Il Fuoco
L'elemento rubato agli Dei: dal Mito al Futuro

Relatori: Teresa Polimei e Alberto Renieri
(Associazione "I Sette")

Intermezzi musicali: Carla Costigliola (*voce solista)*
Mario Albanesi (*chitarra)*
Marco Palladini (*chitarra*)
Fabio Colatosti (*percussioni)*

Presso Sede FIDAF (Federazione Italiana Dottori in Agraria e Forestali)
via Livenza 6, Roma – 16 ottobre 2015 ore 16:30

Il Fuoco

L'elemento rubato agli Dei: dal Mito al Futuro

Laudato si', mi' Signore, per frate focu, per lo quale ennallumini la nocte, et ello è bello et iocundo et robustoso et forte.

« La flamme, parmi les objets du monde qui appellent la rêverie, est un des plus grands opérateurs d'images. La flamme nous force à imaginer. Devant une flamme, dès qu'on rêve, ce que l'on perçoit n'est rien au regard de ce qu'on imagine. La flamme porte sa valeur de métaphores et d'images dans les domaines de méditation les plus divers »
Gaston Bachelard

SOMMARIO

1. Introduzione: il Mito e la Filosofia
2. Il Fuoco che Distrugge, Purifica e Punisce
3. Il Fuoco nella Storia
4. Il Fuoco nella Scienza
5. Il Fuoco Nucleare
6. Quando il Fuoco ci scappa di Mano: l'Incendio
7. Utilizzo dell'Energia Nucleare

1. Introduzione: il Mito e la Filosofia

Secondo i miti più antichi, il fuoco ha origine divina, non umana. Per questo gli uomini hanno dovuto in qualche modo "rubare" il fuoco agli dei.

Vengono riportate numerose varianti del furto del fuoco, in culture molto distanti e diverse fra loro. Questo furto viene di solito perpetrato ai danni degli dei da un essere divino o semidivino

Per gli antichi greci il grande dio del cielo, Zeus, nascose il fuoco agli uomini, ma Prometeo , figlio del Titano Giapeto, rubò il fuoco alla divinità del cielo e lo portò a terra in regalo agli uomini.

Per questo furto Zeus punì Prometeo incatenandolo ad una rupe del Caucaso, e inviando un avvoltoio a divorare ogni giorno e per l'eternità il fegato dell'eroe; di notte, infatti, l'organo riacquistava tutto ciò che aveva perso durante il giorno.

Nicolas-Sébastien Adam, Parigi, Louvre

Prometeo sopportò questa tortura per tremila anni, finché non venne liberato da Ercole.

