



# WOLFGANG PAULI:

## il Principio di Esclusione (1900-1958)

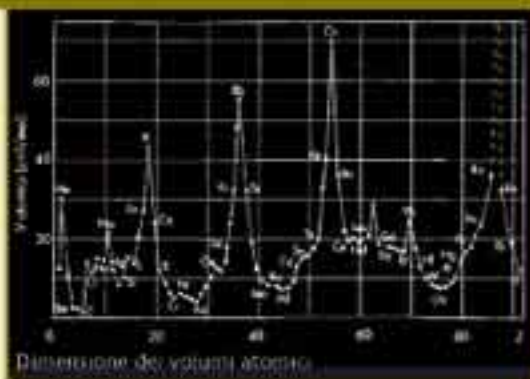
*"Pauli aveva un modo speciale di occuparsi di scienza [...]. Questo stile ricercava l'essenziale ed il simmetrico delle leggi della natura, formulato in formule matematiche senza molte parole e discorsi [...]. Conosciamo tutti l'acutezza della sua critica, la durezza e l'ironia con cui combatteva le idee false, l'arguzia e il disprezzo con cui affrontava le cose che gli sembravano incomplete e false. Tutto questo è l'espressione della sua costante aspirazione alla chiarezza e alla purezza nella scienza e nelle cose umane".* (Trotto dal discorso di commemorazione)

Wolfgang Pauli nasce a Vienna il 2 aprile 1900. Dopo aver studiato a Göttingen e a Copenaghen, dal 1923 al 1928 si trasferisce ad Amburgo dove lavora con Stern. Nel 1928 succede a Schrödinger a Zurigo dove trascorre tutta la sua vita, fatta esclusione per il periodo della seconda guerra mondiale durante il quale si trasferisce a Princeton. Tra i maggiori fisici teorici del secolo, nel 1945 vince il premio Nobel per il Principio di Esclusione. Muore nel 1958 a Zurigo.

Bohr aveva scoperto che l'atomo di idrogeno contiene soltanto un elettrone libero di occupare qualsiasi possibile stato energetico: in assenza di eccitazioni dall'esterno, si trova naturalmente allo stato di minima energia, il più vicino al nucleo; se portato da una forza esterna in uno stato di energia più alto, ricade sullo stato di partenza più basso emettendo le righe caratteristiche dello spettro dell'idrogeno.

Secondo la teoria classica, al crescere del numero di protoni  $Z$ , i raggi atomici devono diminuire a causa della compensazione tra la forza coulombiana e la forza centrifuga che agiscono sull'elettrone ( $F_{\text{coul}} = F_{\text{centr}}$ )

$$\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_{\text{pro}} q_{\text{el}}}{r^2} = m_{\text{el}} \frac{v^2}{r}$$



Si può dimostrare, dalla formula precedente, che il raggio delle "orbite" degli elettroni è inversamente proporzionale al numero dei protoni nel nucleo

$$r \propto \frac{1}{Z}$$

Gli atomi che formano il sistema periodico degli elementi dovrebbero quindi, al crescere di  $Z$ , diventare sempre più piccoli.

Sperimentalmente, invece, si osserva che i volumi atomici dall'idrogeno all'uranio sono in prima approssimazione costanti. È quindi necessario trovare un principio fondamentale che spieghi perché gli elettroni atomici non si affollino nello stato quantico più basso. È questo uno dei problemi su cui si concentra l'attenzione di Pauli.

Nei primi anni Venti un esperimento condotto da Stern e Gerlach mostra come la struttura dell'atomo di idrogeno sia molto più complessa di quanto si era immaginato fino ad allora. Nello stesso periodo Pauli, lavorando con Sommerfeld, ricerca una interpretazione diretta degli spettri atomici dedicandosi in particolare allo studio dell'effetto Zeeman anomalo.

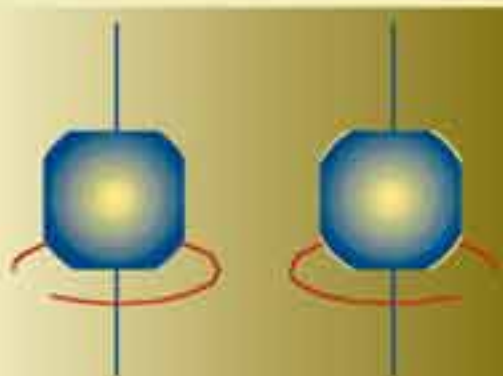
L'effetto Zeeman è stato scoperto a Leida nel 1896 dal fisico olandese Zeeman. Consiste nella separazione di alcune righe spettrali degli atomi in un tripletto o un doppietto di righe sotto l'azione di una campo magnetico. Più tardi fu scoperto il cosiddetto effetto Zeeman anomalo (non spiegabile nell'ambito della fisica classica), che consiste nella separazione dello spettro in ulteriori righe in presenza di campi magnetici particolarmente intensi.

A Pauli diviene sempre più chiaro che esiste uno stretto rapporto tra il problema della struttura atomica, e l'effetto Zeeman anomalo. Nel 1925 avanza l'ipotesi di una **doppia valenza non descrivibile classicamente dell'elettrone**. Enuncia così il principio secondo cui "Non possono mai esserci nell'atomo due o più elettroni, per i quali i valori di tutti i numeri quantici siano uguali" (Principio di Esclusione di Pauli). Servendosi del Principio di Pauli, Bohr e i suoi collaboratori riescono a costruire i modelli di tutti gli atomi dall'idrogeno all'uranio, spiegando i cambiamenti periodici dei volumi e dei

potenziali di ionizzazione, le reciproche affinità chimiche, le valenze e le altre proprietà del sistema periodico degli elementi.

Due ricercatori, Uhlenbeck e Goudsmit scoprono che gli elettroni possiedono una caratteristica intrinseca (come la massa e la carica) rappresentabile come l'orientamento della rotazione dell'elettrone attorno al suo asse (lo spin). A seguito di tale scoperta il Principio di Pauli è modificato aggiungendo che **solo due elettroni aventi spin opposto possono stare sulla stessa orbita**.

Nei decenni successivi si vede che il Principio di Esclusione, sviluppato per gli elettroni, è una legge fondamentale della natura. A ogni particella può essere associato un valore di spin che, se semintero ( $1/2, 3/2, 5/2, \dots$ ), verifica il Principio di Pauli. La formalizzazione di questo principio è dovuta a Fermi.



Rappresentazione di due elettroni con spin opposti.

