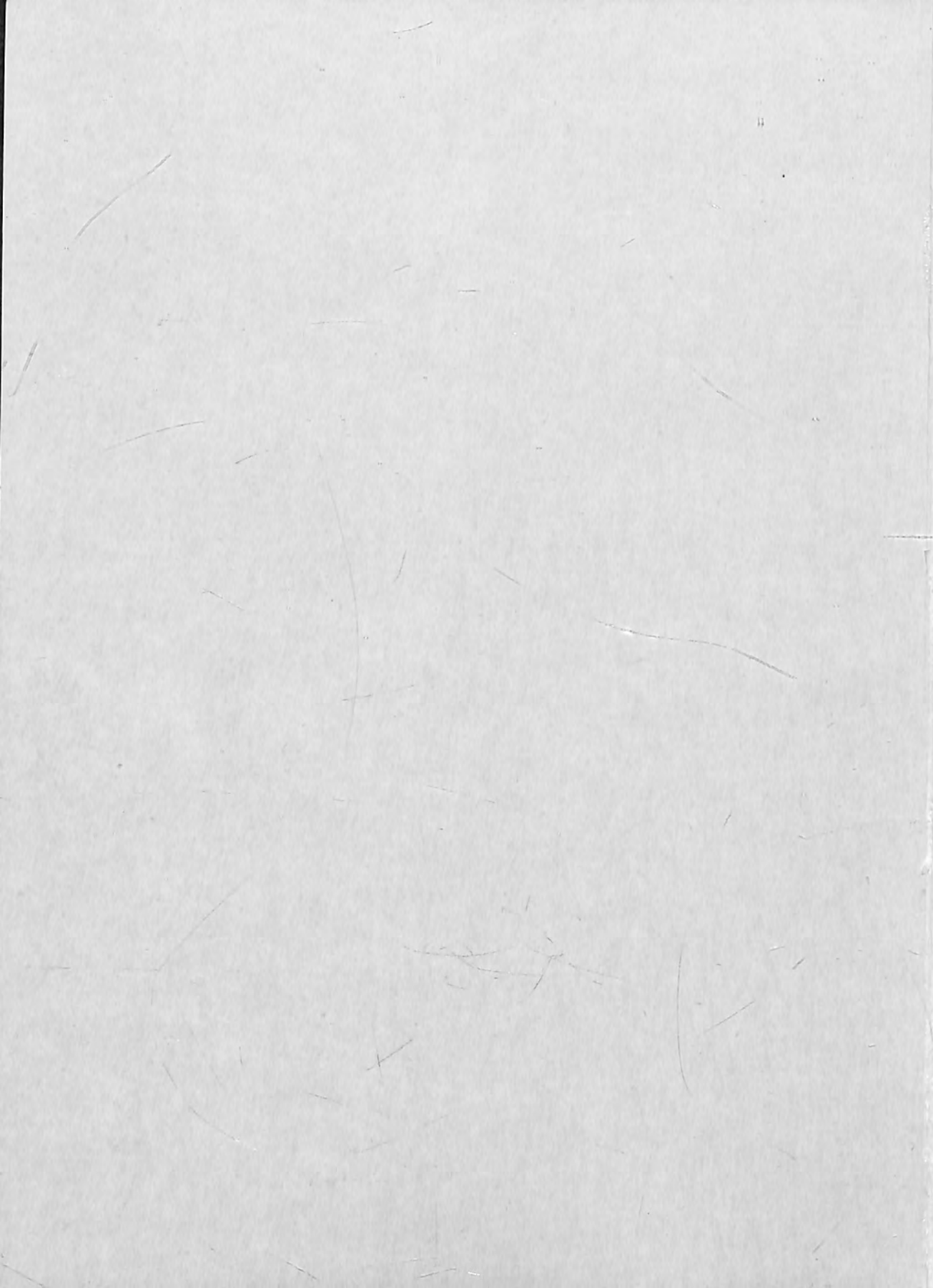


ACCADEMIA NAZIONALE VIRGILIANA

GRANDI MODELLI SCIENTIFICI DEL NOVECENTO



Mantova - Dicembre 1990



ACCADEMIA NAZIONALE VIRGILIANA
DI SCIENZE LETTERE ED ARTI

ATTI E MEMORIE

Serie speciale della Classe di Scienze Matematiche fisiche e Naturali

N. 4

Grandi modelli scientifici del Novecento

Sette lezioni degli eminenti scienziati italiani:
Bruno Bertotti, Carlo Castagnoli, Arturo Falaschi, Piero Galeotti,
Raoul Gatto, Arnaldo Longhetto e Carlo Rubbia
svolte in Accademia nel periodo 1988-90



Mantova - Dicembre 1990

PRESENTAZIONE

In questo volume di memorie della Classe di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali, sono raccolte alcune delle relazioni svolte da illustri e noti docenti che hanno partecipato alle giornate dedicate dall'Accademia alle Scienze negli ultimi tre anni durante la prima estate.

Il lettore interessato potrà così apprendere notizie puntuali e aggiornate su alcuni dei modelli scientifici preminenti indicati dai risultati delle ricerche: quello della unificazione delle forze fondamentali, dell'origine dell'universo, del codice genetico.

Ai relatori professori, Bruno Bertotti, Carlo Castagnoli, Piero Galeotti, Raoul Gatto, Arturo Falaschi, Arnaldo Longhetto e al Premio Nobel Carlo Rubbia, l'Accademia esprime anche attraverso queste mie righe i più vivi sentimenti di gratitudine per avere Essi permesso la stampa di questo volume sulle Scienze.

A queste pagine l'augurio di essere attentamente lette e meditate.

Il Presidente
dell'Accademia Nazionale Virgiliana
Prof. EROS BENEDINI

BRUNO BERTOTTI

L'ORIGINE DELL'UNIVERSO

*Dipartimento di Fisica Nucleare e Teorica
Università di Pavia*

I temi principali della moderna cosmologia scientifica vengono passati in breve rassegna a livello qualitativo e senza un apparato matematico. Essi si basano su due classi di osservazioni astronomiche, l'espansione universale delle galassie e la radiazione cosmologica di fondo. Si può così ricostruire, nell'ambito di un preciso modello teorico, la «storia» dell'Universo a partire dalla sua origine, avvenuta circa 10 miliardi di anni fa. Un recente sviluppo della cosmologia — la teoria dell'«inflazione» — ha permesso di fare un'ipotesi, riguardante le primissime fasi del cosmo, che risolverebbe due difficoltà della cosmologia tradizionale; di questa teoria si dà qui una spiegazione qualitativa ed intuitiva.

Questo articolo usa concetti di fisica e passaggi logici non banali; esso richiede per la sua comprensione una buona conoscenza della fisica a livello istituzionale.

1. L'UNIVERSO IN ESPANSIONE.

Tradizionalmente la Cosmologia, intesa nel suo significato più ampio di concezione del mondo, abbracciava tutte le discipline astronomiche, in particolare le teorie circa la natura e l'origine del sistema solare. Il significato corrente del termine, tuttavia, è più ristretto ed è legato a due scoperte fondamentali, l'espansione dell'Universo e la radiazione di fondo, che hanno inaspettatamente messo in evidenza una struttura ordinata, cioè non caotica, del Cosmo. L'Universo come peculiare oggetto di indagine, dotato della sua unità e delle sue «leggi», è così diventato l'argomento di una nuova disciplina astronomica, la Cosmologia scientifica, che negli ultimi anni ha avuto un'impressionante sviluppo sia sperimentale che teorico.

Prima della scoperta della radiazione di fondo, per la Cosmologia gli unici elementi costitutivi dell'Universo erano le galassie, ag-

gregazioni assai variabili in forma e dimensione di stelle, polvere e gas, la cui massa è decine, o anche centinaia di miliardi di volte quella del sole. Oltre alle galassie ordinarie, i radiotelescopi hanno permesso l'identificazione delle radiogalassie e degli Oggetti Quasi Stellari (QSO), potentissime sorgenti di radiazione che probabilmente traggono la loro energia dalla caduta di materia in un gigantesco buco nero nel loro nucleo. La loro grandissima distanza, anche paragonabile alle dimensioni dell'Universo, ne fa sonde preziose per la struttura del cosmo.

La legge di Hubble, messa in evidenza sperimentale nel 1929, asserisce che le galassie si allontanano le une dalle altre con una velocità proporzionale alla loro distanza; il corrispondente coefficiente di proporzionalità, indicato con H , ha le dimensioni del reciproco di un tempo; per gli oggetti più lontani tale velocità è paragonabile a quella stessa della luce. La grandezza $1/H$, rapporto tra la distanza di due galassie e la loro velocità di allontanamento, dà una misura del tempo al quale, nel passato, esse erano sovrapposte; poiché, per la legge di Hubble, tale rapporto è lo stesso per ogni coppia di galassie, esso indica un'epoca — appunto anteriore di $1/H$ al presente — nella quale tutto l'Universo si trovava in una fase primordiale di grande densità ed elevata temperatura («big bang»). Nonostante un notevole e poco conosciuto precedente letterario (il saggio «Eureka» del 1848 di E. A. Poe), l'idea dell'espansione universale fu correntemente accettata negli ambienti scientifici solo negli anni 30, quando, ad opera di Einstein e di Sitter, essa venne inquadrata e giustificata nella teoria della relatività generale. È interessante notare che già negli anni 20 era stato proposto (da Friedman e Lemaitre) un modello relativistico dell'Universo in espansione; ma esso fu ignorato o accolto con scetticismo.

2. IL MODELLO COSMOLOGICO «COPERNICANO».

Fu così elaborato un preciso modello (il modello di Robertson e Walker), ancor oggi strumento principe di indagine, basato sul *Principio cosmologico*, secondo cui la densità e le altre proprietà dell'Universo ad un certo istante sono, *in media*, le stesse in tutti i posti e in tutte le direzioni di osservazione (omogeneità ed isotropia). In questa maniera viene soddisfatto l'ideale copernicano, secondo cui il posto che il genere umano occupa nel Cosmo non gode

di alcun privilegio o distinzione. L'Universo «medio» è così descritto mediante una precisa struttura dello spazio-tempo, individuata da una sola funzione del tempo t , la costante di Hubble $H(t)$.

Trascurando le disomogeneità locali, nel modello si suppone che la materia (il «substrato») sia uniformemente distribuita ed animata da un moto di espansione, simile a quello di una membrana stirata uniformemente; il moto delle galassie osservate è la sovrapposizione delle loro velocità accidentali e del moto del substrato; quest'ultimo prevale a grandi distanze. Come si può intuitivamente comprendere col modello della membrana, l'espansione, in accordo con il principio cosmologico «copernicano», non ne privilegia alcun punto: per ogni osservatore gli altri punti del substrato si allontanano con la stessa legge, cioè con una velocità proporzionale alla distanza.

Il modello di Robertson e Walker prevede due alternative, corrispondenti ad una densità media di materia rispettivamente inferiore o superiore ad un certo valore critico, determinato dalla costante di Hubble: un Universo infinito ed illimitato (come lo spazio tridimensionale ordinario); ed un Universo senza confini, ma finito, individuato dal suo «raggio» $R(t)$. In un mondo con solo due dimensioni spaziali (ad esempio, lunghezza e larghezza), quest'ultimo corrisponde ad una superficie sferica di raggio R ; in tre dimensioni esso ha una rappresentazione matematica precisa, ma non intuitiva («ipersfera»). La scelta tra queste due alternative, a tutt'oggi (1990) un importante problema aperto, può essere fatta studiando la discrepanza dell'espansione universale dalla legge di Hubble per le galassie più lontane. Difatti la dipendenza lineare della velocità dalla distanza, in realtà, vale solo per velocità piccole rispetto a quella della luce; per velocità (e distanze) più grandi essa ha anche un termine quadratico, che dipende dal modello e discrimina tra le due alternative.

La dinamica dell'Universo è simile a quella di un grave lanciato dalla terra verso l'alto. Il suo moto, che conserva l'energia totale, si può descrivere come una trasformazione continua di energia tra la forma cinetica, determinata dalla velocità e la forma potenziale, determinata dall'attrazione gravitazionale. Il lancio può avere due tipi di esiti: se l'energia cinetica iniziale è sufficiente (come nel caso di un razzo per il lancio di satelliti dalla terra) il grave sfugge alla gravità e si perde nello spazio esterno; altrimenti esso, dopo aver

raggiunto un'altezza massima, ritorna al suolo. In ambedue i casi la fase di salita, corrispondente all'espansione, è decelerata. Nel modello di Robertson e Walker la distanza R del grave dal centro della terra corrisponde alla distanza tra due punti del substrato (o al suo raggio nel caso finito); si tenga però presente che per l'Universo l'energia potenziale gravitazionale è, in assoluto, arbitrariamente grande, come accadrebbe se si lanciasse un grave da una terra di massa fissata, ma arbitrariamente piccola. Si dimostra che la dicotomia geometrica accennata corrisponde alla dicotomia dinamica: in altre parole, l'Universo infinito si espande indefinitamente nel futuro, corrispondentemente al lancio di un grave lontano dalla terra; invece l'Universo finito ritorna a collassare dopo aver raggiunto la sua dimensione massima, proprio come un grave, se lanciato troppo lentamente, ritorna al suolo.

3. LA RADIAZIONE DI FONDO.

L'ipotesi dell'origine esplosiva dell'universo ha avuto una straordinaria conferma nel 1965 quando fu messa in evidenza da Penzias e Wilson la «radiazione cosmologica di fondo». La terra è inondata da un debole flusso di microonde, con lunghezza d'onda attorno al millimetro, la cui intensità è praticamente la stessa in tutte le direzioni. Questa straordinaria uniformità rende assai difficile interpretarlo come dovuto a sorgenti distinte; inoltre il suo spettro corrisponde a quello di un corpo, per così dire, «caldo», alla temperatura di 2.7 gradi Kelvin al di sopra dello zero assoluto. Essa viene correntemente interpretata come il residuo raffreddato dell'esplosione iniziale. In base al modello di Robertson e Walker si può dimostrare che la temperatura di una radiazione diffusa è inversamente proporzionale al «raggio» R dell'Universo e nel lontano passato coincideva con la temperatura dell'Universo stesso; è allora possibile mettere in relazione geometria e temperatura, e ricostruire così la storia termica del Cosmo fino dalle sue origini. La radiazione di fondo si è propagata indisturbata sino a noi nello spazio intergalattico, già estremamente rarefatto, a partire dall'epoca — detta del *disaccoppiamento* — in cui essa ha subito le ultime interazioni con la materia, quando le dimensioni dell'Universo erano circa 1500 volte più piccole di quelle attuali. Ciò è avvenuto quando, per effetto del progressivo raffreddamento, gli elettroni ed i nuclei

presenti si sono riuniti a formare atomi (epoca della *ricombinazione*). La radiazione di fondo quindi ci fornisce preziose informazioni circa lo stato in cui l'Universo allora si trovava, circa 300.000 anni dopo l'origine. Si noti la piccolezza di questo tempo rispetto all'età presente di 10 miliardi di anni. È importante notare che la portata delle osservazioni astronomiche dirette di sorgenti singole, sia nella banda ottica che in quella radio, è assai minore; difatti esse si spingono in genere solo ad un'epoca in cui le dimensioni dell'Universo erano assai vicine a quelle attuali, fatta eccezione per gli Oggetti Quasi Stellari, per i quali si può arrivare a un «raggio» più piccolo del presente per un fattore due o tre. In particolare, l'indipendenza dalla radiazione di fondo dalla direzione ci permette di concludere che all'epoca del disaccoppiamento l'Universo era estremamente omogeneo.

Ciò è in netto contrasto con il suo stato presente, nel quale la materia osservata è ben lungi dall'essere distribuita in maniera uniforme ed è raggruppata in aggregazioni a diversi livelli, quali le galassie, gli ammassi di galassie, gli ammassi di ammassi, e presenta strutture peculiari quali immensi vuoti e filamenti. I processi fisici che hanno condotto a queste complesse aggregazioni di materia (che in seguito hanno reso possibile la formazione in seno alle galassie delle stelle e, in particolare, del sole) sono ancora in parte ignoti. Un meccanismo di condensazione parallelo, quello della formazione delle stelle in seno al gas interstellare nelle galassie, è ben noto e correntemente accettato: quando una nube di gas interstellare è sufficientemente grande e massiva perché la sua attrazione gravitazionale prevalga sulla forza di pressione interna, inizia il collasso, per diventare poi sempre più rapido con l'aumentare della densità. In un Universo in espansione questo processo è invece impedito o grandemente rallentato dall'espansione stessa; pertanto le galassie si possono formare in seno al gas intergalattico solo se esistono in precedenza dei nuclei di condensazione.

La misura dettagliata della radiazione di fondo è un complesso problema sperimentale ancora aperto; a questo scopo è dedicato il satellite COBE («COsmic Background Explorer») della NASA. È necessario per questo scopo portare rivelatori di radiazione nello spazio anche perché è assai importante misurare il suo spettro nella banda infrarossa, nella quale l'atmosfera è quasi opaca. Oltre allo spet-

tro occorre misurare piccolissime variazioni dell'intensità con la direzione a diverse scale angolari.

La radiazione di fondo determina localmente un peculiare e privilegiato sistema di riferimento, ancorato alla struttura dell'Universo a grande scala all'epoca del disaccoppiamento. Se ad un osservatore la radiazione di fondo appare uniforme in tutte le direzioni, non lo è più per un osservatore in moto: per l'effetto Doppler la frequenza dei fotoni ricevuti dipende dalla velocità relativa e quindi il cielo appare «più caldo» nella regione verso cui il moto è diretto e «più freddo» nella regione opposta. Questo sistema di osservatori privilegiati, idealmente così determinati per ogni istante come quelli rispetto ai quali la radiazione di fondo è isotropa, viene identificato con quello individuato nel modello di Robertson e Walker dal moto del «substrato»; pertanto la radiazione di fondo individua sperimentalmente il moto del substrato all'epoca presente e nella regione della nostra galassia. La velocità del sistema solare rispetto al substrato è stata misurata ed è di circa 400 km/sec. A parte questa lieve anisotropia, la cui distribuzione nelle varie direzioni ha peraltro una forma precisa, sinora non sono state misurate disuniformità della radiazione di fondo nelle varie direzioni a meno di circa tre parti su 100.000. Parimenti, per quanto riguarda lo spettro, non sono state messe sinora in evidenza discrepanze da quello di equilibrio termico corrispondente all'emissione elettromagnetica di un corpo caldo.

4. LA STORIA TERMICA DELL'UNIVERSO.

Benché non esistano osservazioni dirette relative ad epoche anteriori al disaccoppiamento, è peculiare caratteristica della cosmologia spingere arditamente ed illimitatamente l'indagine indietro nel passato, da un lato usando senza esitazione, fin dove ciò è teoricamente ammesso, il modello teorico di Robertson e Walker e dall'altro mettendo in evidenza connessioni e conseguenze indirette di ipotesi teoriche. Come già accennato, in questo modello un momento qualsiasi dell'evoluzione cosmologica può essere individuato a piacere con una qualsiasi di tre grandezze matematicamente connesse: il tempo t , che ha avuto un inizio circa 10 miliardi di anni fa; le dimensioni dell'Universo, che nel modello finito ipersferico sono individuate dal suo raggio R ; e la temperatura della radiazione di fondo T . Quando ci si approssima all'origine il raggio R tende a

zero e la temperatura T (e con essa la densità di materia) cresce oltre ogni limite.

In questa estrapolazione vengono usate le leggi ordinarie della fisica — almeno fino a dove esse sono note — per stabilire le proprietà dell'Universo ad ogni istante. In linea generale, andando indietro nel passato, il progressivo aumento della temperatura richiede, in corrispondenza a soglie precise, che le aggregazioni e le particelle conosciute siano scomposte in altre più semplici, in maniera simile, per esempio, alla transizione tra solido e gas; viceversa, l'espansione dell'Universo, col progressivo suo raffreddamento, è quindi segnata da periodi di transizione a più complesse e più condensate forme di aggregazione della materia. Per esempio, come già detto, all'epoca del disaccoppiamento tra radiazione di fondo e materia, ebbe luogo la ricombinazione dei protoni e degli elettroni in atomi di idrogeno, il principale costituente delle galassie e delle stelle. Questi processi di condensazione e aggregazione dovettero tuttavia competere con la densità di materia bassa e in continua diminuzione a causa dell'espansione universale; ciò rese più difficile l'incontro e quindi la successiva fusione tra i frammenti, anche se la loro agitazione termica era già sufficientemente bassa da permettere la costituzione di un aggregato stabile.

Prima del disaccoppiamento l'Universo era quindi formato da elettroni, protoni, nuclei di elio (ovvero particelle alfa, formate da due protoni e due neutroni), neutrini e i fotoni del fondo cosmico, tutti alla stessa temperatura di qualche migliaio di gradi; l'elio era presente per circa un quarto della massa totale. Gli altri elementi si sono formati solo assai più tardi, nei processi di nucleosintesi all'interno delle stelle. È interessante notare che già nel 1950 Alpher e Hermann si erano resi conto che la nucleosintesi stellare non è sufficiente per render conto di tutto l'elio osservato e postularono la sua formazione primordiale in una fase ad altissima temperatura dell'Universo. Con questa analisi essi furono anche in grado di predire l'esistenza della radiazione di fondo.

In questo quadro generale si può comprendere la terza grande scoperta della cosmologia moderna, la sintesi primordiale dell'elio. In questo caso, in base alla fisica delle reazioni nucleari, si sa che la soglia caratteristica per la temperatura è di circa un miliardo di gradi, raggiunta a circa 300 secondi dall'origine, quando le dimensioni dell'Universo erano solo tre milionesimi di quelle attuali. A

quell'epoca i barioni (cioè i protoni e i neutroni) primordiali potero-
no formare deuterio (nucleo formato da un protone e un neutrone)
che poi, per successive fusioni, dette luogo all'elio. In base al valore
misurato della costante di Hubble è così possibile calcolare la per-
centuale di elio formato, che risulta in buon accordo con quella ne-
cessaria per spiegare quella effettivamente osservata.

5. COSMOLOGIA E PARTICELLE ELEMENTARI.

Un'altra transizione caratteristica ha avuto luogo alla tempera-
tura di 5 miliardi di gradi (10 secondi dall'origine!); prima di tale
epoca ogni fotone aveva un'energia sufficiente per creare una cop-
pia di elettroni e positroni (conservando pertanto la carica totale,
perché le due particelle hanno carica opposta). Questa transizione
segna la fine della cosiddetta *era leptonica*, in cui assieme ai leptoni
(cioè elettroni e muoni) erano presenti anche le antiparticelle corri-
spondenti, cioè gli antimuoni e i positroni. Andando ancora più
indietro nel tempo verso l'origine, quando la temperatura era 2000
volte maggiore, incontriamo la corrispondente transizione per i
protoni ed i neutroni (la cui massa è, appunto 2000 volte maggiore
di quella elettronica): i fotoni a questa temperatura sono abbastan-
za energetici da poter generare coppie di protoni ed antiprotoni o di
neutroni ed antineutroni. È interessante notare che ad epoche ante-
riori particelle ed antiparticelle sono presenti praticamente in
egual numero; vi è però un piccolo sbilancio consistente nel fatto
che il numero delle particelle è lievemente superiore a quello delle
antiparticelle, necessario per render conto del fatto che le galassie,
nelle concezioni correnti, sono formate di materia e non di antimat-
teria. Non si conosce con precisione l'origine di questa peculiare
asimmetria nella costituzione dell'Universo.

Benché, naturalmente, le connessioni con le osservazioni diven-
tino sempre più vaghe e remote mano a mano che ci si avvicina
all'origine, nulla proibisce di applicare il modello cosmologico
standard anche a tempi arbitrariamente piccoli, purché si possano
presumere valide per l'Universo le leggi della fisica classica, su cui
esso si basa. Ciò certamente non è vero quando l'Universo è così
piccolo da richiedere l'applicazione ai fenomeni gravitazionali del-
le leggi della meccanica quantistica, cioè quando il «raggio»
dell'Universo era dell'ordine di 10^{-33} cm («lunghezza di Planck»), a

a tempi che distano dall'origine per circa 10^{-43} sec («tempo di Planck»). La nostra ignoranza circa le leggi che governano i fenomeni quantistici quando la gravitazione ha in essi una parte importante ci impedisce di andare oltre. Si può facilmente calcolare anche la temperatura a quest'epoca, circa 10^{32} gradi. L'evoluzione dell'Universo dal tempo di Planck all'era leptonica è caratterizzata da interazioni tra particelle elementari ad altissima energia, anche assai superiore a quelle raggiungibili negli acceleratori. Erano presenti particelle postulate teoricamente, ma mai osservate, come i quark, che in triplette costituiscono i barioni; ed ebbero certo luogo processi nuovi, come il decadimento dei barioni stessi.

Assistiamo quindi ad una straordinaria connessione tra due discipline scientifiche a prima vista lontanissime, la fisica delle particelle elementari e la Cosmologia Primordiale. Questa connessione riguarda soprattutto il problema della unificazione tra le forze della fisica, che assilla da molto tempo i fisici. Sappiamo che in natura vi sono quattro forze fondamentali: quella elettromagnetica, quella debole che presiede ai decadimenti radioattivi, l'interazione forte che lega tra di loro i costituenti dei nuclei e, infine, la gravitazione. Sappiamo che le prime due sono in realtà la manifestazione, in condizioni differenti, di un'unica forza, chiamata *elettrodebole*; essa appare come una forza unica solo ad elevate energie, maggiori di 100 GeV. Sarebbe assai interessante scoprire come un unico schema teorico le incorpori tutte e quattro, e molti tentativi sono stati fatti a questo riguardo. Noi sappiamo però che, se tale schema esiste, occorre arrivare ad energie ancor più elevate affinché il loro carattere unitario sia completamente evidente; in particolare, l'unificazione tra l'interazione elettrodebole e quella forte dovrebbe avvenire a energie dell'ordine di 10^{15} GeV, mentre l'interazione gravitazionale entrerebbe in gioco nello schema complessivo all'energia di Planck di 10^{19} GeV, corrispondente alla temperatura sopra indicata di 10^{32} gradi. Ambedue queste soglie energetiche non sono raggiungibili in esperimenti di laboratorio; solo l'Universo primordiale, la cui temperatura corrisponde all'energia di Planck quando la sua età è, appunto, il tempo di Planck, ci permette di avere informazioni indirette e di porre importanti vincoli sul grande programma di unificazione.

6. L'UNIVERSO «GONFIATO».

La cosmologia evolutiva convenzionale di Robertson e Walker lascia insoluti due importanti problemi di principio, quello dell'*orizzonte* e quello delle *condizioni iniziali*; recentemente la teoria dell'*inflazione cosmologica* ha introdotto una interessante modifica del modello standard che potrebbe risolvere ambedue le difficoltà. Benché questa modifica sia lungi dall'essere perfettamente chiarita e correntemente accettata, in questo paragrafo conclusivo tentiamo di spiegare in termini semplici e non matematici la natura dei due paradossi e, utilizzando l'analogia tra l'evoluzione dell'Universo e il lancio di un grave dalla terra nello spazio, come l'«inflazione» risolve brillantemente il secondo.

Come già si è detto, l'Universo si trova oggi, dal punto di vista dinamico, in una situazione marginale rispetto alla dicotomia tra espansione indefinita e collasso finale. Nell'analogia meccanica il grave, ormai lontano dal centro della terra, ha un'energia cinetica e un'energia potenziale (in valore assoluto) dello stesso ordine di grandezza; i due casi corrispondono allora al prevalere della prima o della seconda. In questa situazione anche l'energia totale (che, naturalmente, è costante) è dello stesso ordine dell'energia potenziale (e di quella cinetica). Quando però ci si spinge indietro nel passato e, nell'analogia meccanica, si considerano distanze R dal centro della terra sempre più piccole, il rapporto tra energia totale ed energia potenziale, in valore assoluto, diminuisce rapidamente e lo sbilancio presente tra energia cinetica e potenziale diminuisce rispetto ad ambedue, distruggendo così la situazione di marginalità suddetta. Affinché, a grande distanza dalla terra, le energie in gioco siano in effetti paragonabili, occorre che l'energia totale, e quindi la velocità iniziale sia scelta in maniera estremamente precisa; una scelta generica avrebbe come risultato la sua immediata ricaduta al punto di partenza o la sua fuga nello spazio, ad alta velocità.

Se, in accordo con il programma della Cosmologia Primordiale, supponiamo che il modello classico di Robertson e Walker (e, quindi, anche l'analogia meccanica), sia completamente invalido solo al tempo di Planck, possiamo ricondurre ad un'epoca un po' posteriore all'inizio dell'evoluzione classica (cioè, non quantistica) e il problema della scelta dell'energia dell'espansione. Per esempio, se iniziamo l'espansione classica quando la temperatura dell'Universo

corrisponde a 10^{17} GeV (100 volte più piccola di quella di Planck), l'energia potenziale dell'Universo, che, in valore assoluto e prima del disaccoppiamento, risulta essere proporzionale al quadrato della temperatura, era a quell'epoca circa 10^{55} volte più grande di quella attuale! La precisione richiesta nella «scelta» dell'energia, e quindi della velocità iniziale, deve quindi spingersi sino alla 55^a cifra decimale! Il problema è simile a quello che si presenta a chi si proponesse di lanciare un proiettile sulla superficie della terra dal fondo di un pozzo profondissimo, di cui non si conosce la quota; nella maggior parte dei casi la scelta a caso della velocità di lancio condurrà o ad una immediata ricaduta del grave, o alla fuga del proiettile nello spazio. Naturalmente una scelta accuratissima della velocità iniziale non è incompatibile con le leggi fisiche; ma, dato che il programma finale della Cosmologia consiste nel ricondurre ad una spiegazione razionale ogni aspetto dell'Universo, sarebbe interessante attribuire una condizione iniziale così peculiare a circostanze più generali e, possibilmente, confrontabili con l'esperienza; se ciò non fosse possibile, un sottile disagio persisterebbe ostinatamente.

Il secondo problema, che dal punto di vista epistemologico è simile al primo, deve la sua importanza alla straordinaria uniformità della radiazione di fondo. Anche tale uniformità, naturalmente, può essere attribuita ad opportune condizioni iniziali: si può dire, l'Universo all'epoca del disaccoppiamento aveva una temperatura uniforme semplicemente perché era così all'inizio. Poiché ciò costituisce una grandissima restrizione rispetto alle infinite possibili distribuzioni della temperatura iniziale, molti cosmologi hanno tentato, con qualche successo, di escogitare processi dissipativi che, similmente alla conduzione termica, possano ricondurla dopo un certo tempo alla distribuzione uniforme osservata. Il modello standard di Robertson e Walker, tuttavia, impone, a causa della teoria della relatività, una limitazione fondamentale all'efficacia di ogni processo di questo tipo. Secondo questa teoria, mai contraddetta dall'esperienza, nessuna azione fisica può propagarsi con velocità superiore a quella della luce c ; pertanto un evento fisico può influenzarne altri a distanza r solo dopo il tempo r/c . All'epoca del disaccoppiamento ogni punto P dell'Universo può quindi venire influenzato da eventi che accadessero t secondi prima solo se essi ebbero luogo entro una distanza ct da P ; l'insieme di questi eventi, per ciascun valore del tempo t , si dice *orizzonte* di P a quel momento. È

chiaro allora che ogni processo di uniformizzazione della temperatura è possibile solo se tutti gli orizzonti dei punti P dell'Universo all'epoca del disaccoppiamento hanno una parte in comune quando ci si spinga abbastanza indietro nel passato, verso l'origine; in tal caso il processo richiesto deve aver avuto in questa fase o anteriormente. Poiché l'Universo diventa sempre più piccolo mano a mano che ci si avvicina all'origine, a prima vista sembrerebbe che questa condizione sia banale; ma non è così. Il modello di Robertson e Walker, per un motivo matematico connesso con il fatto che la sua accelerazione è negativa, ha una inaspettata peculiarità: gli orizzonti di due eventi generici (cioè non troppo vicini) all'epoca del disaccoppiamento non hanno alcuna parte comune, per quanto indietro ci si spinga verso l'origine e, pertanto, non esiste un unico processo fisico in grado di determinarli entrambi. Con altre parole, si può dire che all'epoca del disaccoppiamento l'Universo era diventato già così grande che anche un evento fisico accaduto all'origine e propagantesi con la velocità della luce ha la possibilità di influenzarne solo una piccolissima parte. Quindi nel modello convenzionale l'uniformità osservata della radiazione di fondo rimane un fatto razionalmente inspiegabile.

L'ipotesi dell'*inflazione cosmologica* (inflazione è una inadeguata traduzione dell'inglese «inflation», da «inflate», gonfiare) si riferisce ad una ipotetica fase, poco dopo l'inizio, in cui l'Universo avrebbe subito un improvviso rigonfiamento per molti ordini di grandezza, caratterizzato da una temporanea accelerazione, cioè da una velocità di espansione crescente, e non decrescente, come nel modello standard. La risoluzione dei due paradossi avviene perché, secondo questa ipotesi, in un certo intervallo del «raggio» R assai vicino all'origine, il valore assoluto dell'energia potenziale dell'Universo subisce, con l'aumento di R , un rapido e grandissimo aumento. L'analisi del modello meccanico mostra come ciò permette di risolvere brillantemente il secondo paradosso. È sufficiente che tale diminuzione (o aumento in valore assoluto) sia superiore al rapporto critico 10^{55} ; in tal caso si potrà arrivare al corretto rapporto odierno tra energia totale ed energia potenziale (in assoluto), dell'ordine dell'unità. Questa diminuzione trasforma così una richiesta quantitativa di estrema precisione sulla condizione iniziale in una semplice disuguaglianza. È anche interessante notare che, quanto meglio essa è soddisfatta, come ci si potrebbe aspettare in

un caso generico, tanto più la situazione finale d'oggi è vicina al confine tra un sistema legato (grave che ricade) o un sistema libero (grave che esce nello spazio). Questa eventualità, che corrisponde ad un valore ben determinato della densità di massa media, potrebbe essere in effetti verificata sperimentalmente. Se ciò fosse, poiché questo valore della massa è assai più grande della massa luminosa osservata, se ne dedurrebbe che la «massa oscura» (ad esempio, sotto forma di neutrini, buchi neri, onde gravitazionali, ecc.) nell'Universo è prevalente.

Nel modello meccanico si può realizzare astrattamente questo comportamento dell'energia potenziale supponendo che il grave, lanciato dal fondo di un pozzo verso l'alto, una volta al di sopra della superficie terrestre, incontri uno strato di massa negativa. Tale strato non ha effetto ad altezze inferiori, perché il grave risente solo dei gusci di massa interni; pertanto, dovendo risalire un potenziale attrattivo, la sua velocità diminuisce gradualmente. Però, una volta oltrepassatolo, esso incontra un potenziale (negativo) decrescente e viene spinto in fuori dalla «repulsione» gravitazionale. La sua accelerazione è quindi positiva e la distanza R dal centro subisce un rapido e grandissimo aumento, che corrisponde appunto all'inflazione.

L'analisi del primo paradosso — che, naturalmente, non può venire discusso nel modello meccanico, non relativistico — porta alla straordinaria conclusione (messa in rilievo per la prima volta da A. H. Guth nel 1981) che anche esso è risolto da una diminuzione dell'energia potenziale dell'Universo, soggetta alla stessa disegualianza. Ci si può rendere conto qualitativamente di questo riflettendo che è dovuto al fatto che all'inizio, prima del disaccoppiamento, l'Universo era «troppo» grande rispetto alla regione casualmente connessa con ciò che accadde a quell'epoca. Invece, in presenza dell'inflazione, il «raggio» R dell'Universo, il cui valore odierno è fissato, doveva essere stato nel passato, prima dell'espansione inflazionaria, assai più piccolo di quanto preveda il modello standard e, quindi, può essere compreso nel dominio di causalità richiesto.