Nicolas-Sébastien Adam, Parigi, Louvre

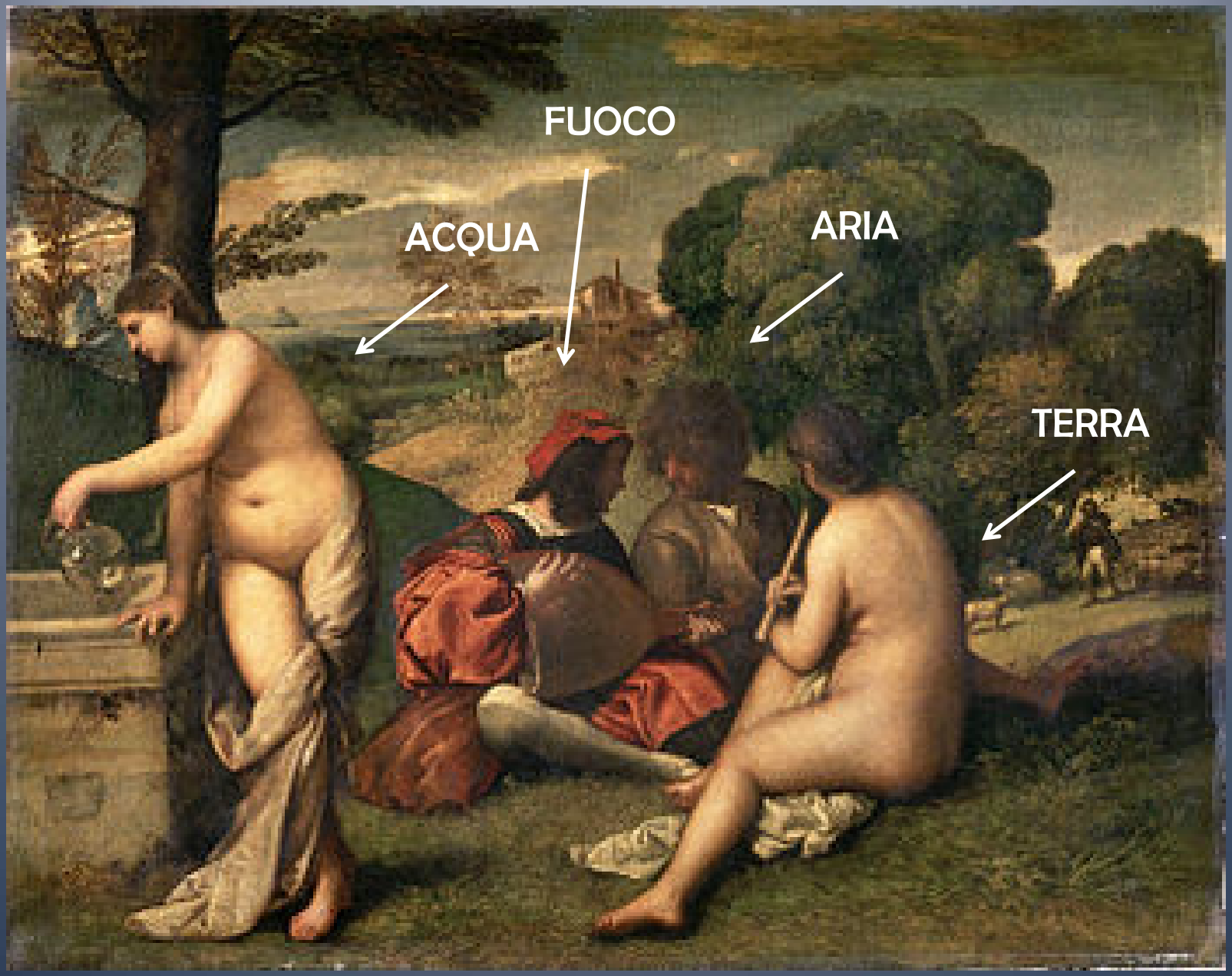
La mitologia, secondo *James George Frazer* (antropologo delle religioni) può venir definita come la filosofia dell'uomo primitivo.

Il suo primo tentativo di rispondere a quelle domande generali riguardanti il mondo, le quali senza dubbio si sono imposte al pensiero umano fin dai tempi più antichi e continueranno ad occuparlo fino all'ultimo.

Una domanda pressante concernente il mondo riguardava proprio da che cosa fosse costituito.

Siamo nel 450 a.c. e la filosofia, per rispondere a questo quesito, tenta di prendere il posto del mito.

I quattro elementi



Tiziano, *Concerto campestre*

Zeus: Fuoco △

Era (moglie di Zeus): Aria ⊼

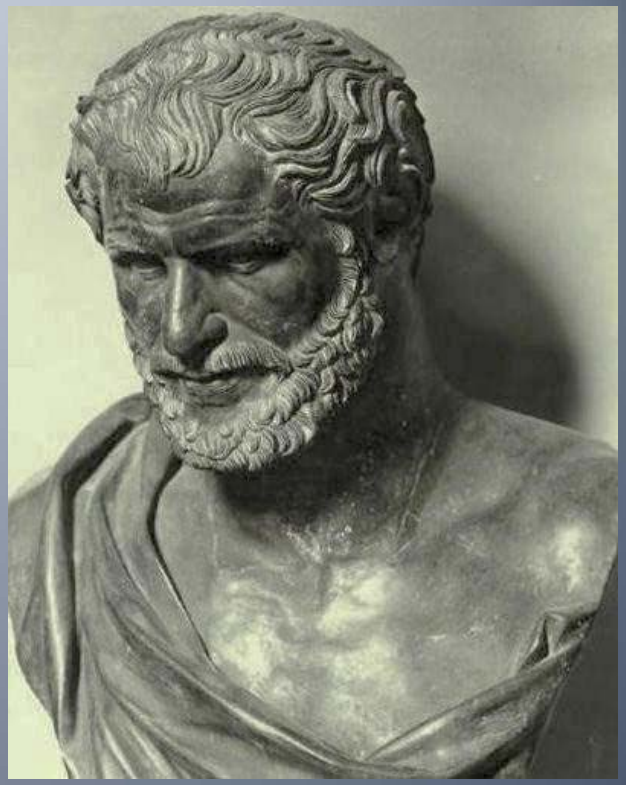
*Persefone (*che con le sue lacrime alimenta le sorgenti dei mortali): *Acqua* ▽

Ade (dio degli inferi): Terra ⊽

«Conosci innanzitutto la quadruplice radice
di tutte le cose: Zeus è il fuoco luminoso,
Era madre della vita, e poi Ade,
Persefone infine, alle cui sorgenti i mortali bevono»

Empedocle (ca. 450 a.c.)

