

ALMA MATER STUDIORUM- UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Fissione Nucleare

Tesi di Laurea Triennale in Fisica

Relatore: Prof. Paolo Finelli

Presentata da: Eriona Zahari

II Sessione

Anno Accademica 2013-2014

Indice

INTRODUZIONE.....	4
I. LA FISICA NUCLEARE	11
1.1 LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ E SUE CONSEGUENZE	11
1.2 LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO	14
1.3 DECADIMENTO RADIOATTIVO.....	17
1.4 DECADIMENTO ALFA.....	18
1.5 DECADIMENTO BETA.....	19
1.6 I RAGGI GAMMA.....	20
1.7 FISSIONE SPONTANEA.....	20
II. NEUTRONE, ENERGIA DI LEGAME.....	22
2.1 LA SCOPERTA DEL NEUTRONE.....	22
2.2 DIFETTO DI MASSA.....	23
2.3 ENERGIA DI LEGAME.....	24
III. STORIA E MECANISMO DELLA FISSIONE NUCLEARE	26
3.1 LA SCOPERTA DELLA FISSIONE.....	26
3.2 IL MECCANISMO DELLA FISSIONE NUCLEARE.....	29
3.3 L'ENERGIA DA FISSIONE.....	32
3.4 ESPERIMENTI DI FERMI DEL 1934 E L'IMPORTANZA DEI NEUTRONI LENTI.....	34
3.5 URANIO.....	36
IV. APPLICAZIONI E PROGETTI MILITARI, MEDICHE DELLA FISSIONE NUCLEARE	37
4.1 IL PROGETTO MANHATTAN	37
4.2 LA PILA DI FERMI.....	42
4.3 FISICI ALL'OPERA: LOS ALAMOS.....	44
4.4 ALTRE APPLICAZIONI DELLA FISSIONE NUCLEARE	48
4.5 FAT MAN	49
4.6 APPLICAZIONI MEDICHE	49
V. LE SPIEGAZIONI TEORICHE DI BOHR-WHEELER E MEITNER E FRISCH DELLA FISSIONE NUCLEARE	51
5.1 LA TEORIA DI BOHR-WHEELER	51
5.2 LA SPIEGAZIONE TEORICA DEL PROCESSO DI FISSIONE(MEITNER E FRISCH).....	53
5.3 LA TRATTAZIONE MATEMATICA DELLA FISSIONE SECONDO LA TEORIA DI BOHR-WHEELER	56

VI. REATTORE NUCLEARE.....	61
6.1 COS'È IL REATTORE NUCLEARE (A FISSIONE)?.....	61
6.2 REATTORE: PROBLEMI DI SICUREZZA	62
VII. VANTAGGI E SVANTAGGI DEL NUCLEARE	64
7.1 VANTAGGI DEL NUCLEARE.....	64
7.2 SVANTAGGI DEL NUCLEARE	65
VIII. BIBLIOGRAFIA	67
8.1 BIOGRAFIA LISA MEITNER.....	67
8.2 OTTO FRISCH (1904 - 1979).....	70
CONCLUSIONI.....	72
REFERENZE	74

Introduzione

Scoprire come funziona la natura non è fine a se stesso. A volte ci vogliono anni, decenni o ancora di più per comprendere che una scoperta, che può risultare agli occhi dei più inutile, è in grado di cambiar la vita di molti. Può sembrare di aver buttato via soldi, tempo e intelletto. Ma la ricerca e lo studio pagano sempre.

La qualità della vita è migliorata e migliorerà notevolmente grazie a chi si è impegnato e si impegna nella ricerca. Basti pensare alla corrente elettrica e al riscaldamento nelle nostre case; ai mezzi che ci permettono di spostarci sempre più velocemente in posti sempre più lontani; a modi di comunicare anch'essi più veloci e più fruibili.

Anche la medicina ha fatto passi da gigante, spesso grazie alle applicazioni della fisica, soprattutto nel settore della fisica nucleare.

Oggi sentiamo parlare di PET, di risonanza magnetica; tutti nella nostra vita abbiamo fatto una radiografia, ma pochi conoscono i principi che ci sono dietro queste tecniche mediche.

In questa tesi sarà discusso in modo più accurato l'utilizzo della fissione nucleare e la sua storia.

Il lavoro è suddiviso in otto capitoli: nei primi viene parlato della scoperta della radioattività e decadimento radioattivo, legge del decadimento radioattivo etc.

La scoperta della radioattività viene attribuita a Henry Becquerel e risale al 1896. Fu una scoperta casuale, conseguenza di studi effettuati per comprendere la natura dei raggi X: sembrava erroneamente che tali raggi fossero connessi alla fluorescenza verde del vetro del tubo in cui venivano prodotti raggi catodici. Becquerel volle verificare se le sostanze fluorescenti naturali avevano capacità di emettere raggi dopo l'esposizione alla luce solare. A tale scopo impiegò una sostanza fluorescente costituita da un sale di uranio. Quando la lastra fu sviluppata, mostrò chiaramente l'effetto di radiazioni che non potevano provenire che dall'interno dello stesso involucro, cioè dalla sostanza che vi era stata avvolta. Questa scoperta suggerì a Becquerel di ricercare la causa di queste radiazioni con una serie di altri esperimenti al termine dei quali poté concludere che le radiazioni erano dovute unicamente alla presenza di uranio nella sostanza. Marie Curie con ricerche successive mostrò che altri due elementi possedevano le stesse proprietà di emettere "raggi naturali", il polonio e il radio. L'esame delle radiazioni emesse dagli elementi radioattivi chiarì che

esse erano costituite da tre componenti essenziali: le particelle α e β poco penetranti e una radiazione γ molto più penetrante.

In decadimento alfa, una particella carica positiva, identico al nucleo di elio 4, viene emessa spontaneamente. È stato scoperto e chiamato da Sir Ernest Rutherford nel 1899.

Gli atomi emettono particelle beta attraverso un processo noto come decadimento beta. Il decadimento beta si verifica quando un atomo o ha troppi protoni o troppi neutroni nel nucleo. I raggi gamma sono un tipo di radiazione elettromagnetica, che risulta da una redistribuzione di carica elettrica all'interno di un nucleo.

Un altro tipo di decadimento radioattivo è fissione spontanea. In questo processo di decadimento, il nucleo si dividerà in due frammenti quasi uguali e diversi neutroni liberi.

Nel capitolo 2 parlerò della scoperta del neutrone, energia di legame. La scoperta del neutrone si deve al fisico inglese Chadwick (Nobel 1935), il quale fornì una nuova interpretazione degli esperimenti effettuati da Bothe e Becker (1930) e dai coniugi francesi Joliot-Curie (1932), bombardando bersagli di boro e di berillio con le particelle (nuclei di elio) emesse dal radio. Bothe e Becker e Joliot-Curie pensavano che il bombardamento con particelle determinasse l'emissione di fotoni γ di alta energia da parte dei nuclei di B e Be; invece le prove teorico-sperimentali prodotte da Chadwick, evidenziarono l'esistenza del neutrone nei nuclei atomici.

L'energia di legame rappresenta la minima energia necessaria per separare il nucleo nei nucleoni componenti. L'energia di legame per nucleone caratterizza la stabilità nucleare.

La massa dei nuclei degli elementi calcolata sperimentalmente è sempre inferiore alla somma della massa dei nucleoni costituenti, cioè dei protoni e dei neutroni, presi isolatamente. Questa differenza di massa o difetto di massa, Δm , è proporzionale all'energia ΔE , secondo la relazione di Einstein: $\Delta E = \Delta m \cdot c^2$. Più elevato è il difetto di massa, più elevata è l'energia di legame nucleare e più stabile è il nucleo. L'energia di legame nucleare è l'energia necessaria per rompere il nucleo di un atomo in singoli. Tale energia è responsabile della stabilità del nucleo, la quale dipende dal numero di protoni in relazione al numero di neutroni, se il numero di neutroni differisce di molto dal numero di protoni il nucleo risulta poco stabile.

Nel capitolo 3 si parla della fissione nucleare, la sua storia, il meccanismo e dell'energia della fissione.

Quando la fissione è stata riconosciuta, infine, è stata una sorpresa sensazionale che avrebbe cambiato la storia del suo tempo.

La fissione era nata in un mondo in pace, la sua energia potrebbe prima essere stata utilizzata per fornire luce e calore per le case della gente.

La fissione e il fenomeno della reazione a catena, sono importantissimi dal punto di vista pratico, in quanto è la base del funzionamento delle bombe atomiche (in cui la reazione è incontrollata) e dei reattori nucleari (in cui la reazione è controllata).

La fissione nucleare è una reazione che ha luogo soltanto nei nuclei aventi alto numero atomico (Z), alcuni dei quali esistono in natura, come il torio ($Z=90$), il protoattinio ($Z=91$) e uranio ($Z=92$), mentre altri, i transuranici, non esistono in natura, si producono artificialmente.

Il fenomeno della fissione consiste nel fatto che i nuclei, colpiti da neutroni si spezzano in due altri nuclei più leggeri, aventi numero atomico medio, liberando un certo numero di neutroni (generalmente 2 o 3) e una notevole quantità di energia, dovuta al fatto che la massa totale dei prodotti della fissione è minore di quella del nucleo originario e che la differenza di massa secondo la relazione di Einstein $E=mc^2$. Il fenomeno della fissione fu scoperto nel 1939 dai fisici tedeschi O. Hahn e F. Strassman che, bombardando con neutroni lenti l'uranio naturale, scoprirono fra i prodotti della reazione numerosi radionuclidi aventi numero atomico compreso fra 35 e 57. Questo fenomeno fu interpretato come la rottura del nucleo di uranio in due frammenti all'incirca uguali e ad esso venne dato il nome di fissione. Fu anche scoperto che, dei tre isotopi costituenti l'uranio naturale soltanto il ^{235}U partecipa alla reazione di fissione.

Otto Hahn era uno dei pochissimi amici della Meitner a conoscenza della sua fuga. Sapeva che si era rifugiata in Svezia e lì le spedì una lettera pochi giorni prima del Natale del 1938, per chiederle aiuto. Dopo la sua partenza, Hahn e Strassmann avevano continuato il lavoro cominciato con lei, per riprodurre gli esperimenti di Fermi. Ma i risultati ottenuti erano incredibili: bombardando l'uranio con i neutroni lenti, Hahn e Strassmann avevano ottenuto del bario. Ma come si poteva formare il bario a partire dall'uranio? Nella tavola periodica, il bario dista trentasei posti dall'uranio e in nessuno dei processi di

trasmutazione di sostanze radioattive era mai stato ottenuto un elemento così lontano da quello di partenza. Hahn non era un fisico, ma sapeva che, per la fisica fino ad allora conosciuta, non si poteva formare bario dall'uranio, eppure l'aveva ottenuto. Lise Meitner sapeva che Hahn era un grande radiochimico e se sosteneva di aver trovato del bario, di bario si trattava. Esaminando i risultati degli esperimenti di Hahn e di Strassmann, Lise Meitner e il nipote Otto Frisch, capirono che nel bombardamento dell'uranio succedeva qualcosa di completamente nuovo, il nucleo dell'uranio si spezzava. Riuscirono a trovare il bandolo della matassa grazie al modello a goccia del nucleo atomico elaborato dal grande fisico teorico danese Niels Bohr, secondo il quale il nucleo poteva essere immaginato come una goccia d'acqua, deformabile per effetto di una forza esterna. Quando il neutrone penetrava nel nucleo dell'atomo di uranio, poteva deformare la goccia fino a farla dividere in due goccioline più piccole, il nucleo dell'uranio, perciò, si spezzava in due frammenti, uno dei quali era appunto il bario ottenuto da Hahn e Strassmann. Lise Meitner e Otto Frisch chiamarono quel processo *fissione nucleare*. I due fisici capirono però anche un'altra cosa fondamentale: nella fissione veniva emessa una considerevole quantità di energia. Da dove veniva? Dalla conversione della massa in energia, secondo la formula di Einstein $E = mc^2$, nel processo di fissione, infatti, il nucleo dell'atomo dell'uranio si spezzava in due frammenti tali che la somma delle loro masse era inferiore alla massa del nucleo originale. La fissione nucleare è un particolare processo di disintegrazione durante il quale nuclei pesanti, come quelli dell'uranio o del torio, se opportunamente bombardati con neutroni si dividono in due grossi frammenti, entrambe di carica positiva, che si respingono con violenza allontanandosi con elevata energia cinetica.

Con la fissione si liberano anche almeno due neutroni. Questi neutroni possono a loro volta provocare altre fissioni innescando reazioni a catena.

L'energia cinetica dei frammenti di fissione si trasforma in calore, cioè energia termica, utile per produrre vapore con cui alimentare una turbina e ricavare energia elettrica. La fissione di 1 grammo di uranio produce una quantità di energia pari a quella ottenibile dalla combustione di circa 2800 kg di carbone.

Nei ultimi capitoli si parla delle applicazioni militari e mediche della fissione nucleare, i vantaggi e svantaggi della fissione nucleare e delle spiegazioni teoriche di Bohr-Wheeler e Meitner e Frisch della fissione nucleare.

Il battesimo dell'energia nucleare, il suo peccato originale, fu militare, gli eccidi di Hiroshima e Nagasaki del 1945 (il primo reattore nucleare del 1942, chiamato impropriamente "Pila di Fermi" non era concepito per produrre energia, ma il plutonio per la bomba). Fu nel dicembre 1942, che Enrico Fermi e il suo gruppo al laboratorio metallurgico all'Università di Chicago ottenne una dimostrazione sperimentale di una reazione a catena. Fermi fu il campione dello sforzo americano nella gara segreta per ottenere una reazione a catena con l'uranio. Il suo antagonista fu il fisico tedesco Werner Heisenberg uno dei fondatori della meccanica quantistica e quasi il principale fisico teorico mondiale. La pila di Chicago comprendeva 400 tonnellate di grafite e 22000 "pseudo sfere" di uranio disposte in 57 strati con lamine di cadmio inchiodate su strisce di legno piatte come barre di controllo e sicurezza. Il 2 Dicembre Fermi supervisionò le fasi finali del suo esperimento. Calcolò il numero di neutroni attesi per la fissione quando la barra di controllo era mossa nella pila.

Il successo della pila assicurò a Los Alamos la disponibilità di plutonio, così come di uranio, come potenziale esplosivo nucleare. La direzione del laboratorio di Los Alamos era stata affidata al brillante fisico teorico Robert Oppenheimer. Los Alamos divenne presto il centro principale di tutto il progetto Manhattan e, a causa della massima priorità data alla costruzione delle bombe a fissione, il suo personale scientifico e tecnico crebbe al punto che nella primavera del '45 aveva superato le duemila unità, includendo i migliori fisici teorici e sperimentali di tutto il mondo. Il principale problema tecnico che i fisici di Los Alamos affrontarono inizialmente fu quello di determinare le proprietà di una massa critica di U235 o di plutonio nel brevissimo intervallo di tempo, dell'ordine del microsecondo, intercorrente fra l'inizio della reazione a catena e l'esplosione.

Altre applicazioni della fissione nucleare erano, "Little Boy"-235U lanciata il 06/08/1945 su Hiroshima(75000 morti), "Fat Boy"-239Pt lanciata il 09/08/1945 su Nagasaki(70000 morti).

In sostanza, "Little Boy" consisteva in una pistola che ha sparato una massa di uranio 235 in un altro massa di uranio 235, creando così una massa supercritica. Un requisito fondamentale è che i pezzi si incontrino in un tempo più breve del tempo tra fissioni spontanee.

Il progetto (per il Fat Man) iniziale per la bomba al plutonio si è basato anche sull'utilizzo di un design semplice pistola (nota come "Thin Man") come la bomba all'uranio. Come il plutonio è stato prodotto nei reattori nucleari di Hanford, Washington, si è scoperto che il plutonio non era puro come i campioni iniziali da Radiation Laboratory di Lawrence. Il plutonio conteneva quantità di plutonio 240, un isotopo con un rapido tasso di fissione spontanea.

Ma la fissione nucleare ha trovato utilizzo anche in medicina, come applicazioni diagnostiche più diffuse sono le Radiografie, la Tac, la Scintigrafia e la PET.

Prima di discutere dei vantaggi e svantaggi della fissione nucleare, parliamo della teoria definitiva della fissione nucleare; la teoria di Bohr-wheeler e la teoria di Lisa Meitner e Frisch della fissione nucleare.

Nel 1939 erano stati individuati e studiati abbastanza isotopi perche determinate regolarità divenissero evidenti. Nel costituire il nucleo, i protoni tendono ad accoppiarsi ad altri protoni e i neutroni ad altri neutroni. Di conseguenza, i nuclei con numero dispari di protoni e un numero pari di neutroni, o viceversa, sono meno stabili di quelli con un numero pari di protoni e di neutroni (i nuclei che hanno dispari sia protoni sia neutroni sono anch'essi stabili).

Per determinarla Bohr utilizzò il suo modello di reazione nucleare basato sul nucleo composto. Quando un neutrone colpisce l' ^{235}U , si forma un nucleo di ^{236}U , con numero pari di neutroni e di protoni, esso è quindi più stabile del nucleo di ^{239}U -dispari che si forma quando un neutrone colpisce l' ^{238}U . Il risultato è una barriera più bassa e quindi una energia di attivazione inferiore per l' ^{235}U rispetto all' ^{238}U . Da qui la conclusione fondamentale di Bohr: "L' ^{235}U è soggetto di fissione da neutroni lenti o termici, al contrario dell' ^{238}U ". Ma nell'uranio naturale-quello che si trova nelle miniere, l' ^{235}U è più raro dell' ^{238}U , solo un nucleo su 139 è di ^{235}U . Bohr si rese conto che la fissione osservata da Hahn era provocata dai nuclei di ^{235}U presenti nel suo campione. I nuclei di ^{238}U , presenti in quantità molto superiori erano essenzialmente spettatori del processo di fissione. Nel febbraio 1939 Bohr pubblicò i suoi risultati, insieme a Wheeler [Bohr and Wheeler, 1939].

Nel 1939, Lise Meitner, assieme a suo nipote Otto Robert Frisch [Meitner and Frisch, 1939], pubblicò l'articolo intitolato "Disintegration of Uranium by Neutrons: a New Type of Nuclear Reaction" in cui fornì una spiegazione teorica di questa "rottura" e pose così le fondamenta della "fissione nucleare", un termine concepito dalla stessa Meitner. Questa fissione fu ottenuta, per la prima volta, in laboratorio da Hahn e Fritz Stramann nel 1938, tramite il bombardamento di uranio 239 con neutroni.

L'idea per il termine "fissione nucleare" nacque nel corso di una passeggiata della Meitner con suo nipote, anch'esso noto fisico nucleare. I due frammenti (nuclei atomici) che si formano nel processo di fissione, possiedono insieme una massa minore dell'originario nucleo atomico di uranio. Da questa differenza di massa, Lise Meitner, usando la nota formula di Einstein $E=mc^2$, calcolò l'energia liberata nel processo. Il risultato è stato circa 200 milioni di elettronvolt (eV) ogni nucleo "rotto". Con questo calcolo, aprì la strada teorica per lo sviluppo dell'energia atomica per scopi civili e militari.

Spesso il nucleare viene presentato come un male da combattere o come miracolosa pozione per risollevare l'economia nazionale. Non ci riconosciamo in entrambe le visioni. Il nucleare rappresenta un'opzione energetica come le altre con i suoi "pro" ed i suoi "contro". Proveremo ad elencare i principali vantaggi e svantaggi.

Il nucleare presenta indubbiamente dei vantaggi:

- 1) Una centrale nucleare non emette CO₂
- 2) Vantaggio nella bilancia dei pagamenti
- 3) Maggiore stabilità politica

Vediamo ora quali svantaggi porta l'uso dell'energia nucleare:

- 1) Conseguenze in caso di incidente
- 2) Le scorie nucleari
- 3) Localizzazione delle centrali nucleari e proteste locali
- 4) Il terrorismo

I. La Fisica Nucleare

1.1 La scoperta della radioattività e sue conseguenze

L'anno della scoperta della radioattività (1896) può a buona ragione essere considerato quello della nascita della Fisica Nucleare. Senza dubbio si è trattato, infatti, della prima evidenza sperimentale di un fenomeno nucleare, identificato negli anni seguenti come fosse dovuto al decadimento dei nuclei atomici instabili.



All'inizio del 1896, il fisico francese H. Becquerel (1852–1908; Premio Nobel), venuto a conoscenza degli studi di Rontgen sui raggi X decise di indagare se qualcosa di simile ai raggi X venisse emesso dalle sostanze fluorescenti che, sotto l'azione della luce, si coprono di una soffusa luminosità. Egli scelse per queste ricerche l'uranile (solfato doppio di uranio e potassio), un minerale caratterizzato da un notevole potere fluorescente.