È assai interessante notare che processi inflazionari di questo tipo e di adeguata intensità trovano una loro realizzazione abbastanza naturale nei processi che in Cosmologia Primordiale si presume abbiano avuto luogo alla separazione tra le varie interazioni

fondamentali. Nella Cosmologia standard la densità di massa-energia diminuisce progressivamente con il raffreddamento e la rarefazione prodotti dall'espansione; è proprio questa diminuzione della densità che produce l'indebolimento dell'interazione gravitazionale e il tendere verso lo zero, da valori negativi, dell'energia potenziale. Nella teoria delle particelle elementari questa diminuzione inaspettatamente incontra un limite assoluto quando ci si avvicina allo stato di *vuoto*; in esso la densità rimane costante nonostante l'espansione, producendo un allontanamento dallo zero dell'energia potenziale verso valori più negativi e, quindi, dando luogo ad una fase di espansione accelerata. Tuttavia le diverse fasi con le quali si sono progressivamente separate le diverse interazioni fondamentali sono caratterizzate da «vuoti» diversi, corrispondenti a diversi stati fondamentali in cui la materia si trova quando la sua energia termica è al minimo. Nella vita quotidiana esempi di tali stati fondamentali sono le diverse forme di aggregazione della materia, quali i gas e i solidi; sappiamo che al diminuire ulteriore della temperatura hanno luogo le *transizioni di fase* verso forme la cui densità di energia è più piccola di quella dello stato fondamentale precedente. Questa differenza corrisponde al *calore latente*, liberato nella transizione. Se anche le interazioni tra particelle elementari hanno simili proprietà, ci si può attendere che, dopo un certo periodo di permanenza dell'Universo nello stato di «vuoto» relativo ad una certa forma di aggregazione, si verifichi una transizione di fase e la densità di energia-materia riprenda il suo comportamento normale, diminuendo con l'espansione e il raffreddamento. A questo punto l'inflazione termina ed anche la velocità di espansione riprende a diminuire.

Questi ultimi sviluppi mettono in evidenza il carattere peculiare e interessantissimo della cosmologia, dal punto di vista epistemologico: la preponderanza degli aspetti teorici nel procedere dell'indagine; il ruolo che hanno ipotesi e congetture, anche assai lontane da confronti sperimentali; l'unicità dell'oggetto fisico allo studio, senza paragone con le altre discipline scientifiche; infine, lo spingersi, ardito ed incondizionato, sempre più vicino all'*origine*, che sembra quasi attrarre magicamente l'immaginazione degli addetti ai lavori. In questa peculiarità sta il fascino, ma anche il pericolo della speculazione cosmologica.

PIERO GALEOTTI

L'ORIGINE DELL'UNIVERSO: TEORIE ED OSSERVAZIONI

*Professore di fisica dello spazio
nell'Istituto di Fisica della Università di Torino*

L'origine dell'universo, o in senso più lato la cosmologia, è un argomento che si può trattare sotto diversi aspetti, privilegiando quello di maggior interesse personale; per esempio discutere la metrica (studio della geometria che ne regola la dinamica), o gli aspetti astronomici (studio dei corpi che lo popolano), o infine la fisica (studio delle particelle e dei processi che vi hanno luogo). A mio parere, e per la mia formazione professionale, quest'ultimo aspetto, che qui cercherò di discutere, è il più completo e interessante, perché permette di ottenere una visione complessiva dell'universo su cui convergono informazioni di diversa natura.

La cosmologia è una disciplina molto antica, nata agli albori della civiltà umana e sviluppatasi nel corso dei secoli, fin da quando persone dotate di un minimo di curiosità (siano esse state fenicie, egizie o greche) hanno volto il loro sguardo al cielo e si sono poste dei dubbi, delle domande, dei problemi sulla natura ed origine di quanto stessero osservando. Se queste persone hanno cercato di dare una risposta alla loro curiosità, ad esse si può far risalire l'origine della cosmologia. È tuttavia indubbio che la cosmologia moderna sia frutto del nostro secolo, di cui anzi ne è uno dei risultati scientifici più notevoli, per merito della formulazione di nuove teorie e dello sviluppo di nuove tecniche sperimentali.

Basti pensare che, ancora all'inizio del nostro secolo, non si ipotizzava neppure l'esistenza di altre galassie, e si riteneva che tutto il visibile, l'intero universo, appartenesse alla nostra Galassia, cioè ad un insieme unico di stelle, popolato in modo più o meno uniforme, di forma non ben definita. Ora sappiamo invece che l'universo è fatto di galassie, e che la nostra non è altro che una delle tante galassie che si possono osservare fino a distanze inimmaginabili qualche decennio fa.

In questo sviluppo delle nostre conoscenze cosmologiche ci sono state delle tappe principali: date significative, sia dal punto di vista teorico che da quello osservativo, si sono avute intorno agli anni 1910-1930. In primo luogo c'è stato tutto il lavoro teorico di Einstein sulla relatività generale, che ha portato alle equazioni di Friedman in base alle quali si interpreta ancora ora l'evoluzione dell'universo. Poi ci sono state le prime misure di Hubble sullo spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle galassie, che si interpretano come un moto sistematico di allontanamento dovuto all'espansione dell'universo.

Naturalmente, quest'ultima non è stata una deduzione immediata (ed infatti altre ne erano state proposte), perché i dati sperimentali indicano solo uno spostamento verso il rosso delle righe spettrali; se però questo spostamento (il ben noto red shift) è dovuto ad effetto Doppler, come si ritiene ormai generalmente, l'espansione dell'universo ne deriva come conseguenza immediata. Questo è il dato sperimentale principale da cui si deve partire per descrivere l'origine dell'universo, la sua dinamica e la sua evoluzione passata e futura.

*

Altri dati sperimentali si ottengono da osservazioni immediate. Basta infatti guardarsi intorno per dedurre che nell'universo c'è materia (di cui anche noi siamo fatti) e radiazione (la luce che ci proviene dal Sole e dalle altre stelle ne è un tipico esempio, anche se esistono sorgenti che emettono prevalentemente onde radio o raggi X). Inoltre, negli anni 60, anche la temperatura media dell'universo è stata misurata: circa 3 gradi assoluti, cioè 270 gradi sotto lo zero centigrado. Come per l'espansione, anche la temperatura dell'universo non è stata misurata direttamente, ma attraverso la distribuzione energetica di una radiazione di fondo, diffusa, non associata a particolari sorgenti celesti ma proveniente da tutte le direzioni. In sostanza, conosciamo ora con buona precisione quanta materia e radiazione siano presenti nell'universo (ne conosciamo, in altri termini, il contenuto energetico, perché materia e radiazione sono due manifestazioni diverse della stessa grandezza fisica, l'energia), ed anche la distribuzione spettrale dell'energia, dalla conoscenza della temperatura di corpo nero.

Siamo quindi in grado di applicare le leggi della fisica all'universo nel suo complesso, considerandolo come un gas composto di galassie ed ammassi di galassie. In particolare, è immediato concludere che, essendo l'universo in espansione, esso deve essere stato più denso nel passato, e quindi più caldo (come ci insegnano le leggi della termodinamica), e sarà più rarefatto e freddo nel futuro. Queste informazioni sperimentali stanno alla base dei nostri tentativi di interpretare l'evoluzione passata e futura dell'universo.

Tuttavia, comprendere e ricostruire la storia dell'universo non è un problema semplice, che riguarda un solo campo ben specifico della fisica, ma è un problema molto complesso, che richiede l'uso di metodologie diverse, tipiche dei diversi rami della fisica. È naturale che si debba far ricorso, in primo luogo, ai metodi astrofisici o astronomici, ma questi non sono sufficienti per interpretare tutti i diversi fenomeni che si sono verificati nel corso dell'evoluzione dell'universo. È invece necessario ricorrere, di volta in volta, ai metodi tipici della fisica atomica, della fisica nucleare, della fisica delle particelle elementari, insieme a considerazioni di relatività generale e di meccanica quantistica. In altre parole, lo studio dell'universo nel suo complesso richiede, come vedremo, di utilizzare i risultati ottenuti dalla fisica moderna nei suoi vari campi di studio.

Partendo dai dati sperimentali a cui mi riferivo prima, cioè che l'universo è in espansione ed ha un ben preciso contenuto di materia e radiazione (dati che definiscono la struttura e la dinamica dell'universo attuale), ed utilizzando le diverse leggi della fisica, è possibile delineare l'evoluzione dell'universo tramite un modello che permette di risalire fino ad un tempo molto remoto nel passato. Questo modello evolutivo di universo, ben noto come il Big Bang, è basato sulle sue proprietà attuali (in particolare relative ad un'età di circa 10^{17} secondi, cioè circa 15 miliardi di anni) e si spinge molto indietro nel tempo, fino a quando l'universo aveva un'età pari ad una frazione estremamente piccola di secondo (circa 10^{-43} secondi), epoca in cui le condizioni fisiche nell'universo erano molto diverse rispetto a quelle che le leggi fisiche sono ora in grado di verificare. Pur mancando l'interpretazione sull'origine, il modello del Big Bang è comunque esteso per un intervallo temporale ampio circa 60 ordini di grandezza, per il quale si possono applicare le nostre conoscenze fisiche attuali.

A causa del processo di raffreddamento dell'universo dovuto alla sua espansione, nel passaggio dalla configurazione iniziale a quella attuale le condizioni fisiche nell'universo sono cambiate più volte in maniera sostanziale. Questo è il motivo per cui, come detto, per ricostruirne la storia si deve ricorrere di volta in volta a metodi tipici dei diversi campi della fisica, metodi che hanno giustificazione e validità nell'ambito di condizioni fisiche diverse, in particolare di temperatura e densità. L'evoluzione passata dell'universo (che però determina quella futura) si studia perciò facendo ricorso, come vedremo, a tutti i risultati dei diversi metodi scientifici disponibili.

Iniziando con i metodi astronomici, il principale risultato ottenuto è che, come accennato, l'universo si espande, ad un ritmo definito dalla legge di Hubble $v = HR$, dove v è la velocità di allontanamento delle galassie ed R la loro distanza da noi. Questa semplice legge dice che la velocità di allontanamento delle galassie è proporzionale alla loro distanza: una galassia posta a distanza doppia di un'altra si allontana a velocità doppia di questa. Il fattore di proporzionalità H , noto come costante di Hubble anche se, in realtà, varia con il tempo cosmologico, stabilisce il ritmo dell'espansione.

*

Semplici considerazioni dimensionali consentono di ottenere un primo risultato importante: poiché la velocità v si misura in km/sec e la distanza R in km, la costante di Hubble H ha le dimensioni dell'inverso di un tempo. In prima approssimazione, supponendo cioè che l'espansione sia avvenuta sempre allo stesso ritmo, si può quindi dedurre l'età dell'universo come l'inverso del valore numerico di H ; si ottiene così un valore di circa 15 miliardi di anni.

Può essere interessante ricordare che la scoperta dell'espansione dell'universo, che risale agli anni 30, poteva essere fatta circa un secolo prima, quando venne formulato il cosiddetto paradosso di Olbers. Riprendendo una considerazione di Halley di ancora un secolo precedente, Olbers si chiese come può il cielo essere buio di notte se esso è popolato da un'infinità di stelle, in quanto, lungo qualsiasi direzione si guardi, si dovrebbe ricevere la luce di una stella. La situazione è analoga a quella di una persona che si trovi in una foresta: lungo qualsiasi direzione essa guardi vedrà il tronco

di un albero se la foresta è sufficientemente grande. Così, anche il cielo notturno dovrebbe essere infinitamente luminoso lungo qualsiasi direzione lo si osservi. Invece il cielo di notte è buio. Cercando di dare una spiegazione a questo paradosso, Olbers formulò alcune ipotesi, tra cui l'esistenza di nubi interstellari che assorbissero la luce delle stelle più lontane. In realtà, le leggi della termodinamica, formulate però in epoche successive, escludono tale possibilità perché le nubi si riscalderebbero con il passare del tempo ed esse stesse diverrebbero luminose, spostando così solo nel tempo il problema del buio della notte.

*

La spiegazione del perché di notte il cielo è buio, che non poteva essere data allora perché non si sapeva che la velocità della luce è finita, è dovuta proprio al fatto che l'universo è in espansione e la luce delle stelle più lontane non riesce a giungere fino a Terra, perché queste stelle si allontanano da noi a velocità confrontabili con la velocità stessa della luce. Inoltre, essendo la velocità della luce costante, deriva anche immediatamente un'altra conseguenza: gli oggetti più lontani sono anche più vecchi. Per esempio, un corpo celeste lontano 10 miliardi di anni luce viene visto da noi come era 10 miliardi di anni fa, il tempo necessario alla luce a percorrere la distanza che lo separa da Terra.

Questi metodi astronomici hanno però anche portato, in passato, a risultati paradossali perché, quando sono state fatte le prime misure sull'allontanamento delle galassie, si è ottenuto un valore della costante di Hubble troppo grande (circa 10 volte maggiore del valore attuale) e di conseguenza un tempo di Hubble troppo piccolo, circa due miliardi di anni, inferiore non solo all'età del sistema solare, ma anche a quella delle rocce terrestri, circa 4,5 miliardi di anni. Ovviamente, l'universo non può essere più giovane dei corpi che lo popolano. A questo paradosso è stata data, nel passato, una risposta non soddisfacente e solo in anni più recenti si sono ottenute misure precise della costante di Hubble che non fanno più sorgere tale discrepanza: era infatti stato compiuto un errore sistematico nella misura delle distanze R , che si rifletteva sul valore della costante di Hubble e quindi sull'età dell'universo. In effetti, la misura delle distanze in astronomia è sempre stato un problema molto

difficile. Comunque, ora, con le recenti misure di distanza, si è ricavato un valore della costante di Hubble tale da comportare per l'universo un'età di circa 15 miliardi di anni, in accordo con l'età dei corpi che lo popolano.

Altri dati astronomici forniscono chiare evidenze che l'universo si sta espandendo. Tra essi, il conteggio delle radiosorgenti (oggetti, soprattutto galassie, che emettono molto più nel dominio radio che in quello ottico) che indica come le radiosorgenti più lontane siano molto più concentrate tra loro di quelle vicine. Ma, essendo lontani, questi oggetti sono anche, come abbiamo visto, più vecchi e quindi se ne deduce che le galassie sono state, nel passato, molto più addensate tra loro di quanto lo siano ora, dopo che l'universo si è espanso.

*

Queste informazioni permettono anche di ricavare la densità di materia visibile nell'universo: basta dividere la massa delle galassie (o meglio degli ammassi di galassie) per il volume da esse occupato e si ottiene immediatamente la densità. Numericamente, il valore che si ottiene è di circa un atomo di idrogeno per metro cubo, un risultato sperimentale che però fa sorgere subito un problema, in quanto è poco inferiore, ma molto simile, alla cosiddetta densità critica, un parametro che definisce la discriminazione tra un modello di universo ed un altro.

Si tratta di un concetto molto importante in cosmologia, che merita una discussione più approfondita. In sostanza, se la densità vera dell'universo è maggiore della densità critica, ciò significa che nell'universo c'è tanta materia, le cui forze gravitazionali reciproche molto intense fanno sì che l'espansione rallenti ad un ritmo elevato, fino ad arrestarsi ed iniziare poi una fase di contrazione gravitazionale. Questo comporta ovviamente che l'universo sia chiuso, in quanto può espandersi solo fino ad un valore massimo. Se invece la densità vera dell'universo è minore della densità critica, ciò significa che nell'universo c'è poca materia e le reciproche forze gravitazionali, poco intense, non riescono ad invertire l'espansione in una contrazione. Questo comporta ovviamente che l'universo sia aperto, in quanto l'espansione prosegue all'infinito. Se, infine, la densità vera dell'universo è uguale alla densità critica, ciò significa che

la quantità di materia presente nell'universo è tale da annullarne l'espansione, però in un tempo infinito: l'universo continuerà ad espandersi per sempre, ma ad un ritmo sempre più piccolo, fino a raggiungere dimensioni infinite in un tempo infinito. Il modello che ne descrive l'evoluzione è in questo caso detto di universo piatto.

Ci sono dunque queste tre possibilità (universo aperto, chiuso o piatto) ed il fatto strano è che, nonostante, siano passati ormai circa 15 miliardi di anni da quando l'universo ebbe origine, non ci sia ancora la possibilità di discriminare quella vera tra esse. Come detto, ciò è conseguenza del fatto che la densità di materia visibile nell'universo è poco inferiore, ma molto vicina, al valore critico e non ci permette di discriminare tra i diversi modelli di universo. Questa nostra ignoranza è però meno importante per quanto riguarda lo studio dell'evoluzione passata dell'universo; infatti è possibile assumere, con buona approssimazione, che il valore vero di densità sia il valore critico, in quanto queste due grandezze si discostano sempre più man mano che il tempo cosmologico passa e, quindi, erano nel passato di valore sempre più simile. Possiamo, in altre parole, utilizzare il modello di universo piatto per descrivere la storia passata dell'universo.

*

Se ora passiamo ad esaminare i risultati ottenuti con i metodi della fisica atomica, si vede che l'intero universo è permeato in modo uniforme da una radiazione primordiale, fossile (detta anche di corpo nero perché tale è la sua distribuzione energetica) a cui corrisponde una temperatura di 2,7 gradi assoluti (cioè circa 270 gradi sotto lo zero centigrado). Oltre ad essere uniforme, la radiazione fossile è anche isotropa, cioè ha la stessa distribuzione energetica lungo ogni direzione la si osservi, entro variazioni inferiori ad 1 parte su centomila. Questa uniformità ed isotropia della radiazione di corpo nero vengono interpretate come naturale conseguenza della sua natura fossile, di radiazione primordiale diffusa nell'universo, non dovuta a particolari sorgenti locali.

Una conseguenza immediata dei risultati precedenti (e delle leggi della fisica) è che, essendo l'universo in espansione e conoscendone la temperatura attuale, si può determinare facilmente quale fosse stata la sua temperatura in qualsiasi epoca del passato.

Infatti, è noto che un gas (quale può essere assimilato l'universo inteso come un fluido cosmico di galassie ed ammassi di galassie) in contrazione, cioè percorrendo l'evoluzione dell'universo a ritroso nel tempo, si riscalda.

Le leggi della termodinamica ci dicono dunque che quando l'universo era più concentrato di ora era anche più caldo di ora, e ci consentono di sapere, in termini quantitativi, quale fosse stato il valore della temperatura alle varie epoche nel passato. In particolare, sappiamo così che la radiazione fossile di fondo cosmico si è disaccoppiata dalla materia (e quindi la radiazione e la materia hanno seguito evoluzioni diverse) quando la temperatura era di circa 3000 gradi e l'universo aveva un'età di circa centomila anni; il modello di Big Bang ci fornisce inoltre le dimensioni lineari di quel tempo in circa 10 milioni di anni luce.

Questo risultato fa sorgere immediatamente un problema, noto come il problema dell'orizzonte, perché in centomila anni la luce può aver percorso una distanza pari a centomila anni luce. Avendo l'universo dimensioni lineari 100 volte maggiori (10 milioni di anni luce) nel suo volume devono esserci state regioni che non hanno potuto ricevere segnali luminosi da altre regioni perché troppo lontane. Per essere più precisi, esisteva allora circa un milione di volumi coerenti, cioè regioni distinte e fisicamente non connesse tra loro, nel senso di non potersi scambiare segnali fisici in quanto nessun segnale può propagarsi a velocità superiore a quella della luce. Ciononostante, da queste regioni giunge a Terra esattamente la stessa radiazione fossile (come indicano le misure di isotropia ed uniformità) come se esse avessero invece potuto interagire tra loro per raggiungere condizioni di equilibrio termodinamico. Il problema dell'orizzonte si ritrova anche, come vedremo, in epoche precedenti e viene risolto introducendo una variante del modello standard di Big Bang nota come modello inflazionario.

I risultati ottenuti applicando i metodi della fisica nucleare alla cosmologia dicono che ci deve essere stato un periodo ancora più remoto, in cui la temperatura dell'universo era ancora più elevata per consentire la formazione di alcuni elementi chimici leggeri, che richiede temperature di circa un miliardo di gradi. Dalla teoria della struttura ed evoluzione stellare sappiamo infatti che la maggior parte degli elementi chimici vengono sintetizzati nell'interno delle

stelle (che liberano energia bruciando soprattutto idrogeno e poi elio ed elementi più pesanti) e che non esiste alcun meccanismo, se non in ambito cosmologico, in grado di sintetizzare l'idrogeno stesso ed alcuni altri elementi chimici leggeri.

*

L'esistenza della materia ci porta quindi a concludere che devono essere avvenute, nel passato dell'universo, reazioni di fusione tra i costituenti dei nuclei atomici (neutroni e protoni, anche per i quali si dovrà ricercare, come vedremo, un meccanismo di produzione) che hanno sintetizzato deuterio, tritio, elio ed un isotopo del litio. Perché ciò possa essere avvenuto è necessario non solo che la temperatura dell'universo sia stata di un miliardo di gradi circa, ma anche che la densità di materia abbia avuto valori ben precisi, compresi in un ristretto intervallo comprendente la densità critica. Il fatto che si ottenga il medesimo risultato su quale debba essere il valore numerico della densità di materia nell'universo, e che esso sia molto simile alla densità critica, in modo del tutto indipendente rispetto a quanto prima ottenuto dal conteggio delle galassie, indica che questi metodi sono sufficientemente precisi ed affidabili per tentare di ricostruire l'evoluzione passata dell'universo.

Lo studio sulle abbondanze degli elementi chimici che, a prima vista, potrebbe sembrare completamente scorrelato con quanto riguarda l'interpretazione dell'universo nel suo complesso, fornisce invece informazioni estremamente importanti sulla densità di materia nell'universo ed indica come, ancora una volta, non si possa discriminare tra universo aperto o chiuso, in quanto anche in questo caso si ottengono valori di densità molto simili al valore critico.

Andando ancora più lontano nel passato, anche i metodi della fisica nucleare non sono più sufficienti, ma si deve far ricorso a quelli della fisica delle particelle elementari, in quanto si deve ricercare un meccanismo di origine dei componenti dei nuclei degli elementi chimici (i nucleoni: protoni e neutroni) e degli elettroni orbitali. Le recenti teorie ritengono che questi ultimi siano realmente particelle elementari, appartenenti alla famiglia dei leptoni, mentre i primi non sarebbero elementari ma a loro volta costituiti da quark. Oltre a queste due famiglie (quark e leptoni) la fisica delle particelle elementari ci dice che devono esistere anche altre parti-

celle, responsabili delle varie forze, tra le quali il più noto è il fotone e, dopo la recente scoperta fatta al laboratorio europeo del CERN nel 1983, anche lo Z^0 ed i $W^\pm$.

Infatti, queste varie particelle (i quark costituenti la materia pesante ed i leptoni costituenti la materia leggera) sono soggette ad alcuni tipi di forze (o interazioni, per usare il linguaggio più preciso della fisica), che si manifestano in modo diverso a seconda della natura delle particelle interessate e delle condizioni fisiche in cui si trovano. Nel nostro universo freddo (che, come sappiamo, ha una temperatura di soli 2,7 gradi sopra lo zero assoluto) le interazioni fondamentali sono 4: gravitazionali (che si esercitano tra tutti i corpi, di qualsiasi natura, il cui esempio più noto è dato dal moto dei pianeti intorno al Sole oppure dal fatto che un qualsiasi oggetto non vincolato cade a terra), elettromagnetiche (che si esercitano solo tra corpi dotati di carica elettrica, e sono alla base della nostra vita quotidiana attraverso i vari fenomeni luminosi o di telecomunicazioni), due interazioni nucleari infine, la forte e la debole, che si esercitano solo a piccolissime distanze e di cui non si ha esperienza nella vita quotidiana.

*

In realtà, fino a circa 130 anni fa, prima che Maxwell formulasse le equazioni dell'elettromagnetismo, si riteneva che esistessero in modo distinto forze elettriche e forze magnetiche, che, appunto con Maxwell, sono state unificate in elettromagnetiche. Anche ora si cerca di unificare le diverse interazioni fondamentali tra particelle, ma il concetto moderno di unificazione è diverso rispetto a quello di Maxwell ed è fondamentale in tutte le teorie riguardanti le particelle elementari e la cosmologia. Ciò è soprattutto vero dopo la scoperta dello Z^0 e dei $W^\pm$, le particelle responsabili dell'unificazione delle interazioni nucleari deboli con quelle elettromagnetiche in un'unica interazione elettrodebole, scoperta avvenuta al CERN con l'uso di un grande acceleratore di particelle, in grado di produrre scontri tra protoni ed antiprotoni di altissima energia.

Proprio la necessità di disporre di altissime energie fa sì che solo con gli acceleratori di particelle si possano ottenere in laboratorio questi risultati sull'unificazione delle interazioni fondamentali. Per essere più precisi, ed utilizzando le unità di misura tipiche

della fisica delle alte energie (il GeV, cioè il miliardo di elettronvolt), la produzione dei Z^0 e $W^\pm$ può avvenire solo ad energie di circa 100 GeV, in quanto di questo ordine di grandezza è la massa a riposo di tali particelle. In natura, le energie corrispondenti alla temperatura ambiente (circa 300 gradi assoluti) sono solo di circa 10 eV, cioè ben dieci miliardi di volte inferiori alle energie necessarie per l'unificazione elettrodebole. Per questo motivo, le 4 interazioni fondamentali precedentemente definite non sono spontaneamente unificate ora, alle condizioni fisiche attuali del nostro mondo freddo, ma agiscono in modo indipendente tra loro. Ciò è tanto più vero nell'ambito cosmologico attuale, in cui il fondo fossile di radiazione ha temperatura di solo 2,7 gradi assoluti.

*

Tuttavia, a causa dell'espansione, come sappiamo l'universo era molto più caldo di ora nel passato, e l'unificazione spontanea tra le interazioni fondamentali tra particelle era una conseguenza naturale dell'alto valore dell'energia disponibile nell'ambiente. In effetti, la teoria cosmologica del Big Bang prevede che l'universo avesse una temperatura di circa 100 GeV ad un'età di circa 10^{-12} secondi dall'origine, epoca in cui le interazioni elettromagnetiche e deboli dovevano essere unificate in elettrodeboli; solo in epoche successive si è verificata la separazione spontanea nelle due interazioni che ora conosciamo. Anche in questo caso si vede dunque quanto stretto sia il legame tra cosmologia e fisica delle particelle elementari, e come i risultati ottenuti in un campo influenzino notevolmente quelli dell'altro.

Andando ancora più lontano nel passato remoto dell'universo, la temperatura doveva essere ancora più elevata, fino a raggiungere valori di circa 10^{14} GeV ad un'età di circa 10^{-35} secondi dal Big Bang. Anche se non esistono verifiche sperimentali dirette (perché non esistono acceleratori di particelle in grado di ricreare valori tanto elevati di energia, e perché altri tipi di esperimenti, che come vedremo si costruiscono in laboratori sotterranei, non hanno fornito risultati certi) le teorie prevedono comunque che, a quelle energie anche le interazioni nucleari forti fossero state spontaneamente unificate con le interazioni elettrodeboli, in quella che si chiama la grande unificazione. A quell'epoca, dovevano quindi esistere in

natura solo due tipi diversi di interazioni, le gravitazionali e quelle di grande unificazione (comprendenti le attuali interazioni elettromagnetiche, deboli e forti).

Come detto, le teorie di grande unificazione non possono essere verificate in modo diretto ma solo in modo indiretto, ricercando processi fisici o particelle primordiali sopravvissute a quei tempi, e che erano comuni allora e molto rare ora; in particolare, attraverso la ricerca di processi di decadimento del protone o l'osservazione di monopoli magnetici. Il protone, che come abbiamo visto è uno dei componenti principali dei nuclei atomici, è formato di quark i quali, con i leptoni, sono i costituenti della materia ordinaria. All'epoca della grande unificazione tra interazioni elettrodeboli e forti, 10^{-35} secondi dal Big Bang, quark e leptoni potevano trasformarsi gli uni negli altri spontaneamente, in quanto le interazioni forti (tra quark) e quelle elettrodeboli (tra leptoni) non erano distinte tra loro.

In questo senso, le teorie di grande unificazione prevedono che il protone non sia stabile ma, pur avendo una vita molto lunga, possa decadere in altre particelle in conseguenza della transizione di un suo quark in un leptone. I monopoli magnetici sarebbero invece tra le più antiche particelle nell'universo, residuo fossile dei processi fisici che hanno caratterizzato l'epoca di grande unificazione, e ad essa sopravvissuti.

*

La ricerca di verifiche sperimentali (sia per il decadimento del protone che per i monopoli magnetici) viene condotta in laboratori sotterranei per eliminare, o almeno ridurre al minimo, i disturbi di altra natura, soprattutto dovuti alla gran quantità di radiazione cosmica che giunge al suolo e che può mascherare l'evento raro cercato. Poiché questi studi non hanno ancora portato a risultati definitivi, si deve concludere, seguendo l'insegnamento di Galileo, che, per quanto queste teorie di grande unificazione siano molto suggestive ed abbiano una loro forte logica intrinseca, la loro validità resta nell'ambito delle ipotesi (per quanto molto ben fondate) e le nostre conoscenze cosmologiche si devono per ora fermare ad un'epoca successiva a quella in cui è avvenuta la rottura spontanea della simmetria di grande unificazione.

Un ultimo momento caratteristico, dei primi istanti di evoluzione cosmologica, riguarda la possibile unificazione di tutte le interazioni fondamentali tra particelle, cioè quando anche le forze di gravità si unificano con le altre 3 interazioni. In questo caso, però, non solo non si hanno ancora dati sperimentali disponibili, ma manca anche una teoria quantistica della gravitazione, necessaria perché si devono usare insieme i metodi della meccanica quantistica e della relatività generale. Anche dal punto di vista teorico, siamo quindi limitati ad un tempo, 10^{-43} secondi dopo il Big Bang, detto tempo di Plank, in cui le fluttuazioni di energia del vuoto (ineliminabili per il principio di indeterminazione di Heisenberg, che definisce un limite minimo al prodotto delle fluttuazioni temporali Δt per quelle energetiche ΔE) erano paragonabili all'energia stessa dell'universo, allora prevista dai modelli in 10^{19} GeV. In altre parole, tempi Δt estremamente piccoli comportano incertezze estremamente grandi sulle energie ΔE , per cui non si possono avere informazioni precise sull'energia caratteristica dell'universo al tempo di Plank.

Infine, i metodi della relatività generale, formulata da Einstein nel 1916 e le conseguenti equazioni di Friedman degli anni 30, ci consentono di sviluppare modelli atti ad interpretare l'evoluzione passata ed a prevedere l'evoluzione futura dell'universo. Si ottiene in particolare il parametro di curvatura dell'universo per diversi modelli, il quale stabilisce il tipo di metrica (cioè la geometria che descrive la dinamica dei corpi nello spazio-tempo), che dipende dall'essere l'universo aperto, piatto o chiuso, ovviamente legata al contenuto di materia nell'universo, cioè al valore della densità in relazione alla densità critica.

I vari modelli cosmologici non sono tuttavia esenti da problemi, anzi ci sono in particolare 3 aspetti che non trovano una spiegazione naturale nel modello standard di Big Bang, quello che si ricava dalle equazioni di Friedman: i problemi dell'orizzonte, della piattezza e dei monopoli magnetici. Il primo, già esaminato in relazione alla radiazione di fondo cosmico, riguarda la costanza della velocità di propagazione della luce: alla fine dell'epoca della grande unificazione, 10^{-33} secondi dalla singolarità iniziale, esso consisteva nel fatto che l'universo, secondo il modello standard, aveva dimensioni lineari di circa 1 centimetro ma la luce poteva aver percorso solo una distanza pari a 10^{-24} centimetri, in quel tempo. Quindi, nell'intere-

ro volume di universo, le regioni fisicamente non connesse tra loro erano dell'ordine di 10^{72} ed ancora una volta non si riesce a spiegare l'uniformità e l'isotropia attuali dell'universo se esso si è sviluppato da regioni che non hanno mai potuto avere tra loro scambi di segnali fisici.

*

Anche il problema dei monopoli magnetici è legato a questo alto numero di regioni fisicamente non collegate tra loro, in quanto la teoria ritiene che queste particelle possano essere state prodotte solo ai confini tra volumi coerenti. Quindi, secondo il modello standard, il numero totale di monopoli sarebbe dell'ordine di 10^{72} ; inoltre, avendo i monopoli massa molto grande, essi sarebbero la componente dominante della materia nell'universo attuale, con una densità addirittura maggiore di quella critica, tanto da avere ormai, definitivamente e da tempo, chiuso l'universo.

Il problema della piattezza, infine, è legato al fatto che la densità di materia visibile nell'universo ha un valore molto simile alla densità critica, tanto da non poter ancora discriminare in quale tipo di universo stiamo vivendo, se esso sia aperto o chiuso. Tuttavia, se la densità effettiva di materia nel lontano passato fosse stata anche di poco diversa rispetto al valore critico, ora, dopo circa 15 miliardi di anni, essa ne sarebbe molto diversa, tanto che sapremmo, senza alcun dubbio, quale modello di universo sia quello corretto.

Per risolvere questi problemi, in anni recenti sono stati formulati modelli non standard di universo, noti come modelli inflazionari. In sintesi, essi prevedono che, durante il periodo di rottura spontanea della grande unificazione, cioè quando le interazioni forti si sono separate da quelle elettrodeboli, le dimensioni dell'universo siano cresciute in modo esponenziale (come accade appunto per i processi inflattivi) e che il nostro universo attuale si sia sviluppato da uno solo dei tanti volumi coerenti presenti allora, e ancora ora presenti come tanti universi distinti tra i quali non esiste alcuna possibilità di comunicare.

Si risolve così in modo naturale ed immediato il problema dei monopoli magnetici (in quanto nel nostro intero universo sarebbero presenti pochi o anche nessun monopolio) e dell'orizzonte (in quanto l'universo era fin dall'inizio uniforme ed isotropo perchè

costituito di un singolo volume coerente). Anche il problema della piattezza si risolve assumendo che la densità effettiva di materia abbia sempre avuto, fin dalle origini dell'universo, un valore uguale al valore critico. Come conseguenza, sorge invece il problema della cosiddetta materia oscura (comunque più facilmente risolvibile) in quanto, per arrivare a densità uguale alla densità critica, si richiede che circa il 90% di tutta la materia dell'universo non sia sotto forma di materia visibile ma sotto qualche altra forma che ancora non si è identificata.

*

Per concludere questa breve carrellata sulla fisica dell'universo, si può ribadire ancora una volta che la cosmologia non è più, come spesso si riteneva in passato, solo un problema di metrica, di geometria o di equazioni del campo gravitazionale, ma è invece e soprattutto un problema di fisica nel senso più ampio della parola, che si cerca di risolvere utilizzando i risultati ed i metodi delle varie discipline fisiche e dei diversi strumenti che la moderna tecnologia ha messo a disposizione dei fisici, nei laboratori sotterranei come nei grandi acceleratori di particelle.

CARLO CASTAGNOLI

MORTE DELLE STELLE: LE SUPERNOVAE STORICHE E QUELLA DEL 1987

*Direttore degli Istituti di Fisica
della Università e di Cosmogeofisica del CNR di Torino*

1) LE SUPERNOVAE STORICHE

Nell'anno 1006, in cui Teodaldo di Canossa fece la donazione per il Monastero di S. Benedetto in Polirone, è molto probabile che qualche nostro concittadino mantovano, la notte del 30 aprile abbia assistito ad un evento celeste straordinario (nebbia permettendo).

Lo sappiamo dal *Chronicon* di Iohannis Venetum, cioè da un vicino di casa: «A quel tempo una cometa, il cui apparire sempre annuncia umane sventure, apparve nella regione Sud, e fu seguita da una grande pestilenza in tutti i territori di Italia e Venezia». Ma non si trattava di una cometa, come risulta da una descrizione più accurata. Negli *Annales Sangallenses Maiores* che i Benedettini hanno tenuto dal 915 al 1044, in quel giorno è scritto «Una nuova stella di inusuale grandezza apparve causando allarme. Fu interessante il fatto che essa prima si contrasse per un pò, poi si allargò ed infine si estinse. Essa fu poi vista per tre mesi in zona sud (in intimis finibus austri)». Questa descrizione di una nuova stella di intensità variabile è confermata dagli *Annales Beneventani* del Monastero di Santa Sofia (che vanno dal 750 al 1128): «Nel 25° anno del nostro maestro Pandolfo e nel 19° del nostro maestro Landolfo, suo figlio, una "clarissima" stella apparve producendo un grande splendore per 3 mesi».

Altre menzioni di questo evento celeste si leggono nel *Diversitate Temporum* (liber 1°) di Alberto da Metz e negli *Annales Mosomagenses* (Mousson). Noi oggi sappiamo che si trattava della Supernova apparsa nella costellazione del Lupus.