Nel 1914, James Chadwick scopre che, contrariamente alle particelle  $\alpha$  e ai raggi  $\gamma$  emessi dai nuclei radioattivi, le particelle  $\beta$  non hanno energie ben definite, anzi il loro spettro di energia si estende in modo continuo praticamente da zero a valori altissimi. La possibilità che l'emissione di energia sia dovuta a qualche perdita interna subito dalle particelle  $\beta$  nella fuga dal materiale radioattivo è esclusa in seguito a esperimenti. Si è di fronte a una situazione in cui il bilancio nucleare delle entrate e delle uscite di energia non è in pareggio. Niels Bohr ipotizza che il principio di conservazione dell'energia non sia valido per l'emissione o per i processi di assorbimento di particelle  $\beta$ .

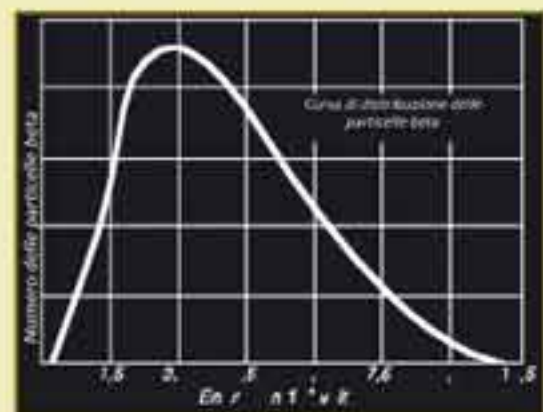
A tale proposito Pauli commenta "Questa ipotesi non mi sembra soddisfacente, anzi neppure plausibile. Anzitutto la carica elettrica si conserva durante il processo, e non vedo perché la conservazione della carica dovrebbe essere più fondamentale di quella dell'energia e dell'impulso [...]. Se le leggi di conservazione non fossero valide, se ne dovrebbe concludere che una disintegrazione beta è sempre accompagnata da una perdita e mai da un

guadagno di energia; questa conclusione implica l'irreversibilità del processo nel tempo, cosa che non mi appare affatto accettabile"

Pauli suppone che l'equilibrio energetico violato dai raggi  $\beta$  sia ristabilito dall'emissione di qualche altro tipo di particella ancora sconosciuta, che egli chiama "neutrone", cambiato in "neutrino" da Fermi.

Nel 1930 scrive a un gruppo di ricercatori: " [...] in relazione allo spettro continuo beta, una via d'uscita per salvare le legge di scambio della statistica e la conservazione dell'energia; e cioè la possibilità che nei nuclei esistano particelle elettricamente neutre, che voglio denominare neutroni, le quali abbiano spin  $1/2$  e seguano il principio di esclusione [...]. La massa dei neutroni dovrebbe essere dello stesso ordine di grandezza della massa degli elettroni [...]. Ammetto che la mia soluzione possa sembrarvi da principio poco probabile, perché se i neutroni esistessero si sarebbero visti da parecchio tempo. Ma solo chi osa vince [...]. Per questa ragione bisogna discutere seriamente ogni via verso la salvezza."

Successivamente Pauli stesso ipotizza i neutrini come particelle neutre di massa trascurabile emessi in coppia con particelle  $\beta$ .



Per molto tempo si cerca una prova dell'effettiva esistenza dei neutrini e soltanto nel 1955 due fisici di Los Alamos (Reines e Cowan) ne dimostrano l'esistenza rilevandoli tra le particelle emesse dalle pile atomiche.

Wolfgang Pauli





# PAUL ADRIEN MAURICE DIRAC:

## l'ipotesi dell'antimateria (1902 - 1984)

Nato a Bristol da padre svizzero e madre inglese, Dirac è educato alla Merchant Venture's e successivamente frequenta il corso di ingegneria elettronica alla Bristol University. Si diploma nel 1921 e segue successivamente studi di matematica applicata.

Nel 1923 vince una borsa di studio per ricerche in fisica all'Università di Cambridge e inizia a interessarsi di Fisica teorica. Ha così l'opportunità di entrare in contatto con il mondo scientifico di allora. Così scrive del suo primo professore: "Fowler mi introdusse in un nuovo mondo, il cui nome era atomo di Rutherford, Bohr e Sommerfeld [...] Rimasi molto sorpreso nel vedere che si poteva descrivere l'atomo con le equazioni dell'elettrodinamica classica." Appena trentenne, ottiene la cattedra Lucasiana di Cambridge, la stessa che aveva ricoperto Newton. Nel 1925 viene a conoscenza dei lavori di Heisenberg sulla meccanica quantistica e inizia i suoi studi nell'ambito della fisica dei quanti. Nel 1969 si ritira in Florida, presso l'Università di Tallahassee.

Nel 1933 aveva condiviso con Schroedinger il Premio Nobel per la Fisica.

Nel 1927 Dirac apporta un fondamentale contributo alla meccanica quantistica formulando un'equazione d'onda relativistica per l'elettrone che descrive esattamente il comportamento di questa particella: applicata all'atomo di idrogeno, essa permette di ottenere perfettamente lo spettro di emissione.

Dirac va oltre e affronta un nuovo problema che lo porterà a postulare l'esistenza delle antiparticelle.

Infatti l'equazione ammette soluzioni anche per energie negative, cosa che classicamente non ha alcun senso. Risultano una serie di livelli energetici con energia a riposo  $+mc^2$  e una serie con energia a riposo  $-mc^2$ , il che significa prevedere l'esistenza di corpi con massa negativa, mai osservati in natura, caratterizzati da un comportamento differente da quello dei corpi usuali.

Per esempio, per accelerare un tavolo con massa negativa dovremmo spingerlo nella direzione opposta al moto, cioè applicargli una forza opposta alla direzione di accelerazione, e per fermarlo dovremmo spingerlo in direzione del suo moto.

Sappiamo che per la legge di Coulomb due palline con uguale massa e carica elettrica si respingono con forze uguali e di verso opposto. Se una delle due palline avesse massa negativa questa sarebbe accelerata nella stessa direzione dell'altra, e vedremmo le due palline inseguirsi.

Quando Dirac pubblica la sua equazione è ben cosciente di queste conseguenze, apparentemente assurde, ma è anche convinto che l'energia negativa non sia una peculiarità della sua equazione, bensì una conseguenza della formulazione matematica di tutte le equazioni relativistiche, come risulta evidente dalla espressione per l'energia relativistica:

$$E^2 = p^2c^2 + m_0^2c^4$$

che ha due soluzioni:

$$E = +c\sqrt{m_0^2c^2 + p^2}$$

$$E = -c\sqrt{m_0^2c^2 + p^2}$$

Il problema era allora quello di scoprire quale parte della natura fosse descritta dalla soluzione che portava a quei comportamenti in apparenza assurdi. Il problema presentato da queste soluzioni non poteva essere eluso, perché dal punto di vista quantistico sarebbero stati possibili salti quantici da stati di energia negativa a stati di energia positiva.