Poiché era convinto che l'illuminazione fosse il fattore responsabile della radiazione emessa da tale cristallo, lo appoggiò su una lastra fotografica, avvolse il tutto in carta nera e lo espose alla luce solare. Dopo qualche ora di esposizione, Becquerel sviluppò la lastra fotografica e questa presentava una macchia scura in corrispondenza della zona sulla quale era stato appoggiato il cristallo di uranile. Ripetendo l'esperimento parecchie volte, la macchia scura ricompariva nella stessa posizione, qualunque fosse lo spessore di carta usata per ricoprire la lastra fotografica.

Per puro caso, durante i soliti esperimenti, Becquerel si accorse che l'annerimento della lastra non aveva nulla a che fare con l'esposizione del cristallo ai raggi solari. Si trattava dunque, di una radiazione penetrante simile ai raggi x, ma emessa spontaneamente, senza che fosse necessaria alcuna eccitazione, presumibilmente dagli atomi dell'uranio contenuti nel cristallo di uranile. Becquerel provò a riscaldare il cristallo, a raffreddarlo, a polverizzarlo, a scioglierlo in acidi, insomma a sottoporlo a tutti i trattamenti possibili, ma l'intensità della misteriosa radiazione restava costante.

Questa nuova proprietà della materia, battezzata col nome di radioattività, non aveva nulla a che vedere col trattamento chimico o fisico cui era sottoposta, ma era una proprietà intrinseca dell'atomo.

Negli anni immediatamente successivi alla scoperta della radioattività, un gran numero di fisici e chimici rivolsero la loro attenzione al nuovo fenomeno.

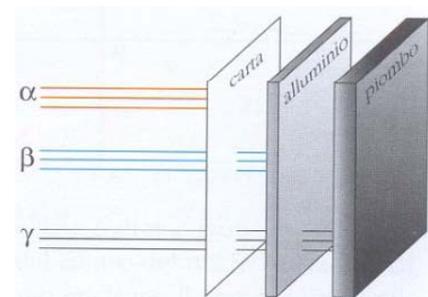
M. S. Curie (1867–1934; Premio Nobel), nata in Polonia e moglie del fisico francese P. Curie (1859–1906; Premio Nobel), sottopose tutti gli elementi chimici allora noti ed i loro composti ad una meticolosa analisi per identificare l'eventuale radioattività e scoprì che il torio emette radiazioni simili a quelle dell'uranio. Confrontando la radioattività di minerali di uranio con quella dell'uranio metallico, notò, inoltre, che i minerali erano cinque volte più radioattivi di quanto ci si sarebbe aspettato per il loro contenuto di uranio; quindi era molto probabile la presenza nei minerali di uranio di qualche altra sostanza molto più radioattiva dello stesso uranio, che riuscì a scoprire e che chiamò polonio, in onore della sua terra natale.



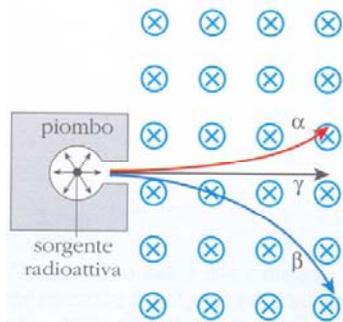
Poco tempo dopo fu isolata un'altra sostanza simile al bario, circa due milioni di volte più radioattiva dell'uranio, cui fu dato il nome di radio. La scoperta del polonio e del radio fu ben presto seguita da quella di molte altre sostanze radioattive, tra le quali l'attinio, stretto parente dell'uranio da fissione, il radiotorio ed il mesotorio.

La ricerca in questo nuovo ramo della fisica progredì rapidamente, orientandosi verso lo studio delle proprietà della radiazione penetrante.

Al Cavendish Laboratori di Cambridge Thomson fece le prime accurate misure sul potere ionizzante delle radiazioni emesse dagli elementi radioattivi e, nel 1899, Rutherford scoprì che un preparato radioattivo può emettere almeno due specie di radiazioni, inizialmente



contraddistinte in base al loro potere penetrante nella materia, la componente poco penetrante fu chiamata radiazione alfa e quella più penetrante radiazione beta.



Qualche tempo dopo, il francese P. U. Villard (1860-1934) evidenziò un terzo tipo di radiazione ancora più penetrante dei raggi beta e molto simile ai raggi X, che egli chiamò radiazione gamma.

In seguito si riconobbe che i raggi α sono nuclei di elio con doppia carica positiva, i raggi β sono elettroni, mentre i raggi γ sono onde elettromagnetiche, cioè fotoni di altissima energia, ancora più elevata di quella dei raggi X.

Subito dopo la scoperta della radioattività, Rutheford ed il suo collaboratore F. Soddy (1877-1956; Premio Nobel), annunciarono che: "il fenomeno della radioattività era il risultato di una trasformazione spontanea di un elemento in un altro". L'emissione di una particella α ha come risultato la formazione di un elemento spostato di due posti a sinistra nel Sistema Periodico ed il cui peso è inferiore di quattro unità a quello dell' elemento di partenza.

L'emissione di una particella β sposta l'elemento di un posto a destra nel Sistema Periodico, mentre ne lascia invariato il peso atomico.

L'emissione di raggi γ è un processo secondario che accompagna l'emissione delle particella α e β . Infatti, in seguito all'emissione di tali particelle il nucleo si porta in uno stato eccitato e, nel ritorno allo stato fondamentale, emette raggi γ .

NATURA DELLE RADIAZIONI			
Radiazione α	Radiazione β^-	Radiazione β^+	Radiazione γ
${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z-2} Y^{A-4} + {}_2 \alpha^4$ ${}_2 \alpha^4 = \text{nuclei di elio}$	${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^{A+} + {}_{-1} \beta^0 + \bar{\nu}$ ${}_{-1} \beta^0 = \text{ELETTRONE}$ $\bar{\nu} = \text{antineutrino}$	${}_Z X^A \rightarrow {}_{Z+1} Y^{A+} + {}_{+1} \beta^0 + \nu$ ${}_{+1} \beta^0 = \text{positrone}$ $\nu = \text{neutrino}$	${}_Z X^A \rightarrow {}_Z X^A + \gamma$ $\gamma = \text{fotone}$

X= nucleo dell'elemento radioattivo; Y= nucleo dell'elemento originario del decadimento;
A= numero di massa = numero totale dei nucleoni; Z= numero atomico ${}_Z^AX$ =nucleo in uno stato eccitato

In base alle leggi della meccanica quantistica il decadimento radioattivo di un nucleo è un processo puramente casuale; da ciò discende che mentre è praticamente impossibile determinare l'istante in cui un particolare nucleo si disintegra, si può invece predire la probabilità che un certo numero di atomi di una data specie si disintegrino in un dato intervallo di tempo.

Pertanto, le radiazioni α , β e γ seguono la seguente legge:

1.2 Legge del decadimento radioattivo

$$N_T = N_0 e^{-\lambda t}$$

N_T = numero di nuclei radioattivi non ancora decaduti presente all'istante t ;

N_0 = numero di nuclei radioattivi presenti all'istante $t = 0$;

λ = costante di decadimento;

L'interpretazione del fenomeno della radioattività come un decadimento spontaneo dei nuclei atomici non lasciava alcun dubbio che i nuclei fossero sistemi meccanici complessi costituiti da molte particelle. Il fatto poi che i pesi atomici degli isotopi di tutti gli elementi fossero ben rappresentati con numeri interi, indicava nei protoni il principale costituente del nucleo. Quando Bohr parlò a Rutherford di questi fatti, essi decisero di comune accordo che il solo modo per salvare la situazione, dal punto di vista quantistico, era di supporre l'esistenza di protoni senza carica, che furono chiamati neutroni.

Verso il 1925 fu organizzato, presso il Laboratorio Cavendish, un intenso programma di ricerca, allo scopo di espellere questi ipotetici neutroni dai nuclei di qualche elemento leggero, per ottenere una conferma diretta della loro esistenza, ma i risultati furono negativi. Il lavoro in quella direzione fu temporaneamente sospeso e la scoperta dei neutroni fu ritardata di un certo numero di anni.

Nel 1930, W. Bothe (1891–1957; Premio Nobel) e H. Becker, osservarono che se le particelle alfa del polonio, dotate di grande energia, incidevano su nuclei di elementi leggeri, specificatamente berillio, boro e litio, era prodotta una radiazione particolarmente penetrante. In un primo momento si ritenne che potesse trattarsi di radiazione gamma, sebbene si mostrasse più penetrante dei raggi gamma allora conosciuti e i dettagli dei risultati sperimentali fossero difficili da interpretare in tali termini.



Finalmente, all'inizio del 1932, il fisico J. Chadwick (1891–1974; Premio Nobel) eseguì una serie di misurazioni che mostrarono come l'ipotesi dei raggi gamma fosse insufficiente a dare conto dei dati osservativi. Egli congetturò che la radiazione penetrante del berillio consistesse in particelle neutre, chiamate appunto neutroni, dotate di massa approssimativamente uguale a quella di protoni, la cui ricerca sperimentale si era rivelata fino ad allora infruttuosa.

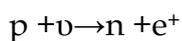
Nel 1914 Chadwick lavorava a Berlino sotto la guida del fisico tedesco Geiger, ed il suo compito era lo studio degli spettri dei raggi beta emessi da varie sostanze radioattive; tali spettri sembravano differire radicalmente dagli spettri dei raggi alfa e gamma e le energie delle particelle beta variavano entro un grande intervallo. Bohr, molto eccitato da questa strana situazione, giunse a suggerire che il principio di conservazione dell'energia non fosse valido per le trasformazioni radioattive β . Pauli, invece, suggerì un'alternativa che avrebbe equilibrato il rendiconto energetico dei processi nucleari. Egli, infatti, prese in considerazione la possibilità che l'emissione di una particella beta fosse sempre accompagnata dall'emissione di un'altra particella instabile, che sfuggiva all'osservazione e che si portava appresso l'energia necessaria all'equilibrio energetico. Se si suppone che queste particelle siano prive di carica elettrica ed abbiano una massa molto minore di quella dell'elettrone, potrebbero effettivamente sfuggire col loro carico d'energia ai più accurati tentativi d'osservazione sperimentale.

Queste particelle, più tardi, furono chiamate neutrini da Fermi per distinguerle dai neutroni, molto più grandi, scoperti da Chadwick.

Dobbiamo dire che queste particelle per molto tempo rimasero realmente inosservabili ed i fisici dovettero accontentarsi di osservare i loro effetti. Soltanto nel 1955 F. Reines

(1918–1998, Premio Nobel) e C. Cowan, dal laboratorio di ricerche di Los Alamos, riuscirono ad organizzare un esperimento per mettere in evidenza il neutrino.

La più intensa sorgente di neutrini esistente è la pila atomica che viene attraversata facilmente da queste particelle senza che vengano arrestati dagli spessori di cemento che schermano le pile. Per rivellarli, Reines e Cowan disposero all'esterno della schermatura un enorme contenitore pieno d'idrogeno ed un gran numero di contatori di particelle di diverso tipo. Un neutrino veloce, urtando un protone crea un elettrone positivo, trasformando il protone in un neutrone secondo il seguente schema:



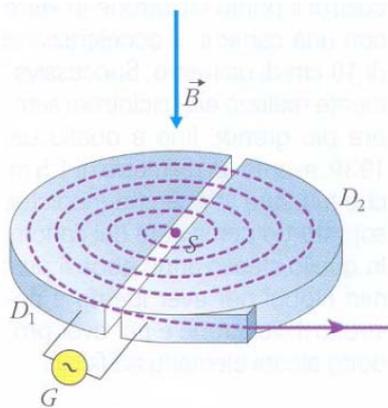
Dal momento in cui si scoprì che il fenomeno della radioattività rappresentava una trasformazione spontanea di un elemento chimico in un altro, Rutherford fu preso dal desiderio di disintegrare il nucleo atomico di qualche elemento stabile per trasformarlo in un altro.

Poiché la barriera di repulsione coulombiana circostante il nucleo atomico diventa sempre più alta mentre ci si sposta lungo il Sistema Periodico, sarebbe stato molto conveniente bombardare i nuclei più leggeri; se poi se fossero usati come proiettili le particelle alfa ad alta energia emesse da elementi radioattivi a rapido decadimento, il compito sarebbe stato ulteriormente facilitato. Le prime osservazioni di Rutherford furono eseguite col metodo della scintillazione, ma ben presto lo studio delle trasformazioni nucleari fu enormemente facilitato dalla brillante invenzione di C.T.R. Wilson (1869-1959; Premio Nobel) la camera a nebbia. Il funzionamento della camera a nebbia è basato sulla ionizzazione prodotta sul percorso di una particella carica in aria, o in qualsiasi altro gas.

Se l'aria, attraverso la quale le particelle passano, è satura di vapor d'acqua, gli ioni prodotti fungono da centri di condensazione per le piccolissime gocce d'acqua e si osservano lunghe e sottili tracce di nebbia lungo le traiettorie delle particelle.

Rutherford chiese ai suoi allievi Walton e Cockroft, di costruire un acceleratore che sfrutta l'applicazione di una alta differenza di potenziale usando un grosso elettrodo terminale e distribuendo il potenziale lungo la colonna di accelerazione.

La ricerca pionieristica di Walton e Cockroft diede inizio alla costruzione e al perfezionamento di un numero sempre crescente di acceleratori di particelle, basati sui più vari ed ingegnosi principi.



Uno di questi, il ciclotrone ideato da E.O. Lawrence(1901-1958;Premio Nobel), fu il più geniale. Esso era in grado di accelerare protoni fino a qualche MeV. Nel ciclotrone si ha una zona di campo magnetico costante nella quale i protoni (o ioni) percorrono traiettorie circolari

1.3 Decadimento radioattivo

La radioattività è la disintegrazione spontanea di nuclei atomici. Questo fenomeno è stato segnalato nel 1896 dal fisico francese Henri Becquerel. Marie Curie e suo marito Pierre Curie contribuirono ulteriormente alla comprensione della radioattività. La loro ricerca ha portato alla scoperta di due nuovi elementi radioattivi, il polonio e il radio, e gli scienziati costretti a cambiare le loro idee sulla struttura dell'atomo.

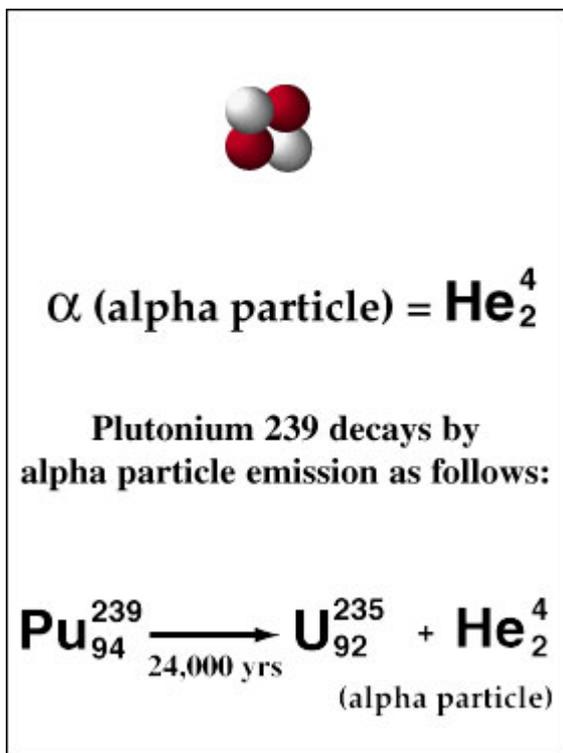
La radioattività è il risultato di un atomo cercando di raggiungere una configurazione nucleare più stabile. Il processo di decadimento radioattivo, può essere raggiunto attraverso tre metodi primari; un nucleo cambia uno dei suoi neutroni in un protone con l'emissione simultanea di un elettrone (decadimento beta), emettendo un nucleo di elio (decadimento alfa), oppure spontanea fissione (scissione) in due frammenti. Spesso associata a questi eventi è il rilascio di fotoni ad alta energia o raggi gamma. Ci sono altri metodi di decadimento radioattivo, ma sono più esotici in natura.

Ogni sostanza radioattiva individuò ha un periodo di decadimento caratteristica o emivita. Un emivita è l'intervallo di tempo necessario per una metà dei nuclei atomici di un campione radioattivo a decadere. L'isotopo radioattivo cobalto 60, che viene utilizzato nella terapia del cancro radiazioni, ha, ad esempio, un tempo di dimezzamento di 5,26 anni. Così, dopo tale intervallo, un campione in origine contenente 16 grammi di cobalto 60 conterrebbe soltanto 8 grammi di cobalto 60 e emetterebbe solo la metà delle radiazioni. Dopo un altro intervallo di 5,26 anni, il campione dovrebbe contenere solo 4 grammi di cobalto 60. Emivita può variare da migliaia di anni per millisecondi

Talvolta dopo aver subito decadimento radioattivo, il nuovo atomo ancora è lasciato in una forma radioattiva. Ciò significa che l'atomo decadrà nuovamente nel tentativo di raggiungere uno stato stabile nucleare.

1.4 Decadimento alfa

In decadimento alfa, una particella carica positiva, identico al nucleo di elio 4, viene emessa spontaneamente. Questa particella, noto anche come una particella alfa, costituita da due protoni e due neutroni. E 'stata scoperta e chiamata da Sir Ernest Rutherford nel 1899.



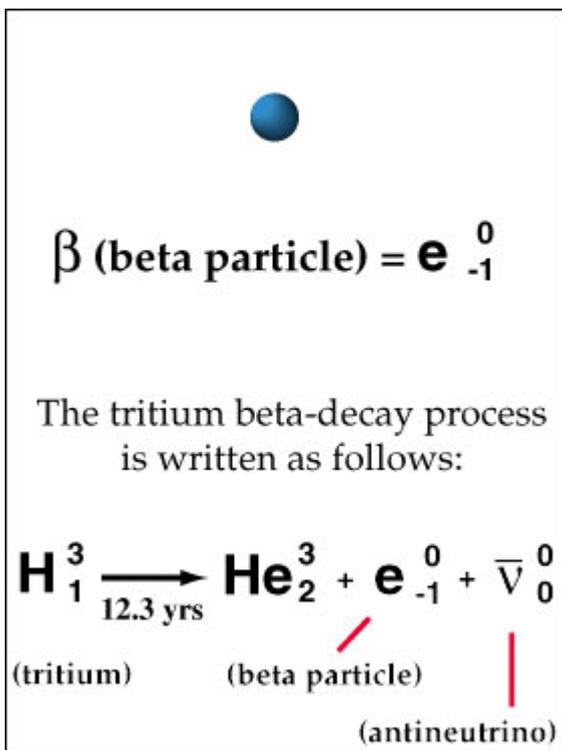
Decadimento alfa

Decadimento alfa si verifica di solito in nuclei pesanti come l'uranio o di plutonio, e quindi è una parte importante del fallout radioattivo ad una esplosione nucleare. Poiché una particella alfa è relativamente più massiccia di altre forme di decadimento radioattivo, può essere fermata da un foglio di carta e non può penetrare la pelle umana. A 4 MeV particella alfa può spostarsi solo di circa 2.5 cm attraverso l'aria.

1.5 Decadimento Beta

Gli atomi emettono particelle beta attraverso un processo noto come decadimento beta. Decadimento beta si verifica quando un atomo o ha troppi protoni o troppi neutroni nel nucleo. Possono verificarsi due tipi di decadimento beta. Un tipo (decadimento beta positivo) rilascia una particella di carica positiva beta chiamata un positrone e un neutrino, l'altro tipo (decadimento beta negativo) rilascia una particella carica negativamente beta chiamata un elettrone e un antineutrino. Il neutrino e l'antineutrino sono particelle elementari con poca o nessuna massa e vengono rilasciati al fine di conservare energia durante il processo di decadimento. Decadimento beta negativo è molto più comune di quanto decadimento beta positivo.

Questa forma di decadimento radioattivo è stato scoperto da Sir Ernest Rutherford nel 1899, anche se il neutrino non è stata osservata fino al 1960. Particelle beta hanno tutte le caratteristiche di elettroni. Al momento della loro emissione, viaggiano quasi alla velocità della luce. Un tipico delle particelle 0,5 MeV percorrerà circa 10 metri attraverso l'aria, e può essere fermato da 2.5-5 cm di legno.



