di Barnard (indicata dalla freccia) nel 1950; a destra la posizione nel 1997 in conseguenza di un moto proprio annuo di 10.29" (secondi d'arco per anno).

Van de Kamp, dopo decenni di osservazioni, giunse alla conclusione che due pianeti orbitavano attorno alla stella di Barnard, uno di 0,7 e l'altro di 0,5 masse di Giove (in questo articolo la unità di massa di riferimento per i pianeti è la massa di Giove $M_G = 1,90 \times 10^{30} \text{ x g} = 317 M_T \text{ x } 0,001 M_S$.) La scoperta di Van de Kamp servì a mantenere vivo il dibattito sull'esistenza dei Pianeti extrasolari, anche se le sue misure vennero ritenute viziate da errori sistematici e rigettate dalla maggior parte della comunità scientifica. Nonostante la continua diatriba con la comunità astronomica, la sua ostinazione è stata in parte premiata nel 1995 quando Gatewood, in base a misure indipendenti,

suggerì che delle Nane Brune, stelle però non pianeti, potevano effettivamente orbitare attorno alla stella di Barnard.

Prima di passare alla rassegna dei risultati di questi ultimi anni, è necessario cercare di capire come si è formato il Sistema solare e se gli stessi criteri fisico-chimici, che stanno alla base della sua formazione, si possono estendere anche alla formazione di ipotetici sistemi extrasolari. La prima domanda che ci si pone è come si distinguono i pianeti dalle stelle.

La distinzione tra stelle e pianeti

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

La distinzione tra stelle e pianeti

Introduzione

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Fino a qualche decennio fa, un pianeta era inteso come un corpo celeste che non emette luce propria ma riflette quella della stella che lo illumina. In realtà questa distinzione si rivelò inadeguata per i pianeti giganti del Sistema solare che emettono più radiazione di quanta ne ricevano dal Sole. Di conseguenza occorre trovare un nuovo criterio per definire un "pianeta" come tale, oppure classificare i pianeti giganti come "stelle". Si ritenne opportuno cambiare la definizione di stella intendendola come un oggetto autogravitante che, durante la sua evoluzione, abbia prodotto la sua energia interna tramite le reazioni nucleari. Al contrario si definisce pianeta un corpo celeste che non sarà mai in grado di innescare le reazioni nucleari.

La teoria dell'evoluzione stellare mostra che la massa minima per produrre l'innescio delle reazioni nucleari dell'idrogeno è di circa $80 M_{\odot}$. Ulteriori studi però hanno ridotto questo valore, in quanto si è dimostrato che un oggetto celeste, con una sufficiente quantità di deuterio, può innescare, per reazione con l'elio, il bruciamento dell'idrogeno anche se la massa è di soltanto $10 M_{\odot}$; quest'ultimo valore viene quindi assunto come limite superiore della massa di un pianeta. Secondo questo criterio, imponendo il confine tra stelle e pianeti all'1% della massa del Sole, si possono considerare tali, cioè pianeti, anche i pianeti giganti del Sistema solare, che pur mantengono una fonte (non termonucleare) di energia interna.

Un'ulteriore possibilità è collegata alla distinzione sulle orbite. Mentre le stelle hanno orbite circolari si ritiene che i pianeti abbiano orbite eccentriche. Il calcolo dell'eccentricità delle loro orbite è quindi fondamentale per effettuare una selezione tra stelle, con masse al limite delle $10 M_{\odot}$, e pianeti extrasolari. In particolare gli oggetti celesti sono ritenuti pianeti se hanno eccentricità maggiori di 0,1. Quest'ultimo criterio è molto delicato, infatti la maggior parte dei pianeti del Sistema solare hanno orbite quasi circolari con eccentricità minori del limite precedentemente fissato, per cui mentre il limite sulla massa è certamente valido, quello sulle eccentricità delle orbite presta il fianco a dubbi e discussioni.

La formazione dei sistemi planetari

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

La formazione dei sistemi planetari

Introduzione

È importante, per capire la formazione dei sistemi planetari, distinguere tra stelle singole e multiple, ad esempio binarie.

La stella di Barnard

Nel caso di sistemi stellari singoli, per sistema planetario s'intende un sistema che è legato gravitazionalmente e che, oltre ad essere costituito da una stella centrale, presenta almeno due pianeti che le orbitano attorno. Il Sistema solare presenta una *struttura non gerarchica* nella distribuzione dei suoi pianeti, poiché tutti e nove ruotano su orbite quasi circolari attorno al Sole, una stella singola

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Considerando invece sistemi stellari multipli (ad esempio binari), i pianeti potrebbero a loro volta ruotare attorno al comune centro di massa, producendo una *struttura gerarchica* con una situazione molto più complessa e dovuta, probabilmente, ad un meccanismo di formazione planetaria completamente diverso. Di questa *struttura gerarchica* si ha un esempio anche nel nostro Sistema solare in quanto il satellite di Plutone, Caronte, è di massa e dimensioni paragonabili a quelle del pianeta principale tale da costituire un sistema di pianeti doppio. Si ritiene però che tale configurazione non sia dovuta al meccanismo originario di formazione del Sistema solare ma alla cattura di un asteroide esterno all'orbita di Plutone.

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Ogni teoria di formazione planetaria deve essere in accordo con le osservazioni e in particolare con la teoria della formazione del Sistema solare. Secondo quanto si è valutato per il meccanismo di formazione del Sistema solare possiamo ritenere che la formazione di una stella e del suo eventuale sistema planetario si svolga in tre fasi principali. La prima consiste nel collasso di una nube molecolare, da cui si origina una protostella, circondata da un disco di gas e polveri che si estende fino a 100 U.A. (U.A.=Unità Astronomica), la cui durata è di circa 100.000 anni. La seconda, nell'aggregazione di gas e polveri sulla stella centrale, che porta alla formazione di una stella di sequenza principale che, a sua volta, innesca le reazioni nucleari e determina una redistribuzione del materiale in una struttura a forma di disco con tempi che variano da 10 a 100 milioni di anni. La terza è la formazione di una nebulosa stellare quiescente che, in seguito, accumulandosi ulteriormente, darà luogo ai pianeti: il tempo per completare questo stadio finale è molto più lungo, fino a 200 milioni di anni.

La scoperta dei pianeti extrasolari

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

La scoperta dei pianeti extrasolari

Introduzione

Veniamo finalmente alla rassegna dei risultati e delle scoperte più recenti. Fino a pochi anni fa non c'erano prove dirette dell'esistenza di pianeti in orbita intorno a stelle che assomigliassero al Sole, salvo il dubbio caso della stella di Barnard.

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Le tecniche di osservazione dei pianeti extrasolari

Le "Nane Brune"

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Nell'ottobre del 1995 M. Mayor e D. Queloz dell'Osservatorio di Ginevra annunciarono la scoperta di un pianeta di grande massa attorno alla stella, di tipo solare, 51 Pegasi. Pochi mesi dopo anche G. W. Marcy e R.P. Butler della San Francisco State University e della University of California, Berkley, riferirono dell'individuazione di altri due corpi in orbita intorno a stelle dello stesso tipo: 47 Ursae Majoris e 70 Virginis. Da allora sino ad oggi il numero di pianeti extrasolari ha raggiunto la ragguardevole cifra di cinquanta!

