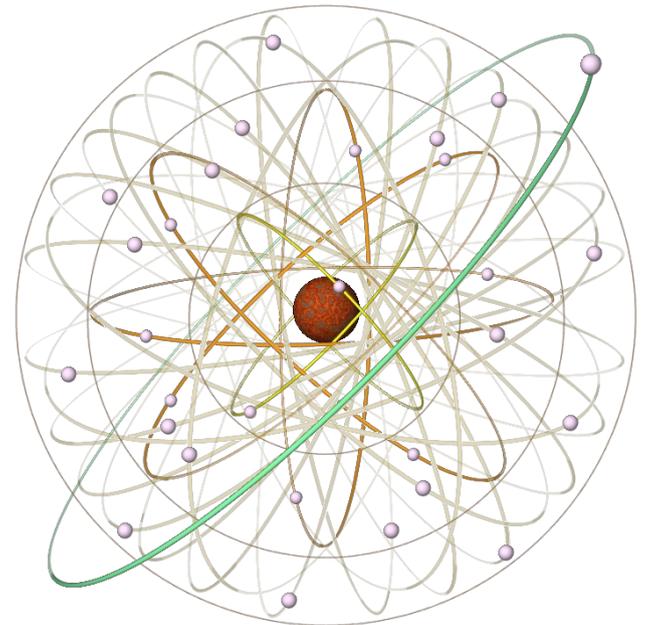
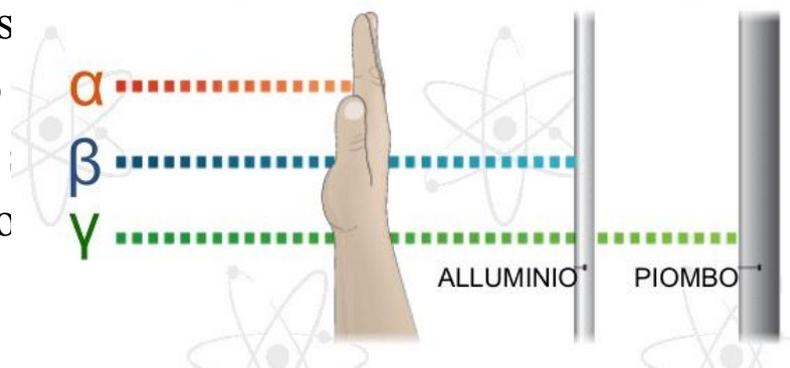


La fisica nucleare



LA RADIOATTIVITA' E IL DECADIMENTO RADIOATTIVO

Lo scopritore della radioattività naturale fu **Henri Becquerel** nel 1896, il quale ipotizzò che l'uranio producesse onde più potenti della luce. Successivamente i coniugi **Curie**, accertata la radioattività del **Torio**, riuscirono a isolare alcuni grammi di materiali radioattivi per studiarli meglio. Procuratosi poi delle tonnellate di pechblenda, il minerale d'uranio più radioattivo, estrassero da questo uranio e si accorsero che il materiale che era residuo produceva molte più radiazioni di quanto previste e pensarono che potessero essere presenti altre sostanze radiattive sconosciute. Dopo diversi anni, i coniugi scoprirono due elementi radioattivi che chiamarono **Radio e Polonio**. Negli stessi anni Rutherford riconobbe il fatto che un elemento radioattivo emetteva due diverse specie di radiazioni, che lui ha chiamato **alfa e beta**. L'anno dopo **Paul Villard** scoprì un terzo tipo di radiazione che chiamò raggi **gamma**. La differenza che c'è tra questi diversi tipi di raggi è la loro intensità: bassa per i raggi alfa, più forte per i raggi beta e molto alta per i raggi gamma. Rutherford vinse il Nobel nel 1908 per aver dimostrato che i raggi alfa sono costituiti da nuclei di elio (numero atomico = 2, massa atomica = 4). Lo stesso Rutherford accertò che i raggi beta sono costituiti da elettroni (numero atomico = -1, massa atomica = 1/1836). I raggi gamma sono costituiti da fotoni (numero atomico = 0, massa atomica = 0) e sono molto penetranti. I raggi alfa sono fermati da un foglio di carta, i raggi beta da un foglio di alluminio e i raggi gamma da un blocco di piombo.



LA RADIOATTIVITA' E IL DECADIMENTO

RADIOATTIVO

Ogni volta che un nucleo emette una particella alfa o beta, esso modifica la sua struttura subendo una trasformazione detta decadimento radioattivo.