Decadimento beta

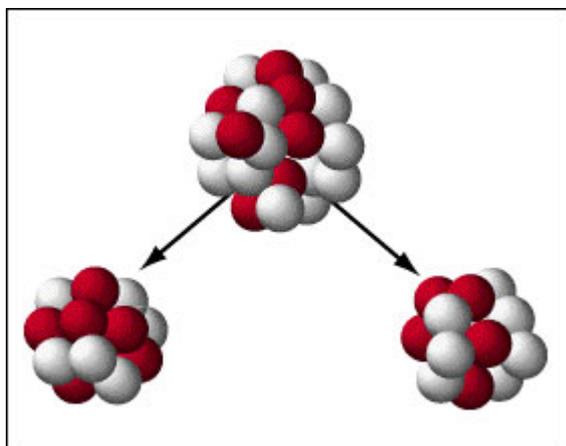
1.6 I raggi gamma

I raggi gamma sono un tipo di radiazione elettromagnetica, che risulta da una ridistribuzione di carica elettrica all'interno di un nucleo. I raggi gamma sono essenzialmente raggi X molto energetici, la distinzione tra i due non si basa sulla loro natura intrinseca, ma piuttosto sulle loro origini. I raggi X vengono emessi durante i processi atomici che coinvolgono elettroni energetici. Radiazione gamma è emessa da nuclei eccitati o altri processi che coinvolgono le particelle subatomiche, ma spesso accompagna alfa o radiazione beta, come un nucleo emette queste particelle possono essere lasciati in un eccitato (più alto-energia) dello stato.

I raggi gamma sono più penetranti delle radiazioni alfa o beta, ma meno ionizzanti. Essi producono danni simili a quelli provocati dai raggi X come ustioni, cancro e mutazioni genetiche.

1.7 Fissione spontanea

Un altro tipo di decadimento radioattivo è fissione spontanea. In questo processo di decadimento, il nucleo si dividerà in due frammenti quasi uguali e diversi neutroni liberi. Una grande quantità di energia è anche rilasciata. Maggior parte degli elementi non decadono in questo modo almeno che il loro numero di massa è maggiore di 230.



Fissione spontanea

I neutroni vaganti rilasciati da una fissione spontanea può prematuramente avviare una reazione a catena. Ciò significa che il tempo di assemblaggio per raggiungere una massa critica deve essere inferiore alla velocità di fissione spontanea. Gli scienziati devono prendere in considerazione il tasso di fissione spontanea di ogni materiale durante la progettazione di armi nucleari.

Per esempio, il tasso di fissione spontanea del plutonio 239 è circa 300 volte più grande di quella di uranio 235.

II. Neutrone, Energia di legame

2.1 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 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: "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", 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, i.e. nucleoni. Scelte diverse di questo potenziale furono fatte dai tre autori; ciascuno di esse avevano i propri giustificazioni e meriti. Queste teorie rimasero un ingrediente utile o anche necessario di molti successivi sviluppi”.

Furono così introdotti diversi tipi di forze di scambio o 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).

2.2 Difetto di massa

La massa di un qualsiasi nucleo (misurabile con precisione con le tecniche della spettrometria di massa) risulta inferiore alla somma delle masse dei nucleoni componenti. Ad esempio il nucleo di un atomo dell'elemento elio (He , $Z = 2$) è costituito da due protoni e due neutroni. Sapendo che un protone ha la massa di 1,0073 dalton ed un neutrone la massa di 1,0087 dalton, la massa del nucleo di elio dovrebbe essere di 4,0320 dalton.

Misure molto precise hanno stabilito, invece, che un nucleo di elio pesa solamente 4,0015 dalton e cioè meno di quanto dovrebbe pesare. Questa differenza di masse è definita difetto di massa.

Risulta allora che quando più nucleoni si uniscono per formare un nucleo si ha una diminuzione della massa. Dato che la massa è la misura della quantità di materia, una diminuzione della massa significa che una parte di materia «scompare», e per la legge formulata dal tedesco A. Einstein $E = mc^2$ ($c \rightarrow$ è la velocità della luce nel vuoto) significa che «scompare» una corrispondente quantità di energia.

Quindi ad una perdita di massa corrisponde una perdita di energia da parte del sistema, che la riversa all'esterno. Ma qual è il processo coinvolto?

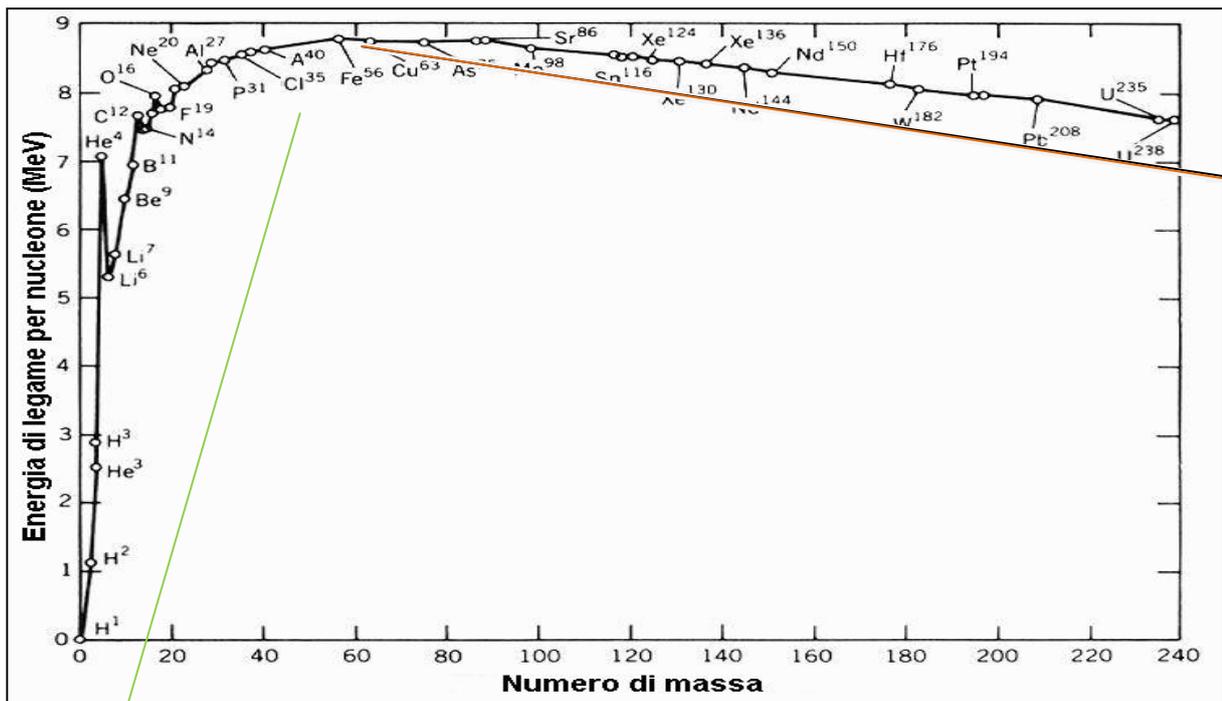
Quando a partire da nucleoni isolati si forma un nucleo, diminuisce la massa (cioè si perde della massa nel processo), ciò, dalle considerazioni fatte, equivale a dire che si perde della energia. Un nucleo quindi è più leggero dei suoi costituenti isolati ed ha un contenuto energetico inferiore a quello della somma dei contenuti energetici dei suoi costituenti isolati.

Questo minore contenuto energetico rende il nucleo più stabile dei suoi componenti isolati. Questa piccola diminuzione di massa, moltiplicata per l'altissimo valore della velocità della luce ci può dare una idea di quanta energia si può liberare dalla trasformazione della materia in energia.

Appare abbastanza logico considerare questa energia 'liberata' come l'energia di legame fra nucleoni. Si può dunque col calcolo valutare l'energia media di legame per nucleone dividendo l'energia di legame E_l per il numero di nucleoni A

2.3 Energia di legame

Rappresenta la minima energia necessaria per separare il nucleo nei nucleoni componenti. L'energia di legame per nucleone caratterizza la stabilità nucleare.



Fissione

Fusione

Maggiore è l'energia di legame per nucleone, più legati sono i nuclei (nuclei più stabili).

Il nucleo di Fe in cui si ha il massimo valore della curva è il nucleo più stabile.

- Nuclei con A inferiore al Fe tendono a unirsi ("fondersi") per raggiungere una conformazione più stabile;
- Nuclei con A superiore al Fe tendono a dividersi ("fissionarsi") per raggiungere una conformazione più stabile;

In entrambi i casi quando il nucleo originale si distrugge, si libera energia sotto forma di energia dei prodotti della reazione (reazioni esoenergetiche).

III. Storia e meccanismo della fissione nucleare

3.1 La scoperta della Fissione

Dal 1938, Hahn, Strassmann e Meitner avevano identificato almeno 10 prodotti radioattivi derivanti dal bombardamento con neutroni dell'uranio, molti di più di quelli osservati inizialmente dal gruppo Fermi. Essi ipotizzarono che queste sostanze fossero nuovi elementi transuranici o isotopi dell'uranio. Gli Joliot-Curie avevano pure eseguito questi esperimenti e credevano di aver osservato torio e attinio (elementi che precedono l'uranio). Queste differenze con i risultati di Fermi portarono entrambi i gruppi a continuare le loro ricerche. Prima del dicembre 1938, Hahn e Strassmann pensavano di aver stabilito le reazioni nucleari che davano i prodotti indicati dai Joliot-Curie, presumibilmente, gli isotopi del radio, prodotti dal bombardamento iniziale con neutroni dell'uranio decaduto in torio e attinio. Per essere assolutamente certi, Hahn e Strassmann decisero di identificare gli isotopi del radio per via chimica. Il radioisotopo sospetto è indicato come "Ra". Poiché radio e bario sono elementi del gruppo IIA, aventi le stesse proprietà chimiche, venne aggiunto del bario come mediatore per facilitarne l'isolamento di piccole quantità.

Il passo finale in questo procedimento fu una cristallizzazione frazionaria per separare il bario dal sospettato "radio". Hahn e Strassmann non furono in grado di separare la radioattività del 'Ra' da quella della frazione di bario e pertanto confermarono che uno dei prodotti del bombardamento dei neutroni sull'uranio non era nelle vicinanze del radio, ma distante dal bario. Poteva essere corretta l'ipotesi di Ida Noddack. Sì, erano gli atomi di uranio divisi in frammenti di massa circa uguale?

Hahn e Strassmann ripeterono l'esperimento numerose volte e non furono mai in grado di isolare il "radio" dal bario. Essi riportarono i loro risultati nel modo seguente: "Come chimici, dobbiamo in realtà dire che le nuove particelle non si comportano come il radio ma, in effetti, come il bario; come fisici nucleari, non possiamo trarre questa conclusione, che è in conflitto con tutte le esperienze in fisica nucleare." Hahn, il chimico, era riluttante

ad andare contro le idee dei fisici nucleari, nonostante la chiara evidenza chimica del bario.

Hahn allora si rivolse alla sua collega, Lise Meitner, per una spiegazione. Meitner era un fisico che era emigrata da poco in Svezia per sfuggire al regime nazista. Durante il Natale del 1939, Meitner e suo nipote Otto Frisch, un fisico pure esiliato dalla Germania, lessero la lettera con la relazione di Hahn e con sorpresa i risultati del bario. Quando Meitner e Frisch ricercarono una spiegazione, apparve loro chiaro che quando il nucleo di uranio assorbe un neutrone, poteva divenire instabile e dividersi in due particelle di massa circa uguale (cioè, bario e kripton). Essi usarono il primo modello di Bohr, che trattava il nucleo come una grande goccia di liquido. In questo modello, l'assorbimento di un neutrone poteva indurre instabilità nel nucleo di uranio e dividerlo in due gocce più piccole. Se questa divisione ha luogo, le gocce risultanti (frammenti nucleari) si dovevano respingere a causa della loro carica positiva. Questo processo, chiamato "fissione" da Meitner e Frisch, poteva dare origine a una grande quantità di energia, così come a neutroni aggiuntivi. Essi calcolarono che l'energia associata alla repulsione tra i due frammenti nucleari carichi positivamente doveva essere di circa 200 MeV per atomo di uranio. Per confronto, le reazioni chimiche più energetiche liberavano circa 5 eV per atomo.

Da dove veniva l'energia richiesta per separare il nucleo di uranio? I dati esistenti sulle masse degli elementi mostravano che la somma delle masse dei più piccoli prodotti nucleari era minore della massa dell'uranio. Meitner usò la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$ per calcolare l'energia associata alla differenza di massa (energia nucleare di legame) e l'energia associata alla repulsione dei due frammenti di fissione. I suoi calcoli rivelarono che l'energia equivalente al difetto di massa era uguale a 200 MeV. Frisch tornò rapidamente al suo laboratorio al Neils Bohr Institute a Copenhagen per verificare sperimentalmente tale ipotesi.

La comunità scientifica era eccitata dalla scoperta di questa nuova fonte di energia. Quando Frisch presentò la sua spiegazione a Bohr, questi si colpì la fronte ed esclamò, "Che idioti siamo stati tutti! Oh ma questo è meraviglioso! Deve essere proprio così!" L'energia proveniente dalla fissione era almeno otto ordini di grandezza maggiore dell'energia emessa nelle reazioni chimiche che riguardavano un uguale numero di atomi.

La fissione faceva sorgere la possibilità di una reazione nucleare a catena. I prodotti radioattivi della fissione avevano un eccesso di neutroni, rispetto ai nuclei stabili (non radioattivi) dello stesso numero di massa. Essi potevano eliminare l'eccesso di neutroni per decadimento beta, un processo lento che aumenta di uno il numero atomico, o per emissione diretta di neutroni. In quest'ultimo caso, i neutroni secondari potevano essere usati per produrre nuovi fissioni e se si otteneva un numero sufficiente di fissioni, si poteva ottenere un numero di neutroni sufficienti a sostenere una reazione a catena.

Si ipotizzò che se una tale reazione a catena potesse essere controllata, si poteva disporre di una enorme fonte di energia. Gli scienziati iniziarono a pensare su potenziali impianti di produzione di energia nucleare. Ma se la reazione a catena avveniva in modo violento e incontrollato, si poteva avere una bomba atomica. Gli scienziati iniziarono a preoccuparsi sulle potenzialità delle armi nucleari.

Rimaneva una domanda finale sulla fissione dell'uranio. Nel 1935, Arthur Dempster, un chimico nato in Canada che lavorò all'Università di Chicago, usò uno spettrometro di massa per trovare un isotopo fino ad allora sconosciuto di massa 235 nascosto nell'uranio naturale, la cui massa totale era circa 238. Tre anni dopo, Alfred Nier usò uno spettrometro di massa per misurare il rapporto tra U^{235} e U^{238} nell'uranio naturale trovando 1:139, che significa che U^{235} era presente in quantità pari a 0.7%.

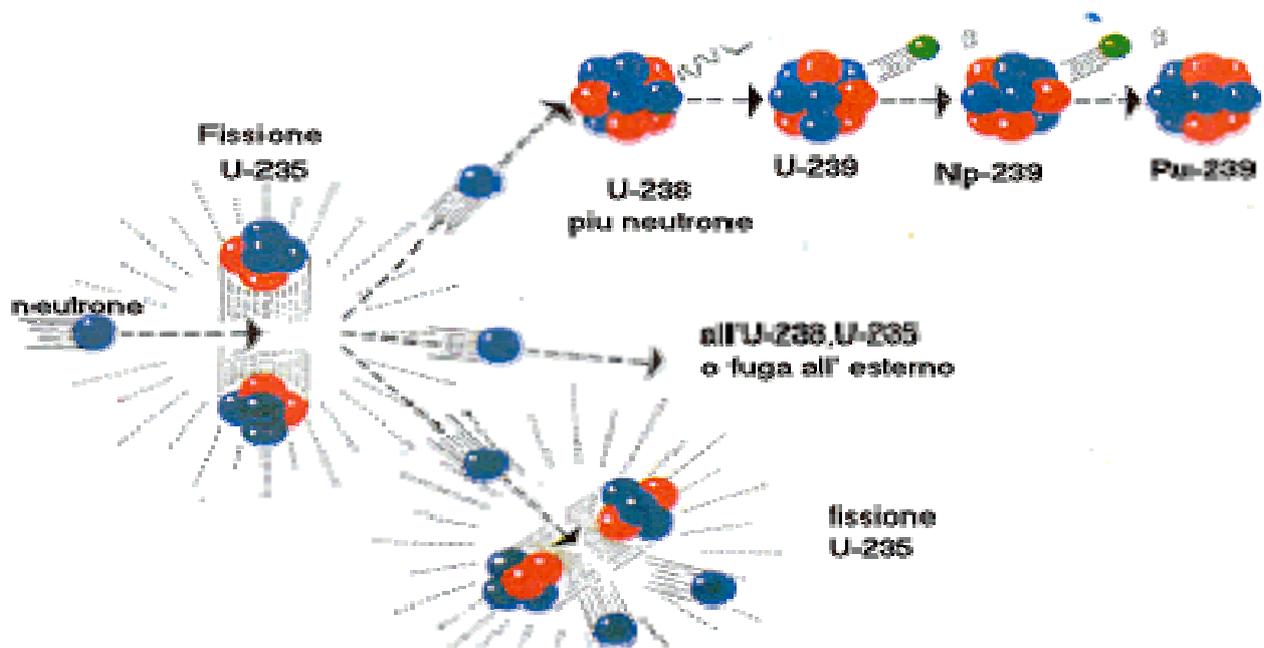
Intanto, all'Università di Princeton, Niels Bohr e John Wheeler ipotizzarono che solo U^{238} subiva fissioni con neutroni veloci di alta energia, mentre neutroni termici lenti potevano produrre fissione solo nell' U^{235} . John Dunning, un fisico che lavorava con Fermi alla Columbia University, decise di verificare la teoria Bohr-Wheeler e fece un accordo con Nier per ottenere qualche microgrammo di U^{235} puro. Usando questo piccolo campione, il gruppo Dunning dimostrò l'ipotesi Bohr-Wheeler. Fino a questa scoperta l'isotopo più leggero non era considerato importante nelle reazioni nucleari a causa della sua bassa concentrazione. Ora, per fare una bomba all'uranio, doveva essere necessario separare l' U^{235} dall' U^{238} , che è una operazione difficile. Metodi fisici, non chimici, si dovevano usare per la separazione, poiché i due isotopi hanno identiche proprietà chimiche.

3.2 Il meccanismo della fissione nucleare

La fissione nucleare è una reazione nucleare in cui atomi di uranio 235, plutonio 239 o di altri elementi pesanti adatti vengono divisi in frammenti in un processo che libera energia. È la reazione nucleare più facile da ottenere, ed è comunemente utilizzata nei reattori nucleari e nei tipi più semplici di bombe atomiche, quali le bombe all'Uranio (come quella di Hiroshima) ed al Plutonio (come quella che colpì Nagasaki).

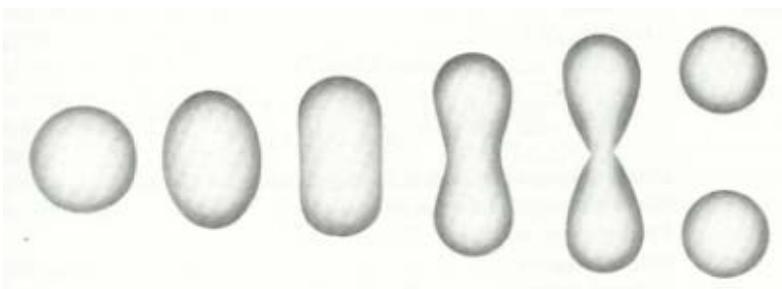
Può avvenire spontaneamente o a causa del bombardamento di neutroni (è il caso più diffuso) o da particelle cariche. Il processo di fissione nucleare genera un'enorme quantità di energia; nelle centrali nucleari questo avviene in modo controllato e il calore prodotto dalla reazione viene trasformato in energia elettrica: da 1 g di uranio-235 (il combustibile nucleare più importante) si ottengono ca 80 miliardi di joule di energia.

I primi processi di fissione vennero ottenuti nel 1936 da un gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi, i cosiddetti "ragazzi di via Panisperna" mentre bombardavano dell'uranio con neutroni rallentati per mezzo di paraffina. Il gruppo di fisici però non si accorse di ciò che era avvenuto ma ritenne invece di aver prodotto degli elementi transuranici. Tre anni dopo, alcuni fisico-chimici tedeschi, Otto Hahn, Lise Meitner e Fritz Straßmann, furono i primi a capire che un nucleo di uranio 235, colpito quando assorbe un neutrone si rompe in due o più frammenti ed ha luogo così la fissione del nucleo. A questo punto per i fisici nucleari di tutto il mondo fu chiaro che si poteva usare questo processo, costruendo dei reattori che contenessero la reazione, per produrre energia o degli ordigni nucleari ed ebbe inizio l'"Era atomica".