Le tecniche di osservazione dei pianeti extrasolari

Ma prima di entrare nella descrizione del "bestiario" dei pianeti extrasolari noti, vediamo quali sono i metodi per individuarli. Due sono le possibilità principali: o rivelare i pianeti indirettamente, tramite effetti fisici che ne provino l'esistenza, oppure osservarli direttamente con le immagini astronomiche.

La rilevazione indiretta. La stella principale di un sistema extrasolare è certamente visibile, e l'ipotetico pianeta si può individuare in base agli effetti che provoca sulla stella principale. Due sono i principali metodi indiretti: quello *astrometrico* e quello *spettroscopico*; a questi due va aggiunta la *fotometria a terra*, che sta rivelandosi sempre più interessante in questi ultimi anni. Tutte queste tecniche rivelano gli effetti *gravitazionali* che la presenza del compagno planetario determina sulla stella, in conseguenza del loro moto attorno al comune centro di massa.

La rilevazione diretta non serve, se non in alcuni casi particolari, per la scoperta dei pianeti extrasolari ma, una volta scoperti con metodi indiretti, permette di studiarne alcune caratteristiche peculiari, ad esempio la presenza della materia diffusa intorno alle stelle.

Entrambi questi metodi hanno, almeno per ora, un grande limite: non sono in grado di individuare pianeti extrasolari di tipo terrestre.

Il metodo astrometrico. Questa tecnica, cui abbiamo già accennato precedentemente, si basa sullo studio del moto apparente delle stelle proiettato sulla volta celeste. Le stelle più vicine al Sole mostrano, in un dato periodo, un *moto proprio* maggiore delle stelle lontane, che invece appaiono immobili nel cielo. La ricerca dei pianeti extrasolari, effettuata mediante l'astrometria, richiede una *misura accurata* della posizione della stella per un lungo periodo di tempo così da verificare se il suo *moto proprio* è lineare o se

invece presenta delle oscillazioni provocate dalla presenza di eventuali compagni. Questa tecnica fornisce risultati ottimali nel caso di sistemi planetari in stelle vicine e con pianeti massicci orbitanti lontano dalla stella principale e con orbite di lungo periodo. L'estrema difficoltà di queste misure è messa in evidenza ricordando che un pianeta di "tipo terrestre" in orbita attorno ad un altro sole richiederebbe, per essere rilevato, misure di moto proprio con una precisione di un milionesimo di secondo d'arco: ben al di là delle possibilità osservative attuali.

Il metodo spettroscopico. Le tecniche spettroscopiche sono basate sulle misure degli spostamenti verso il blu o verso il rosso, per effetto Doppler, delle linee spettrali, particolarmente intense, osservate nello spettro della stella principale, e sono quelle che hanno dato i risultati più interessanti.

La stella, a causa del moto orbitale dell'eventuale pianeta, presenta una variazione di velocità radiale con ampiezza data dalla seguente formula:

$$V_r \cong \frac{(m_p \cdot \sin i)}{M_*^{2/3} \cdot P^{1/3}} \quad (1)$$

dove: V_r = variazione della velocità radiale in m/s, M_* = massa della stella (in unità di masse solari), m_p = massa del pianeta (in unità di masse solari) P = periodo dell'orbita del pianeta in anni ed i = inclinazione dell'orbita del pianeta rispetto al piano del cielo.

Si tenga presente la differenza nella misura delle velocità radiali per i pianeti extrasolari. Infatti, mentre per lo spostamento verso il rosso delle galassie lontane il valore di V_r è osservato in km/s, nel caso di oggetti planetari la misura è molto più difficile in quanto limitata a poche decine di m/s!

La spettroscopia delle righe delle stelle fornisce, tramite l'effetto Doppler, il valore della velocità radiale secondo la seguente formula:

$$\frac{V_r}{c} = \frac{\Delta \lambda}{\lambda} \quad (2)$$

dove $\Delta \lambda$ è il valore dello spostamento delle righe dello spettro causato dal moto del pianeta (rispetto alla lunghezza di onda a riposo), e c la velocità della luce. Lo spostamento Doppler si ricava dalle osservazioni, anche se è necessario "ripulirlo" dagli effetti di turbolenza dell'atmosfera della stella. Questo richiede un buon modello delle atmosfere stellari in modo da calcolare, e poi sottrarre, questa componente dall'effetto totale. Il periodo dell'orbita P si ricava dall'andamento della curva di variazione della velocità radiale nel tempo, per cui il valore che si ricava dalla formula 1, è il prodotto tra la massa del pianeta ed il seno dell'inclinazione ($m_p \sin i$). Attenzione: si ricava direttamente la massa del pianeta, solo nel fortunato caso in cui il piano dell'orbita del pianeta attorno alla stella sia perpendicolare al piano del cielo! Da qui l'incertezza sui valori della massa del candidato pianeta.

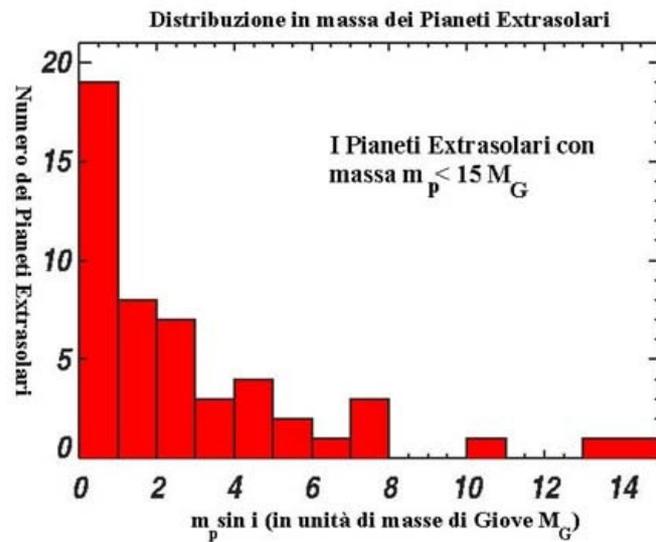


Figura 2. È un istogramma della distribuzione di massa per i pianeti extrasolari osservati. Sull'asse delle ordinate si trova il numero di pianeti, mentre su quello delle ascisse il prodotto $m_p \sin i$ che è il valore calcolato in base all'effetto Doppler con il metodo spettroscopico. Si può notare come la definizione dell'inclinazione i tra il piano dell'orbita ed il piano del cielo può influire in modo determinante il calcolo del valore reale della massa del pianeta.

Quanto è difficile osservare un pianeta extrasolare? Dipende dalla distanza della stella e dalla massa del pianeta. Ad esempio, se il Sole fosse osservato da una distanza di 10 parsec, un pianeta della massa di Giove mostrerebbe una variazione sinusoidale nell'ampiezza di 13 m/s in un periodo orbitale uguale a 12 anni. Nel caso di Urano risulterebbe di 0,3 m/s in un periodo di 84 anni, mentre per un pianeta della massa della Terra sarebbe di 0,09 m/s per un periodo orbitale di 1 anno. Si tratta di piccole variazioni che rendono quasi proibitiva la ricerca di pianeti lontani e soprattutto di tipo terrestre!