Formula allora l'ipotesi, facendo uso del Principio di Pauli, che tutti gli stati corrispondenti a energia negativa siano occupati e che questo stato di cose, non avendo manifestazioni fenomenologiche, non è osservabile sperimentalmente. L'assorbimento di quanti di radiazione potrebbe portare un elettrone da uno stato di energia negativa a uno di energia positiva, lasciando una lacuna nel mare di stati a energia negativa. Questa lacuna si potrebbe manifestare come una particella di energia positiva carica positivamente. Successivamente Dirac ipotizza e cerca di dimostrare che il valore numerico della massa della lacuna è proprio quella del protone, 1840 volte quella dell'elettrone.

Nel maggio del 1931 Dirac abbandona questa teoria e propone l'esistenza di "una nuova specie di particella, ignota alla fisica sperimentale, avente la stessa massa e carica opposta a quella dell'elettrone". Questa particella, il **positrone**, sarà effettivamente scoperta due anni dopo da C. D. Anderson: inizierà così la fisica delle **antiparticelle**.

È stato essenziale, per l'intuizione di Dirac il contributo del matematico tedesco Claus Weyl. Weyl aveva infatti mostrato in accordo con la teoria di Dirac la necessità che la lacuna avesse la stessa massa di un elettrone ordinario.

In molte sue memorie Dirac dice che avrebbe immediatamente postulato il positrone se avesse avuto fede solamente nel potere del puro ragionamento matematico e non si fosse lasciato portare

fuori strada dalla fisica empirica. Questo fu quello che fece Weyl, benché implicitamente. In molte occasioni Dirac attribuisce questo successo di Weyl al suo approccio matematico alla fisica.

"Weyl era un matematico. Non era totalmente un fisico. Era solamente interessato alle conseguenze matematiche di un'idea, estraendo ciò che si poteva dedurre dalle varie simmetrie. Questo approccio matematico lo portò direttamente alla conclusione che le buche avrebbero dovuto avere la stessa massa dell'elettrone [...] senza fare nessun commento sulle conseguenze fisiche delle sue asserzioni."

Si deve anche a Dirac la predizione dei processi di annichilazione di una coppia elettrone-positrone in due quanti  $\gamma$ .

$e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$   
e della creazione di coppie elettrone-positrone nella collisione tra due quanti

$\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$

Paul Adrien Maurice Dirac







# ENRICO FERMI:

## nasce l'era atomica (1901 - 1954)

*"Nella nostra epoca di rigida specializzazione del sapere, la presenza della figura di Fermi fisico universale ed enciclopedico, è un fenomeno più unico che raro"*  
(Bruno Pontecorvo)

Enrico Fermi nasce a Roma il 29 settembre 1901. La sua carriera scolastica è brillante: a 17 anni ha già una conoscenza della fisica classica a livello universitario. Terminato il liceo, frequenta la Facoltà di Fisica alla Normale di Pisa tra il 1918 e il 1922 e quindi si specializza a Leyda e Gottinga. Tornato a Roma, nel 1927 gli viene assegnata la Cattedra di Fisica Teorica. La motivazione della Commissione, quanto mai profetica, riconosce Fermi, allora ventiseienne, come " [...] altamente meritevole [...] e si ritiene di poter fondare su di lui le migliori speranze per l'affermazione e lo sviluppo della Fisica Teorica in Italia [...]". Nel 1938 riceve il Premio Nobel per la Fisica: " [...] conferito per le sue scoperte sui nuovi elementi radioattivi prodotti dal bombardamento di neutroni e per le sue scoperte di reazioni nucleari prodotte da neutroni lenti."

Nello stesso anno si reca con la famiglia in America per sfuggire alle leggi razziali italiane. A Chicago costruisce la prima pila atomica dando inizio all'era dell'energia nucleare e partecipa al progetto Manhattan per la costruzione della bomba atomica. Torna in Italia solo due volte e per brevi periodi. L'ultimo suo soggiorno lo vede a Varenna, a insegnare alla Scuola Internazionale di Fisica. Si spegne pochi mesi dopo.

Il gruppo raccolto attorno a Fermi (Amaldi, Segrè, Majorana, Pontecorvo, Rasetti, D'Agostino) presso l'Istituto di Fisica di Roma, in via Panisperna, sotto la direzione di E. Corbino, si dedica soprattutto allo studio degli effetti delle radiazioni.

Pontecorvo ha l'idea di bombardare vari elementi con una sorgente di neutroni e misurare per

quanto tempo questi rimanevano radioattivi. Infatti, la maggior parte degli elementi in natura non sono radioattivi ma lo diventano se il loro nucleo viene bombardato per esempio da neutroni, che ne alterano la composizione. Il nuovo nucleo che si forma emette particelle (fotoni, elettroni,  $\alpha$ ) fino a tornare in una configurazione stabile (non radioattiva). Cominciano a verificarsi fenomeni apparentemente inspiegabili.

Infatti, il tempo per cui un campione d'argento rimane radioattivo non è sempre lo stesso ma varia, in particolare a seconda della posizione che esso ha all'interno del cosiddetto "scricchio" (una scatola di piombo con le pareti spesse cinque centimetri) usato per proteggersi dalle radiazioni. Il gruppo e il suo capo, Fermi (che chiamano il Papa), si trovano a dover interpretare dei fatti apparentemente inspiegabili: avvicinando l'argento alle pareti di piombo dello scricchio (non radioattivo) la radioattività aumenta così come aumenta se l'esperimento è spostato dal tavolo di marmo a uno di legno.

Fermi decide di ricostruire l'esperimento in condizioni ottimali, avvicinando e allontanando dall'argento una piastra di piombo.

All'ultimo momento però, preso da curiosità, sostituisce il piombo con la paraffina (materiale più leggero).

L'argento posto vicino alla paraffina sprigiona una radioattività mai osservata prima di allora.

Ricorda Emilio Segrè: "Credetti dapprima che il contatore fosse difettoso: raramente avevamo assistito ad un'attività di quella portata. Ma fu rapidamente provato che l'attività dell'argento era dovuta alla filtrazione dei neutroni attraverso la paraffina."

