

# La fisica dei nuclei dagli anni trenta ai giorni nostri

UGO AMALDI

Una presentazione sistematica dei settant'anni di sviluppo della fisica dei nuclei richiederebbe molto più spazio di quello che è qui a disposizione; perciò in questo articolo sono messi a fuoco tre soli momenti importanti di questa affascinante avventura intellettuale.

La prima sezione tratta la nascita, negli anni trenta, di questa fisica e i suoi primi sviluppi sottolineando in particolare i lavori scientifici di Enrico Fermi e collaboratori. Il secondo capitolo è dedicato allo stato della fisica dei nuclei a metà degli anni sessanta, allorché lo studio di quella che fu poi chiamata “fisica delle particelle” si era da poco separato dalla sperimentazione e interpretazione dei fenomeni che avvengono nei nuclei atomici.

Per rendere omaggio a Enrico Fermi nel centenario della nascita, nella discussione di questi due temi si fa ampio riferimento a scritti dei suoi primi allievi: Edoardo Amaldi ed Emilio Segrè.

Nell'ultimo capitolo sono trattati tre dei temi sui quali si concentra oggi la ricerca in fisica nucleare; tali argomenti sono stati scelti per la loro importanza e la rappresentatività delle nuove linee di sviluppo, ma senza pretesa di completezza.

## 1. – Gli anni trenta: nascita e primi sviluppi

1.1. *Il “Physics Report” di Edoardo Amaldi.* – Come guida a questo straordinario periodo di crescita della fisica moderna utilizziamo il saggio pubblicato nel 1984 da Edoardo Amaldi per “Physics Reports”, una pubblicazione di monografie del prestigioso giornale scientifico “Physics Letters”.

Il grosso volume (331 pagine con 924 tra riferimenti bibliografici e note) è intitolato “From the Discovery of the Neutron to the Discovery of Nuclear Fission” [1]. L'indice dà un'idea precisa sia del contenuto che del tono, che è talvolta discorsivo e aneddotico pur restando sempre rigorosamente scientifico:

1. *The discovery of the neutron opens the great season of nuclear physics (1932-1933).*
2. *Other highlights of the same period of nuclear physics (1932-1933).*
3. *Beta decay discloses the existence of a new particle and a new interaction (1930-1939).*
4. *Artificial radioactivity, the road to thousands of new nuclear species for research and applications. The photoneutron and (n,2n) reactions (1934-1937).*
5. *Low velocity neutrons reveal new quantum effects in nuclei (1934-1935).*
6. *Long-lived systems: Neutron resonances and isomeric states (1935-1936).*
7. *Slowing down of fast neutrons; diffusion and diffraction of slow neutrons.*
8. *Other fundamental discoveries and results.*
9. *An intriguing puzzle: What happens to Thorium and Uranium irradiated with neutrons?*

1'2. *La scoperta del neutrone.* – La fisica dei nuclei è nata con la scoperta del neutrone, che fu preceduta nel 1930 dall'osservazione compiuta da W. Bothe e H. Becker [2] di una radiazione penetrante emessa da alcuni nuclei leggeri, incluso il berillio, quando essi venivano irraggiati con le particelle alfa emesse dal polonio. Nel primo capitolo Amaldi scrive [3]: “*Al Congresso Internazionale sulla Fisica Nucleare, tenutosi a Roma nell'ottobre del 1931, in una presentazione generale delle eccitazioni e trasmutazioni di nuclei prodotte da particelle alfa, [Bothe] descrisse nuove misure di assorbimento in Pb e Fe delle radiazioni secondarie emesse dal Be. Il risultato di questo [suo] nuovo esperimento, condotto in condizioni geometriche migliori, era che la penetrazione osservata era tanto grande da richiedere fotoni di energia circa doppia di quella delle particelle alfa incidenti.*”

Seguirono diversi esperimenti, in particolare uno della coppia Joliot-Curie, che erano molto difficili da spiegare con l'ipotesi che nella reazione venissero emessi fotoni di alta energia. Meno di sei mesi dopo, nel febbraio del 1932, James Chadwick misurò la ionizzazione prodotta da singole particelle della radiazione secondaria del berillio. Come è detto nel “Physics Report” [4], questi “*risultati furono riassunti in una lettera all'Editore di “Nature”, datata 17 febbraio 1932 e intitolata ‘Possibile esistenza del neutrone’ che è universalmente considerata essere il certificato di nascita del neutrone*” e della fisica dei nuclei. Da allora un nucleo va pensato come l'insieme legato di  $N$  neutroni e di  $Z$  protoni, di modo che il numero di massa  $A$  vale  $A = N + Z$ . Prosegue Amaldi: “*Heisenberg, Majorana e Wigner per primi compresero appieno l'importanza del nuovo modello che descriveva il nucleo come sistema composto di soli protoni e neutroni. Si poteva infatti applicare il formalismo della meccanica quantistica non relativistica per spiegare qualitativamente, e in parte quantitativamente, alcune proprietà nucleari. Tale programma richiedeva, evidentemente, l'introduzione nell'equazione di Schrödinger di un*

*‘potenziale’ capace di descrivere le nuove forze che agiscono tra i costituenti dei nuclei [e cioè i nucleoni]. Scelte diverse di questo potenziale furono fatte dai tre autori; ciascuna di esse aveva giustificazioni e meriti e rimase un ingrediente utile (o anche necessario) di molti successivi sviluppi”.*

Furono così introdotti diversi tipi di forze (di scambio od ordinarie) ancora oggi dette di Heisenberg, di Majorana e di Wigner. Con esse fu possibile spiegare la saturazione nucleare, il fatto cioè che l’energia di legame dei nuclei è all’incirca proporzionale al numero  $A$  di nucleoni, di modo che l’energia di legame per nucleone è praticamente indipendente da  $A$  e vale, per i nuclei medi e pesanti, all’incirca 8 MeV per nucleone.

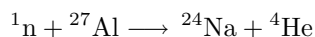
Tra il 1932 e l’inizio del 1934 furono fatte un gran numero di scoperte. Limitandoci alla sola fisica dei nuclei, occorre ricordare: le prime reazioni di disintegrazione nucleare prodotte da protoni accelerati artificialmente con un acceleratore elettrostatico (Cockcroft e Walton, 1932), la scoperta del deuterio —che è l’isotopo dell’idrogeno di numero di massa  $A = 2$  (Urey *et al.*, 1932), l’accelerazione di deutoni (nuclei di deuterio) e di protoni a energie superiori al MeV nel nuovo ciclotrone da 27 pollici (Lawrence e Livingstone, 1933), la scoperta del trizio— isotopo del deuterio con  $A = 3$  (Oliphant, Kinsey e Rutherford, 1933), la teoria del decadimento beta, nella quale l’emissione di elettroni è interpretata come trasformazione di un neutrone in un protone con la contemporanea emissione di un (anti)neutrino (Fermi, 1933), la scoperta della fotodisintegrazione del deutone (Chadwick e Goldhaber, 1934) e, infine, la scoperta di un nuovo tipo di radioattività indotta in un bersaglio di alluminio irradiato con particelle alfa (cioè nuclei di  $^4\text{He}$ ), nella quale sono emessi antielettroni (positoni) anziché gli elettroni emessi nella radioattività beta naturale (Joliot e Curie, 1934).

1’3. *La radioattività indotta dai neutroni.* – Queste scoperte sono discusse in dettaglio nei capitoli 2 e 3 del “Physics Report” di Amaldi che, nel capitolo 4, scrive [5]:

*“Dopo che a Roma furono letti i lavori di Joliot e Curie, all’inizio del marzo 1934 Fermi suggerì a Rasetti di provare a osservare un effetto simile ma prodotto da neutroni [anziché da particelle alfa] usando la sorgente di Polonio-Berillio preparata dallo stesso Rasetti. Due settimane dopo diversi elementi furono irradiati e la loro attività fu misurata con un contatore Geiger-Müller a parete sottile, ma per mancanza di intensità i risultati furono negativi. Poi Rasetti partì per una vacanza in Marocco e Fermi continuò gli esperimenti. Egli ebbe l’idea che per osservare un’attività indotta dai neutroni non era necessario utilizzare una sorgente di Polonio-Berillio; poteva essere impiegata una sorgente molto più intensa di Radon-Berillio, dato che le sue radiazioni beta e gamma (assenti in una sorgente di Polonio-Berillio) non avrebbero impedito l’osservazione di un effetto ritardato nel tempo. [...] Appena avuta una sorgente di neutroni molto più intensa, Fermi bombardò sistematicamente gli elementi in ordine di numero atomico crescente, cominciando dall’idrogeno. [...] Finalmente riuscì a ottenere che il suo contatore di Geiger-Müller registrasse alcuni conteggi quando irradiò il Fluoro e l’Alluminio.”*

La scoperta della radioattività artificiale indotta dai neutroni in questi elementi leggeri, nella quale sono emessi usuali elettroni anziché positoni, fu interpretata correttamente da Fermi come dovuta a un nuovo tipo di reazioni nucleari —indicata con il simbolo

(n,  $\alpha$ )— nelle quali un nucleo assorbe un neutrone ed emette una particella alfa. In particolare per l'alluminio egli scrisse la reazione nucleare nella forma



e affermò che “il  ${}^{24}\text{Na}$  così formato sarebbe un nuovo elemento radioattivo e si trasformerebbe in  ${}^{24}\text{Ca}$  con emissione di una particella beta (un elettrone)” [6].

“Fermi voleva procedere nel lavoro nel modo più rapido possibile e perciò chiese a Segrè e a me —racconta Amaldi [5]— di aiutarlo negli esperimenti. A Rasetti fu spedito un telegramma, chiedendogli di tornare, e il lavoro fu organizzato immediatamente e in modo molto efficiente. Fermi, aiutato alcuni giorni dopo da Rasetti, faceva una buona parte delle misure e dei calcoli, Segrè procurava le sostanze che dovevano essere irradiate e gli strumenti necessari e più tardi fu coinvolto nella maggior parte del lavoro chimico. Io mi occupavo della costruzione dei contatori di Geiger-Müller e di quella che ora si chiama l'elettronica. Questa divisione dei compiti non era però affatto rigida e ciascuno di noi partecipava a tutte le fasi del lavoro.” In pochi mesi furono così irradiati una sessantina di elementi e furono scoperti quarantaquattro nuovi nuclidi; in ben sedici casi si ottenne la separazione chimica dell'elemento radioattivo usando la tecnica del trasporto chimico, a cui lavorava principalmente il chimico Oscar D'Agostino che era stato invitato a raggiungere il gruppo dei fisici di via Panisperna. In tutti i casi si trovò che nella radioattività indotta artificialmente dai neutroni erano sempre prodotti elettroni e mai positoni, come ci si doveva attendere per nuclidi ricchi di neutroni prodotti in reazioni nucleari del tipo (n,  $\alpha$ ), (n, p) e (n,  $\gamma$ ).