I limiti di questi due metodi, astrometrico e spettroscopico, sono riassunti nella Figura 3. In sostanza non si possono rivelare pianeti con *raggio orbitale maggiore di 10 unità astronomiche* (come Urano e Nettuno del nostro Sistema solare) in quanto richiedono periodi di osservazione troppo lunghi né con *raggio orbitale minore di 0,03 unità astronomiche*, sia perché le maree della stella centrale distruggerebbero i pianeti, sia perché essi potrebbero essere inglobati nella atmosfera della stella principale. Ricordiamo, inoltre, che, per *masse superiori alle 10 Masse di Giove*, probabilmente non si tratta di pianeti, ma di Nane Brune

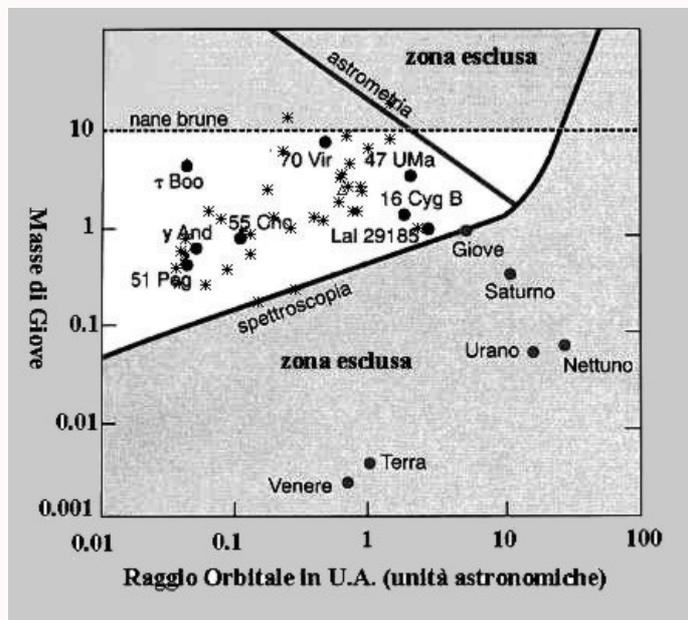


Figura 3. I pianeti extrasolari che possono essere osservati con le attuali tecnologie sono rappresentati nella zona in bianco del grafico. Le masse ed i raggi sono in scala logaritmica. In questa zona i pallini neri si riferiscono ai pianeti extrasolari scoperti prima del 1997, mentre gli asterischi sono i nuovi candidati a tutto il 2000. La riga orizzontale a tratteggio delimita la regione, sopra le 10 masse di Giove, dove finiscono i pianeti veri e propri ed iniziano le stelle di tipo "Nana Bruna". La linea trasversale in basso indica il limite di visibilità nelle misure spettroscopiche di velocità radiale delle stelle. La regione sottostante in grigio, dove si trovano per confronto alcuni pianeti del Sistema solare, non è accessibile con la tecnologia attuale. La linea trasversale in alto indica gli attuali limiti del metodo astrometrico. Con tale metodo, attualmente sarebbe possibile solo l'identificazione di un compagno sub-stellare attorno ad una stella lontana non più di 30 anni luce. Questo limite potrà essere migliorato solo aumentando la precisione nella determinazione della posizione delle stelle sino ad $1/100.000$ di secondo d'arco. Si vede da questo grafico che i pianeti extrasolari di taglia gioviana o più piccola sono fuori delle possibilità osservative attuali. (adattata da F. Marzari, *l'Astronomia*, n. 175, pag. 35)

Le "Nane Brune"

Un accordo preciso sulla natura di pianeta extrasolare non è ancora stato raggiunto, anche a causa dell'esistenza delle "Nane Brune". Queste ultime si originano allo stesso modo delle stelle ma non accumulano abbastanza massa da generare le alte temperature capaci di innescare la fusione nucleare nel loro nucleo. *Oggetti con massa compresa tra le 0,01 e 0,08 masse solari vengono dette "Nane Brune"*. Fino al 1995 si trattava di una classe d'oggetti alquanto "misteriosi". Le prime prove inconfutabili della loro esistenza si sono avute in seguito alla scoperta di una di esse (Gliese 229 B) trovata vicino ad una Nana Rossa, Gliese 229.

Classificazione dei pianeti extrasolari

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Introduzione

Non possiamo, in questo breve articolo, riferire di tutti i pianeti extrasolari sino ad oggi osservati, sia perché sono ormai in gran numero (oltre cinquanta) sia perché per alcuni manca ancora la conferma da parte di più osservatori.

La stella di Barnard

Lasciamo al lettore interessato l'indicazione delle pagine Web a cui accedere per ottenere informazioni sempre più aggiornate, con la raccomandazione di distinguere i dati astronomici da speculazioni che, per quanto suggestive, sono sempre del tutto ipotetiche.

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

È possibile catalogare i pianeti extrasolari finora scoperti in tre classi principali.

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Pianeti di "tipo 51 Pegasi". A questa categoria appartengono 51 Pegasi b, 55 Cancri b, tau Boo ed ups And. Si tratta di pianeti che ruotano attorno alla stella principale molto velocemente (con periodi di pochi giorni) e con orbite quasi circolari. Il semiasse maggiore è compreso tra 0.05 ed 0.1 U.A., cioè a meno di 1/3 dell'orbita di Mercurio dal Sole.

Beta Pictoris

Conclusioni

Pianeti di "tipo 70 Virginis". A questa classe appartengono 70 Virginis B ed HD 114762, che ruotano a distanze tra le 0.4 e 0.5 U.A. con orbite molto ellittiche. Avendo una massa maggiore di 10 volte quella di Giove, potrebbero anche essere delle "Nane Brune".

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Pianeti di "tipo 47 Ursae Majoris". Questa classe comprende oltre a 47 Ursae Majoris B anche Lalande 21885 b e 16 Cygni B b. Si tratta di pianeti con semiassi maggiori superiori alle 1.5 U.A. con un ampio spettro di eccentricità orbitali.

Beta Pictoris: un esempio di disco protoplanetario

L'interessere nella ricerca di pianeti esterni al Sistema Solare non si limita alla scoperta di pianeti, ma va anche nella direzione dell'individuazione di dischi protoplanetari da cui si possono formare i pianeti stessi. Beta Pictoris è una stella un po' più calda del nostro Sole, dista circa *60 anni luce* e presenta un disco circumstellare attorno ad essa. Il satellite artificiale IRAS (Infrared Astronomic Satellite) ha rivelato attorno a questa stella un eccesso di radiazione infrarossa tipica della emissione di nubi fredde di polveri. Ad un esame più accurato è risultato che tale nube altro non è che un disco di materia, che si distende lungo il piano equatoriale della stella e che viene osservato quasi di taglio. Le prime immagini di Beta Pictoris sono state prese dai telescopi dall'Osservatorio Europeo dell'emisfero sud (ESO) utilizzando un telescopio di 2.5 metri, tramite una videocamera CCD attrezzata con un coronografo in modo da bloccare la maggior parte della luce stellare e così mettere in evidenza il disco circumstellare

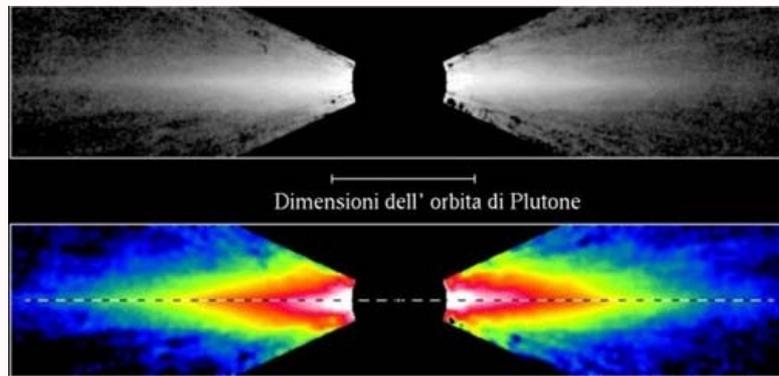


Figura 4. Il disco deformato di Beta Pictoris come visto da HST. ©Nasa Hst

Il Telescopio Spaziale (HST) ha permesso, per la prima volta, di osservare la regione interna al disco che circonda la stella evidenziando per la prima volta, la struttura delle regioni interne. Queste mostrano un disco di *200 miliardi di km* di estensione, costituito principalmente da polvere, ghiaccio e silicati e non troppo dissimile da quello da cui ha tratto origine il nostro Sistema Solare.