Anche per Fermi quello è un momento particolare, come racconterà anni dopo in una conversazione con Chandrasekhar:

*"Le racconterò come feci la scoperta che credo sia la più importante della mia carriera. Stavamo lavorando molto intensamente sui neutroni e i risultati che ottenevamo erano incomprensibili."*

*Un giorno andando al laboratorio pensai che avrei dovuto osservare l'effetto d'assorbimento dei neutroni da parte del piombo, ma invece di usare un pezzo di piombo qualunque ne feci preparare uno lavorato con precisione. Sembrava che ci fosse qualcosa che non mi andava bene nell'esperienza progettata e cercavo delle scuse per rimandare l'esecuzione.*

*Quando, finalmente, stavo per cominciare le misure, mi dissi: "No quello che voglio qui non è un pezzo di piombo, ma uno di paraffina".*

*Fu proprio un'ispirazione improvvisa, senza una ragione premeditata.*

*Ne presi subito un pezzo che trovai lì per lì, e lo misi dove sarebbe dovuto andare il piombo."*

Fermi, pensando all'accaduto, intuisce la risposta: i neutroni lenti interagiscono di più con il nucleo rispetto a quelli veloci (20 ottobre 1934).

L'intuizione di Fermi si può riassumere in alcuni punti fondamentali.

a) I neutroni lenti interagiscono di più di quelli veloci e i materiali posti vicino all'argento hanno l'effetto di rallentare i neutroni.

b) Le particelle, come per esempio il neutrone, sono nello stesso tempo onde e corpuscoli; proprio l'aspetto ondulatorio ha un ruolo fondamentale nell'interazione tra neutroni e nuclei. Quando un'onda incontra un oggetto i suoi effetti su quest'ultimo sono tanto più forti quanto più la sua lunghezza d'onda è prossima a un valore detto di risonanza.

I neutroni con una lunghezza d'onda circa uguale alle dimensioni del nucleo provocano "vibrazioni" tali da distruggerlo; dal momento che la lunghezza d'onda di una particella è inversamente proporzionale alla sua energia, accade che, abbassando l'energia dei neutroni, la loro lunghezza d'onda si avvicina a quella di risonanza.

c) I neutroni, urtando i materiali vicini alla sorgente, vengono rallentati e rimandati sul campione di argento. Si pensi per esempio a un biliardo: quando una biglia urta la sponda, cioè un oggetto con massa molto maggiore della sua, rimbalza indietro mantenendo la sua velocità; quando invece urta un'altra biglia, entrambe si muovono e la velocità iniziale si ripartisce tra le due (se l'urto è frontale, la prima biglia cede tutta la sua energia alla seconda e si ferma).

La paraffina rallenta i neutroni più del piombo perché contiene molto idrogeno che ha massa circa uguale a quella del neutrone. Questo effetto si ripete anche passando da un tavolo di marmo (povero di idrogeno) a un tavolo di legno (ricco di idrogeno).

I contributi scientifici di Fermi non si limitano al campo della radioattività e a quello della fisica nucleare, che lo porterà alla realizzazione della prima pila, cioè del prototipo del primo reattore a fissione. Ha lasciato lavori fondamentali in tanti altri settori: termodinamica, astrofisica, elettrodinamica, fisica atomica, fisica molecolare, fisica dello stato solido, particelle elementari. Come scrive Edoardo Amaldi: "In tutti questi campi Fermi ha apportato contributi essenziali, talvolta teorici, talvolta sperimentali, sempre con acuto spirito di naturalista, aderente e interessato ai fatti della natura, con una sicurezza matematica, un'inventiva da sperimentatore, una solidità da ingegnere, come nessun altro".



Fermi con alcuni dei suoi collaboratori dell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma, in via Panisperna. Da sinistra, D'Agostino, Segrè, Amaldi, Rasetti



Targa che commemora l'evento della prima reazione nucleare autosostenuta

Fermi impegnato in una partita di calcetto a Varenna



Enrico Fermi



# L'universo del big bang

Nel 1929 Edwin Hubble fece la scoperta che aprì la strada alla cosmologia moderna. Analizzando la luce di un campione di galassie, le più distanti osservabili con il telescopio di Monte Wilson, in California, appena entrato in funzione, Hubble dimostrò che le galassie si allontanano le une dalle altre con velocità tanto più grandi quanto maggiore è la distanza che le separa. L'Universo è in espansione.

Questa conclusione fondamentale era già suggerita dalle leggi della teoria della Relatività Generale applicate all'Universo. Einstein, tuttavia, riluttante all'idea di un Universo che evolve nel tempo, aveva introdotto un termine aggiuntivo alle sue equazioni in modo da ottenere un Universo statico, precludendosi la possibilità di predire su base teorica l'espansione cosmica. Dopo l'evidenza sperimentale dell'espansione, Einstein definì questa sua mossa "il più grave errore" della sua vita.

L'espansione implica che la densità media di energia e di materia, e di conseguenza la temperatura, nell'Universo antico dovevano essere molto maggiori di quanto lo sono nell'Universo attuale.

Dal ritmo dell'espansione osservato oggi si può

dedurre che all'incirca 15 miliardi di anni fa l'Universo si trovava in una fase iniziale caratterizzata da temperature e densità inimmaginabili.

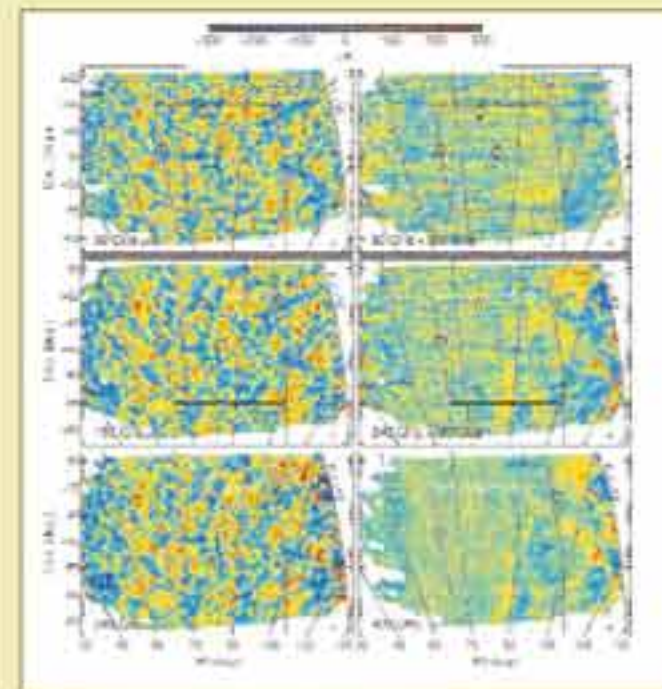
L'Universo muta nel tempo: il compito dei cosmologi è quello di ricostruire la storia cosmica, e di comprendere gli avvenimenti che dal punto di vista fisico ne costituiscono le tappe principali.