Essendo che durante un decadimento un nucleo cambia il suo numero di protoni, è inevitabile che l'elemento in questione si trasformi in un altro. Da qui possiamo dedurre tre tipi di decadimento:

Decadimento alfa: il nucleo emette una particella alfa, e l'elemento perde quattro unità di massa atomica e due di numero atomico

Decadimento beta meno: la massa atomica rimane costante, mentre il numero atomico aumenta di un'unità, emettendo un elettrone beta e un antineutrino elettronico.

Decadimento beta più: la massa atomica rimane costante, mentre il numero atomico diminuisce di un'unità, emettendo un positrone e un neutrino elettronico.

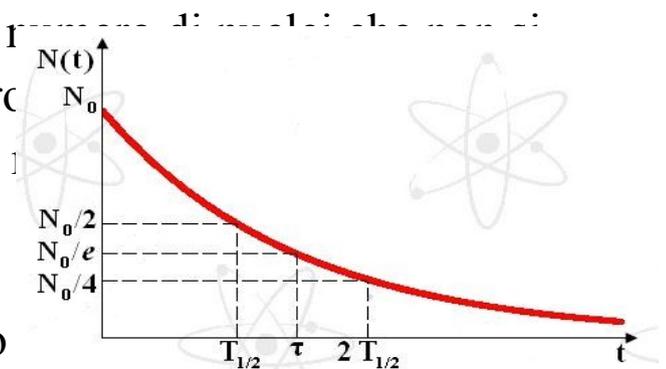
Tramite una serie di calcoli possiamo definire la legge che determina il numero di nuclei che sono disintegrati nel corso del tempo, e in particolare, di come il numero di nuclei diminuisce esponenzialmente nel tempo. Questa è chiamata legge del decadimento radioattivo.

La formula è:

$$N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Si dice emivita o tempo di dimezzamento di un isotopo radioattivo, e lo

tempo dopo il quale il numero totale dei nuclei si è dimezzato, passando da N_0 a $N_0/2$.



Ponendo $N = N_0/2$ nella legge del decadimento radioattivo, otteniamo: $e^{-\lambda t} = 1/2$

IL NUCLEO ATOMICO

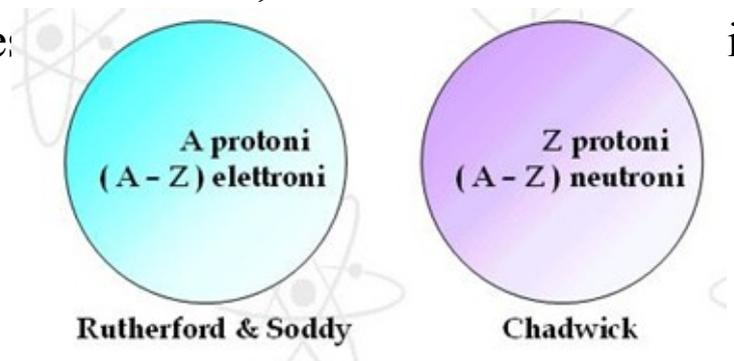
La massa di un nucleo è sempre leggermente minore della somma delle masse dei suoi componenti, e la differenza che c'è tra queste due è chiamata energia di legame, ossia l'energia necessaria per disintegrare il nucleo, ovvero l'energia che il nucleo fornisce quando si forma per aggregazione dei nucleoni.

Il chimico inglese Sir Frederick Soddy ipotizzò che esistano diversi atomi con lo stesso numero atomico Z ma diverso numero di massa A , e li chiamò isotopi. L'isotopia rivoluzionava il mondo della chimica, in quanto distruggeva l'idea presente al tempo che gli atomi di una sostanza fossero tutti uguali tra loro. Tutti gli elementi oggi conosciuti sono composti da svariati isotopi, per cui ogni specie atomica è in realtà costituita da una mescolanza di isotopi diversi, molti dei quali radioattivi: da questo fatto deriva che i nuclei sono composti da particelle ancora più elementari di neutroni e protoni, ossia i nucleoni.

Il tedesco Walther Bothe e il suo studente Herbert Becker osservarono che delle particelle alfa generate dal polonio, incidendo su nuclei leggeri (litio, berillio, boro), generavano una radiazione particolarmente penetrante. I due fisici francesi Irène Joliot e Frédéric Joliot proposero che si trattasse di raggi gamma, mentre il famoso fisico Ettore Majorana riteneva si trattasse del protone neutro.

IL NUCLEO ATOMICO

Il primo modello nucleare, proposto da Rutherford e Soddy, prevede che in un nucleo di massa atomica A e numero atomico Z siano presenti A protoni ed $(A-Z)$ elettroni, mentre il fisico inglese James Chadwick propose un modello differente, in cui il numero di massa A rappresentasse il numero totale di nucleoni, mentre Z rappre-



Si trovò difficoltà a spiegare i raggi beta col nuovo modello atomico, fino a che Enrico Fermi propose la sua teoria del decadimento beta. Secondo tale teoria, un neutrone può decadere in un protone più un elettrone. In seguito, per fare in modo che fosse salvaguardata la conservazione della quantità di moto, lo stesso Fermi aggiunse che in questa reazione veniva prodotta anche una terza particella, di carica e massa a riposo entrambe nulle, che Edoardo Amaldi battezzò scherzosamente neutrino, nome poi diventato ufficiale nella letteratura scientifica.