Conclusioni

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

Conclusioni

Introduzione

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Per quale motivo è così importante la ricerca dei pianeti extrasolari? Per tanti motivi: per capire come si forma un sistema planetario, per avere indicazioni sull'evoluzione stellare di stelle di piccola massa, per cercare di porre le basi per la ricerca di pianeti terrestri. Quest'ultimo obiettivo è lungi dall'essere raggiunto. Infatti non è ancora possibile riuscire non solo ad individuare pianeti di "taglia" terrestre, ma siamo ancora lontani dalla possibilità di distinguere la luce della stella da quella dell'ipotetico pianeta e, quindi, fare la spettroscopia delle atmosfere dei pianeti. Sarà questo il prossimo passo! Individuare mediante tecniche "coronografiche" pianeti con atmosfere "terrestri" riuscendo a risolvere l'atmosfera di pianeti a massa sempre più piccola. Lasciamo alla fantasia degli appassionati fantasticare su possibili missioni interstellari verso i pianeti extrasolari; per ora si può solo pensare di individuarli.

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Introduzione

La stella di Barnard

Il catalogo è aggiornato al 28 ottobre 2000 e fornisce i principali parametri fisici ed orbitali dei pianeti extrasolari confermati. È ordinato per semiasse maggiore dell'orbita in U.A. crescente, ed è ricavato dai dati per le masse stellari, la metallicità e l'evoluzione stellare di Hipparcos.

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Stella	M sini M _G	Periodo (giorni)	Semiasse Maggiore U.A.	Eccentricità	V _r (m/s)	Inclinazione (gradi)
HD83443	0.35	2.986	0.038	0.08	56.0	-
HD46375	0.25	3.024	0.041	0.02	35.2	-
HD187123	0.54	3.097	0.042	0.01	72.0	-
HD179949	0.86	3.092	0.043	0.0	112	-
Tau Boo	4.14	3.313	0.047	0.02	474.0	-
BD-103166	0.48	3.487	0.046	0.05	60.6	< 84.3°
HD75289	0.46	3.508	0.048	0.00	54.0	-
HD209458	0.63	3.524	0.046	0.02	82.0	85.3°
51 Peg	0.46	4.231	0.052	0.01	55.2	-
Ups Andb	0.68	4.617	0.059	0.02	70.2	-
HD168746	0.24	6.400	0.066	0.00	28.0	-
HD217107	1.29	7.130	0.072	0.14	139.7	-
HD162020	13.73	8.420	0.072	0.28	1813.0	-
HD130322	1.15	10.72	0.092	0.05	115.0	-
HD108147	0.35	10.88	0.098	0.56	37.0	-
HD28529	0.77	14.31	0.129	0.27	53.6	-
55 Cnc	0.93	14.66	0.118	0.03	75.8	25°
GJ86	4.23	15.80	0.117	0.04	379.0	-
HD195019	3.55	18.20	0.136	0.01	271.0	-
HD6434	0.48	22.0	0.15	0.3	37.0	-
HD192263	0.81	24.35	0.152	0.22	68.2	-
HD83443c	0.16	29.83	0.17	0.42	14.0	-
Rho CrB	0.99	39.81	0.224	0.07	61.3	-
HD168443	7.18	58.10	0.29	0.53	470.0	-
GJ876	2.07	60.90	0.207	0.24	235.0	-
HD121504	0.89	64	0.32	0.13	45.0	-
HD16141	0.22	75.80	0.351	0.28	10.8	-
HD114762	10.96	84.03	0.351	0.33	615.0	-
70 Vir	7.42	116.7	0.482	0.40	316.2	-
HD52265	1.14	119.0	0.493	0.29	45.4	-
HD1237	3.45	133.8	0.505	0.51	164.0	-
HD37124	1.13	154.8	0.547	0.31	48.0	-
HD169830	2.95	230.4	0.823	0.34	83.0	-

<i>Ups Andc</i>	2.05	241.3	0.828	0.24	58.0	-
<i>HD12661</i>	2.83	250.2	0.799	0.20	89.3	-
<i>HD89744</i>	7.17	256.0	0.883	0.70	257.0	-
<i>HD202206</i>	14.68	258.9	0.768	0.42	554.0	-
<i>HD134987</i>	1.58	260.0	0.810	0.24	50.2	-
<i>Iota Hor</i>	2.98	320.0	0.970	0.16	80.0	-
<i>HD92788</i>	3.86	337.7	0.97	0.27	113.1	-
<i>HD177830</i>	1.24	391.0	1.10	0.40	34.0	-
<i>HD27442</i>	1.13	426	1.15	0.02	34	-
<i>HD210277</i>	1.29	436.6	1.12	0.45	39.1	-
<i>HD82943</i>	2.3	442.6	1.2	0.60	73	-
<i>HD222582</i>	5.18	576.0	1.35	0.71	179.6	-
<i>HD160191</i>	1.87	743	1.6	0.62	54.	-
<i>16 CygB</i>	1.68	796.7	1.69	0.68	50.0	-
<i>HD10697</i>	6.08	1074.0	2.12	0.11	114.0	-
<i>47 Uma</i>	2.60	1084.0	2.09	0.13	50.9	-
<i>HD 190228</i>	5.0	1127	2.3	0.43	91.0	-
<i>Ups Andd</i>	4.29	1308.5	2.56	0.31	70.4	-
<i>14 Her</i>	5.55	2380.0	3.5	0.45	98.5	-
<i>Epsilon Eri</i>	0.8	2518.	3.4	0.6	19.0	46 ±.17°

I Pianeti extrasolari

Roberto Bedogni

Letture e internet

Introduzione

La stella di Barnard

La distinzione tra stelle e pianeti

La formazione dei sistemi planetari

La scoperta dei pianeti extrasolari

Classificazione dei Pianeti extrasolari

Conclusioni

Catalogo dei pianeti extrasolari confermati

Letture

J.R. Angel e N.J. Woolf, "In cerca di vita su altri pianeti", in *Le Scienze*, n. 335, 1996

AA. VV., "La vita nell'Universo", in *Le Scienze*, n. 316, 1994

G. Bernardi, *La vita extraterrestre*, Newton, 1997

N. Booth, *Il Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1996

A. Braccesi, G. Caprara, M. Hack, *Alla scoperta del Sistema Solare*, Mondadori, Milano, 2000

G. Briggs e F. Taylor, *Atlante Cambridge dei pianeti*, Zanichelli, Milano, 1997

J.S. Kargel e R.G. Strom, "Cambiamenti climatici su Marte", in *Le Scienze*, n. 341, 1997