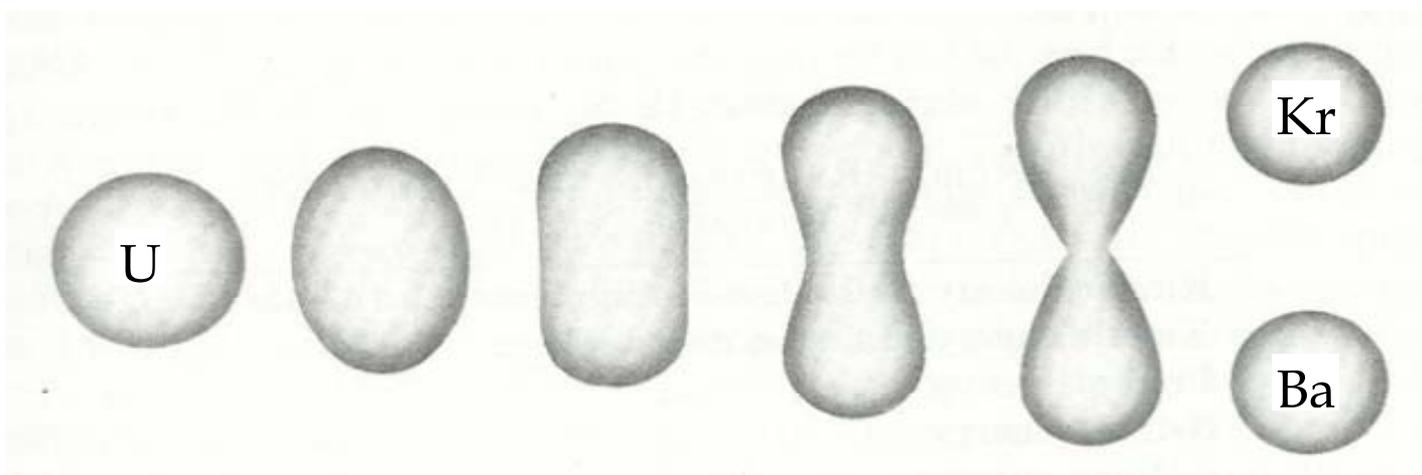
Nella fissione nucleare, quando un nucleo di materiale fissile assorbe un neutrone si fissiona producendo due o più nuclei più piccoli. Gli isotopi prodotti da tale reazione sono radioattivi in quanto posseggono un eccesso di neutroni.

I nuovi neutroni prodotti possono venire assorbiti dai nuclei degli atomi di uranio 235 vicini, se ciò avviene producono una nuova fissione del nucleo : se il numero di neutroni che danno luogo a nuove fissioni è maggiore di 1 si ha una reazione a catena in cui il numero di fissioni aumentano esponenzialmente; se tale numero è uguale a 1 si ha una reazione stabile in tal caso si parla di massa critica, cioè quella concentrazione e disposizione di atomi con nuclei fissili per cui la reazione a catena si mantiene stabile; se si varia tale disposizione allora il numero di neutroni assorbiti può scendere sotto tale valore e si ha che la reazione si spegne oppure salire sopra e si ha che la reazione aumenta esponenzialmente.



La fissione nucleare può avvenire in nuclei con numero di massa superiore a 100, ma è molto più probabile in nuclei con numero di massa pari a circa 230: nelle centrali nucleari si utilizzano due isotopi diversi dell'uranio, uno con un numero di massa pari a 238 e

l'altro pari a 235 (è questo il nucleo che più facilmente subisce il processo di fissione). Nella fissione nucleare indotta, il neutrone che incide sul nucleo e ne viene assorbito cede la propria energia al nucleo stesso, aumentando l'energia interna dei suoi componenti (protoni e neutroni); il nucleo acquista un'anomala forma allungata. Questa è una situazione instabile e nel giro di una frazione di secondo, il nucleo si divide in due emettendo due o tre neutroni. La massa totale dei due nuclei prodotti nella fissione nucleare è inferiore a quella del nucleo di partenza: questo difetto di massa è l'origine dell'energia prodotta nella reazione, perché la massa persa si trasforma in energia secondo l'equazione di Einstein ($E = mc^2$). Per poter iniziare la reazione di fissione nucleare dell'uranio, il neutrone deve essere di bassa energia (neutrone lento): per questo vengono usate particolari sostanze dette moderatori che rallentano i neutroni più veloci.



I nuclei che vanno incontro a fissione, spontanea o indotta, sono gli isotopi degli elementi più pesanti della tavola periodica, come l'uranio, il torio e il plutonio. I due frammenti di fissione possono avere masse variabili entro uno spettro relativamente ampio: in genere è favorita la formazione di un nucleo più leggero, di numero di massa A pari a circa 90, e di uno più pesante, con A vicino a 140. Insieme ai due frammenti vengono emessi da 2 a 4 neutroni liberi, rilasciati immediatamente (neutroni pronti) o dopo un intervallo di tempo dell'ordine dei secondi (neutroni ritardati). L'emissione di neutroni liberi si deve al fatto che i nuclei fissili, molto pesanti, sono caratterizzati da un numero medio di neutroni

proporzionalmente maggiore di quello dei nuclei più leggeri: quando un nucleo si rompe in due frammenti, quindi, i neutroni in eccesso, che non trovano posto nella composizione dei nuclei leggeri, vengono liberati.

- Una tipica reazione di fissione indotta è:
- $^{235}\text{U} + \text{n} \rightarrow ^{93}\text{Rb} + ^{141}\text{Cs} + 2\text{n}$,
- dove un neutrone induce la fissione dell'uranio 235, che si spezza in due frammenti - il rubidio 93 e il cesio 141 - e due neutroni liberi. La reazione di fissione è sempre accompagnata dal rilascio di una notevole quantità di energia, pari alla differenza tra le masse dei reagenti e le masse dei prodotti. Per la reazione scritta sopra, la quantità di energia liberata è di circa 200 MeV.

I frammenti di fissione sono sempre elementi altamente radioattivi: prima di raggiungere la stabilità, vanno incontro a decadimenti beta e gamma successivi, con tempi di dimezzamento anche molto lunghi.

3.3 L'energia da fissione

L'atomo è formato da un nucleo composto di protoni e di neutroni, e da elettroni, che ruotano attorno al nucleo. Gli elettroni sono particelle atomiche con carica elettrica negativa. I protoni hanno una carica elettrica positiva, i neutroni nessuna carica. Dal numero di protoni e neutroni presenti nel nucleo dipende il peso dell'atomo. Le particelle del nucleo sono tenute insieme da forze molto intense chiamate forze nucleari.

Il processo di fissione, che è alla base del funzionamento di un reattore nucleare, si fonda sulla proprietà dei nuclei di alcuni elementi pesanti, detti fissili: se un neutrone lento colpisce uno di questi nuclei, si rompe l'equilibrio che ne teneva saldate le particelle e il nucleo si spezza in due; è questa la fissione nucleare. Il più noto dei nuclei fissili è quello dell'Uranio 235, un isotopo presente nell'uranio naturale in percentuale dello 0,7%.

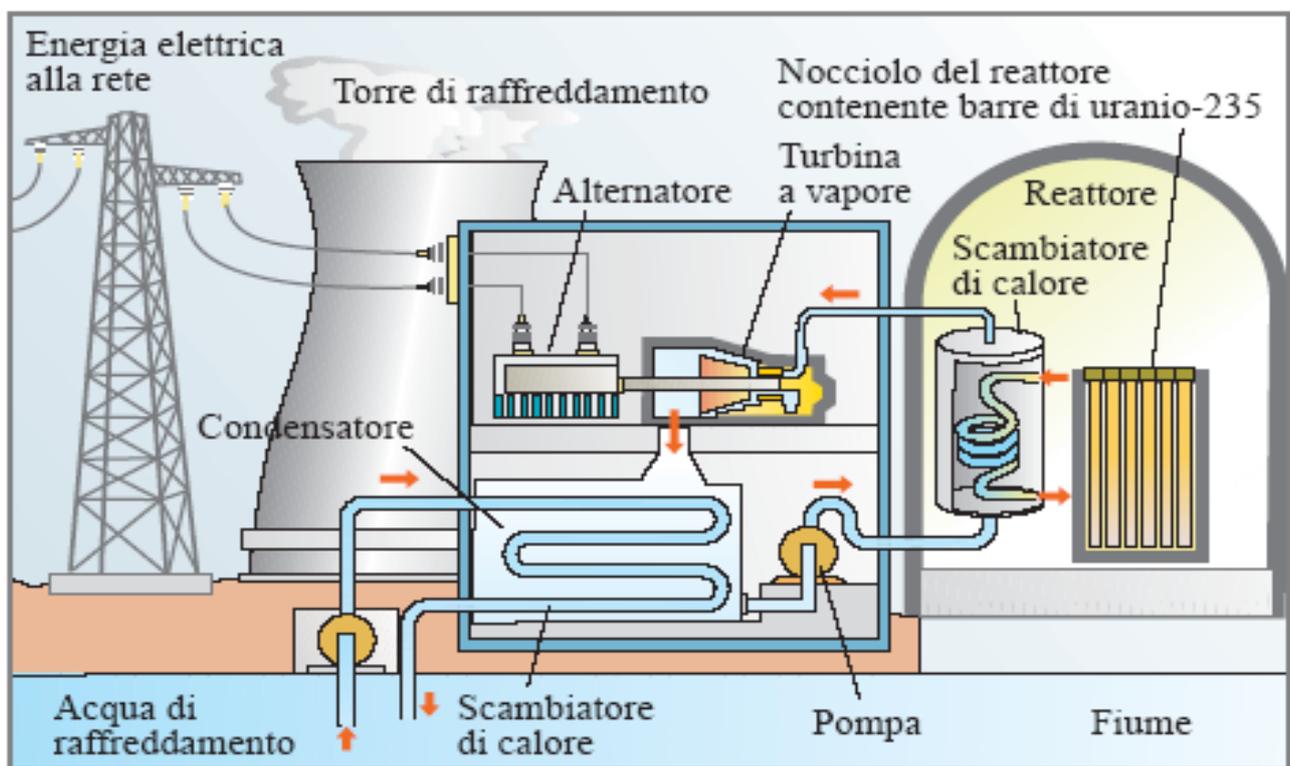
Dalla fissione si libera una grande quantità di energia e tre neutroni, che facevano parte del nucleo e che vengono proiettati a grande velocità. Questi neutroni possono a loro volta provocare altre fissioni; in particolari condizioni (poiché la probabilità che i neutroni provochino fissione aumenta se la loro velocità viene moderata, a tale scopo viene utilizzato un liquido "moderatore" ricco di idrogeno, per esempio l'acqua) è possibile far

avvenire e controllare (con opportuni dispositivi) una serie di reazioni di fissione a catena, accompagnata da produzione di calore.

Nelle centrali nucleari il calore sviluppato dalla fissione dei nuclei permette di scaldare l'acqua fino a produrre vapore. Come in ogni centrale termoelettrica a combustibile fossile (olio combustibile, carbone o gas naturale), l'energia liberata sotto forma di calore viene trasformata prima in energia meccanica e successivamente in energia elettrica: il vapore prodotto aziona infatti una turbina che, a sua volta, mette in moto un alternatore.

Il neutrone è dunque lo strumento base dell'industria nucleare; la sua esistenza è stata scoperta dal fisico inglese Chadwick nel 1932. Pochi anni dopo, nel 1939, il fisico tedesco Otto Hann ha dimostrato che l'atomo di uranio si spezza in due quando viene colpito da un neutrone e tre anni dopo, il 12 dicembre 1942 Enrico Fermi è riuscito a far avvenire per la prima volta la reazione a catena in un reattore costruito a Chicago sotto la sua direzione. È iniziata così una nuova era ed è stata messa a disposizione dell'umanità una nuova fonte di energia.

Oltre che per la produzione di energia, la fissione nucleare ha trovato innumerevoli applicazioni in ogni campo della ricerca scientifica e delle attività industriali.



Schema di una centrale nucleare

3.4 Esperimenti di Fermi del 1934 e l'importanza dei neutroni lenti

Nel gennaio del 1934 Irène Curie, la figlia di Marie e Pierre Curie, e suo marito Frédéric Joliot, che lavoravano al Laboratoire du Radium a Parigi, annunciarono la scoperta della radioattività artificiale. La scoperta era il coronamento di due anni di importanti ricerche iniziate con lo studio della misteriosa radiazione, estremamente penetrante, emessa dal berillio bombardato con particelle alfa provenienti da una sorgente di polonio. La scoperta della radioattività artificiale fatta dai coniugi Joliot-Curie diede a Fermi e al suo gruppo l'occasione che attendevano per iniziare una serie di ricerche sperimentali in fisica nucleare, per le quali nei due anni precedenti avevano acquisito le tecniche e messo a punto la strumentazione: queste ricerche dovevano rivelarsi della massima importanza.

Appresa la notizia della scoperta dei coniugi Joliot-Curie, Fermi ebbe subito l'idea di cercare di produrre nuovi elementi radioattivi utilizzando sorgenti di neutroni invece delle particelle alfa usate dai fisici francesi: queste ultime infatti, essendo cariche positivamente, erano soggette a una forte repulsione coulombiana da parte dei nuclei-bersaglio, mentre i neutroni, elettricamente neutri, avrebbero dovuto avere, secondo Fermi, un'efficacia molto maggiore nella produzione di reazioni nucleari. . Verso la fine di marzo vengono irradiati diversi elementi la cui attività viene misurata per mezzo di un contatore Geiger-Müller. Dopo una serie di tentativi infruttuosi fatti con la sorgente di polonio-berillio, Rasetti parte per il Marocco e Fermi inizia a bombardare in modo sistematico gli elementi del sistema periodico di numero atomico crescente cominciando dall'idrogeno e continuando con litio, berillio, boro, carbonio, azoto e ossigeno, ma inizialmente ottenne risultati negativi. utilizzando una sorgente neutronica più intensa costituita da radon e berillio. Quando tuttavia passò al fluoro e all'alluminio il suo contatore di Geiger-Müller segnò finalmente alcuni conteggi.

Fermi inviò subito una lettera alla Ricerca Scientifica, in data 25 marzo 1934, in cui annunciava questi primi risultati positivi, da lui interpretati in termini di una reazione in cui il nucleo-bersaglio assorbe un neutrone ed emette una particella alfa, dando luogo alla creazione di un nuovo elemento radioattivo il cui numero atomico è minore di due unità rispetto a quello dell'elemento di partenza. Il lavoro era intitolato Radioattività provocata

da bombardamento di neutroni, e fu il primo di una serie di dieci pubblicati con lo stesso titolo, frutto di una indagine sistematicamente condotta su tutti gli elementi noti.

In poco tempo vengono irradiati con neutroni una sessantina di elementi e in almeno quaranta di questi vengono scoperti, e spesso identificati, nuovi elementi radioattivi. I risultati ottenuti dal gruppo dei "ragazzi di via Panisperna" dimostrano tutti i vantaggi del lavoro di *équipe*, introdotto per la prima volta proprio a Roma.

Nel procedere con il bombardamento sistematico, Fermi e il suo gruppo, all'inizio dell'estate, arrivano a irradiare il torio (numero atomico 90) e l'uranio (numero atomico 92), ma la naturale attività di questi elementi ostacola l'identificazione dei nuovi radionuclidi artificiali ottenuti. Fermi e il suo gruppo dimostrano che l'attività di tali radionuclidi non è dovuta ad alcuno degli isotopi di elementi compresi fra il piombo e l'uranio, cioè con numero atomico compreso fra 86 e 92. Il gruppo è convinto di avere prodotto e identificato due elementi transuranici che vengono battezzati esperio e ausonio e accantona la possibilità che il nucleo di uranio possa scindersi in "molti grandi pezzi" ciascuno dei quali può essere un isotopo di elementi noti ma lontani dall'uranio e dal torio nella tavola periodica.

Nell'autunno del 1934 Fermi assegna ad Amaldi e Bruno Pontecorvo, appena laureato, il compito di stabilire una scala quantitativa delle attività indotte negli elementi bombardati. I due si trovano subito di fronte a una serie di problemi perché l'intensità della radioattività ottenuta sembra dipendere dal materiale su cui vengono posti la sorgente e l'elemento da irradiare.

Per chiarire il mistero vengono eseguite osservazioni sistematiche a partire dal 18 ottobre, in particolare Amaldi effettua una serie di misure all'esterno e all'interno di una sorta di casetta di piombo le cui pareti hanno 5 cm di spessore che serve da schermo per le radiazioni. I risultati mostrano chiaramente che, mentre all'esterno la capacità di attivazione decresce rapidamente con l'aumento della distanza fra sorgente ed elemento irradiato, all'interno la diminuzione è molto più lenta. A questo punto, per misurare l'assorbimento del piombo viene preparato un cuneo di questo materiale da inserire tra la sorgente di neutroni e il rivelatore con l'idea di confrontarne l'assorbimento rispetto a

un mattoncino di piombo dello stesso spessore.

Fermi decide di procedere da solo per risolvere l' "enigma del piombo" . Al momento di collocare il cuneo di piombo, senza alcun particolare motivo, aveva deciso di mettere al suo posto un pezzo di paraffina. La sera stessa il gruppo scrive una lettera per la "Ricerca Scientifica" , *Azione di sostanze idrogenate sulla radioattività provocata dai neutroni-I* in cui annuncia la sensazionale scoperta: "Uno spessore di alcuni centimetri di paraffina interposto fra la sorgente e l'argento invece di diminuire l'attivazione la aumenta" . I neutroni rallentati fino all'energia dell'agitazione termica delle molecole dalle collisioni con nuclei di idrogeno passano più tempo nelle vicinanze dei nuclei bersaglio diventando più efficaci nell'indurre la radioattività artificiale. La scoperta dell'effetto dei neutroni lenti apre una nuova fase nel programma di ricerca del gruppo che si concentra ormai sul problema degli effetti di questi neutroni. La scoperta ha immediate applicazioni pratiche nella possibilità di produrre isotopi radioattivi artificiali da utilizzare per esempio come traccianti a scopi fisici, chimici e biologici.

3.5 Uranio

L'uranio è l'elemento chimico di numero atomico 92. Il suo simbolo è U. È un metallo bianco-argenteo, tossico e radioattivo; appartiene alla serie degli attinoidi ed il suo isotopo ^{235}U trova impiego come combustibile nei reattori nucleari e nella realizzazione di armi nucleari. Per ottenere un materiale fissile che sia adatto a scopi nucleari, cioè che emetta una quantità sufficiente di neutroni, è necessario aumentare la concentrazione dell'isotopo ^{235}U rispetto al più comune e meno radioattivo ^{238}U .

IV. Applicazioni e Progetti militari, mediche della fissione nucleare

4.1 Il progetto Manhattan

Nel gennaio del 1939 il fisico danese Niels Bohr e il fisico belga Leon Rosenfeld si recarono negli Stati Uniti e informarono i colleghi del fatto che in Germania Otto Hahn e Fritz Strassmann nel dicembre del '38 erano riusciti a produrre la fissione di atomi di uranio bombardati con neutroni lenti, e dell'interpretazione che nel giro di pochi giorni Lise Meimer e Otto Frish, rifugiatisi in Svezia per scampare alle persecuzioni dei nazisti, avevano dato dei risultati ottenuti da Hahn e Strassmann. Nel giro di poche settimane gli esperimenti furono ripetuti da diversi gruppi negli Usa. In questo modo fra i fisici nucleari che lavoravano negli Stati Uniti su questo problema si fece strada rapidamente la consapevolezza che mediante la realizzazione di una reazione a catena di fissione dell'uranio si potesse costruire una superbomba nucleare di inaudita potenza distruttiva.

All'inizio dell'estate del 1939 Leo Szilard, Edward Teller e Eugene Wigner, fisici ungheresi in esilio negli Stati Uniti per ragioni politiche, seppero che la Germania nazista aveva posto l'embargo sull'uranio cecoslovacco. Molto allarmati dalla possibilità che i tedeschi stessero preparandosi ad utilizzare la fissione dell'uranio per sviluppare armi nucleari, convinsero Albert Einstein, rifugiatosi negli Stati Uniti dal 1933 a seguito delle leggi razziali, a firmare una lettera, da loro scritta ai primi di agosto, al Presidente degli Stati Uniti Franklin Delano Roosevelt per avvertirlo del pericolo. La lettera fu presentata al Presidente dal suo consigliere scientifico, il banchiere di origine russa Alexander Sachs soltanto l'11 ottobre 1939, quando la guerra in Europa era già scoppiata.