Fuoco, Aria, Acqua e Terra erano per i greci delle entità elementari (radici) non composite, la cui combinazione genera l'intero universo.
Per Leucippo, e poi Democrito, queste entità elementari erano gli Atomi



La realtà degli Atomi costituiva per Democrito l'arché, quindi l'essere immutabile ed eterno. Gli atomi erano concepiti come particelle originarie indivisibili: essi cioè erano quantità o grandezze primitive e semplici (ovvero non composte), omogenee e compatte, la cui caratteristica principale è l'indivisibilità

Ma cosa spinge questi elementi a incontrarsi, interagire, combinarsi e formare così tutte le cose animate ed inanimate?

I greci non concepivano l'azione a distanza (non solo loro!).

I filosofi epicurei ipotizzarono l'esistenza del "clinamen"

Il clinamen (in greco *parénklisis*, *παρέγκλισις*) **è la deviazione spontanea degli atomi nel corso della loro caduta nel vuoto in linea retta, deviazione casuale, sia nel tempo sia nello spazio, che permette agli atomi di incontrarsi e così di interagire.**

Chi ha costruito l'Universo?

Forse Dio?

No! Per i greci Dio ha creato l'universo, ma non lo ha ordinato e plasmato, si è tenuto ben distante dalla sua creatura

È stato il Demiurgo, "δημιουργός ", «artefice e padre dell'universo», forza ordinatrice, imitatrice, plasmatrice, che trasforma e forma, ma non crea.

Secondo Platone il Demiurgo in qualche misura vivifica la materia, dandole forma e ordine, e la rende anima del cosmo.

L'Universo dei greci è così composto:

Le radici di tutte le cose

TERRA

ACQUA

ARIA

FUOCO

L'origine delle interazioni tra le radici

CLINAMEN

Il plasmatore e ordinatore della materia

DEMIURGO

L'Universo dei fisici del XXI secolo è così composto:

Le particelle elementari

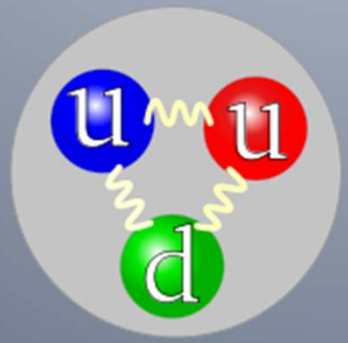
QUARK UP

QUARK DOWN

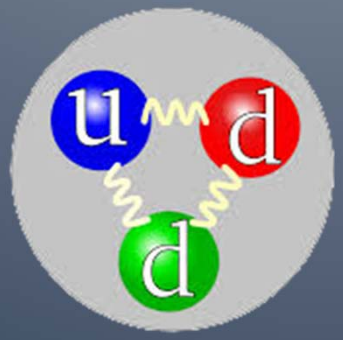
ELETTRONE

NEUTRINO

PROTONE



NEUTRONE



L'origine delle interazioni tra le particelle

GLUONI

$W^{\pm}$

Z^0

γ

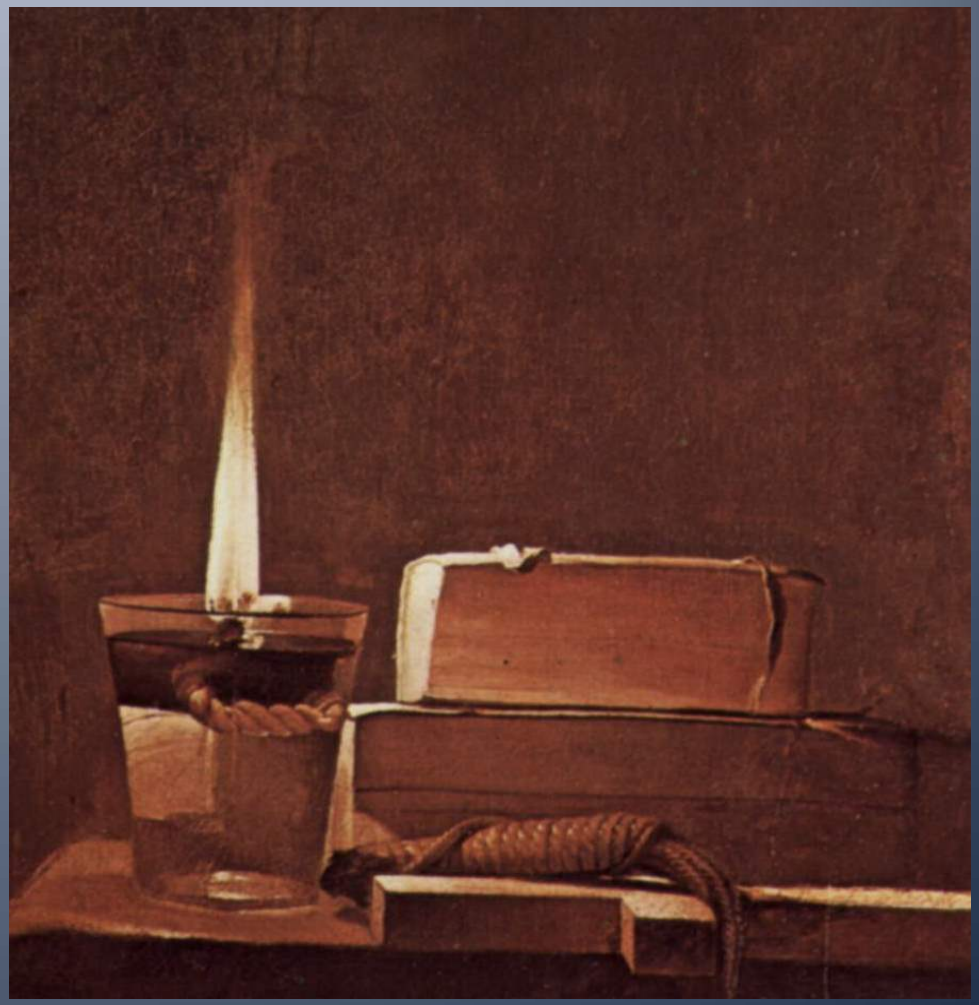
Il plasmatore e ordinatore della materia

HIGGS

2. Il Fuoco che Distrugge, Purifica e Punisce

Rituali

- I rituali magici legati al fuoco comprendevano spesso l'atto di ardere un'immagine, un'erba o un altro oggetto infiammabile, oppure comprendevano l'utilizzo di candele



Georges de la Tour

Rituali

Rituali

- Il fuoco era rispettato e adorato ma anche temuto per la sua devastante forza distruttrice

- Nella sua connotazione positiva, il fuoco era utilizzato per purificare, venivano bruciati fisicamente oggetti ritenuti “responsabili” di cattiva sorte o ritenuti la causa di un male.

Fuoco e Religione

Fuoco e Religione

- Con l'Ebraismo e il Cristianesimo il fuoco diventa una punizione divina inferta agli uomini per i propri peccati.

Fuoco e Religione

- Nell'Antico Testamento (Genesi, 19, 23-26) leggiamo di come «il Signore fece piovere sopra Sodoma e Gomorra zolfo e fuoco. Distrusse queste città e tutta la valle con i suoi abitanti»

Fuoco e Religione

- «(Egli) brucia le iniquità come fuoco, che divora rovi e pruni, divampa nel folto della selva, da dove si sollevano colonne di fumo. Per l'ira del Signore brucia la terra e il popolo è come un'esca per il fuoco» (Is 9,17-18).

Fuoco e Religione

- L'evangelista Luca, nel capitolo terzo del suo vangelo, presenta il Battista come un profeta che appicca dovunque il fuoco della parola del Signore, proclamando l'urgenza indilazionabile della conversione.

Fuoco e Religione

- Il Cattolicesimo, all'epoca della Santa Inquisizione, riteneva che la purificazione degli eretici dovesse avvenire attraverso il fuoco.