D.L. Goodstein e J.R. Goodstein, *Il moto dei pianeti intorno al Sole: una lezione inedita di R. Feynmann*, Zanichelli, Bologna, 1997

K.R. Lang e C.A. Whitney, *Vagabondi nello spazio: ricerche e scoperte nel Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1987

F. Marzari, "Pianeti extrasolari come si formano?", in *Astronomia*, n. 175, 1997

D.H. Menzel e J.M. Pasachoff, *Stelle e pianeti*, Zanichelli, Milano, 1990

E. Nesme-Ribes, S.L. Baliunas e D. Sokoloff, "La dinamo stellare", in *Le Scienze*, n. 338, 1996

R. Rossi, "Alla scoperta di nuovi mondi", in *Airone*, n. 230, 2000

C. Sagan, "La ricerca di forme di vita extraterrestri", in *Le Scienze*, n. 316, 1994

R. Smoluchowski, *Il Sistema Solare*, Zanichelli, Bologna, 1989.

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Premessa

Premessa

**Attraverso quale
finestra dello
spettro
elettromagnetico è
più vantaggioso
osservare?**

**Fino a che distanza
l'attuale tecnologia
permette di
indagare e che
segnale si cerca?**

**Quante civiltà
potrebbero esistere
all'interno della Via
Lattea?**

**Come si osserva e
cosa si sta facendo
nel nostro paese?**

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Gli ultimi anni sono stati ricchi di nuove scoperte astronomiche rese possibili sia da osservatori basati a terra che da osservatori in orbita. Queste hanno pesantemente contribuito alla incredibile crescita della Bioastronomia, nuova branca della scienza che, come un grande mosaico, è composta da molteplici settori della ricerca moderna. La Bioastronomia indaga sull'origine, sull'evoluzione e sull'espansione della vita nell'universo. Le recenti scoperte di pianeti extrasolari e di molecole prebiotiche in nubi interstellari sembrano indicare che probabilmente la vita, come noi la concepiamo, non è un fenomeno unico nell'universo. È anche vero che l'uomo esiste perché nel cosmo, fin dalla sua lontanissima origine, si sono verificate una serie di situazioni favorevoli (ma anche estremamente critiche) che ne hanno reso possibile la nascita e l'evoluzione. Alcune delle costanti universali, come la velocità della luce, la costante di Planck o la velocità con cui l'universo iniziò ad espandersi, hanno assunto in natura quei precisi valori che hanno permesso molto più tardi la comparsa e l'evoluzione della vita. Se la velocità con cui l'universo ha iniziato ad espandersi fosse stata minore o maggiore di quella assunta in natura (a livello di meno di una parte su dieci milioni), sulla Terra non ci sarebbe mai stata la vita. Il carbonio stesso, uno degli elementi fondamentali per la chimica della vita, è stato generato da reazioni termonucleari all'interno delle stelle che lo hanno reso poi disponibile in grandi quantità alla fine della loro evoluzione durata miliardi di anni. Tutte queste meravigliose coincidenze potrebbero avere determinato l'apparizione dello stesso miracolo "vita", magari intelligente, anche su altri pianeti. La possibilità di esistenza di vita extraterrestre appariva realistica già fin dagli anni 50 quando due ricercatori americani (Urey e Miller) dimostrarono che immettendo acqua, ammoniaca, metano ed idrogeno in un'ampolla sottoposta a forti scariche elettriche, si potevano ottenere molecole complesse come gli amminoacidi, elementi fondamentali per la chimica della nostra vita.

La domanda cui si vorrebbe tentare di rispondere ora è "siamo gli unici esseri viventi ed intelligenti nell'Universo?". A questa domanda tenta di dare sperimentalmente una risposta il programma SETI (*Search for ExtraTerrestrial Intelligence*). Avviato negli USA (NASA) negli anni settanta, costituisce ora una delle componenti più importanti di quel consorzio interdisciplinare che è la Bioastronomia. È un programma a largo respiro internazionale che, mediante l'uso di grandi radiotelescopi, si propone di monitorare la banda delle microonde alla ricerca di segnali radio provenienti da civiltà extraterrestri in possesso di una

opportuna tecnologia radio. Il programma, sospeso dal congresso americano nell'Ottobre 1993 per carenza di fondi, è ora gestito dal *SETI Institute*, che opera sulla base di contributi volontari da parte di industrie e privati.

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

Premessa

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Nella scelta della banda dello spettro elettromagnetico attraverso cui cercare tracce di vita intelligente si deve tenere conto che, dovendo osservare con strumenti basati a terra, solo le finestre radio ed ottica sono "aperte" sull'universo. In altre parole l'atmosfera è trasparente solo alle frequenze relative a queste bande mentre alle altre (infrarossi, ultravioletti, X e Gamma) è completamente opaca, se ne deduce che la ricerca da terra può essere condotta solo attraverso queste due bande. Il programma SETI prevede l'uso della finestra radio attraverso la quale i radiotelescopi studiano il cielo a lunghezze d'onda non percepibili dall'occhio umano. Le onde radio sono anche caratterizzate dal fatto di potere attraversare regioni dello spazio che sono invece "opache" alle emissioni presenti sulle altre bande dello spettro elettromagnetico. Per questo tipo di indagine vengono impiegati i grandi radiotelescopi oggi disponibili, grazie anche all'enorme sensibilità offerta da queste complesse strumentazioni. Infatti, date le distanze, un eventuale messaggio radio trasmesso da un'ipotetica civiltà extraterrestre arriverebbe sulla nostra Terra con un livello di segnale incredibilmente basso. Una volta stabilito l'impiego della banda radio, resta da determinare a quale frequenza sintonizzare gli strumenti per provare a ricevere segnali radio extraterrestri. Come si vede nella Figura 1, la zona della banda radio meno "disturbata" dal rumore di origine cosmico è quella compresa tra 1 e 10 GHz all'interno della quale si predilige l'intervallo di frequenza compreso tra l'emissione dell'idrogeno neutro (H) e dell'ossidrile (OH) (fra 1,4 e 1,6 GHz). Questa scelta si basa sull'ipotesi secondo cui se una civiltà extraterrestre volesse deliberatamente farsi notare, potrebbe decidere di trasmettere un segnale monocromatico nelle vicinanze di queste frequenze, probabilmente molto "studiate" da radioastronomi di altri mondi, data l'importanza e l'abbondanza di tali elementi nell'universo.