Questi brevi cenni storici servono a farci capire come questo fenomeno celeste sia così clamoroso da lasciare profonda traccia di sè, anche nell'Occidente e non solo nei documenti astronomici dell'Oriente (Cina e Corea) come per molto tempo (fino quasi a metà

del nostro secolo) si è creduto. Certo, anche di questa supernova l'Oriente ci dà traccia. Per esempio un documento della Corea ci dice «Durante il 9° anno di Mokchong una stella ospite (Konyo-sa) è stata vista ad ovest di Ti. I suoi raggi brillavano come se fosse su un disco d'oro».

E gli Arabi non sono da meno.

Ali ibn Ridwan nel suo *Commentario sul Tetrabiblos* di Tolomeo così scrive: «Vi descrivo uno spettacolo che io ho visto all'inizio dei miei studi. Lo spettacolo apparve nel segno dello Scorpione in opposizione al Sole. Il Sole quel giorno era 19° nel Toro e lo spettacolo al 19° nello Scorpione. Lo spettacolo era un grande corpo circolare, grande circa 2,5-3 volte Venere. Il cielo era splendente a causa della sua luce la cui intensità era ca. 1/4 di quello della luna piena. Esso rimase dove era e si muoveva giornalmente con il segno zodiacale finchè il Sole fu in sestile con esso (cioè a 60°) in Virgo quando scomparve all'improvviso. Poichè lo Scorpione è di cattivo presagio per la religione Islamica si combatterono aspre battaglie e alcune delle maggiori città furono distrutte. Capitarono incidenti ai re delle due città Sante (Mecca e Medina), ci fu siccità, fame e aumento dei prezzi e innumerevoli migliaia di persone morirono a causa delle armi, della fame e della pestilenza. E ciò durò per vari anni dopo lo spettacolo».

Naturalmente la SN1006 del Lupus non è la sola di cui abbiamo notizie, grazie ad un esteso lavoro di ricerca che, sia pure iniziato da Bessel e Biot più di un secolo fa, ha avuto il suo grande sviluppo negli ultimi due decenni per merito soprattutto degli storici (astronomi) cinesi e che è terminato da un paio di anni.

Sotto la guida di Zhuang Weigeng e di Li Qibin, dell'osservatorio di Pechino duecento ricercatori hanno lavorato per tredici anni per analizzare tutti i documenti e le cronache cinesi disponibili (e che risalgono a prima della dinastia Han) per fare il catalogo di dieci tipi di eventi celesti inusuali (comete, meteore, meteoriti, macchie solari, eclissi solari e lunari, occultazioni, aurore boreali, novae e Supernovae).

Così oggi sappiamo che sicuramente si sono osservate otto supernovae galattiche nel 185, 393, 1006, 1054, 1181, 1408, 1572 e 1604, che sei altre sono probabili (124, 483, 1087, 1244, 1408, 1431).

Sulla base di queste informazioni storiche è stato possibile programmare nuovi metodi di osservazione di questo straordinario fenomeno astrofisico, che hanno portato nel 1987 ad osservare con una grande varietà di tecniche (e non solo con l'osservazione visuale come per le supernove storiche) la supernova esplosa nella Grande Nube di Magellano (e quindi a stretto rigore non galattica) contribuendo in modo determinante ad interpretare la fase dell'evoluzione delle stelle.

2) FREQUENZE DI SUPERNOVE

Delle supernove AD 1572 (studiata fra gli altri da Tycho Brahe) e AD 1604 (la supernova di Keplero, che però è stata osservata per la prima volta dall'Antonelli a Verona) è stato possibile ricostruire le curve luce, cosa che non si è potuto fare per le altre, a causa della scarsità dei dati. Le 8 supernove nell'arco di due millenni danno un rateo di 250-300 anni per supernova entro una distanza di ca. 6 Kilo-parsec dal Sole. È questa la distanza massima a cui una supernova (di magnitudine assoluta -19) è visibile ad occhio nudo da Terra, se si considera un assorbimento della luce dovuto al mezzo interstellare in media di 1.5 magnitudini per Kpc. Di conseguenza nel passato, è stata tenuta sotto osservazione solo una frazione della Galassia pari a 1/7 del totale (in questo calcolo abbiamo assunto in 16 Kpc il raggio della Galassia). Perciò, considerando tutta la Galassia, il rateo dovrebbe salire a 1 evento ogni ca. 40 anni.

Un ulteriore aumento valutabile in circa un fattore 2 compensa poi l'incompletezza dei resoconti storici. Alcuni dati infatti possono essere andati perduti; supernove potrebbero essere esplose solo dall'emisfero australe, e quindi non registrate dalle civiltà dell'emisfero settentrionale. Certe supernove possono essere state troppo poco luminose, sia per ragioni intrinseche che a causa dell'oscuramento interstellare, oppure per le cattive condizioni atmosferiche. Infine una supernova che fosse durata al massimo di luminosità un solo giorno, potrebbe essere stata troppo debole per la rivelazione diurna, e già abbastanza esaurita da non essere notata all'arrivo della notte. Tutto questo porta la frequenza di supernove nella nostra Galassia a circa 1 ogni 20 anni, ma fa sorgere la questione di come mai siano passati già 382 anni dall'ultima osservazione storica riportata (Keplero nel 1604). Eppure dall'avvento del telescopio è

difficile che qualcuno di questi eventi sia sfuggito all'osservazione. Inoltre l'esame della distribuzione temporale delle supernove storiche rivela l'esistenza di periodi molto lunghi in cui non sono state osservate supernove, mentre tra quella di Tycho e di Keplero, per esempio, sono trascorsi solo 32 anni.

Per verificare se circostanze di questo tipo siano o no conciliabili con il rateo stimato di 1 supernova ogni 20 anni, si è proceduto al calcolo di una simulazione al calcolatore. Il modello adottato è quello di una Galassia a disco sottile (di raggio 16 Kpc) in cui si assume un rateo medio di 1 esplosione di supernova ogni 20 anni. Ogni supernova viene collocata in una posizione casuale; si assume che solo gli impulsi luminosi che arrivano da una stella distante meno di 6 Kpc possano raggiungere la Terra. Il risultato è che il fattore di maggior peso nella stima del rateo è il tempo che impiega la luce ad arrivare fino a noi. Cioè un intervallo di tempo molto piccolo registrato tra lo scoppio di una supernova e la supernova successiva può essere conseguenza della diversa distanza delle due stelle dalla Terra.

La frequenza calcolata comprende supernove di tipo I e supernove di tipo II. Si ritiene che le prime originino da stelle di piccola massa, che sono la maggioranza nella nostra Galassia, ma hanno tempi evolutivi più lunghi. Possiamo quindi pensare che il rateo di SNI e di SNII sia circa lo stesso, e la metà di quello totale. La frequenza di SNII, (le più importanti dal punto di vista di emissione neutrinica), sarebbe allora di 1 evento ogni ca. 40 anni.

Tutti questi risultati sono stati ottenuti calcolando la frequenza di supernove basandosi su dati riguardanti sia galassie esterne che su quelle interne alla nostra Galassia.

La proiezione delle 8 supernove sul piano galattico occupa un settore angolare di ca. 50 gradi; inoltre la loro distribuzione radiale, raffrontata con quella delle SN nelle galassie spirale di tipo Sc (visibili di faccia), mostra che le supernove storiche giacciono a quelle distanze in cui è più probabile trovare una supernova. Il confronto suggerisce però che un 20% delle SN più lontane non siano state storicamente osservate.

Assegnando dunque 8.8 SN al settore di 50°, si trova 63.4 SN in 1000 anni in tutto il disco galattico. La frequenza di supernove è allora 1/15 anni.

3) CORRELAZIONE PULSARS - SUPERNOVA REMNANTS

Nel 1934, Baade e Zwicky (cioè 1 anno dopo la scoperta dei neutroni) fecero l'ipotesi che le supernove fossero il meccanismo con cui alcune stelle ordinarie possono trasformarsi in stelle di neutroni. Dopo la scoperta delle pulsars e la loro spiegazione in termini di stelle di neutroni in rotazione, venne automatico pensare ad una connessione tra pulsars e supernova remnants.

Purtroppo i dati osservativi non confermano questa associazione con chiarezza: delle 370 pulsars conosciute, solo 3 sono identificate con altrettanti remnants.

La distribuzione delle pulsars conosciute in funzione delle coordinate galattiche mostra una concentrazione di queste stelle lungo il piano galattico, anche se bisogna tener conto del fatto che non è possibile investigare uniformemente ogni parte della Galassia.

La rarefazione delle pulsars nel centro galattico, ad esempio, dipende, almeno in parte, dalla ridotta sensibilità di ricezione dei nostri strumenti causata dall'alto rumore di fondo galattico in quella direzione. Recenti misure del moto proprio di alcune pulsars mostrano che esse si sono formate vicino al piano galattico, e si sono successivamente allontanate da esso ad una velocità media di circa 200 Km/s. Se l'altezza scala sul piano galattico delle pulsars è oggi in media ca. 350 pc, quella dei loro progenitori doveva essere minore di 100 pc. Le pulsars derivano dunque da stelle massicce, stelle cioè di popolazione I, che si trovano di preferenza a piccole latitudini galattiche. L'associazione tra pulsars e remnants sembra allora riguardare solo le supernove di tipo II, tanto più che le pulsars, così come le SNII, sono concentrate sui bracci a spirale.

Esistono molte stime della frequenza con cui le pulsars nascono. Si può pensare ad un rateo di 1 pulsar ogni 20 anni fino ad una pulsar ogni 50 anni. Un rateo dunque in accordo con quello delle supernove di tipo II.

4) IL COLLASSO GRAVITAZIONALE STELLARE

Teoricamente si è soliti distinguere due tipi di supernove. Le SN di tipo I, osservate in stelle presenti in qualunque tipo di galas-

sia, ma che appaiono dominanti in quelle ellittiche, sono caratterizzate da una particolare curva di luce con una rapida decrescita di circa tre magnitudini del massimo di luminosità. Le SN di tipo II, con curve di luce più irregolari, sono invece osservate soprattutto nelle galassie a spirale, ricche di stelle di popolazione I, giovani.

I due fenomeni emettono circa la stessa energia nell'ottico (ca. 10^{51} erg) ed in entrambi i casi vengono prodotti elementi pesanti, ma richiedono interpretazioni diverse.

Le SN II sono il risultato di un'instabilità prodottasi all'interno di una stella massiva, principalmente per la fotodisintegrazione del Ferro, che conduce alla formazione di una stella di neutroni o di un buco nero. Le SN di tipo I sono invece interpretate come l'esplosione in un sistema binario, in cui una nana bianca accresce la propria massa a spese del compagno, fino alla deflagrazione esplosiva del carbonio. La rivelazione dei neutrini è associata all'esplosione di SN di tipo II.

L'evoluzione di una stella massiva è costituita da una progressiva contrazione gravitazionale intervallata da «stop» nucleari in corrispondenza delle varie reazioni termonucleari che rendono possibile l'equilibrio della struttura stellare. Una stella, se sufficientemente massiva, sintetizzerà nel suo interno successivamente H in He, He in C e O ed in seguito in Ne, Mg e Si sino alla formazione di un nucleo centrale di Ferro, assumendo una struttura finale a gusci concentrici con composizione chimica diversa. Prima di questo forse altri fenomeni possono innescare un'esplosione SN: la formazione di un nucleo degenerare di C e O e processi di cattura elettronica dopo la combustione del carbonio. Però tali meccanismi potrebbero essere meno probabili a causa dei fenomeni di perdita di massa in fase di gigante rossa.

Il limite di massa oltre il quale un nucleo di Ferro collassa (limite di Chandrasekhar) è

$$M_{\text{Ch}} = 5.87 M_{\odot} \mu^2$$

ove μ è l'abbondanza elettronica e $M_{\odot}$ la massa del Sole. Per esempio se $\mu = 0.5$ si trova $M_{\text{Ch}} = 1.47 M_{\odot}$.

Una stella la cui massa centrale di Ferro sia maggiore di tale limite si raffredda rapidamente, la pressione interna diminuisce e può generarsi il collasso gravitazionale. La stella continua a collas-

sare o, se sufficientemente riscaldata durante tale fase, esplode diventando una SN. Se in questa fase la stella perde abbastanza materia, la massa del nucleo può scendere sotto il limite di Chandrasekhar; in questo caso la materia rimasta, altamente compressa, può dar vita ad una stella di neutroni o ad oggetti ancora più collassati quali stelle formate di quark (*strange star*). Non c'è per ora accordo né sulla massa della stella in cui è possibile il collasso né sulle cause dell'esplosione.

5) LA DINAMICA DEL COLLASSO

Molte valutazioni teoriche sembrano indicare la possibilità di un collasso per deflagrazione del carbonio per una massa compresa tra 8 e 11 $M_{\odot}$, e per fotosintegrazione del Ferro per masse maggiori.

In ogni caso la contrazione fa aumentare la pressione, ma non tanto rapidamente quanto la gravità, poiché una parte di energia viene spesa nella dissociazione dei nuclei di ferro in particelle α . Se l'indice adiabatico γ diventa minore di 4/3 la stella non può più essere stabile: dalla contrazione la stella non ottiene più energia per sostenere la struttura.

Questo meccanismo di innesco del collasso è abbastanza chiaro, ma estremamente controversa è invece la descrizione degli eventi successivi, dall'inizio della contrazione del nucleo stellare all'esplosione della stella. I meccanismi proposti per giustificare l'esplosione non hanno infatti molto spesso trovato conferme nelle simulazioni al calcolatore.

Uno dei primi meccanismi, consisteva in un modello in cui il trasporto dell'energia necessaria all'esplosione degli strati esterni della stella era dovuto ai neutrini. Questo modello, anche se successivamente migliorato dopo la scoperta delle correnti neutre, non ha mai portato «all'osservazione» di un'esplosione attraverso le simulazioni al calcolatore, in quanto una frazione troppo grande di neutrini rimaneva intrappolata nel core. Così un impulso inadeguato per fare esplodere la stella veniva trasferito agli strati esterni.

Il mancato trasporto era dovuto al fatto che, da un lato i neutrini di più alta energia hanno un cammino libero medio più corto del raggio stellare e, dall'altro, che i neutrini di energia più bassa tendono a diventare degeneri e ciò riduce la loro produzione.

Questi problemi portarono a riconsiderare la possibilità che l'energia meccanica del core fosse trasportata all'esterno da un'onda d'urto (*shock*). Questa ipotesi è stata giustificata dalle conoscenze nel frattempo acquisite in fisica nucleare; in particolare la possibilità che il nucleo collassante rimanga molto più freddo di quanto precedentemente ipotizzato, supponendo un elevato calore specifico degli stati nucleari eccitati dei nuclei pesanti. In questo caso, il collasso non terminerebbe a densità ρ ca. $3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^3$ per effetto della pressione termica dei nucleoni caldi (generati dalla fotodisintegrazione della materia) ma continuerebbe fino a densità superiori alla densità nucleare (ca. $2.7 \cdot 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$)! Una conseguenza della persistenza dei nuclei pesanti nel core è che i neutrini vengono intrappolati ancora più facilmente: «*il neutrino transport model*» era così una volta di più sfavorito.

Lo scenario che ora riceve il maggior consenso è il seguente. Il nucleo della stella che implode è separato in due parti: la prima, più centrale, in cui la velocità di caduta della materia è subsonica e proporzionale al raggio ($v \propto r$), ed una seconda, il core esterno, in cui la velocità di caduta è supersonica e va con $R^{1/2}$. La massima velocità di caduta raggiunge i 70/80 km/ms. Quando le regioni centrali raggiungono o superano la densità nucleare, la materia diventa incompressibile e la velocità di caduta cade rapidamente a zero, prima al centro e poi per raggi più grandi. Questo improvviso cambio di velocità genera un'onda di pressione che si allontana verso l'esterno della stella alla velocità del suono. Per effetto della pressione la densità della stella cresce di una frazione pari al rapporto tra le velocità di caduta della materia e del suono locali.

Ora vicino al centro questo rapporto è molto minore di 1, ma allontanandosi verso la periferia arriva ad 1 (e poi lo supera) in un punto detto punto sonico che separa il core collassante in due parti (interna ed esterna). Si vede così che vicino al centro della stella si ha una moderata onda di pressione, ma oltre al punto sonico essa cambia completamente di densità, entropia e velocità. Il punto sonico ha quindi due importanti funzioni: 1) le onde sonore provenienti dall'interno non possono muoversi oltre di esso; 2) delimita la superficie del core non sottoposto a shock.

L'entropia aumenta con il collasso provocando la dissociazione dei nuclei in nucleoni, con un conseguente rilascio di energia. Ciò

fa aumentare la pressione improvvisamente ed il materiale che si trova in questa regione inverte la direzione del moto e viene proiettato all'esterno. In conclusione, il core si comprime oltre la densità nucleare ρ_{nuc} e poi «rimbalza indietro» ed espelle il materiale ad alta velocità (*bounce shock mechanism*).

Se le simulazioni al calcolatore di un tale processo sono riuscite così a mostrare l'esplosione della stella in SN, nascono però nuovi problemi teorici. Infatti, l'onda di shock subisce forti perdite di energia, mentre si muove verso l'esterno, dovute all'emissione neutrinica ed alla fotodisintegrazione. Perciò spesso essa «muore» prima di giungere nelle regioni in cui si può innescare l'esplosione. Il successo del meccanismo di rimbalzo del core dipende fortemente dalla massa del nucleo di Ferro, che non può essere troppo grande.

Il limite oltre il quale l'onda di shock diventa inefficace dipende fortemente dalla scelta dell'equazione di stato. Peraltro con sicurezza si ha che una stella con $M_{\text{core}} \geq 2 M_{\odot}$ non può esplodere e, sono necessari altri meccanismi, specialmente per stelle con masse $> 12-15 M_{\odot}$.

Nel 1985 si è proposto un meccanismo che coinvolge nuovamente i neutrini e che richiede un iniziale fallimento dell'esplosione. In pratica una parte dei neutrini emessi ed assorbiti dai nucleoni liberi può rilasciare parte della energia in modo da «rivitalizzare» l'onda di shock e garantire l'esplosione.

Cruciale in questo meccanismo è il mantenimento di un flusso caldo di neutrini per un lungo periodo di tempo: anche i ν_{μ} e ν_{τ} (oltre ai ν_e) possono partecipare al processo di riscaldamento (eccitando i nuclei atomici di He, C, S, Fe).

Per prudenza occorre però osservare che tutti i modelli sono unidimensionali, senza momento angolare e senza campi magnetici, mentre invece le stelle di neutroni hanno elevato momento angolare e forti campi magnetici!

La rotazione sembra un fattore decisivo per ottenere l'esplosione: purtroppo è pressochè sconosciuta la distribuzione del momento angolare delle stelle in configurazione presupernova.

In conclusione: a) sembra impossibile individuare due famiglie di SN di tipo II: quelle con $M < 12 - 15 M_{\odot}$ che esplodono attraverso l'onda di shock (*bounce shock mechanism*) e quelle con

$M > 12 - 15 M_{\odot}$ per cui lo shock è rivitalizzato dai neutrini (*neutrinic heating mechanism*); b) per quanto i neutrini non siano i responsabili diretti dell'esplosione (come ipotizzato nei primi modelli teorici), essi sono molto importanti nel collasso perchè attraverso di loro viene principalmente rilasciata l'energia verso l'esterno. Anche se il collasso del nucleo centrale non termina con l'esplosione della stella, l'emissione neutrinica avverrà lo stesso. Un telescopio neutrinico quale quello realizzato al Monte Bianco può rivelare anche tali eventi non visibili otticamente (*hidden sources*).

6) EMISSIONE NEUTRINICA DA COLLASSO STELLARE

I modelli teorici concordano nel ritenere che la maggior parte dell'energia liberata durante il collasso di una stella $\approx 10^{53}$ erg. venga emessa sotto forma di neutrini; solo una frazione dell'1% produce altri effetti, tra cui l'emissione luminosa e l'esplosione dell'involuppo.

Ci si aspetta a Terra per tutta la durata del *burst*, un flusso di circa 10^{12} neutrini elettronici per cm^2 e di 10^{11} corrispondenti anti-neutrini. L'emissione di ν può essere divisa in tre fasi, dominate da tre processi diversi: neutronizzazione, deleptonizzazione e raffreddamento. a) prima fase: gli elettroni vengono catturati dai p nel nocciolo stellare con emissione di ν_e , in centesimi di sec. e con una luminosità $> 10^{58}$ al sec; b) seconda fase i ν sono emessi in coppie, in seguito all'annichilazione di coppie, (deleptonizzazione); c) terza fase: l'emissione di ν continua dalla «neutrino-sfera» della stella di neutroni, formatasi in seguito all'intrappolamento dei neutrini nella stella collassante.

L'emissione neutrinica diventa superficiale (come avviene per la luce sulla fotosfera delle stelle ordinarie) e non più volumica a causa di processi che rendono il libero cammino medio dei ν inferiore al raggio stellare; cioè i neutrini riescono ad abbandonare la stella solo da uno strato superficiale. I neutrini provenienti dall'interno diffondono verso la superficie facendosi strada attraverso la materia. La maggior parte dei neutrini viene emessa durante la fase di raffreddamento, mentre solo circa il 3% sfugge dalla stella durante il picco iniziale di neutronizzazione.

Almeno ca. $0.1 M_{\odot} c^2$ è l'energia liberata sotto forma di neutrini durante il fenomeno: ciò equivale a un'emissione totale in $\nu > 10^{53}$

erg per il collasso cioè uno dei processi con maggior liberazione di energia nel cosmo.

La struttura temporale del burst neutrino ha 3 fasi successive: neutrinizzazione, deleptonizzazione e raffreddamento.

a) La neutrinizzazione è contemporanea al collasso gravitazionale vero e proprio, che avviene su tempi scala dell'ordine del tempo di caduta libera del core su se stesso (alcuni millesecodi). In questa fase vengono emessi solo ν_e .

b) La deleptonizzazione dura ca. 1s e comporta ancora emissione di ν (da reazioni di neutrinizzazione) e di ν_e e $\bar{\nu}_e$ (da annichilazione di coppie e^-e^+); la fase termina quando, soprattutto a causa delle correnti neutre, i ν non possono più sfuggire dal core ma restano intrappolati nella stella, diffondendo comunque verso la superficie. Si viene così a formare una «neutrinofera» analoga alla fotosfera delle stelle ordinarie (responsabile della loro emissione luminosa).

c) Da essa si ha l'emissione di neutrini di ogni specie per alcuni secondi contemporaneamente al raffreddamento Kelvin della neonata stella di neutroni: l'emissione di neutrini diventa quindi superficiale e non più volumica.

La differenza di energia di legame tra la stella di neutroni e il core iniziale viene emessa sotto forma di neutrini ed altri effetti osservabili: a) ca. 20 MeV/nucleone sono spesi durante la fase iniziale per la formazione dell'onda d'urto, il rimbalzo e l'assestamento del core e per il burst di neutrini da neutrinizzazione (3% del totale); b) altri 20 MeV/nucleone circa vengono liberati nella successiva fase di deleptonizzazione e diffondono sotto forma di ν dal core verso la superficie della stella di neutroni. La maggior parte dei neutrini viene emessa nel raffreddamento della stella neutroni dalla neutrinofera alla temperatura di alcuni MeV.

7) LA SN 1987A

Il 23 febbraio 1987 è stata osservata un'esplosione di supernova nella Grande Nube di Magellano. Per la prima volta è stato possibile registrare un evento di questo tipo con rivelatori di neutrini, di onde gravitazionali, oltre che nello spettro elettromagnetico, dalle onde radio ai raggi gamma. La posizione della supernova coincide con quella di una supergigante blu, Sanduleak - 69.202, identificata quindi come progenitore della SN.

Rispetto al modello standard la SN 1987A presenta numerose anomalie:

- la SN è esplosa in una piccola galassia irregolare per le quali il rateo previsto di SN è molto più basso che nelle galassie a spirale;
- la stella progenitrice non è una supergigante rossa, ma blu, mentre i modelli teorici attuali privilegiano appunto come configurazione tipica della stella pre-SN la supergigante rossa;
- la massima luminosità ottica è stata molto inferiore rispetto a quelle di altre SN dello stesso tipo;
- nei laboratori sotterranei sono stati registrati due distinti burst di neutrini separati nel tempo di 4,7 ore.

Senza dubbio quest'ultimo dato, se dovuto alla rivelazione di neutrini, è quello di più difficile interpretazione in quanto è in contrasto con le previsioni del modello standard. Il quadro degli eventi registrati al nostro Liquid Scintillation Detector (LSD) del Monte Bianco, al Baksan Scintillation Telescope (BST) in Unione Sovietica, a Kamioka (K2) in Giappone ed a IMB negli Stati Uniti è complesso. K2 e IMB sono rivelatori Cerenkov ad acqua, LSD e BST sono a scintillatore liquido. Tutti questi eventi sono generalmente considerati come dovuti al positrone prodotto dalla reazione sui protoni liberi indotta dai $\bar{\nu}_e$.

Dopo l'analisi delle correlazioni esistenti tra LSD e antenne gravitazionali di Roma e Maryland fatte subito dopo l'osservazione della SN, l'esame dei dati è stato recentemente arricchito da una dettagliata analisi delle correlazioni esistenti tra i segnali registrati nei rivelatori sotterranei di LSD, K2 e IMB, e tra questi e le antenne gravitazionali.

I 4 esperimenti sotterranei hanno caratteristiche diverse e ciò rende i dati non immediatamente confrontabili.

A causa di tutte queste differenze si può concludere che eventi di energia nel range 5.8 ca. 7.8 MeV osservato a LSD corrispondono ad energie visibili in acqua nel range 4.5 ca. 6.5 MeV (dove per esempio l'efficienza di K2 è inferiore a 0,1). È quindi facilmente giustificabile l'assenza di segnale a BST e IBM in contemporaneità col burst registrato a LSD per le piccole dimensioni o l'elevata soglia. La bassa statistica rende poi chiaramente incerte queste conclusioni.

Molti autori hanno evidenziato la difficoltà di interpretare il ritardo tra i due fiotti. Come si è visto però la non osservazione in Kamiokande di un numero di eventi consistente al tempo di LSD non è contraddittoria da un punto di vista strettamente sperimentale. Alcuni autori si sono limitati a scartare il segnale registrato a LSD, imputandolo ad una fluttuazione statistica.

La probabilità che si verifichino 5 eventi in un intervallo di tempo di 10 secondi in LSD è circa $3 \cdot 10^{-4}$. Inoltre, come è stato analizzato, bisogna considerare che i 2 eventi in K2 al tempo di LSD e quello iniziale del burst registrato in K2 sono separati rispettivamente di $4h\ 43m\ 13.2 \pm 2s$ e $4h\ 43m\ 5 \pm 2s$. Questi 2 eventi di K2 sono gli unici in un intervallo di 12 minuti, centrato sul tempo del segnale registrato a LSD. Il tempo tra il primo evento in LSD e IBM è di $4h\ 43m\ 4.58s$.

Calcolando la probabilità che si verifichi una coincidenza di eventi di questo tipo si ottiene che la probabilità totale che l'evento registrato a LSD sia non reale, ma dovuto ad una fluttuazione statistica, è pari a $2.5 \cdot 10^{-5}$, cioè molto piccola. L'evento registrato al Monte Bianco risulta quindi rafforzato dal segnale registrato in Giappone.

Considerando solo il segnale registrato a IMB e K2 i dati possono essere fittati con spettri termici con temperature ed energie totali rilasciate non in buon accordo tra loro, come si vede dalla seguente tabella

	K2	IMB
T (MeV)	2.8 ± 0.3	4.6 ± 0.7
E_{tot} (10^{53} erg)	2.9 ± 0.6	$1.5 \pm 1.2/-0.6$

I valori che si ottengono dai dati del Monte Bianco (e tenendo conto che non si è visto un burst consistente in Kamiokande) portano a stimare una $T = 0.9 + 0.5/-0.2$ MeV ed un'energia totale rilasciata di $1.8 \pm 1.2 \cdot 10^{54}$ erg, al limite della massima energia di legame per una stella di neutroni ($6 \cdot 10^{53}$ erg).

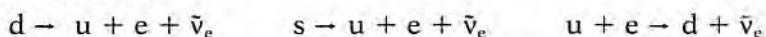
8) MODELLI NON STANDARD

Diversi scenari sono stati proposti per risolvere questi problemi che sorgono dall'interpretazione dei dati.

(1) La stella progenitrice diventa prima una stella di neutroni e successivamente collassa in un buco nero. I due eventi sono distanziati di qualche ora. È stato trovato un significativo accordo tra le previsioni teoriche e quelle sperimentali per l'emissione neutrinica del secondo burst. Se questo scenario fosse vero, non dovrebbe essere scoperta una sorgente intensa di raggi X dove si trovava la stella, pulsante o no.

(2) Una variante di questa ipotesi (da noi proposta) nasce dall'osservazione che poco si sa del comportamento della materia barionica a temperature e pressioni elevate come quelle che si verificano durante un collasso. Witten ha per primo postulato la possibilità dell'esistenza di stelle a *quark matter*, uno stato della materia ove i quark sono deconfinati. Questo stato della materia può essere pensato come un gas di Fermi di quark u, d e s e di qualche elettrone (per garantire la neutralità totale della carica).

L'equilibrio chimico tra i tre tipi di quark è mantenuto dalle seguenti reazioni:



È quindi possibile supporre che sia rivelabile a Terra un segnale della conversione in materia strana. Ogni neutrone convertito libera circa 20 MeV e vengono rilasciati in tutto $3 \cdot 10^{58}$ MeV di energia, irradiata in neutrini, fotoni e coppie $e^+ e^-$, ma solo i neutrini possono uscire dalla stella.

Lo scenario è allora quello della formazione, durante il primo collasso di un «seme» di materia strana, che progressivamente si espande verso l'esterno. Significativamente tale scenario può prevedere dei tempi scala di qualche ora. In LSD 42 minuti prima del burst di 5 eventi e 2h e 10m dopo sono stati registrati altri due segnali di 4 e 3 eventi ciascuno in un intervallo di tempo rispettivamente di 57s e 0.5s. Il quadro completo degli eventi registrati a LSD dà indicazione che l'emissione neutrinica segue tempi scala di qualche ora. Se si è formata una stella strana potrebbe essere visibile una pulsar. Nel 1989 era stata segnalata l'osservazione della pulsar della SN con un periodo di circa 0.5 ms. Ciò era una prova indiretta di questo scenario in quanto una pulsar costituita da neutroni sarebbe disintegrata dalle forze di marea associate a velocità di rotazione così elevate mentre una stella strana non si sarebbe disintegrata. Tale osservazione è stata però recentemente smentita (1989).

Permangono poi ovviamente dubbi sull'esistenza delle stelle strane, date le incertezze teoriche sul comportamento della materia a tali pressioni.

(3) Berezhinsky, Castagnoli, Dokuchaev e Galeotti, partendo da un'analisi dei dati sperimentali hanno invece osservato come sia possibile ridurre il numero di eventi previsti in Kamiokande suggerendo uno spettro degenerare per i neutrini emessi:

$$\frac{dn}{dE} = A \frac{E^2}{\exp(E/\tau - \mu) + 1}$$

dove τ è espressa in MeV e μ è il potenziale chimico adimensionale. La presenza di un potenziale chimico diverso da zero implica una condizione di disequilibrio nelle reazioni che dovrebbero garantire l'equilibrio termico nell'irraggiamento dei neutrini. I valori che meglio descrivono i dati (τ ca. 0.5 MeV e μ ca. 12) comportano appunto una bassa densità di equilibrio dei positroni. Vengono emessi pochi neutrini μ e τ (prodotti solo attraverso il canale e^+ e $\nu \bar{\nu}$). Queste ipotesi si traducono quindi in una drastica riduzione dell'energia totale rilasciata attraverso queste due specie neutriniche. Il ritardo tra i due burst viene spiegato nel modo seguente: la stella, soggetta ad una forte rotazione durante il collasso diventa uno sferoide appiattito, e si rompe in due pezzi, di massa M ca. $20 M_\odot$ e m ca. $1 \div 2 M_\odot$. La componente più massiva collassa in un buco nero e produce il primo burst. Il frammento più piccolo orbita attorno alla componente più massiva fino a che vi precipita. La materia assorbita dal buco nero produce il secondo burst.

In modo del tutto indipendente Hillebrandt et al. hanno proposto come parametro per descrivere lo spettro di emissione dei neutrini proprio un potenziale chimico adimensionale, partendo da risultati ottenuti con una simulazione. La forma degli spettri, rispetto a quelli di corpo nero, presenta un restringimento attorno al picco ed un innalzamento della componente di bassa energia rispetto a quella di più alta energia, che risulta fittabile introducendo opportuni valori del potenziale chimico μ .

9) CONCLUSIONI

La SN 1987A ha posto in evidenza come il modello standard delle Supernova sia inadeguato ad interpretare i dati sperimentali.

In particolare, per ciò che riguarda l'emissione neutrinica vanno sottolineati i seguenti punti:

1) La durata temporale dell'emissione è probabilmente più estesa di quanto si pensasse. Inoltre anche i dati sperimentali delle coincidenze tra rivelatori sotterranei e di onde gravitazionali indicano emissioni su lunghi tempi scala.

2) Una distribuzione di Fermi - Dirac non descrive bene l'effettiva forma dello spettro emesso: il numero di eventi attesi va quindi calcolato utilizzando sia lo spettro standard sia quello con un potenziale chimico diverso da zero.

3) Le correlazioni tra rivelatori di neutrini e di onde gravitazionali suggeriscono una fenomenologia di collasso più complicata di quella standard con semplice formazione di stella a neutroni.

4) Anche le osservazioni ottiche di tipo tradizionale danno una curva-luce (cioè una variazione della luminosità della SN198 a) completamente diversa da quella ottenibile dalle supernovae di tipo SN1 ed SN2 osservate nella nostra ed in altre galassie.

5) Le osservazioni con raggi X, UV, IR, radio non sono di immediata interpretazione con il modello standard.

6) Sarà molto importante vedere nei prossimi anni se apparirà una pulsar nel punto di collasso. Anche le fotografie che potrà fornire la stazione spaziale Hubble saranno di grande aiuto per l'interpretazione corretta dell'evento SN.

Il quadro generale del collasso stellare richiederà ancora decenni di lavoro per essere chiarito. Naturalmente sarà necessario ampliare gli apparati e migliorare le tecnologie.

La fisica italiana sta facendo uno sforzo notevole in questa direzione con la realizzazione del Laboratorio del G. Sasso che affianca, dopo venti anni, quello del M. Bianco.

L'esperimento LVD che stiamo costruendo con una collaborazione Italia-USA-URSS sarà pronto tra quattro/cinque anni, ed essendo più grande di quello LSD in funzione da un decennio nel M. Bianco (avrà ben 2000 tonnellate di scintillatore!) potrà osservare i futuri collassi di stelle sia nella nostra Galassia che nelle Nubi di Magellano con una statistica di neutrini molto ricca, dal 2000 in poi.

Comunque nei mille anni trascorsi dalla cronaca di Giovanni Veneto ad oggi, un certo progresso è stato fatto nella conoscenza delle «stelle ospiti» osservate dagli antichi nostri colleghi astronomi cinesi, coreani, arabi e dai monaci europei. Ancora molti problemi sono però aperti. La morte delle stelle resta ancora un difficile problema da studiare.

E intanto anche molti altri problemi restano irrisolti malgrado il progresso della civiltà. Come scriveva Alì ibu Ridwan nel 1006 all'apparire della SN-Lupus anche oggi, all'apparire della SN987A «...capitarono incidenti ai re delle due città sante di Mecca e Medina, ci fu siccità, fame e aumento dei prezzi e innumerevoli migliaia di persone morirono a causa delle armi, della fame e della pestilenza. E ciò durò per vari anni».

CARLO RUBBIA

ALLA RICERCA DELL'INFINITAMENTE PICCOLO

*Direttore del CERN - Ginevra
Premio Nobel per la Fisica*

Come siamo fatti? Di che cosa è costituita la materia? Sono domande che la scienza si pone fin dai tempi dell'antichità. Lo studio della costituzione della materia ha rappresentato da sempre una delle attività fondamentali dello spirito umano.

Fu il greco Democrito, nel quarto secolo avanti Cristo, a formulare in maniera precisa questa domanda. Egli descrisse un'esperienza ideale, quella di suddividere la materia in parti sempre più piccole. Si chiese se questo processo di divisione successiva avrebbe potuto continuare all'infinito o se invece si sarebbe arrivati ad un elemento ultimo, al di sotto del quale non avrebbe avuto più senso parlare di materia. Fece l'ipotesi che a questo interrogativo si potesse rispondere in modo affermativo. Per Democrito esisteva dunque un elemento base, un blocco o mattone fondamentale, l'atomo (atomo in greco vuol dire indivisibile). Così facendo, egli introdusse, per la prima volta, il concetto di *particella elementare* — il costituente ultimo della materia. Fu il primo passo razionale verso l'avventura dell'infinitamente piccolo.