- Ben presto l'attenzione dell'uomo per il fuoco è passata dal senso reale del termine a quello metaforico: fuoco del rimorso, fuoco della collera, della gelosia, della parola, della guerra e della spada, e anche del fuoco nelle ossa e del fuoco dell'amore;

3. Il Fuoco nella Storia

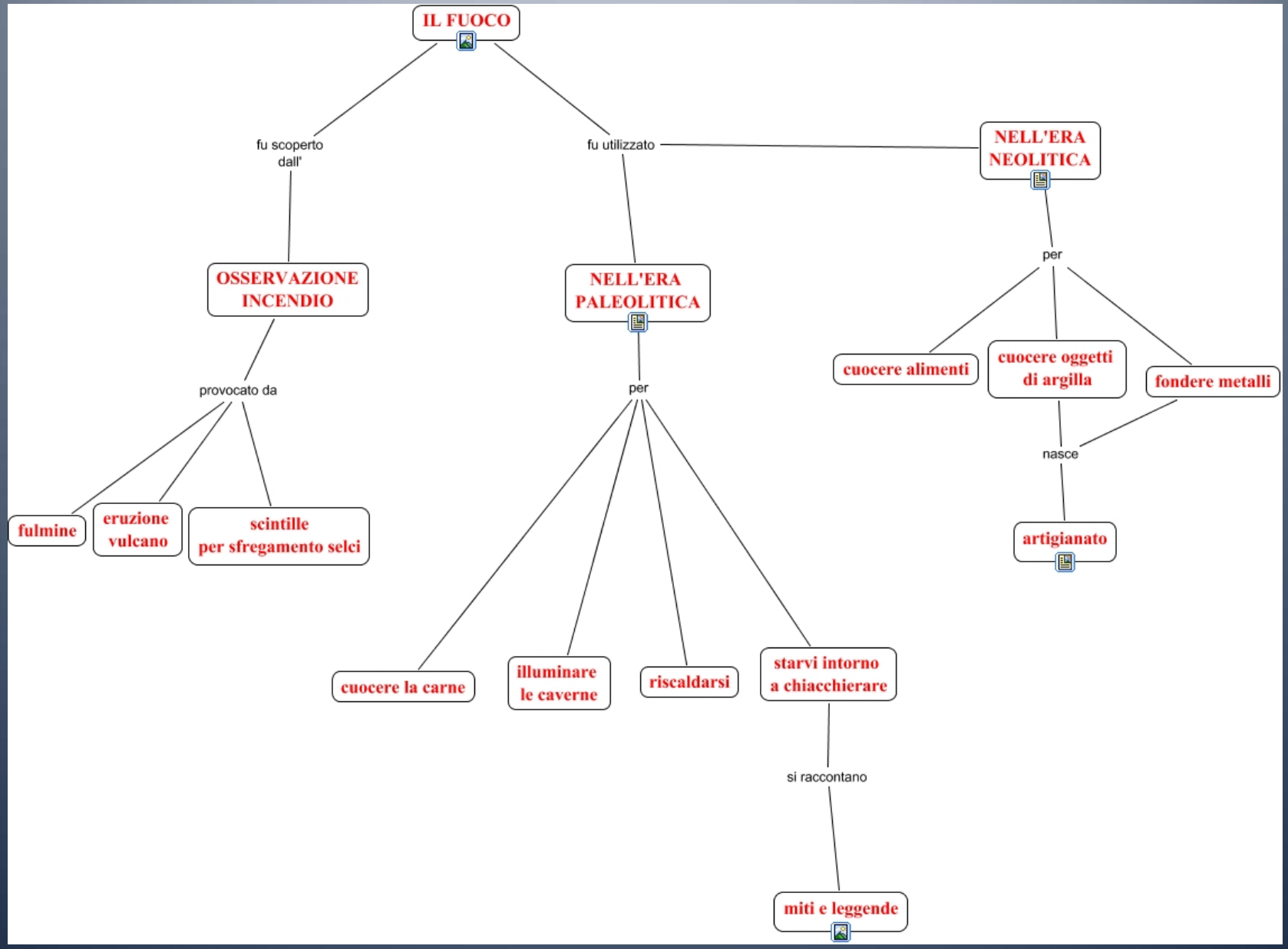
- Circa sette miliardi persone popolano il pianeta. Tutti usano il fuoco in modi diversi ed hanno bisogno di combustibile. Non tutti gli abitanti della terra posso possono disporre a comando di energia