Dopo tre minuti dall'inizio dell'espansione la temperatura è adeguata per innescare la fusione di una parte dell'idrogeno primordiale in elio (più tracce di altri nuclei leggeri): le quantità previste dalla teoria sono in eccellente accordo con i dati osservativi. Espandendosi l'Universo si raffredda, e una delicata combinazione del rapporto tra le forze fondamentali della natura ha reso possibile la formazione delle strutture che oggi osserviamo (ammassi di galassie, galassie, stelle, pianeti), e l'emergere della complessità.

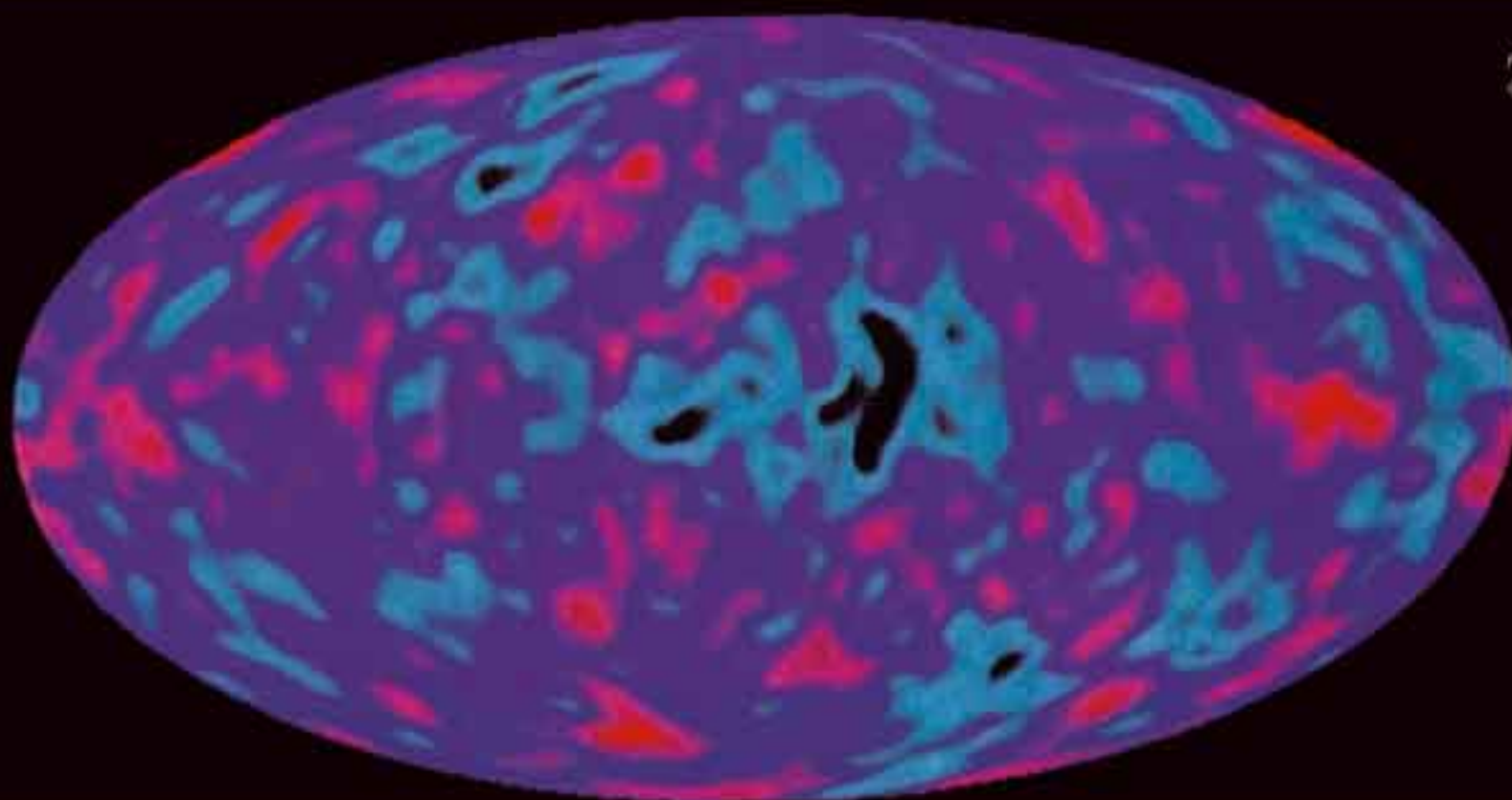
Negli anni '30 e '40 Georges Lemaitre e George Gamow furono pionieri dello scenario cosmologico evolutivo, successivamente chiamato "Hot Big Bang". Ma fu solo a partire dalla metà degli anni '60 che questa descrizione dell'Universo fisico si affermò definitivamente, grazie a una scoperta non preventivata. Nel 1965 Penzias

e Wilson intercettarono casualmente una radiazione elettromagnetica, estremamente debole e uniforme, residuo della bollente fase cosmica iniziale: il Fondo Cosmico di Microonde, che ci offre la straordinaria possibilità di osservare direttamente l'Universo "giovane", prima della formazione delle galassie, quando esso era 1000 volte più compatto e più caldo di oggi. In realtà l'esistenza di tale relitto cosmico era stata prevista su basi teoriche una ventina d'anni prima da Gamow e collaboratori, ma la loro previsione non ottenne l'attenzione della comunità scientifica.

L'osservazione dettagliata delle proprietà del Fondo Cosmico di Microonde consente di estrarre informazioni decisive sulla natura e sulla dinamica dell'Universo. Dopo il successo del satellite COBE, lanciato dalla NASA nel 1989, numerosi esperimenti (tra cui Boomerang e Maxima) sono stati realizzati con successo, e altri due satelliti dedicati alla cosmologia del Fondo Cosmico sono previsti nei prossimi anni, uno della NASA (MAP, nel 2001) e uno dell'ESA (PLANCK, nel 2007).



Mappe della radiazione di fondo a microonde dall'esperimento "Boomerang"



Mappe della radiazione di fondo a microonde dal satellite COBE

GAMOW







# Murray Gell-Mann (1929 - )

## il puzzle delle particelle elementari

Murray Gell-Mann nasce a New York nel 1929.

A soli 15 anni viene ammesso a frequentare la Yale University, dove si laurea nel 1948; a 23 anni intraprende la carriera di docente universitario presso l'Istituto di Fisica Nucleare dell'Università di Chicago, dove ha l'occasione di lavorare con giganti della fisica come Enrico Fermi.

Nel 1954 viene assunto all'Institute for Advanced Study di Princeton: lì elabora il metodo di classificazione delle particelle detto "l'ottuplice via", per il quale vince il Premio Nobel per la Fisica nel 1969.