L'idea — che un elemento di indivisibilità debba esistere — è più che mai attuale. Ma dai tempi di Democrito ad oggi sono successe molte cose. Nell'esplorazione della materia si sono trovati oggetti sempre più piccoli che sono stati dapprima celebrati come *elementari* per poi risultare costruiti, a loro volta, a partire da altri componenti ancora più piccoli. E a tutt'oggi la caccia è ancora aperta, anche se continuiamo a chiamare alcune delle particelle scoperte come *elementari*.

Ciò che noi chiamiamo oggi *atomo* non è quindi più una entità indivisibile. È, al contrario, un oggetto molto complicato, dotato di una ricca struttura interna. Siamo riusciti a entrare all'interno di questo micro-mondo e a spingere il nostro sguardo verso regioni

sempre più piccole dello spazio. Se l'atomo ha una dimensione di dieci alla meno otto centimetri, oggi siamo in grado di esplorare regioni che occupano uno spazio di dieci alla meno sedici centimetri. E il viaggio all'interno dell'atomo non è ancora finito. Pensiamo che le risposte ultime alle domande sulla struttura della materia si trovino a dimensioni ancora più piccole, a dieci alla meno trentadue centimetri. L'enorme strada percorsa fino ad oggi all'inseguimento del sogno di Democrito non rappresenterebbe quindi neppure la metà del percorso dal mondo microscopico alla chiave ultima della materia.

A partire dalla ipotesi della esistenza dell'atomo da parte di Democrito il concetto stesso di particella elementare si è dunque evoluto nel tempo. Di volta in volta gli uomini hanno dato l'attributo elementare a particelle via via più piccole. L'atomo oggi si può considerare elementare solo dal punto di vista della chimica, ma non è indivisibile ed è dotato di una ricca struttura interna. Una struttura che si chiarì lentamente tra la fine del secolo scorso e gli inizi del Novecento, con le scoperte successive dell'elettrone, del protone e del neutrone. Si pensò allora che fossero queste tre particelle gli ultimi mattoni della materia — ma non era così; non si era ancora arrivati al fondo della struttura atomica. Solo l'elettrone oggi è ancora considerato indivisibile.

I protoni e i neutroni invece, come comincio ad essere chiaro già alla fine degli anni cinquanta, non lo sono. La loro struttura è oggi spiegata per mezzo di particelle ancora più piccole — chiamate quark — molto curiose, come vedremo più avanti. L'attributo elementare perciò è concesso oggi all'elettrone e ai quark. Sono già state formulate teorie che ipotizzano l'esistenza di particelle ancora più piccole, i *preoni*, che determinerebbero la struttura degli elettroni e dei quark.

Per ora la loro esistenza è solo una ipotesi e non si possono nemmeno fare previsioni sugli sviluppi della teoria che li prevede. Si può però accennare ad alcuni problemi associati alla loro possibile esistenza. Se si ipotizzano oggetti ancora più piccoli di quelli che consideriamo elementari oggi, bisogna introdurre anche le forze nuove e straordinariamente potenti che li tengono uniti. In altre parole: se si vorrà davvero spiegare la struttura dell'atomo a partire dai preoni, bisognerà inventare concetti nuovi. Per questi — ed altri ancora — motivi, si assume che le particelle che oggi chiama-

mo elementari lo sono davvero. E anche se la fisica subatomica si evolverà in direzioni nuove, le particelle *elementari* di oggi rimarranno un termine di riferimento determinante. La ricerca dell'ultimo, più piccolo componente della materia — iniziata con Democrito — si può oggi perciò considerare almeno provvisoriamente conclusa.

*

Per addentrarsi nel mondo subatomico bisogna varcare una soglia molto importante che separa il mondo microscopico degli oggetti grandi dal mondo microscopico degli oggetti piccoli. A ognuno viene spontaneo pensare a una stella o a una galassia come grandi, a un atomo o a una particella come piccoli. Finora abbiamo usato questi termini nel loro senso più intuitivo e corrente. Ma nella scienza ogni termine deve avere una definizione *precisa*. È la meccanica quantistica che ci viene in aiuto per rispondere alla domanda: *Quale è la differenza, in termini scientifici, tra grande e piccolo?* Vedremo, poco più avanti, la risposta. Vale prima la pena di ricordare in breve che la meccanica quantistica ha rappresentato — nella ricerca di una descrizione appropriata del mondo subatomico — una rivoluzione filosofica della stessa importanza della relatività. Questa teoria, affermata nei primi anni del nostro secolo, descrive un mondo lontano dalle nostre esperienze quotidiane e usa concetti diversi da quelli a cui la nostra razionalità è abituata. Non è sorprendente quindi che a molti i fenomeni quantistici possano apparire, a volte, addirittura paradossali. Ogniqualvolta ci troviamo di fronte a un fenomeno nuovo, siamo immediatamente portati a descriverlo in termini di esperienze vissute. Fare riferimento a oggetti che conosciamo e utilizziamo nell'esperienza di tutti i giorni è inevitabile: è una reazione delle più naturali di fronte a situazioni a cui non siamo abituati. Questa possibilità ci viene a mancare quando parliamo dei fenomeni che avvengono alla scala atomica o inferiore. Ma non bisogna pensare per questo che la teoria quantistica sia un astratto meccanismo intellettuale utilizzato dagli scienziati e che non possa avere una influenza concreta nella vita di tutti.

Molte macchine sono diventate parte integrante della nostra tecnologia, come il laser e il transistor; funzionano proprio in base a principi quantistici. Sono macchine che, viste nel loro funzionamento complessivo, hanno un comportamento *classico* ma sono in-

vece basate, nella loro struttura profonda, su principi di meccanica quantistica. Il confine tra la meccanica classica e quella quantistica non è quindi così lontano come a prima vista potremmo immaginare. In elettronica, ad esempio, si sta andando verso la realizzazione di circuiti sempre più integrati che radunano da centinaia di migliaia a milioni di elementi di memoria su un singolo microchip. Se le dimensioni dei circuiti elettronici attuali venissero ridotte ulteriormente, anche solamente di un fattore dieci (ed è un obiettivo già in vista), la memoria elettronica dei computer comincerebbe ad avere fluttuazioni quantistiche e cioè a saltare spontaneamente da uno stato all'altro, cambiando, ad esempio, gli zeri in uni e viceversa, con conseguenze anche drammatiche nella vita di tutti i giorni (basta pensare agli uni e agli zeri del nostro conto bancario!).

*

Ma rispondiamo ora alla domanda che abbiamo posto precedentemente. Secondo la meccanica quantistica la differenza tra grande e piccolo si basa sul concetto di *osservabilità*. Un oggetto è *grande* se non viene influenzato dal processo che utilizziamo per osservarlo, un oggetto è *piccolo* se viene modificato dal processo di osservazione. Per chiarirlo ricordiamo che il metodo di osservazione per eccellenza è la luce. La luce non fluisce in modo continuo, come si immagina istintivamente. Essa, al contrario, viaggia in piccolissime goccioline, pacchetti, chiamati «*quanti*» di luce o *fotoni*. I quanti di luce sono tanto più grossi, hanno tanta più energia, quanto più piccola è la lunghezza d'onda della luce stessa. I pacchetti di luce rossa, ad esempio, sono meno carichi di energia dei pacchetti di luce blu, perché questi ultimi hanno lunghezza d'onda più piccola. I pacchetti di luce blu sono a loro volta meno energetici dei pacchetti di raggi X, che hanno una lunghezza d'onda ancora più piccola. Se la luce arriva su un oggetto a pacchetti — a grumi — è chiaro che, tanto più l'oggetto è piccolo, tanto più verrà disturbato dalla pioggia di fotoni che gli inviamo contro per vederlo, fino al punto che la luce, colpendo l'oggetto, lo modificherà in senso distruttivo.

Supponiamo, ad esempio, di voler esaminare un atomo con pacchetti di raggi X (che avendo una lunghezza d'onda piccola, aiutano a vedere molto in dettaglio). Cosa succede? Il pacchetto di raggi X urta l'elettrone che circola intorno al protone e lo lancia fuori

dall'atomo. Il risultato è che siamo riusciti a vedere l'elettrone, perché il fotone di luce lo ha urtato, ma non abbiamo più l'atomo, perché è stato distrutto dalla violenza dell'urto. *Il sistema è stato modificato dalla osservazione.* È quindi ovvio che, a dimensioni *piccole*, bisogna tenere conto degli effetti della osservazione sul sistema che stiamo studiando.

Ben diversa è la situazione nel mondo degli oggetti *grandi*. La struttura di un sistema fisico macroscopico non viene modificata apprezzabilmente dal processo di osservazione. Un sistema meccanico del mondo macroscopico della nostra esistenza quotidiana prosegue inalterato il suo movimento indipendentemente dal fatto che sia sotto osservazione. Il moto della Terra intorno al Sole, ad esempio, non è certamente influenzato dal fatto che gli uomini lo guardano: le perturbazioni causate dalla osservazione sono troppo piccole rispetto alle dimensioni della Terra e del Sole per avere su di esso un'influenza significativa.

*

Abbiamo così chiarito, in modo intuitivo, una prima differenza fondamentale tra il nostro abituale modo di pensare e il nuovo atteggiamento mentale che bisogna adottare nel mondo microscopico. Una espressione più precisa di tutto ciò è contenuta in quelle che vengono chiamate *relazioni di indeterminazione*, introdotte dal fisico tedesco Werner Heisenberg nel 1927 per spiegare il funzionamento dell'atomo di idrogeno.

*

All'inizio del secolo, il fisico neozelandese Ernest Rutherford aveva suggerito come modello della struttura atomica una riproduzione in miniatura del sistema planetario. Al centro era posto il nucleo carico positivamente e intorno ruotavano gli elettroni, carichi negativamente, come pianeti intorno al Sole. Il modello, basato su una semplice analogia con un sistema fisico macroscopico mise in serio imbarazzo i fisici, perché conteneva una evidente contraddizione. Gli elettroni, particelle cariche, ruotano intorno al nucleo grazie alla forza elettrica, che crea attrazione tra cariche di segno contrario. I pianeti invece ruotano intorno al Sole grazie alla forza gravitazionale che si esercita tra le masse. Le forze gravitazionale

ed elettrica variano ambedue come l'inverso del quadrato della distanza; quindi — a parte le questioni di scala — le equazioni del moto e quindi le traiettorie seguono leggi identiche. Già dalla fine del secolo scorso si sapeva inoltre che un elettrone, quando percorre un'orbita circolare, emette luce. È una diretta conseguenza delle equazioni della elettrodinamica: una carica elettrica che non si muove di moto rettilineo uniforme, — accelerata o decelerata irraggia. Lo si vede nel fenomeno di scarica di un tubo al neon, dovuto al fatto che gli elettroni, decelerati dal movimento attraverso il gas, emettono luce. E lo si vede anche in appariscenti fenomeni del cielo. La nebulosa del Granchio, ad esempio, deve la sua bella luminosità azzurrina proprio all'irraggiamento degli elettroni del gas che la circonda, che vengono incurvati dai campi magnetici. La conseguenza di questo fenomeno, per la consistenza del modello atomico di Rutherford, è evidente. Se gli elettroni percorrono un'orbita circolare intorno al nucleo *devono* irraggiare. Quindi perdono velocità e si avvicinano sempre di più al nucleo, fino a schiacciarsi contro di esso.

Il modello dell'atomo, così formulato, non funziona. Come uscire dalla contraddizione? La risposta viene ancora dalla meccanica quantistica ed è una risposta molto sofisticata e profonda (che mette alla prova la nostra razionalità). Consiste nell'affermare che non ha più senso parlare di orbita dell'elettrone, perché essa non è osservabile. (Ricordate l'effetto distruttivo della osservazione?). Se non c'è orbita non c'è accelerazione o decelerazione, nel senso che questi termini hanno nella fisica classica. E infine non c'è nemmeno irraggiamento. Il problema creato dall'accettazione del modello planetario dell'atomo non si pone. Scompare. Viene risolto con un capovolgimento del nostro abituale modo di pensare.

*

Come si vede il concetto di osservabilità nella fisica moderna ha assunto un ruolo particolare e molto diverso da quello che occupava nella fisica classica. Nella fisica moderna l'osservabilità è diventata una condizione «necessaria» perché si possa parlare di fenomeno fisico; ciò significa che un fenomeno fisico *non ha senso* se non è, almeno in linea di principio, osservabile; se non esiste cioè un meccanismo con cui sia possibile — anche solo teoricamente —

la misura della grandezza fisica che lo rappresenta. Per capire come la posizione della fisica moderna si discosti da quella della fisica classica, si può pensare di avere di fronte una scatola che resta sempre chiusa e che non si può — nemmeno in linea di principio — aprire. Ebbene, secondo la fisica classica, è perfettamente lecito parlare del contenuto della scatola; secondo la fisica moderna invece, il contenuto della scatola non è un concetto che entra nella descrizione della natura.

Ritorniamo ora al principio di indeterminazione di Heisenberg. L'incertezza e l'indeterminazione non hanno a prima vista una funzione diretta nel mondo fisico — che è il dominio della ricerca sperimentale — basato su misure di grandezze fisiche e che, per la loro stessa natura, hanno sempre valori numerici determinati.

Con l'avvento della meccanica quantistica si è dovuto rivedere, almeno in parte, questo punto di vista. Il principio di indeterminazione non invalida, ad esempio, i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, ma consente che una violazione di tali principi passi *inosservata* qualora venga rettificata con sufficiente prontezza. Il principio di indeterminazione afferma che tali violazioni possono essere tollerate se non durano troppo a lungo o se non si estendono a distanze troppo grandi. In aggiunta ai processi fisici *reali*, si devono quindi aggiungere tutto un mondo nuovo di processi *virtuali*, la maggioranza dei quali — come vedremo — accadono continuamente e spontaneamente.

Ma anzitutto che cosa intendiamo con *troppo* a lungo e che cosa vuol dire *troppo* distante? Le risposte dipendono dall'entità della violazione apparente: quanto maggiore è lo squilibrio, nell'energia e nella quantità di moto del processo *virtuale*, tanto più rapidamente esso deve sparire. Fenomeni di energia arbitrariamente grande possono quindi avere luogo *spontaneamente*, purché l'equilibrio sia ristabilito in un tempo sufficientemente breve. In termini precisi il prodotto dello squilibrio energetico moltiplicato per il tempo di intervento non può essere maggiore della costante di Planck, che è pari a $1.054 \cdot 10^{-27}$ erg $\times$ sec, un numero piccolissimo rispetto a fenomeni della vita di tutti i giorni, ma molto significativo per i processi atomici, nucleari e subnucleari.

*

Quante sono le particelle elementari? Quelle utilizzate per la costruzione della materia sono solamente tre: i due quark chiamati up e down che formano il protone e il neutrone, e l'elettrone. È stupefacente pensare che la infinita complessità e varietà del mondo che ci circonda sia realizzata usando solo tre componenti, tre microscopiche tavolette del Lego che riescono, con le loro infinite combinazioni, a formare l'universo e noi stessi, ed è ancora più stupefacente pensare che queste tre componenti elementari sono completamente prive di struttura. Cosa significa? Cerchiamo di chiarirlo con una analogia. Le particelle elementari, per la loro funzione di mattoni fondamentali della materia, si possono paragonare alle cellule, i mattoni fondamentali della materia vivente. Ma c'è una enorme differenza tra particella e cellula. La cellula è un microcosmo «pieno». Ha una struttura contenente il citoplasma, le informazioni genetiche; una struttura che racchiude ed esprime la sua identità, la sua storia. Una particella elementare, al contrario, non ha struttura, non ha «interno». Non ha storia. Non ha memoria. Le particelle sono perciò più correttamente paragonabili a punti matematici, oggetti ideali privi di parti. Non cercate di pensare a una particella come se fosse una minuscola pallina da ping pong. Bisogna dimenticare le comode analogie con gli oggetti macroscopici del mondo in cui viviamo (Ricordate? Un atomo *non* è un sistema planetario!). Le particelle sono entità matematiche. Sono, secondo la meccanica quantistica, *funzioni d'onda*.

Questo non impedisce loro di avere numerose proprietà, chiamate «numeri quantici», che le caratterizzano con precisione. Sono, ad esempio, la massa, la carica elettrica o, nel caso dei quark, il colore. Vi chiederete «dove» le particelle contengono queste proprietà, se è vero che non hanno dimensione. È una domanda del tutto lecita, ma è molto difficile trovare una risposta. Siamo di fronte, ancora una volta, a un paradosso dell'infinitamente piccolo. Difficile da accettare è anche la totale indistinguibilità delle particelle tra di loro. È una conseguenza della loro mancanza di struttura che le rende prive di individualità e di storia. Due particelle non sono, nemmeno in linea di principio, distinguibili tra loro. Nell'atomo di elio, ad esempio, ci sono due elettroni. Ebbene, non avrebbe nessun senso chiamarli «elettrone uno» e «elettrone due». Per ogni configurazione in cui l'elettrone uno è in un punto e il due in un altro, esiste una configurazione del tutto analoga in cui gli elettroni sono

scambiati. È chiaro allora che la distinzione tra le due particelle all'interno dell'atomo di elio è un ulteriore fenomeno non rivelabile sperimentalmente. Non ci sono l'elettrone A e l'elettrone B, ci sono due elettroni e basta. La impossibilità di dare individualità alle particelle è anche, naturalmente, riflessa dal formalismo matematico utilizzato nella meccanica quantistica; all'interno delle equazioni che descrivono il mondo subatomico, due particelle identiche sono rappresentate in modo indistinguibile all'interno della quantità matematica che le rappresenta.

*

Il vuoto è tradizionalmente considerato la condizione di totale *assenza di materia*. Fino dai tempi antichi il concetto di vuoto ha affascinato gli studiosi dei fenomeni naturali. Evangelista Torricelli spiegava la salita dell'acqua nei tubi come conseguenza del principio che «La Natura ha orrore del vuoto». Oggi basta sapere dell'esistenza della pressione atmosferica per convincerci che questo fenomeno è perfettamente ovvio. Pensando al vuoto ci viene del tutto spontaneo il riferimento allo spazio interstellare e soprattutto intergalattico. Tuttavia anche queste immense regioni dell'Universo, che a prima vista ci appaiono come prive di tutto, sono di fatto popolate da un gran numero di fenomeni fisici che sono — come vedremo — affascinanti e complessi.

Prima di tutto c'è la cosiddetta radiazione nera: un grandissimo numero di segnali elettromagnetici — soprattutto nella regione delle Microonde — che è uno dei resti più appariscenti del Big Bang, l'eco dell'esplosione iniziale che ha dato origine all'Universo come noi lo conosciamo. Questa radiazione — come ogni altro tipo di onda elettromagnetica — è in realtà formata da un gran numero di corpuscoli senza massa a riposo che quindi viaggiano con la velocità della luce, chiamati fotoni. Come abbiamo già ricordato precedentemente, l'energia trasportata da ciascuno di questi fotoni è tanto più grande quanto più alta è la frequenza della radiazione o, equivalentemente, tanto più corta è la sua lunghezza d'onda. Anche nelle regioni più recondite e più vuote dell'Universo, questa radiazione è onnipresente: un miliardo di fotoni in ogni centimetro cubo dello spazio che chiamiamo vuoto! È credenza diffusa che l'Universo sia dominato dalla materia, stelle, pianeti, gas, polveri, eccetera.

Niente di più falso: i fotoni dell'Universo sono miliardi di volte più numerosi dei nuclei e degli elettroni che formano ogni forma di materia. Essi sono rivelabili senza difficoltà perché sia sotto forma di luce, che di segnali radio o di raggi X, sono prontamente assorbiti dalla materia.

Ma lo spazio non è dominato solamente dai fotoni. Sappiamo ad esempio che l'Universo tutto intero brulica anche di altre particelle molto meno visibili, chiamate *neutrini*. Che cosa è un neutrino? In parole semplici è come un fratello minore e meno dotato dell'elettrone: non ha carica, e quindi è elettricamente inattivo, ha massa piccolissima o probabilmente zero come il fotone. Non è assolutamente assorbito dalla materia che può attraversare impunemente. Ciò nonostante, è estremamente «popolare» nei fenomeni cosmici che ne producono in grandissima quantità. Il Sole, ad esempio, emette più energia sotto forma di neutrini di quanto ne emetta sotto forma di calore. Ogni centimetro quadrato sul nostro pianeta è bombardato da un miliardo di queste particelle ogni secondo! La luce solare si spegne durante la notte. Invece i neutrini — che possono attraversare impunemente tutta la massa del nostro pianeta — continuano a pioverci addosso indisturbati. A differenza del calore che ci proviene dalla superficie del Sole arroventata a circa 5.000 Gradi centigradi, i neutrini vengono direttamente dal centro della Stella dove la temperatura sorpassa i 2.000.000 di Gradi: lo spessore del Sole non riesce a fermarli. Mentre il calore che ci riscalda oggi è stato prodotto più di un milione di anni fa — e ha impiegato questo tempo a propagarsi dal centro alla periferia della Stella — i neutrini arrivano sul nostro pianeta con il breve ritardo di circa otto minuti necessario a coprire la distanza Sole-Terra.

Involontariamente l'uomo è diventato un grande produttore di neutrini. I reattori nucleari sono delle sorgenti potentissime di queste particelle. L'energia emessa sotto forma di neutrini è confrontabile all'energia prodotta sotto forma di corrente elettrica. Anche per questi neutrini non c'è barriera che possa arrestarli. Escono indisturbati dalla pesante schermatura del reattore disperdendosi nello spazio cosmico, fino al di là del nostro sistema solare e della Galassia. È stata proprio l'utilizzazione di un grosso reattore nucleare come sorgente che permise di rivelare nel 1956, dopo grandissimi sforzi, la prima traccia di questa elusiva particella.

Un rivelatore di 380 tonnellate di materiale — posto a grandi profondità sotto terra per schermare l'apparato da effetti spuri — ha molto probabilmente osservato alcuni anni fa anche il segnale dovuto ai neutrini provenienti dal Sole. Fu questa una grande sorpresa: i neutrini rivelati erano all'incirca un terzo di quanto era previsto in base alla quantità di calore emessa dal Sole. Dove sono gli altri? O non abbiamo capito niente del Sole oppure i neutrini mancanti sono, per così dire, «spariti» per strada.

Potentissime sorgenti di neutrini esistono anche al di fuori del nostro sistema solare, della nostra Galassia e oltre. Questo ci porta all'anno 1050 dC quando gli astronomi cinesi annotarono un fenomeno straordinario: una stella brillantissima era apparsa improvvisamente nel cielo, per sparire rapidamente alcune notti dopo. Oggi, esplorando con potenti telescopi quella regione del cielo, vediamo una diffusa nube azzurra — i resti della stella allora esplosa — la Crab Nebula. Di questo tipo di fenomeni — conosciuti con il nome di Supernovae — ne sono stati registrati sei esempi dall'antichità a oggi: sono la improvvisa e definitiva distruzione di un sistema simile al nostro Sole. Ciò avviene con una reazione — che dura appena qualche secondo — durante la quale *tutti* i protoni della stella si fondono con gli elettroni, dando origine a un neutrino e a un neutrone. La stella si disintegra in una nuvola fantasma di neutrini — il cui numero è un'astronomica cifra di uno seguito da cinquantaquattro zeri — che si disperdono negli spazi stellari alla velocità della luce. Restano indietro i neutroni, compattati in una pallina densissima del raggio di alcuni chilometri, pazzamente in rotazione sul proprio asse. Un tale oggetto — chiamato pulsar — è oggi ben visibile tra i resti della Supernova nella Crab Nebula. È molto probabile che anche il nostro sistema solare diverrà un giorno lontano una Supernova.

Altre sorgenti sconosciute di neutrini sono probabilmente presenti nell'Universo. Il centro della nostra Galassia è con tutta probabilità sede di fenomeni potentissimi e misteriosi, coperti ai nostri sguardi da una densa nuvola di polveri cosmiche. Quanti neutrini vengono emessi? È questo un problema ancora aperto, che attende una risposta sperimentale.

Negli istanti del Big Bang in cui si formarono i fotoni della radiazione a Microonde di fondo cosmico, vennero emessi anche un

numero forse altrettanto grande di neutrini ancora oggi presenti nello spazio. La loro energia residua è piccolissima e essi rimangono inaccessibili alle attuali tecniche sperimentali.

*

Il cosiddetto vuoto cosmico è dunque tutt'altro che privo di contenuto. La radiazione elettromagnetica e i neutrini non sono ancora tutto. Come facciamo ad esserne così sicuri? Ogni forma di materia quando è in grandi quantità, produce effetti gravitazionali, cioè esercita un'attrazione sugli oggetti circostanti. Nel movimento dei corpi celesti l'attrazione gravitazionale è in generale controbilanciata dalla forza centrifuga. Si può pensare a questa forza come ad un grande filo invisibile che trattiene i corpi sulla loro orbita. La nostra Galassia — come la gran parte delle Galassie — è una specie di grossa spirale di dieci miliardi di soli trattenuta nel suo movimento dalla forza gravitazionale. E qui le cose si complicano: il tipo di movimento che viene osservato nella Galassia non torna con le predizioni, basate sulla distribuzione osservata delle masse solari. Quindi, o mettiamo in discussione la validità della legge di Newton, oppure *ci deve essere qualcosa d'altro*, che — restando invisibile — contribuisce all'aumento della forza gravitazionale. E di questa *materia invisibile* ce ne vuole molta, moltissima... almeno dieci volte tanto quella visibile! Non solo, ma questa osservazione si ripete anche per altre galassie: è un fenomeno che riguarda l'Universo intero.

È veramente possibile che nonostante la molteplicità di quello che vediamo intorno a noi, siamo in grado di *percepire* solamente alcuni percento della materia dell'Universo? Siamo di fronte a un mistero di proporzioni colossali. Per risolverlo ci potrebbe venire in aiuto la moderna fisica delle particelle elementari. Secondo ipotesi teoriche ancora da verificare sperimentalmente — le cosiddette teorie supersimmetriche — ad ogni particella conosciuta e rivelabile ne corrisponderebbe un'altra, fantasma sfuggente come il neutrino. Queste nuove particelle sarebbero state prodotte in abbondanza insieme alla materia ordinaria nell'istante del Big Bang. Alcune di esse sono instabili, e quindi disintegrano rapidamente. Altre invece, altrettanto stabili che la materia ordinaria, sarebbero presenti oggi come un'incredibile nuvola invisibile che ci attraversa e che noi non sappiamo vedere o rivelare in alcun modo.

E non siamo alla fine dei misteri racchiusi in quella cosa che credevamo così semplice e che chiamiamo ingenuamente il *vuoto*. Anche se riuscissimo a spazzare via tutte le particelle che vi sono alloggiare — visibili e invisibili —, resterebbe ancora qualcosa d'altro e ben più recondito. Riparliamo per un momento del principio di Heisenberg. Abbiamo spiegato come il principio di indeterminazione non invalidi i principi di conservazione dell'energia e della quantità di moto, ma consenta che una loro violazione passi inosservata qualora venga rettificata con sufficiente prontezza. Tali violazioni possono essere quindi tollerate se non durano troppo a lungo o se non si estendono a distanze troppo grandi. Come conseguenza, accanto ai processi fisici «reali», esistono nuovi processi «virtuali», che accadono, per la maggior parte, continuamente e spontaneamente. La presenza di un numero infinitamente grande di stati virtuali possibili e a cui la natura fa continuamente accesso complica enormemente la struttura dell'Universo. E anche il vuoto — a causa dei processi virtuali — non è più semplicemente uno spazio privo di materia: ha una struttura molto complicata, è pieno di vita, brulicante di attività.

Guardare il vuoto con gli occhi della meccanica quantistica è come guardare un liquido in perpetua ebollizione dove nuove bollicine vengono continuamente create per sparire subito dopo. Nel vuoto c'è *tutta* la fisica: sono contenute tutte le leggi che governano la costituzione del nostro mondo e possono venire create tutte le particelle conosciute, anche quelle di cui noi stessi siamo costituiti. Tutte le particelle che si possono formare *virtualmente* nel vuoto sono però accuratamente sottratte alla nostra osservazione; ogni particella può comparire e scomparire solamente nell'intervallo di tempo ben preciso che le è consentito dal principio di indeterminazione. Nel vuoto si possono creare spontaneamente anche particelle cariche come l'elettrone, ma alla condizione che compaiano in coppie associate di particelle a antiparticelle; nel caso dell'elettrone in coppie di elettroni e positroni — o antielettroni —.

Questi processi hanno profonde conseguenze sulle teorie fisiche. Ad esempio sull'elettromagnetismo. Si consideri ciò che accade quando un elettrone è circondato da una nuvola di coppie virtuali elettrone-positrone. Le cariche virtuali si polarizzano: le cariche negative virtuali vengono respinte, mentre le cariche positive sono attratte dalle cariche negative dell'elettrone reale. Il risultato è

che l'elettrone si circonda a brevi distanze di una nube di cariche positive che schermano in parte la sua carica. Da questa analisi deriva che la carica «nuda» dell'elettrone è molto maggiore di quella misurata. Se si potesse misurare la carica dell'elettrone a brevissime distanze si scoprirebbe che essa aumenta entrando nello stato dello schermo. Una particella elementare — come l'elettrone — è nella descrizione usuale considerata come puntiforme, cioè è possibile avvicinarsi a distanze arbitrariamente piccole dal centro di dimensione infinitesima.

La conseguenza di questa ipotesi è che per raggiungere la carica «nuda» bisogna arrivare a distanza zero: il risultato di questa estrapolazione è che la carica nuda diviene infinita! Non solo poi la carica «nuda» risulta infinitamente grande, ma anche la repulsione elettrostatica alle vicinanze immediate dell'elettrone genera un'auto-energia che è pure infinita, e che quindi rende la massa totale anche infinita; questa da sola predirebbe l'elettrone come infinitamente pesante! Sembra una concatenazione di ragionamenti assurdi, che ci rendono molto sospettosi nei confronti della meccanica quantistica. Ma non deve essere così in realtà, la carica «nuda» di un elettrone non è osservabile sperimentalmente, come il contenuto della scatola che rimane sempre chiusa di cui abbiamo parlato precedentemente. Di conseguenza, secondo la meccanica quantistica, non ha senso parlarne. La carica nuda «non esiste». È la stessa via d'uscita — il rifiuto di parlare di ciò che sfugge all'osservabilità diretta — adottato nel caso dell'orbita dell'elettrone, può sembrare che la meccanica quantistica, nella sua sfida alla nostra razionalità, «giochi con il fuoco». Lo pensava Einstein che, all'incontrario di Bohr, rimase sempre incredulo sulla validità di questo genere di ragionamenti. Ma, ai nostri giorni, forse l'unico e più convincente argomento per accettarli è che essi predicono correttamente e accuratamente una grandissima varietà di fenomeni fisici. Non possiamo che prenderne atto: come in molte cose della vita, il successo dà sempre ragione!

*

Nel vuoto è racchiuso anche il meccanismo di trasmissione delle forze. Lo spazio tra la Terra e il Sole è ad esempio la sede del meccanismo che «comanda» alla Terra di seguire con infinita preci-

sione la sua orbita attorno al Sole. Le forze possono agire anche a distanze molto grandi e si propagano attraverso il vuoto. Assieme alle particelle elementari, esse costituiscono l'ingrediente fondamentale dell'Universo. Grazie alle forze, le particelle elementari formano strutture complesse: nucleoni, nuclei, atomi, molecole, stelle, galassie e così via. Le forze costituiscono forse il capitolo più affascinante della storia della struttura della materia. Tutto quello che ci circonda è cementato dall'azione sottile e precisa di questo meccanismo. Ma che cosa è veramente la forza?

La forza più comunemente sperimentata è la *gravità*. Abbiamo l'esperienza del peso, poiché i quark e gli elettroni che si trovano nel nostro corpo interagiscono continuamente con i quark e gli elettroni che costituiscono il nostro pianeta.

Di gran lunga più rilevante nella nostra vita quotidiana è la *forza elettrica*, caratterizzata nella sua forma più elementare dall'interazione a distanza tra due cariche elettriche, descritte dalla ben nota legge di Coulomb. Tanto nel caso delle forze elettriche che di quelle gravitazionali e per sorgenti di piccole dimensioni, la forza varia come l'inverso del quadrato della distanza. Vi sono però fra loro differenze importanti: la forza elettromagnetica è molto più potente e, a differenza della gravitazione, può essere sia attrattiva che repulsiva (le cariche possono essere positive o negative). In pratica, la forza di gravità emerge nei fenomeni naturali solamente perché la cancellazione tra le cariche all'interno della materia è incredibilmente esatta, cioè le cariche degli elettroni e dei protoni sono esattamente eguali ed opposte. Invece, il campo elettrico prodotto dalle cariche all'interno della materia — a distanze dell'ordine di quelle tra gli atomi — non è esattamente bilanciato e quindi gli effetti si fanno sentire. Ad essi sono dovute tutte le proprietà meccaniche e chimico-fisiche della materia.

Sono stati osservati in natura altri due tipi di forze. Esse si manifestano esclusivamente a distanze sub-microscopiche. È in gran parte per questo motivo che esse sono state investigate in maniera completa solo recentemente. Queste due forze sono schematicamente indicate come la forza *forte* e la forza *debole*. La prima, cioè l'*interazione forte*, si manifesta quando due *quark* si vengono a trovare ad una distanza dell'ordine del diametro di un protone. A queste distanze gli effetti delle interazioni forti superano largamente

quelli dovuti alle cariche elettriche delle particelle elementari. Come già menzionato, i quark esistono in tre stati differenti. Questo grado di libertà interno a tre valori, chiamato *colore*, viene oggi considerato la sorgente delle interazioni forti. L'effetto più vistoso di tale forza è la costruzione dei nuclei, partendo dai quark. L'energia termonucleare ad esempio è derivata direttamente dall'utilizzazione di tale forza da parte dell'uomo.

L'altro tipo di forze, le *interazioni deboli*, diventano importanti quando *quark*, *elettroni* o *neutrini* si trovano a distanze ancora più piccole, dell'ordine di un millesimo del raggio di un protone. A tali distanze, le forze elettromagnetiche e deboli hanno effetti paragonabili. Questo non è casuale: come vedremo si è riusciti a mettere in evidenza un legame strettissimo tra queste due forze apparentemente così diverse.

Le interazioni forti e le interazioni deboli (più in generale tutti i campi di forze), oltre che ad esercitare degli effetti cinematici classici, come ad esempio i ben noti effetti macroscopici dell'elettromagnetismo e della gravità, possono manifestarsi anche come *trasformazioni* tra particelle. Ad esempio nel caso delle forze deboli la *radioattività* consiste in reazioni in cui un neutrone si trasforma in protone o viceversa, con l'emissione di una coppia elettrone-neutrino.

*

Quale è il meccanismo che fa sì che le forze si percepiscano lontano dagli oggetti che le causano? Al giorno d'oggi per spiegare il meccanismo responsabile delle forze si ricorre invece alla Meccanica Quantistica. Secondo la descrizione universalmente accettata, anche effetti macroscopici e a grande distanza sono dovuti in realtà alla manifestazione di effetti *quantici*, cioè allo scambio di particelle «virtuali» caratteristiche del tipo di forza. L'interazione di due particelle può essere riassunta dicendo che esse si scambiano una terza particella, detta *quanto* della forza. Per esempio quando due elettroni, ciascuno circondato da un campo elettromagnetico, si avvicinano l'uno all'altro per poi riallontanarsi, si dice che essi hanno scambiato un fotone, il quanto del campo elettromagnetico. Il quanto scambiato ha soltanto un'esistenza effimera cioè è una particella «virtuale» e quindi irrilevabile. Per capire meglio come

l'azione a distanza di queste particelle separatamente inosservate, o «*virtuali*» possa essere compatibile con la risultante dei loro effetti cioè la forza, ricordiamo che secondo la meccanica quantistica esistono limitazioni *intrinseche* al processo fisico di osservazione. Quindi il quanto della forza, una volta emesso, deve venire riassorbito o dalla stessa particella o da un'altra entro il tempo permesso-gli dal principio di indeterminazione. Maggiore è la sua energia, minore è la durata dell'esistenza. In effetti, una particella virtuale prende in prestito o si appropria di una certa quantità di energia, che deve rendere, per così dire, prima che ne venga scoperta la scomparsa.