Nel lavoro conclusivo pubblicato sui “Proceedings” della *Royal Society* [7] è discusso in dettaglio il caso in cui il nuclide radioattivo prodotto a seguito della cattura neutronica è isotopo del nuclide di partenza. Due possibili reazioni sono considerate, la reazione (n, 2n) con emissione di due neutroni e la reazione (n,  $\gamma$ ), nella quale dopo la cattura è emesso un quanto gamma. Poiché la cattura di un neutrone libera la sua energia di legame, circa 8 MeV, e l'emissione di due neutroni richiede il doppio di questa energia, la reazione (n, 2n) è endoenergetica mentre la reazione (n,  $\gamma$ ) è esoenergetica.

Quest'ultima era quindi l'interpretazione da favorire, ma essa “...va incontro a serie difficoltà teoriche quando si cerca di spiegare come un neutrone possa essere catturato da un nucleo in uno stato stabile o quasi stabile. Infatti si ammette generalmente che un neutrone è attratto da un nucleo soltanto quando la sua distanza dal centro del nucleo è dell'ordine di  $10^{-12}$  cm. Ne segue che un neutrone di qualche milione di elettronvolt [che è l'energia posseduta dai neutroni emessi nelle reazioni ( $\alpha$ , n) proprie delle sorgenti di radon-berillio] può rimanere nel nucleo soltanto per un tempo dell'ordine di  $10^{-21}$  s, cioè il tempo necessario ad attraversare il nucleo. Il neutrone è catturato se, durante questo tempo, è capace di perdere l'eccesso di energia, per esempio con l'emissione di un gamma. Se si calcola la probabilità del processo di emissione con i soliti metodi, si trova però un valore troppo piccolo per spiegare le sezioni d'urto osservate. Per mantenere l'ipotesi della cattura bisogna quindi supporre o che la probabilità di emettere un gamma sia molto maggiore di quella generalmente assunta oppure che, per ragioni non capite

*nella teoria presente, un nucleo possa rimanere per almeno  $10^{-16}$  s in uno stato di energia tanto alta [cioè più di 8 MeV] da permettere l'emissione di un neutrone.*” [7]. Come dice Amaldi [8] “... la dimostrazione che i neutroni possono subire, con sezione d'urto apprezzabile, la cattura radiativa fu una delle prime prove sperimentali del fatto che il modello a particella singola del nucleo è inadeguato a descrivere molte importanti proprietà nucleari.” La spiegazione di questo importante fenomeno dovette attendere la scoperta della grande probabilità di assorbimento dei neutroni lenti, certamente il maggiore contributo alla fisica dei nuclei dovuto al gruppo di Fermi.

1'4. *I neutroni lenti.* – La storia di questa scoperta iniziò con una serie di misteri che misero in crisi i giovani che lavoravano nell'Istituto di via Panisperna.

Nel settembre del 1934 Amaldi e Segrè ripeterono la misura della radioattività indotta in alluminio con l'intento di verificare se essa fosse dovuta a una reazione  $(n, \gamma)$  e immediatamente comunicarono per telegramma l'interessante risultato a Fermi che, di ritorno dal Sud America, si era fermato a Londra per un congresso internazionale. Nel suo discorso Fermi menzionò questa importante osservazione ma, tornato a Roma, ebbe ragione di inquietarsi. Infatti qualche giorno dopo la misura era stata ripetuta dal solo Amaldi, dato che Segrè era costretto a letto da un raffreddore, ed era stato trovato un diverso periodo di dimezzamento della radioattività indotta. Segrè racconta di quanto i due giovani ricercatori, che erano sicuri dei loro primi risultati, fossero dispiaciuti dell'irritazione di Fermi e aggiunge: “... non riuscivo a immaginare che cosa stesse succedendo. Per di più, Edoardo stava trovando alcuni nuovi fenomeni inesplicabili; in poche settimane i misteri si moltiplicarono” [9].

Nel “Physics Reports” gli eventi sono così raccontati [10]. “Fu deciso di stabilire una scala quantitativa delle attività indotte e il lavoro fu affidato a me e a Bruno Pontecorvo che, laureatosi nel luglio del 1934, era uno dei nostri migliori studenti e si era unito al gruppo subito dopo le vacanze. Cominciammo con lo studiare le condizioni di irradiazione più convenienti per ottenere risultati riproducibili, ma incontrammo subito delle difficoltà dato che l'attivazione dipendeva dalle condizioni di irradiazione. In particolare nella camera oscura, ove di solito si eseguivano gli esperimenti, vi erano alcuni tavoli di legno che avevano proprietà miracolose. Come Pontecorvo osservò per caso, l'argento irradiato su quei tavoli diventava più radioattivo di quello irradiato sulla solita tavola di marmo che si trovava nella stessa stanza. Questi risultati, riferiti quotidianamente a Fermi e agli altri, furono criticati amichevolmente ma con fermezza da Rasetti che, prendendoci in giro, insinuò che io e Pontecorvo eravamo incapaci di fare ‘misure pulite e riproducibili.’”

Nella mattinata del 22 ottobre la maggior parte dei giovani di via Panisperna era occupata a fare esami e Fermi, trovatosi solo in laboratorio, decise di continuare le misure ma, al momento di inserire un assorbitore di piombo tra la sorgente di neutroni e l'argento da attivare, utilizzò invece un pezzo di paraffina. Era presente in laboratorio Enrico Persico dell'Università di Torino, che si trovava per caso a Roma e aiutò Fermi a scrivere i primi risultati delle misure sul quaderno di laboratorio. Alla fine della mattinata, l'aumento di radioattività indotta causato dalla presenza della paraffina fu mostrato a

Bruno Rossi dell'Università di Padova, che era anche in visita quel giorno, e agli altri componenti del gruppo, che avevano finito gli esami.

Molti anni dopo lo stesso Fermi raccontò a Chandrasekhar come ciò avvenne [11]. *“Lavoravamo molto intensamente sulla radioattività indotta da neutroni e i risultati non facevano alcun senso. Un giorno, mentre mi recavo in laboratorio, mi venne in mente di studiare cosa sarebbe successo collocando del piombo davanti alla sorgente di neutroni. Contrariamente al mio solito, impiegai molto tempo a lavorare con precisione al tornio il pezzo di piombo; ero chiaramente scontento di qualche cosa e cercavo ogni scusa possibile per ritardare il momento di mettere il piombo al suo posto. A un certo punto dissi a me stesso: ‘No, qui non voglio un pezzo di piombo; quello che voglio è un pezzo di paraffina’. Fu proprio così, senza preavvertimenti né ragionamento conscio. Immediatamente presi un pezzo di paraffina qualunque e lo posi lì dove avrei dovuto mettere il pezzo di piombo.”*

Gli avvenimenti del 22 ottobre 1934 sono stati raccontati da molti dei presenti con aggiunte e sfumature diverse. Bruno Pontecorvo riporta, ad esempio, alcune frasi illuminanti pronunciate da Fermi in quella occasione [12]:

*“Il risultato fu chiaro: ‘l’assorbente’ di paraffina non diminuiva l’attività ma (anche se di poco) la incrementava. Fermi ci chiamò tutti e disse ‘Questo fatto avviene, presumibilmente, grazie all’idrogeno contenuto nella paraffina; se una piccola quantità di paraffina dà comunque un risultato evidente, proviamo a vedere cosa succede con una quantità maggiore’. L’esperimento venne immediatamente realizzato prima con la paraffina e poi con l’acqua. I risultati furono sbalorditivi: l’attività dell’argento era centinaia di volte superiore a quella che ottenevamo in precedenza! Fermi mise fine al chiasso e all’agitazione dei collaboratori pronunciando una famosa frase che, dicono, ripeté otto anni dopo al momento dell’avviamento del primo reattore: ‘Andiamo a pranzo’... [Nella scoperta dei neutroni lenti] hanno giocato un ruolo sostanziale sia alcune situazioni casuali, sia la profondità e l’intuito di un grande intelletto. Quando noi chiedemmo a Fermi perché avesse usato un cuneo di paraffina e non di piombo, egli sorrise e con aria beffarda articolò: ‘C.I.F.’ (Con Intuito Fenomenale). Se il lettore di questa affermazione si facesse l’idea che Fermi fosse immodesto, sbaglierebbe di grosso. Egli era un uomo diretto, molto semplice e modesto, tuttavia cosciente delle proprie capacità. A questo proposito, quando quel famoso giorno egli tornò dopo pranzo all’Istituto e, con incredibile chiarezza, ci spiegò l’effetto della paraffina, introducendo così il concetto del rallentamento dei neutroni, ci disse con assoluta sincerità: ‘Che cosa stupida aver scoperto questo fenomeno casualmente senza averlo saputo prevedere.’”*

La spiegazione trovata da Fermi nell’intervallo del pranzo è ben nota: i neutroni di qualche MeV — emessi da una sorgente di radon-berillio — perdono praticamente tutta questa energia cinetica in un gran numero di urti successivi con i protoni, e cioè con i nuclei degli atomi di idrogeno contenuti nella paraffina. Rallentati fino all’energia dell’agitazione termica delle molecole, i neutroni passano più tempo nelle vicinanze dei nuclei di argento del bersaglio e sono quindi molto più efficienti nell’induzione di radioattività.

L’interpretazione richiede che, diversamente da quanto ci si aspettava a quell’epoca, la probabilità di cattura di un neutrone da parte di un nucleo *aumenti* grandemente al *diminuire* della velocità del neutrone; questo è il nucleo essenziale della scoperta fatta a

Roma il 22 ottobre 1934, confermata nel pomeriggio per il rame e lo iodio (ma non per il silicio, lo zinco e il fosforo) e descritta in una corta memoria [13], che fu preparata in una riunione traboccante di eccitazione tenutasi la sera stessa a casa Amaldi. Il giorno dopo la lettera (firmata da E. Fermi, E. Amaldi, B. Pontecorvo, F. Rasetti ed E. Segrè) fu portata alla “Ricerca Scientifica” da Ginestra Amaldi, che vi lavorava come redattrice.

Fu subito chiaro a tutti i componenti del gruppo che la scoperta aveva importanti applicazioni pratiche in quanto il tasso di produzione di isotopi radioattivi artificiali aumenta grandemente quando si usano neutroni lenti, prodotti a partire da una qualsiasi sorgente immersa in sostanze “moderatrici” della velocità in quanto ricche di idrogeno. In particolare, i ricercatori di via Panisperna pensarono immediatamente alle applicazioni mediche e all'utilizzazione come traccianti —a scopi fisici, chimici e biologici— degli isotopi radioattivi prodotti con tanta maggiore efficienza. Orso Mario Corbino, direttore dell'Istituto, suggerì immediatamente di prendere un brevetto, il che fu fatto il 26 ottobre dagli autori del lavoro e da O. D'Agostino e G. C. Trabacchi, che furono aggiunti tra gli inventori in considerazione dell'aiuto dato alle ricerche sui neutroni nei mesi precedenti la scoperta.