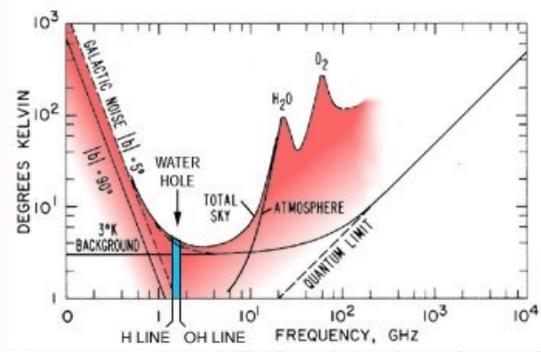


Figura 1. Parte della banda radio adatta alla ricerca per il basso rumore di fondo

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

Premessa

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Si può intuire che la tecnologia attuale non permette una ricerca estesa a tutta la Via Lattea (100.000 anni luce di diametro) e tanto meno a tutto l'universo. Enormi problemi e limitazioni tecnologiche rendono al momento possibile un'indagine in uno spazio molto limitato. Un'ipotetica civiltà extraterrestre ad appena 100 anni luce (Figura 2) che decidesse di inviare un segnale radio in tutte le direzioni per fare notare la propria presenza, dovrebbe impiegare trasmettitori con potenze di circa 66.000.000.000 watt (66 GW) per rendere possibile la ricezione sul nostro pianeta ascoltando con la più grande antenna (radiotelescopio di Arecibo) collegata ad apparecchiature molto sofisticate. Se la stessa civiltà fosse a conoscenza della nostra presenza, cosa estremamente improbabile, potrebbe puntare un'antenna parabolica di 300 m di diametro verso la Terra ed inviare un segnale di appena 3.300 watt per essere rivelato nelle stesse condizioni del caso precedente.

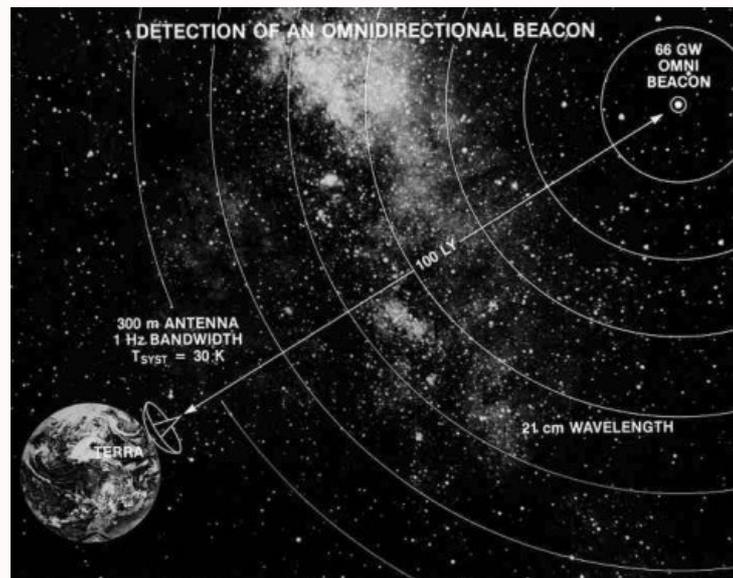


Figura 2. Scenario relativo alla ricezione di un segnale emesso da una antenna omnidirezionale da un pianeta X a 100 anni luce

A livello internazionale si parla già di radiotelescopi della prossima generazione, equipaggiati con superfici collettrici

di circa 1 km quadrato, denominati SKA (*Square Kilometer Array*), per cui i limiti sopra riportati potrebbero essere completamente stravolti entro i prossimi dieci anni.

A questo punto viene spontanea una domanda: ma che tipo di segnale o di informazione si intende cercare? Dopo varie considerazioni, legate prevalentemente ad aspetti tecnologici, si è deciso di cercare un segnale di tipo monocromatico in un primo tempo e pulsato successivamente. Quest'ultimo, a differenza del monocromatico, contiene maggiore informazione, ma è più difficile da rivelare. Un segnale monocromatico presenta una concentrazione di energia su una sola frequenza, mentre quello ad impulsi presenta una concentrazione di energia nel tempo. È per questa ragione che, momentaneamente, il SETI (ed in particolare il SETI-Italia) ricerca un segnale radio monocromatico cioè quella che in gergo si chiama portante radio. È molto efficiente per chi lo trasmette (tutta la potenza disponibile si concentra sulla sola portante radio) ed è facilmente riconoscibile da parte di chi lo riceve. Non esistendo segnali monocromatici in natura, è semplice da distinguere dai segnali a larga banda di origine naturale che quotidianamente vengono ricevuti ed elaborati dai radiotelescopi. Un eventuale segnale alieno modulato (portante + informazione), tipo quelli che siamo abituati a ricevere dai trasmettitori "terrestri", non sarebbe di grande utilità per l'estrema complessità del processo di estrazione dell'informazione contenuta. Si pensi già alle difficoltà a cui andremmo incontro nel tentare di estrarre informazioni da una trasmissione di "radio Pechino" nel caso non si conoscesse il cinese. Immaginiamoci quali potrebbero essere i problemi che dovremmo affrontare nel processo di decodifica di un messaggio alieno di cui non si conosce né il tipo di modulazione né tanto meno il relativo codice informativo! Allo stato attuale il SETI si propone di ricercare una portante radio affetta da spostamento doppler introdotto dalla componente radiale del movimento relativo dei pianeti (Terra - pianeta X). Questa particolarità ci farebbe capire che il segnale monocromatico ricevuto arriva dallo spazio, inviato, intenzionalmente o no, da un'eventuale civiltà extraterrestre in possesso di una opportuna tecnologia "radio".

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

Premessa

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Per tentare di dare una risposta plausibile a questa importante domanda, usiamo la formula di Drake (Frank Drake è uno dei padri fondatori del SETI). Questa ci dà una buona stima circa l'ipotetico numero di civiltà potenzialmente rilevabili:

$$N = R \cdot F_p \cdot N_e \cdot F_l \cdot F_i \cdot F_c \cdot L$$

Dove:

N = numero di civiltà nella Via Lattea le cui emissioni radio sono potenzialmente rilevabili;

R = velocità di formazione di stelle (numero di stelle per anno) "adatte", tipo il Sole, all'interno della Via Lattea;

F_p = frazione di queste stelle che presentano sistemi planetari;

N_e = numero di pianeti per sistema con ambiente adatto alla vita;

F_l = frazione di pianeti in cui la vita si evolve;

F_i = frazione di pianeti in cui si evolve vita "intelligente";

F_c = frazione del numero di civiltà che sviluppano una tecnologia in grado di lasciare un segno della loro presenza nello spazio (ad esempio onde radio);

L = periodo di tempo in cui questa civiltà rilascia nello spazio evidenze della sua presenza come, ad esempio, onde radio.

Se, per puro esercizio, assegniamo ai fattori appena descritti valori plausibili:

$$R = 30$$

$$F_p = 20\%$$

$$N_e = 1$$

$$F_l = 10\%$$

$$F_i = 20\%$$

$$F_c = 10\%$$

$$L = 1000 \text{ anni}$$

si ottiene una stima del numero N di ipotetiche civiltà presenti nella nostra galassia, in grado di "farsi sentire", pari a 12.

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

Premessa

Attraverso quale finestra dello spettro elettromagnetico è più vantaggioso osservare?

Fino a che distanza l'attuale tecnologia permette di indagare e che segnale si cerca?

Quante civiltà potrebbero esistere all'interno della Via Lattea?

Come si osserva e cosa si sta facendo nel nostro paese?