Nel 1963, mentre si trova al MIT, scopre che la struttura delle particelle elementari può essere spiegata ipotizzando che esse siano costituite da mattoni ancora più piccoli, ai quali dà il nome di **quark**: è a questa scoperta che egli deve la fama di cui gode anche presso i non addetti ai lavori.

A partire dagli anni '80 le ricerche di Gell-Mann si estendono oltre i confini dei laboratori di fisica, per comprendere una visione più ampia dell'universo, dedicandosi alle "ricerche sulla complessità": scopo di questa nuova disciplina è quello di esplorare i modi in cui la particella più infinitesima dell'universo possa essere correlata ai più complessi sistemi viventi.

### Gli adroni

Dopo la scoperta del neutrone e del positrone nel 1932, i fisici si dedicano alla ricerca di altre particelle sconosciute mediante l'osservazione dei raggi cosmici con nuovi metodi sperimentali come le

camere a nebbia e le camere a bolle. In questo modo, nel giro di pochi anni il numero delle particelle "elementari" si moltiplica in maniera incontrollabile, fino a comprendere le cosiddette particelle "strane", che assumono questo nome perché presentano la curiosa attitudine di essere sempre prodotte a coppie.

Nel contempo si scopre che quasi tutte queste nuove particelle si comportano come il protone e il neutrone, cioè interagiscono "forte"; a esse si attribuisce perciò il nome collettivo di *adroni* (da  $\alpha\delta\rho\sigma$ , forte) e vengono sommariamente suddivise in due categorie, a seconda della loro massa: i *barioni* sono gli stati con massa maggiore o uguale a quella del protone, mentre i *mesoni* hanno masse intermedie fra gli elettroni e i protoni.

A questo punto appare assolutamente indispensabile predisporre un sistema di classificazione che sia in grado di caratterizzare questa moltitudine di nuove particelle in base a un numero ristretto di parametri: in pratica si tratta di realizzare un analogo della tavola di Mendeleev, in cui sia possibile catalogare "per righe" e "per colonne" (a seconda di alcune caratteristiche salienti) tutte le particelle conosciute.

### L'ottuplice via

Nel 1961, utilizzando un ramo della matematica noto come "teoria dei gruppi di simmetria", Gell-Mann viene a capo del puzzle delle particelle elementari: egli le raggruppa in "famiglie", descritte da otto numeri quantici che ne definiscono le caratteristiche e proprietà comuni.

Questa teoria prende il nome di **ottuplice via**, con esplicito riferimento alle otto virtù necessarie a raggiungere l'armonia nella religione buddista. La deduzione dell'ottuplice via si basa sul comportamento degli adroni rispetto alle interazioni forti; del resto, è interessante notare che il quadro teorico della forza forte (si intende con *forza forte* la forza responsabile dell'esistenza e della stabilità dei nuclei atomici) verrà precisato solo qualche anno dopo (la prima

formulazione della QCD risale al 1972); in realtà sarà proprio la classificazione delle particelle a dare il contributo decisivo alla comprensione della forza forte.

Le caratteristiche delle interazioni forti che guidano Gell-Mann nel suo lavoro possono essere riassunte in due punti:

- l'indipendenza dalla carica: le interazioni forti sono indipendenti dalla carica delle particelle coinvolte, cioè non "vedono" se una particella è carica o neutra. Per esempio il protone e il neutrone sono due "casi" della stessa particella, il nucleone; allo stesso modo, i tre pioni ( $\pi^+$ ,  $\pi^0$  e  $\pi^-$ ) rappresentano per la forza forte un unico stato;

- la conservazione della stranezza: la constatazione sperimentale che le particelle "strane" vengono sempre prodotte a coppie può essere formalizzata nel seguente modo: esiste un nuovo *numero quantico* che caratterizza le particelle, la **stranezza**; le particelle strane sono quelle con stranezza diversa da zero, tipicamente  $+1$ ,  $0$  o  $-1$ .