Come scrive Amaldi [14]: *“Fummo compiaciuti e divertiti, non tanto perché il brevetto avrebbe potuto trasformarsi —forse e in futuro— in un beneficio economico per gli ‘inventori’ ma piuttosto perché un lavoro, condotto con grande energia e determinazione soltanto per i suoi meriti scientifici, ci aveva inaspettatamente condotto ad applicazioni che, oltretutto, erano di natura scientifica e medica.”* In realtà, per una serie di circostanze legate prima alla seconda guerra mondiale e poi alla guerra fredda, il beneficio economico fu piccolo ma la soddisfazione rimase grande; basti pensare che settant'anni dopo l'80% circa di tutti gli esami diagnostici di medicina nucleare utilizzano un isotopo del tecnezio, che è prodotto da neutroni termici prodotti in reattori nucleari. Non va neppure dimenticato che lo stesso elemento tecnezio fu scoperto a Palermo qualche anno dopo da Emilio Segrè e Perrier in un pezzo di metallo irradiato al ciclotrone di Berkeley.

Tornando alle ricerche condotte a via Panisperna, nei mesi seguenti furono scoperti sessanta nuovi isotopi radioattivi e fu confermato che la probabilità di cattura di un neutrone varia approssimativamente con legge  $1/v$ , cioè aumenta con l'inverso della sua velocità. Ma presto si osservò che questa legge non è valida per tutti i nuclei. Nel 1935 Bjerger e Westcott, nel laboratorio di Rutherford a Cambridge, e Moon e Tillman all'Imperial College di Londra trovarono alcune eccezioni cosicché, dopo l'estate del 1935, Amaldi e Fermi intrapresero uno studio sistematico dei fenomeni di assorbimento di neutroni filtrati da sostanze diverse. Gli altri membri del gruppo non erano più a Roma in quanto Rasetti era negli Stati Uniti, Segrè era stato nominato professore a Palermo e Pontecorvo faceva il fisico teorico e si preparava ad andare dai Joliot a Parigi.

Amaldi e Fermi lavorarono per molti mesi con enorme energia e concentrazione, *“... come se, con i nostri maggiori sforzi, volessimo compensare la perdita di forza-lavoro del gruppo”* [15], e nel giro di pochi mesi pubblicarono sulla “Ricerca Scientifica” sei lavori. La conclusione di questo approccio sistematico, combinato con risultati ottenuti da Leo Szilard a Oxford, fu che in molti elementi i neutroni, la cui energia cinetica cade in alcune bande caratteristiche del nucleo bersaglio, sono enormemente assorbiti.

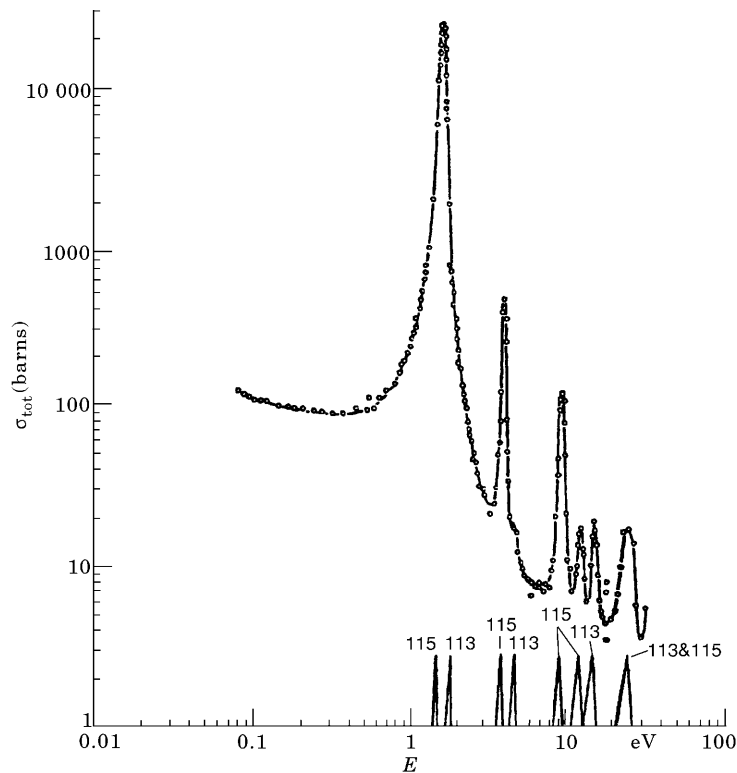


Figura 1. – Sezione d'urto totale dell'indio naturale misurata nel 1952 da V. L. Sailor e L. H. Boost in funzione dell'energia del neutrone catturato espressa in eV; 1 barn vale  $10^{-24}$  cm<sup>2</sup>.

Questo nuovo fenomeno completa la serie di scoperte fatte a Roma tra il 22 ottobre 1934 e il 29 maggio 1936, giorno in cui Amaldi e Fermi spedirono alla “Ricerca Scientifica” e a “Physical Review” il ponderoso lavoro che concludeva lo studio sistematico dell'assorbimento e della diffusione di neutroni [16]. In sintesi esse sono:

1. la radioattività prodotta dai neutroni rallentati dagli urti con l'idrogeno, e altri nuclei leggeri,
2. la legge  $1/v$ , secondo la quale i neutroni sono tanto più assorbiti dai nuclei quanto è minore la loro velocità  $v$ ,
3. l'enorme sezione d'urto di cattura del cadmio e l'esistenza, nel cadmio e in molti altri nuclidi, di forti bande di assorbimento dei neutroni lenti,
4. l'effetto del legame chimico sull'assorbimento dei neutroni.

Particolarmente importante per il futuro della fisica dei nuclei fu la scoperta delle bande di assorbimento, che furono subito studiate con metodi ingegnosi, ma apparvero



nella loro spettacolarità soltanto dopo la guerra, quando i reattori nucleari permisero misure accurate. A illustrazione di questo fenomeno di assorbimento selettivo, nel “Physics Report” è riportata la sezione d’urto dell’indio naturale che ha due isotopi di numero di massa 113 e 115 (fig. 1).

1.5. *Il modello del nucleo composto.* – In meno di un anno e mezzo la fisica dei nuclei cambiò volto. Infatti se, come si è visto, la teoria nucleare dell’inizio del 1934 non era in grado di spiegare le sezioni d’urto delle reazioni  $(n, \gamma)$  osservate quando i neutroni hanno qualche MeV di energia, ancor meno poteva interpretare le bande di assorbimento osservate per i neutroni epitermici e termici, i neutroni cioè che hanno energie minori di una decina di elettronvolt. All’inizio Niels Bohr non credeva a questi risultati, tanto che nel giugno del 1934 scrisse a Rutherford [9]: “*sono pieno di dubbi circa l’idea di Fermi che i neutroni in alcuni casi si attaccano direttamente ai nuclei con emissione di radiazione [producendo cioè reazioni  $(n, \gamma)$ ]; a me sembra molto più probabile che il risultato sia l’espulsione di due neutroni [reazioni  $(n, 2n)$ ].*” Ma la conferma della generalità delle reazioni  $(n, \gamma)$  e la scoperta delle risonanze nucleari lo obbligò a riconsiderare le sue idee. Così all’inizio del 1936 Bohr pubblicò un importante lavoro [17], che fu seguito poco dopo da uno altrettanto importante di Breit e Wigner [18].

All’atto della penetrazione di un neutrone in un nucleo medio o pesante si libera la sua energia di legame, circa 8 MeV, che va aggiunta all’energia cinetica per calcolare l’energia totale acquistata dal nucleo. Con l’acquisto di questa energia, come scrive lo stesso Bohr [17], “*... una collisione tra un [ ... ] neutrone e un nucleo pesante dà innanzitutto luogo alla formazione di un sistema composto di straordinaria stabilità. Il possibile successivo fenomeno di rottura di questo sistema intermedio con l’eiezione di una particella materiale, oppure la sua transizione a uno stato finale con l’emissione [di un quanto di] radiazione, devono essere considerati come processi diversi in competizione tra loro, che non sono in alcun modo connessi con il primo stadio dell’incontro.*”

Nel capitolo 6 Amaldi riproduce la figura utilizzata da Bohr per spiegare il suo modello (fig. 2) e così lo spiega [19]: “*La straordinaria stabilità dello stato intermedio è giustificata da Bohr osservando che non appena il neutrone incidente è entrato nel nucleo esso comincia a urtare i suoi ‘costituenti’. Di conseguenza la sua energia [sempre maggiore di 8 MeV] è rapidamente suddivisa tra molte particelle, nessuna delle quali acquista abbastanza energia per lasciare il nucleo [ ... ]. Secondo questo modello un processo nucleare può essere descritto come la successione di due fenomeni indipendenti: il primo è la formazione, a seguito della cattura del neutrone incidente, di un ‘sistema composto’ eccitato e il secondo è il decadimento del sistema composto, o ‘stato intermedio’ o per emissione di una particella oppure attraverso l’irradiazione di un fotone.*”

Nello stesso lavoro nel quale Bohr propose questo ‘*modello del nucleo composto*’ egli spiegò anche l’assorbimento selettivo dei neutroni. La presenza delle linee di assorbimento di neutroni lenti è infatti dovuta al fatto che, nei nuclei medi e pesanti, per energie di eccitazioni nucleari inferiori a una decina di MeV (caratteristiche della cattura di neutroni termici ed epitermici) gli stati del nucleo composto sono ben separati gli uni dagli altri; in corrispondenza di ciascuno di essi la cattura è più probabile e la sezione d’urto ha un

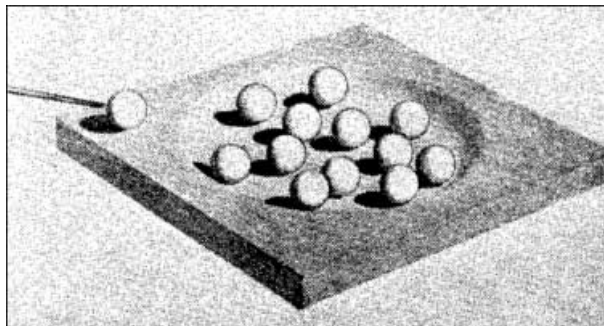


Figura 2. – Modello realizzato nell’officina dell’Istituto di Copenhagen per illustrare l’idea di Bohr sulla formazione del sistema composto eccitato a seguito della cattura di un neutrone.

“picco”. Alcuni di questi picchi sono stati mostrati nella fig. 1 a pag. 160. Per energie di eccitazione dell’ordine dei 15 MeV —caratteristiche della cattura di neutroni veloci che hanno qualche MeV di energia cinetica— i livelli energetici del nucleo composto sono vicini l’uno all’altro e tendono a sovrapporsi; non si hanno quindi bande di assorbimento e la sezione d’urto varia seguendo approssimativamente la legge  $1/v$ .