Il raggio di azione di un'interazione è correlato alla massa del quanto scambiato. Se il quanto del campo ha una grande massa che deve essere chiesta in prestito sotto forma di energia per poterne garantire l'esistenza, la restituzione deve essere più rapida prima che si scopra l'irregolarità. La distanza che la particella può percorrere prima di dover essere riassorbita perciò diminuisce e, quindi, la forza corrispondente ha un breve raggio di azione. Nel caso particolare in cui il quanto scambiato è privo di massa il raggio d'azione risulta infinito.

*

Se il meccanismo dietro le forze è in un certo senso universale, cioè è dovuto allo scambio di particelle virtuali, la domanda che rimane ancora senza risposta è perché le forze sono quattro e perché esse sono simili nello stesso tempo. Questo interrogativo ha incoraggiato da tempi immemorabili generazioni di fisici a tentare di «unificare» le varie interazioni, cercando un denominatore comune tra le diverse forme fisiche assunte dal meccanismo forza. L'ambizione è quella di costruire una sola teoria guida che riveli alcune profonde connessioni tra le varie forze rendendo contemporaneamente conto delle loro evidenti diversità. Una tale unificazione non è stata ancora raggiunta, ma è probabile che negli ultimi anni sia stato compiuto qualche progresso. Oggi ad esempio la forza debole e l'elettromagnetismo si possono interpretare nel contesto di un'unica teoria. Pur restando due forze distinte, esse appaiono interconnesse nella formulazione matematica. Ciò che oggi sappiamo e che potrebbe rivelarsi l'aspetto più importante della ricerca verso

l'unificazione è che tutte le quattro forze sono derivabili dallo stesso tipo di principi di simmetria. Così se i fisici devono ancora trovare un'unica chiave che vada bene per tutte le serrature conosciute, essi hanno almeno trovato che tutte le chiavi necessarie si possono ricavare dallo stesso blocco.

Nonostante il rapido progresso nella comprensione della natura, della sua struttura più intima e dei suoi meccanismi più fondamentali, la soluzione dell'enigma della materia ci sfugge ancora. Un grande numero di domande resta ancora senza risposta. Ad esempio una delle proprietà più universali della materia è la proprietà di avere una massa, cioè di reagire al cambiamento di velocità. Quale è l'origine di questo effetto? L'unica combinazione di costanti fondamentali che può essere identificata con una massa è la cosiddetta massa di Planck, introdotta proprio da Planck all'inizio di questo secolo come prodotto della costante universale di gravitazione, della costante di Planck — appena inventata a quel tempo — e della velocità della luce. Ogni teoria che voglia ad esempio spiegare perché l'elettrone ha una massa pari a $9,8 \cdot 10^{-28}$ grammi, in mancanza di alternative migliori (e sconosciute) deve in qualche modo quindi fare riferimento alla costante di Planck. Purtroppo il valore di tale costante è straordinariamente grande, 10^{19} volte la massa di un protone. Come è possibile che la risposta si trovi così lontana dal mondo fisico a cui siamo abituati?

Il sospetto che la vera risposta alle domande di natura fondamentale si trovino in un mondo di fenomeni fisici lontani da quello oggi accessibile è reso più credibile dalle idee professate da molti fisici secondo cui tutti i fenomeni sono in qualche modo derivabili da estensioni della teoria della relatività generale e della gravitazione. L'estrema debolezza dei fenomeni gravitazionali, per i quali non esiste una sperimentazione al livello di onde e quantistico, ci fa quindi presagire che la soluzione dell'enigma sia ancora inaccessibile.

*

E tuttavia, il discorso iniziale dell'importanza della costante di Planck ci fa riflettere sulla possibilità che *proprio* a queste piccolissime distanze si trovi la struttura vera, *intima* della materia. In questo campo i fisici teorici hanno dato libero sfogo alla loro imma-

ginazione, soprattutto incoraggiati dall'impossibilità di verifiche sperimentali. Parliamone un poco. Noi *crediamo* di vivere in un Mondo fatto di tre direzioni o dimensioni dello spazio e una del tempo. Einstein aveva fatto tre più uno eguale a quattro, introducendo le quattro dimensioni dello spazio-tempo. Negli anni venti, Kalutza e Klein suggerirono che tutto sommato questo non era niente altro che una grossolana approssimazione — perché di fatto le «dimensioni» sono molte di più. Questa idea è stata ripresa con vigore negli ultimi anni nella cosiddetta teoria delle *super-stringhe* — secondo la quale noi in *realtà* viviamo in un mondo a dieci (!) dimensioni. E allora? Niente paura, perché le sei dimensioni che ci sfuggono sono del tutto semplicemente ARROTOLATE in un rotolino di dimensioni dell'ordine di 10^{-32} centimetri e quindi invisibili al comune mortale come noi e voi. E non è ancora finita. Un microscopio potentissimo che guardasse le particelle elementari e tutto il resto e capace di discernere quello che succede a queste distanze, scoprirebbe che in realtà siamo tutti costruiti partendo da una specie di filo, o stringa, caratterizzato da un punto di partenza e uno di arrivo, naturalmente vicinissimi l'uno all'altro.

Tutto questo — che sembrerebbe a prima vista completamente gratuito — di fatto è sostenuto da un serissimo insieme di formulazioni matematiche e di teoremi, che tra l'altro definisce in maniera alquanto univoca questa possibile immagine del mondo. Naturalmente la fisica si basa su fatti sperimentali. Ma come è possibile sperimentare su fenomeni così reconditi? È questo il problema centrale di questo tipo di descrizione della natura, davanti alla quale tutta la tecnologia di oggi e quasi certamente di domani è assolutamente impotente. Per il momento possiamo prendere il punto di vista di assumere *a priori vere* tutte queste cose, alla condizione che con esse si possano spiegare in maniera soddisfacente o almeno non contraddittoria i fenomeni che possiamo osservare, come ad esempio le proprietà fondamentali delle particelle elementari e delle forze. In generale tali modelli riescono a predire in maniera più o meno univoca qualche cosa che assomiglia allo spettro delle particelle conosciuto, anche se la cosa più importante, cioè le loro masse, non è ancora uscita dal formalismo matematico — peraltro, e come già detto — di una complessità straordinaria. Inoltre esiste una grandissima flessibilità nella scelta delle opzioni possibili nella formulazione dei dettagli della teoria, che permettono ad esempio

di «nascondere» particelle imbarazzanti, in quanto non osservate, nella zona «proibita» all'osservazione, e cioè a valori nei dintorni della massa di Planck!

La vera essenza — la chiave della struttura della materia — ci sta dunque sfuggendo tra le dita in un mondo *proibito all'osservazione*? La frontiera dell'infinitamente piccolo sta allontanandosi da noi senza speranza, in una maniera altrettanto disastrosa di quanto stia avvenendo per le frontiere più lontane dell'Universo?

Quello che i fisici attendono e in cui sperano è in un certo senso l'equivalente scientifico del «miracolo», quello che si chiama la «grande sorpresa» e che generalmente include un viaggio a Stoccolma dietro l'invito dell'Accademia Reale di Svezia! Anche se per definizione la sorpresa non è conoscibile in anticipo, abbiamo delle idee abbastanza chiare di cosa e di dove cercare. In prima linea viene il decadimento del protone (!). Niente di più intuitivo e accettabile dell'idea che la materia sia stabile, e cioè eterna. In fondo ci sono all'incirca i quindici miliardi di anni che ci separano dall'inizio dell'Universo e ci offrono spontaneamente un tale tipo di garanzia. Tuttavia è possibile che questo non basti e che su di una scala di tempi ancora più lunga l'esplosione o disintegrazione di un comunissimo protone possa avere luogo. Si prevede in certe teorie che dopo un tempo dell'ordine di:

10,000,000,000,000,000,000,000,

volte la vita trascorsa dell'Universo una frazione apprezzabile della materia si sarà spontaneamente disintegrata! Questo processo se osservato è in un certo senso un modo per guardare a queste piccolissime distanze, per così dire attraverso il buco della serratura, in quanto questa è semplicemente una predizione ulteriore e straordinaria di queste teorie, che potrebbe essere considerata come prova. Non crediamo che si debbano spendere troppe parole per spiegare la complessità straordinaria di tale tipo di esperimenti oggi in corso in diverse parti del mondo. In più l'assenza di decadimento del protone non può essere considerata prova del contrario, e cioè della falsità delle teorie, in quanto un piccolo «aggiustamento» delle suddette teorie potrebbe farlo facilmente sparire dalle previsioni.

*

E quindi venti secoli dopo Democrito, il mistero della materia rimane ancora più che mai fitto e più impenetrabile. Ciò nonostante, la nostra comprensione dei fenomeni naturali ci ha permesso di dominare i fenomeni naturali al punto di metterne un grande numero al nostro servizio; tutta la società moderna ne è influenzata e determinata. Mai come nella scienza la conoscenza di una parte così modesta della verità ci ha permesso di andare così lontano!

RAOUL GATTO

I MODELLI DI UNIFICAZIONE
NELLA FISICA DELLE PARTICELLE

*Département de Physique Théorique
Université de Genève, CH-1211 Genève 4*

Vorrei anzitutto ringraziare l'illustre Presidente dell'Accademia Nazionale Virgiliana, Professor Eros Benedini, e il collega Carlo Castagnoli, amico sin dai vecchi anni della Scuola Normale, per avermi invitato a presentare questa relazione. Il testo, qui di seguito, contiene una esposizione generale, le parti più tecniche sono relegate nelle note.

*

L'idea di unificazione è intrinseca alla fisica. Una teoria fisica ha sempre carattere unificatore. Una delle prime teorie fisiche, la teoria della gravitazione di Newton, permette di spiegare in termini di una unica forza, la gravitazione, la caduta di una mela da un albero e il moto dei pianeti attorno al sole. Infatti si parla spesso di legge universale della gravitazione, dove l'aggettivo universale esprime la caratteristica unificante.

Un esempio più vicino a noi è la teoria dell'elettromagnetismo che permise di unificare fenomeni elettrici e fenomeni magnetici. «Magnesia» era la regione dell'antica Grecia da cui provenivano dei magneti naturali, e magnetismo era la classe di fenomeni fisici cui davano luogo i magneti. L'elettricità era inizialmente lo studio dei fenomeni dovuti alla attrazione e repulsione di cariche elettriche. La teoria unificante, l'elettromagnetismo, ebbe la sua descrizione completa con le equazioni di Maxwell del 1865 (1).

La descrizione dei soli fenomeni statici, in base alle stesse equazioni di Maxwell, specializzate al caso statico, non contiene ancora effetti di unificazione. Si limita a dire che una densità di cariche elettriche genera un campo elettrico con certe proprietà (pre-

cisamente le cariche sono le sue sorgenti, ed è un campo, come si dice, irrotazionale) e lo stesso vale per il campo magnetico (non ha sorgenti ed è anche esso irrotazionale).

Appena si studiano fenomeni non statici, che variano col tempo, appare una straordinaria interdipendenza tra fenomeni elettrici e magnetici. La presenza di un campo magnetico variabile nel tempo modifica l'irrotazionalità del campo elettrico e, parimenti, la presenza di cariche che si che si muovono oppure di campi elettrici variabili modifica l'irrotazionalità del campo magnetico.

Inoltre, e questo richiamo ci sembra qui particolarmente opportuno, una coincidenza, già notata (pur tra notevoli errori sperimentali) e rimasta incomprensibile, venne spiegata dalla teoria elettromagnetica. In assenza di tale teoria il fatto che, moltiplicando una costante di natura tipicamente elettrica, la costante dielettrica del vuoto, con una costante tipicamente magnetica, la permeabilità magnetica del vuoto, si ottenesse una quantità numericamente coincidente con l'inverso del quadrato della velocità della luce nel vuoto, restava una coincidenza incomprensibile.

*

Si direbbe, oggi, che, prima della teoria elettromagnetica, richiedere una tale relazione, tra cose talmente diverse, sarebbe stato «innaturale». La teoria di Maxwell, appunto attraverso l'interdipendenza tra elettricità e magnetismo, che ha luogo appena si considerino situazioni non statiche, contiene la possibilità di onde elettromagnetiche che, nel vuoto, si propagano con la velocità della luce, e non sorprende più che tale velocità sia ricavabile una volta che si conoscono le caratteristiche elettriche e magnetiche del vuoto.

Oggi, naturalmente, un tale discorso viene fatto nel senso inverso, in quanto è la velocità della luce che ha acquistato un carattere primario di costante universale e collega la permeabilità magnetica del vuoto alla sua permeabilità elettrica.

In ogni caso una relazione a prima vista incomprensibile tra fenomeni (nella classificazione dell'epoca) luminosi, elettrici e magnetici, apparve definitivamente chiara una volta che fu scoperta la teoria unificante, la teoria elettromagnetica. Ripeteremo da Virgilio, l'illustre poeta mantovano, che dà il nome alla Accademia Na-

zionale Virgiliana, «Felix qui potuit rerum cognoscere causas» (Georgiche, II). Ma non si tratta solo della soddisfazione di avere raggiunto la conoscenza delle cause: la teoria unificante contiene in germe la teoria della relatività speciale. A questo scopo ci limiteremo a osservare che l'unificazione è portata dai fenomeni non statici, dai fenomeni cioè in cui il tempo, la quarta dimensione della teoria della relatività, gioca un ruolo essenziale.

*

Nel 1915 Einstein scrisse le famose equazioni della gravitazione (relatività generale) (2). Il significato fisico delle equazioni di Einstein è il seguente: la materia modifica la geometria. Le equazioni di Einstein connettono le caratteristiche geometriche dello spazio-tempo, definite dal cosiddetto tensore metrico, alle proprietà della materia che compaiono attraverso il tensore dell'energia e dell'impulso della materia.

Notevoli geometri italiani, tra cui Ricci, Bianchi, Levi-Civita, contribuirono a sviluppare la disciplina matematica che servì ad Einstein per descrivere la geometria dello spazio-tempo.

*

Nel 1917 Einstein si domandò se non andava aggiunto un nuovo termine alle sue equazioni, a priori compatibile con tutti i postulati della teoria, proporzionale a una nuova costante, che viene chiamata costante cosmologica (3). Nello stesso modo come la materia modifica la geometria, la presenza di tale costante cosmologica avrebbe un effetto sulla geometria. Ritorneremo su questo punto importante che di nuovo ci farà discutere della «naturalità» delle teorie fisiche.

*

Abbiamo parlato di elettromagnetismo e gravitazione. Già Einstein era stato costantemente preso dall'idea di unificare queste due teorie. Nessuna delle teorie proposte per unificare da soli elettromagnetismo e gravitazione ha avuto successo, ivi compreso il tentativo di cui parleremo qui di seguito più in dettaglio, dovuto a

Kaluza e a Klein. Ne discuteremo più in dettaglio perché contiene concetti che hanno recentemente e stanno tuttora suscitando interesse tra i fisici teorici.

Kaluza pubblicò il suo lavoro sull'argomento nel 1921, sulla rivista della Accademia delle Scienze Prussiana e Klein portò un contributo chiarificatore nel 1926, con un articolo su *Nature*. Klein era un noto professore di Stoccolma.

*

Meno conosciuto, Theodore Kaluza, aveva tuttavia un vero talento di fisico teorico. Weinberg ha ricostruito un episodio della vita di Kaluza che illustra la sua indole, tipica in qualche modo di un fisico teorico. Riconoscendo la necessità di apprendere il nuoto pare che avesse risolto il problema semplicemente acquistando, e studiando, un manuale sugli stili di nuoto. Avendolo bene studiato, si tuffò e, senza difficoltà, nuotò. Un altro tratto di Kaluza che certamente lo accomuna a molti teorici illustri aveva a che fare con certe sue necessità economiche, dovute al fatto che, come privatdozent all'università di Königsberg (città sul Baltico, a nord-est di Danzica, che allora faceva parte della Prussia Orientale e oggi si chiama Kaliningrad e fa parte dell'Unione Sovietica) veniva pagato proporzionalmente al numero di studenti che frequentavano il suo corso. È facile immaginare la scarsità del numero di persone interessate e le conseguenti ristrettezze economiche. La teoria di Kaluza-Klein contiene un aspetto rivoluzionario, al limite, diremmo, soprattutto per quell'epoca, della eresia. Lo spazio-tempo a quattro dimensioni della relatività viene sostituito con uno spazio-tempo a cinque dimensioni. Le equazioni della gravitazione, scritte per cinque dimensioni, mostrano una proprietà interessante. Si possono interpretare, alcune come le equazioni della gravitazione di Einstein in quattro dimensioni, e le altre come le equazioni dell'elettromagnetismo.

*

L'interpretazione porta in effetti a qualcosa di più quantitativo (4). La carica elettrica, che è la sorgente del campo elettromagnetico, viene assimilata all'energia e all'impulso della materia, che sono sorgenti del campo gravitazionale, e diventa una quinta com-

ponente della energia-impulso. Per avere quindi la carica di un elettrone occorre che questo quinto impulso sia quello corrispondente al moto attorno a un cerchio, che si trova essere di raggio piccolissimo, dell'ordine di 10^{-30} cm.

*

In altri termini, la quinta dimensione, a differenza delle altre quattro con cui siamo più familiari, è una dimensione chiusa su se stessa. In ogni punto dello spazio-tempo, indipendentemente punto per punto, dobbiamo immaginare questa quinta dimensione, chiusa su stessa, o come si dice in linguaggio matematico, «compattificata», con un raggio piccolissimo. Il fatto che in ogni punto si possono indipendentemente eseguire rotazioni all'interno della quinta dimensione implica l'elettromagnetismo di Maxwell.

*

La situazione è evoluta in una direzione diversa da quella immaginata dai relativisti, che guardavano soprattutto a unificare relatività e gravitazione. Lo sviluppo straordinario della fisica delle particelle elementari ha portato alle interazioni deboli ed alle interazioni forti, da aggiungere a quelle elettromagnetiche e gravitazionali per la descrizione del mondo fisico.

Gli antichi Greci, con una intuizione del tutto straordinaria, avevano immaginato un mondo fisico fatto da unità indivisibili, atomi. Avevano anche pensato a una semplicità della materia, risultante da quattro elementi diversi: fuoco, acqua, terra, aria.

Una ricerca immensa, per uomini, per mezzi, per ricchezza intellettuale e tenacia, ha portato a una descrizione incredibilmente semplice della materia che conosciamo ora come fatta da quark e leptoni e da alcuni bosoni.

*

Non ci dilungheremo su queste nozioni e scoperte che sono ora conosciute da un pubblico più vasto e ci limiteremo a ricordare il recente contributo di Carlo Rubbia con la scoperta dei bosoni intermedi. Le interazioni deboli ed elettromagnetiche appaiono

unificate nella cosiddetta teoria elettrodebole (Glashow - Weinberg - Salam). I bosoni intermedi sono la manifestazione diretta di tale unificazione.

L'unificazione elettrodebole si basa su un paradigma centrale che la rende possibile: il paradigma della rottura spontanea di simmetria. Questo paradigma permette di utilizzare una descrizione il più possibile simmetrica anche in situazioni dove non tutte le simmetrie utilizzate in effetti rimangono esatte.

*

Il paradigma, inizialmente utilizzato nella teoria della superconduttività, deve la sua straordinaria utilità al fatto che permette di ricorrere ad una descrizione del mondo fisico ricca di simmetrie, e quindi in un certo senso più avvicinabile ai nostri concetti matematici, anche quando queste simmetrie si sa che sono solo vere in certi limiti a volte molto lontani dalle regioni fisiche accessibili.

Situazioni simmetriche in cui, successivamente ha luogo, spontaneamente, una rottura della simmetria sono spesso presenti nella nostra esperienza quotidiana. Nel popolare «giro-tondo» della nostra infanzia, i maestri ci disponevano in circolo ed a priori il giro-tondo poteva iniziare girando o verso la destra o verso la sinistra. La situazione era simmetrica, la scelta di girare a destra o a sinistra interveniva quando il gioco iniziava, in maniera piuttosto casuale.

Più complicato, almeno geometricamente, l'esempio della roulette. La pallina può, a priori, fermarsi su qualsiasi delle caselle numerate che si trovano su una circonferenza. Si fermerà su una particolare casella.

Idealizzando un poco la situazione possiamo pensare alle infinite posizioni sulla circonferenza dove una pallina, pensata puntiforme, potrebbe fermarsi. Diremmo che a priori c'è totale simmetria rispetto a tutti i punti della circonferenza, cioè totale simmetria rispetto a rotazioni. La simmetria si romperà, in maniera a noi imprevedibile, quindi diremo «spontaneamente», quando la pallina si sarà fermata in un punto particolare della circonferenza.

Naturalmente questi esempi sono lontani ancora dal caso fisico che viene considerato, dove è importante che il sistema sia descri-

vibile mediante infiniti parametri (e non uno solo, quanto basterebbe nell'esempio per precisare la posizione della pallina). Tuttavia nelle grandi linee, è attraverso ragionamenti di questo tipo che è possibile sostituire a una situazione del tutto asimmetrica un modello simmetrico che, poi per rottura spontanea della simmetria, ridiventa il modello asimmetrico della realtà.

Tornando all'esempio elementare, e come abbiamo detto, non da prendere alla lettera quale esempio veramente pertinente, della pallina lungo la circonferenza, diremo che le differenti posizioni, in cui la pallina può a priori fermarsi, sono tutti possibili punti di stabilità ed hanno un paragone nella teoria dei campi con i possibili stati di vuoto.

*

Il vuoto è lo stato che ha l'energia più bassa, e quando c'è ne sono molti, in questo caso infiniti, di tali stati, essi sono a priori tutti possibili. Uno di tali stati viene scelto per rottura spontanea di simmetria. Questo da solo introduce tutta l'asimmetria necessaria nel sistema perché possa descrivere la realtà fisica che non è simmetrica.

*

C'è un prezzo da pagare nell'uso di questo paradigma. In termini ecologici, quali oggi sono di uso corrente, diremo che il vuoto viene «polluito». A priori nulla dovrebbe essere più pulito del vuoto. Per definizione, nel vuoto non ci aspetteremmo polluzione di alcun tipo. Il meccanismo di rottura spontanea porta in un certo senso, a un vuoto più complicato e questo ci riporta direttamente al problema della costante cosmologica, a cui avevamo accennato.

*

Nella teoria completa la costante cosmologica risulta da diversi contributi. Si può pensare ad una costante cosmologica già esistente nelle pure equazioni della gravitazione, il cui valore può essere a priori qualunque. A questa si aggiungeranno altri contributi, che sarebbe non facile spiegare, dovute a quelle che si chiamano

fluttuazioni del vuoto ed a quelle che sono inevitabilmente indotte dalla struttura complessa del vuoto che abbiamo introdotto a seguito dell'uso del paradigma della rottura spontanea.

La costante cosmologica totale, risultante dalla somma di tutti questi contributi, come avevamo già detto, contribuirà a determinare la geometria dell'universo. Essa sarà quindi in qualche modo determinabile attraverso l'osservazione di questa geometria. In effetti, dal conteggio delle galassie in regioni lontane dall'universo, si riesce a ottenere un limite inferiore per l'inverso del valore assoluto della costante cosmologica, una quantità che si esprime in quadrati di lunghezza, cioè con le dimensioni di una area.

Questo limite inferiore è di circa 10^{56} cm^2 . A fronte di questo limite il contributo che si calcola per questa stessa grandezza sulla base della rottura spontanea è di circa 10^2 cm^2 .

Una tale discrepanza è inaccettabile. Nel parlarne, si è spinti, a citare ancora Virgilio: «Horresco referens», dall'Eneide II. Se così fosse veramente, il fallimento dei nostri modelli teorici sarebbe totale.

*

Si può obiettare che il contributo alla costante cosmologica calcolabile a seguito del meccanismo di rottura spontanea è uno solo dei vari contributi. Per esempio si potrebbe dire che a fronte dei 10^{-2} cm^2 che provengono dal meccanismo di rottura spontanea c'è un contributo già esistente uguale e di segno contrario in modo che la costante cosmologica totale sia praticamente nulla, in modo di soddisfare il limite superiore osservato di 10^{56} cm^2 .

*

Ma questo sarebbe innaturale, nel senso che abbiamo già spiegato. Sarebbe accettabile solo se ci fosse una teoria che spiegasse il perché di una tale esatta compensazione. Nello stesso modo in cui, senza la teoria di Maxwell, sarebbe stato inaccettabile porre la velocità della luce uguale all'inverso della radice quadrata del prodotto delle due costanti, elettrica e magnetica, del vuoto.

Ancora in un altro punto importante dell'attuale teoria interviene il paradigma della naturalezza, che abbiamo qui illustrato

con riferimento al problema della costante cosmologica. Per discutere questo punto parleremo della «grande unificazione».

*

Abbiamo già accennato alla unificazione delle interazioni elettromagnetiche con le interazioni deboli, che ha portato alla teoria elettrodebole. Il passo successivo è l'unificazione di queste interazioni con le interazioni forti.

Condizioni per questa unificazione è di classificare insieme quark e leptoni. Il motivo è semplice ma richiede un minimo di conoscenze di fisica.

*

Chi conosce per esempio l'atomo di idrogeno sa che stati con un certo momento angolare orbitale possono orientarsi nello spazio in diverse maniere, ma sempre in modo che la proiezione su un asse del momento angolare sia intera. La somma dei valori di tutte queste proiezioni possibili deve però in ogni caso risultare nulla. Questo è dovuto alla invarianza per rotazioni nello spazio tridimensionale (5).

Per lo stesso motivo quando si vogliono unificare delle simmetrie, tra le quali ci dovrà necessariamente essere la carica elettrica, sarà inevitabile che la somma delle cariche elettriche di quegli oggetti che sono classificati sia nulla.

Ora, la somma delle cariche elettriche dei quark più leggeri dà $+1$ e quella dei leptoni più leggeri dà -1 . Quindi è possibile classificarli insieme, mentre sarebbe impossibile classificarli separatamente.

Ora è proprio questo fatto, di classificare insieme quark e leptoni, che porta a transizioni tra di loro. Una conseguenza è che il protone può essere instabile. La sua instabilità è dovuta a una transizione elementare che viene effettuata tramite un bosone avente una massa elevata. Si sa che il protone vive in media almeno 10^{31} anni. Questo permette di calcolare che la massa di questo logone deve essere di almeno 5×10^{14} GeV.

Se si vogliono unificare le interazioni elettrodeboli con le interazioni forti, degli argomenti matematici che non possiamo qui ri-

portare, portano a concludere che questa unificazione sarà possibile solo ad una scala di masse molto elevata, calcolabile approssimativamente a partire dai dati a disposizione. Questo calcolo porta ad una massa che, in modelli semplici, è dell'ordine di 5×10^{14} GeV (con un certo errore nella previsione) (6).

*

Questa massa è dell'ordine di quella indicata prima, a partire da un argomento del tutto indipendente, basato sul dato della lunga vita del protone. La coincidenza può essere occasionale; tuttavia è un elemento favorevole alla grande unificazione, nel senso che se questa massa fosse venuta molto più bassa, tutto il discorso sarebbe stato immediatamente invalidato dal confronto con il limite inferiore misurato della vita del protone.

Questo non è il solo argomento a favore della grande unificazione. Un altro argomento ha a che fare con la predizione, possibile in questo modello, di un parametro essenziale della teoria elettrodebole, che viene chiamato angolo di Weinberg.

Inoltre le teorie unificate hanno portato a speculazioni inattese e ridato vita a tutta la cosmologia (7). Non possiamo però a questo punto evitare di ritornare sul problema della naturalezza. Se si confrontano queste masse dell'ordine di $10^{14} \div 10^{15}$ GeV con, per esempio, le masse dei bosoni intermedi trovati al CERN, che sono dell'ordine del centinaio di GeV, si è confrontati con un enorme divario. È naturale che le masse dei bosoni trovati al CERN siano incomparabilmente più piccole di questa grande massa che gioca un ruolo centrale per la grande unificazione? Perché questo sia naturale bisogna dare una ragione teorica.

È inutile dire che modelli sono stati inventati per questo fine. Ma nessuno di questi è ritenuto soddisfacente e soprattutto manca ogni supporto sperimentale.

Ho voluto dare un'idea del lavoro attuale del fisico teorico di particelle elementari. Mi è parso utile dire non solo dei successi, ma prospettare anche i problemi. Soltanto in questo modo, anche chi è lontano da questa disciplina, necessariamente molto tecnica, può giungere ad una sensazione dello sviluppo della materia e della soddisfazione e nello stesso delle difficoltà di un fisico teorico verso la fine di questo mezzo secolo.

(1) Le equazioni di Maxwell sono (per sostanze isotrope e non ferromagnetiche)

$$\begin{aligned} \operatorname{div} \vec{D} &= q & \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \\ \operatorname{rot} \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} & \operatorname{rot} \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \end{aligned}$$

dove $\vec{E}$ è il campo elettrico, $\vec{D} = \epsilon \vec{E}$, $\vec{H}$ è il campo magnetico, $\vec{B} = \mu \vec{H}$, q è la densità di carica e $\vec{j}$ la densità di corrente. Le costanti ϵ e μ sono rispettivamente la costante dielettrica e la permeabilità magnetica. Nel vuoto tali costanti sono ϵ_0 e μ_0 e vale la relazione

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

dove c è la velocità della luce nel vuoto che è di circa trecentomila chilometri al secondo.

(2) Il postulato fondamentale della teoria di Einstein è il principio di equivalenza: per ogni punto dello spazio tempo è possibile scegliere un sistema di riferimento "localmente inerziale", tale che le forze gravitazionali risultino nulle - in un intorno sufficientemente piccolo del punto. Questo postulato dà luogo al principio generale di covarianza: una equazione fisica generalmente covariante valida in assenza di gravitazione resta vera anche in presenza di gravitazione. Per la gravitazione medesima, sulla base della considerazione che il tensore energia-impulso della materia deve agire da sorgente del campo gravitazionale Einstein scrisse le equazioni (1915)

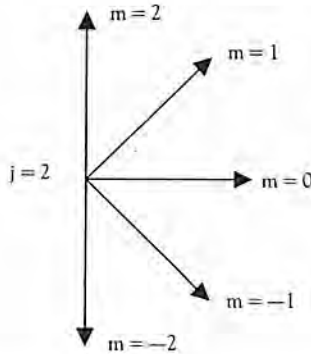
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

dove $R_{\mu\nu}$ è il tensore di Ricci, R è la curvatura, $T_{\mu\nu}$ è il tensore energia-impulso della materia e $g_{\mu\nu}$ è il tensore metrico. È immediato verificare che per campi gravitazionali statici e deboli si ottiene il limite newtoniano, dove la gravitazione è descritta da una potenziale che soddisfa la equazione di Poisson con la densità di materia per sorgente.

(3) Al primo membro delle equazioni di Einstein (vedi nota 1) è possibile aggiungere un termine proporzionale a $g_{\mu\nu}$ senza alterare la divergenza covariante. La costante di proporzionalità è la costante cosmologica. Einstein aveva proposto di aggiungere questo termine nel 1917 per poter derivare un universo statico. Naturalmente tale giustificazione per l'aggiunta di un termine cosmologico venne meno dopo la scoperta dell'espansione dell'universo.

(4) Le equazioni gravitazionali in 5 dimensioni si "riducono" a quelle di Einstein per 4 dimensioni più quelle di Maxwell, sempre a 4 dimensioni. È possibile allora identificare la sorgente $J_m^{\mu\nu}$ del campo elettromagnetico col quadrivettore $T^{\mu 5}$, che appare all'interno del tensore energia-impulso in 5 dimensioni. La carica elettrica appare quindi come proporzionale alla quinta componente p_5 dell'impulso pentadimensionale. La costante di proporzionalità risulta fissata, dalla identificazione delle equazioni gravitazionali, a $G^{1/2}$. La compattificazione della quinta dimensione darà per p_5 una quantità dell'ordine di R^{-1} , dove R è il raggio di compattificazione. Quindi l'ordine di grandezza, per esempio nel caso di un elettrone, del prodotto di R per la carica elettrica dell'elettrone sarà $G^{1/2}$. Da cui segue per R un valore dell'ordine di 10^{-30} cm.

(5) Consideriamo per esempio gli stati a momento angolare $j=\alpha$ dell'atomo di idrogeno (o di un qualunque altro sistema quantistico). Essi vengono schematizzati mediante il cosiddetto modello vettoriale come nella figura qui sotto:



dove m è la componente del vettore $\vec{j}$ lungo un asse. Si ha chiaramente $\sum m = 0$, sommando sui 5 stati indipendenti. Questa proprietà segue infatti più in generale per un qualunque gruppo semplice. Nel nostro caso, gruppo di rotazioni, si ha la regola di commutazione $[J_x, J_y] = iJ_z$ e quindi $\text{Traccia}(J_z) = 0$, quale semplice conseguenza algebrica.

(6) La congettura della "grande unificazione" consiste nel pensare $SU(2) \times U(1)$ elettrodebole e $SU(3)$ di colore entrambi immersi in un gruppo unificante, che si suppone essere un gruppo semplice. Alcune considerazioni generali seguono subito dalla congettura. La carica elettrica sarà un generatore e così pure la terza componente dello spin isotopico debole T_3 , appartenente al sottogruppo $SU(2)$. In una opportuna base si avrà che $Q - T_3$ sarà proporzionale a un generatore Y_1 , $Q - T_3 = \beta Y_1$. Pertanto βY_1 , è niente altro che la ipercarica debole. L'ipotesi che sia T_3 che Y_1 siano generatori del gruppo semplice fissa β dalla equazione $\beta^2 = (\text{Traccia } Q^2) / (\text{Traccia } T_3^2) - 1$. Basta per questo quadrare l'espressione sopra riportata per Q , e utilizzare l'ipotesi di gruppo semplice. I bosoni di gauge accoppiati a T_3 e Y_1 sono W_3 e B . Una loro combinazione lineare $B \cos \theta_w + W_3 \sin \theta_w$, dove θ_w si chiama angolo di Weinberg, corrisponderà al fotone. Il suo accoppiamento di gauge $-ie j_\mu^{\text{em}} A^\mu$ sarà quindi, in termine di generatori, $-ie(T_3 + \beta T_1)A$ con $e = g \sin \theta_w$, dove g è la costante unificata, $\beta = \cot \theta_w$. Calcolando β attraverso $\text{Traccia } (Q^2)$ e $\text{Traccia } (T_3^2)$, calcolati su una generazione fatta da $u_L, u_R, d_L, d_R, e_L, e_R, \nu_L$, si ottiene dalla equazione precedente $\sin^2 \theta_w = 3/8$. L'eventuale presenza di ν_R , con $Q=0$ e $T_3=0$, non modifica evidentemente il calcolo. Risulta così predetto il valore dell'angolo di Weinberg nella teoria unificata, indipendentemente dal particolare gruppo semplice in cui si vogliono immergere $SU(2) \times U(1)$ e lo $SU(3)$ di colore. Per confrontare con i dati, questa predizione, valida al punto di unificazione, va riportata ad una scala di energia dell'ordine della massa del bosone W . Le equazioni del gruppo di rinormalizzazione danno che le quantità g_1^{-2} (g_1 è la costante d'accoppiamento per Y_1), g_2^{-2} (g_2 è la costante di $SU(2)$), e g_3^{-2} (g_3 è la costante di $SU(3)$) sono funzioni lineari del logaritmo della energia di scala. I coefficienti dei termini lineari sono noti nei tre casi, e dipendono solo dal numero di generazioni, che fissiamo uguale a tre. I termini costanti per g_1^{-2} e g_2^{-2} contengono l'angolo di Weinberg misurato a bassa energia. Noti i valori iniziali delle costanti g_1, g_2, g_3 a bassa energia ($g_1 = \beta g'$, dove g' è la costante che di solito si assegna

alla ipercarica debole in $SU(2) \times U(1)$ si verifica numericamente che le tre costanti convergono alla costante unificata a condizione di prendere un angolo di Weinberg a bassa energia dato da $\sin^2 \theta_w \approx 0.21$, in accordo coi dati. La massa di unificazione risulta dell'ordine di 0.5×10^{15} GeV.