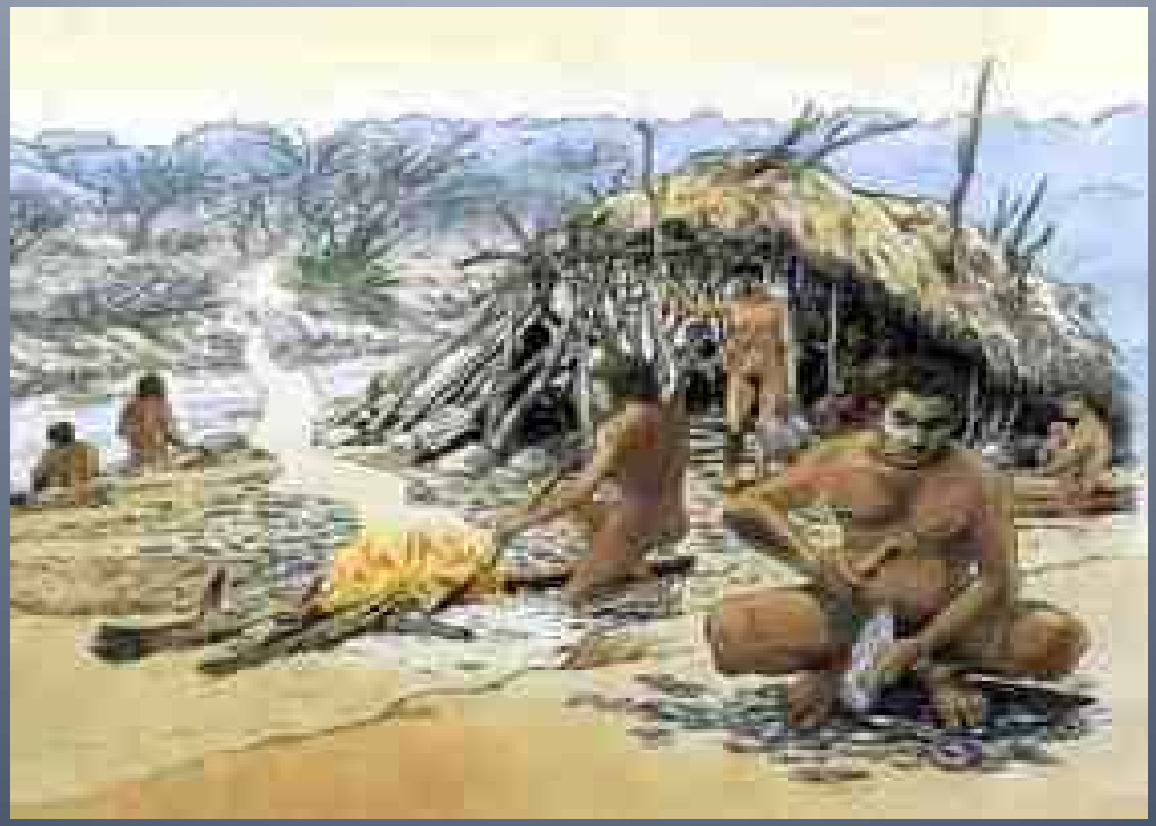
Scoperta del fuoco

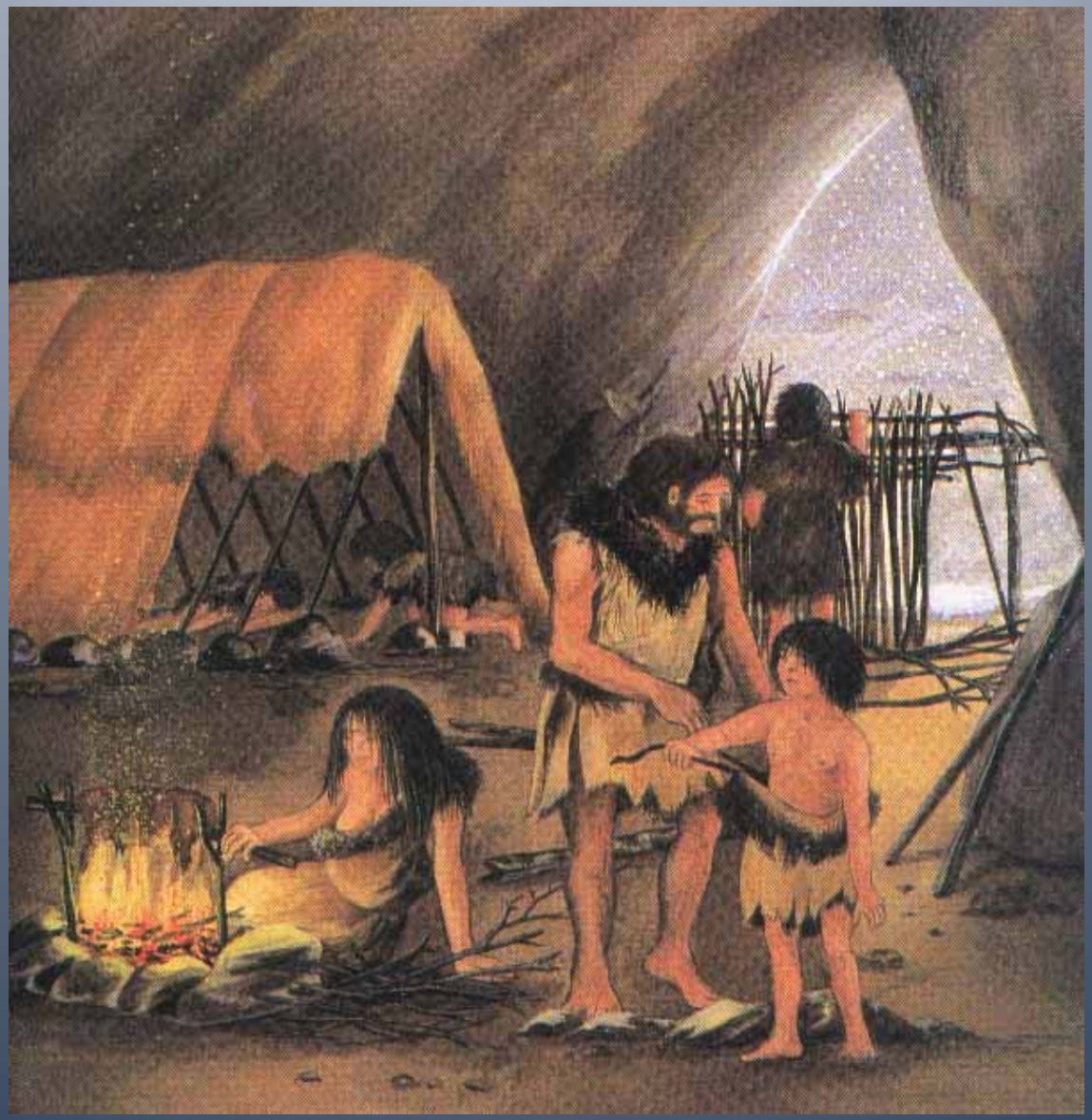
L'umanità nel corso della sua evoluzione sarebbe passata attraverso tre fasi:

1. Non conoscenza dell'esistenza e dell'uso del fuoco
2. conoscenza del fuoco ed ignoranza dei mezzi di accensione. Inizio dell'uso del fuoco per scaldare e per cuocere il cibo
3. Reale scoperta del fuoco e del suo utilizzo

Scoperta del fuoco







La capacità di controllo del fuoco è stato un momento fondamentale dell'evoluzione dell'uomo che ha portato:

- alla cottura del cibo e l'introduzione di una dieta che ha modificato la struttura stessa dell'uomo
- alla socializzazione intorno al fuoco
- allo sfruttamento del territorio da parte dell'uomo

4. Il Fuoco nella Scienza

Cosa è il fuoco?

- In movimento oppure apparentemente fermo, che ci attrae e avremmo a volte voglia di afferrarlo. Ma cosa è il fuoco?

- il fuoco è un insieme di fenomeni chimico-fisici che derivano tutti direttamente o indirettamente da una reazione chimica di «combustione»
  La combustione è una reazione appartenente al grande gruppo delle ossido-riduzioni.

Chimica del fuoco

- Una reazione chimica consiste nella ridistribuzione degli atomi in molecole o aggregati diversi da quelli esistenti precedentemente e quindi nella formazione di sostanze nuove, costituite dagli stessi elementi (atomi) da cui hanno preso origine.

Chimica del fuoco

- La fiamma (dal latino *flamma*) è un fenomeno luminoso tipico della combustione, di cui è anche l'indice più evidente
- dove c'è una fiamma, c'è una combustione in atto.

