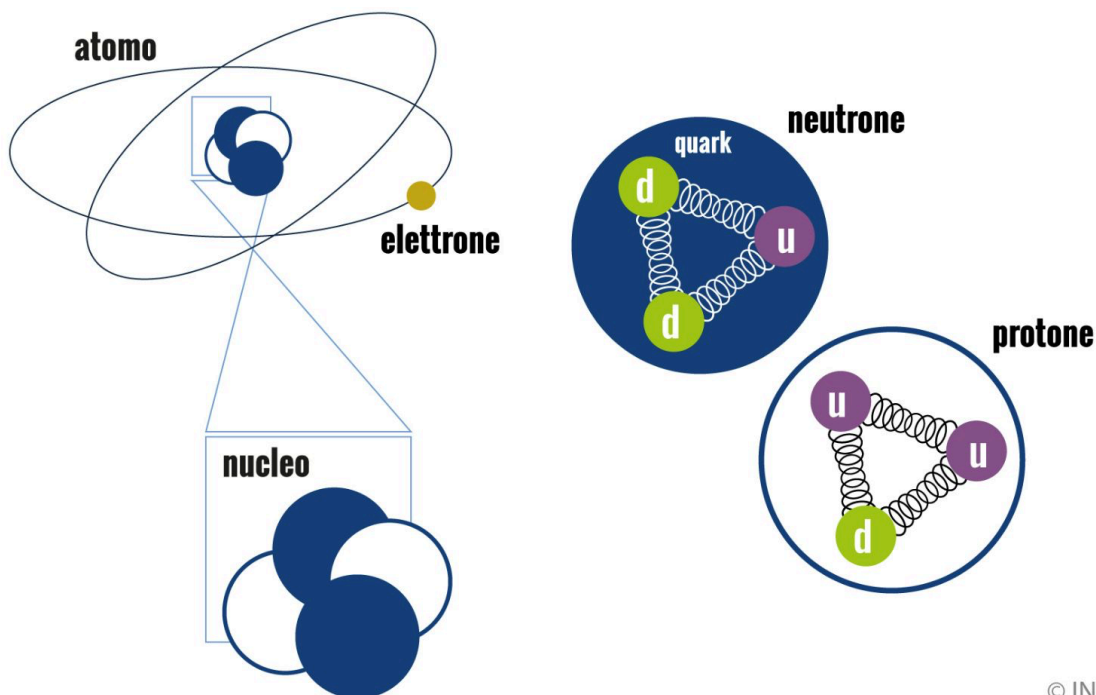


## FISICA NUCLEARE

La materia ordinaria che compone tutto ciò che ci circonda, e di cui noi stessi siamo fatti, è formata da atomi. Ogni atomo è strutturato in un nucleo centrale, che contiene protoni e neutroni, intorno al quale orbitano gli elettroni. Questi ultimi sono particelle elementari di carica elettrica negativa, legate ai protoni del nucleo (che hanno carica positiva) dalla forza elettromagnetica. I neutroni e i protoni sono tenuti insieme dall'interazione nucleare forte: non sono particelle elementari, ma sono formati a loro volta da particelle più piccole, i *quark*. Ogni atomo stabile è elettricamente neutro, con un uguale numero di protoni ed elettroni.

La comprensione teorica e sperimentale della struttura atomica e nucleare è passata attraverso un lungo percorso scientifico che ha coinvolto grandi scienziati e scienziate, tra cui Ernest Rutherford, i cui esperimenti all'inizio del Novecento furono decisivi per intuire l'esistenza dei nuclei al centro degli atomi; Niels Bohr, il cui modello atomico introdusse il concetto di quantizzazione dell'energia e l'esistenza di orbite discrete per gli elettroni intorno al nucleo; Lise Meitner, con studi decisivi sulla manipolazione dei nuclei atomici e sulla fissione nucleare, e molti altri (tra cui naturalmente anche Enrico Fermi e i Ragazzi di via Panisperna).