In seguito alla lettera di Einstein, Roosevelt decise di dare vita a un Uranium Conimittee (UC), sotto la direzione di Lyman Briggs, presidente del National Bureau of Standards (NBS), con lo scopo di studiare le possibili applicazioni pratiche del processo di fissione dell'uranio. I fondi per le ricerche sull'uranio, che ammontavano inizialmente alla cifra

irrisoria di 6000 dollari l'anno, furono forniti inizialmente al NBS dall'esercito e dalla Marina Usa. Tuttavia fino alla metà del 1940 le ricerche condotte dall'UC procedettero con un'esasperante lentezza provocando notevoli frustrazioni fra gli scienziati che vi lavoravano.

Ma nella primavera del 1940 scese in campo Vannevar Bush che cominciò ad affrontare con decisione il problema di mobilitare la comunità scientifica per la difesa. Bush, professore di ingegneria elettrica presso il (MIT), nel corso degli anni '30 era stato nominato preside della facoltà di ingegneria e vicepresidente del MIT stesso, il cui presidente era il fisico Karl Taylor Compton. La sua influenza negli ambienti scientifici e politici crebbe ulteriormente a partire dal 1939, quando si trasferì a Washington come presidente della più importante organizzazione privata per la ricerca, la Carnegie Institution of Washington (Ciw) e fu anche nominato presidente del National Advisory Committee for Aeronautics (NACA).

Dopo l'invasione della Francia da parte della Germania nel maggio del 1940, Bush organizzò una serie di incontri con Compton, con il chimico James Conant, presidente dell'Università di Harvard, Richard C. Tolman, rettore del California Institute of Technology (CalTech), Frank Jewett, ex presidente dei Bell Telephone Laboratories e presidente della NAS, con lo scopo di mettere a punto un piano dettagliato per la costituzione di un nuovo ente federale finanziato dal Governo, che avesse il compito di mobilitare la comunità scientifica e tecnologica degli Stati Uniti per effettuare ricerche riguardanti la difesa nazionale e la progettazione di nuove armi. Il piano fu presentato a Roosevelt il 27 giugno 1940 che approvò seduta stante l'istituzione dell'organizzazione promossa da Bush, il National Defense Research Committee (NDRC, finanziata con fondi per l'emergenza nazionale concessi dal Congresso al presidente, e chiamò Bush a presiederla. L'UC fu posto da Roosevelt sotto l'egida dell'NDRC.

Inizialmente Bush si limitò a spingere la Crw a sostenere le ricerche sulla separazione degli isotopi dell'uranio con tecniche di centrifugazione. Il problema della separazione degli isotopi dell'uranio era di importanza fondamentale per la possibile realizzazione di una reazione a catena, perché l'uranio che si trovava in natura era composto da una

miscela di isotopi: quasi tutto U^{238} , non fissile, mentre l'isotopo fissile U^{235} rappresentava soltanto lo 0,77% della miscela.

Nella primavera del 1941 l'UC si rivolse a Ernest Lawrence per chiedergli di affrontare con il suo gruppo di Berkeley il problema di isolare l'elemento 94 e di verificare se fosse fissionabile. All'inizio del '41 infatti il giovane chimico fisico Glenn T. Seaborg utilizzando il ciclotrone di Berkeley aveva bombardato con neutroni l' U^{238} riuscendo a "trasformarlo" nell'elemento 94, chiamandolo plutonio. Si pensava, sulla base di considerazioni teoriche, che il plutonio fosse fissile come l' U^{235} e quindi utilizzabile come materiale per la costruzione di una bomba nucleare. Inoltre lo stesso Lawrence aveva cominciato ad affrontare, utilizzando il ciclotrone, il problema della "separazione elettromagnetica" degli isotopi dell'uranio.

In seguito a questi risultati Lawrence si convinse subito che il processo di fissione poteva essere utilizzato per la costruzione di esplosivo nucleare e cominciò a esercitare pressioni su Bush perché l'attività dell'UC venisse potenziata assumendo un gruppo permanente di tecnici e scienziati e nominando un comitato di consulenti, fra cui lo stesso Lawrence.

Il 14 aprile del '41 il fisico di origine tedesca Rud Ladenburg, che risiedeva a Princeton, inviò a Briggs la lettera seguente:

"Caro Dr. Briggs,

può interessarla di sapere che un mio collega, arrivato da Berlino via Lisbona alcuni giorni fa, ha portato il seguente messaggio: un collega affidabile che sta lavorando in un laboratorio di ricerche tecniche gli ha chiesto di farci sapere che un gran numero di fisici tedeschi sta lavorando intensamente sul problema della bomba all'uranio sotto la direzione di Heisenberg, che lo stesso Heisenberg sta cercando di rallentare il lavoro per quanto è possibile, temendo i catastrofici risultati di un successo, ma non può fare a meno di adempiere gli ordini a lui dati, e se il problema può essere risolto, sarà probabilmente risolto in vicino futuro. Così ci ha consigliato di affrettarci se gli USA non vogliono arrivare troppo tardi".

Questa lettera contribuì sicuramente a rafforzare il già diffuso convincimento che il programma di ricerche della Germania nazista sulla bomba atomica avesse ormai raggiunto uno stadio molto più avanzato dei corrispondenti programmi degli Stati Uniti e della Gran Bretagna.

Ai primi di maggio del '41 Kenneth Bainbridge, di ritorno dall'Inghilterra, informò i membri del Comitato Consultivo della NAS che gli inglesi erano convinti che si potesse realizzare la costruzione di una bomba atomica entro due anni. Da cosa nasceva l'ottimismo degli scienziati inglesi sulle prospettive di riuscire a costruire in tempi brevi una bomba all'uranio? Uno degli ostacoli principali da superare nella costruzione di una bomba all'uranio riguardava, come si è detto, il problema della separazione degli isotopi, in modo da isolare una sufficiente quantità dell'isotopo raro U^{235} .

Gli inglesi erano tuttavia giunti alla conclusione che per raggiungere la cosiddetta "massa critica" (cioè la massa minima di materiale fissile necessaria per la realizzazione di una bomba a fissione) erano necessari circa 10 kg di U^{235} , e che quest'ultimo potesse essere separato dall' U^{238} mediante il metodo della diffusione gassosa. Anche negli Stati Uniti il fisico chimico Harold Urey, che aveva vinto il premio Nobel per la scoperta del deuterio fatta nel 1932, e il fisico John Dunning avevano cominciato a effettuare ricerche per la messa a punto di questa tecnica per la separazione degli isotopi dell'uranio presso la Columbia University.

Tuttavia il rapporto del Comitato Consultivo della NAS, completato il 17 maggio 1941, pur sottolineando che la fissione nucleare poteva essere utilizzata per la propulsione di navi e per produrre sostanze radioattive da utilizzare contro truppe nemiche e popolazioni civili, concludeva che esisteva soltanto "una possibilità molto remota" di utilizzare la fissione per costruire bombe atomiche, in stridente contrasto con le conclusioni in proposito a cui erano giunti gli scienziati inglesi. Il Comitato Consultivo concludeva raccomandando che le ricerche promosse dall'UC continuassero con un budget di 350.000 dollari per altri sei mesi, e che successivamente un nuovo comitato riprendesse in esame il problema sulla base dei risultati ottenuti.

Il secondo rapporto del Comitato Consultivo della NAS fu presentato a Bush e Conant l'11 luglio del '41. Anche questa volta il rapporto del Comitato sottolineava come non si potessero ancora fare valutazioni precise sulle possibili applicazioni della fissione, ma raccomandava che le ricerche fondamentali sull'uranio continuassero, con un budget di 550.000 dollari, per un altro anno al cui termine l'intera questione avrebbe dovuto essere riesaminata.

Tuttavia in appendice al rapporto era annessa una relazione di minoranza di Lawrence che raccomandava l'immediata produzione su vasta scala dell'elemento 94, prevedendo la possibilità di costruzione di reattori nucleari e di super bombe al plutonio.

Il 3 ottobre del '41 Bush e Conant ricevettero da Thomson, presidente dell'equivalente commissione inglese (MAUD), il rapporto ufficiale, le cui conclusioni erano molto ottimistiche sia per quanto riguardava l'utilizzazione di tecniche di separazione degli isotopi dell'uranio che per le prospettive di costruzione di una bomba atomica. Lo stesso giorno Bush chiese a Jewett udienza a Roosevelt.

L'incontro con Roosevelt avvenne il 9 ottobre alla presenza del vicepresidente Henry Wallace. Secondo i resoconti ufficiali, "la decisione che gli Stati Uniti, dovessero esaminare, se era possibile costruire una bomba atomica, fu presa nella massima segretezza da Franklin D. Roosevelt il 9 ottobre 1941. Quel giorno il Presidente non approvò né la costruzione di impianti né ancor meno la fabbricazione di bombe..Il 21 ottobre un nuovo rapporto del Comitato, in netto contrasto con i primi due, arrivava alla secca conclusione che "una bomba a fissione di potenza eccezionalmente distruttiva si potrà ottenere portando rapidamente insieme una massa sufficiente dell'elemento U235. Ciò sembra essere vero, come può essere qualsiasi previsione, fondata teoricamente e sperimentalmente, ma non realizzata". Il rapporto valutava che il costo dell'intero progetto avrebbe raggiunto un totale di 133 milioni di dollari, mentre la somma effettivamente spesa dal giugno del '42 all'agosto del '45 superò i 2 miliardi di dollari.

4.2 La pila di Fermi

Sebbene Los Alamos sia stato selezionato come il sito del laboratorio che avrebbe progettato l'arma nucleare per il Manhattan Engineer District (MED), fu solo dal 2 Dicembre 1942, che Enrico Fermi e il suo gruppo al laboratorio metallurgico all'Università di Chicago ottenne una dimostrazione sperimentale di una reazione a catena. Questo fu il risultato di un programma iniziato nel 1939 come risposta alla lettera di Albert Einstein al Presidente Franklin Delano Roosevelt allarmato dal programma tedesco di sfruttare la fissione per scopi militari. Ci vollero tre anni per ottenere questo risultato che dimostrò il tipo pericolo, sebbene sconosciuto ai fisici americani, se i tedeschi avessero avuto successo nell'ottenimento della reazione a catena nei loro esperimenti.

L'ottenimento di una reazione a catena era importante, non solo perché avrebbe verificato il principio della bomba atomica, ma anche perché una pila con reazione a catena sarebbe potuto essere usato per la produzione di plutonio, uno degli esplosivi che gli scienziati americani avevano sperato di usare nelle loro armi. Intanto il Comandante del MED Leslie Groves ha già chiesto alla DuPont Corp. di mandare in produzione reattori a Hanford, Washington., per tale scopo.

Fermi fu il campione dello sforzo americano nella gara segreta per ottenere una reazione a catena con l'uranio. Il suo antagonista fu il fisico tedesco Werner Heisenberg uno dei fondatori della meccanica quantistica e quasi il principale fisico teorico mondiale.

Mentre Fermi sceglieva grafite per rallentare, o "moderare", i neutroni prodotti nella fissione dell'uranio 235 per consentire ulteriori fissioni in una reazione a catena, Heisenberg scelse acqua pesante, in parte perché esperimenti condotti da Walter Bothe all'Università di Heidelberg indicavano che la grafite pura era inadeguata come moderatore.

Questi risultati erano basati su calcoli errati e davano a Fermi un vantaggio. L'acqua pesante era stata scelta anche perché i primi esperimenti di Heisenberg con la paraffina come moderatore avevano fallito nella produzione di una reazione a catena. I primi esperimenti di Fermi al Columbia usarono invece grafite altamente purificata.

Il prezzo era di \$6.000 per 40 tonnellate purificata dal boro e altri elementi che assorbono i neutroni e che avrebbero potuto inibire una reazione a catena. Esso aumentò a \$40.000

quando fu creata la National Defense Research Committee nel 1940. Nessuna delle pile costruite alla Columbia con questi fondi diede una moltiplicazione di neutroni maggiori di uno, perché doveva solo indicare la fattibilità della reazione a catena.

I primi esperimenti di Heisenberg con l'acqua pesante al Kaiser-Wilhelm Institute a Berlino-Dahlem e a Lipsia, Germania, furono sufficientemente incoraggianti tanto da promuovere l'energia nucleare nel governo tedesco. Egli avvertì i suoi governanti nell'autunno del 1941 che gli Americani stavano lavorando su un esplosivo nucleare (plutonio) che si poteva ottenere in una pila con reazione a catena. L'animazione derivò dal ricevere la più alta priorità per questo lavoro da parte di Albert Speer, ministro dei rifornimenti di Hitler. La pila di Lipsia, tuttavia, bruciò a causa di una reazione piroforica della polvere d'uranio con l'aria, e il bombardamento alleato di Berlino spinse Heisenberg a spostare i suoi materiali a Haigerloch nel Württemberg, Germania.

Dopo la decisione del governo degli Stati Uniti di avviare un programma su larga scala per la costruzione della bomba atomica nell'Ottobre 1941, la pila di Fermi fu spostata all'Università di Chicago, dove fu ricostruita in un campo di squash sotto gli stand dello Stagg Field, che non erano più in uso da qualche tempo. Qui, usò l'uranio metallico, invece della polvere piroforica di Heisenberg o ossido di uranio già usato in precedenza negli esperimenti alla Columbia, per costruire una pila più grande.

La pila di Chicago comprendeva 400 tonnellate di grafite e 22000 "pseudo sfere" di uranio disposte in 57 strati con lamine di cadmio inchiodate su strisce di legno piatte come barre di controllo e sicurezza. Il 2 Dicembre Fermi supervisionò le fasi finali del suo esperimento. Calcolò il numero di neutroni attesi per la fissione quando la barra di controllo era mossa nella pila. Inoltre per maggiore sicurezza usò barre rivestite di cadmio(Cd) in modo da poterle muovere se il rivelatore di neutroni indicava una reazione incontrollata, e ancora, appesantite con piombo, sarebbero cadute nella pila se il fisico Norman Hilberry avesse tagliato una fune con un'accetta. Se tutto fosse andato male, una squadra di tre "fisici suicidi" avrebbero allagato la pila con solfato di cadmio.

Quella mattina, Fermi ordinò che la barra di controllo fosse tolta dalla pila piede dopo piede fino a che una delle barre di sicurezza, regolata ad un punto stabilito che aveva dimenticato, fu liberata e scivolò nella pila, cadendo di peso sul pavimento. Egli ordinò di estrarla ancora, vide i contatori indicare il flusso precedente e poi ruppe la tensione

invitando i collaboratori ad interrompere per il pranzo. Dopo pranzo, la barra di controllo fu estratta di altri 3 metri, poi altri 15 cm, poi, dopo aver reinserito la barra di sicurezza, di altri 30 cm. La barra di sicurezza fu ritirata e i contatori ticchettavano quando la quantità che indicava la moltiplicazione dei neutroni raggiunse il valore stabilito, indicando una reazione a catena auto sostenenti.

Dopo aver funzionato per 28 minuti, producendo circa 200 watt di potenza, la pila fu spenta. Eugene Wigner (un fisico ungherese che aveva aiutato Einstein a scrivere la lettera a FDR) passò a Fermi una bottiglia di Chianti Bertolli e passò dei bicchieri di carta ai collaboratori. Leona Woods Marshall, la sola donna presente, ruppe il silenzio con il commento: "Speriamo di essere i primi ad avere avuto successo".

Arthur Compton a capo del NDRC, telefonò in forma criptata a James Conant, "il navigatore Italiano è sbarcato nel Nuovo Mondo, " la frase segreta stabilita come segnale di successo.

Il successo della pila assicurò a Los Alamos la disponibilità di plutonio, così come di uranio, come potenziale esplosivo nucleare. Furono poi costruite pertanto la pila gigante ad Hanford e l'impianto di separazione dell'isotopo di uranio a Oak Ridge, Tenn., che avrebbero dovuto fornire materiale sufficiente per queste armi.

4.3 Fisici all'opera: LOS ALAMOS

L'attacco giapponese a Pearl Harbor il 7 dicembre del '41 e l'entrata in guerra degli Stati Uniti resero molto più acuto il senso di urgenza fra gli scienziati che lavoravano al "progetto uranio": mentre fino ad allora i vari gruppi di fisici avevano lavorato in sedi isolate e distanti fra loro, fu deciso che era meglio che svolgessero le loro ricerche in modo coordinato in un unico sito: così nel gennaio del '42 alcuni di questi gruppi, fra cui quello di Enrico Fermi e di Leo Szilard della Columbia University, furono trasferiti presso l'Università di Chicago per dar vita al Metallurgical Laboratory sotto la direzione di Arthur Holly Compton. Il nome alquanto fuorviante dato al laboratorio di Chicago nascondeva il suo vero scopo: la realizzazione di una reazione a catena controllata per verificare la fattibilità della produzione di plutonio in una pila atomica.

Nel giugno del '42, mentre nel frattempo si erano andati accumulando risultati scientifici favorevoli alla possibilità di realizzare una reazione a catena auto sostenuta, il Presidente Roosevelt diede il via libera perché venisse intrapreso con la massima priorità un programma su vasta scala per la realizzazione di bombe a fissione. Bush e Conant erano ben consapevoli che lo sforzo industriale richiesto andava molto al di là delle capacità manageriali dell'OSRD, si adoperarono perché i compiti relativi allo sviluppo, la progettazione, la produzione e l'approvvigionamento di materiali del progetto fossero affidati ad una agenzia direttamente sotto il controllo dei militari.

Nel settembre del '42 l'esercito degli Stati Uniti assunse la direzione del progetto a cui, per ragioni di segretezza, venne dato un nome fuorviante: il Manhattan District of the Army Engineers. Il comando del cosiddetto progetto Manhattan, come venne poi comunemente chiamato, fu affidato al brigadiere generale Leslie R. Groves, mentre la responsabilità delle ricerche fisiche e chimiche sulla bomba rimase nelle mani di tre scienziati civili: Harold Urey per il programma relativo alla separazione dell' U^{235} mediante diffusione gassosa presso la Columbia University di New York; Ernest Lawrence per il programma sulla separazione elettromagnetica e per gli studi sul plutonio a Berkeley; Arthur Compton per gli studi teorici sulla bomba e per le reazioni a catena presso il Metallurgical Laboratory di Chicago.

A Chicago, il 2 dicembre del 1942, sotto la direzione scientifica di Fermi venne costruita la prima pila nucleare.

Quello stesso mese il Presidente Roosevelt approvò la spesa di 400 milioni di dollari per la costruzione di installazioni industriali per la separazione dell' U^{235} e di reattori nucleari per la produzione di plutonio su larga scala. All'inizio del '43, il generale Groves, poté rilasciare i contratti per la separazione dell' U^{235} a varie industrie, fra le quali la Stone and Webster per la separazione elettromagnetica dell' U^{235} e la Kellogg Corporation per la diffusione gassosa, e per la costruzione dei relativi impianti su un terreno di 24.000 ettari acquistato a questo scopo dall'esercito presso Oak Ridge nel Tennessee. Lo stabilimento per la produzione su larga scala di plutonio fu costruito a Hanford, nello Stato di Washington, su un terreno di proprietà federale che si estendeva su oltre 160.000 ettari.

Una volta verificata, con il successo della pila di Fermi moderata a grafite, la fattibilità di una reazione a catena controllata per la produzione di plutonio, il problema principale per

la produzione su larga scala di questo elemento fissile con un reattore fu quello di ottenere un sistema di raffreddamento efficace. Ma già molto prima che gli impianti di Oak Ridge e di Hanford raggiungessero il pieno regime di produzione del materiale fissile, i primi piccoli quantitativi di plutonio e di uranio arricchito furono spediti a Los Alamos, nel New Mexico, nello speciale laboratorio segreto, fondato nel marzo del '43 dal generale Groves, per la messa a punto dei prototipi delle bombe a fissione.

La direzione del laboratorio di Los Alamos era stata affidata al brillante fisico teorico Robert Oppenheimer. Los Alamos divenne presto il centro principale di tutto il progetto Manhattan e, a causa della massima priorità data alla costruzione delle bombe a fissione, il suo personale scientifico e tecnico crebbe al punto che nella primavera del '45 aveva superato le duemila unità, includendo i migliori fisici teorici e sperimentali di tutto il mondo.