Mentre nella breve lettera a “Nature” Bohr non scrisse neanche una formula, il lavoro di Breit e Wigner ne contiene molte; in particolare vi compare per la prima volta la famosissima “formula di Breit e Wigner” che esprime l’andamento delle sezioni d’urto di cattura neutronica e di diffusione neutronica nell’intorno di una risonanza nucleare isolata e riproduce, per esempio, la forma dei picchi della fig. 1. Nella loro complementarità questi due lavori, pubblicati all’inizio del 1936, rappresentano una pietra miliare nella costruzione della fisica dei nuclei.

**1.6. Le forze nucleone-nucleone.** – Sin dagli anni trenta lo studio sperimentale e teorico dei nuclei ha seguito due approcci complementari e paralleli: la costruzione di modelli (che permettono di spiegare i livelli energetici, le probabilità di transizione tra livelli e le reazioni nucleari) e la giustificazione di questi stessi modelli a partire dalle forze nucleone-nucleone. Da sempre si spera di riuscire a ricavare le proprietà dei nuclei dalla conoscenza delle interazioni tra i loro componenti, ma ancora oggi questo traguardo non è stato raggiunto (tranne che per alcuni nuclei leggeri) e, anzi, molti pensano che non lo sarà mai.

Lo studio sperimentale della diffusione protone-protone, iniziato al Carnegie Institute di Washington nel 1926, nel 1934 proseguiva al ciclotrone di Berkeley. L’anno successivo a Roma Amaldi e Fermi provarono che a basse energie la forza neutrone-protone è uguale a quella protone-protone [9]. Questi e altri risultati permisero a Breit, Condon e Present di affermare, in un famoso lavoro anch’esso del 1936 [20], che “*l’accordo tra i valori sperimentali delle interazioni protone-protone e protone-neutrone nello stato  $^1S$  suggerisce che, facendo astrazione da effetti coulombiani [cioè elettrici] e di spin, le interazioni tra particelle pesanti [nucleoni] sono indipendenti dalla loro carica.*” Sappiamo

oggi che questa importantissima proprietà delle forze nucleari che agiscono tra coppie di nucleoni è una conseguenza della natura composita dei nucleoni, fatti da tre quark che hanno massa propria molto minore della massa di un nucleone.

Nel campo delle forze internucleoniche lo sviluppo più carico di conseguenze fu fatto da Hideki Yukawa con un lavoro pubblicato all'inizio del 1935 [21] ma rimasto sconosciuto in occidente per più di due anni. Come spiega Amaldi [22], questo lavoro —riprendendo una proposta fatta da altri precedentemente secondo la quale la forza neutrone-protone era dovuta allo scambio di una coppia elettrone-neutrino— “... inizia con due osservazioni e una proposta. La prima osservazione riguarda l'importanza delle forze di scambio, la seconda si riferisce ai tentativi infruttuosi appena citati. Esse sono contenute nelle prime dieci righe del lavoro di Yukawa, che presenta nelle dieci righe successive una nuova straordinaria proposta: se le forze di scambio di Heisenberg non possono essere interpretate come effetto dello scambio di una coppia elettrone-neutrino, perché non cercare di interpretarle come dovute allo scambio di una nuova particella di massa intermedia [tra quelle di un elettrone e di un nucleone]? Yukawa scrive: ‘Ora questa interazione tra particelle elementari può essere descritta per mezzo di un campo di forza, esattamente come l'interazione tra particelle cariche è descritta dal campo elettromagnetico. [...] Nella teoria quantistica questo campo [chiamato dall'autore campo  $U$ ] dovrebbe essere accompagnato da un nuovo quanto, proprio come il campo elettromagnetico è accompagnato dal fotone.’”

Poiché le forze nucleari agiscono soltanto fino a distanze di circa  $10^{-13}$  cm, Yukawa calcolò che il loro mediatore doveva essere circa 200 volte più massiccio di un elettrone. Questa previsione fu verificata quando questa nuova particella, detta oggi “pione” fu scoperta una decina d'anni dopo nei raggi cosmici. Essa è soltanto una delle molte particelle di spin intero (bosoni) il cui scambio fu utilizzato negli anni settanta per cercare di spiegare quantitativamente le forze nucleone-nucleone. Questi tentativi sono stati quasi completamente abbandonati, ma ancora oggi nei calcoli nucleari la forza nucleone-nucleone a distanze maggiori di  $10^{-13}$  cm è descritta mediante lo scambio di un pione, adottando lo schema che è noto con il nome di OPEM (*One Pion Exchange Model*).

1.7. *Transuranici e fissione.* – Il capitolo 9 —intitolato “An intriguing puzzle: What happens to Thorium and Uranium irradiated with neutrons?”— si apre con la descrizione delle molte attività scoperte allorché il gruppo di via Panisperna irradiò il torio e l'uranio. Successivamente è tracciata una storia degli innumerevoli lavori sperimentali e teorici nella quale il gruppo di Roma si trovò coinvolto —insieme ai fisici americani, austriaci, francesi e tedeschi Angruss, Irène Curie, Grosse, Lise Meitner, Ida Nodack, Hahn e altri— nel tentativo di spiegare questi nuclidi radioattivi come “transuranici”. La situazione di confusione durò quattro anni e, a posteriori, l'unica intuizione valida durante questo periodo fu quella di Ida Nodack [23] che nel 1934 suggerì che a seguito del bombardamento con neutroni i nuclei pesanti si sarebbero potuti rompere in “*molte grandi pezzi*” isotopi di elementi noti ma lontani, nella tabella degli elementi, dall'uranio e dal torio.

Nessuno raccolse questa proposta e Amaldi così descrive ciò che accadde a Roma [24]: “*Mi sembra di ricordare alcune discussioni avvenute tra i membri del nostro gruppo, com-*

*preso Fermi, nelle quali le idee di I. Noddack furono messe da parte troppo rapidamente perché richiedevano una reazione nucleare di tipo completamente nuovo. Enrico Fermi, e noi tutti cresciuti alla sua scuola lo seguivamo in questo, era sempre molto riluttante a invocare un fenomeno nuovo non appena qualcosa di nuovo veniva osservato: fenomeni nuovi dovevano essere dimostrati! Come gli sviluppi successivi dimostrarono, sarebbe stato più utile mettere alla prova la proposta della Noddack e, se necessario, dimostrare che era sbagliata. Ma Fermi e tutti noi fummo, in quell'occasione, troppo conservatori. [...] Vi sono due motivi, o forse, due scuse tardive, del fatto che il suggerimento di I. Noddack non venne preso seriamente né a Roma, né a Berlino o Parigi. La sua proposta, che era poi la spiegazione corretta [e cioè la "fissione" dell'uranio e del torio], appariva più come una speculazione, avente lo scopo di mettere in luce la mancanza di rigore nell'enunciazione della formazione dell'elemento con  $Z = 93$ , che una spiegazione seria delle osservazioni. Questo sembra essere confermato dal fatto che ella non cercò, né sola né con il marito, di condurre esperimenti sull'Uranio irradiato come avrebbero potuto fare. Inoltre, in quegli anni i Noddack erano alquanto screditati perché avevano preteso di aver scoperto l'elemento con  $Z = 43$ , che avevano chiamato 'masurio'.*

Com'è noto, nel dicembre del 1938 Otto Hahn e Fritz Strassmann annunciarono che l'uranio, irradiato con neutroni, si spezza in due nuclei di massa intermedia; applicando raffinati metodi di radiochimica gli autori erano infatti riusciti a mettere in evidenza isotopi radioattivi che avevano le proprietà chimiche del bario e del lantanio.

Pochi giorni dopo l'annuncio della scoperta della fissione nucleare, Otto Frisch e Lise Meitner interpretarono il fenomeno nel quadro del "modello a goccia" del nucleo. Come una goccia di liquido che vibra può dividersi in due, così un nucleo pesante e instabile, catturando un neutrone, può cominciare a vibrare in modo che le forze repulsive, che si esercitano tra i protoni che sono tutti positivi, finiscono col vincere le forze di tensione superficiale, che tendono a mantenere il nucleo di forma sferica. Questo fu il primo contributo che la scoperta della fissione dette alla teoria dei nuclei.

Iniziò così quella notissima catena di eventi che portò Einstein a scrivere al Presidente Roosevelt sulle possibili applicazioni militari di questo fenomeno e vide Fermi realizzare nel 1942 il primo reattore nucleare.

## 2. – Gli anni sessanta e la separazione dalla fisica delle particelle

**2'1.** *Il trattato "Nuclei and Particles" di Emilio Segrè.* – Per descrivere lo stato della fisica dei nuclei negli anni sessanta facciamoci guidare dal notissimo libro di Emilio Segrè "Nuclei and Particles", la cui prima edizione (754 pagine) fu pubblicata trentaquattro anni dopo il Congresso di Roma del 1930 [25]. La versione italiana del "Segrè" fu diffusa qualche anno dopo [26].

Dopo la collaborazione con Enrico Fermi e la scoperta del tecnezio, fatta quando era professore a Palermo, Segrè era emigrato negli Stati Uniti a causa delle leggi razziali e durante la guerra aveva partecipato al Progetto Manhattan. Divenuto nel 1946 professore a Berkeley, nel 1959 aveva diviso con Owen Chamberlain il premio Nobel per la scoperta dell'antiprotone. Avendo partecipato in prima persona sia alle ricerche di fisica dei

nuclei degli anni trenta che alle nuove attività di fisica delle particelle compiute presso i primi grandi acceleratori del dopoguerra, Segrè era certamente il fisico sperimentale che, all'inizio degli anni sessanta, meglio poteva dare un quadro unitario delle “due fisiche”.

Già l'indice di “Nuclei and particles” (che porta il sottotitolo “An introduction to nuclear and subnuclear physics”) permette di rendersi conto dello stato delle conoscenze e dell'importanza che allora era data ai diversi argomenti:

1. *History and introduction.*

Part I - Tools

2. *The passage of radiations through matter.*

3. *Detection methods for nuclear radiations.*

4. *Particle accelerators.*

5. *Radioactive decays.*

Part II - The nucleus

6. *Elements of the nuclear structure and systematics.*

7. *Alpha emission.*

8. *Gamma emission.*

9. *Beta decay.*

10. *The two-body system and nuclear forces.*

11. *Nuclear reactions.*

12. *Neutrons.*

Part III - Subnuclear particles

13. *Muons.*

14. *Pions.*

15. *Strange particles.*

Nel capitolo 3 sono passati in rivista i rivelatori di particelle che erano in uso all'inizio degli anni sessanta. Trent'anni prima la maggior parte di essi —i rivelatori a semiconduttore, gli scintillatori, i contatori di Čerenkov, le camere a bolle e le camere a scintilla— non erano ancora stati inventati.