La conoscenza sempre più dettagliata della struttura atomica e nucleare ha portato a numerose applicazioni tecnologiche, alcune rivoluzionarie per la società moderna (dalla medicina nucleare alle tecnologie basate su laser, per citarne solo alcune). Tuttavia, al contrario di quanto si possa credere, resta ancora molto da capire sul comportamento degli atomi e dei nuclei, che vengono studiati ancora oggi sia a livello fondamentale, sia per nuove potenziali applicazioni.



© INFN

## ISOTOPI

Gli atomi sono costituiti da protoni, elettroni e neutroni.

I protoni hanno carica positiva e sono localizzati all'interno del nucleo dell'atomo, in una regione di spazio di dimensioni dell'ordine di  $10^{-15}$  m. Il numero di protoni determina il numero atomico, Z, ed il nome dell'atomo. Nell'atomo (neutro) per ogni protone c'è un elettrone con carica negativa esattamente uguale (in modulo) a quella del protone, ma con una massa molto più piccola (circa 2000 volte). Gli elettroni si muovono in una regione spaziale molto più grande di quella del nucleo, con dimensioni dell'ordine di  $10^{-10}$  m.

C'è una terza particella, il neutrone, privo di carica e con massa eguale (leggermente più grande, per la precisione) a quella del protone. I neutroni sono localizzati all'interno del nucleo, insieme ai protoni. Nuclei con lo stesso numero Z di protoni possono avere diversi valori del numero di neutroni, N. In altre parole, si possono avere diversi isotopi dello stesso atomo, caratterizzati dallo stesso Z e diversi N.

$$A = Z + N$$

A = numero di massa

Z = numero atomico (di protoni, determina il tipo di atomo)

N = numero di neutroni

Le proprietà chimiche degli atomi sono determinate dalla configurazione degli elettroni e quindi sono le stesse per i diversi isotopi di uno stesso elemento.

Isotopi diversi dello stesso atomo hanno però masse diverse e quindi pesi diversi nella gravità. Hanno inoltre diversa inerzia nei loro moti e quindi le molecole che formano avranno diverse velocità e diverse frequenze rotazionali e vibrazionali. Anche i processi chimici saranno quindi influenzati dalla diversa massa e si potrà osservare, in generale, selettività isotopica nei composti che gli atomi formano.

Gli isotopi sono atomi dello stesso elemento chimico (stesso numero atomico Z, quindi stesso numero di protoni) che differiscono per il numero di neutroni nel nucleo, possedendo di conseguenza un diverso numero di massa A e massa atomica. Pur comportandosi in modo simile chimicamente, presentano proprietà fisiche differenti, come la massa e la stabilità nucleare.

All'interno del nucleo sono presenti due forze fondamentali per le proprietà dell'atomo.

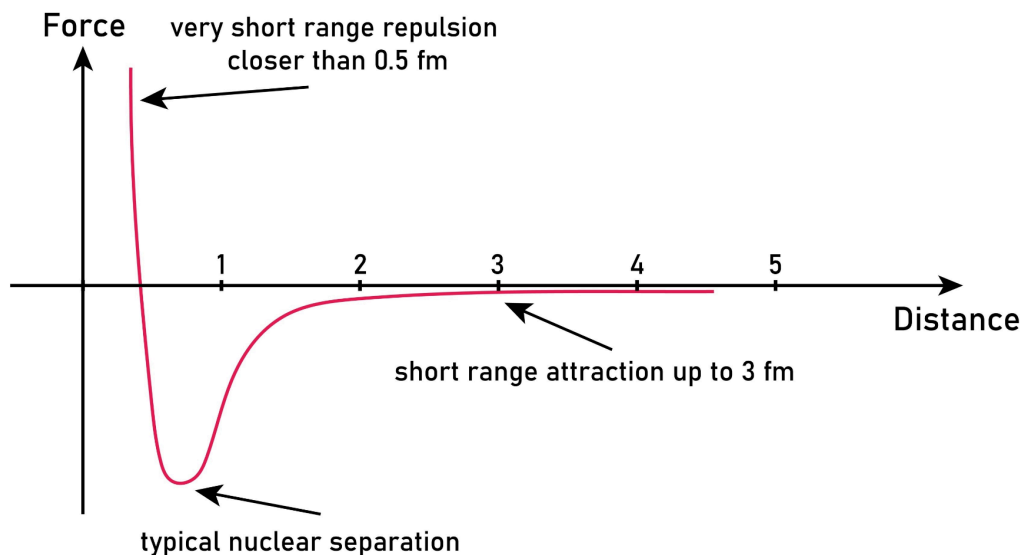
La forza elettrostatica è governata dalla **Legge di Coulomb**. Essa stabilisce che cariche dello stesso segno si respingono con una forza che è direttamente proporzionale al prodotto delle cariche e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che le separa:

$$F = K \frac{q_A q_B}{r^2} \quad K = \frac{1}{4\pi\epsilon}$$

Per controbilanciare questa immane spinta repulsiva, interviene la **forza nucleare forte**. Si tratta di una delle quattro interazioni fondamentali della fisica e presenta caratteristiche uniche:

- **Intensità straordinaria:** A cortissime distanze, è circa 100 volte più intensa della forza elettrostatica.
- **Corto raggio d'azione:** È una forza "a corto raggio". Agisce efficacemente solo a distanze inferiori a circa 2.5 fm. Oltre questa distanza, la sua intensità crolla quasi a zero.
- **Indipendenza dalla carica:** A differenza della forza elettrostatica, la forza forte non bada alla carica elettrica. Agisce con la stessa identica intensità tra protone e protone (p-p), tra neutrone e neutrone (n-n), e tra protone e neutrone (p-n). Per questo motivo, le particelle del nucleo vengono chiamate collettivamente **nucleoni**.

A livello fondamentale (nella cromodinamica quantistica), la forza forte tiene insieme i quark dentro i singoli nucleoni tramite lo scambio di gluoni. Quella che noi chiamiamo "forza nucleare forte" nel nucleo è in realtà una **forza nucleare residua** (spesso schematizzata con lo scambio di particelle chiamate *pioni*), che straborda dai singoli nucleoni e attrae quelli vicini.



In questo scenario, i neutroni svolgono un ruolo strutturale salvifico. Essendo privi di carica elettrica:

- **Non aumentano la repulsione elettrostatica** nel nucleo.
- **Contribuiscono attivamente alla forza nucleare forte**, poiché attraggono sia i protoni che gli altri neutroni vicini.

I neutroni aumentano letteralmente la quantità di "collante" nucleare senza aumentare la spinta a separarsi. Tuttavia, non si possono aggiungere neutroni all'infinito. Esiste un limite geometrico e quantistico (legato al *Principio di Esclusione di Pauli*) per cui i nucleoni devono disporsi in precisi livelli energetici nucleari.

All'interno del nucleo atomico esiste una costante lotta tra la **forza nucleare forte** (che tiene uniti i protoni e i neutroni) e la **forza repulsiva elettrostatica** (che spinge i protoni, tutti positivi, a respingersi). I neutroni fungono da "collante".

- **Isotopi Stabili:** Hanno un perfetto bilanciamento tra protoni e neutroni. Rimangono identici a se stessi per l'eternità.
- **Isotopi Instabili (o Radioisotopi):** Hanno troppi o troppo pochi neutroni. Il nucleo è "scomodo" e, per trovare la pace, deve liberarsi dell'energia in eccesso. Questo processo di stabilizzazione si chiama **decadimento radioattivo**.

## L'ORIGINE DEI RADIOISOTOPPI

Quando un isotopo si trova fuori dalla Valle di Stabilità, significa che il bilancio energetico tra queste due forze è precario.

- **Eccesso di protoni (o nuclei troppo grandi):** Se la forza elettrostatica vince sulla forza forte, il nucleo diventa instabile. Nei nuclei massicci (come l'Uranio o il Radio), la repulsione interna è così forte che il nucleo si destabilizza strutturalmente, portando al decadimento Alfa (l'espulsione di un pacchetto di 2 protoni e 2 neutroni per rimpicciolirsi rapidamente) o alla fissione spontanea.
- **Eccesso di neutroni:** Se ci sono troppi neutroni rispetto ai protoni, l'instabilità non è data dalla forza elettrostatica, ma dalle leggi della meccanica quantistica. I neutroni in più occupano livelli energetici troppo elevati. Il nucleo si stabilizza tramite il decadimento Beta Meno ( $\beta^-$ ), in cui un neutrone si trasforma in un protone, riequilibrando il rapporto e portando l'atomo verso una configurazione più stabile.