Il principale problema tecnico che i fisici di Los Alamos affrontarono inizialmente fu quello di determinare le proprietà di una massa critica di U^{235} o di plutonio nel brevissimo intervallo di tempo, dell'ordine del microsecondo, intercorrente fra l'inizio della reazione a catena e l'esplosione. A questo scopo la divisione di fisica sperimentale di Los Alamos diretta da Robert F. Bacher utilizzò gli acceleratori di particelle più avanzati dell'epoca per ottenere sorgenti di neutroni adatte a misurare le proprietà di fissione dei due elementi. Usando tecniche di elettronica veloce utilizzate per il radar a microonde, i fisici di questa divisione misero a punto sofisticati strumenti per misurare le velocità dei processi di fissione in funzione dell'energia dei neutroni incidenti. La divisione di fisica teorica di Los Alamos, diretta da Hans Bethe, ebbe quindi il compito di elaborare i dati sperimentali così ottenuti per fare previsioni sul comportamento della massa critica dei materiali fissili.

Ma il problema principale che i fisici di Los Alamos dovettero affrontare fu quello riguardante il disegno e alla progettazione delle bombe. La potenza dell'esplosione, infatti dipendeva dalla rapidità con cui una quantità sufficiente di materiale fissile era "messa insieme" in modo da raggiungere la massa critica. Il metodo di assemblaggio del materiale fissile su cui inizialmente si cominciò a lavorare fu quello noto come "metodo del cannone", che consisteva nello "sparo" di una quantità di materiale fissile al di sotto del valore critico all'interno di un'altra massa dello stesso materiale con la velocità di un proiettile di artiglieria, in modo da raggiungere la massa critica con sufficiente rapidità.

Ma in seguito ad una serie di esperimenti ci si rese conto all'inizio del '44 che questo metodo avrebbe potuto funzionare per l' U^{235} ma non per il plutonio.

Un metodo alternativo a quello del cannone, noto come "metodo dell'implosione", era già stato proposto un anno prima dal giovane fisico di CalTech Seth Neddermeyer, ma era stato inizialmente respinto perché le difficoltà di realizzazione pratica erano apparse insormontabili. Una volta scoperti i limiti del metodo del cannone per il plutonio, nel febbraio del '44 Oppenheimer decise di riprendere in seria considerazione la vecchia idea di Neddermeyer e incaricò il chimico fisico George Kistiakowsky di dirigere un gruppo apposito per la realizzazione del metodo dell'implosione. A partire dalla metà del '44 il laboratorio di Los Alamos venne riorganizzato: le sue attività vennero orientate dalla ricerca alla realizzazione vera e propria della bomba a U^{235} e di quella al plutonio. Tuttavia il progetto della bomba a implosione fu completato soltanto all'inizio di marzo del 1945, e Kistiakowsky poté venire a capo del problema critico dell'asimmetria dell'onda d'urto implosiva soltanto a metà aprile. L'8 maggio del '45 ebbe fine la guerra in Europa con la resa della Germania nazista. L'assemblaggio della bomba a U^{235} fu completato due mesi dopo la fine della guerra in Europa; gli scienziati di Los Alamos ritennero che non fosse necessario sperimentarla prima di un suo eventuale uso sul campo di battaglia perché avevano raggiunto la massima fiducia nell'efficacia del metodo del cannone, mentre considerarono fondamentale effettuare un'esplosione sperimentale della bomba al plutonio. Il 16 luglio 1945, la prima esplosione nucleare sperimentale di una bomba al plutonio, chiamata in codice Trinity, fu effettuata ad Alamogordo, un'area desertica del New Mexico. L'energia liberata fu valutata pari a 13.000 tonnellate di tritolo equivalente (chiloton). La bomba atomica era ormai una realtà. Restava da decidere se e come usarla.

La bomba sul Giappone Nella primavera del '45, quando gli impianti di Hanford e Oak Ridge avevano cominciato a funzionare a pieno ritmo nella produzione del materiale fissile e a Los Alamos la progettazione e la messa a punto delle bombe a fissione aveva ormai raggiunto uno stadio avanzato, era ormai diventato chiaro che la guerra contro la Germania stava per finire con la vittoria sul campo degli alleati; veniva quindi meno la necessità di utilizzare questa nuova arma contro i tedeschi. All'inizio di marzo del '45 alcuni fisici del Metallurgical Laboratory cominciarono a porsi seri interrogativi sull'opportunità di sperimentare e usare contro il Giappone le bombe atomiche in

costruzione a Los Alamos, e sulle drammatiche conseguenze che il loro uso e la loro probabile proliferazione avrebbero avuto sugli equilibri mondiali dopo la fine della guerra.

4.4 Altre applicazioni della fissione nucleare

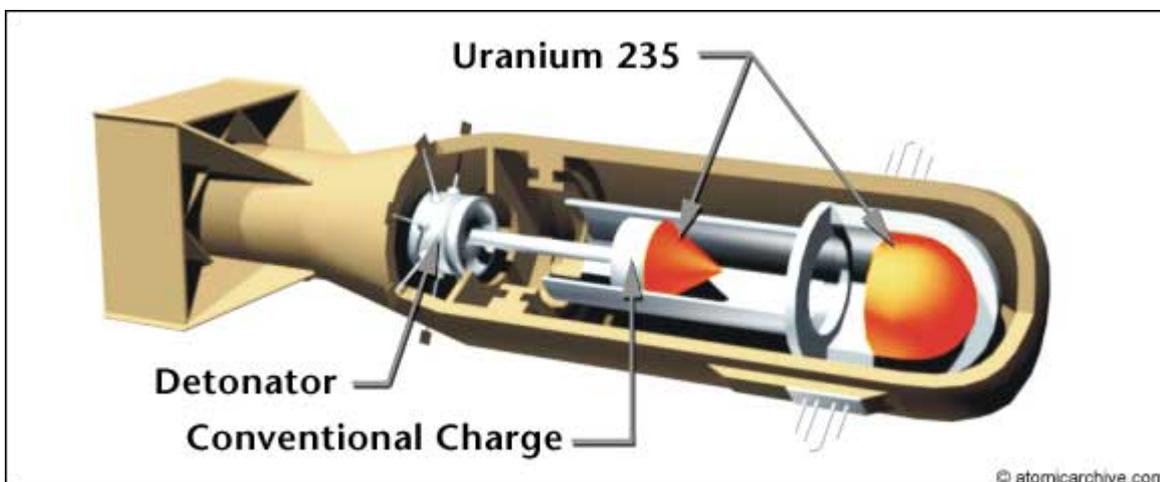
Prime applicazioni della fissione erano bombe a fissione:

“Little Boy”- ^{235}U -lanciata il 06/08/1945 su Hiroshima(75000 morti)

“Fat Boy”- ^{239}Pt -lanciata il 09/08/1945 su Nagasaki(70000 morti)

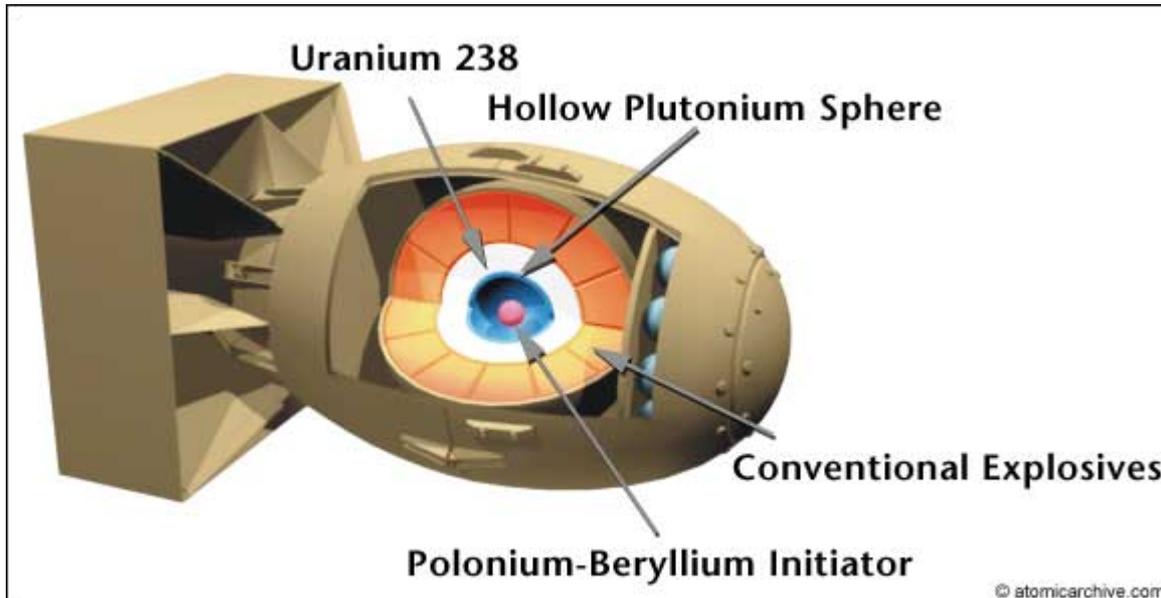
Nella bomba atomica la reazione diventa esplosiva perché vengono messi a contatto rapidamente due masse "subcritiche" sì che il sistema ottenuto risulti, nel complesso, superiore alla massa "critica". La massa critica rappresenta la più piccola quantità di materiale fissibile necessaria per auto sostenere la reazione a catena.

Little Boy: Una Pistola-Tipo Bomba



In sostanza, la Little Boy disegno consisteva in una pistola che ha sparato una massa di uranio 235 in un'altra massa di uranio 235, creando così una massa supercritica. Un requisito fondamentale è che i pezzi si incontrino in un tempo più breve del tempo tra fissioni spontanee. Una volta che i due pezzi di uranio sono riuniti, l'inziatore introduce un burst di neutroni e comincia la reazione a catena, continuando fino a quando l'energia rilasciata diventa così grande che la bomba si soffia semplicemente a parte.

4.5 Fat Man



Il progetto iniziale per la bomba al plutonio si è basata anche sull'utilizzo di un design semplice pistola (nota come "Thin Man") come la bomba all'uranio. Come il plutonio è stato prodotto nei reattori nucleari di Hanford, Washington, si è scoperto che il plutonio non era puro come i campioni iniziali da Radiation Laboratory di Lawrence. Il plutonio conteneva quantità di plutonio 240, un isotopo con un rapido tasso di fissione spontanea. Ciò ha richiesto un diverso tipo di bomba essere progettato. Una bomba pistola di tipo non sarebbe abbastanza veloce per lavorare. Prima che la bomba potrebbe essere montata, alcuni neutroni randagi sarebbero stati emessi dalle fissioni spontanee, e questi sarebbe iniziare una reazione a catena prematura, portando ad una grande riduzione dell'energia rilasciata.

Seth Neddermeyer, uno scienziato di Los Alamos, ha sviluppato l'idea di usare cariche esplosive per comprimere una sfera di plutonio molto rapidamente ad una densità sufficiente per farlo andare critica e produrre un esplosione nucleare.

4.6 Applicazioni mediche

Esiste una grossa branca della medicina che si occupa dell'utilizzo di radiazioni e di sostanze radioattive per fini diagnostici e terapeutici.

Le applicazioni diagnostiche più diffuse sono le Radiografie, la Tac, la Scintigrafia e la PET.

Le applicazioni terapeutiche sono utilizzate soprattutto nella cura dei tumori, la più nota è la radioterapia.

I metodi diagnostici che utilizzano radiazioni sono utilizzati perché permettono di ricostruire immagini di parti interne del corpo, senza fare danni al paziente. Rispetto ad altri tipi di esami danno migliori risultati creando un disagio minimo. Le terapie che utilizzano radiazioni per la cura dei tumori sono in generale utilizzate perché le radiazioni permettono di distruggere le cellule malate, permettendo di ridurre le masse tumorali in modo efficace e riducendo l'impatto degli interventi chirurgici. L'impatto di queste pratiche sull'organismo è di solito molto basso. Le radiografie comportano per un paziente una dose che, di solito, è nell'ordine di un millisievert, altri esami comportano dosi che vanno dai 3-4 millisievert per una Tac, ai circa 10-20 per una PET o per una scintigrafia.

Sono dosi che potrebbero essere considerate abbastanza alte, se confrontate con quelle ricevute dai lavoratori in campo nucleare. Vengono spesso date a persone che necessitano di una diagnosi, ma eventuali danni (una probabilità su mille di tumore per una dose di 20 Msv a tutto il corpo nel peggiore delle ipotesi) a seguito di una PET o di una scintigrafia, sono ampiamente controbilanciati dai benefici ottenuti. Mentre un tempo le radioterapie erano molto pesanti per i pazienti al giorno d'oggi si riesce a sagomare la zona da distruggere molto meglio.

V. Le spiegazioni teoriche di Bohr-Wheeler e Meitner e Frisch della fissione nucleare

5.1 La teoria di Bohr-Wheeler

Una volta arrivato a New York, Bohr si trasferì a Princeton, dove si insediò in qualità di visitatore, presso l'Institute for Advanced Study. Insieme al fisico americano John Wheeler iniziò uno studio più sistematico della teoria della fissione basato sul modello a goccia. Avevano iniziato da poco il loro lavoro, quando Bohr ha avuto un'intuizione che avrebbe trasformato per sempre la ricerca sull'energia nucleare: capì che, nel caso di fissione indotta da neutroni, il comportamento dei due isotopi dell'uranio ^{235}U e ^{238}U , è completamente diverso.

Prima di discutere le implicazioni dell'intuizione di Bohr, soffermiamoci brevemente sul ragionamento, che sarebbe entrato a far parte della teoria definitiva della fissione nucleare; la teoria di Bohr-Wheeler. Nel 1939 erano stati individuati e studiati abbastanza isotopi perché determinate regolarità divenissero evidenti. Nel costituire il nucleo, i protoni tendono ad accoppiarsi ad altri protoni e i neutroni ad altri neutroni. Di conseguenza, i nuclei con numero dispari di protoni e un numero pari di neutroni, o viceversa, sono meno stabili di quelli con un numero pari di protoni e di neutroni (i nuclei che hanno dispari sia protoni sia neutroni sono anch'essi stabili). Per fare un esempio, mentre ^{238}U ha 92 protoni e 146 neutroni, ^{235}U ha 92 protoni e 143 neutroni ed è quindi meno stabile.

Si pensi per esempio al caso della fissione dell'uranio in bario e kripton. Possiamo immaginare l'uranio prima della fissione come una specie di stato "virtuale" di bario e kripton, nel senso che possiamo concepire il nucleo di uranio come una sorta di composto bario-kripton. Questi due elementi hanno cariche positive che si respingono: se non fossero in azione altre forze si respingerebbero semplicemente. Ma la forza nucleare forte tende appunto a mantenerli uniti. Si crea così una "barriera" di protoni tenuto insieme dalla forza nucleare. Quando avviene la fissione, i frammenti devono superare, o attraversare, tale barriera di carica, cosa che può accadere in due modi. La meccanica

quantistica permette di oltrepassare la barriera secondo diversi gradi di probabilità, fino alla cosiddetta fissione spontanea. Essa ha luogo anche senza che un neutrone metta in moto il processo. I nuclei pesanti, dall'uranio in poi, vanno perciò incontro alla fissione spontanea secondo tassi che crescono con la carica nucleare: ecco perché in natura non esistono nuclei stabili molto pesanti. D'altra parte, la vita media per fissione spontanea dell'uranio, per esempio, è talmente lunga, circa 1016 anni, che si trova ancora in grande quantità.

Ciò nondimeno, la fissione può anche avere luogo se il neutrone incidente apporta abbastanza energia da sollevare i potenziali frammenti oltre la barriera di carica. L'energia minima necessaria è detta l'energia di attivazione. Per determinarla Bohr utilizzò il suo modello di reazione nucleare basato sul nucleo composto. Quando un neutrone colpisce l' ^{235}U , si forma un nucleo di ^{236}U ; con numero pari di neutroni e di protoni, esso è quindi più stabile del nucleo di ^{239}U -dispari pari che si forma quando un neutrone colpisce l' ^{238}U . Il risultato è una barriera più bassa e quindi un'energia di attivazione inferiore per l' ^{235}U rispetto all' ^{238}U . Da qui la conclusione fondamentale di Bohr: "L' ^{235}U è soggetto di fissione da neutroni lenti o termici, al contrario dell' ^{238}U ". Ma nell'uranio naturale-quello che si trova nelle miniere l' ^{235}U è più raro dell' ^{238}U . Solo un nucleo su 139 è di ^{235}U .

Bohr si rese conto che la fissione osservata da Hahn era provocata dai nuclei di ^{235}U presenti nel suo campione. I nuclei di ^{238}U , presenti in quantità molto superiori erano essenzialmente spettatori del processo di fissione. La conclusione di Bohr, che si sarebbe rivelata errata, fu che tali condizioni rendevano le armi nucleari, di fatto, un mero oggetto di speculazione accademica. Per costruirle, pensava, si sarebbero dovuti separare grosse quantità di ^{235}U dall' ^{238}U : ciò avrebbe significato investire le risorse di un'intera nazione e non riusciva a immaginare quando mai si sarebbe riusciti a mettere insieme i mezzi necessari. Nel febbraio 1939 Bohr pubblicò i suoi risultati, insieme a Wheeler.

A metà marzo dello stesso anno fu osservata la liberazione di neutroni aggiuntivi richiesti dalla teoria della reazione a catena di Szilard. Artefici della scoperta erano due gruppi: quello di Fermi al Columbia University, con cui collaboravano Szilard e un giovane assistente di nome Walter Zinn, e quello di Frederic Joliot Curie a Parigi.

Nel processo osservato, oltre agli isotopi pesanti risultanti dalla fissione, venivano emessi in media più di due neutroni -2,42 per l' ^{235}U per ognuno di quelli assorbiti per produrre la

fissione; era perciò possibile una reazione a catena, confermando i timore di Szilard. Nonostante le sue pressioni affinché la scoperta fosse mantenuta segreta e i tedeschi ne rimanessero all'oscuro, Joliot e la sua equipe pubblicarono i risultati sul numero di Nature del 18 marzo. Quest'articolo spinse scienziati tedeschi come Harteck a contattare l'Esercito, mentre il risultato di Fermi indusse Pegram a contattare la Marina degli stati Uniti: era iniziata la corsa all'arma nucleare.

5.2 La spiegazione teorica del processo di fissione(Meitner e Frisch)

Bombardando l'uranio con neutroni, Fermi e i suoi collaboratori hanno rilevato che almeno quattro sostanze radioattive sono state prodotte, per due dei quali numeri atomici più grandi di 92, sono stati attribuiti. Ulteriori indagini hanno dimostrato l'esistenza di almeno nove periodi radioattivi, sei dei quali sono stati assegnati ad elementi oltre l'uranio, e isomeria nucleare doveva essere assunta al fine di spiegare il loro comportamento chimico con le loro relazioni genetiche.

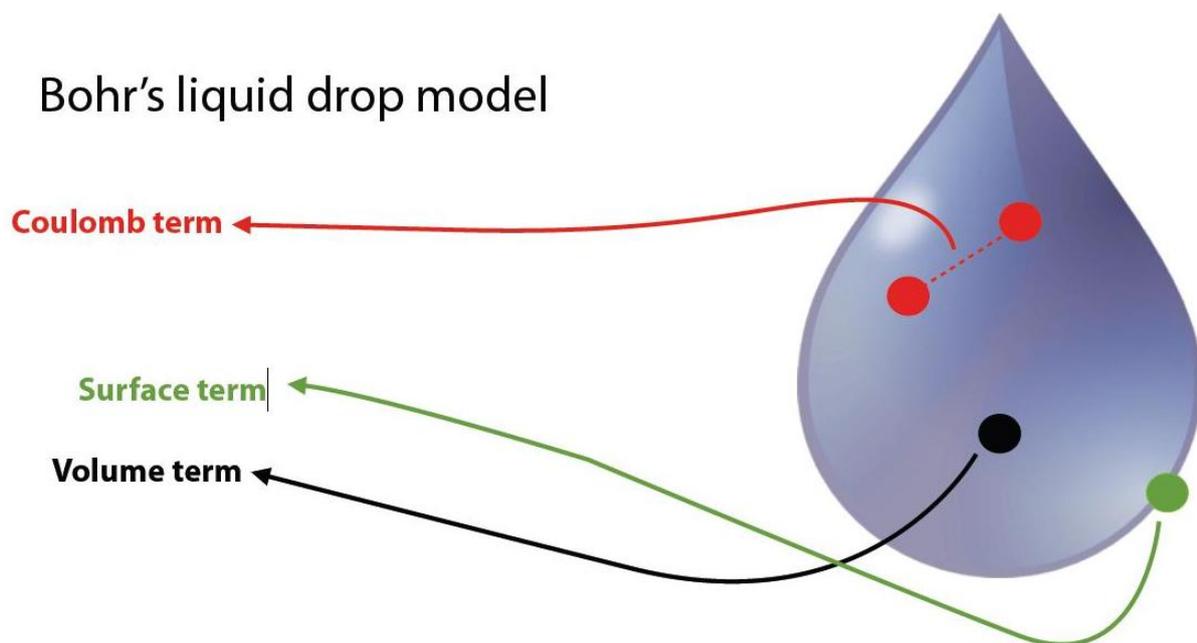
Nel fare le assegnazioni chimiche, si è sempre pensato che questi corpi radioattivi hanno numeri atomici vicino a quello dell'elemento bombardato, dal momento che solo le particelle con una o due cariche erano note per essere emesse da nuclei. Un corpo, per esempio, con proprietà simili a quelle di osmio è stato ipotizzato EKA-osmio ($Z = 94$) invece di osmio ($Z = 76$) o rutenio ($Z = 44$).