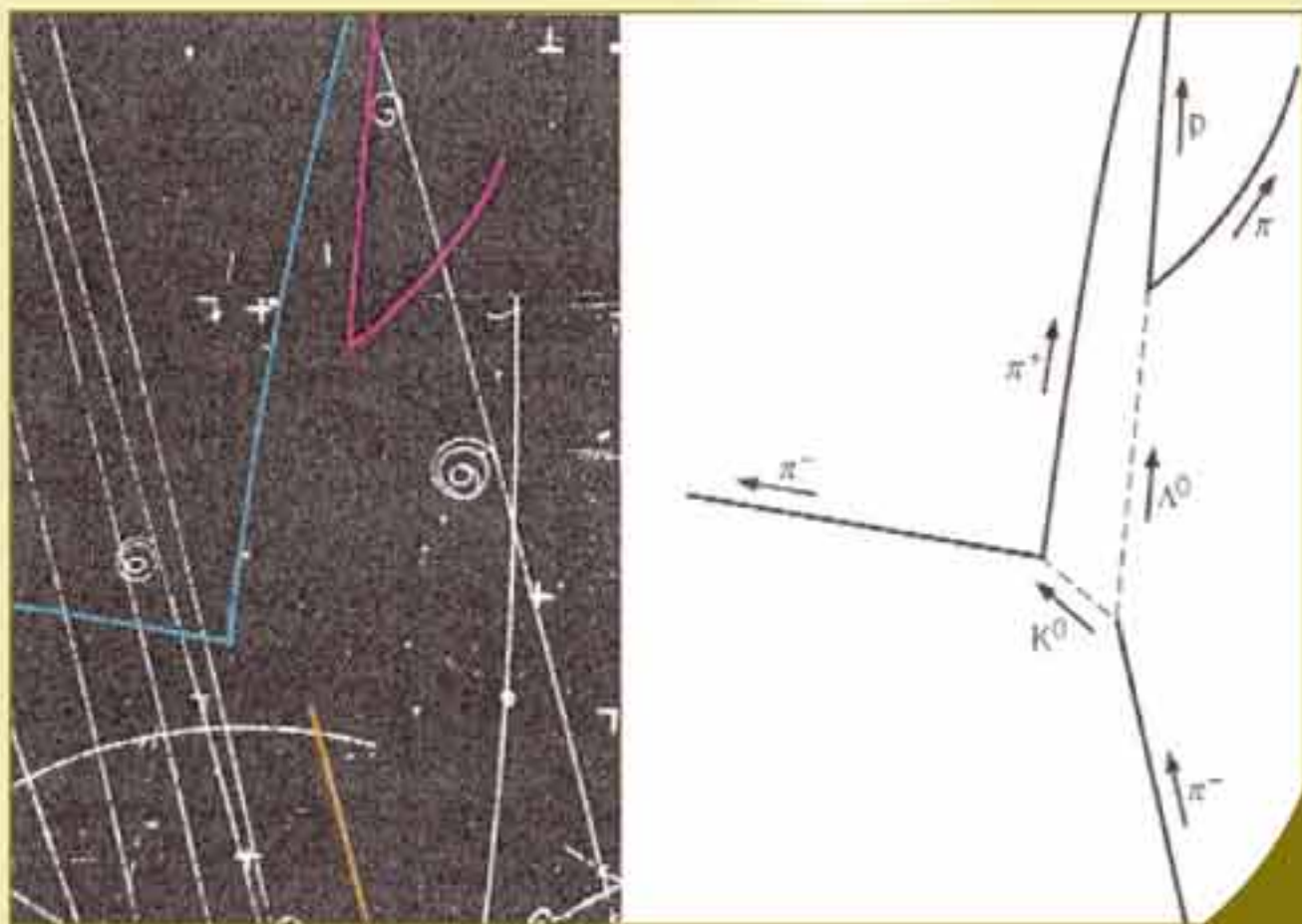
Pertanto queste particelle vengono

prodotte a coppie perché l'interazione forte conserva la stranezza.

Le proprietà dell'interazione forte elencate finora avevano da subito indotto i fisici ad applicare la teoria dei gruppi di simmetria allo studio delle particelle elementari; in particolare, Yang e Mills avevano elaborato una teoria basata sui nucleoni, che utilizzava il gruppo  $SU(2)$ ; la scoperta della stranezza porta all'introduzione di una simmetria più ampia, associata al gruppo  $SU(3)$ .

In base alla teoria dell'ottuplice via, verranno previste le caratteristiche di una nuova particella, la *Omega meno*, che verrà scoperta nel 1964 esattamente con i requisiti anticipati da Gell-Mann: sarà questa clamorosa scoperta a sancire il definitivo successo della teoria, portando Gell-Mann al premio Nobel nel 1969.

Tracce della produzione di particelle strane in camera a nebbia



Murray Gell-Mann





# Murray Gell-Mann (1929 - )

## "Three quarks for Muster Mark"

L'introduzione di una simmetria  $SU(3)$ , pone immediatamente il problema di individuare una base, in senso matematico, dello spazio in cui il gruppo viene rappresentato. A questo scopo, Gell-Mann raggruppa i mesoni e i barioni da lui conosciuti in base ad alcuni numeri quantici (lo *spin* e la *parità*); poi rappresenta le famiglie così ottenute in un grafico in base ad altre due caratteristiche (l'ipercarica forte  $Y$  e la terza componente di spin isotopico  $I_3$ ). Quello che risulta sono degli schemi molto regolari, di forma esagonale e triangolare.

Quello che immediatamente si nota, osservando questa figure, è che esse possono essere scomposte in piccoli triangoli: l'analogo matematico di questa affermazione consiste nel dire che le particelle ammettono una "base" costituita dai vertici del triangolo più piccolo.

Gell-Mann associa ai vertici del triangolo più piccolo tre nuove particelle, dai nomi fantasiosi: *up*, *down*, *strange* e attribuisce loro il nome collettivo di *quark*, da un brano del *Finnegans Wake* di James Joyce, che recita "Three quarks for Muster Mark"; si tratta di una frase dialettale che significa circa "Tre quarti (di vino) per il signor Mark" (la scena è ambientata in un pub). A questo punto, la ricetta delle particelle elementari viene così formulata: per fare un barione ci vogliono tre quark, mentre per

avere un mesone si deve prendere una coppia quark-antiquark. In questo modo si ottengono  $3 \times 3 \times 3 = 27$  barioni conosciuti ed  $3 \times 3 = 9$  mesoni.

Immediatamente si pone un problema: cosa rappresenta fisicamente il triangolo  $u, d, s$ ? Ovvero: i quark sono oggetti reali o una rappresentazione matematica? Questo è il punto più critico della teoria, per il quale Gell-Mann riceverà aspre critiche di convenzionalismo. Riportiamo le sue parole:

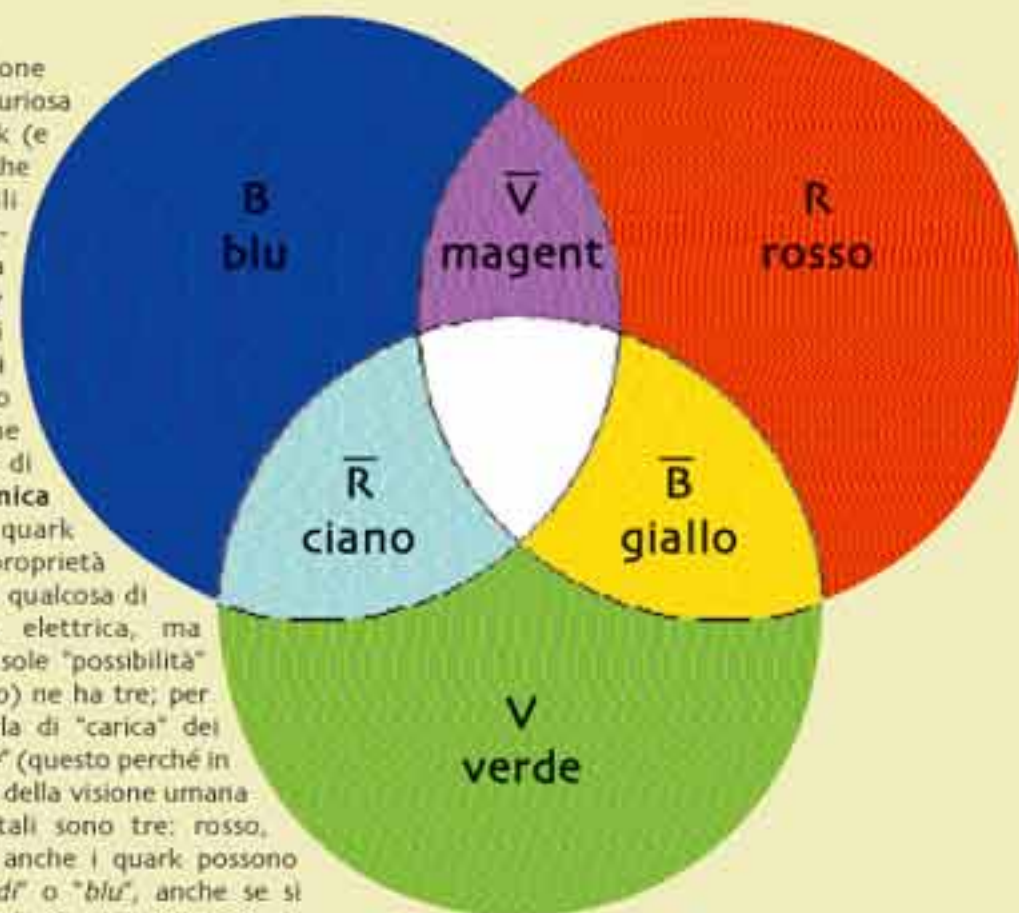
*"Quando proposi l'esistenza dei quark, ero convinto fin dal principio che essi fossero in qualche modo permanentemente confinati. Designai tali quark come "matematici", spiegando con cura cosa intendessi con tale termine, in contrapposizione a presunti "quark reali", in grado di emergere e rivelabili singolarmente. La terminologia si rivelò infelice. Numerosi autori, ignorando la mia spiegazione dei termini "matematico" e "reale" - e il fatto che la situazione che stavo descrivendo è quella universalmente riconosciuta come corretta - hanno sostenuto che io in realtà non credevo all'esistenza dei quark!"*