(7) I recenti sviluppi teorici nella fisica delle particelle elementari hanno dato luogo a sviluppi concettuali importanti in cosmologia. Il modello standard del big bang permetteva già una descrizione dello sviluppo dell'universo dall'epoca in cui viviamo (si suppone dell'ordine di 15×10^9 anni dopo il big bang) indietro sino a tempi dell'ordine di 10^{-2} sec dopo il big bang. A quel momento le temperature erano dell'ordine di 10^{11} K e le energie dell'ordine delle decine di MeV, una situazione che permetteva la nucleosintesi (formazione di nuclei leggeri a partire da n e p). Le osservazioni confermano nelle grandi linee le predizioni della nucleosintesi (basate su fatti noti di fisica nucleare) per le abbondanze primordiali dello ^1H , del deutone, del ^3He , e del ^7Li . La formazione di strutture nell'universo, probabilmente a seguito della instabilità gravitazionale di piccole fluttuazioni iniziali di densità, avviene successivamente alla preponderanza della densità della materia sulla radiazione, a tempi dell'ordine di 10^{11} sec, cioè più o meno, energie di alcuni eV e temperature dell'ordine di 10^4 K. Poco dopo, sui 3000 K e intorno a 1 eV avviene il disaccoppiamento materia-radiazione e la formazione di atomi (i nuclei si rivestono di elettroni). Quindi si formano galassie (intorno ai 10^{16} sec) e il sistema solare (sui 10^{17} sec). La cosmologia standard del big bang, di cui abbiamo rapidamente schizzato alcuni contenuti, ha le sue importanti conferme, oltre che nelle abbondanze primordiali degli elementi leggeri, di cui abbiamo parlato, anche nelle misure della radiazione di fondo a 2.7 K, nelle osservazioni delle galassie, e degli spostamenti verso il rosso degli oggetti quasi stellari. I recenti sviluppi della fisica delle particelle permettono di risalire nella scala dei tempi in maniera vertiginosa, pur restando sempre nell'ambito di congetture teoriche essenzialmente da verificare. QCD predice una transizione di fase nell'universo sui 10^{12} K e tempi sui 10^{-5} sec. Questa transizione corrisponde al confinamento; quark e gluoni non confinati passano alla fase (quella attuale) dove sono confinati in adroni. L'unificazione elettrodebole prevede anche una transizione di fase, dalla fase a simmetria $SU(2) \times U(1)$ esatta a quella presente dove solo l' $U(1)$ dell'elettromagnetismo resta conservato. Questa transizione avviene sui 10^{-11} sec ovvero per temperature sui 10^{15} K. Le speculazioni su ciò che avviene a tempi più vicini al supposto big bang iniziale assumono la grande unificazione e le sue estensioni. Sono pertanto molto congettuali. Un paradigma importante è la possibilità della asimmetria barioni-antibarioni in modelli dove CP è violato ed anche il numero barionico. L'asimmetria dovrebbe manifestarsi intorno a tempi dell'ordine di 10^{-35} sec ovvero $T \sim 10^{26}$ K. L'altro paradigma importante è quello della inflazione: una espansione esponenziale dell'Universo durante un certo periodo della sua storia. Un problema cruciale della cosmologia è quello della isotropia e della omogeneità per osservazioni fatte su scale molto grandi. Questo problema viene spiegato mediante un universo inflazionario e così pure il problema della geometria dell'universo, essenzialmente piatto. Lo scenario basato sulla inflazione è anche cruciale per risolvere problemi come quello dei monopoli primordiali, dei gravitini, dei "domain walls", ed altri. Le teorie unificate predirebbero monopoli magnetici estremamente massicci (10^{16} volte più pesanti del protone) che dovrebbero oggi esistere in numero altrettanto grande come il numero dei protoni, in conflitto inaccettabile con le densità osservate. Rotture di simmetrie discrete, quali capitano nei modelli unificati, porterebbero a "domain walls" molto pesanti in contrasto con l'osservazione. Contraddizioni esisterebbero anche in teorie di supergravità a causa della abbondanza di gravitini primordiali. Questi problemi sono evitati nello scenario inflazionistico.

Vari scenari di inflazione sono stati sviluppati portando a volte modificazioni radicali alla idea stessa di big bang (per esempio un universo dove si producono sempre nuove zone di inflazione; ognuno dei mini-universi può avere leggi fisiche differenti, o anche dimensioni diverse per il suo spazio-tempo).

ARTURO FALASCHI

IL DNA E LA BIOLOGIA MOLECOLARE

*Direttore del Centro Internazionale di ingegneria genetica e biotecnologia
UNIDO - Trieste*

1. DA DARWIN AGLI ENZIMI

Sono particolarmente lieto di schizzare un breve quadro della biologia moderna, in parallelo a quanto hanno fatto i miei predecessori per i fondamenti della fisica moderna, della cosmologia e della geofisica. Credo che, quaranta o cinquanta anni fa, una simile posizione di pari dignità della Biologia rispetto alle altre scienze qui presentate non sarebbe stata neanche concepibile; fino ad allora infatti l'opinione prevalente in campo scientifico era che esistessero da una parte le scienze forti, tipicamente la fisica e la chimica (sua stretta parente), mentre la biologia era un po' come la raccolta di francobolli e non aveva quindi il rigore metodologico e la robustezza concettuale di queste altre scienze. In realtà anche allora questo preconconcetto non era certamente valido perchè la biologia godeva già di un inquadramento teorico forte dato dalla teoria dell'evoluzione, messa a punto intorno alla metà dell'800 grazie soprattutto a Darwin e poi rielaborata in termini più moderni negli anni 30 del '900 sulla base delle leggi della genetica, scoperte prima da Mendel e poi riscoperte all'inizio del secolo.

Secondo questa rielaborazione le specie evolvono grazie alla comparsa casuale di mutazioni ereditabili nella popolazione, mutazioni tra cui si affermano e si diffondono quelle che conferiscono in qualche modo un vantaggio a chi le porta; tale vantaggio consiste essenzialmente nel fatto di avere una progenie più abbondante di quelli che non le portano (dato un particolare ambiente). Era questo l'inquadramento concettuale fondamentale della cosiddetta teoria sintetica dell'evoluzione come si è elaborata negli anni '30, una teoria in realtà molto forte e molto ben sostanziata sul piano intellettuale, cui però mancava un grosso sostegno giustamente considerato importante, e precisamente il sostegno fisico: non si aveva idea cioè di quale fosse la base fisica dell'eredità biologica e del modo in

cui questa si potesse esplicitare nelle proprietà degli organismi viventi; in altre parole quale fosse la natura fisica dei geni (le unità fondamentali dell'eredità biologica) e come questa portasse alle proprietà macroscopiche degli organismi biologici.

In realtà, anche se non si aveva ancora una nozione precisa di quale fosse il sostegno fisico dell'eredità biologica, pure era già abbastanza chiaro che i processi tipici degli organismi viventi, quali il metabolismo energetico, dipendevano dalle proprietà delle molecole presenti in questi organismi. Si può dire che il primo esperimento di biologia molecolare sia stato fatto già alla fine dell'800: fino ad allora lo stesso Pasteur era convinto che dei processi come la fermentazione alcoolica provocata dal lievito potessero avere luogo soltanto in presenza del lievito, cioè soltanto in presenza di un organismo biologico complesso. Un ricercatore tedesco, E. Büchner, alla fine dell'800 ottenne un filtrato di lievito che non conteneva assolutamente nessuna cellula vivente, ma solo molecole estratte dal lievito, e con questo filtrato riprodusse tutta la fermentazione alcoolica, dimostrando che non c'era bisogno di avere un organismo biologico intero per compiere un processo biologico altamente complesso come la trasformazione dello zucchero in alcool. Fu quindi chiaro che dovevano essere delle molecole che realizzavano questo processo, molecole che furono chiamate «enzimi» (che vuol dire «dentro il lievito», ossia «fermento dentro il lievito»). Nel 1926 un biochimico americano, J. Sumner, aveva poi dimostrato che gli enzimi sono proteine, ossia delle macromolecole che cominciavano ad essere ben descritte anche dal punto di vista chimico.

Nonostante questi concetti e nozioni, la base molecolare dell'eredità biologica era ancora ignota e non era chiaro quale fosse la struttura fisica di un gene. Una volta chiarito che le reazioni fondamentali di una cellula avvengono grazie agli enzimi, e che questi sono proteine, una volta chiarito che organismi geneticamente diversi contengono enzimi diversi, si era giunti alla conclusione che i geni producono gli enzimi, (o altre proteine che non hanno funzione enzimatica ma definiscono la struttura di una cellula e di un organismo), ma restava ancora ignoto che cosa fossero i geni. Cominciava comunque ad essere chiaro che l'evoluzione opera selezionando quelle mutazioni casuali dei geni che portano alla formazione di proteine in qualche modo diverse e tali da conferire un vantaggio ai portatori di queste alterazioni, vantaggio esplicito nella più abbondante progenie.

2. IL DNA E LA TRASMISSIONE DELL'EREDITÀ BIOLOGICA

Questa era, *in nuce*, la teoria neodarwiniana fino all'inizio degli anni '40; soltanto alla fine di questo decennio e soprattutto dal 1953 il supporto fisico dell'eredità biologica e quindi della teoria dell'evoluzione, è stato chiaramente identificato e descritto, prima con la dimostrazione che i geni sono DNA e poi con la descrizione della struttura del DNA. L'identificazione del DNA come materiale ereditario risale al 1944 ed è dovuta ad un gruppo di ricercatori americani, di cui il principale era J. Avery, un noto microbiologo. La definizione della struttura del DNA, dovuta a J. Watson e F. Crick nel 1953 è stata una vera pietra miliare nella Biologia, non solo perchè ha fatto conoscere la base chimica e fisica dell'eredità biologica, ma anche perchè ha dimostrato che questa consiste in una struttura che per le sue caratteristiche intrinseche spiega la proprietà fondamentale dell'eredità biologica: infatti la struttura del DNA ci appare fatta apposta per duplicarsi e trasmettere alla progenie due copie di una struttura identica a quella di partenza.

Com'è noto, il DNA (vedi Fig. 1) è fatto da due eliche, per cui in realtà una molecola di DNA consiste di due molecole, o meglio due subunità; ciascuna di queste subunità a sua volta consiste di una catena di monomeri chiamati nucleotidi; nel nucleotide la parte chimicamente distintiva è definita dalla struttura indicata in rosso nella figura, detta «base»; di queste basi si trovano nel DNA 4 tipi, dette Citosina, Guanina, Timina e Adenina, abbreviate in C, G, T ed A. Ciascuna di queste due catene di monomeri è avvolta in forma di elica attorno all'altra, e le due eliche sono tenute insieme da legami deboli (ponti idrogeno e interazioni di Van der Waals) secondo la regola precisa per cui una C su un'elica si associa sempre ad una G sull'elica complementare, e reciprocamente una G si associa sempre ad una C sull'elica complementare; davanti a una T invece c'è un'A, e davanti ad un'A c'è sempre una T. Da ciò consegue che le due subunità (eliche) sono perfettamente complementari e questo fatto ci propone immediatamente un modello di come questa struttura possa svolgere la sua più importante proprietà biologica, ossia si possa replicare.

La Fig. 2 riporta il modello del meccanismo di replicazione proposto da Watson e Crick: la doppia elica tenuta insieme dai legami complementari, viene aperta: questi legami sono deboli e quindi,

pur essendo la struttura a doppia elica termodinamicamente favorita, l'apertura può avvenire in condizioni corrispondenti a quelle prevalenti nelle condizioni fisiologiche, (ossia temperature tra i 20°C e i 37°C, soluzione acquosa, pH vicino alla neutralità) con l'apporto di moderate energie; una volta che la struttura della doppia elica sia aperta verranno esposte nell'ambiente della cellula le funzioni delle basi che possono permettere di riformare le coppie di basi complementari, A con T e C con G; i monomeri (i nucleotidi) così appaiati specificamente di fronte ad ogni elica aperta, vengono poi polimerizzati da un apposito complesso di enzimi. È chiaro quindi che continuando con questo processo, (apertura della doppia elica e sintesi di un'elica complementare su ciascuna delle due eliche) si ottiene la duplicazione completa del materiale ereditario. Quindi la struttura del DNA giustifica la proprietà più importante dell'eredità biologica.

3. DAL DNA ALLE PROTEINE

Non meno importante è stato il fatto che, sulla base della conoscenza della struttura del DNA e della disponibilità delle tecnologie per isolarlo e per studiarne le proprietà biochimiche, chimiche e chimico-fisiche, si poteva impostare la soluzione di altri problemi biologici fondamentali, e in primo luogo quello di come i geni producessero le proteine.

Più precisamente: abbiamo detto che il DNA, portatore dell'informazione ereditaria, è una molecola fatta da 4 monomeri; la combinazione lineare, ossia la sequenza dei 4 monomeri (delle 4 basi, per usare il linguaggio più corrente) porta scritta in qualche modo tutta l'informazione che caratterizza un particolare organismo vivente; ma abbiamo anche detto prima che i veri protagonisti delle strutture biologiche e della loro funzionalità sono le proteine, perchè le proteine conferiscono stabilità fisica all'organismo biologico, assicurano gli scambi energetici e materiali con l'ambiente e costruiscono tutte le altre molecole presenti nelle cellule. Ora, anche le proteine sono, chimicamente parlando, strutture lineari, formate però dalla combinazione lineare di 20 monomeri, detti aminoacidi. Allora, come si passa dal DNA alle proteine? In altre parole, all'interno della stessa generazione, di uno stesso organismo, di una stessa cellula, come avviene che l'informazione scritta sulla sequenza

del DNA si esplichino nelle diverse strutture e funzioni della cellula, ovvero come avviene che questa sequenza diventi la combinazione di proteine diverse che fanno una cellula e un organismo vivente così specifico?

Si è potuto osservare che tutti gli organismi viventi, per trasmettere l'informazione presente nel DNA alle proteine, usano una molecola intermedia, detta acido ribonucleico o RNA, simile all'acido deossiribonucleico (DNA) ma molto più abbondante in natura del DNA stesso: i batteri contengono cinque volte più RNA che DNA, le cellule superiori ne contengono anche 20 volte di più. L'RNA somiglia moltissimo al DNA dal punto di vista chimico, con la differenza di avere come zucchero il ribosio in luogo del deossiribosio, cosa che gli conferisce maggiore instabilità ma anche maggiore reattività chimica; anche l'RNA è fatto di 4 monomeri fondamentali che invece di essere A, C, G e T sono A, C, G e U dove U sta per uracile, una base molto simile alla timina. Ma la proprietà veramente distintiva dell'RNA rispetto al DNA non è tanto quella di essere chimicamente un po' più instabile, ma soprattutto di essere molto più corto e per lo più a singolo filamento. In altre parole l'RNA è la copia complementare, secondo le regole di appaiamento di Watson e Crick, (quindi C davanti a G, G davanti a C, A davanti a T, U davanti ad A), di un breve tratto di una delle due eliche di una molecola di DNA. In pratica, un tratto della molecola di DNA (del cromosoma), corrispondente in prima approssimazione ad un gene, viene copiato in una sequenza a singolo filamento che porta quindi la stessa informazione presente in quel tratto di DNA. Questo breve singolo filamento di RNA si allontana dal DNA da cui è stato copiato e, nelle cellule che hanno un nucleo distinto da un citoplasma, esce dal nucleo e va nel citoplasma; nei batteri, che non hanno una separazione tra nucleo e citoplasma si allontana dal DNA e si diffonde all'interno della cellula batterica. Questo RNA porta l'informazione necessaria a sintetizzare le proteine (vedi Fig. 3).

Come ho accennato sopra, le proteine, che sono gli attori essenziali di tutti i processi biologici, hanno una struttura chimica molto diversa dall'RNA e dal DNA: anch'esse sono fundamentalmente dal punto di vista chimico dei polimeri lineari, composti però non più da 4 monomeri come gli acidi nucleici, bensì da 20 diversi monomeri fondamentali detti aminoacidi, ben descritti dai biochimici fin dall'inizio del secolo. Le proteine possono essere lunghe diverse

centinaia o anche migliaia di aminoacidi; ciascuno dei 20 aminoacidi ha delle proprietà chimiche distintive, per cui conferisce alla porzione della proteina in cui è presente delle proprietà strutturali e reattività diverse e specifiche. Questa sequenza lineare di aminoacidi, proprio per le diversità di reattività, di struttura e di proprietà chimiche dei diversi monomeri che la costituiscono, si ripiega su se stessa a formare una struttura tridimensionale complessa e precisa, determinata termodinamicamente da un unico fattore e cioè appunto dalla sequenza di aminoacidi. In altre parole, data una certa sequenza per esempio di 150 aminoacidi presi a caso tra i 20 aminoacidi conosciuti, questa sequenza, in condizioni fisiologiche (cioè pH neutro, temperatura vicina ai 37°C, soluzione acquosa, bassa forza ionica), si ripiega a formare una struttura tridimensionale assolutamente unica e definita, corrispondente a quella che ha il più basso livello di energia.

Questa specifica struttura tridimensionale è quella che conferisce le proprietà strutturali e catalitiche tipiche ai diversi enzimi ed alle diverse proteine. Quindi, per poter capire come sono codificate nei diversi geni le proprietà di tutte le proteine che fanno l'individualità di una cellula e di un organismo vivente dobbiamo capire come si fa a passare dal linguaggio a 4 lettere del DNA, al linguaggio a 20 lettere delle proteine.

Questo processo, definito di «traduzione», si compie tramite una vera e propria macchinetta corrispondente ad una specie di organello cellulare detto «ribosoma». Il ribosoma è composto di molte molecole, e precisamente da una cinquantina ad un'ottantina di proteine diverse a seconda dell'organismo e da tre molecole di RNA; esso è una specie di catena di montaggio attraverso cui scorre il cosiddetto RNA messaggero, ossia l'RNA che porta il messaggio per la sintesi di una particolare proteina (vedi Fig. 4).

Mentre la sequenza dell'RNA messaggero scorre attraverso il ribosoma, questo polimerizza gli aminoacidi, attaccandone uno dietro l'altro, seguendo le informazioni scritte sulla sequenza stessa dell'RNA. In altre parole, il ribosoma «legge» una sequenza di basi dell'RNA messaggero e la «traduce» sintetizzando una precisa sequenza di aminoacidi. Come si vede nella Fig. 4, giunti alla fine dell'RNA messaggero, tutta la sequenza proteica è uscita dal ribosoma e si ripiega spontaneamente a dare la struttura tridimensionale tipica di quella proteina.

4. IL CODICE GENETICO

Quindi nel ribosoma ha luogo questo processo fondamentale di traduzione, ossia di passaggio da un messaggio codificato nel DNA (poi nell'RNA), con un linguaggio di 4 lettere ad un altro codificato invece in un linguaggio di 20 lettere. Il problema del cosiddetto codice genetico è proprio questo: come si passa da un linguaggio a 4 lettere ad uno a 20 lettere? La soluzione del codice genetico, merito soprattutto di M. Nierenberg e H. G. Khorana, è rappresentata nella Fig. 5 che si trova ormai in tutti i testi elementari di biologia: vi sono riportati con simbologia di 3 lettere i 20 aminoacidi (fenilalanina, serina, tirosina ecc.) e, ai bordi, il messaggio di 3 basi che li codifica; così, per esempio, l'aminoacido fenilalanina è codificato sia dalla tripletta di basi (= codone) UUU, sia dal codone UUC. La leucina può essere codificata con 4 codoni diversi: UUA, UUG, CUU e CUC. Tutte le 64 possibili triplette codificano per un aminoacido, eccetto 3 che codificano per la terminazione della catena. Questo significa che quando l'RNA messaggero scorre lungo il ribosoma, questo legge la sequenza del messaggio a una tripletta per volta, e inserisce parallelamente il corrispondente aminoacido nella catena proteica, che viene sintetizzata.

Il problema è quindi spostato sul ribosoma: come fa questo a riconoscere da una parte una certa tripletta e dall'altra un preciso aminoacido? Per quanto riguarda il messaggio da tradurre, il ribosoma di per sé è totalmente aspecifico, nel senso che può sintetizzare qualunque proteina, seguendo le istruzioni di qualunque RNA messaggero. Ma da dove viene la capacità di accoppiare un particolare aminoacido ad una particolare tripletta presente nel messaggio? Questa specificità è data da un'altra molecola di piccole dimensioni (75 nucleotidi in media) che si chiama tRNA e che ha funzioni che si possono definire di adattatore (vedi Fig. 6). Di queste piccole molecole di tRNA che sono veramente la chiave del codice genetico, esistono almeno 20 tipi diversi, una per ogni aminoacido. Questa molecola, che contiene una sequenza complementare alla tripletta che codifica per un particolare aminoacido (il cosiddetto anticodone), entra nel ribosoma. Nella Fig. 6 è rappresentato il tRNA per l'aminoacido alanina. Nella posizione indicata come zona dell'anticodone, esiste una sequenza che è esattamente complementare (con qualche complicazione che non stiamo a vedere adesso)

alla tripletta che codifica per l'alanina: quindi il primo riconoscimento tra codone sull'RNA messaggero e anticodone sul tRNA adattatore è dato ancora una volta dalle regole di Watson e Crick, dal fatto cioè che ad un C si appaia un G, ad un G si appaia un C e così via.

Dato che nella posizione del tRNA indicata come zona dell'aminoacido è attaccata in questo caso l'alanina, questo tRNA può attaccare alla catena proteica in via di sintesi precisamente l'alanina. È chiaro quindi che il problema della specificità della traduzione da una tripletta sull'RNA messaggero all'aminoacido corrispondente sulla proteina consiste nel problema di come si faccia ad attaccare l'aminoacido specifico, l'alanina in questo caso, soltanto a questo tRNA che porta questo anticodone e non agli altri: è infatti ovvio che se l'alanina fosse attaccata al tRNA che porta l'anticodone ad esempio per la tirosina, si farebbe un errore nella sintesi della proteina. Invece soltanto il tRNA che contiene l'anticodone dell'alanina porta l'alanina attaccata all'estremità appropriata. Come avviene questo? Questo avviene ancora una volta grazie agli enzimi. Gli enzimi sono molecole di straordinaria varietà e specificità di reazione ed esiste una famiglia di enzimi ciascuno dei quali riconosce, con una porzione della sua superficie attiva, il tRNA che porta un dato anticodone e, con un'altra porzione del sito attivo, attacca l'aminoacido corrispondente (e solo quello) alla terminazione appropriata di quel tRNA.

Quindi, tornando al ribosoma (Fig. 5), questa complessa struttura contiene in via transitoria anche il tRNA che, da una parte riconosce l'anticodone sull'RNA messaggero e ad un'altra estremità porta attaccato l'aminoacido corrispondente. Dato che esistono almeno 20 enzimi diversi del tipo detto sopra, uno per ogni aminoacido e per ogni tRNA specifico, un dato tRNA porta sempre e soltanto l'aminoacido giusto. In altre parole, il segreto della specificità della traduzione da un messaggio scritto col linguaggio degli acidi nucleici a un messaggio scritto col linguaggio delle proteine, risiede ancora una volta nella specificità di un enzima, o meglio di una famiglia di enzimi.

Quanto descritto fin qui corrisponde all'essenziale della biologia molecolare; come si è visto, i veri attori di questi processi sono le proteine con la loro straordinaria specificità; si può quindi immaginare quanto interesserebbe poter prevedere, da una certa

sequenza di aminoacidi di una proteina, la corrispondente struttura tridimensionale. Purtroppo non siamo ancora in grado di fare questa previsione e questo problema è ancora oggi uno dei nodi più difficili da sciogliere nel campo della biologia molecolare: esso rappresenta una frontiera veramente importante della biologia futura, perchè in questa frontiera sono nascosti molti segreti funzionali della cellula, molti affascinanti misteri evolutivi e anche molte possibilità di utilizzazione pratica dei prodotti biologici.

Per avere un'idea della complessità del problema, basta considerare il numero di possibili sequenze di aminoacidi, e quindi di strutture tridimensionali; ad esempio, per una proteina della lunghezza di 1000 aminoacidi le diverse possibili combinazioni sono 20 elevato a 1000! Se poi consideriamo una sola sequenza di questa lunghezza, bisogna considerare che ogni aminoacido della catena può assumere, sulla base delle sue specifiche proprietà stereochimiche, una varietà di orientamenti rispetto agli aminoacidi immediatamente adiacenti; per una sequenza di mille aminoacidi, il numero di possibili combinazioni diverse di questi singoli diversi orientamenti raggiunge ancora cifre astronomiche; eppure fra tutte queste, una sola combinazione di orientamenti (e quindi una sola conformazione stereochimica per ogni singolo aminoacido) viene prescelta in quanto dà la struttura colla massima stabilità termodinamica! Inoltre, tra tutte le sequenze di aminoacidi teoricamente possibili, gli organismi viventi appaiono utilizzare un insieme assai limitato: sembra cioè che gli organismi viventi, una volta selezionata una sequenza proteica funzionalmente efficace grazie alla sua specifica struttura tridimensionale, la riutilizzino con poche varianti in diversi contesti, magari associata a diverse altre sequenze pure selezionate funzionalmente ed indipendentemente. Ora, noi abbiamo solo conoscenze embrionali sul perché una certa sequenza assuma una e una sola precisa struttura tridimensionale, e non abbiamo alcuna idea del perché tra tutto l'infinito universo di possibili sequenze soltanto poche siano state prescelte dalla selezione naturale; questa scelta è soltanto un accidente storico dell'evoluzione o ha alla base delle costrizioni fisiche ben precise, che noi ancora non conosciamo, riferite alla chimica fisica delle proteine? Questo è un grosso problema del tutto aperto per il futuro e strettamente collegato al complesso e difficilissimo problema della previsione della struttura tridimensionale delle proteine a partire dalla sequenza.

5. DALLA BIOLOGIA MOLECOLARE ALL'INGEGNERIA GENETICA

Avendo così definito i punti chiave della biologia molecolare, basata soprattutto sulla conoscenza delle strutture del DNA e delle proteine, cercherò di passare ora brevemente in rassegna i principali problemi che incontra oggi il biologo molecolare e il materiale su cui lavora. La Fig. 7 rappresenta la sequenza del DNA di un piccolo virus detto Polyoma, che è lunga 5297 paia di basi. Questo piccolo virus è in grado di indurre tumori nelle cellule di topo; quindi questa sequenza racchiude un'informazione molto importante non soltanto per il virus ma anche per il topo, in quanto corrisponde a tutta l'informazione necessaria a far riprodurre questa particella virale ed a provocare quindi, una volta introdotta in una cellula del topo, o la crescita del virus o la sua inserzione nel genoma del topo e poi l'induzione del tumore.

Se un virus come questo porta tutta la sua informazione biologica scritta in una molecola circolare di DNA lunga 5000 paia di basi, un batterio come l'*Escherichia coli*, che è il comune ospite del nostro intestino e quello su cui si è svolta la maggior parte degli studi della biologia molecolare, porta la sua eredità biologica pure in un'unica molecola di DNA della lunghezza di 3 milioni di paia di basi; ci vogliono quindi circa 600 figure come la Fig. 7 per riportarne tutta la sequenza (peraltro non ancora conosciuta). Se passiamo dai batteri agli organismi complessi come l'uomo, ricordiamo che l'eredità biologica degli esseri umani è iscritta in 23 coppie di molecole diverse, ossia in 23 paia di cromosomi, la cui lunghezza complessiva è di 3 miliardi di paia di basi. Quindi saranno necessarie circa 600.000 figure come la Fig. 7 per riportare tutta questa sequenza quando sarà conosciuta.

In realtà l'obiettivo dei ricercatori e la complessità del problema non risiedono semplicemente nel decifrare tutta questa sequenza, cosa che tecnicamente si può fare e certamente si farà; l'interesse principale è nel capire in che modo, da questa sequenza non soltanto si possano fare tutte le diverse proteine specifiche per la specie umana (ed abbiamo visto sopra come questo avviene) ma soprattutto nel capire in che modo questa sequenza *non* faccia produrre tutte le proteine che vi sono codificate. Il mantenimento di un organismo multicellulare complesso come l'uomo dipende da una serie complicatissima, temporalmente e quantitativamente modulata, di

reazioni regolative: in altri termini, alcune proteine interagiscono con sequenze specifiche del DNA e determinano che ad un certo momento un certo gene venga attivato, e dopo un certo tempo venga inattivato e così via, secondo un complesso programma temporale che prevede ad esempio il passaggio dall'uovo fecondato all'organismo adulto; similmente, altri processi regolativi intervengono per il mantenimento dell'organismo adulto in condizioni fisiologiche, per la sua risposta alle diverse variazioni ambientali ecc.. Di questo complessissimo sistema regolativo stiamo cominciando a capire appena l'ABC. Questo è un vero secondo codice genetico, assai più complesso di quello già descritto, in quanto consiste nella definizione accurata di tutti questi complessissimi sistemi regolativi, di tutto questo giuoco complicatissimo di interazioni tra prodotti di alcuni geni (proteine), che a loro volta agiscono sul DNA e permettono l'attivazione di certi geni i cui prodotti a loro volta possono agire sul DNA in altre posizioni ed attivare o inattivare altri geni e così via, secondo un programma estremamente complesso e geneticamente determinato, di cui, ripeto, siamo appena appena agli albori della comprensione. È questo un programma di estremo interesse proiettato nel futuro, che insieme alla definizione del rapporto tra la sequenza e la struttura tridimensionale delle proteine, rappresenta la frontiera della ricerca biologica più avanzata di oggi.

Ad ogni modo, la straordinaria messe di conoscenze che abbiamo già ottenuto, ci ha messo a disposizione le strutture e le leggi fondamentali con cui si trasmette l'informazione biologica, e con la conoscenza di queste strutture e queste leggi siamo anche in grado di intervenire su esse e di usarle ai nostri fini. Noi possiamo infatti modificare quasi a piacimento il DNA della maggior parte degli organismi viventi, e l'insieme di tecnologie con cui compiamo queste modificazioni è quello che viene chiamato comunemente ingegneria genetica. Noi possiamo «ingegnerizzare» i diversi organismi appunto perché possiamo modificare il loro patrimonio genetico in modo abbastanza mirato. Non entrerei nei dettagli di queste tecnologie perché richiederebbe troppo spazio, ma ne riporterò soltanto l'ABC.

È bene subito precisare che quando si parla di ingegneria genetica, nella grande maggioranza dei casi ci riferiamo alle modifiche dell'eredità biologica di microrganismi; così pure, quando si dice che mediante l'ingegneria genetica abbiamo clonato il gene per una

proteina o il gene per un farmaco (per esempio il gene per l'ormone della crescita o per l'insulina umana e così via), si intende dire che abbiamo introdotto dentro un batterio o un lievito un piccolo cromosoma accessorio, che viene chiamato plasmide, in cui abbiamo inserito una sequenza di DNA proveniente da un altro organismo e che porta l'informazione per quella particolare proteina. L'essenziale di questo processo è rappresentato nella Fig. 8. I plasmidi sono dei piccoli cromosomi circolari accessori presenti in molti batteri, tipicamente l'*Escherichia coli*, delle dimensioni di qualche migliaio di paia di basi; questi sono (a differenza del cromosoma principale, lungo 3 milioni di paia di basi) facilmente estraibili e facilmente manipolabili *in vitro*.

Lo strumento più efficace che abbiamo disponibile ai fini di queste manipolazioni consiste in una ricca famiglia di enzimi, detti enzimi di restrizione, che sono in grado di tagliare le molecole di DNA a doppia elica in corrispondenza di precise sequenze, lunghe per lo più tra le 4 e le 6 paia di basi. Di questi enzimi ne abbiamo a disposizione diverse centinaia, con specificità diverse. La maggior parte di questi enzimi, come simboleggiato nella Fig. 8, tagliano la sequenza specifica del DNA in due punti leggermente sfalsati sulle due eliche complementari, per cui lasciano delle terminazioni cosiddette «adesive», ossia facilmente riattaccabili (grazie alle interazioni tra le sequenze complementari, secondo le note regole di appaiamento, e con l'ausilio di altri enzimi) a terminazioni eguali, presenti su molecole di DNA diverse, ma ottenute con lo stesso enzima di restrizione. Quindi, come si vede nella Fig. 8, una volta tagliato un plasmide in un punto preciso con un dato enzima di restrizione, in questa rottura possiamo inserire un frammento di DNA che proviene da un altro organismo, per esempio il frammento di DNA che codifica per l'emoglobina umana (l'emoglobina è la proteina che trasporta l'ossigeno ai tessuti e grazie a cui il nostro sangue è rosso). Così questo plasmide manipolato *in vitro*, questo piccolo cromosoma «chimerico» ricombinato, può venire reintrodotta dentro la cellula batterica, in cui esso si replica allo stesso ritmo della coltura batterica stessa (vedi Fig. 8).

In tal modo possiamo avere tante copie del plasmide (e del gene dell'emoglobina) quante ne vogliamo, e possiamo far esprimere quel gene sfruttando i sistemi regolativi dell'espressione dei geni che già conosciamo. Possiamo così far produrre al batterio tutta

l'emoglobina umana che ci interessa, oppure tutta l'insulina umana, oppure qualunque altra proteina. Per avere un'idea di quanto sia ricca la nostra capacità d'intervento si veda la Fig. 9. Le capsule di Petri ivi riprodotte contengono delle colonie del batterio *Escherichia coli*, in cui è stato inserito un plasmide contenente il gene per la luciferasi.

La luciferasi è un enzima che è presente nella coda delle lucciole e che, utilizzando una fonte d'energia chimica compie la reazione luminescente che fa brillare la coda delle lucciole. Il gene per questo enzima è stato «clonato» in un plasmide col procedimento schematizzato nella Fig. 8, ed inserito nell'*Escherichia coli*; in presenza di una fonte di energia chimica (glucosio), quest'enzima produce la luminescenza, ed ecco quindi che le colonie batteriche sono luminose. Penso che questo esempio molto pittoresco sia abbastanza indicativo di come con l'ingegneria genetica si possa far produrre ai batteri qualunque proteina.

6. APPLICAZIONI DELL'INGEGNERIA GENETICA

Ad esempio con le tecnologie appena accennate, si possono ottenere farmaci come l'ormone umano della crescita, l'insulina umana, gli interferoni, o l'eritropoietina, una molecola questa essenziale per certi casi di anemia dovuti a dialisi prolungata negli ammalati di rene; si possono pure produrre nuovi fattori trombolitici come l'attivatore del plasminogeno, un enzima in grado di sciogliere il coagulo che si forma nel sangue nel caso dell'infarto o di altre trombosi e che appare assai efficace se somministrato nelle prime ore dopo l'evento, e così via. È molto più conveniente far produrre dai batteri tutte le molecole qui citate, che sono di derivazione umana, che non estrarle da cellule umane; questo vantaggio è ancora più netto quando si devono produrre vaccini per organismi pericolosi: ad esempio il miglior vaccino per l'epatite B, dal punto di vista della sicurezza e dell'economicità, è fatto col DNA ricombinante. È infatti molto meno pericoloso maneggiare un pezzettino dei geni di un virus infettivo per l'uomo, introdotto in un plasmide batterico, che non manipolare il virus stesso: manipolare un virus pericoloso è molto pericoloso, manipolare un 1 per mille del genoma di un virus che produce una proteina che non causa di per sé nessun danno, non è di nessun pericolo, ma, al fine di ottenere il vaccino, altret-

tanto efficace. È comprensibile quindi che l'industria della salute umana mostri un interesse veramente straordinario per l'ingegneria genetica.

È bene però sottolineare che i vantaggi dell'ingegneria genetica per la salute umana non riguardano soltanto la produzione industriale ma soprattutto, e ci tengo a sottolineare questo soprattutto, la conoscenza. Il più grande vantaggio che abbiamo avuto dall'ingegneria genetica è che il tasso di aumento delle nostre conoscenze sulle proprietà biologiche degli organismi superiori e particolarmente dell'uomo è aumentato enormemente, perchè adesso possiamo studiare lunghi tratti del genoma e complesse funzioni espresse nell'organismo umano o in altri organismi superiori con lo stesso dettaglio e con la stessa facilità con cui abbiamo potuto in passato studiare i geni e i prodotti di batteri, di virus o di altri microorganismi. Con la stessa facilità con cui abbiamo studiato la biologia molecolare dei microorganismi adesso possiamo studiare la biologia molecolare umana, proprio perchè possiamo isolare un gene e studiarlo in dettaglio, grazie all'ingegneria genetica.