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Nell'ambito di osservazioni SETI si dovrebbe puntare l'antenna del radiotelescopio nella giusta direzione e con la dovuta precisione onde evitare di raccogliere segnali provenienti da altre direzioni. Una volta puntato correttamente (e questo rappresenta già un grande ostacolo visto che non si sa dove possano essere queste ipotetiche civiltà), si presenta la necessità di sintonizzare il radiotelescopio sulla frequenza corretta, corrispondente cioè a quella dell'eventuale trasmettitore alieno. Non lo possiamo assolutamente sapere anche se, come visto in precedenza, vi possono essere ipotesi di lavoro che portano a considerare la banda 21 - 18 cm (1,4 - 1,6 GHz) come molto probabile. Noi da Terra ci comporteremmo in questo modo nel caso volessimo fare notare la nostra presenza! Non sapendo quindi a che frequenza sintonizzarci, dove puntare le antenne ed in quale momento osservare, non sarebbe plausibile chiedere "tempo antenna" per effettuare osservazioni di cui non si conoscono le modalità operative. L'approccio migliore al programma (soprattutto per il basso costo) è quello basato sulle osservazioni SETI effettuate in parallelo (*piggy back*) alle normali osservazioni in corso alla antenna parabolica VLBI (Figura 3). Una frazione del segnale radio viene inviata al sistema *Serendip IV* che, con i suoi 15 MHz di banda di ingresso e 24.000.000 di canali, cerca, nelle condizioni di puntamento e frequenza operativa in cui sta lavorando l'antenna, la presenza di un segnale di chiara origine extraterrestre. Tale analisi di spettro fornisce, di fatto, anche informazioni fondamentali circa la situazione interferenze radio (a banda stretta); queste costituiscono un problema sempre più pressante per i radiotelescopi (come l'inquinamento luminoso lo è per i telescopi ottici) e gettano ombre sul futuro della radioastronomia (Figure 4 e 5). L'opportunità di usare il sistema *Serendip IV* in compiti di monitoraggio continuo delle interferenze radio è di notevole importanza per le operazioni di controllo delle stesse e rende ancora più interessante ed utile l'esecuzione di osservazioni SETI in parallelo alle normali operazioni dell'antenna VLBI.



Figura 3. Schema a blocchi della configurazione del sistema Serendip IV

Le attività SETI, con il sistema *Serendip IV*, sono iniziate nella primavera del 1998 e non hanno portato finora a nessun risultato. Si sono registrati solo sospetti (che non sono mai stati confermati) e interferenze radio terrestri di varia origine e tipologia. La probabilità di captare segnali alieni è comunque molto bassa e anche se nei prossimi 20 anni non avremo ricevuto nulla, varrà comunque la pena continuare le ricerche adottando modalità osservative nuove, perché potremmo avere osservato in modo sbagliato, nei punti sbagliati e nei momenti sbagliati.

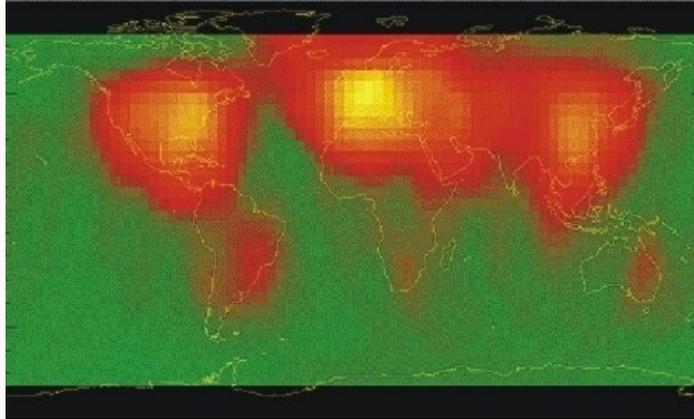


Figura 4. Situazione inquinamento radio (satellite FORTE)



Figura 5. La situazione dell'inquinamento luminoso in Europa

La nostra convinzione ci spinge a cercare in tutti gli angoli della nostra galassia in cui l'attuale tecnologia ci permette di arrivare, tenendo sempre presente il motto di Frank Drake: "la mancanza dell'evidenza non significa l'evidenza della mancanza".

Sviluppi Futuri

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Sviluppi futuri

Premessa

**Attraverso quale
finestra dello
spettro
elettromagnetico è
più vantaggioso
osservare?**

**Fino a che distanza
l'attuale tecnologia
permette di
indagare e che
segnale si cerca?**

**Quante civiltà
potrebbero esistere
all'interno della Via
Lattea?**

**Come si osserva e
cosa si sta facendo
nel nostro paese?**

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Il programma SETI nel nostro paese è a "fondi zero", almeno fino al momento della stesura di questo articolo. Si guarda con grande fiducia alla Bioastronomia che, sotto la direzione di Cristiano Batalli Cosmovici, sembra decollare definitivamente anche da noi. Questo significherà avere, finalmente, finanziamenti dedicati a questa importante ed affascinante ricerca che permetteranno la progettazione di acquisizioni dati velocissime con post analisi in tempo reale. Questi nuovi *back ends* renderanno possibile l'implementazione di nuovi algoritmi più efficienti della ben nota *Fast Fourier Transform* usata fino ad ora, tipo le trasformate KLT (*Karhunen / Loève Transform*) ed analisi *Wavelet*. Nell'ottica di mantenere bassi i costi del programma, quello che si intende fare ora (oltre alle osservazioni in parallelo tipo *Serendip IV*) è di seguire le orme del *SETI@Home* americano che distribuisce via Internet i dati acquisiti ad Arecibo a milioni di utenti volontari che, in tutto il mondo, mettono a disposizione il proprio Personal Computer per la post elaborazione dei dati. Milioni di PC che lavorano insieme sintetizzano un grande elaboratore virtuale che, oltre a coinvolgere il singolo in questa affascinante ricerca, ha un costo che è quasi inesistente! Con il permesso dei responsabili del *SETI@Home* noi vorremmo acquisire dati durante le normali attività osservative dei nostri radiotelescopi e distribuirli per la post elaborazione a volontari. I dati acquisiti dai radiotelescopi di Medicina in futuro saranno a disposizione di tutti i collaboratori tramite un server installato presso l'associazione culturale CRIACESIA di Milano. Chi vorrà collaborare con la ricerca italiana di civiltà extraterrestri mettendo a disposizione il proprio PC, potrà scaricare ed elaborare i nostri dati attraverso questo server che costituirà la nostra "porta" verso il mondo dei collaboratori esterni.

Conclusioni

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Conclusioni

Premessa

**Attraverso quale
finestra dello
spettro
elettromagnetico è
più vantaggioso
osservare?**

**Fino a che distanza
l'attuale tecnologia
permette di
indagare e che
segnale si cerca?**

**Quante civiltà
potrebbero esistere
all'interno della Via
Lattea?**

**Come si osserva e
cosa si sta facendo
nel nostro paese?**

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Il programma SETI è una grande sfida che l'uomo, per la propria indole, non ha potuto non cogliere. E sono proprio queste curiosità e smania di conoscere che lo hanno accompagnato dalle caverne fino ai giorni nostri. L'importanza e la portata di questa ricerca sono tali da superare quello che è il puro aspetto scientifico. Sarebbero infatti enormi le implicazioni filosofiche, teologiche, sociologiche e psicologiche che subentrerebbero in caso di conferma di esistenza di altri esseri intelligenti. Scoprire di essere in compagnia in questo immenso universo ci farebbe sentire anche meno soli e con meno timore del grande vuoto che ci circonda e forse, a questo punto, a noi basterebbe solo avere questa certezza.