### Il confinamento e il colore

Il problema del confinamento dei quark rappresenta ancora oggi un problema cruciale della teoria: come previsto da Gell-Mann, infatti, non è possibile "vedere" quark singoli, nel senso che non è possibile estrarli dalle particelle in cui si trovano. Tuttavia i fisici, con un celeberrimo esperimento eseguito a Stanford nel 1968, sono riusciti a sondare la struttura del protone usando elettroni di altissime energie: quello che hanno visto era che effettivamente dentro al protone si trovavano tre particelle più piccole (per l'esattezza, due quark *up* e un quark *down*); ma per qualche strano motivo era assolutamente impossibile "tirare fuori" questi tre componenti dal protone.

Una spiegazione teorica di questa curiosa attitudine dei quark (e di altri problemi che erano inspiegabili con la teoria di Gell-Mann), è quella formulata da Wally Crindberg e da altri fisici all'inizio degli anni '70. Secondo questa teoria (che prenderà il nome di **Cromo Dinamica Quantistica**), i quark posseggono una proprietà insolita: si tratta di qualcosa di simile alla carica elettrica, ma anziché avere due sole "possibilità" (positivo o negativo) ne ha tre; per questo, non si parla di "carica" dei quark, ma di "colore" (questo perché in una teoria semplice della visione umana i colori fondamentali sono tre: rosso, verde e blu). Così anche i quark possono essere "rossi", "verdi" o "blu", anche se si tratta di proprietà fisiche che non hanno niente a che fare con i colori veri e propri.

La "ricetta" per la formazione di un neutrone consiste allora nel prendere un quark di ciascun colore, uno rosso, uno verde e uno blu, in modo da ottenere mediamente un colore neutro (che viene detto "bianco"); anche i mesoni si ottengono in un modo simile, "sovrapponendo" a un colore il suo complementare. Qui sta dunque la soluzione del problema del confinamento: in natura possono esistere solo particelle "bianche", quindi non è possibile ottenere quark singoli, altrimenti presenterebbero un colore diverso dal bianco: se prendiamo infatti un *up* singolo, esso sarà per forza rosso, verde o blu, ma mai bianco.



Murray Gell-Mann



L'elenco dei barioni di spin  $\frac{1}{2}$  e parità  $+$  (tra cui compaiono il protone e il neutrone)



L'elenco dei mesoni di spin  $0$  e parità  $+$  (tra cui compaiono i  $\pi$  e mesoni  $K$ )



Il decupletto dei barioni di spin  $\frac{3}{2}$  e parità  $+$



L'elenco dei barioni di spin  $\frac{1}{2}$  e parità  $-$



L'elenco dei mesoni di spin  $0$  e parità  $-$



Il decupletto dei mesoni di spin  $\frac{1}{2}$  e parità  $-$



Il "triangolo fondamentale"





# L'uomo è quel livello della Natura che prende coscienza di

"Nluna cosa maggiormente dimostra la grandezza e la potenza dell'umano intelletto, né l'altezza e nobiltà dell'uomo, che il potere l'uomo conoscere e interamente comprendere e fortemente sentire la sua piccolezza.

Quando egli considerando la pluralità dei mondi, si sente essere infinitesima parte di un globo che è minima parte di uno degli infiniti sistemi che compongono il mondo, e in questa considerazione stupisce della sua piccolezza, e profondamente sentendola e profondamente riguardandola, si confonde quasi col suo nulla e perde quasi se stesso nel pensiero della immensità delle cose, e si trova quasi smarrito nella vastità incomprendibile dell'esistenza. Allora, con questo atto e con questo pensiero, egli dà la maggior prova possibile della sua nobiltà, della forza e della immensa capacità della sua mente, la quale, rinchiusa in sì piccolo e minimo essere, è potuta pervenire a conoscere e intendere cose tanto superiori alla natura di lui, e può abbracciare e contenere col pensiero questa immensità medesima dell'esistenza e delle cose.

Certo niuno altro essere su questa terra giunge mai pure a concepire o immaginare di essere cosa piccola o in sé o rispetto alle altre cose eziandio ch'ei sia, quanto al corpo, una milionesima parte dell'uomo, per nulla dire dell'animo. E veramente quanto gli esseri sono più grandi, quale sopra tutti gli esseri terrestri si è l'uomo, tanto sono più capaci della conoscenza e del sentimento della propria piccolezza. Onde avviene che questa conoscenza e questo sentimento anche tra gli uomini siano infatti tanto maggiori e tanto più vivi, ordinarli, continui e pieni quanto l'individuo è di maggiore e più alto e più capace intelletto e Ingegno".

(G. Leopardi, da Zibaldone)

Tutti  
i corpi, il firmamento,  
le stelle, la Terra e  
i suoi regni non valgono  
la più piccola intelligenza:  
questa conosce tutto ciò e se stessa;  
i corpi no. Da tutti i corpi messi insieme  
non si potrebbe ricavare un piccolo pensiero:  
questo è impossibile, e  
appartiene a un altro ordine ...

(Blaise Pascal, da *Pensieri*)

Leopardi e Pascal, il grande poeta e il grande scienziato, si incontrano in questo punto. La trama affascinante della storia della Fisica, una storia di uomini, di fatiche e successi, contraddizioni e svolte imprevedibili, fa emergere con chiarezza la condizione paradossale e misteriosa dell'essere umano: infinitesima parte del reale eppure chiamato a conoscerne il segreto, ad abbracciare la totalità.