Ancora più impressionante è lo sviluppo degli acceleratori, a cui è dedicato il capitolo 4. Ernest Lawrence inventò il ciclotrone nel 1929, ma il primo prototipo funzionò soltanto nel 1932. Segrè descrive il funzionamento del ciclotrone, del sincrociclotrone, del

betatrone e del sincrotrone e sottolinea il fatto che in trent'anni i fasci di protoni estratti da queste macchine acceleratrici erano passati da 1-2 MeV ai 6200 MeV —cioè ai 6.2 GeV— del Bevatrone di Berkeley con il quale erano stati prodotti i primi antiprotoni.

Il rapido sviluppo della fisica dei nuclei e, in particolare, della fisica delle particelle subatomiche è stato possibile soltanto per l'invenzione di molte nuove tecniche di accelerazione e rivelazione delle particelle, a cui qui non si può nemmeno accennare.

**2.2. Il modello a strati dei nuclei.** — La seconda parte del “Segrè”, ben 400 pagine, è la più lunga delle tre; ciò dimostra il ruolo centrale che l'autore attribuiva a questo capitolo della fisica subatomica. Due degli argomenti trattati nel capitolo 6 devono essere ricordati: il modello a strati del nucleo (*shell model*) e i modelli collettivi (*collective models*).

Il modello a goccia (*liquid-drop model*), che era stato introdotto negli anni trenta per spiegare il fenomeno della fissione nucleare, permette di giustificare le proprietà medie delle energie di legame dei nuclei, ma non dà alcuna indicazione su molte regolarità osservate. Infatti sin dagli anni trenta esistevano indicazioni che i nuclei che contengono numeri ben determinati di neutroni e protoni (per esempio 8 e 20) sono particolarmente stabili. D'altra parte il modello del nucleo composto (*compound nucleus model*) —introdotto da Niels Bohr nel 1936 e basato sull'ipotesi che tutti i nucleoni partecipano in egual misura alle reazioni nucleari— spiegava molte osservazioni sperimentali. Anche per questo Bohr, che aveva un'enorme influenza su tutti i fisici dell'epoca, era risolutamente contrario a ogni modello che considerasse importante per la descrizione di un nucleo nel suo complesso il comportamento di un singolo nucleone (i modelli a particella singola che sono detti in inglese *single-particle models*).

Tuttavia, nel 1949 Maria Goppert Mayer e Hans Jensen e collaboratori indipendentemente mostrarono che la particolare stabilità di alcuni nuclei può essere spiegata introducendo nell'energia di legame di un singolo nucleone un termine che dipende dall'orientamento del suo spin rispetto al momento angolare. Fermi non è estraneo neanche a questo sviluppo, accaduto quando non lavorava più nel campo della fisica dei nuclei: alla fine del suo primo lavoro la Mayer infatti scrisse “*Ringrazio Enrico Fermi per l'osservazione 'C'è qualche indicazione di un accoppiamento spin-orbita?' che è stata l'origine di questa comunicazione*” [27].

A causa dell'accoppiamento spin-orbita per alcuni numeri speciali di neutroni o protoni —detti “numeri magici”— i nuclei sono particolarmente stabili, così come accade agli atomi dei gas nobili. In questo caso il completamento degli strati atomici che contengono 2, 10, 18 ... elettroni fa sì che questi atomi siano chimicamente inerti. I numeri di nucleoni che hanno carattere “magico” sono: 2, 8, 20, 28, 50, 82 e 126. L'idea era affascinante e prima dei lavori di Mayer e Jensen era stata considerata da diversi autori, ma aveva sempre incontrato —e per molti anni continuò a incontrare— molte resistenze perché, come dice Segrè [28], appena formulata “... *incontriamo una seria difficoltà di principio: nel nucleo non esiste un punto centrale che —come il nucleo per gli elettroni atomici— produca un potenziale nel quale si muovono i singoli nucleoni. Si può tuttavia fare l'ipotesi che tutti i nucleoni globalmente producano una buca di potenziale nella qua-*

*le si muovono i singoli nucleoni. [...] Anche senza entrare in questo complicatissimo argomento, dobbiamo mettere in luce una grave difficoltà del modello a strati. Come può un nucleone muoversi nella materia nucleare su un'orbita [del modello a strati]? Il libero cammino medio di un nucleone sembra essere breve rispetto alla distanza che deve percorrere perché si possa parlare della sua 'orbita'. Una risposta parziale a questa difficoltà è data dal fatto che all'interno di un nucleo le collisioni sono inibite dal principio di Pauli: gli stati finali che i nucleoni collidenti dovrebbero raggiungere sono già occupati."*

**2'3. Il modello collettivo.** – Sia storicamente che nella descrizione fattane da Segrè, il modello a strati del nucleo atomico è stato il punto di partenza dello sviluppo di tutti i modelli collettivi inventati negli anni cinquanta e completati negli anni sessanta. Per introdurli, Segrè scrive: *“Il modello a strati incontra molti successi nella descrizione dei nuclei fatti di uno strato chiuso (cioè completo di tutti i suoi nucleoni) a cui è aggiunto soltanto uno o pochi altri nucleoni. Nella configurazione di strato completamente occupato il nucleo è sferico; l'aggiunta di uno o più nucleoni produce soltanto piccole deformazioni. Tuttavia a mezza strada tra due strati la situazione è diversa: i nuclei si allontanano apprezzabilmente dalla forma sferica e divengono importanti i moti collettivi che coinvolgono molti nucleoni.”*

Un passo essenziale fu compiuto nel 1950 alla Columbia University da James Rainwater che introdusse esplicitamente l'ipotesi che il nucleone aggiunto a uno strato completo potesse deformare il resto del nucleo (supposto perfettamente sferico nel modello a strati) rendendolo ellissoidale [29]. A quell'epoca si trovava alla Columbia Aage Bohr, il figlio di Niels Bohr, il quale era anche presente. A seguito di molte e approfondite discussioni, nel 1950 il giovane Bohr pubblicò un lavoro che iniziava con un'analogia interessante: il moto dei nucleoni in un nucleo deformato era confrontato con il moto degli elettroni in una molecola non sferica che ruota e vibra [30]. Siccome le frequenze di rotazione e vibrazione sono molto minori delle frequenze del moto degli elettroni, il moto della molecola influenza soltanto adiabaticamente il moto degli elettroni. Analogamente, i moti collettivi che deformano il nocciolo nucleare coinvolgono una massa molto grande e sono quindi lenti rispetto al moto di ogni singolo nucleone.

Aage Bohr e Mottelson riuscirono così a calcolare sia le energie dei moti rotazionali e vibrazionali di molti nuclei, i cui livelli energetici erano rimasti sino ad allora inspiegati, che le deformazioni determinate in sempre più raffinati esperimenti nei quali furono misurati per un gran numero di nuclei i momenti magnetici ed elettrici [31]. Bohr, Mottelson e Rainwater ricevettero il premio Nobel nel 1975.

Nel 1964 Segrè concluse il capitolo dedicato ai modelli nucleari commentando la fig. 3, che non è altro che una carta dei nuclidi nella quale le righe orizzontali e verticali rappresentano i numeri magici [32]. Le aree in nero comprendono i nuclidi i cui livelli energetici possono essere spiegati con il modello rotazionale dei nuclei; le altre regioni nelle quali si possono trovare tali nuclei sono racchiuse dalle righe tratteggiate.

Segrè conclude il capitolo dedicato ai modelli nucleari con queste frasi [33]: *“Lo studio del modello a strati dei nuclei introduce nella fisica nucleare molti concetti che sono familiari in fisica atomica. Analogamente il modello collettivo ha portato in fisica*

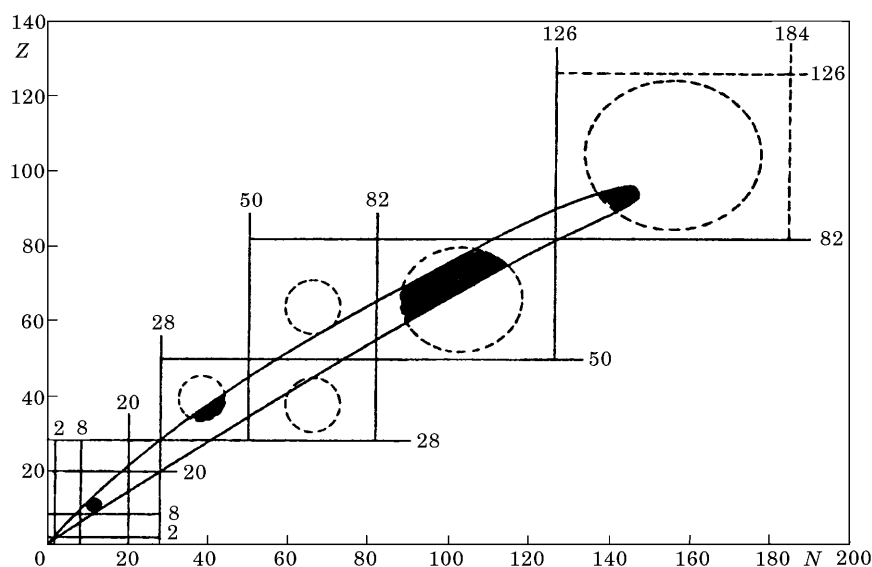


Figura 3. – Nel grafico dei nuclidi sui due assi sono riportati il numero di neutroni  $N$  e il numero di protoni  $Z$  (tali che  $N + Z = A$ ) e le linee orizzontali e verticali rappresentano i numeri magici. I nuclei che hanno vita media maggiore di un minuto sono all'interno della curva a forma di sigaro. Negli anni sessanta il modello collettivo spiegava le proprietà dei nuclei che cadono nelle aree nere.

*nucleare molte idee usuali in fisica molecolare; inoltre idee prese in prestito dalla teoria della superconduttività in stato solido hanno trovato applicazione ai modelli dei nuclei. Persino la stereochimica ha ispirato un modello semplice e interessante, per quanto di limitata applicabilità. È questo il modello a particelle alfa, che è applicabile ai nuclei leggeri con lo stesso numero di protoni e neutroni quando questo numero è multiplo di 4. Evidentemente questi nuclei ( $^8\text{Be}$ ,  $^{12}\text{C}$ ,  $^{16}\text{O}$ , etc.) possono essere pensati come composti di particelle alfa. Il fatto interessante è che un'idea così semplice può essere utilizzata per predire con successo diverse proprietà di questi nuclei. Non possiamo dilungarci su questi argomenti, che si sviluppano rapidamente, ma va sottolineato che ancora una volta essi dimostrano le relazioni formali che esistono tra rami della fisica apparentemente molto lontani.*

**2.4. Reazioni nucleari.** – Le reazioni nucleari sono discusse da Segrè nel capitolo 11, che tratta nell'ordine il modello del nucleo composto, il modello ottico, il modello a gas di Fermi e la teoria statistica. Accenniamo soltanto ad alcuni di questi sviluppi in modo da dare un'idea di ciò che si sapeva in fisica dei nuclei negli anni sessanta.