D'altronde sarebbe estremamente difficile, se non impossibile, mettersi in contatto, sia per le insormontabili distanze che per le enormi diversità che sicuramente ci sarebbero tra noi e "loro". Nell'improbabile caso in cui il contatto fosse possibile, si dovrebbe prendere in esame l'insegnamento che ci deriva dalla storia, quando il contatto tra civiltà molto diverse tra loro ha portato alla quasi cancellazione di quella più "debole".

SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

**Stelio Montebugnoli, Cristiano Batalli
Cosmovici, Alessandro Cattani,
Nicolò D'Amico, Andrea Maccaferri, Giuseppe
Maccaferri, Claudio Maccone, Jader Monari,
Sergio Mariotti, Alessandro Scalambra**

Lecture e internet

Premessa

Attraverso quale
finestra dello
spettro
elettromagnetico è
più vantaggioso
osservare?

Fino a che distanza
l'attuale tecnologia
permette di
indagare e che
segnale si cerca?

Quante civiltà
potrebbero esistere
all'interno della Via
Lattea?

Come si osserva e
cosa si sta facendo
nel nostro paese?

Sviluppi Futuri

Conclusioni

Lecture

*C. Batalli Cosmovici , S. Bowyer, D.Werthimer,
*Astronomical and biochemical origins and the search for life
in the universe*, Editrice Compositori, Bologna, 1991;

F. Falcinelli, *Sussurri dal cosmo*, Società Editoriale Felsinea,
Bologna, 1999;

G. Bianciardi, *La vita oltre la terra* , Edizioni CUEN, Napoli
1998;

J. Heidmann, *Extra-terrestri*, Piemme, Torino, 1996.

*I volumi contrassegnati dall' asterisco costituiscono lecture
di approfondimento*

L'Universo e l'origine della vita

Gli autori

Battistini

Pierluigi Battistini

Pierluigi Battistini è docente di Laboratorio di Astronomia presso l'Università di Bologna. La sua attività di ricerca è stata rivolta allo studio delle stelle e degli ammassi globulari ed attualmente si occupa di informatica applicata all'astronomia.

Bedogni

Bonfitto

Bonòli

Roberto Bedogni

Roberto Bedogni, astronomo presso l'Osservatorio Astronomico di Bologna, studia l'evoluzione delle stelle nelle fasi finali della loro vita mediante lo sviluppo di modelli numerici. La sua attività si rivolge anche alla divulgazione dell'astronomia nelle scuole medie superiori realizzando ipertesti didattici.

Bottoni

Cappi

Delli Santi

Facchini

Marano

Antonio Bonfitto

Antonio Bonfitto, laureato in Scienze Naturali, è stato Conservatore del Museo di Zoologia di Bologna. Attualmente lavora presso il Dipartimento di Biologia evolutiva sperimentale. Si occupa di sistematica dei molluschi marini, di museologia e di divulgazione scientifico-naturalistica. Ha partecipato, come docente, a vari corsi di aggiornamento promossi dall'I.R.R.S.A.E. regionale e collabora con l'Università della Terza Età "Primo Levi".

Montebugnoli

Fabrizio Bonòli

Fabrizio Bonòli insegna Storia dell'Astronomia all'Università di Bologna ed è responsabile del Museo della Specola. È Vice Presidente della Società Astronomica Italiana e Direttore del *Giornale di Astronomia* (edizione italiana ed araba). Si è occupato di ricerche in astrofisica per molti anni ed attualmente la sua attività è dedicata alla storia dell'astronomia.

Andrea Bottoni

Andrea Bottoni è professore associato di Chimica Organica presso l'Università di Bologna. I suoi temi di ricerca riguardano l'applicazione di metodi di calcolo di tipo quantomeccanico allo studio di problemi di struttura e reattività di molecole organiche e bio-organiche.

Alberto Cappi

Alberto Cappi ha conseguito il dottorato di ricerca in astrofisica all'Università di Parigi XI ed è astronomo presso

l'Osservatorio Astronomico di Bologna. La sua attività di ricerca riguarda principalmente lo studio degli ammassi di galassie e della struttura su grande scala dell'universo.

Francesco Saverio Delli Santi

Francesco Saverio Delli Santi è docente di Astronomia nel Corso di Laurea di Scienze Naturali presso l'Università di Bologna e presso la Scuola di Specializzazione per l'insegnamento secondario della stessa Università. Si è occupato nel passato di ricerche nel campo della radioastronomia solare e di oggetti ad emissione radio pulsata. Attualmente è impegnato in ricerche nel campo della didattica dell'Astronomia nella scuola secondaria.

Fiorenzo Facchini

Fiorenzo Facchini, Ordinario di Antropologia nella Università di Bologna. È autore di numerose pubblicazioni, fra cui vari volumi in tema della evoluzione umana. Si occupa inoltre di ricerche di paleobiologia e su popolazioni dell'Asia Centrale, specialmente in alta quota.

Bruno Marano

Bruno Marano è Ordinario di Astronomia presso l'Università di Bologna e Direttore dell'Osservatorio Astronomico e del Dipartimento di Astronomia. Si occupa dello studio di quasar e galassie.

Stelio Montebugnoli

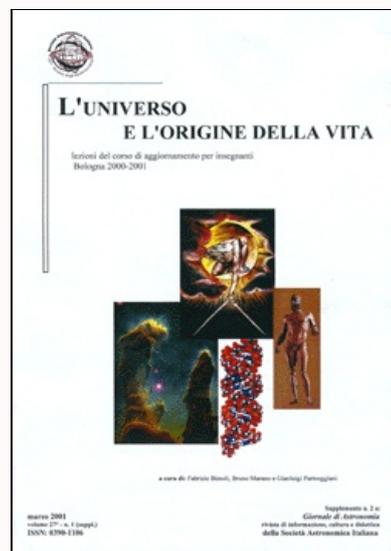
Stelio Montebugnoli è Ingegnere Elettronico e dirigente tecnologo dal 1995, è responsabile della stazione Radioastronomica di Medicina di cui si occupa della gestione e sviluppo tecnologico. Si occupa anche della progettazioni di nuovi analizzatori di spettro ed è responsabile del progetto Seti-Italia.

L'Universo e l'origine della vita

Il libro

I Contributi

"L'Universo e l'origine della vita" raccoglie le lezioni del corso di aggiornamento per insegnanti tenutosi a Bologna nel 2001 ed organizzato dalla Facoltà di Scienze dell'Università di Bologna, dall'Osservatorio Astronomico e dal Dipartimento di Astronomia



Il volume, a cura di Fabrizio Bònoli, Bruno Marano e Gianluigi Parmeggiani, contiene i seguenti contributi:

- B. Marano
Presentazione
- F. Bònoli
I miti delle origini
- A. Cappi
Il Big Bang
- F. Saverio delli Santi
Le molecole organiche nella materia interstellare
- R. Bedogni
Dinamica e Formazione del Sistema Solare
- P. Battistini
I Pianeti e la Vita
- A. Bottoni
Le Molecole della Vita
- A. Bonfitto
Prime tappe dell'evoluzione dei viventi
- A. Bonfitto
Evoluzione Biologica dei Viventi
- F. Facchini
L'evoluzione umana. Dati, problemi, interpretazioni
- R. Bedogni
I pianeti extrasolari
- S. Montebugnoli et Al.
SETI - Italia: ricerca di intelligenze extraterrestri

Letture consigliate