Siccome il neutrino è indicato con ν , la reazione del decadimento beta si scriverà quindi:



LA RADIO DATAZIONE

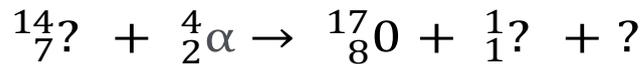
Tutti gli organismi viventi scambiano continuamente carbonio con l'atmosfera attraverso processi di respirazione o fotosintesi, oppure lo assimilano nutrendosi di altri esseri viventi o sostanze organiche. Di conseguenza, finché un organismo è vivo, il rapporto tra la sua concentrazione di ^{14}C e quella degli altri isotopi di carbonio si mantiene costante e uguale a quella che si riscontra nell'atmosfera. Dopo la morte dell'organismo, però, questi processi hanno fine e l'organismo non scambia più carbonio con l'esterno. Per effetto del decadimento radioattivo però, la concentrazione di ^{14}C diminuisce col tempo. Con uno spettrometro di massa, strumento in grado di misurare la percentuale di ogni isotopo dentro un campione, determiniamo dunque la quantità di ^{14}C contenuta in un reperto archeologico organico in rapporto al ^{12}C , che è un isotopo stabile. Grazie a questo valore siamo in grado di calcolare, tramite la formula appunto di decadimento radioattivo, la costante di disintegrazione del ^{14}C e si determinare quindi la 'vita' del nostro reperto.

Il margine di errore a cui questo tipo di misurazione va incontro è compreso tra il 2 e il 5% di età misurate fino a 50000 anni: per campioni più vecchi è presente una concentrazione troppo bassa di carbonio per poter misurare con precisione la datazione.

Questo metodo, chiamato del radiocarbonio, non è l'unico presente: altri metodi comprendono l'utilizzo di potassio-argo e uranio-piombo

LE TRASMUTAZIONI

Rutherford, continuando le sue ricerche sulle particelle alfa, ottenne la prima **trasmutazione naturale artificiale**. Usò delle particelle alfa emesse dall'isotopo polonio-214 per disintegrare degli atomi di azoto, secondo la reazione



In questa, **E** rappresenta l'energia emessa dalla reazione, che in questo caso è pari a **-1,16 Mev**. Dato che **E < 0**, affinché la reazione nucleare abbia luogo, è necessario che le particelle alfa abbiano un'energia almeno pari proprio a **1,16 MeV** ciascuna (reazione endoergonica), altrimenti l'azoto non si rompe.

Nelle reazioni nucleari ci sono ovviamente diversi parametri che si devono conservare, come il numero di massa totale e il numero di nucleoni.

È grazie ad una reazione di questo tipo che i coniugi **Joliot-Curie** scoprirono quel fenomeno che possiamo chiamare come **radioattività artificiale**.

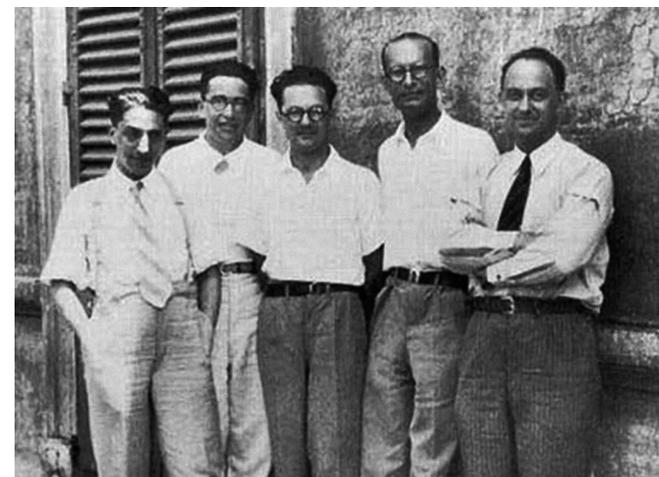
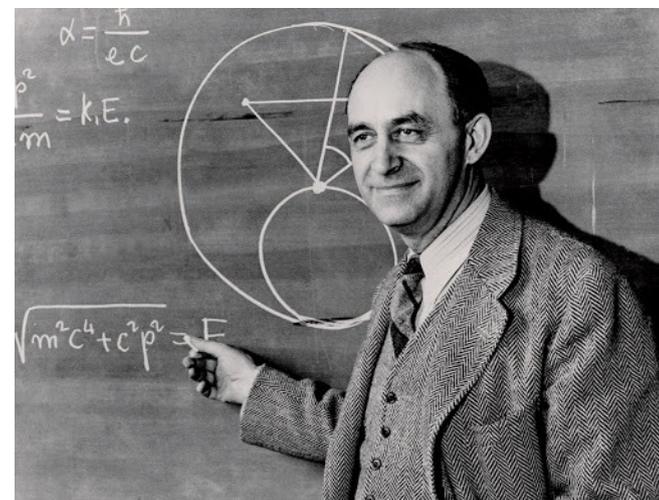
I due coniugi scienziati osservarono anche che il modo più efficace per rendere radioattivo per emissione gamma un nucleo stabile consiste nel bombardarlo con neutroni. Tale reazione nucleare prende il nome di **attivazione neutronica** o **(n, γ)**, e consiste nella cattura di un neutrone da parte di nucleo.