Nel modello ottico si applicano alle reazioni nucleari le idee che sono alla base del modello a strati. La particella incidente penetra in una buca di potenziale simile a quella usata in questo modello e vi viene assorbita; formalmente questo assorbimento è descritto aggiungendo alla buca di potenziale del modello a strati una componente im-



maginaria. Risolvendo l'equazione di Schrödinger —cioè l'equazione fondamentale della teoria quantistica utilizzata anche in fisica atomica— a partire da questo potenziale si possono calcolare le sezioni d'urto di diffusione e di assorbimento in funzione dei parametri del potenziale ottico, e in particolare del raggio del nucleo e dello spessore della sua superficie. Naturalmente si descrivono così soltanto le proprietà medie delle reazioni nucleari valide quando le risonanze sono numerose e sovrapposte e la grandezza che conta è la densità media dei livelli energetici del nucleo eccitato.

Allorché si vuole calcolare direttamente tale densità media, come prima approssimazione risulta molto utile il modello del gas di Fermi, nel quale protoni e neutroni occupano due buche di potenziale sovrapposte nello spazio ma indipendenti, dato che i protoni sono soggetti alla reciproca repulsione coulombiana. Nello stato fondamentale del nucleo, gli  $Z$  protoni e gli  $N$  neutroni occupano nelle rispettive buche gli strati più bassi; poiché obbediscono al principio di esclusione, essi si comportano come un gas di Fermi degenere a temperatura zero. Quando il nucleo viene eccitato, il gas si riscalda ed è possibile mettere in relazione quantitativamente l'energia di eccitazione con una "temperatura" del gas di nucleoni. È anche possibile definire l'entropia del nucleo, che è determinata dalla densità dei livelli. Scrive Segrè [34]: *"L'approccio termodinamico può essere esteso considerando l'emissione di neutroni e di altre particelle dal nucleo composto come un processo di evaporazione. I neutroni evaporati hanno una distribuzione d'energia corrispondente alla distribuzione maxwelliana alla temperatura del nucleo residuo. Questo è stato provato sperimentalmente, per lo meno in maniera qualitativa. [...] Se l'energia di eccitazione iniziale del nucleo composto è sufficiente, l'evaporazione di una particella lascia abbastanza energia nel nucleo residuo da permettere l'evaporazione di una seconda particella, e così via."* È questo un ulteriore esempio di un modello che si applica in modi simili a campi diversi della fisica.

**2.5. Fisica subnucleare.** — Gli ultimi tre capitoli del "Segrè" sono dedicati alla fisica subnucleare e in un centinaio di pagine trattano dei muoni, dei pioni e delle particelle strane. All'epoca queste particelle, scoperte nei raggi cosmici, erano da poco più di un decennio oggetto di ricerche sperimentali in quanto gli acceleratori di particelle avevano raggiunto energie e intensità sufficienti a produrle copiosamente, e le camere a bolle erano i rivelatori ideali per studiarne le reazioni di produzione e decadimento.

Come scrive Segrè [35], a metà degli anni sessanta si sapeva che *"in ordine di massa crescente [esistono] quattro famiglie di particelle: la prima contiene soltanto il 'fotone' un bosone di spin 1. La seconda famiglia, la famiglia dei 'leptoni', contiene fermioni di spin  $1/2$  più leggeri del protone [e cioè elettroni e muoni]. La famiglia dei 'mesoni', la terza, comprende bosoni di spin 0 che sono più pesanti dei leptoni ma più leggeri dei protoni [in particolare il pione di Yukawa]. Infine la quarta famiglia, famiglia dei 'barioni' comprende il protone e i fermioni più pesanti. [...] La scoperta e la classificazione di queste particelle è una delle conquiste più importanti della decade 1950-1960."*

Nel descrivere queste particelle e le loro interazioni Segrè utilizza le simmetrie introdotte da Murray Gell-Mann e altri per inquadrare in un unico schema i mesoni e i barioni, simmetrie che erano state brillantemente confermate con la scoperta del *barione omega*

fatta proprio nel 1964, l'anno della stampa del "Segrè", presso il laboratorio nazionale di Brookhaven (Long Island).

Questi argomenti ci porterebbero fuori tema; basti qui sottolineare che, con la proliferazione del numero di particelle subnucleari note, verso la fine degli anni cinquanta la fisica delle particelle si era staccata dal robusto tronco della fisica dei nuclei per costituire un campo di ricerche a sé stante, il cui successo era strettamente legato all'aumento dell'energia degli acceleratori e alla crescente sofisticazione dei rivelatori.

### 3. – Punti focali della ricerca di oggi

**3'1.** *La fisica dei nuclei al Congresso di fisica nucleare di Parigi del 1998.* – Con un altro salto di trentaquattro anni, partendo dalla data di pubblicazione del "Segrè" e della scoperta del barione omega, portiamoci al Congresso mondiale di fisica nucleare tenutosi a Parigi nel 1998; esso fa parte della serie triennale "International Nuclear Physics Conferences" ed è noto con la sigla INPC98. L'elenco delle sessioni parallele dà un'immagine precisa degli argomenti che sono importanti per la fisica dei nuclei all'inizio del ventunesimo secolo [36]:

1. *Quarks and hadrons.*
2. *Deep inelastic scattering.*
3. *QCD at finite temperature and the quark-gluon plasma.*
4. *Nuclear structure.*
5. *Nuclear reaction dynamics at intermediate and high energy.*
6. *Nuclear reaction dynamics at low energy and fission.*
7. *Astrophysics.*
8. *Fundamental interactions.*
9. *Neutrinos.*
10. *New facilities.*
11. *Medical applications.*

Nelle prime tre sessioni furono trattati argomenti che negli anni sessanta non erano neanche immaginabili. Il più importante riguarda la *struttura a quark* di tutti gli "adroni" e cioè delle centinaia di mesoni (pioni, kaoni etc.) e barioni (neutroni, protoni, particelle  $\Lambda$  e  $\Omega$ , etc.) oggi noti. I primi sono stati legati di un quark e un antiquark, mentre i secondi sono fatti di tre quark.

Per esempio, un protone è fatto da due quark u di carica elettrica  $2/3$  e da un quark d, che ha carica  $-1/3$ , mentre un neutrone ha composizione (udd). Le centinaia di adroni creati presso i grandi acceleratori nelle collisioni di particelle sono costituiti da sei tipi di quark e di antiquark, tre di carica  $2/3$  (i quark u, c e t) e tre di carica  $-1/3$  (i quark d, s e b).

**3.2. Cromodinamica Quantistica e struttura dei nuclei.** – La Cromodinamica Quantistica (in inglese *Quantum Chromo-Dynamics* = QCD) è una teoria della “forza forte” che si esercita tra le particelle-materia che chiamiamo “quark” interpretata come effetto dello scambio di particelle-forza virtuali dette “gluoni”. Si tratta di una teoria dei campi completamente definita nella quale i campi fondamentali (quarkonici e gluonici) interagiscono fortemente, di modo che non è in generale possibile effettuare calcoli perturbativi simili a quelli che sono utilizzati in Elettrodinamica Quantistica (QED) e che rendono questa teoria estremamente predittiva. Ad esempio le masse dei bosoni e dei barioni sono in principio calcolabili, ma non si possono ottenere come somma di una serie di termini l’uno più piccolo del precedente. Occorre invece ricorrere a metodi di calcolo non perturbativi, in particolare a calcoli numerici su un reticolo artificiale di punti, che oggi danno risposte piuttosto soddisfacenti quando si tratta di calcolare le masse dei bosoni e dei barioni più leggeri.

Tornando alla fisica nucleare, sarebbe certamente illuminante poter ricavare le proprietà dei nuclei a partire dalla QCD, ma questo *goal* è lontano per due motivi.

Innanzitutto non è possibile ancora calcolare, a partire dalla QCD che descrive completamente la forza forte che agisce tra i quark, la forza nucleare che si esercita tra due nucleoni. Che il problema sia difficile lo si capisce osservando che tale forza, complessivamente attrattiva, è dovuta al fatto che i gluoni —presenti sempre in gran numero perché continuamente emessi e assorbiti dai tre quark di ciascun nucleone— costituiscono una sorta di “colla nucleare” che, per così dire, tracima al di fuori di ciascun nucleone e agisce anche sui quark dei nucleoni vicini. La forza nucleare tra due nucleoni è quindi effetto secondario della forza forte mediata dallo scambio di gluoni tra i quark.

Inoltre, poiché ogni coppia di nucleoni che interagisce in un nucleo è immersa in materia nucleare, la forza appena descritta (la forza nucleare “nuda” tra due nucleoni liberi) è modificata dalla presenza degli altri nucleoni. Come è illustrato dalla fig. 4, dovuta a W. Nazarewicz [37], ben *due* sono quindi i ponti che devono essere costruiti per ricavare dalla QCD la forza “effettiva” che si esercita tra due nucleoni facenti parte di un sistema di molti corpi tenuto insieme dallo scambio di gluoni.

Questi ponti non sono stati ancora costruiti e questo rimane un vasto programma di ricerca proiettato nel futuro. Infatti oggi, facendo uso dei più potenti calcolatori disponibili, è soltanto possibile calcolare con precisione le energie di legame e altre proprietà dei nuclei leggeri a partire da espressioni empiriche dell’interazione tra due e tre nucleoni [38].

**3.3. Diffusione inelastica profonda.** – La teoria QCD ha una caratteristica unica: il processo elementare di emissione o assorbimento di una particelle-forza (un gluone) da parte di una particella-materia (un quark) diviene *meno frequente* allorché l’energia e/o l’impulso del gluone *umentano*. Poiché il principio di indeterminazione lega con una legge di proporzionalità inversa tale energia/impulso alle dimensioni della regione di spazio ove l’emissione ha luogo, ciò significa che su piccole distanze un quark —anche legato in un nucleo— di solito non è accompagnato da uno o più gluoni e quindi, essendo “nudo” si comporta praticamente come una particella-materia libera. Per sorprendere

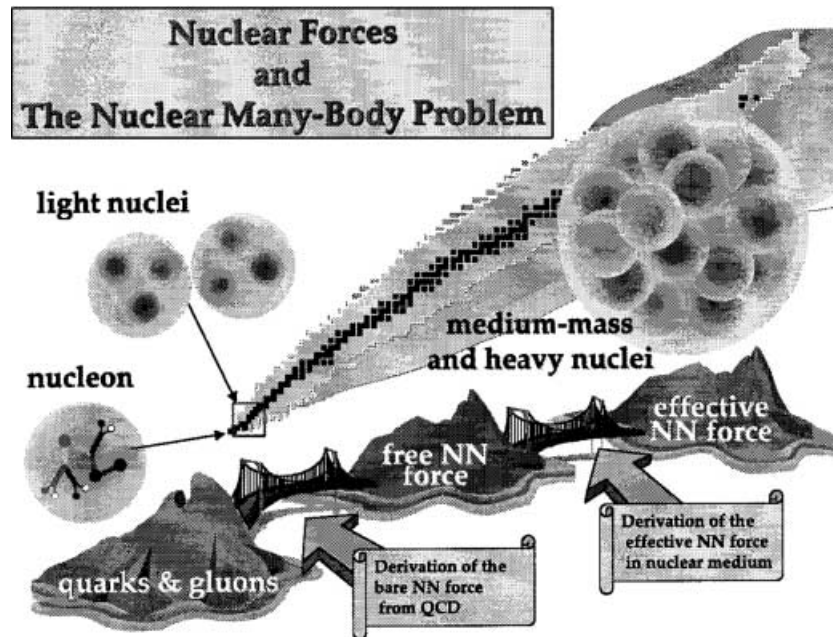


Figura 4. – Per comprendere le forze nucleari che determinano le proprietà dei nuclei a partire dalla QCD, la teoria dei quark e dei gluoni interagenti, occorre costruire due ponti che permettano di ricavare la forza nucleone-nucleone nuda e, successivamente, la forza nucleone-nucleone all'interno di un sistema legato di nucleoni [37].

un quark in questo stato è necessario utilizzare strumenti che abbiano una adeguata risoluzione spaziale, e cioè una risoluzione inferiore ai  $10^{-14}$  cm, corrispondenti a meno di un decimo delle dimensioni di un nucleone.