In sintesi, la varietà di isotopi che osserviamo in natura — e la radioattività stessa — non sono altro che la conseguenza macroscopica del continuo assestamento geometrico e quantistico tra l'immensa spinta repulsiva delle cariche elettriche e il corto, ma potentissimo, abbraccio della forza nucleare forte.

Dei primi 82 elementi della tavola periodica, 80 hanno isotopi considerati stabili.

## RADIOATTIVITÀ

La radioattività, o decadimento radioattivo, è un insieme di processi fisico-nucleari attraverso i quali alcuni nuclei atomici instabili (radionuclidi) decadono trasmutandosi in altri nuclei aventi energia inferiore emettendo radiazioni ionizzanti. Questi processi avvengono in accordo con i principi di conservazione della massa-energia, della quantità di moto e del momento angolare.

I decadimenti radioattivi seguono la legge matematica nota come andamento esponenziale negativo, secondo la quale esiste per ciascuno di essi un tempo caratteristico che viene di solito espresso come vita media o come emivita (o tempo di dimezzamento) di quella specie radioattiva. Vita media ed emivita sono quantità tra loro proporzionali: l'una o l'altra possono essere usate per descrivere la rapidità del processo di decadimento e godono entrambe della proprietà di non dipendere dalla quantità iniziale della specie radioattiva.

Il processo di decadimento continua più o meno velocemente nel tempo finché gli elementi via via prodotti, eventualmente a loro volta radioattivi, non raggiungono una condizione di stabilità attraverso la cosiddetta catena di decadimento.

## STORIA DELLA RADIOATTIVITÀ

Fu Marie Curie che iniziò a misurare la radiazione dell'uranio mediante la piezoelettricità, scoperta dal marito Pierre in collaborazione con suo fratello Jacques, facendo ionizzare l'aria tra due elettrodi e provocando il passaggio di una piccola corrente, di cui misurava l'intensità in rapporto alla pressione su un cristallo necessaria a produrre un'altra corrente di intensità tale da bilanciare la prima. Il sistema ideato funzionò, tanto che Pierre Curie abbandonò il suo lavoro per affiancare la moglie in tali ricerche. Fu proprio Marie a proporre il termine *radioattività* per indicare la capacità dell'uranio di produrre radiazioni e dimostrò la presenza di tale radioattività anche in un altro elemento: il torio.

Ai tempi della scoperta non si conoscevano gli effetti nocivi sulla salute delle radiazioni, e agli inizi del secolo furono reclamizzati tanti prodotti additivati con radio, decantandone proprietà salutari. La stessa Marie Curie negò sempre la sua pericolosità, mentre oggi i suoi abiti, libri e strumenti sono avvicinabili dagli studiosi solo con le dovute protezioni radiologiche.

## DECADIMENTO RADIOATTIVO

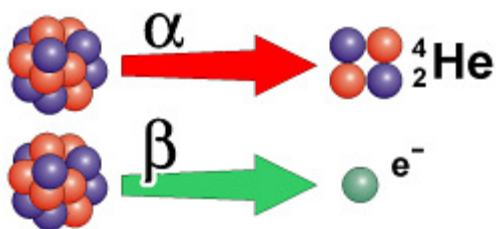
Il decadimento radioattivo o disintegrazione è quindi il processo di trasformazione, con liberazione di energia nucleare, di un radionuclide padre, in un nuclide figlio, il quale può essere a sua volta stabile o instabile. Se il figlio è stabile, il processo di decadimento è terminato. Se anche il figlio è instabile, inizia un nuovo processo di decadimento che può essere differente rispetto a quello del suo predecessore.

Il decadimento alfa è uno dei processi per cui atomi instabili (e dunque radioattivi) si trasformano in atomi di un altro elemento, che possono a loro volta essere radioattivi oppure stabili.