LA FISSIONE NUCLEARE

Il contributo di **Enrico Fermi e dei ragazzi di via Panisperna** fu essenziale per la scoperta della fissione nucleare, grazie alla quale lo stesso Fermi vinse il premio Nobel per la fisica nel 1938.

Il contrario dei coniugi Curie che utilizzarono le particelle alfa, Fermi e i suoi allievi cominciarono a bombardare tutti gli elementi conosciuti con neutroni. Arrivati all'Uranio videro un incredibile aumento di energia, che all'inizio venne erroneamente attribuito alla comparsa di due elementi chimici artificiali.

In realtà Fermi non aveva affatto scoperto nuovi elementi, ma aveva ottenuto le prime **fissioni nucleari** indotte da neutroni rallentati dall'acqua.



LA FISICA NUCLEARE

Il nucleo di un elemento molto pesante, se colpito alla adeguata velocità, si spezza in più frammenti. Il nucleo di uranio a causa dell'elevato numero di protoni, è poco stabile, e quindi si spezza in due nuclei altamente radioattivi, detti **prodotti di fissione**, con notevole sviluppo di energia. In questa scissione è più probabile che avvenga una fissione asimmetrica che una simmetrica.

La reazione che avviene è questa:



- Attraverso i calcoli scopriamo che la fissione produce un'energia 200.000 volte superiore a quella dovuta alla combustione di un grammo di carbonio.
- I neutroni prodotti dalle reazioni possono colpire altri nuclei, generando la cosiddetta “Reazione a catena”. Per farla avvenire però è necessaria una massa critica (pari a 50Kg nell'Uranio-235) poiché la maggior parte dei neutroni va perduta senza dare inizio ad altre reazioni.
- La dicitura “2,43 neutroni” è dovuta al calcolo di un valore medio. Può avvenire infatti la produzione di un numero diverso di neutroni per ogni reazione, ma la media tra questi valori risulta 2,43.
- I neutroni prodotti dalla reazione sono veloci, quindi possiedono molta energia cinetica. Affinché questi possano produrre una fissione nucleare devono essere “termici”, ovvero rallentati da un moderatore.

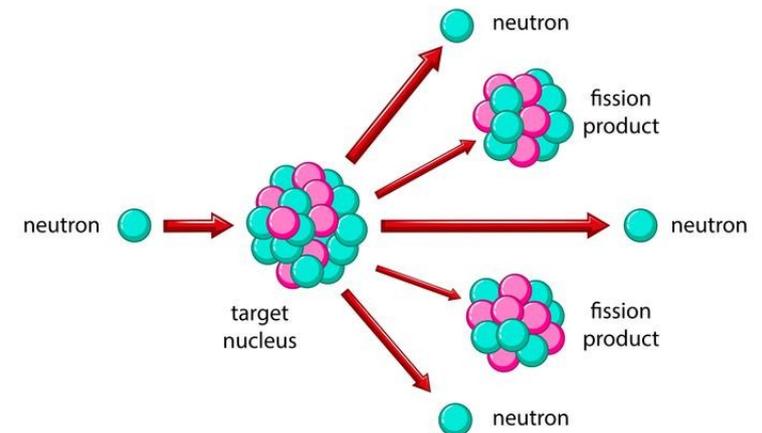
I REATTORI A FISSIONE

Il prossimo passo fu quello di far avvenire una reazione di fissione controllata per sfruttarne l'energia. Per questo intento fu promosso negli USA il Progetto Manhattan, con a capo **Robert Oppenheimer** (1904-1967), il cui primo passo era la costruzione di una pila atomica, cioè di un reattore in cui realizzare una fissione nucleare controllata.