Nella seconda sessione del Congresso di Parigi, dal titolo “Deep inelastic scattering”, si discusse proprio di questo tema: la diffusione ad alta energia di elettroni ed elettroni pesanti (i muoni) da parte dei nuclei.

Allorché un elettrone, urtando un nucleo, cambia direzione di moto creando altre particelle, le cariche elettriche dell'elettrone veloce e di uno dei quark che si trovano all'interno del nucleo, si scambiano un quanto  $\gamma$ , la particella-forza mediatrice della forza elettromagnetica. Questo scambio avviene in un volume molto più piccolo delle dimensioni di un nucleone quando l'energia è “alta” cioè quando l'energia dell'elettrone è maggiore di una decina di GeV. In questo caso il quanto scambiato può avere una energia/impulso più grande di qualche GeV e può sorprendere il quark non circondato da gluoni. In questo fenomeno moltissime complicazioni svaniscono, ed è possibile fare previsioni quantitative utilizzando approcci perturbativi; come si è visto, ciò non è invece possibile quando si affronta il problema della struttura nucleare perché in un nucleo i gluoni virtuali continuamente scambiati hanno tipicamente energie inferiori alla decina di MeV.

Con la tecnica della *diffusione inelastica profonda* si studiano oggi il moto dei quark all'interno dei nucleoni e dei nuclei e il modo in cui i loro spin si combinano per dare lo spin globale del nucleone. Nonostante la semplicità del modello a quark e la possibilità di descrivere questi fenomeni con la teoria delle perturbazioni, vi sono molti aspetti della struttura a quark dei nucleoni e dei nuclei che non sono ancora oggi capiti. Per questo raffinatissimi esperimenti di diffusione di elettroni e muoni sono in corso al CERN di Ginevra e ai Laboratori SLAC e Jefferson negli Stati Uniti.

**3'4. Il plasma di quark e gluoni.** – La terza sessione del Congresso portava il titolo “QCD at finite temperature and the quark-gluon plasma”. Sperimentalmente questo tema è studiato facendo collidere alle massime energie possibili due nuclei pesanti. Nelle collisioni centrali per un tempo breve l'energia si distribuisce tra centinaia di nucleoni aumentandone l'energia cinetica media. Poiché in un sistema composto di molti corpuscoli energia cinetica media e temperatura sono grandezze proporzionali, questa fisica dei nuclei è anche detta *fisica nucleare delle alte temperature*.

In un nucleo le energie cinetiche medie dei nucleoni sono dell'ordine dei MeV e le temperature in gioco sono considerate “basse” nonostante che 1 MeV corrisponda a una temperatura di ben  $10^{10}$  gradi kelvin. Al centro delle collisioni di due nuclei di piombo che sono state studiate al CERN si raggiungono, per tempi brevissimi e in mancanza di equilibrio termico, temperature dell'ordine dei 200 MeV, che sono più di cento volte maggiori delle temperature dei nuclei ordinari e corrispondono a  $2 \cdot 10^{12}$  kelvin.

A temperature di questo ordine la QCD prevede che i quark, che a basse temperature sono confinati all'interno di ciascun nucleone del nucleo, evaporino dalla loro prigione e si mescolino costituendo una nuova forma di materia, il *plasma nucleare*, così come gli atomi di un gas portato a un milione di gradi si liberano dei loro elettroni e costituiscono un *plasma atomico*. Naturalmente tutti questi quark, non più confinati ma liberi di muoversi, continuano a scambiarsi gluoni cosicché il plasma nucleare è una zuppa omogenea di quark e di gluoni.

La transizione di fase che porta al plasma di quark e gluoni è spesso detta di “deconfinamento” e rappresenta la più interessante frontiera della fisica nucleare delle alte temperature. Tale transizione viene di solito analizzata descrivendo i fenomeni in un diagramma di fase come quello della fig. 5, i cui due assi rappresentano la densità della materia nucleare e la sua temperatura.

Quando la densità è quella di un nucleo ordinario (il valore 1 sull'asse delle ascisse della figura) e la temperatura è inferiore a una decina di MeV, si ha a che fare con un liquido nucleare al quale si può applicare il modello a goccia. Al di fuori di questa zona si ha un gas di nucleoni, che diviene sempre più caldo quando ci si sposta verso l'alto allontanandosi dall'asse delle ascisse. L'area a mezzaluna della fig. 5 è la zona nella quale la teoria della QCD prevede il deconfinamento, la cui temperatura critica a bassa densità è indicata con il simbolo  $T_c$ . Negli ultimi dieci anni all'acceleratore SPS del CERN sono stati condotti molti esperimenti di collisione di nuclei di piombo a energie di molte centinaia di GeV con bersagli fissi e la freccia marcata “SPS” qualitativamente mostra l'area dello spazio delle fasi che è stata esplorata. Nel 2000 vari fenomeni osservati hanno

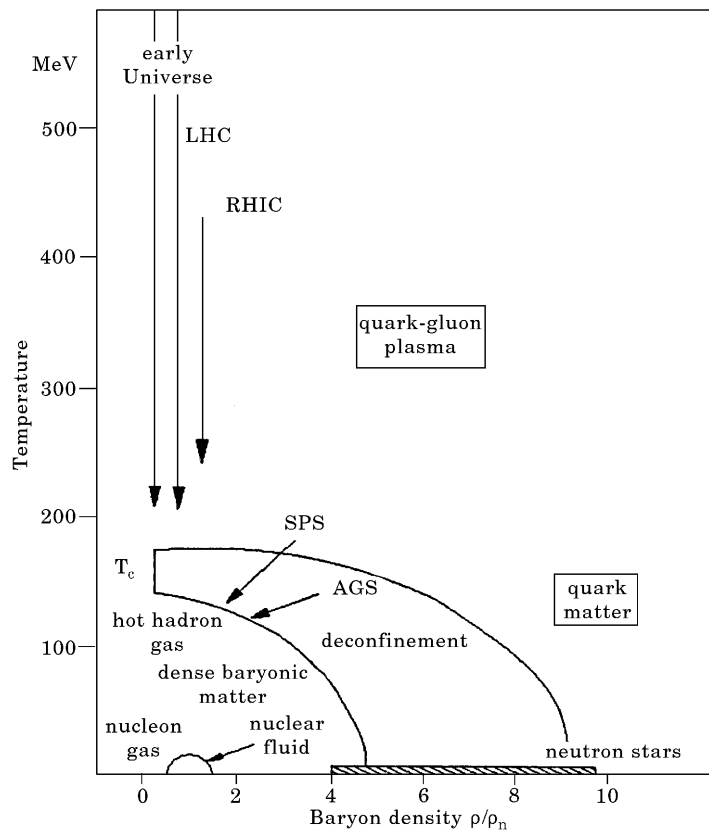


Figura 5. – La transizione di fase (“deconfinement”) è prevista aver luogo nell’area a mezzaluna di questo grafico il cui asse delle ascisse rappresenta la densità normalizzata alla densità dei nuclei e il cui asse delle ordinate rappresenta la temperatura del sistema misurata in MeV ( $100 \text{ MeV} = 10^{12} \text{ kelvin}$ ). In questo contesto “baryon density” è sinonimo di densità nucleare. Le stelle di neutroni sono fredde e hanno una densità compresa tra 4 e 10 volte la densità dei nuclei. La figura è tratta da ref. [39].

permesso di concludere che al CERN è stata prodotta una nuova forma di materia, molto presumibilmente il tanto cercato plasma di quark e gluoni.

Alla fine del 2000 sono entrati in funzione al Brookhaven National Laboratory negli Stati Uniti due anelli di accumulazione interlacciati (detti RHIC) nei quali circolano in verso opposto fasci di nuclei di oro. La freccia della fig. 5 indicata “RHIC” mostra la zona di spazio delle fasi che sarà esplorata presso questo nuovo acceleratore nelle collisioni oro-oro; date le energie molto più alte, sarà così possibile confermare e studiare in dettaglio la transizione di fase prevista dalla QCD e osservata allo SPS del CERN.

Queste ricerche rivestono un grande interesse per l’astrofisica, perché un miliardesimo di secondo dopo il Big Bang l’Universo era una zuppa di quark e gluoni in quanto le ener-

gie cinetiche medie dei corpuscoli erano dell'ordine di 1 GeV (1000 MeV). Espandendosi e raffreddandosi il nostro Universo ha percorso il cammino che nella figura è indicato con la dicitura "early Universe". È quindi importante sapere se il passaggio dal plasma al gas di nucleoni è avvenuto alla temperatura  $T_c = 150$  MeV, che corrisponde a un tempo di circa 20 millisecondi dopo il Big Bang. Come risulta dalla freccia indicata nella figura con "LHC", l'esperimento ALICE —che a partire dal 2006 studierà le collisioni piombo-piombo al nuovo acceleratore Large Hadron Collider del CERN— simulerà al meglio la transizione di fase accaduta all'inizio della storia del nostro Universo.

**3'5. Struttura nucleare e astrofisica.** – Vi è un altro tema della fisica dei nuclei che è di grande interesse anche per l'astrofisica: la formazione dei nuclidi più pesanti del ferro. Infatti, le reazioni di fusione nucleare che avvengono all'interno delle stelle pesanti che bruciano lentamente portano alla produzione dei soli nuclei leggeri e intermedi e si interrompono quando la stella è fatta di gusci concentrici di idrogeno, elio, carbonio, neon, ossigeno, silicio e ferro. Il nocciolo centrale di ferro è lo stadio finale di questa fase dell'evoluzione stellare perché il ferro è l'atomo per il quale l'energia di legame per nucleone è massima, cosicché la sintesi degli elementi più pesanti non rilascia energia ma ne richiede.