Per dare solo un esempio di questo progresso, ricordo che la scoperta degli oncogeni, una scoperta di estremo interesse e di grande importanza per il futuro, si è avuta grazie all'ingegneria genetica. Gli oncogeni (vedi Fig. 10) sono dei geni che, se introdotti in una particolare linea cellulare, conferiscono ad una parte di queste cellule la capacità di crescere tumultuosamente e irregolarmente fino a dare luogo ad un vero e proprio piccolo tumore, prima *in vitro* e poi, introdotte nel topo, anche nell'organismo *in toto*. Grazie alle tecnologie dell'ingegneria genetica si sono identificati più di una trentina di oncogeni, si comincia a conoscerne le proprietà e si comincia a capire perché una cellula diventa cancerosa; da ciò nasce la speranza di riuscire a impedire, domani, che questo avvenga o a curare il processo una volta avviato.

Altri tipi di applicazioni dell'ingegneria genetica a carattere conoscitivo, ma con immediate ricadute pratiche, sono quelle relative alle malattie ereditarie. La definizione di tutta la sequenza del DNA umano non è interessante soltanto allo scopo di completare una grande raccolta di dati, che rischierebbe di riportare allo schema mentale della raccolta di francobolli; è interessante particolarmente per studiare quei geni che hanno a che fare con funzioni impor-

tanti per l'uomo e che, quando sono alterati, provocano gravi malattie ereditarie; infatti l'utilizzazione del DNA ricombinante offre già oggi una facilitazione enorme prima di tutto nella diagnosi e poi nello studio delle malattie ereditarie.

La Fig. 11 riporta lo schema di una procedura che permette, con una semplice estrazione di DNA, di fare diagnosi precisa ed assoluta della presenza di una grave alterazione ereditaria, diagnosi che può essere fatta anche durante la vita fetale. La figura riporta un tratto della sequenza del DNA umano che codifica per l'emoglobina. In alcuni individui questo DNA è alterato in un solo nucleotide, per cui il codone GAG diventa GTG. Questo unico nucleotide alterato su 3 miliardi è sufficiente a provocare la produzione di emoglobina alterata perché al posto dell'acido glutamico (corrispondente al codone GAG) si trova l'aminoacido valina, (corrispondente al codone GUG) un aminoacido questo con proprietà chimiche molto diverse dall'altro, e la cui presenza provoca appunto una grave disfunzione dell'emoglobina per cui i pazienti soffrono di una grave anemia, la cosiddetta anemia falciforme (simile alle talassemie). Quindi, una sola base alterata su 3 miliardi di basi, è sufficiente a far nascere un bambino con una grave malattia incompatibile con la vita. Ora, la presenza di questa singola base alterata può essere visualizzata con una procedura un po' complessa che ci porta all'immagine schematizzata nella Fig. 11. Come è spiegato nella didascalia della figura, si ottiene come risultato dell'analisi una lastra fotografica su cui si vedono, nel caso normale, due bande e, nel caso del gene alterato, una sola banda, e tutto ciò grazie all'alterazione di una sola base. È possibile, in linea di principio, mettere a punto saggi di questo tipo per qualunque malattia ereditaria si voglia studiare e diagnosticare: questo mette a disposizione dei ricercatori delle possibilità di indagine e di diagnosi veramente eccezionali.

7. L'INGEGNERIA GENETICA DEGLI ORGANISMI SUPERIORI

Fino a questo punto abbiamo parlato soprattutto delle tecnologie per modificare il patrimonio ereditario dei microorganismi, ma analoghe capacità di modificare il patrimonio genetico sono state messe a punto anche per organismi più complessi. Abbiamo a disposizione dei plasmidi simili a quelli dei batteri e dei lieviti che

possono essere usati per modificare geneticamente le piante superiori. Grazie ad essi si possono introdurre geni estranei in diverse piante al fine di ottenere piante modificate in modo permanente nel loro patrimonio genetico che siano più utili dal punto di vista alimentare.

Per quanto riguarda l'intervento sul patrimonio genetico degli animali, abbiamo pure delle efficaci tecnologie a disposizione, ma il discorso è più complesso perché queste non sono ancora così eleganti e mirate come nei batteri. Innanzitutto, per quanto riguarda gli animali, dobbiamo distinguere tra due possibili diversi tipi di intervento: possiamo modificare il DNA e quindi l'eredità biologica degli animali nelle cellule somatiche oppure nelle cellule germinali. Ricordo, a questo proposito, che durante lo sviluppo embrionale, dopo la fecondazione dell'uovo da parte dello spermatozoo, inizia la moltiplicazione delle cellule che danno poi origine all'embrione e infine all'organismo adulto. Molto presto, questa moltiplicazione cellulare porta alla divisione in due lignaggi cellulari distinti: uno, più importante numericamente, è la cosiddetta linea somatica, che dà origine a tutte le cellule dell'organismo adulto; l'altro, la linea germinale, molto più limitato numericamente, dà origine ai gameti, vale a dire agli spermatozoi nei maschi e agli oociti nelle femmine.

Tra queste due linee cellulari, dopo che è avvenuta questa separazione, non c'è nessuna comunicazione. È questa la ragione per cui le modifiche del DNA sulle cellule somatiche dell'organismo adulto non sono trasmissibili geneticamente, in quanto non si trasmettono alla linea germinale che è del tutto distinta. Distinguiamo quindi tra l'intervento dell'ingegneria genetica sulle cellule somatiche e quello sulle cellule germinali.

La Fig. 12 riporta uno dei primi interventi di ingegneria genetica sulle cellule somatiche di un mammifero. È stato isolato del DNA da cellule somatiche di topo coltivate *in vitro*. Queste cellule erano state selezionate per essere resistenti ad un particolare farmaco, il metotrexato; il DNA di queste cellule contiene quindi il gene per la resistenza a questo farmaco, che può essere isolato, introdotto in un plasmide, e questo plasmide può poi essere introdotto in cellule di midollo osseo di topo coltivate *in vitro*; le cellule di midollo osseo di topo possono a loro volta integrare nel loro genoma questo nuovo gene, diventando così esse stesse resistenti al meto-

trexato. Queste cellule di midollo, così geneticamente modificate, possono essere, come tutte le cellule di midollo, trapiantate in un topolino normale; una volta reinserite nel topolino queste ne colonizzano il midollo osseo, per cui questo topolino diventa resistente al farmaco; quel farmaco è particolarmente dannoso per le cellule del midollo osseo, ma dato che queste sono state trasformate geneticamente *in vitro*, il topolino è diventato, come organismo nel suo complesso, resistente al metotrexato.

Possiamo considerare questo come il primo esempio, ottenuto più di 10 anni fa, di modifica genetica delle cellule somatiche di un mammifero. Ma oggi siamo in grado di intervenire anche sulla linea germinale. Nella Fig. 13 è indicato, ad esempio, come, mediante micromanipolatore si possano praticare microiniezioni nelle uova fecondate ed ottenere così l'introduzione nell'oocita fecondato o nell'embrione nelle primissime fasi dopo la fecondazione, di alcune molecole di DNA estraneo; questo DNA così microiniettato ha altissime probabilità di integrarsi nel genoma, e quindi di essere riprodotto poi in tutte le cellule derivate dall'embrione, ed essere finalmente trasmesso sia alle cellule somatiche che a quelle germinali dato che l'integrazione ha avuto luogo prima della divisione delle cellule nei due lignaggi.

La Fig. 13 rappresenta il risultato di uno dei primi esperimenti di questo tipo, che portano all'ottenimento dei cosiddetti animali transgenici; in questo caso si è isolato un oocita appena fecondato e vi si è microiniettato del DNA contenente il gene per l'ormone della crescita del ratto. Tale gene si è trapiantato con una certa frequenza all'interno delle cellule di questo embrione dando poi origine a un organismo adulto; questo era un topolino che conteneva inserito quindi, nei suoi cromosomi, il gene per l'ormone della crescita di ratto: dato che questo ormone agisce anche sul topo, questo topolino è un po' più grande dei suoi parenti, e questa proprietà è trasmissibile geneticamente alla progenie. Questo è appunto il primo esempio di animale transgenico.

È chiaro che l'interesse degli allevatori per la tecnologia degli animali transgenici è molto spiccato perché offre la possibilità di ottenere delle modifiche del patrimonio genetico degli animali d'allevamento, molto più rapidamente ed efficacemente che non con le tecniche tradizionali del passato. A questo proposito è bene ricor-

dare che in qualche modo gli allevatori hanno sempre praticato l'ingegneria genetica, almeno fin dai tempi di Giacobbe e ancora prima: la praticavano semplicemente reincrociando quegli organismi che sembravano più interessanti, ed in tal modo potevano ottenere anche grosse modifiche del patrimonio genetico. Ma l'evidente vantaggio delle nuove tecnologie è di poter fare interventi estremamente più mirati e soprattutto estremamente più efficaci. È bene comunque sottolineare che, anche per l'ingegneria genetica degli organismi superiori, l'interesse maggiore è quello conoscitivo; mediante essa è divenuto possibile studiare la funzione e le relative interazioni molecolari dei geni preposti al differenziamento e alla morfogenesi, vale a dire alla formazione di un organismo completo, a partire da un uovo fecondato.

8. LA TERAPIA GENICA

Infine, anche se non resta qui molto spazio per trattarne in esteso, è opportuno ricordare che in diversi laboratori si considerano le possibili applicazioni dell'ingegneria genetica all'uomo; ricordo innanzitutto che vi è un generale consenso che, per quanto riguarda l'ingegneria genetica umana, non si debba intervenire sulla linea germinale, in quanto che, ad esempio, se lo si facesse allo scopo di curare una malattia ereditaria, si finirebbe per fare più danno di quanto si voglia curare. Per quanto riguarda invece l'intervento sulla linea delle cellule somatiche si stanno considerando e studiando diverse possibilità d'intervenire per guarire alcune malattie ereditarie mediante l'inserzione del gene sano nelle cellule somatiche degli individui affetti. Peraltro, ancora nessun intervento è stato realizzato.

La Fig. 14 riporta lo schema che si pensa di utilizzare, da parte di diversi gruppi, a scopo di terapia genica di cellule somatiche nell'uomo. Se abbiamo un paziente affetto da una grave malattia ereditaria e questa malattia ereditaria si esplica nelle cellule del midollo osseo (che, come abbiamo visto sopra, sono le più accessibili a questo tipo di intervento) si può pensare di prelevare appunto del midollo osseo del paziente, coltivarlo *in vitro*, introdurre nelle cellule in coltura il gene «sano» con una tecnologia che potrebbe essere per esempio quella della microiniezione. Una volta che il gene sano si sia integrato nei cromosomi di un adeguato numero di

cellule, e sia in condizioni di esprimere la sua funzione fisiologica, le cellule del midollo osseo possono essere ritrapiantate nel paziente e portare così i geni sani nell'organismo. Vi sono ancora moltissimi problemi tecnici da risolvere a questo scopo e quindi la terapia genica non è ancora una realtà, ma è ragionevole pensare che qualcosa del genere potrà essere realizzato in futuro.

9. CONCLUSIONI

Come si vede, la frontiera aperta dalle conquiste della Biologia in questi ultimi quarant'anni circa, è sconfinata ed estremamente affascinante. Vorrei sottolineare in particolare che, al di là delle applicazioni conoscitive e pratiche qui brevemente accennate, ve ne sono altre con potenzialità forse ancora maggiori di influenzare la nostra vita quotidiana del futuro. Mi riferisco al fatto che il giorno in cui saremo riusciti a capire il modo in cui una certa sequenza di aminoacidi porta ad una particolare struttura e ad una particolare reattività, potremo utilizzare queste conoscenze per ottenere tutte le reazioni chimiche che ci interessano dal punto di vista industriale, alimentare ecc., in modo estremamente più efficiente e blando che in passato. Sarà questo il modo di utilizzare l'informazione presente in una struttura complessa, al posto dell'energia. Infatti, si può dire che quello che rende i processi biologici tanto «superiori» ed efficaci rispetto agli altri processi naturali, è la capacità di utilizzare l'informazione al posto dell'energia. È questo il grande salto che è avvenuto nell'universo con la comparsa degli organismi viventi. Naturalmente per poter arrivare a questa comprensione avremo bisogno di acquisire una grande quantità di conoscenze nelle direzioni che ho sopra indicate, e particolarmente avremo bisogno di conoscere in dettaglio quelle interazioni fisiche così fini e così complesse che permettono di scegliere una particolare struttura tridimensionale a partire da una particolare sequenza: in questo modo la biologia si avvicinerà ancora di più alle altre scienze fondamentali e particolarmente alla fisica.

BIBLIOGRAFIA

I concetti qui riassunti sono presenti nei principali testi di Genetica, Biologia Molecolare e Biologia Cellulare. Ne riportiamo qui alcuni dei più recenti.

ALBERTS, B., BRAY, D., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K., WATSON, J.D., *Molecular Biology of the Cell*, Garland Publishing, Inc., New York and London (1983).

DARNELL, J., LODISH, H., BALTIMORE, D., *Molecular Cell Biology*, Scientific American Books, Inc. (1986).

POLSINELLI, M., BUIATTI, M., OTTAVIANO, E., RITOSSA, F., *Genetica*, Sansoni Editore (1985).

STRYER, L., *Biochemistry*. W.H. Freeman & Co., New York (1988).

WATSON, J.D., TOOZE, J., KURTZ, D.T., *Recombinant DNA, a Short Course*, New York, Scientific American Books, Inc. (1983).

WATSON, J.D., HOPKINS, N., ROBERTS, J.W., STEITZ, J.A., WEINER, A.M., *Molecular Biology of the Gene*, The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc. (1987).

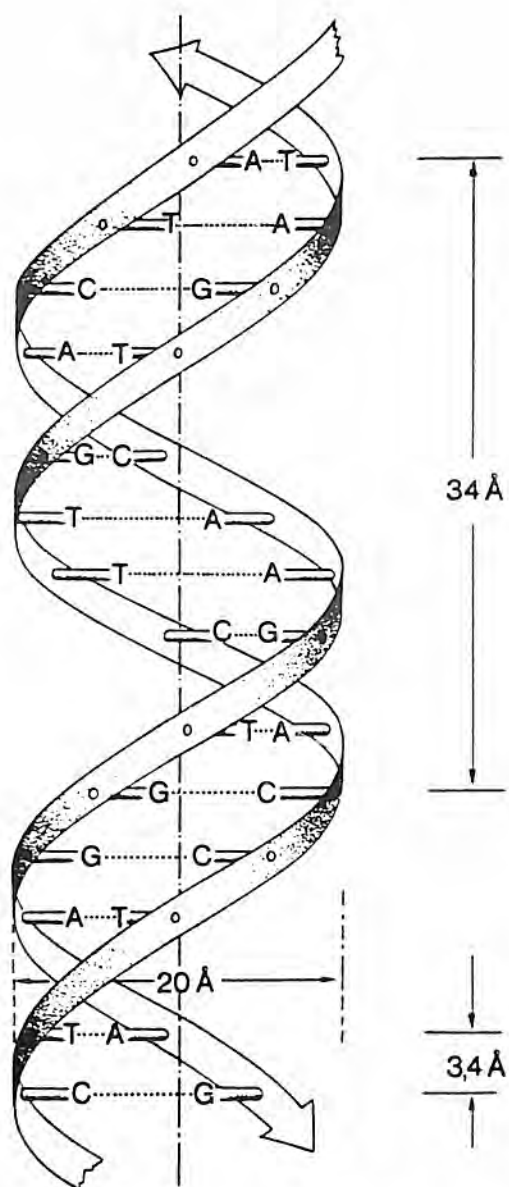


Figura 1: Schema della struttura del DNA proposta da J. Watson e F. Crick. Le lettere riportano le 4 basi poste all'interno della doppia elica; ogni base è legata alla successiva base dell'elica da un legame covalente. Per ogni coppia di basi sono indicati i legami deboli specifici (C:G, T:A) che tengono associate le due eliche. Le misure in Angstrom riportano i parametri spaziali fondamentali della molecola.

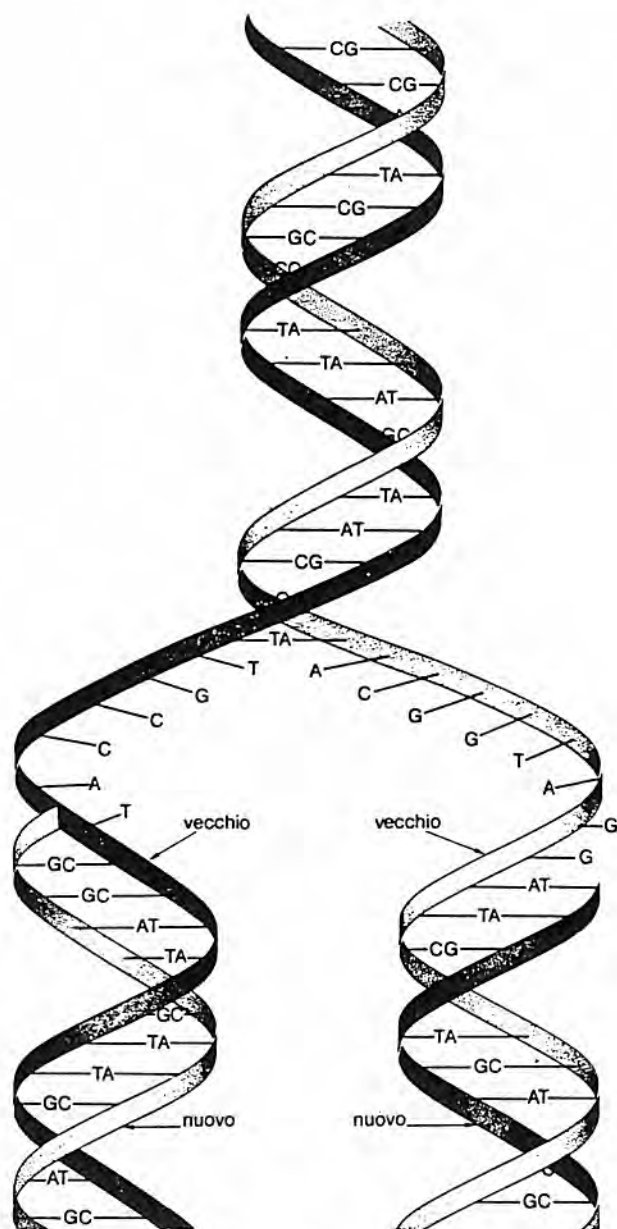


Figura 2: Il modello di duplicazione semiconservativa del DNA. La replicazione procede verso l'alto della molecola; la struttura costituisce una vera e propria «forca replicativa».

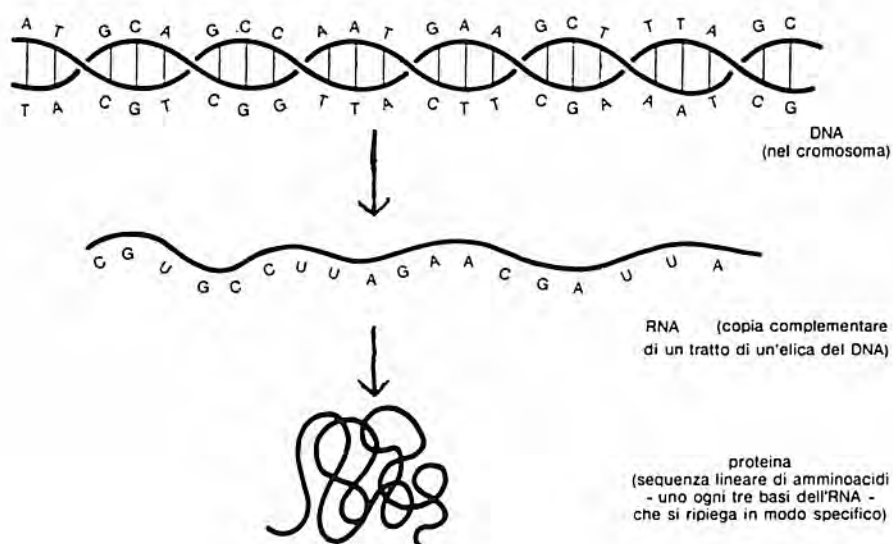


Figura 3: La trasmissione dell'informazione ereditaria all'interno di una cellula. La sequenza del DNA corrispondente ad un particolare gene viene trascritta in una sequenza di RNA seguendo l'informazione presente su una sola delle due eliche. L'RNA è quindi copia complementare dell'elica trascritta per la lunghezza corrispondente a quella del gene, con la sola differenza che la base U sostituisce la T. L'RNA che porta questa informazione viene poi tradotto nella sequenza di una proteina (combinazione lineare di 20 amminoacidi diversi) che si ripiega a formare una precisa struttura tridimensionale. (A. FALASCHI, *Ingegneria Genetica: verso una nuova biologia*, Scienza e Tecnica. Mondadori Est, pp. 206-216, 1982).

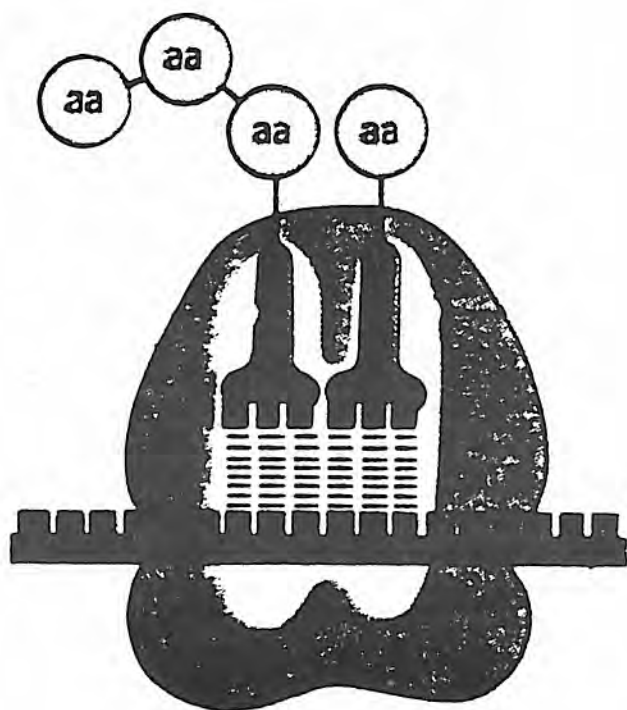


Figura 4: Funzionamento del ribosoma. Al ribosoma si attaccano l'RNA messaggero e due tRNA corrispondenti a due successivi aminoacidi. I tRNA si legano con la loro sequenza di anticodone al codone dell'RNA messaggero e permettono, tramite l'intervento di diversi enzimi, il legame di un nuovo aminoacido all'ultimo aminoacido già polimerizzato sulla proteina in fase di sintesi. (ALBERTS, B., BRAY, D., LEWIS, J., RAFF, M., ROBERTS, K., WATSON, J.D., *Molecular Biology of the Cell*. Garland Publishing, Inc., New York and London, p. 210, 1983).

	U	C	A	G	
U	Phe Phe Leu Leu	Ser Ser Ser Ser	Tyr Tyr non-senso non-senso	Cys Cys non-senso Trp	U C A G
C	Leu Leu Leu Leu	Pro Pro Pro Pro	His His Gln Gln	Arg Arg Arg Arg	U C A G
A	Ile Ile Ile Met	Thr Thr Thr Thr	Asn Asn Lys Lys	Ser Ser Arg Arg	U C A G
G	Val Val Val Val	Ala Ala Ala Ala	Asp Asp Glu Glu	Gly Gly Gly Gly	U C A G

Figura 5: Il codice genetico. Nelle caselle centrali sono riportati i 20 aminoacidi presenti nelle proteine (usando la loro abbreviazione di 3 lettere) ed i segnali di fine di una sequenza proteica (non-senso). Per ogni aminoacido o segnale di termine si può ottenere il codone corrispondente considerando nell'ordine, come prima base quella indicata nella colonna di sinistra, come seconda base quella indicata nella riga in alto e come terza base quella riportata nella colonna di destra. Così, ad esempio, la fenilalanina (Phe) è codificata dai due codoni UUU e UUC.

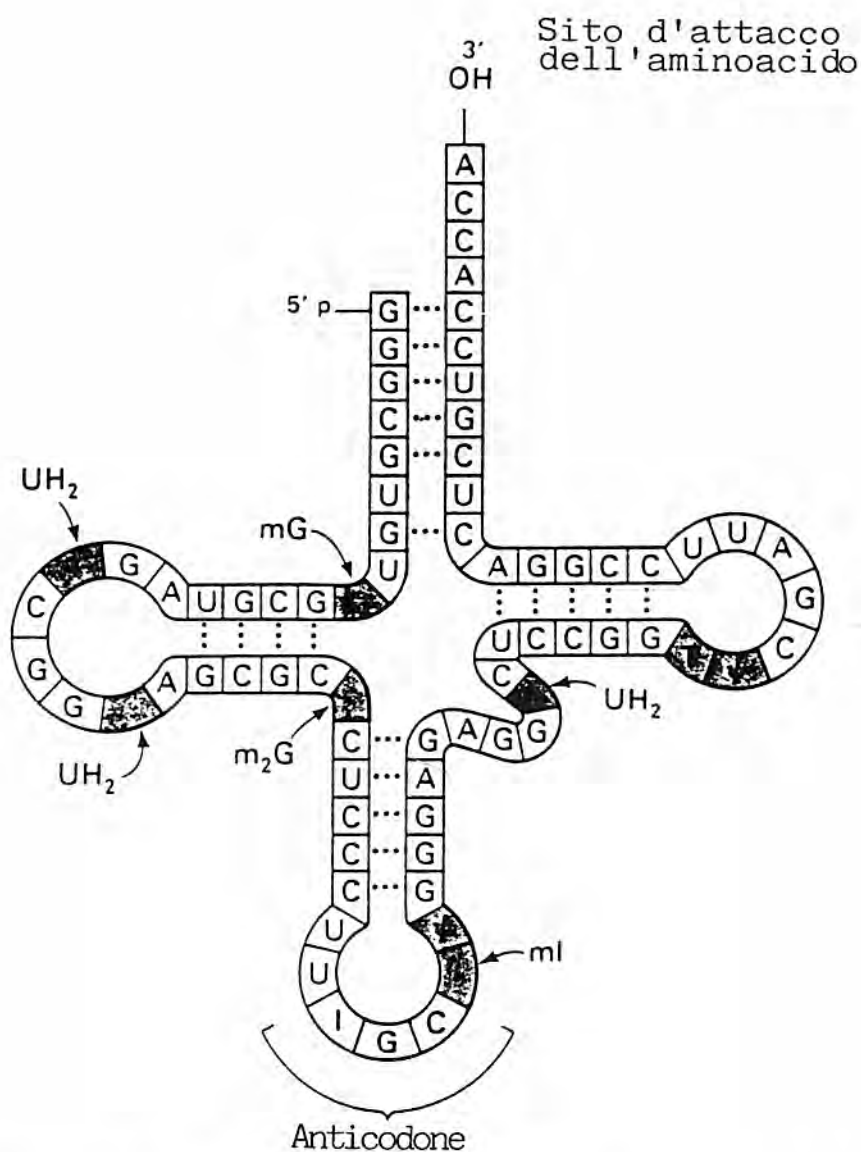


Figura 6: Struttura del tRNA di lievito corrispondente all'alanina. La molecola contiene alcune basi «strane», ottenute per modifiche chimiche che avvengono sulla molecola già polimerizzata. Si distinguono 4 braccia: la terminazione in alto è quella cui si attacca l'aminoacido, mentre il braccio più basso porta la tripletta anticodone che riconosce il codone sull'RNA messaggero. (STRYER, L., *Biochemistry*. W.H. Freeman & Co., New York. p. 739, 1988).

GGGGGCCCCC GGCCCTCCCT TACTCTGGAG AAAAAMAGA GAGCATTCT
AGAGCTTCC AGAGCCACTT TGTCTAACH GAGATGGCC GTTGAGAGGG
CTGTGGGGCC ACCCAATATG ATATATATA GCGCCCAAG CCTCTTCCCG
CCCTATTCCA GCGCTACAC CATCATGGAT AGAGTCTCG GAGAGCTGA
CAAGAAAGG CTGTGAGC TCTTAAGT TCCCAATCA CTATGGGGG
ATTITGGAG ATGGAGAGG GCAATAGAG AGAGAGCTC GTATATGAC
CCAGCAAGG GTGGAGGCA TGGCTTAAT CAGAAATGA ACATCTCTC
GGAAACATTA AATCTGAG TATCATCT GAAATGAT CTAGAGAGGA
CCGGCTTCCA CTATAGAGS ATATCCGG ATGGGTAGA TGTAGAGCC
AAGAGACCT TTGGATAG ATACTACAG CGGTCTCCA TATAGAGCT
TACTGGCTTA GTAAATGTA AATAGAGCT ACAAATGGA AATATAGCC
TCTTAGAGA GCAACATAGA GAGCTCAAG TCCCAAGTGG
CTAGACTTG GAAATGTT TGTCTTGA TGTATACAG AATGGTTGG
AACCCACAG CGAGATGTC TGACCTGTA TGCAGCTC ATTCAGAGA
TCTCATNA CTGGCTGAG CTGGATGTC AGAGCTGTA TATCAAGCT
AGATATCA AGGGCGGGT GGTATTAG GCGATATTC TTAGAGGGT
CTCCCCCAG AACGGCGAG CAGAGACTS AGAGAGAGG CAGAGATCA
CTACAGAGT ACTAGTGGT ATTAGCTAT GAGAGAGT ACTTCAGAG
GGAAATGAGT GATTCTTCA GAAATGGGA CCCCAGTAC CAGTGGCCG
CTAGACCTG CGAGTCTCT GAGACCCCG ACCTATGTC TTATAGAGAG
CCACTCTAT CCCCCAACC GAGTCTCCA ACAGATAC CCGACATAC
TGTGTAGA AGAGCAATC CTGTGTGG TGAGCCCAT GAGACATAT
CCCCGAGCC CCCCAGACT CCGTATCCA GAAAGGAGC AAGACAGCT
GAGAGAGAG GAGAGAGAG AGAGAGAGT CATCCAGT GAGATCTGT
ATTAGACAT CTTACCCGGG GAAACATAC CCCCAGTAT CCCCCCTCT
ATCATTCAG GGGGAGGCT GAGTCACTG AGAGGCTGTA TTCTCCCTCT
TTGTAGAG GCTCATTTG ATCCATGCT AGATGAGCT CAGAAATGA
GAGCTACTA CAGAGTGGT CTAGAGCTC ATTCAGTCA AGCCAGCTA
AGAGGCTAG GAGAGACCT GCTCCAGTG ACTTCTAG CAGCTTACT
GGTATTTCT CTATGCTAT TATCTTAT AATAGTTC CCGATTTCT
AGTATCTCT ACCAAGAGA AATGCAACH ATATATAT ACATAGAGA
AGTATGGCC GAAATTCATA TGGTGTCT ATATAGAGA GGGGGGATG
CTGTCTCTT TACTATGC TAGACAGG GTTATAGAG TTAGATATA
TTGTCTTAG CTTTGGCCA GCTCTCAT GTTACGGA GTACACAGC
CTATGAGAT CTATCAAGT GTACCCGAG CACATTTCA GTTATAGAA
GAAATAGC CAGGCTCCA GCAATCGAG TTATAGAGC ACCGAGAAA
ACAGAAAGA GTAGACTGA TTATGTAG AGACTTCA CTAGAAACH
ACCTTATAG TCCCTGTTA ATTAGGGT ATATCTTGA TTGTGGAAA
GAGGTCTT CATCATTA GTTAGAGAA GAGAAAGC GCGCTCAAT
ACATITGAAA AACATAGAA ACATAGAGA GATAGAGAG CTCTCTCTA
ATTGTAGAG TCAAAAGCA ATCTGAGC AGGAGCTGAG GAGCTGGGA
TCCAGAGAG TGAATTAGT AAGGTAGC CCGAGCAGC TTITAGAGA
GAGATGCA CAGTCTTCC TAGGTATA AGATGAGC TCTCTGATG
CTTACCTCA CTACAGAGT GTGGCTGGT ACCAGTGT TTAGAGAGC
TTTCTCAA CACTGTTTA GATGTAGG CTACTAGAG AAAATGTGCC
AAAGACAGC AACATCTT TTAGAGAGC AGTATATCA GAAAGAGAG
GCGGTAGAG CCGCTTAT AGCTTTAG TGGAGAGT TGTCAATAT
AATGGCCCTG CAGTAACT TGGTTTGA CTGGTGTG CAGAGAGCA
GTITGGTCT GTTITGAG ATGTAGAG TCAATATCC TTAGAGAGC
AACTACAGC AGGATAGG GTGGTATC TATATATC CAGAGATC
TGAATGGA GTTAAAGT CATGTAGA AAAAGAGCA GCAACAGAG
GTACACACT TTTCACACT GTGTGTAG TGTGTATC TATCTCTCT
CAAMAGAG ATGGGCCCG TTTCATAG TGTGTATT CACTGTAAA

CCCCATCGG CCAATCTCT TGAAGATGT GAAITTTTG AAGGAGAG
AATATAGAG AGTAGAGATA CCGTTCCT ATACTATA TGAATTTCA
CTTCAAGAT ATTGAATCT GATATACAG GTCTGTGAA GAGGTTCTG
GACCAATGT CTATGAGTG CTCTAGAG TTGTITGAG ATATCTCTG
TATGTGCA GAGGGAGAG ACCCTTCAAG GAAATATGT GATATAGTG
AATACAGT TTATATATA AATATAT TCCAGAAAT ACATCTTTG
TTTTTCNA GGGGTACCA TACGCTCA TATAGAGT CCCCCTTCA
GGTTCAGC CATATACA CTACAGCT TATACGTGG TGTCTCCC
TTCCATGGT TGGCCCTGCA CTGGAGAG CATGTGTG AAGAGAGC
TTATAGAGG GAGCATGAG TAGGAATTT TACCATCT TTTCATAG
GTATTTTGA AATATAGT AAGCCCTC TCCAGTAG ACACATAGT
TCTGTAGT CTCCAGCCA TTATCTAC ACAGAGAG TATAGCCCT
CTCTTTCA GAGGGGCCA ACTCATTT CTTATAGAG CAGATGTCT
AGGATTTG TCACTGAGC GAGGGTGA GGTGTGTCT CTACAGTGA
ATTGCCAAG TACTATGT TCTATTTT TGTGAGAT GATGAGGA
TTTCAAGAG ATACATTTG TCTTATCA CTTGGCCT GTATATGA
TTAGAGAT GGTCTTGT GAGATGTC TTCTGTGA TTCTTTAT
TGTATACC CTTCTTCT TGTATTTG TGTGATCT GTACAGCT
CTTGAGAG AAGCGTCT CCGCAGCAG CAACAGAT ATATGCTG
CTTCCAGT GAGTGAAT TCTTTGTG TTACTAGAT TGTGGTTTT
GTAGAGCA TGCATCTA ACAGTAGC AGAGCCAGC ACTGAGTT
TACAGTAC TGGCTCCAG ATTGTAGG TGTAGAGT GAGTCTCA
TTAGAGAG GAGCTGGA CTTCCTATA CTCCATGAG GAGTGTAT
ATTGGAGA ATCCAGAT CTATGTAG CAAATATAT CTTCTCTC
AACATATTA TTGCCCTG TGTGTAGG TTGTAGGT GGTGTGTCT
ACCATATTA GGTCTAGC AGCTTAT TGTGTAGC TGTGTAGC
TGTATAGG TGCAGAGCT CCAATCCCT TTATATAG AGTGTGAA
GAGGTGGG TGTGTAGAG CCGTGTAG ATTGTGTC GCAATTAG
ACCGGCTT TTCTTTGG GGCATCTC CTATAGT GTTCCAGC
TAGTTAT ATACCTAG AGCCATAG TTAAAGAG CATCCAGTA
GAGTATCT TTGTGTGA CAGCACCTG GCTGTAGAG ACTTATAC
CTACATCT TCACTGCTA TATGTCTG AGGGTAGAG CCACTATTC
CAGCTGCC TCTATAGTA TTAAAGTG CTCTCTCTG TGTGTATTA
AGCATATG GCTATATTA GTCACTAGT GATAGTCT GTAGAGCTG
TGTATGGA CCTGTGTA TTCACTAT GCTCACTGA GAGCATTAG
AATACCCA CCGGTGTT TTAGAGAG TACTAGAG ATCCAGAT
GTATGTCT GTCTATCT TATGTCTT ACAGTCTCT CCGATCTG
TTGTGTCT TGCAGACA TTGTAGAG ATATCTTCC AGCAATGA
GTAGAGAT GCGCAATGA TGTACTAT TAGAGAT AGCAATGA
TTAGAGAT ATCGAATAT ATCGAAGC GCTGATAG CCACTGAT
CAAGCTTA TTGTATTA CATAGAGC CTCTGCTG TGTAGTAC
GCTGTCT TAGGAATTA GTAGAGAG CTGTAGCT CTGTACAG
CATATGCC CCGCTGTG ACTTACAG ACAGAGAG TACTAGAAA
CCATAGAG TCGGTGAA TACCATAT TGTAGAGCT GTCTCAGC
TCAITAGC GTCAAGAG AGAGTGTG TTTCAGAT TAGGAGAGC
AGGCTTCT CAGTAAAT AGCTGTCC GAGAGCTG TAGGATGA
CACTTACT ATCTCTCA TAGGTATC TGAATATG AGTGGCTC
CCATTTGA AATATCTC CTGTAGCT TTCAAGAT GGGAGAGC
CTCACAGA GTAAITTTCT TCCCATCT TAAATATGA AATGTAGT
CAGTATGA GAGATAGT AACTAGCC AGTGGCTG GCGATCTCT
CTTATATA GTGTAGAG AATGCTCT CAGAGAGAG TGTGTGTG
CAGAGAG CAAMAGCT CTGACAGC GCTATAGT TTTCACCTA
ATATATTA TGCAGAGC TGTITTTT AGTATAGC AGAGCC

Figura 7: Sequenza del DNA del virus Polyoma. Una sola elica è riportata; la molecola è in realtà circolare, e formata da 5297 paia di basi.