Affinché la reazione resti controllata il rapporto K tra il numero di neutroni prodotti dalla fissione e quelli che hanno innescato la fissione deve rimanere 1. Se il numero di neutroni resta costante il reattore diventa quindi **critico**, cioè correttamente funzionante.

Con $k > 1$ il reattore è sovraccarico e si rischia la reazione incontrollata, mentre se $k < 1$ il reattore si spegne progressivamente.

Nuclear Fission



I REATTORI A FISSIONE

- All'interno del *core* del reattore deve essere presente un **moderatore** contro cui i neutroni urtino in modo anelastico, perdendo energia e diventando termici. La caratteristica fondamentale dei moderatori è una **bassa sezione d'urto di cattura neutronica**.
- All'interno del reattore è altrettanto importante il **refrigeratore**, il liquido che assorbe il calore dal nucleo del reattore e che poi lo utilizza per la produzione di energia elettrica.
- Per lo spegnimento di emergenza del reattore in caso di incidente o di un'emergenza si ricorre al cosiddetto "**veleno neutronico**", cioè una sostanza con altissima sezione d'urto di cattura neutronica che ferma immediatamente la reazione attirando a sé la maggior parte dei neutroni. Un efficace veleno neutronico è il cadmio.

A seconda del combustibile, del moderatore e del refrigeratore i reattori a fissione presentano caratteristiche e ognuno ha i suoi benefici e i suoi svantaggi.

Combustibile	Moderatore	Refrigeratore	Reattore	
Uranio naturale	C (grafite)	CO ₂	Semplice ed economico Plutonigeno	MAGNOX UK
Uranio naturale	D ₂ O (H ₂ O pesante)	D ₂ O	Niente plutonio Costoso	CANDU CANADA
Uranio naturale	C (grafite)	D ₂ O	Bassi costi Pericolosità intrinseca	RBMK URSS
Uranio arricchito	H ₂ O	H ₂ O	Semplice ed economico Pericoloso e instabile	LWR BWR USA(GE)
			Sicuro e stabile Più costoso	LWR PWR USA(WH)
Uranio naturale	Nessuno	Na	Molto veloci Molto costoso	LMFBR

LA BOMBA ATOMICA

Al contrario dei reattori nucleari, una bomba libera la sua energia in modo rapido e non controllato. Per questa ragione serve un'adeguata tecnologia che prevenga la bomba dall'esplosione non appena inizia il processo di reazione.

In una bomba atomica la massa critica, racchiusa in uno spazio molto ridotto, deve consentire a una sufficiente quantità di materiale fissile di reagire prima che il calore generato frantumi tutto in modo esplosivo. Nel caso della prima bomba sganciata sul Giappone, venne modificata una

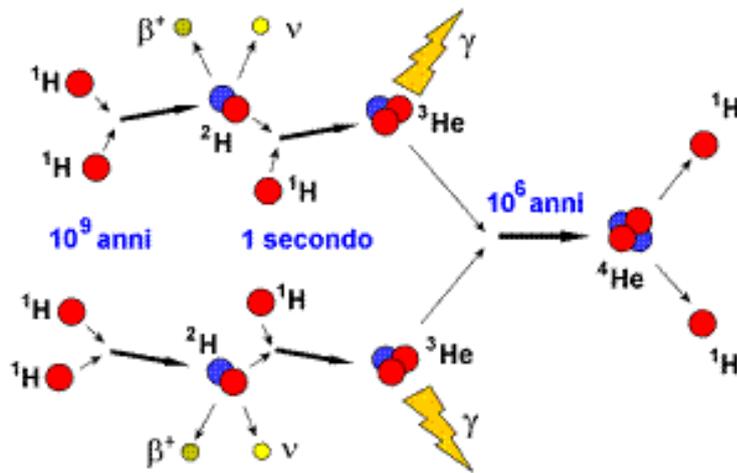
canna di cannone in modo tale che una massa di uranio fissile venisse lanciata contro un'altra massa di uranio che distrugge tutto ciò che incontra e un **fungo radioattivo** che trasporta il fumo e i detriti radioattivi fino a 25000 metri e poi li fa ricadere contaminando il terreno (**il fallout radioattivo**).

Nonostante siano stati firmati svariati trattati di non proliferazione delle armi nucleari dopo le catastrofi di Hiroshima e Nagasaki, oggi gli effetti distruttivi delle radiazioni sono utilizzati in molti altri modi. Ne è un esempio la "bomba sporca", un dispositivo esplosivo convenzionale riempito di scorie radioattive.