Se la massa della stella è più di una volta e mezzo la massa del Sole, il nocciolo collassa dando luogo a una "supernova" che esplosione nello spazio interstellare non soltanto la materia di cui la stella era fatta, ma anche nuovi nuclei prodotti nel corso dell'esplosione. Con i potenti calcolatori oggi a disposizione è possibile eseguire simulazioni dettagliate dei fenomeni che avvengono nei pochi secondi di un tale cataclisma, ma i fenomeni in gioco e i dati nucleari necessari per descriverli non sono sufficientemente noti. Di questo si discute nel corso della settima sessione del Congresso di Parigi.

Uno dei problemi maggiori riguarda la conoscenza delle catene di reazioni nucleari prodotte, dopo il primo collasso del nocciolo stellare, dall'enorme flusso di neutrini che esso genera e che attraversa il materiale precedentemente proiettato nello spazio interstellare. Negli strati caldissimi che evaporano dal nocciolo, che collassa fino a formare una stella di neutroni, i neutrini causano processi di sintesi di nuclei pesanti attraverso quello che è stato chiamato il *processo rapido* (in inglese *r-process*).

In questo processo, a partire da nuclei di massa intermedia ( $A < 100$ ), data l'alta densità di neutroni vengono sintetizzati nuclei pesanti che hanno  $A \sim 200$ . I nuclei con molti neutroni decadono poi in nuclei stabili o quasi attraverso catene di decadimenti beta con emissione di elettroni. Nell'usuale rappresentazione della fig. 6, questi nuclei ricchi in neutroni si trovano tra la zona grigia, nella quale si trovano i nuclei noti, e la linea spezzata indicata come "*dripline* neutronica". In questa zona, che appare bianca nella figura, si trovano circa 6000 nuclei di cui per il momento si sanno calcolare soltanto alcune proprietà medie. Per giungere a una comprensione quantitativa dell'abbondanza dei nuclei pesanti nell'Universo occorrerebbe invece poter utilizzare misure sperimentali delle loro proprietà e reazioni.

Negli ultimi anni sono state sviluppate nuove tecniche proprio per produrre nuclei ricchi di neutroni da far collidere con nuclei ordinari e studiare questa fenomenologia.

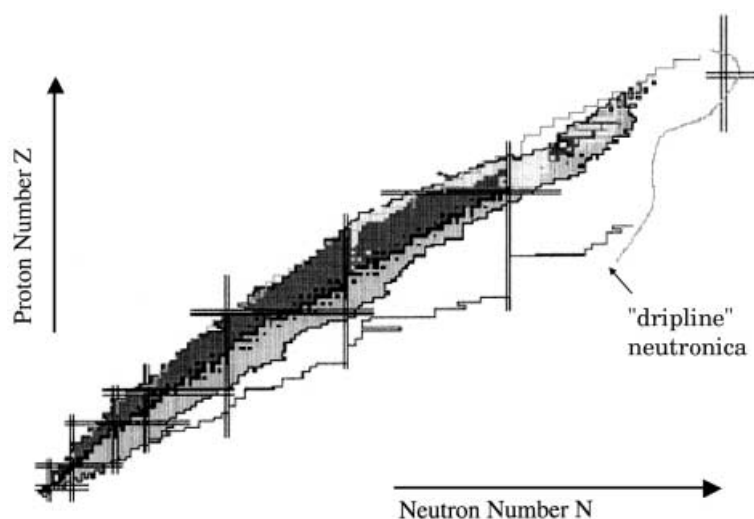


Figura 6. – I quadratini neri rappresentano i nuclei stabili e le croci indicano i numeri magici. Nell'area grigia si trovano i nuclei instabili oggi noti. I nuclei ricchi di neutroni, che intervengono nel processo rapido e possono essere studiati con fasci di nuclei radioattivi, si trovano tra l'area grigia e la linea spezzata detta "dripline" neutronica, al di sotto della quale i nuclei non sono energeticamente legati.

Poiché i nuclei con molti più neutroni dell'ordinario sono instabili, si parla oggi di esperimenti con *nuclei radioattivi*. Fasci intensi di nuclei radioattivi sono ottenuti in due modi molto diversi. Nella tecnica *in volo* i nuclei radioattivi sono prodotti in un bersaglio sottile con la frammentazione di fasci di nuclei pesanti stabili, che contengono naturalmente molti più neutroni che protoni. Alternativamente, nella tecnica "*ISOL*" (*Isotope Separation On Line*) un fascio di protoni —per esempio— produce in un bersaglio spesso isotopi radioattivi a vita media breve. Questi nuclei esotici catturano elettroni e diffondono nel bersaglio come un gas; estratti, sono poi portati all'energia voluta con un altro acceleratore.

All'inizio del ventunesimo secolo la sperimentazione con fasci di ioni radioattivi è oramai praticata nei maggiori laboratori del mondo; con essi sarà possibile esplorare una larga parte del piano  $N$ - $Z$  della fig. 6, restato finora inaccessibile alla sperimentazione in fisica nucleare.

#### 4. – Conclusione

Sono trascorsi settant'anni dalla prima osservazione della radiazione penetrante emessa da alcuni nuclei leggeri, compiuta nel 1930 da W. Bothe e H. Becker. Nonostante le iniziali aspettative, il problema del calcolo delle proprietà dei nuclei a partire dalla conoscenza delle forze nucleone-nucleone non è stato ancora risolto, perché tali forze so-



no conseguenze indirette della più fondamentale forza forte, che agisce tra i quark che costituiscono i nucleoni e non può essere descritta in modo perturbativo.

Pur in mancanza di una soluzione generale del problema di base, sono stati sviluppati modelli molto raffinati dei nuclei e delle reazioni che tra di essi avvengono. Si possono così spiegare quantitativamente l'esistenza dei numeri magici, la struttura a quark dei nuclei, la transizione dallo stato di plasma nucleare allo stato di gas di nucleoni, i moti collettivi dei nuclei e molti altri fenomeni che qui non sono stati descritti. Circa la sintesi dei nuclei degli elementi pesanti avvenuta nell'esplosione delle supernove si hanno modelli piuttosto precisi, ma mancano dati sperimentali; le nuove tecniche di produzione e accelerazione di nuclei radioattivi aprono nuove prospettive perché permettono di penetrare in territori vasti e non ancora esplorati del piano  $N$ - $Z$ .

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1] AMALDI E., *From the Discovery of the Neutron to the Discovery of Nuclear Fission*, *Phys. Rep.*, **111** (1984) 1-332.
- [2] Ref. [1], pag. 6.
- [3] Ref. [1], pag. 9.
- [4] Ref. [1], pag. 39.
- [5] Ref. [1], pag. 124.
- [6] FERMI E., *Ric. Sci.*, **5** (1934) 330.
- [7] AMALDI E., D'AGOSTINO O., FERMI E., RASETTI F. e SEGRÈ E., *Proc. R. Soc. London, Ser. A*, **146** (1934) 483, *Comunicazione di Lord Rutherford*, 25 luglio 1934.
- [8] Ref. [1], pag. 136.
- [9] SEGRÈ E., *A Mind Always in Motion* (University of California Press, Berkeley, Los Angeles) 1993, pag. 93.
- [10] Ref. [1], pag. 151.
- [11] CHANDRASEKHAR S., in *Enrico Fermi Collected Papers*, Vol. **II** (Accademia Lincei e University of Chicago Press) 1965, pag. 297.
- [12] PONTECORVO B., *Enrico Fermi* (Edizioni Studio Tesi, Pordenone) 1993, pag. 82.
- [13] FERMI E., AMALDI E., PONTECORVO B., RASETTI F. e SEGRÈ E., *Ric. Sci.*, **5** (1934) 282.
- [14] Ref. [1], pag. 155.
- [15] Ref. [1], pag. 183.
- [16] AMALDI E. e FERMI E., *Phys. Rev.*, **50** (1936) 899.
- [17] BOHR N., *Nature*, **137** (1936) 344.
- [18] BREIT G. e WIGNER E., *Phys. Rev.*, **49** (1936) 519.
- [19] Ref. [1], pag. 190.
- [20] BREIT G., CONDON E. V. e PRESENT R. D., *Phys. Rev.*, **50** (1936) 825.
- [21] YUKAWA H., *Proc. Phys. Math. Soc. Jpn.*, **17** (1935) 48.
- [22] Ref. [1], pag. 262.
- [23] NODDACK I., *Ang. Chem.*, **47** (1934) 653.
- [24] Ref. [1], pag. 277.
- [25] SEGRÈ E., *Nuclei and Particles* (Benjamin W. A., New York, Amsterdam) 1964.
- [26] SEGRÈ E., *Nuclei e Particelle* (Zanichelli, Bologna) 1966.
- [27] GOEPPERT M. MAYER, *Phys. Rev.*, **75** (1949) 1964.
- [28] Ref. [25], pagg. 248 e 251.
- [29] RAINWATER J., *Phys. Rev.*, **79** (1950) 432.

- [30] BOHR A., *Phys. Rev.*, **81** (1951) 134.
- [31] BOHR A. e MOTTELSON B., *Danske Mat.-Fys. Meddv.* **27** (1953) No. 16.
- [32] Ref. [25], pag. 264.
- [33] Ref. [25], pag. 265.
- [34] Ref. [25], pag. 476.
- [35] Ref. [25], pag. 588.
- [36] FROIS B., GOUTTE D. e GUILLEMAUD-MUELLER D. (a cura di), *INPC/98, International Nuclear Physics Conference, Paris, France, Nucl. Phys. A*, **654** (1999) 1.
- [37] NAZAREWICZ W., *Nuclear Structure*, in ref. [36], pag. 195.
- [38] PANDHARIPANDE V. R., *Quantum Monte Carlo Calculations of Light Nuclei*, in ref. [36], pag. 157.
- [39] AMALDI U., *The importance of Particle Accelerators*, in *Proceedings of the European Particle Accelerator Conference EPAC 2000, Vienna, June 2000*, pagg. 3-7.

---

Ugo Amaldi si è inizialmente occupato, presso il Laboratorio di Fisica dell'Istituto Superiore di Sanità, di fisica nucleare e di fisica delle radiazioni e, a partire dagli anni '70, ha lavorato presso il CERN di Ginevra come dirigente di ricerca a molti esperimenti di fisica delle particelle. Tra l'altro per quindici anni è stato responsabile della Collaborazione DELPHI, che ha costruito e gestito l'omonimo grande rivelatore che ha raccolto dati dal 1989 al 2000 al collisore di elettroni e positroni detto LEP.

Amaldi ha al suo attivo più di 300 lavori scientifici e ha pubblicato, prima con Edoardo Amaldi e poi da solo, una ventina di volumi di fisica per le scuole medie superiori. Egli è *Doctor honoris causa* delle Università di Helsinki, Lione, Uppsala e Valencia. Attualmente, come presidente della Fondazione TERA, opera per l'introduzione in Italia e in Europa delle tecniche di radioterapia dei tumori profondi e radioresistenti dette di "adroterapia".

---