A seguito di un osservazione di Curie e Savitch, Hahn e Strassmann hanno scoperto che un gruppo di almeno tre corpi radioattivi, formati da uranio sotto bombardamento di neutroni, sono stati chimicamente simili al bario e, quindi, presumibilmente isotopica con il radio. Ulteriori indagini, però hanno dimostrato che è impossibile separare quei corpi da bario (anche se mesotorio, un isotopo del radio, è stata prontamente separato nello stesso esperimento), in modo da Hahn e Strassmann sono stati costretti a concludere che *gli isotopi di bario ($Z = 56$) sono formati come conseguenza del bombardamento di uranio ($Z = 92$) con neutroni*.

A prima vista, questo risultato sembra molto difficile da capire. La formazione di elementi molto inferiori all'uranio è stato considerata prima, ma è stata sempre respinta per ragioni

fisiche, purché le prove chimiche non erano tagliate tutte chiare. L'emissione, entro breve tempo, di un gran numero di particelle cariche può essere considerata esclusa dalla piccola penetrabilità della 'Coulomb barriera', indicato dalla teoria del decadimento alfa di Gamov.

Sulla base, però, di presentare idee circa il comportamento dei nuclei pesanti, un quadro completamente diverso ed essenzialmente classico di questi nuovi processi di disintegrazione stesso suggerisce. Le particelle in un nucleo pesante saranno tenute a muoversi in modo collettivo che ha qualche somiglianza con il movimento di una goccia di liquido.



Se il movimento è fatto sufficientemente violento aggiungendo energia, una tale goccia potrà dividersi due gocce più piccole.

Nella discussione delle energie coinvolte nella deformazione dei nuclei, il concetto di tensione superficiale è stato usato e il suo valore è stato stimato da semplici considerazioni relative forze nucleari. Va ricordato, tuttavia, che la tensione superficiale di una gocciolina caricata viene diminuita dalla sua carica, e una stima approssimativa indica che la tensione

superficiale di nuclei, diminuendo all'aumentare carica nucleare, può diventare zero per numeri atomici dell'ordine di 100 .

Sembra quindi possibile che il nucleo di uranio ha una sola piccola stabilità di forma, e può, dopo la cattura di neutroni, dividersi in due nuclei di dimensioni quasi uguali (il rapporto esatto di dimensioni a seconda delle caratteristiche strutturali più sottili e forse in parte dal caso). Questi due nuclei si respingono l'un l'altro e dovrebbe ottenere un'energia cinetica totale di c. 200MeV. Come calcolato dal raggio nucleare e la carica. Questa quantità di energia potrebbe essere effettivamente disponibile dalla differenza di frazione imballaggio tra uranio e gli elementi al centro del sistema periodico. L'intero processo di 'fissione' può quindi essere descritto in modo sostanzialmente classico, senza dover considerare 'effetto tunnel "quantistico-meccaniche", che sarebbe effettivamente estremamente piccolo, a causa delle grandi masse coinvolte.

Dopo la divisione, l'elevato rapporto neutroni / protoni dell'uranio tenderà a riadattarsi da beta decadimento al valore inferiore adatto elementi più leggeri. Probabilmente ciascuna parte sarà quindi dar luogo ad una catena di disintegrazioni. Se una delle parti è un isotopo del barium, l'altro sarà kripton ($Z = 92-56$), che potrebbe decadere nel corso del rubidio, stronzio e ittrio di zirconio. Forse uno o due delle catene bario-lantanio-cerio supposte sono poi effettivamente catene stronzio-ittrio-zirconio.

E 'possibile, e ci sembra piuttosto probabile, che i periodi che sono stati attribuiti a elementi oltre l'uranio sono anche causa di elementi leggeri. Dalle prove chimiche, i due periodi brevi (10 sec. e 40 sec.) finora attribuiti a ^{239}U , potrebbero essere masurio isotopi ($Z = 43$) in decomposizione attraverso rutenio, rodio, palladio e argento in cadmio.

In tutti questi casi potrebbe non essere necessario assumere isomersim nucleare, ma i diversi periodi radioattivi appartenenti allo stesso elemento chimico può quindi essere attribuito a diversi isotopi di questo elemento, poiché proporzioni variabili di neutroni possono essere date alle due parti del nucleo di uranio.

Bombardando il torio con neutroni, sono le attività che sono state attribuite a radio e attinio isotopi. Alcuni di questi periodi sono circa pari a periodi di bario e lantanio isotopi derivanti dal bombardamento dell'uranio. Pertanto Vorremmo suggerire che questi periodi sono dovuti ad una 'fissione' di torio, che è simile a quella di uranio e di risultati in parte degli stessi prodotti.

Si potrebbe ricordare che il corpo con il tempo di dimezzamento 24 min^2 che è stato identificato chimicamente con l'uranio è probabilmente davvero ^{239}U e va in eka-renio che appare inattivo, ma può decadere lentamente, probabilmente con emissione di particelle alfa. (Dalla ispezione degli elementi radioattivi naturali, ^{239}U non possono essere tenuti a dare più di uno o due decadimenti beta; la lunga catena di decadimenti osservati ci ha sempre perplesso). La formazione di questo corpo è un processo di risonanza tipica ; lo stato composto deve avere un tempo di vita di un milione di volte più lungo del tempo che ci sarebbe vorrebbe il nucleo di dividersi. Forse questo stato corrisponde a qualche tipo altamente simmetrico di movimento della materia nucleare che non favorisce 'fissione' del nucleo.

5.3 La trattazione matematica della fissione secondo la teoria di Bohr-Wheeler

Nel giro di poche settimane dalla scoperta della fissione lenta indotta da neutroni di uranio, Niels Bohr si accorse presto che la fissione si verificava solo con i neutroni lenti nell'Uranio 235, un raro isotopo dell'Uranio che nel nucleo ha 143 neutroni e 92 protoni. Anche se l'idea non fu accettata subito da tutti, Bohr ha proseguito con il suo lavoro sulla teoria della fissione nucleare, e, nel 1 settembre 1939 lui e John Wheeler di Princeton University pubblicarono un'analisi approfondita della teoria della fissione [Bohr e Wheeler 1939]. In questo lavoro Bohr e Wheeler hanno analizzato l'energia della fissione nucleare basata sul modello di "liquid drop" dei nuclei. Bohr e Wheeler hanno mostrato come il calcolo della superficie e dell'energia di Coulomb di un nucleo, può essere distorta da una forma inizialmente sferica rivelata e che esiste un limite naturale alla stabilità dei nuclei contro la fissione spontanea (SF) .Questo limite è esprimibile come:

$$(Z^2/A)=2(a_s/a_c)$$

dove Z e A sono numeri atomici e di massa, a_s e a_c sono parametri superficiali energetici di Coulomb, hanno rispettivamente come valori $\sim 18 \text{ MeV}$ e $0,72\text{MeV}$, rispettivamente.

Tuttavia, il modello ellissoidale non rispecchia realmente l'approccio preso da Bohr e Wheeler, che ha usato una somma di polinomi di Legendre per descrivere la forma della superficie del nucleo quando distorce. A dire il vero, se il limite di SF è una questione d'instabilità contro lievi distorsioni allora dovrebbe essere completamente irrilevante come la distorsione è modellata.

In questo lavoro, cerco di percorrere una via di mezzo impostando giù passaggi di riferimento nei calcoli.

Vediamo il modello di Legendre - polinomiale di un nucleo distorto è descritto, e il calcolo del volume di nucleo viene effettuata.

Bohr e Wheeler hanno iniziato immaginando un nucleo inizialmente sferico di raggio R_0 subire una distorsione esprimibile come somma di polinomi di Legendre:

$$r(\theta) = R_0 \{1 + \alpha_0 + \alpha_2 P_2(\cos \theta) + \dots\},$$

dove θ è l'angolo polare nel solito sistema di coordinate sferiche.

Tale perturbazione, è disegnata schematicamente nella figura 1, dove il nucleo è stato perturbato in una forma di manubrio lungo l'asse polare. I coefficienti di perturbazione α_0 e α_2 sono presunti essere piccoli, utilizzando solo due coefficienti è sufficiente per ricavare il limite di SF. Coefficiente α_2 detta la forma non sferica del nucleo; α_0 è necessario essere in grado di garantire la conservazione volume come si verifica la distorsione. E' convenzionale di considerare α_2 come indipendente coefficiente e, infine, esprimono sia l'area sia l'energie Coulomb come funzioni di esso da solo.

Il succo del calcolo Bohr-Wheeler era quello di confrontare l'energia totale del nucleo ($\alpha_2 = 0$) a quello che essa ha avuto nella sua condizione sferica iniziale ($\alpha_2 = 0$), e quindi determinare quale circostanza deve contenere in modo che qualsiasi perturbazione, non importa quanto piccola sia, porterà ad una configurazione di energia più bassa. I contributi di ordine più bassi a queste energie di entrambi dimostrano di essere di ordine α_2^2

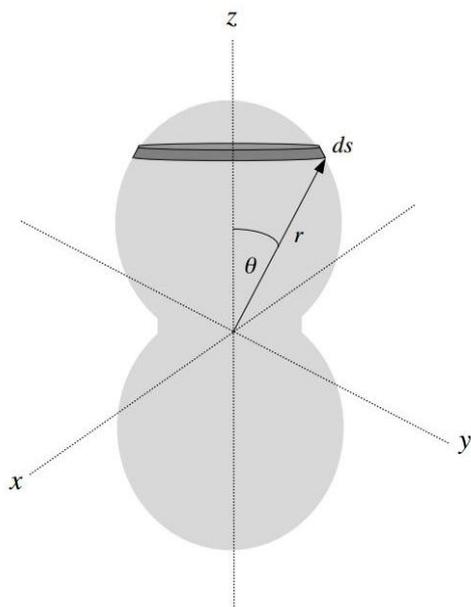


Figura 1

Tale termine introdurrebbe una distorsione della forma del nucleo, rendendolo alquanto appiattito al polo sud ($\theta = \pi$). Incorporando solo polinomi di Legendre, anche di ordine semplifica la situazione per avere un nucleo in cui il centro di massa rimane all'origine delle coordinate e che è simmetrico rispetto al piano xy.

Poiché $R(\theta)$ contiene alcuna dipendenza dall'angolo azimutale φ , il nucleo rimane assialmente simmetrico attorno all'asse polare. Il segno del α_2 determina la natura della distorsione. Se $\alpha_2 > 0$, il nucleo diventa spremuto all'equatore e allungata ai poli, come suggerito in figura 1; $\alpha_2 < 0$ produce l'effetto opposto, rendendo il nucleo alquanto forma di ciambella nel piano equatoriale.

La domanda è 'Perché polinomi di Legendre?' Il valore dei polinomi di Legendre, e, in particolare, dei polinomi associati di Legendre e armoniche sferiche costruite da loro, è che essi costituiscono un insieme ortogonale di funzioni sopra (θ, φ) con un particolarmente semplice rapporto di ortogonalità. Di conseguenza, essi formano una famiglia di funzioni naturale per descrivere perturbazioni da circolarità o sfericità.

Il primo compito è quello di garantire la conservazione di volume. Il volume del nucleo deformato è:

$$V = \int_{\theta=0}^{\pi} \int_{r=0}^{r(\theta)} \int_{\varphi=0}^{2\pi} r^2 \sin \theta \, d\theta \, dr \, d\varphi \quad (2)$$

$$r(\theta) = R_0 [1 + \alpha_0 + \alpha_2 P_2]$$

con attenzione qui l'ordine di integrazioni oltre r e θ . Poiché il limite superiore di r è un funzione di θ , l'integrale r deve essere fatto prima e poi che oltre θ . La φ oltre integrale

dà direttamente 2π . Quindi, abbiamo

$$V = \frac{2\pi}{3} \int_{\theta=0}^{\pi} r^3 \sin\theta d\theta \quad (3)$$

$$V = \left(\frac{2\pi R_0^3}{3}\right) \int_{\theta=0}^{\pi} [1 + \alpha_0 + \alpha_2 P_2]^3 \sin\theta d\theta$$

In tutti questi casi è conveniente fare un cambiamento di variabile $x = \cos \theta$, che rende $\sin\theta d\theta$ come $-dx$, con limiti $x = (1, -1)$. I limiti possono essere invertiti, con il risultato che il segno negativo $-dx$ può essere eliminato. La relazione per polinomi di Legendre,

$$V = \left(\frac{2\pi R_0^3}{3}\right) \int_{\theta=0}^{\pi} [1 + \alpha_0 + \alpha_2 P_2]^3 dx$$

$$\int_{-1}^1 P_i P_j dx = \frac{2}{i+j+1} \delta_i^j \quad (4)$$

$$V = \left(\frac{2\pi R_0^3}{3}\right) \left\{ (1+\alpha_0)^3 \int_{-1}^1 dx + 3(1+\alpha_0)^2 \alpha_2 \int_{-1}^1 P_2 dx + 3(1+\alpha_0) \alpha_2^2 \int_{-1}^1 P_2^2 dx + \alpha_2^3 \int_{-1}^1 P_2^3 dx \right\}$$

Mantenere termin α_2^2 , L'integrale di volume e

$$V = \left(\frac{4\pi R_0^3}{3}\right) \left\{ (1+\alpha_0)^3 + \frac{3}{5} (1+\alpha_0) \alpha_2^2 + \dots \right\} \quad (5)$$

Se il volume è conservato, quindi il contenuto della staffa di rinforzo in (5) deve essere uguale all'unità.

$$1 + 3\alpha_0 + 3\alpha_0^2 + \alpha_0^3 + \frac{3}{5} \alpha_2^2 + \frac{3}{5} \alpha_0 \alpha_2^2 = 1$$

Se α_0 e α_2 sono presunti più piccoli, rispetto alla $\alpha_0 \alpha_2^2$ e α_0^3 termini possono essere eliminati, ciò che rimane è un'equazione di secondo grado in α_0 la cui soluzione è

$$\alpha_0^2 + \alpha_0 + \frac{1}{5} \alpha_2^2 = 0 \text{ una quadratica in } \alpha_0$$

$\alpha_0 = \frac{-1 \pm \sqrt{1 - 4\alpha_2^2/5}}{2} \sim \frac{-1 \pm (1 + \frac{2\alpha_2^2}{5} + \dots)}{2}$
 dove invoco una espansione binomiale della radice quadrata. Per decidere su quale radice di scegliere, se $\alpha_2 \rightarrow 0$ e il volume è conservato, dobbiamo pure avere $\alpha_0 \rightarrow 0$. Il segno superiore è la scelta corretta, lasciando

$$\alpha_0 \sim -\frac{1}{5} \alpha_2^2 \quad (6)$$

VI. Reattore nucleare

6.1 Cos'è il reattore nucleare (a fissione)?

Il reattore nucleare è un dispositivo nel quale può essere mantenuta e controllata una reazione nucleare (di fissione o fusione) per la produzione di energia.

Il reattore nucleare a fissione (per antonomasia, reattore nucleare) è un impianto costituito da un nocciolo (o 'core') contenente il combustibile fissile (uranio, plutonio, torio) che, in quantità sufficiente (superiore alla massa critica), alimenta la reazione a catena di fissione. Affinché il numero di neutroni nel nocciolo resti costante (condizione necessaria perché non avvenga una reazione esplosiva) è necessaria la presenza di barre di controllo costituite da materiali diversi (acciaio al boro, cadmio, afnio, ecc.) con la proprietà di assorbire i neutroni in eccesso.

Nei reattori nucleari lenti o termici (U^{235} , Pu^{239}) la reazione di fissione è alimentata solo dai neutroni a bassa energia: nel nocciolo è quindi presente un moderatore (acqua pesante, berillio, grafite) in grado di rallentare, tramite gli urti, i neutroni veloci per aumentare la probabilità di produrre la reazione.

Nei reattori nucleari veloci (U^{238} , Th^{232}) la reazione a catena è mantenuta dai neutroni ad alta energia che non necessitano di un moderatore: tipico caso è il reattore autofertilizzante (FBR o fast breeder reactor) in cui l'eccesso di neutroni prodotti dalla fissione di U^{235} viene assorbito dal U^{238} , elemento fertile, più abbondante in natura, che si trasforma in Pu^{239} (fissile), utilizzabile a sua volta per la reazione (es. il Superphénix a Creys-Malville nei pressi di Lione, con potenza di 1300 MW).

Per estrarre dal nocciolo il calore prodotto dalla reazione (e alimentare uno scambiatore di calore nel caso di produzione di energia) vengono usati fluidi refrigeranti, in base ai quali i reattori nucleari sono classificati: acqua leggera in pressione (PWR o pressurized water reactor), acqua bollente (BWR o boiling water reactor), acqua pesante (HWR o heavy water reactor), CO_2 o elio (GCR o gas cooled reactor).

Un opportuno sistema di schermatura dalle radiazioni prodotte dalla reazione (neutroni e raggi gamma) completa l'impianto.

A partire dalla "pila atomica" realizzata da E. Fermi nel 1942, l'evoluzione dei reattori nucleari ha portato, oltre alla costruzione di piccoli impianti utilizzati unicamente per la produzione di radioisotopi nella ricerca scientifica, allo sviluppo di reattori di potenza, proposti a partire dagli anni '60 come fonte alternativa di energia in alcuni paesi (Francia, USA, URSS), dando origine a un ampio dibattito legato all'inquinamento ambientale, sia di carattere termico sia legato all'eliminazione delle scorie radioattive create dal decadimento del materiale fissile, nonché al rischio di incidenti, dovuto alla possibilità di innesco di reazioni non controllabili. Per risolvere questo ultimo problema sono stati studiati reattori nucleari in cui il nocciolo viene automaticamente immerso in una sostanza con alto potere assorbente dei neutroni in caso di incidente.

6.2 Reattore: problemi di sicurezza

Sicurezza dei reattori è stato chiamato in causa da tre gravi incidenti, uno nel 1979 al Mile Island centrale Tre (TMI) nucleare in Pennsylvania, Fukushima e l'altro nel 1986 a Chernobyl RBMK (reattore Bolshoy Moshchnosty Kanalnyin) nella ex Unione Sovietica (Fig). Quest'ultimo è stato il più grave incidente del reattore di storia, con 31 persone di morire di avvelenamento da radiazione diretta e migliaia di più esposti a dosi elevate di radiazioni per un periodo di quasi 20 anni. Controversie ancora fester per danni totale del disastro di Chernobyl, anche se un ampio studio riportato da un gruppo sponsorizzato ONU di scienziati indica che il danno è stato un po' meno di quanto temuto in precedenza. Il reattore di Chernobyl ha utilizzato un moderatore di grafite e acqua refrigerante senza una struttura di contenimento. Anche se alcuni dei difetti di progettazione sono stati corretti dopo questo incidente, RBMKs sono considerati i reattori più pericolosi.

Fukushima è una città del Giappone, capoluogo della prefettura omonima sull'isola di Honshū. Nel 2006 la città contava circa 290.000 abitanti. È nota soprattutto per il disastro nucleare di Fukushima Daiichi. La città ha assunto un'improvvisa notorietà mondiale quando, a seguito di un terremoto, l'11 marzo 2011 si è verificato un grave

incidente alla centrale nucleare situata a sessanta chilometri di distanza. I livelli di radiazioni raggiunti, malgrado non abbiano portato all'evacuazione dell'abitato, hanno indotto la popolazione a rimanere in casa la sera, riducendo le attività economiche notturne in città



Centrale nucleare di Chernobyl a seguito dell'incidente di 1986.

Anche se l'incidente di TMI era molto più piccolo per estensione e ha provocato nessun morto, ha avuto un profondo impatto psicologico sulla vista del pubblico del nucleare commerciale. L'impianto TMI era un pressurizzata reattore ad acqua leggera, mentre Chernobyl aveva un modello di reattore simile a quello utilizzato per i reattori a Hanford, Washington, che ha prodotto plutonio per le armi nucleari Uniti United. Entrambi gli incidenti riconducibili ad errori umani ignorando le caratteristiche di sicurezza integrate nei sistemi di reattori. Caratteristiche delle nuove generazioni di reattori compresi i sistemi di sicurezza passiva e di un minor numero di tubi e valvole sono progettate per ridurre al minimo il rischio di incidenti e di limitare gli effetti dannosi si verificano tali incidenti.