Più precisamente, il **decadimento alfa** avviene tramite l'emissione di una particella, detta appunto particella alfa, composta da due protoni e due neutroni (nucleo di elio) da parte dell'isotopo di un elemento con elevato numero atomico ( $Z > 83$ ). Perdendo due protoni l'elemento indietreggia di due posizioni nella tavola periodica degli elementi. Le ragioni di tale fenomeno sono da ricercare nella tendenza di tutti i sistemi fisici a cercare condizioni di energia più stabile.

Il **decadimento beta** è un processo di trasformazione nucleare governato dall'interazione debole, in cui un neutrone si converte in un protone ( $\beta^-$ ) o un protone in un neutrone. Si verifica quando nel nucleo è presente un eccesso o una carenza di neutroni rispetto ai protoni.

In questi casi, l'interazione debole trasforma un neutrone in un protone ( $\beta^-$ ) o un protone in un neutrone ( $\beta^+$ ), ristabilendo un equilibrio più stabile.



## URANIO-235 E PLUTONIO

Quando Einstein nel 1905 formulò la rivoluzionaria equazione  $E = mc^2$  (l'energia contenuta o emessa da un corpo equivale alla massa per la velocità della luce nel vuoto al quadrato), gran parte dei fisici e degli ingegneri non le attribuì grande importanza pratica e neppure Einstein, probabilmente, poteva prevederne l'applicazione.

Tuttavia, proprio nel campo della fisica nucleare il principio einsteiniano ebbe le sue più convincenti conferme, quando i fisici realizzarono la fissione dell'atomo.

La fissione nucleare è un processo in cui il nucleo di un elemento chimico pesante decade in nuclei di atomi a numero atomico inferiore (cioè con minor numero di protoni).

Alcuni materiali fissili (come l'Uranio-235) hanno la potenzialità di dar vita a una reazione a catena, cioè a un processo di fissione nucleare che si autoalimenta, producendo grandi quantità di energia.

Il **31 agosto 1939 Bohr e John A. Wheeler** pubblicarono un articolo scientifico in cui sostenevano che nel minerale di uranio era l'isotopo U-235 a sostenere la reazione a catena e non l'U-238. I due fisici formularono inoltre l'ipotesi dell'elemento 94 (il plutonio), elemento altamente fissionabile. I fondamenti teorici della bomba atomica erano così sostanzialmente posti: la ricerca doveva concentrarsi sull'U-235 e sul plutonio.

In natura l'uranio si trova in combinazione chimica con altri elementi, dai quali viene separato attraverso procedimenti chimico-metallurgici. L'U-235 ha 92 protoni e 143 neutroni con peso atomico 235, l'U-238 ha 92 protoni e 146 neutroni con peso atomico 238.

Poiché era l'Uranio-235 che interessava per la produzione della bomba atomica, esso doveva essere separato dall'U-238. Altro elemento altamente fissile è il plutonio, prodotto artificialmente: si forma dal decadimento dell'U-239, prodotto dall'assorbimento nell'U-238 di un neutrone. I due problemi che i fisici del progetto Manhattan dovevano quindi risolvere erano come produrre U-235 e plutonio in quantità sufficiente per costruire la bomba nucleare.

## LA FISSIONE NUCLEARE

Se un nucleo di Uranio 235 si fissiona, cioè si separa in due nuclei più leggeri e due neutroni, la massa totale delle quattro particelle emesse è normalmente inferiore alla massa del nucleo di uranio.

La differenza tra la massa dell'**Uranio** e la massa dei prodotti della fissione (le quattro particelle) **si trasforma in energia**.

Questa energia si manifesta in gran parte come energia cinetica (cioè velocità) delle particelle emesse. Questa energia cinetica microscopica viene trasferita mediante urti multipli al materiale circostante che si scalda. Se il processo di fissione coinvolge un numero molto elevato di nuclei di Uranio, mediante una reazione a catena, si produce una enorme quantità di energia che può essere utilizzata dall'uomo. Se la reazione a catena avviene lentamente in condizioni controllate possiamo costruire un reattore nucleare per produrre energia elettrica,

se invece la reazione avviene in un tempo brevissimo in forma esplosiva abbiamo una bomba nucleare con gli effetti devastanti che oramai conosciamo.