Batterio	Enzima di restrizione	Sequenza di riconoscimento e siti di rottura	Terminazioni adesive prodotte
<i>Bacillus amyloliquefaciens</i>	Bam HI	-G [↓] -G-A-T-C-C- -C-C-T-A-G _r -G-	-G -C-C-T-A-G G-A-T-C-C- G-
<i>Escherichia coli</i> RY 13	Eco RI	-G [↓] -A-A* [↓] -T-T-C- -C-T-T-A [↓] -A [↓] -G-	-G -C-T-T-A*-A A-A*-T-T-C- G-
<i>Escherichia coli</i> R 345	Eco RI II	-G [↓] -C-C*-A-G-G-C- -C-G-G-T-C*-C _r -G-	-G -C-G-G-T-C*-C C-C*-A-G-G-C- G-
<i>Haemophilus influenzae</i>	Hind III	-A* [↓] -A-G-C-T-T- -T-T-C-G-A _r A*-	-A* -T-T-C-G-A A-G-C-T-T- A*-
<i>Haemophilus parainfluenzae</i>	Hind II	-C [↓] -C-G-G- -G-G-C _r C-	-C -G-G-C C-G-G- C-

ASSE DI SIMMETRIA BINARIA

Figura 8: Alcuni enzimi di restrizione con la sequenza da essi riconosciuta. Le sequenze qui riportate sono palindroniche e la rottura nei siti indicati dalle frecce dà origine a terminazioni parzialmente a singolo filamento e quindi «adesive». (A. FALASCHI, *Ingegneria Genetica: verso una nuova biologia*, Scienza e Tecnica. Mondadori Est. pp. 206-216, 1982.

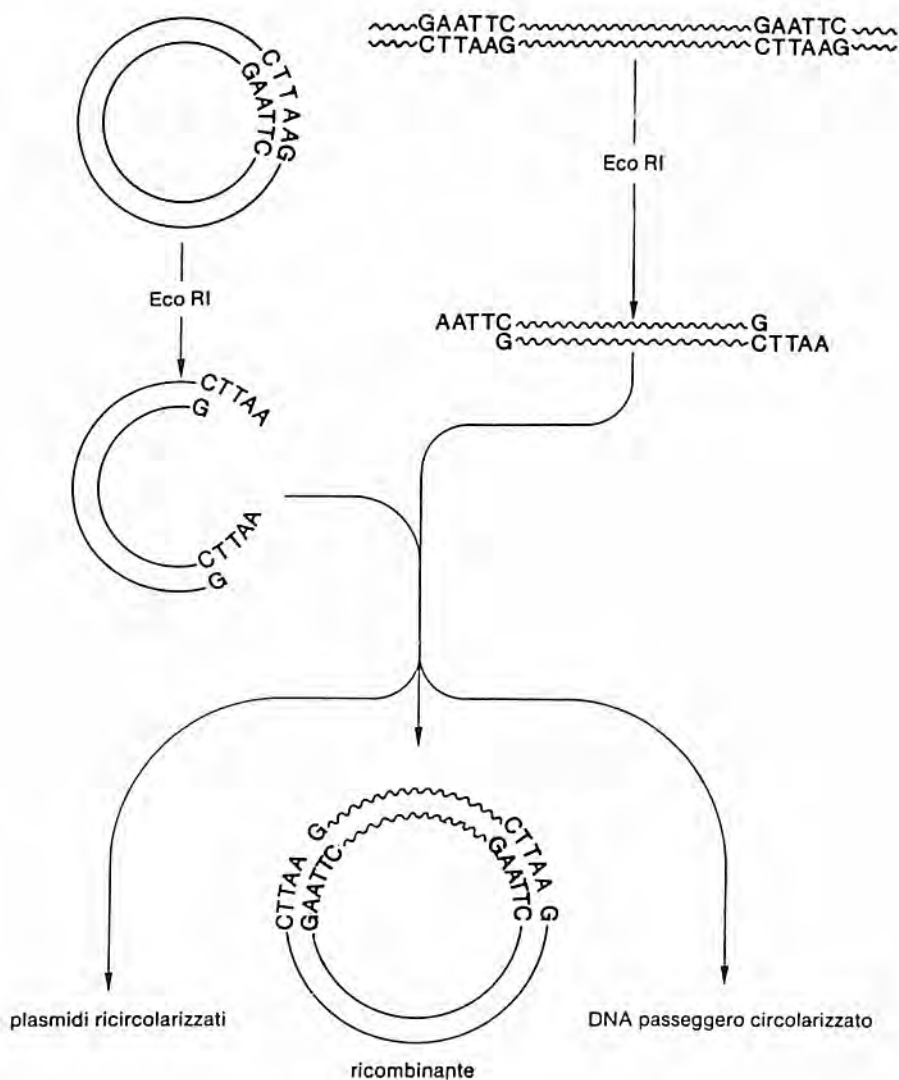


Figura 9: Procedimento per il clonaggio di un gene. Il DNA di un plasmide circolare viene tagliato da un enzima di restrizione; il DNA di un gene di qualsiasi provenienza è stato prodotto dal trattamento con lo stesso enzima di restrizione. Le terminazioni adesive possono così riassociarsi e dare origine, coll'intervento di un apposito enzima, ad una nuova molecola circolare «chimerica» in cui il gene estraneo fa ora parte del plasmide. Questo plasmide ricombinante può venire reintrodotta in un batterio, e riprodursi insieme al batterio stesso. Si può quindi ottenere un numero illimitato di copie del gene clonato. (POLSINELLI, M., BUIATTI, M., OTTAVIANO, E., RITOSSA, F., *Genetica*. Sansoni Editore. p. 522, 1985).



Figura 10: Un esempio di clonaggio di un gene estraneo in un batterio. Le capsule di Petri contengono colonie del batterio *Escherichia coli* in cui è stato clonato il gene della luciferasi, ossia dell'enzima che rende luminosa la coda delle lucciole (e di altri organismi). In alto, una fiasca contiene una sospensione degli stessi batterii. I batterii sono luminosi grazie all'attività della luciferasi. (Cell, Vol. 32 n. 32 - Copertina Marzo 1983).

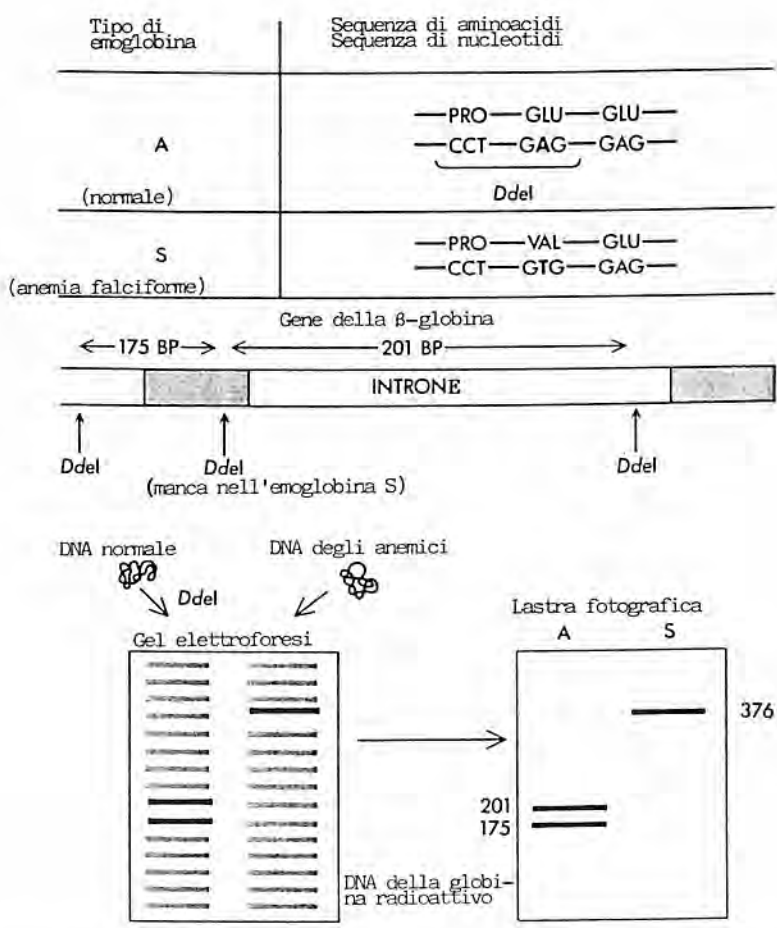


Figura 11: Diagnosi della presenza di una mutazione nel DNA umano. La sequenza del gene dell'emoglobina normale contiene la tripletta GAG compresa in una sequenza riconosciuta da un particolare enzima di restrizione (Dde I). Una mutazione relativamente frequente cambia la A in T trasformando il codone da quello dell'acido glutamico a quello della valina; questa mutazione abolisce il sito di taglio riconosciuto dell'enzima Dde I. Il DNA normale e quello mutante, se tagliati con detto enzima e quindi frazionati per peso molecolare, contengono il gene dell'emoglobina in frammenti di lunghezza diversa. Questi frammenti possono essere individuati grazie alla riassociazione con una sonda di DNA radioattivo che si può legare solo alla sequenza dell'emoglobina grazie all'interazione specifica tra le basi della struttura del DNA. La presenza della sonda radioattiva in corrispondenza dei diversi frammenti del DNA può essere riconosciuta mediante impressione di una lastra fotografica sovrapposta. Il DNA contenente la mutazione può essere così facilmente riconosciuto a quello normale per la presenza di un unico frammento di lunghezza pari alla somma dei due frammenti del DNA normale. (WATSON, J.D., TOOZE, J., KURTZ, D.T., *Recombinant DNA, a Short Course*, New York, Scientific American Books, Inc., 1983).

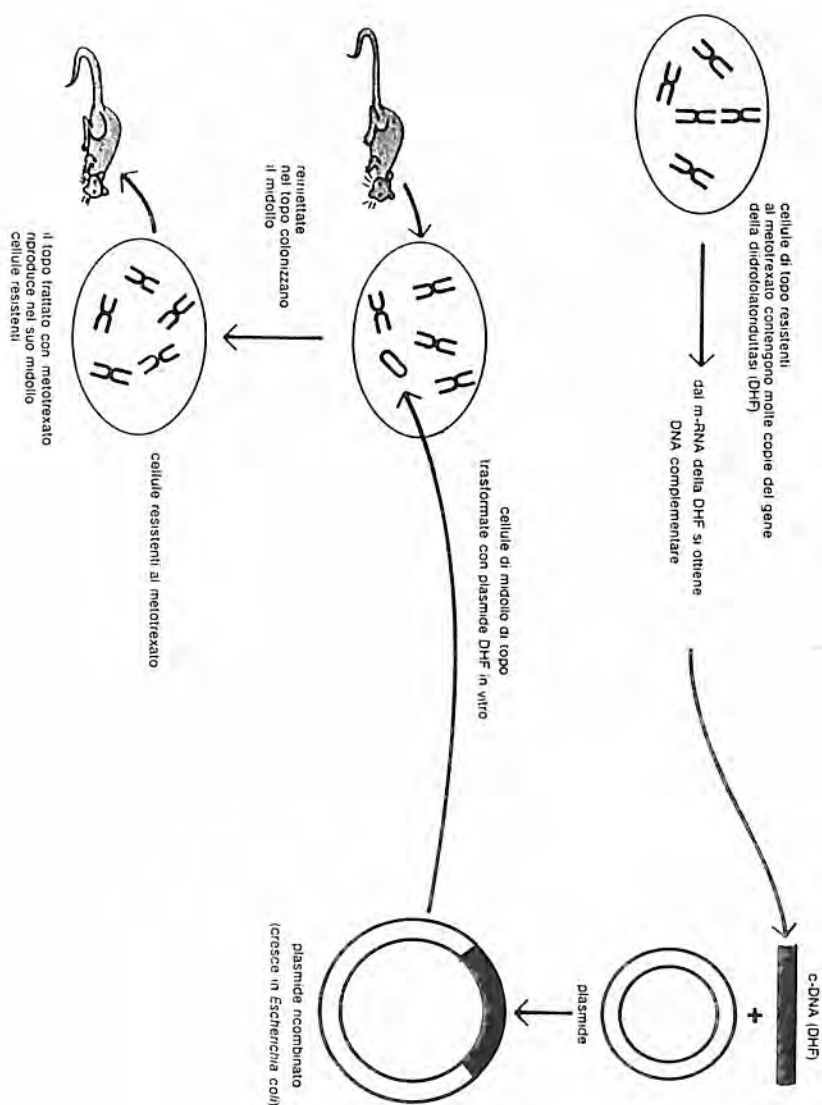


Figura 12: Schema della terapia genica somatica in un topolino. Da cellule di topo resistenti al metotrexato si estrae il DNA corrispondente al gene che conferisce detta resistenza. Questo DNA viene inserito in un plasmide e reintrodotta in modo stabile nelle cellule di midollo osseo del topolino coltivato *in vitro*. Queste cellule vengono trapiantate nel midollo del topolino dove si riproducono conferendo al topo stesso la resistenza al metotrexato. (A. FALASCHI, *Ingegneria Genetica: verso una nuova biologia*. Scienza e Tecnica. Mondadori Est. pp. 206-216, 1982).



Figura 13: Il primo risultato del trapianto genico sulle cellule germinali. Il topo di sinistra differisce da quello di destra perché porta nel suo DNA il gene per l'ormone della crescita del ratto, la cui azione gli conferisce una maggiore dimensione. Tale proprietà viene trasmessa geneticamente alla progenie. (Nature, Vol. 300, n. 5893, Copertina Dicembre 1982).

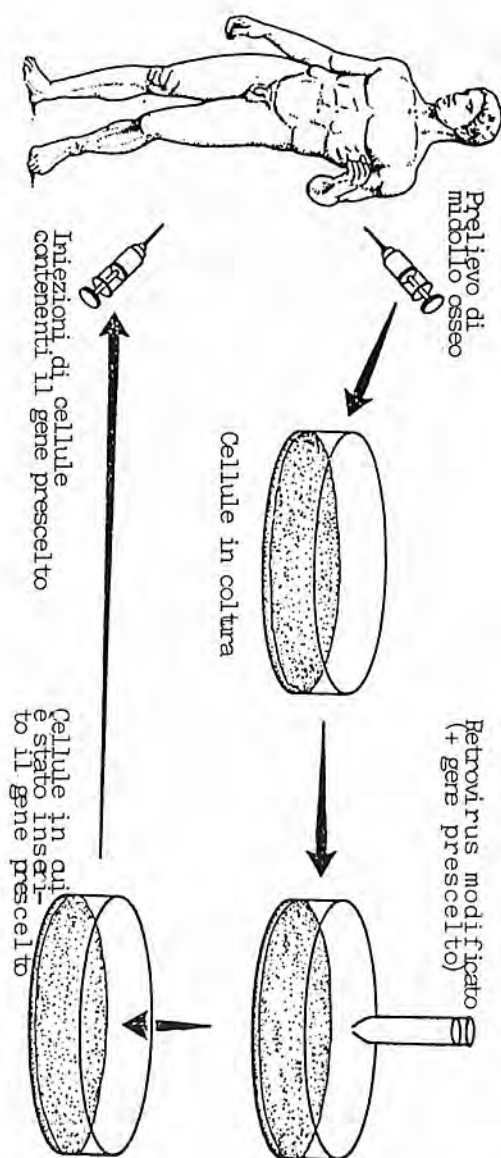


Figura 14: Uno schema possibile di terapia genica nell'uomo. Cellule di midollo osseo umano possono essere coltivate *in vitro*; geni estranei possono essere introdotti tramite l'uso di virus umani modificati. Le cellule contenenti DNA estraneo impiantato vengono ritrapiantate nel midollo osseo dell'individuo di partenza cui possono così conferire nuove proprietà. (ANDERSON, W.F., *Le traitement des maladies génétiques*. La recherche, Vol. 17, n. 176. pp. 458-468, Aprile 1986).

ARNALDO LONGHETTO

SICCITÀ E DESERTIFICAZIONE

*Istituto di Fisica dell'Atmosfera
della Università di Torino*

«Desertificazione» è quel processo di trasformazione che porta una determinata regione del nostro pianeta ad assumere, progressivamente e attraverso una serie più o meno numerosa di oscillazioni, l'aspetto e le caratteristiche di un «Deserto», ossia di un ampio tratto di superficie terrestre con scarsissime precipitazioni, disabitata e priva di vita vegetale e animale, i cui elementi geologici e pedologici (terra, sassi, rocce) si sono sbriciolati e disgregati fino a divenire sabbia.

«Desertificazione» non è, però, e non va confusa con «Deserto». Quest'ultimo costituisce lo stadio finale della degradazione del suolo conseguente alla «Desertificazione» e rappresenta uno stato di equilibrio stabile, dal quale non è facile il ritorno.

Se vogliamo affrontare subito la questione delle definizioni, il nuovo «Vocabolario della lingua italiana Treccani» ce ne fornisce una che, meglio di altre, riassume le nostre attuali conoscenze su questo fenomeno; desertificazione è: «trasformazione in deserto di zone semiaride o aride, ma ancora sedi di attività agricola o pastorale, per degradazione causata in genere da eventi naturali [come la siccità (che è *una caratteristica climatica* - Nota dell'Autore -)], cui si unisce però, e su cui talora prevale, un incontrollato sfruttamento di tali aree da parte dell'uomo».

*

Desertificazione non è quindi neppure da identificare con siccità, bensì ne è una delle conseguenze.

Cause naturali, quindi, sono quelle che danno origine, su estesi territori, a cambiamenti che, dapprima gradualmente e quasi inavvertiti nel corso di parecchi decenni, cominciano a un certo punto a mostrare i caratteri della irreversibilità. Da questo momento, le abitu-

dini di vita degli abitanti e il loro inasprimento per contrapporre difese alla degradazione naturale contribuiscono ad accelerare il tracollo finale.

Questa concezione del processo di desertificazione è relativamente recente e non ancora unanimemente condivisa, in quanto a tutt'oggi non vi è consenso generale nè sul significato dei termini che si usano per descriverla e definirla, nè sul riconoscimento delle sue cause e origini.

L'opinione prevalente in campo scientifico è che la desertificazione non sia, in generale, opera dell'uomo, bensì dei cambi climatici che interessano, o hanno interessato, determinate regioni della Terra, e che l'uomo possa solo contribuire ad accelerarla e ad accrescerne le conseguenze.

Tuttavia, alcuni rimangono ancora dell'opinione che la causa primaria della desertificazione sia di prevalente origine antropica, aggravata poi dalle condizioni particolarmente sfavorevoli del clima e delle sue mutazioni.

*

Questi punti di vista così divergenti si sono confrontati seriamente la prima volta nel lontano 1977 in occasione della Conferenza sulla Desertificazione organizzata dalle Nazioni Unite a Nairobi.

Tale conferenza si era proposta di valutare «tutti i dati e le informazioni disponibili sulla desertificazione e sulle sue conseguenze sui processi di sviluppo delle nazioni colpite» e di confrontare gli aspetti climatologici, agronomici, biologici, ecologici, geografici, ecc. del problema.

Le risposte agli innumerevoli quesiti posti agli scienziati da parte degli organizzatori della Conferenza, raccolte in un volume che per molto tempo ha costituito un riferimento scientifico prezioso, hanno evidenziato con chiarezza il contributo primario del clima sulla desertificazione e il ruolo da esso svolto nell'amplificare talune conseguenze delle azioni dell'uomo.

È stato infatti affermato che la desertificazione è originata dall'interazione fra un ambiente arido difficile, infido e fragile, e l'uso e l'occupazione che ne fa l'uomo per sopravvivere.

La vulnerabilità alla desertificazione e la severità del suo impatto sono regolate sia dal clima, in termini di variazioni interstagionali delle già scarse precipitazioni, sia da altri fattori naturali non climatici, quali la struttura e la permeabilità dei suoli, la topografia e i tipi di vegetazione.

Quando l'ambiente giunge alle sopradette condizioni di vulnerabilità, è probabile che le azioni dell'uomo contribuiscano ad accentuare lo stress climatico (attraverso modifiche alle caratteristiche delle superfici e ai flussi idrologici), mentre è assai improbabile, se non impossibile, che esse siano state l'origine del deterioramento dei climi aridi, i quali sono espressione e conseguenza della circolazione generale dell'atmosfera.

Sappiamo che il clima è cambiato notevolmente sul nostro pianeta nel corso dei millenni.

*

Pensando al Sahel, area oggi semidesertica a sud del Sahara, colpita da un severo periodo di siccità a cui ha fatto seguito la gravissima carestia dal 1969 al 1973, noi sappiamo che fino alla fine dell'ultimo periodo glaciale (che si ebbe circa 20 mila anni fa) l'Africa del Nord era un territorio fertile, bagnato fino al Sahara da abbondanti precipitazioni invernali, seguite dal monsone estivo (regime climatico ottimale).

Successivamente, con l'attenuazione del freddo sull'Europa e lo stabilirsi progressivo del clima mite attuale, la circolazione atmosferica cambiò le sue caratteristiche e il regime delle piogge si modificò fino a ridursi al punto da squilibrare il bilancio idrico del terreno, che è definito come la differenza fra l'acqua in esso convogliata e quella che viene evaporata e restituita all'atmosfera.

Perché un terreno sia stabile e produttivo, e consenta buone condizioni di sopravvivenza all'uomo, il bilancio idrico annuale deve essere nullo, ovverossia l'acqua da esso acquisita deve essere uguale a quella persa per evaporazione.

In queste condizioni di clima ottimale e di bilancio idrico medio nullo, l'azione dell'uomo non solo non pregiudica l'ambiente naturale, bensì, se svolta con razionalità e saggezza, lo può considerevolmente migliorare. Inoltre, le fluttuazioni del clima intorno al

suo valore medio sono più contenute di quelle tipiche dei climi sub-aridi e non sono in grado di svolgere sinergismi con interventi antropici. In altre parole, l'uomo può anche esercitare pressioni elevate sul territorio senza provocare guasti irreparabili.

*

Tornando all'Africa del Nord, le sue condizioni climatiche mutarono, per cui l'acqua evaporata dal suolo divenne superiore a quella apportata dalle precipitazioni; il clima di quelle regioni cominciò a divenire arido ed ebbero inizio i processi di desertificazione e di formazione delle aree desertiche che tuttora prosegue.

Va fatta, a questo proposito, una importante osservazione. Il bilancio idrico può divenire negativo, ossia l'evaporazione può eccedere l'acqua ricevuta, anche in presenza di sufficienti precipitazioni. Questo è ciò che avviene nelle regioni subtropicali, che sono le maggiormente inclini a ospitare deserti, dal momento che le precipitazioni si verificano durante la stagione più calda, quando l'elevata insolazione e l'elevata temperatura dell'aria favoriscono al massimo l'evaporazione. All'evaporazione si sovrappone poi la struttura fragile e permeabile dei suoli, che favorisce scorrimenti di acqua verso i suoi strati inferiori non raggiunti dalle radici della vegetazione, come già ricordato all'inizio.

Al cambiamento climatico vero e proprio sul lungo periodo a cui abbiamo appena fatto cenno, che ha spostato gradualmente i valori medi delle grandezze meteorologiche (temperatura, umidità, precipitazioni) e di quelle pedologiche (umidità del terreno, ecc.) dalle condizioni di «optimum» a quelle attuali, si è aggiunta un'altra caratteristica, che chiamiamo variabilità climatica, consistente in un aumento delle sue oscillazioni intorno alla media.

È, quest'ultima delle fluttuazioni climatiche, una peculiarità del clima delle zone semidesertiche, caratterizzato da alternanza, irregolare e difficilmente prevedibile, di siccità con brevi periodi di piovosità.

Quanto più il clima è secco, tanto maggiore si fa la variabilità delle precipitazioni e, quindi, il rischio della siccità e della desertificazione.

Le fluttuazioni climatiche, in queste regioni semidesertiche, si traducono geograficamente in espansioni e contrazioni delle fasce dei terreni secchi, cosicchè una regione semidesertica può sottostare alternativamente a condizioni aride e a condizioni sub-umide, dando in molti casi l'illusione che il fenomeno si sia concluso o, almeno, molto mitigato.

Diviene allora chiaro come la fragilità di queste condizioni climatiche renda inermi i territori e gli ambienti naturali nei confronti di azioni umane. Anche piccoli cambiamenti di abitudini, persino il permanere delle tradizionali attività che garantiscono il sostentamento minimo delle popolazioni di quelle regioni (pastorizia, agricoltura), possono risultare pregiudizievoli, allorchè si verificano in concomitanza di una fluttuazione climatica avversa, dando così luogo a intensificazioni di degradazioni.

Possiamo riassumere tutto ciò dicendo che l'energia connessa alle azioni antropiche può modificare qualche equilibrio nelle zone a «*climatologia marginale*», ma non è in grado di originare le cause che hanno condotto il clima a siffatto livello di marginalità. È ovvio che chi non segua questo schema logico di cause ed effetti, ma privilegi solo la considerazione di quest'ultima fase del processo, pervenga a conclusioni diverse, come abbiamo prima ricordato.

Peccato che questo modo di pensare alternativo non sia in grado di giustificare fenomenologie analoghe, o di intensità e gravità anche ben superiore, che si sono registrate nella storia del nostro pianeta, da almeno 500.000 anni a questa parte.

*

La World Desertification Map, preparata dalla FAO in collaborazione con UNESCO e WMO nel 1976, sotto gli auspici dell'UNEP, ha identificato aree semiaride e aride di maggiore rilevanza nelle seguenti regioni: 1) NORD AFRICA; 2) PENISOLA ARABICA; 3) DESERTO DEL TURKESSTAN; 4) DESERTI DELL'IRAN-THAR; 5) CINA (GOBI); 6) NORD AMERICA; 7) SUD AFRICA; 8) AUSTRALIA; 9) SUD AMERICA.

Consideriamo allora le ricostruzioni che sono state fatte dai paleoclimatologi sulle periodicità delle siccità (o aridità), che hanno influenzato (e influenzano tuttora, ovviamente) ciascuna di queste nove regioni.

Tenuto conto di tutti i possibili errori connessi alle ricostruzioni paleoclimatiche, osserviamo che nel NORD AFRICA, ad esempio, il primo periodo di sicura datazione con aridità diffusa parte dal 5000 a.C. e arriva al 3000 a.C., è quindi seguito da una fase calda e umida, per riprendere poi dal 2000 a.C. fino ad oggi, con fluttuazioni di ampiezza trascurabile.

Nella PENISOLA ARABICA si hanno datazioni più antiche, fin da 500.000 anni a.C., che mostrano aridità estesa da quell'epoca fino a circa il 300.000 a.C., e così via verso epoche più recenti.

In NORD AMERICA, dove le datazioni appaiono più sicure, periodi di aridità risultano compresi fra l'anno 31.000 a.C. e il 15.000 a.C. e poi dal 10.000 all'8.000 a.C. e così via fino al 1850 dopo Cristo, al termine della piccola età glaciale.

Una analisi approfondita e accurata di tutti questi dati unitamente a quella degli sfasamenti e delle contemporaneità delle date, suggerisce la presenza di oscillazioni latitudinali della fascia delle subsidenze anticicloniche delle medie latitudini verso l'equatore durante i periodi in cui più intensi erano i gradienti di temperatura dal polo all'equatore, nonché anche variazioni longitudinali.

Al di là di ciò, però, l'analisi delle periodicità ci insegna che periodi di più intensa siccità si sono verificati nei millenni passati, allorché certamente le attività umane non erano in discussione.

*

Cerchiamo, ora, di addentrarci nella fenomenologia dinamica dell'atmosfera che può spiegarci alcuni fatti fondamentali da cui la siccità e la desertificazione traggono origine.

Possiamo, innanzitutto, affermare che le radici più profonde della siccità o delle eccessive precipitazioni sono di tipo globale, ovvero a scala planetaria, che noi oggi cominciamo a riconoscere sotto forma delle cosiddette «teleconnessioni», ossia di quelle relazioni a grande distanza fra fenomeni climatici come la zona delle alte pressioni nel Nord Atlantico e il clima del Sahel, o fra i cicli di aridità di alcune regioni del pianeta e le anomalie di temperature superficiali dell'oceano in altre parti lontane, ovvero ancora fra il fenomeno del Niño e l'oscillazione meridionale di pressione fra l'Australia e le isole Haway.

Dal canto proprio, la desertificazione, pur governata dal clima, diviene poi anche un fenomeno dalle caratteristiche locali, tipiche della regione in cui essa si sviluppa. Abbiamo parlato prima di bilancio idrico come di processo basilare di regolazioni dei cicli agronomici dei terreni, e il bilancio idrico è non solo dovuto al clima, ma anche alle già ricordate caratteristiche pedologiche, topografiche e geografiche di ciascuna regione. Su queste ultime, come abbiamo già ricordato, può esercitarsi un'influenza da parte dell'uomo, in particolari condizioni critiche del clima.

*

Consideriamo, fra tutti i processi a scala globale e a scala locale, due meccanismi che spiegano molte delle caratteristiche del fenomeno della siccità e della desertificazione.

Il primo meccanismo è legato alla struttura planetaria della circolazione atmosferica, detta anche circolazione cellulare di Hadley.

Le leggi della dinamica, applicate all'atmosfera di un pianeta rotante e non uniformemente riscaldato dal Sole, come la Terra, indicano che vi devono essere movimenti dell'aria diretti verso il basso (moti subsidenti), che tali moti devono essere presenti alle latitudini sub-tropicali e che dove tali moti subsidenti esistono devono pure esservi deserti. Così, i deserti sono sempre esistiti sul nostro pianeta.

Il clima associato alla subsidenza atmosferica si stabilisce sia sulle terre emerse, sia sul mare, per cui alcuni parlano anche di deserti marini. Soltanto sulla terra, però, si riscontrano gli effetti desolanti del clima desertico e della mancanza di piogge che, unite all'eccessivo calore, eliminano via via tutte le forme di vita.

Poichè le precipitazioni atmosferiche sono sempre causate da sollevamento di aria umida, avviene che laddove prevalgono moti verso il basso tali sollevamenti divengono impossibili, e così pure le precipitazioni. Anche se le correnti atmosferiche sono cariche di umidità (come avviene ad esempio sul mare), non si avrà pioggia se non si creano le condizioni perchè queste correnti possano innalzarsi e dare così luogo alla condensazione del vapore d'acqua in esse contenuto. Il sollevamento dell'aria può essere prodotto sia da rilievi montuosi, quando il flusso atmosferico vi si dirige contro (non

va dimenticato, però, che sul versante sottovento la situazione si capovolge), sia da instabilità termica, quando una massa d'aria, riscaldata nella sua parte inferiore, diviene più leggera delle altre masse che la circondano.

Se però l'aria ha una struttura termica verticale stabile, quale può essere provocata dalla subsidenza o da altri processi che la raffreddano dal basso o la riscaldano in alto, allora i moti verticali di innalzamento vengono inibiti e non si formano precipitazioni.

Abbiamo appena detto che devono esistere zone della Terra caratterizzate da moti atmosferici discendenti alle latitudini subtropicali. Queste sono ampie regioni di persistente subsidenza atmosferica, che deriva dalla circolazione generale dell'atmosfera, e le principali fasce desertiche sulla Terra giacciono proprio sotto di esse (Deserto di Sonoran nel Messico e negli Stati Uniti sudoccidentali; fascia Sahariano-asiatica sudoccidentale; Australia; ecc.).

*

Come si è detto, queste zone sono poco propizie, o meglio avverse, allo sviluppo di moti atmosferici dal basso verso l'alto. Tuttavia, occorre considerare anche altri effetti a scala più locale che possono sia permettere l'apertura di brecce contro tale barriera e consentire la formazione di precipitazioni, sia creare condizioni di subsidenza aggiuntiva, come le già ricordate barriere montuose, che determinano zone di subsidenza nelle regioni ad esse sottovento.

Tali condizioni possono essere perturbazioni di tipo frontale, che si hanno ad esempio durante l'inverno nei climi di tipo mediterraneo, ovvero circolazioni di tipo monsonico che favoriscono precipitazioni estive e inverni secchi nel Sahel e in Asia.

Un esame più dettagliato potrebbe mostrare come questi regimi periodici, per quanto influenti a scala locale, siano anch'essi associati a fenomeni planetari di oscillazione annuale dell'asse della fascia delle alte pressioni sub tropicali.

Il fatto più importante per noi è però rappresentato dal fatto che questa periodicità annuale di regimi secchi-umidi darà luogo, per le ragioni prima viste di influenza sul bilancio idrico, a conseguenze desertificanti più pesanti laddove il massimo delle precipitazioni si ha nei mesi estivi.

Abbiamo visto come il clima arido sia di origine globale e come possa essere ulteriormente rinforzato da cause più localizzate (almeno nelle loro manifestazioni) e come dal clima arido si generino le condizioni per l'innescare di processi di desertificazione.

Questi ultimi, riguardando determinati territori, appaiono di natura più locale legata anche, come si è detto, a peculiari caratteristiche topografiche e pedologiche.

*

È stato spiegato da J. Charney un importante meccanismo di auto alimentazione e di amplificazione del processo di desertificazione, dovuto al particolare bilancio di energia termica che viene a stabilirsi sulle regioni che, per via della desertificazione, mutano progressivamente le loro caratteristiche superficiali, e che induce circolazioni atmosferiche locali che esaltano la subsidenza.

Ciò non deve far pensare, tuttavia, che la desertificazione sia originata dalle esistenti aree desertiche. In altre parole, i deserti non sono le sorgenti da cui la desertificazione trae il suo principio, in quanto essi non diffondono, al loro esterno, nessuno degli elementi che sono alla base di questo processo, eccetto venti torridi e sabbia trasportata dal vento.

La desertificazione esplode, solitamente, durante periodi di stress dovuto a siccità, in aree già naturalmente vulnerabili.

Non si tratta di avanzamento del deserto che ingloba, e fa sparire, terre fertili, bensì di qualche cosa di simile a una malattia della superficie terrestre che trae dall'interno delle aree affette le risorse per la crescita e la diffusione di queste ultime.

Solo sotto questo aspetto, si può parlare di contributo antropico alla desertificazione di regioni sottoposte a pressioni varie di sfruttamento dei suoli.

A questo punto, però, siamo arrivati alle fasi terminali di una lunga serie di vicende naturali che hanno predisposto queste regioni al dramma ecologico a cui oggi assistiamo con tanta sensibilizzazione.

INDICE

Presentazione	pag. 5
Bruno Bertotti	
<i>L'origine dell'universo</i>	pag. 7
Piero Galeotti	
<i>L'origine dell'universo: teorie ed osservazioni</i>	pag. 21
Carlo Castagnoli	
<i>Morte delle stelle: le supernove storiche e quella del 1987</i>	pag. 37
Carlo Rubbia	
<i>Alla ricerca dell'infinitamente piccolo</i>	pag. 55
Raoul Gatto	
<i>I modelli di unificazione nella fisica delle particelle</i>	pag. 77
Arturo Falaschi	
<i>Il Dna e la biologia molecolare</i>	pag. 91
Arnaldo Longhetto	
<i>Siccità e desertificazione</i>	pag. 125

*Finito di stampare
nel mese di Marzo 1991
dalla Tipografia Grassi di Mantova.*