VII. Vantaggi e svantaggi del nucleare

7.1 Vantaggi del nucleare

Spesso il nucleare viene presentato come un male da combattere o come miracolosa pozione per risollevare l'economia nazionale. Non ci riconosciamo in entrambe le visioni. Il nucleare rappresenta un'opzione energetica come le altre con i suoi "pro" ed i suoi "contro". Proveremo ad elencare i principali vantaggi e svantaggi.

Il nucleare presenta indubbiamente dei vantaggi:

- Una centrale nucleare non emette CO₂
Le centrali nucleari non producono anidride carbonica ed ossidi di azoto e di zolfo, principali cause del buco nell'ozono e dell'effetto serra.
- Vantaggio nella bilancia dei pagamenti
La produzione di energia dal nucleare riduce l'importazione di petrolio e la dipendenza delle economie dal petrolio. La copertura del fabbisogno energetico interno tramite il nucleare riduce la possibilità degli shock esterni sull'economia e consente ai governi un minore carico di spesa sulla bilancia dei pagamenti con l'estero. Il tutto si traduce in una maggiore stabilità del sistema economico nazionale.
- Maggiore stabilità politica
Le principali riserve petrolifere sono concentrate in pochi paesi ad elevata instabilità politica (Medio Oriente) che rischia di trasmettersi anche nei paesi fortemente dipendenti dall'import del petrolio. L'uso del nucleare riduce la dipendenza occidentale dal petrolio mediorientale.

7.2 Svantaggi del nucleare

Vediamo ora quali svantaggi porta l'uso dell'energia nucleare:

- Conseguenze in caso di incidente

La storia ha già mostrato la gravità delle conseguenze degli incidenti alle centrali nucleari. Le radiazioni a cui la popolazione viene esposta causano un maggiore rischio di morte per leucemia e tumore. Dall'incidente di Chernobyl la sicurezza delle centrali nucleari è diventato uno dei principali aspetti critici dell'energia nucleare per uso civile. Negli ultimi anni il progresso tecnologico ha notevolmente migliorato la sicurezza delle centrali nucleari dotate di reattori di ultima generazione.

- Le scorie nucleari

Purtroppo le scorie nucleari sono un altro aspetto critico del nucleare. Non possono essere distrutte e l'unica soluzione, per il momento, sembra essere lo stoccaggio per migliaia di anni in depositi geologici o ingegneristici. La ricerca di un deposito sicuro è tra i principali obiettivi della UE e degli Usa. Sono necessari anni di studi e grandi investimenti per l'individuazione delle soluzioni di stoccaggio per centinaia di migliaia di anni.

- Localizzazione centrali nucleari e proteste locali

Anche il processo di localizzazione di una centrale nucleare o del deposito di scorie è molto difficoltoso. Nessuna comunità locale accetta di sacrificare il proprio territorio per ospitare i rifiuti nucleari. La Sardegna, la Puglia, la Basilicata sono i recenti casi italiani di forti proteste antinucleari (2003). Nello stesso anno una comunità locale cinese si oppose con successo alla decisione del governo di costruire un deposito geologico di scorie attuando una dura e prolungata protesta. In entrambi i casi vinsero le popolazioni locali.

- Il terrorismo

Viviamo in un'epoca in cui poche persone possono compiere grandi danni all'umanità. Il ricordo della tragedia dell'11 settembre 2001 ai grattacieli del World Trade Center è stato un duro shock per l'intera società occidentale. Il rischio che le

centrali nucleari siano prese come obiettivi per atti di terrorismo o come bombe sporche è quindi molto realistico. E' lecito e razionale preoccuparsi. Le nuove centrali nucleari dovranno includere questo aspetto fin dalla fase di progettazione.

- o Il trasporto di materiale nucleare

Il trasporto di scorie e di materiale nucleare è uno degli aspetti più critici della questione "sicurezza". Durante il trasporto, oltre all'opposizione delle popolazioni che vedranno passare treni o navi con carichi radioattivi vicino alle proprie abitazioni, sussiste il rischio di incidenti e di attentati terroristici. In Francia, i treni speciali adibiti al trasporto di scorie nucleari sono scortati da "carri armati" e da poliziotti a cavallo. L'itinerario del treno cambia in continuazione all'insaputa delle popolazioni residenti nei pressi delle ferrovie. Per questi motivi i depositi di scorie dovrebbero risiedere nei pressi delle centrali nucleari evitando in questo modo la necessità del trasporto delle scorie. La ricerca tecnologica e scientifica non ha ancora trovato il modo per distruggere le scorie all'interno delle stesse centrali nucleari. Si attendono ancora risposte in tale senso.

VIII. Bibliografia

8.1 Biografia Lisa Meitner

Lise Meitner è una figura relativamente poco nota al grande pubblico e spesso anche agli specialisti in fisica nucleare, campo in cui questa scienziata si distinse in modo evidente nel '900. Esiste, tuttavia, di lei un'ampia opera biografica: quella forse più conosciuta è il libro scritto dal chimico Ruth Sime, una donna e scienziata anch'ella, apprezzato in tutto il mondo e tradotto in più lingue. Meitner è stata altresì oggetto di rappresentazioni teatrali, come la sua più anziana e famosa coeva, Marie Curie.

La Meitner nasce a Vienna nel 1878, frequenta le scuole pubbliche sino all'equivalente della nostra scuola media. Al tempo non esistono scuole secondarie femminili e Lise deve prepararsi alla maturità privatamente per poi iscriversi all'università, nel frattempo apertasi alle donne. La famiglia, benestante, ebrea non osservante, non la ostacola nei suoi propositi. Siamo ai primi del '900, Vienna è una città vivace e fervente intellettualmente. Lise Meitner frequenta le lezioni di matematica del professor Gegenbauer (di cui si ricordano i polinomi impiegati nella meccanica quantistica), ma rimane impressionata soprattutto da Boltzmann, il famoso fisico, entusiasta e aperto comunicatore: sono probabilmente le sue lezioni che l'aiuteranno a scegliere di laurearsi in fisica. Il suo lavoro di tesi con il professor Exner è sull'analogia tra comportamento della conduzione di calore e comportamento della conduzione elettrica, entrambi nel caso di corpi disomogenei: per il caso elettrico già esiste la formula di Maxwell. Il compito della giovane austriaca è di verificare sperimentalmente la succitata analogia e di riscrivere la formula di Maxwell nel caso del calore. Vi riesce e ottiene il titolo di dottore nel 1906: il secondo in Austria per una donna. Lise, dopo il tentativo, non riuscito, di trasferirsi a Parigi a lavorare con Marie Curie, va a Berlino nel 1907, ove lavorava Planck, conosciuto, e ammirato, da lei a Vienna.

Il suo intento è di approfondire lo studio della fisica nella capitale tedesca e i suoi genitori la supportano anche finanziariamente in questa passione. Di quest'aiuto economico ha

bisogno, poiché al tempo a Berlino non erano ammesse le donne all'università: già riuscire a lavorarvi gratuitamente, se pur con difficoltà, costituiva un successo. Rimarrà non pagata sino al 1912, quando, nominata assistente di Planck, riceverà il suo primo stipendio. Inizia a lavorare con Otto Hahn, poi amico di una vita, nel campo della radioattività, argomento al centro dell'attenzione scientifica dell'epoca, in cui Hahn eccelleva. La loro collaborazione è feconda, Otto, il chimico e Lise, il fisico, si completano. Sono anni belli per la Meitner, pubblica con Hahn diversi articoli nel campo della radioattività, una menzione tra le quali merita quello sulla scoperta del protoattinio. Da sola compie ricerche in fisica nucleare, l'effetto Auger è scoperto da lei, studia il fenomeno della conversione interna e partecipa alla controversia scientifica sul decadimento beta alcuni, tra cui l'austriaca, ritengono che si tratti di uno spettro solo in apparenza continuo, ma in realtà discreto; Ellis, a ragione, ritiene che sia continuo, in contrasto con l'opinione della comunità scientifica internazionale. Con Hahn sappiamo che le rivoluzioni scientifiche passano per questo tipo di fenomeno: lo scontro con il paradigma dell'epoca, il suo superamento e l'instaurarsi di un nuovo paradigma. La continuità dell'effetto beta porterà alla scoperta di una nuova interazione, la debole, e alla scoperta del neutrino. Si noti che anche durante la pausa della prima guerra mondiale, la Meitner non resta inerte. Inizialmente presta servizio come infermiera radiologa, come del resto anche la Curie, poi, ritornata a Berlino, ricomincia a lavorare e collaborare con Hahn a distanza: Otto si trova al fronte e tra i due vi è una fitta corrispondenza epistolare. Con il tempo, ottiene la libera docenza e poi è professore, prima donna in Germania con una cattedra in fisica. È un'autorità nel suo campo, molti si fidano delle sue indiscusse doti di fisico sperimentale evidenziate sin dai tempi della tesi e migliorate nel tempo attraverso le sue doti personali, la sua esperienza con Hahn e i suoi contatti con gli eminenti fisici che si ritrovavano, prima o poi, a passare per Berlino, per loro indiscusso punto d'attrazione dell'epoca. Conosce Einstein: di lui è l'espressione contenuta nel titolo di questo contributo a proposito di Lise Meitner: la "Marie Curie tedesca". Con il tempo, però il nazismo prende potere e la Meitner benché convertita al protestantesimo, rimane comunque ebrea, secondo la concezione razziale di Hitler. Lavorando presso il Kaiser Wilhelm Institut, istituzione privata, riesce a eludere gli effetti devastanti del nazismo, che con le prime leggi razziali limita l'accesso alle sole istituzioni pubbliche da parte dei non ariani. Poi la situazione

precipita e nel '38, con l'Anschluss dell'Austria alla Germania, per la Meitner, ormai cittadina tedesca ed ebrea, la situazione si fa direttamente pesantissima. Perciò, in modo molto avventuroso, fugge in Svezia, nel luglio dello stesso anno, aiutata da amici, tra cui Hahn, Fokker e Coster. All'epoca la Meitner ha già 60 anni e, nonostante la sua fama, si trova a lavorare in condizioni non idonee a sfruttare le sue notevoli capacità ed esperienza. Nello stesso anno, la fisica nucleare, già da anni in fermento per la ricerca degli elementi transuranici con Enrico Fermi in testa, perviene all'ennesima scoperta importante del secolo: la fissione nucleare. Otto Hahn con Strassmann, cercando gli elementi transuranici, ottiene in laboratorio la fissione nucleare. Chiede consiglio per via epistolare alla Meitner, che con il nipote Otto Robert Frisch ne fornisce la spiegazione fisica, il nucleo di Uranio bombardato da neutroni si scinde in due nuclei di massa simile, liberando moltissima energia, secondo il principio di equivalenza massa energia di Einstein. Che tale principio possa essere utilizzato come base per la costruzione di un ordigno bellico è subito intuito, anche se la messa in opera presenta difficoltà pratiche. Ma menti brillanti certo non mancano nel periodo, Fermi ne realizza un primo prototipo nel '42 con la pila nucleare. La paura che Hitler possa entrare in possesso di un oggetto così devastante è grande e il pur pacifista Einstein si ritrova a sostenere il progetto della bomba presso il governo americano. Negli anni seguenti, la Germania non trova la soluzione per la costruzione dell'ordigno. Gli Stati Uniti, invece, dopo averlo costruito, benché il pericolo che la Germania possa disporre della bomba sia ormai scongiurato, lo utilizzano nel '45 prima a Hiroshima e poi a Nagasaki nella sua versione al Plutonio. Conseguenze: migliaia di morti e l'orrore di vittime innocenti. I geni fisici del periodo sono scioccati dalle conseguenze delle loro ricerche, ma ormai il gioco è fatto. Il tedesco Hahn riceverà il Nobel nello stesso anno per la scoperta della fissione nucleare, assegnato per il '44. A Meitner non verrà dato alcun riconoscimento, cosa che forse, visto il terribile utilizzo di tale scoperta, non le farà neanche tanto dispiacere: negli anni precedenti aveva rifiutato di partecipare ad attività americane correlate con la costruzione della bomba, del resto in odio anche al suo amico Hahn. Negli ultimi anni della sua lunga vita, la Meitner morirà quasi novantenne, si ritira a Cambridge non senza avere ricevuto vari riconoscimenti, di cui il più prestigioso è il premio Enrico Fermi, ricevuto nel 1966, con Hahn e Strassman.

Attualmente viene ricordata in diversi modi, attraverso premi, riconoscimenti e commemorazioni.

8.2 Otto Frisch (1904 - 1979)

Otto Robert Frisch è nato 1 Ottobre 1904, a Vienna. Figlio di un pittore e una pianista, che aveva ereditato dalla zia Lise Meitner l'amore per la fisica, la laurea presso l'Università di Vienna nel 1926 con un lavoro sull'effetto dell'elettrone appena scoperto di sali. Dopo alcuni anni di lavoro in laboratori relativamente oscuri in tedesco, Frisch ha ottenuto una posizione di Amburgo sotto il premio Nobel scienziato Otto Stern. Qui, ha prodotto il lavoro sulla diffrazione di atomi (utilizzando superfici di cristallo), e anche dimostrato che il momento magnetico del protone era molto più grande di quanto era stato precedentemente supportato.

Frisch prima ha lavorato presso le università di Berlino e Amburgo, ma è stato respinto ai sensi delle leggi razziali tedesche nel 1933 e si è trasferito all'Istituto di Fisica Teorica a Copenaghen. L'adesione di Adolf Hitler al cancellierato della Germania nello stesso anno, fece decidere a Frisch di trasferirsi a Londra, dove unisce il personale al Birkbeck College e lavora sulla tecnologia cloud da camera e radioattività artificiale. A seguito di questo, per un periodo di lavoro di cinque anni si trasferisce a Copenaghen con Niels Bohr, dove si specializza in fisica nucleare, in particolare la fisica dei neutroni.

Nel dicembre del 1939, Lise Meitner, che viveva in esilio a Stoccolma, informa Frisch della visita che Otto Hahn e Fritz Strassmann e che avevano trovato il fenomeno che fortemente suggerisce la fissione nucleare dell'uranio mediante bombardamento (lento) di neutroni. Hahn e Strassmann a Berlino avevano scoperto che la collisione di un neutrone con un nucleo di uranio produce il bario come uno dei suoi sottoprodotti. Frisch e Meitner spiegano il processo in termini di eccessiva carica elettrica, stimati dall'energia rilasciata e inventano il termine "fissione" per descriverlo. Frisch torna a Copenaghen, dove sarà rapidamente in grado di isolare i frammenti prodotti dalle reazioni di fissione.

Nell'estate del 1939, Frisch lascia la Danimarca per quello che sarebbe stato un breve viaggio a Birmingham, ma l'inizio della seconda guerra mondiale preclude il suo

ritorno. Lavorando con il fisico Rudolf Peierls, dimostra che la fissione di uranio aveva il potenziale per creare una reazione a catena volatile che, quando si usa l'uranio-235, potrebbe essere utilizzato per sviluppare un'arma estremamente distruttivo.

Frisch era stato lasciato fuori dalla ricerca perché il suo status di straniero rappresentava un rischio per la sicurezza. Nel 1943, insieme a molti altri scienziati che erano stati esiliati dalla Germania, Frisch è stato naturalizzato come cittadino britannico, e gli fu permesso di lavorare per il Progetto Manhattan, come parte della *missione inglese*. Lui è stato a capo del gruppo Critical Assembly.

Dopo la guerra, Frisch tornò in Inghilterra a lavorare per l'Atomic Energy Research Establishment di Harwell e ottenne la cattedra Jackson di Fisica all'Università di Cambridge 1947-1972, quando si ritirò a concentrarsi sui suoi libri e gli interessi commerciali. Morì il 22 settembre 1979, a Cambridge, in Inghilterra.

Conclusioni

La fissione nucleare è una reazione nucleare in cui il nucleo di un elemento pesante - ad esempio uranio-235 o plutonio 239 - decade in frammenti di minori dimensioni. La fissione può avvenire spontaneamente (fissione spontanea) oppure essere indotta tramite bombardamento di neutroni.

È la reazione nucleare comunemente utilizzata nei reattori nucleari e nei tipi più semplici di bombe atomiche, quali le bombe all'uranio (come quella che colpì Hiroshima) o al plutonio (come quella che colpì Nagasaki). Tutte le bombe a fissione nucleare vengono militarmente etichettate come Bombe A.

Il 22 ottobre 1934 la prima fissione nucleare artificiale (cioè provocata dall'uomo) della storia era stata realizzata da un gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi (i cosiddetti "ragazzi di via Panisperna") mentre bombardavano dell'uranio con neutroni. Il gruppo di fisici italiani però non si accorse di ciò che era avvenuto ma ritenne invece di aver prodotto dei nuovi elementi transuranici. Alla fine del dicembre 1938, esattamente nella notte tra il 17 e il 18, due chimici nucleari tedeschi, Otto Hahn e il suo giovane assistente Fritz Strassmann, furono i primi a dimostrare sperimentalmente che un nucleo di uranio 235, qualora assorba un neutrone, può dividersi in due o più frammenti dando luogo così alla fissione del nucleo (fu la chimica Ida Noddack ad ipotizzare per prima la fissione dell'atomo nel 1934, mentre i fondamenti teorici si devono a Lise Meitner). A questo punto per i chimici e fisici iniziò a prendere forma l'idea che si potesse utilizzare questo processo, costruendo dei reattori che contenessero la reazione, per produrre energia o degli ordigni nucleari.

La nascita dell'energia nucleare come fonte concreta di energia si può far risalire verso la metà degli anni sessanta, quando se ne dimostrò la competitività economica. Lo sviluppo fu inizialmente assai accelerato ma successivamente ebbe un rallentamento legato a forti contestazioni sugli aspetti di sicurezza che determinarono crescenti difficoltà di ordine finanziario a causa dei ritardi nel concedere le autorizzazioni per il funzionamento degli

impianti da parte degli organi nazionali per la sicurezza. In alcuni casi, gli stessi organi, imposero delle sostanziali modifiche agli impianti in servizio o addirittura delle chiusure definitive. L'incidente di Three Mile Island (1979), Chernobyl (1986) e il recente incidente nella centrale di Fukushima in Giappone (marzo 2011) hanno rinfocolato le polemiche nei confronti dell'opzione nucleare. Quest'ultimo incidente è stato di gran lunga più grave e per questo ha avuto un notevole impatto sull'opinione pubblica.

L'energia nucleare è una fonte energetica da valutare attentamente sia negli aspetti positivi che negativi.

Referenze

Amaldi, E., From the discovery of the neutron to the discovery of nuclear fission "Una bomba, dieci storie" di Stefania Maurizi.

Battimelli, G. and M. De Maria, Da Via Panisperna all'America, I fisici italiani e la seconda guerra mondiale, Cronologia dell'opera scientifica di Enrico Fermi.1997

Bohr, N., Neutron Capture and Nuclear Constitution, Nature, 137, 344 – 351, 1936.

Bohr, N., and J. A. Wheeler, The Mechanism of Nuclear Fission, Phys. Rev. 56, 426-450, 1939.

Ciani, G.F., La radioterapia con protoni e antiprotoni, Archivio tesi di laurea triennale, Università di Bari, aa. 2009-2010.

Fermi, E., Amaldi, F., d'Agostino, O., Rasetti, F., and Segré, E. Proc. Roy. Soc., A, 146, 483, 1934.

Frisch, O., La mia vita con l'atomo, RICORDI DI UN PADRE DELLA BOMBA A, Editori Riuniti 1981, Prima edizione pag. 197.

La biblioteca di Repubblica, L'universo. Agosto 2005.

Meitner, L, and O. R. Frisch, Disintegration of Uranium by Neutrons: A New Type of Nuclear Reaction, Nature, 143, 239-240, 1939.

Meitner, L., Strassmann, F., and Hahn, O., Z. Phys. 109, 538, 1938.

Meitner, L., A Life in Physics, by Ruth Lewin Sime, University of California Press, pag. 540, 1996.

http://it.wikipedia.org/wiki/Progetto_Manhattan

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/421629/nuclear-fission/48316/Nuclear-models-and-nuclear-fission>

<http://www.scribd.com/doc/39412208/Fission>

<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ed066p373>

<http://www.fisicanucleare.it/>

www.ecoage.com

<http://www.cartografareilpresente.org/article384.html>