In principio anche le reazioni chimiche liberano energia a scapito della massa dei prodotti della reazione che bruciano (come diciamo nel linguaggio corrente). La differenza tra una reazione chimica ed una nucleare è nella quantità di energia liberata. Quando un atomo di carbonio brucia, cioè si combina chimicamente con l'ossigeno dell'aria per formare l'anidride carbonica CO<sub>2</sub>, si libera una energia dell'ordine di 1 elettronVolt (1 eV).

Quando "brucia" un atomo di Uranio, cioè il suo nucleo si fissiona, si liberano circa duecento milioni di elettronvolt (200 MeV).

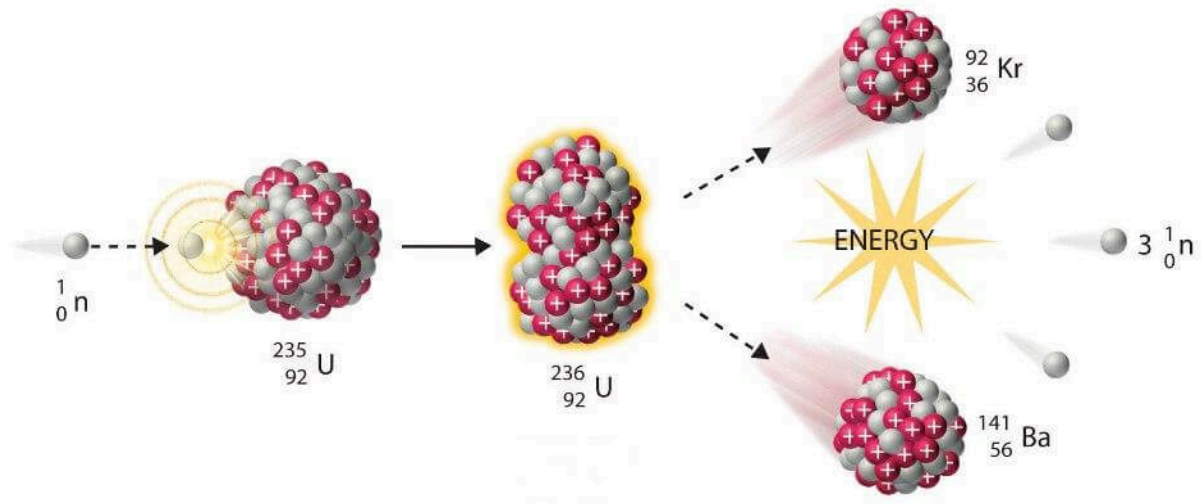
Naturalmente non è possibile convertire tutta la massa di un nucleo di Uranio in energia perché questo processo violerebbe diverse leggi della fisica dalla conservazione della carica alla conservazione del numero dei barioni, cioè la conservazione del numero complessivo di protoni e neutroni. Circa un millesimo della massa viene convertita in energia in un processo di fissione, ma questa frazione è cento milioni di volte più grande della massa che viene convertita in energia in una reazione chimica.

## **L'U-235**

Un tipico esempio di fissione è dato dalla reazione che avviene a carico dell'uranio-235 definito "fissile". Il processo viene innescato dal bombardamento del nucleo di U-235 con un neutrone: l'uranio lo assorbe, aumentando il proprio numero di massa di una unità (da 235 a 236); a questo punto subisce la fissione, scindendosi in due nuclei, bario e kripton. La somma dei numeri atomici di questi ultimi è 92 (coincide con il numero atomico del nucleo dell'uranio) ma la somma dei loro numeri di massa è pari a 233, dunque inferiore di 3 unità al numero di massa dell'uranio dopo l'assorbimento del neutrone: ciò in quanto dalla reazione vengono emessi anche 3 neutroni più raggi gamma. L'emissione di neutroni consente l'auto propagazione della fissione (reazione a catena), in quanto basta che almeno uno di essi vada, a sua volta, a bombardare un altro nucleo di U<sub>235</sub> perché la fissione si ripeta, liberando altri 3 neutroni e così di seguito.

## **I PRIMI PROCESSI DI FISSIONE**

I primi processi di fissione furono 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 (elementi chimici con numero atomico maggiore di 92). 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.