LA FUSIONE NUCLEARE

Il padre della fusione nucleare è il fisico **Hans Bethe**. Egli fu il primo che ipotizzò che le stelle bruciano per reazioni nucleari e non chimiche. Individuò un ciclo di reazioni termonucleari alla base dell'energia prodotta dal sole e dalla maggior parte delle stelle, detto ciclo protone-protono o catena dell'idrogeno.



Il sole quindi produce energia attraverso un nuovo tipo di reazione dovuto alla fusione di due nuclei leggeri in uno pesante. Questo nuovo tipo di reazione nucleare prende il nome di “**fusione nucleare**”.

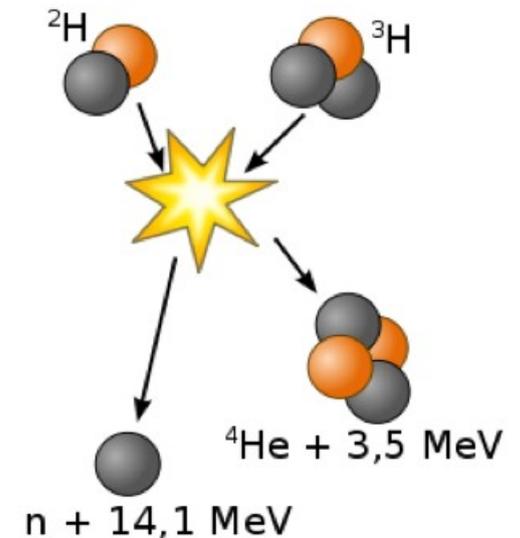


LA FUSIONE NUCLEARE

La fusione nucleare presenta quindi delle caratteristiche diverse da quelle della fissione: **produce molta più energia della precedente e senza rilasciare scorie radioattive.**

La fusione nucleare presenta però anch'essa i suoi problemi. Per innescare la fusione i due nuclei devono essere portati ad una distanza compatibile con il raggio d'azione della forza nucleare forte, la forza di attrazione tra i nucleoni. I nuclei però sono entrambi carichi positivamente e per questo c'è una gigantesca barriera di potenziale da superare affinché avvenga la fusione.

Per vincere la loro naturale repulsione il solo modo è quello di aumentare la loro agitazione termica così da farli urtare violentemente. La temperatura necessaria è di 10^8 K, pari a quella presente nel nucleo delle stelle.

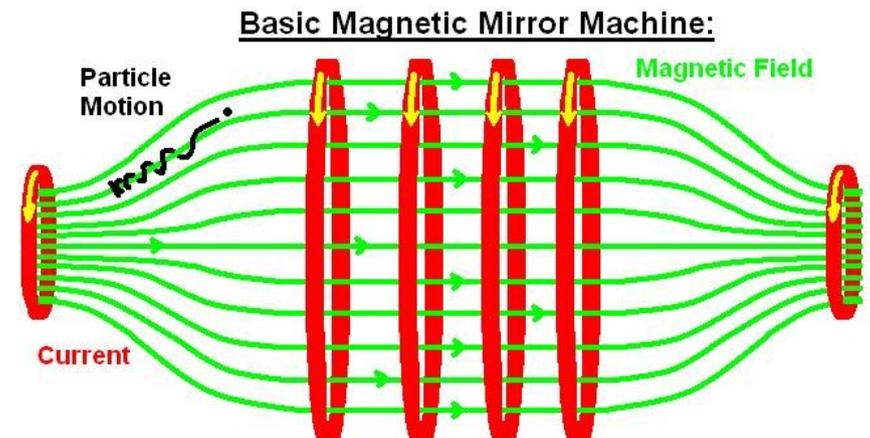
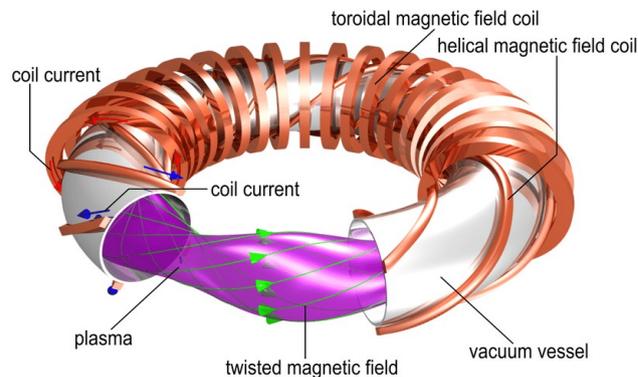


IL TOKAMAK

Se si riuscisse a realizzare una reazione di fusione nucleare controllata, avremmo a disposizione una fonte di energia praticamente illimitata. Per farlo bisogna scegliere una reazione a bassa energia di soglia. La reazione che si è scelta di utilizzare è la seguente:



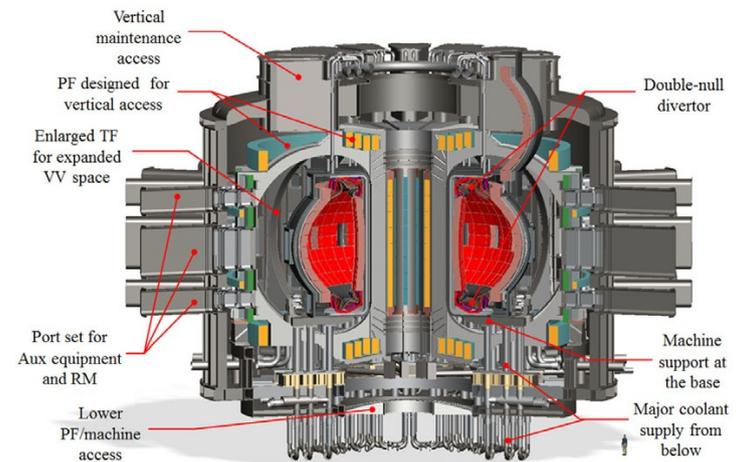
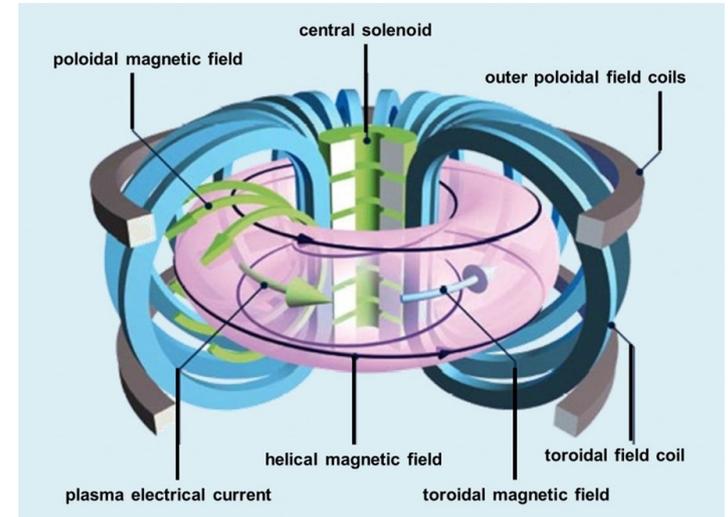
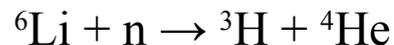
L'unica possibilità è quella di tenere in equilibrio il plasma dentro un opportuno campo magnetico, approfittando del fatto che esso è elettricamente carico: si parla in questo caso di **bottiglia magnetica**. Il primo tentativo di confinare un plasma con potenti campi magnetici fu lo Stellarator, poi negli anni sessanta invece si puntò sul cosiddetto specchio magnetico, una configurazione lineare costituita da due grandi bobine allineate con l'asse in comune.



IL TOKAMAK

Siccome la maggior parte delle perdite in uno specchio magnetico avviene alle estremità, si pensò di richiudere ad anello la configurazione magnetica, a forma di **toro**: si dice toro il solido ottenuto facendo ruotare un cerchio attorno a una retta che non lo attraversa. Questa è la soluzione che oggi viene più adottata.

Per tenere confinato (cioè in equilibrio) il plasma dentro un simile anello occorrono due campi magnetici, detti rispettivamente **toroidale**, parallelo all'asse del Tokamak, e **poloidale**, che giace in piani perpendicolari all'asse del Tokamak, prodotti da enormi magneti posti attorno al reattore, che si sommano dando vita ad un campo magnetico elicoidale. La reazione di fusione del Tokamak produce dei pericolosissimi neutroni liberi. Per eliminarli il Tokamak è stato circondato da una spessa camicia di litio, capace di assorbirli attraverso questa reazione:



Purtroppo il litio è una delle sostanze più cancerogene che esistono in natura e perciò si è pensato di far operare dei robot

La fisica delle particelle

GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

L'unico modo che abbiamo noi per studiare le particelle è facendole accelerare e scontrare. Questo processo avviene facendo passare la particella attraverso una successione di campi elettrici.

- Una successione di cilindri cavi sono collegati alternativamente ad un generatore di corrente alternata in modo tale che la particella venga espulsa dal cilindro che la precede e venga attratta da quello che segue. I cilindri inoltre devono avere lunghezza crescente in modo da sincronizzare perfettamente l'ingresso del protone in un cilindretto con l'inversione del segno della carica.
- Lo SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) è il più lungo acceleratore di particelle lineare (lungo 3 Km) che ha portato alla scoperta del quark charm e del leptone tau.