L'altro tipo principale di testata nucleare è la **bomba all'idrogeno**, che sfrutta il principio della fusione. I nuclei di atomi leggeri (come gli isotopi dell'idrogeno), se si trovano a distanze molto ravvicinate, si fondono formando nuclei di elio liberando grandi quantità di energia. Per avvicinare sufficientemente i nuclei bisogna comprimere e scaldare l'idrogeno a temperature intorno ai cento milioni di gradi, e per raggiungerle è necessaria una bomba atomica come innesco.

### **BOMBA ATOMICA E REAZIONE A CATENA**

La bomba atomica (o bomba a fissione nucleare) è un ordigno esplosivo appartenente al gruppo delle **armi nucleari**, la cui energia è interamente prodotta da una reazione a catena di fissione nucleare, un processo di divisione del nucleo atomico, che avviene in un elemento pesante detto fissile, in due o più nuclei di massa inferiore, a seguito della collisione con un neutrone libero.

La **rottura del nucleo** produce a sua volta, oltre a elementi più leggeri, anche alcuni ulteriori neutroni liberi, oltre ad una quantità molto significativa di energia. Se il materiale fissile ha un grado di concentrazione sufficiente ed è in una massa sufficientemente grande, detta "massa critica", i neutroni liberi prodotti a loro volta sono in grado di colpire nuovi nuclei di elemento fissile, producendo una reazione a catena incontrollata che si propaga per tutta la massa di materiale liberando un'immensa quantità di energia in un tempo brevissimo.

Il principio della bomba atomica è la reazione a catena di **fissione nucleare**, il fenomeno fisico per cui il nucleo atomico di certi elementi con massa atomica superiore a 230 si può dividere (fissione) in due o più nuclei di elementi più leggeri quando viene colpito da un neutrone libero. La fissione si può innescare in forma massiccia, cioè come **reazione a catena**, se i nuclei fissili sono tanto numerosi e vicini fra loro da rendere probabile l'ulteriore collisione dei neutroni liberati con nuovi nuclei fissili.

Quando un neutrone libero colpisce un nucleo di  $^{235}\text{U}$  o di  $^{239}\text{Pu}$ , viene catturato dal nucleo per un tempo brevissimo, rendendo il nucleo composto instabile: questo si spezza entro  $10^{-12}$  secondi in due o più nuclei di elementi più leggeri, liberando contestualmente da due a quattro neutroni. Circa l'uno per cento della sua massa viene convertita in energia sotto forma principalmente di fotoni ed energia cinetica dei nuclei leggeri residui e dei neutroni liberi, per un totale di circa **200 MeV**.

I neutroni liberati dal processo possono urtare a loro volta altri nuclei fissili presenti nel sistema, che quindi si fissionano liberando ulteriori neutroni e propagando la reazione a catena in tutta la massa di materiale. Come già detto però la reazione a catena avviene solo se la probabilità di cattura dei neutroni da parte dei nuclei fissili è sufficientemente alta, cioè se i nuclei sono numerosi, molto vicini fra loro e le perdite per fuga dal sistema sono opportunamente ridotte.

La bomba viene fatta detonare concentrando insieme il materiale fissile per mezzo di **esplosivi convenzionali** che portano istantaneamente a contatto le varie masse o fanno collassare il guscio sferico. Al centro del sistema è collocato anche un iniziatore di neutroni, un piccolo dispositivo in berillio contenente qualche grammo di una sostanza fortemente emissiva di particelle alfa come il **polonio**, un sistema che aiuta l'esplosione irradiando la massa con un'ondata di neutroni al momento giusto. La testata è eventualmente rivestita esternamente con uno schermo in **berillio** che riflette parzialmente i neutroni che altrimenti verrebbero persi all'esterno.

Energia e potenza dell'ordigno nucleare sono funzioni dirette della quantità di materiale fissile e della sua percentuale di arricchimento, così come dell'efficienza dell'arma, cioè la percentuale di materiale che effettivamente subisce la fissione, quest'ultima determinata dalla qualità o dalla taratura del suo sistema di detonazione.



immagine della prima bomba atomica