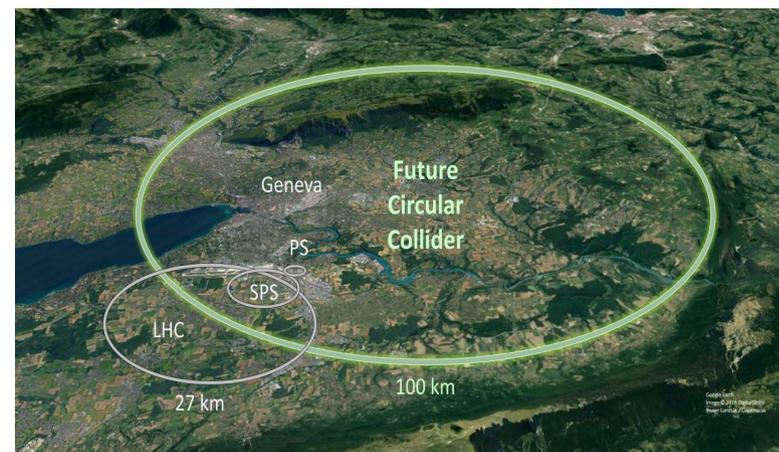
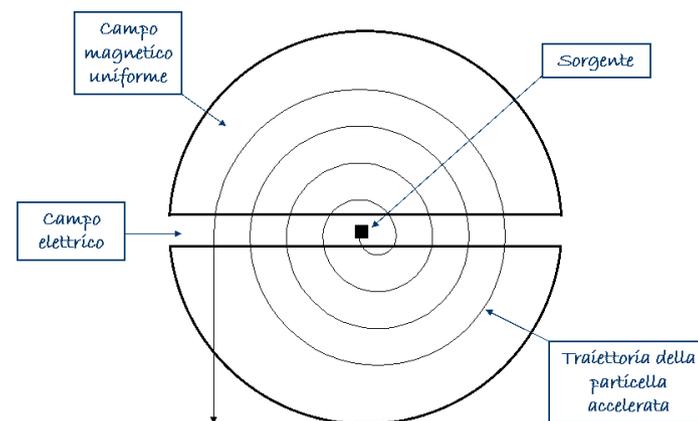


GLI ACCELERATORI DI PARTICELLE

Il ciclotrone, al posto di un'ingombrante successione di cilindri, utilizza solo due elettrodi, ottenuti prendendo un cilindro cavo e tagliandolo in due lungo un piano passante per il suo asse di simmetria, così da ottenere due strutture cave a forma di D. Se le particelle si muovono a velocità prossime a quelle della luce viene a mancare il sincronismo tra il moto della particella e l'inversione di polarità e quindi la particella si fermerà. Per prevenire ciò venne implementato un alternatore che genera corrente alternata con frequenza crescente.

Questo viene chiamato sincrotrone, che quindi è un'evoluzione del ciclotrone.

Il più lungo sincrotrone d'Europa fu il Super Proton (SPS) Synchrotron del CERN, poi evolutosi in Large Electron-Positron Collider (LEP) e infine smantellato per costruire il Large Hadron Collider (LHC). L'LHC è il più potente acceleratore finora realizzato e può accelerare adroni a una velocità simile a quella della luce.



LE PARTICELLE ELEMENTARI

- All'inizio degli anni trenta del Novecento, dunque, tutta la materia conosciuta poteva essere descritta mediante tre sole particelle: **il protone, il neutrone e l'elettrone**, cui andava aggiunto solo il fotone, introdotto nel 1905 da Albert Einstein.
- Dirac nel tentativo di conciliare la Meccanica Quantistica con la Teoria della Relatività Ristretta scrisse una complicata equazione che oggi porta il suo nome: **l'equazione di Dirac**. Questa condusse anche ad una scoperta: una soluzione dell'equazione corrispondente ad un elettroni dall'energia negativa. Egli avanzò l'ipotesi del “mare di Dirac” e interpretò queste particella come una lacuna al suo interno. Oltre ad essa poi se ne scoprirono molte altre, queste presero il nome di **antiparticelle**.
- La scoperta della antiparticelle poi fu accompagnata subito dopo a quella del **neutrino**, introdotto poiché nel decadimento beta l'energia associata ai prodotti di reazione è sensibilmente inferiore a quella che ci si sarebbe aspettata in base al calcolo del difetto di massa.
- Tra le particelle dalla grande massa (i barioni) e quelle con massa molto piccola (i leptoni) venne introdotta la categoria media dei **mesoni**. Il primo a essere scoperto fu in muone, poi posto nella categoria dei leptoni. Il concetto di mesone però è rimasto e ad oggi però conosciamo mesoni come il kaone o il pione.

- Ad oggi le particelle sono divise per massa in **barioni, mesoni e leptoni**. I primi sono formati da 3