Chimica del fuoco

- Fisicamente, la luce emessa è dovuta alle molecole dei prodotti gassosi della combustione, ancora eccitate, che emettono l'energia sotto forma di fotoni nello spettro visibile.
- Il movimento delle fiamme è quello dei gas combusti, molto caldi, che sfuggono verso l'alto nell'atmosfera circostante.

Chimica del fuoco

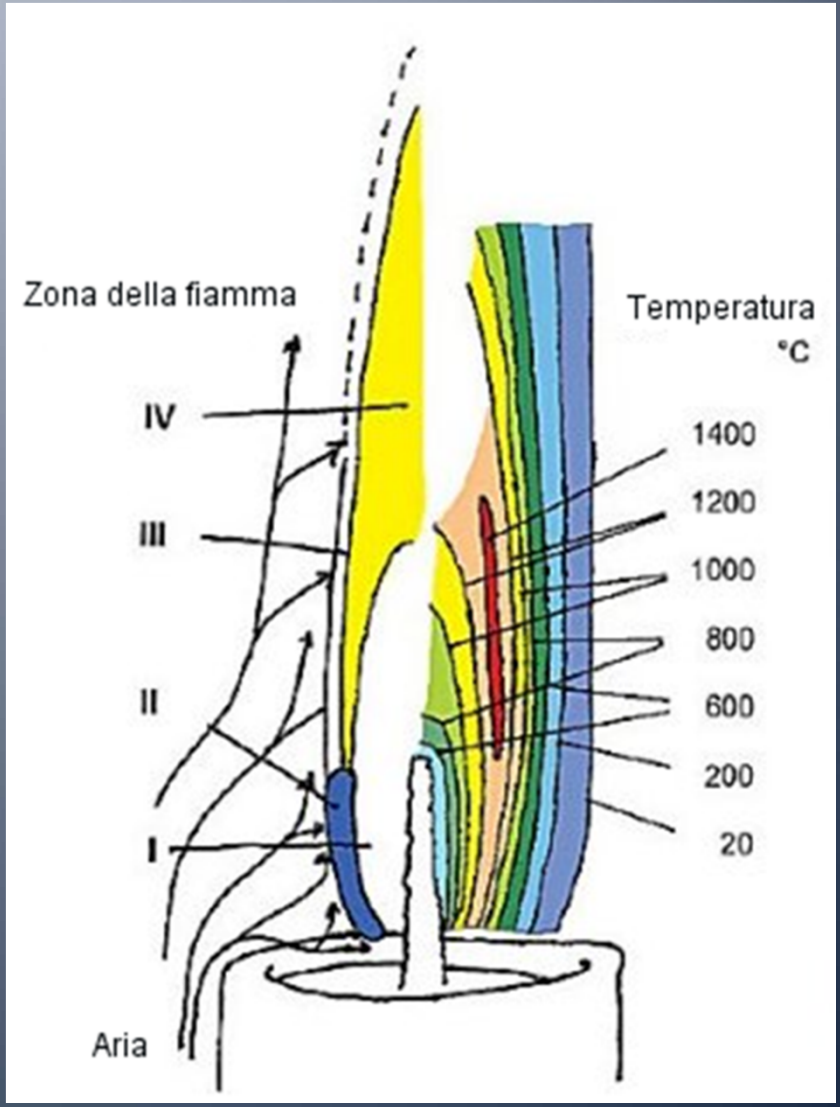
Alcuni materiali bruciano senza mostrare fiamme visibili:

- in questo caso la lunghezza d'onda dei fotoni emessi dai gas non è nel campo del visibile ma nell'infrarosso o (più raramente) nell'ultravioletto.
- La fiamma di un gas molto puro, ad esempio metano, in condizioni abbondanza di ossigeno, può risultare incolore, trasparente, pressoché immobile e silenziosa

- Il colore della fiamma è un ottimo indicatore della composizione chimica di una sostanza: sottoposta a spettroscopia, la luce della fiamma rivela una serie di righe spettrali caratteristiche delle molecole e degli elementi contenuti nel gas.
- A seconda della temperatura il colore della fiamma cambia, ciò talvolta può facilitare il riconoscimento del combustibile.

Chimica del fuoco

- Se si osserva una fiamma, si possono riconoscere in essa diverse colorazioni a seconda si osserva sulla sua base, cioè più vicina al materiale che sta bruciando, oppure più in periferia, ovvero più lontano da esso, magari sulla sommità della stessa fiamma.

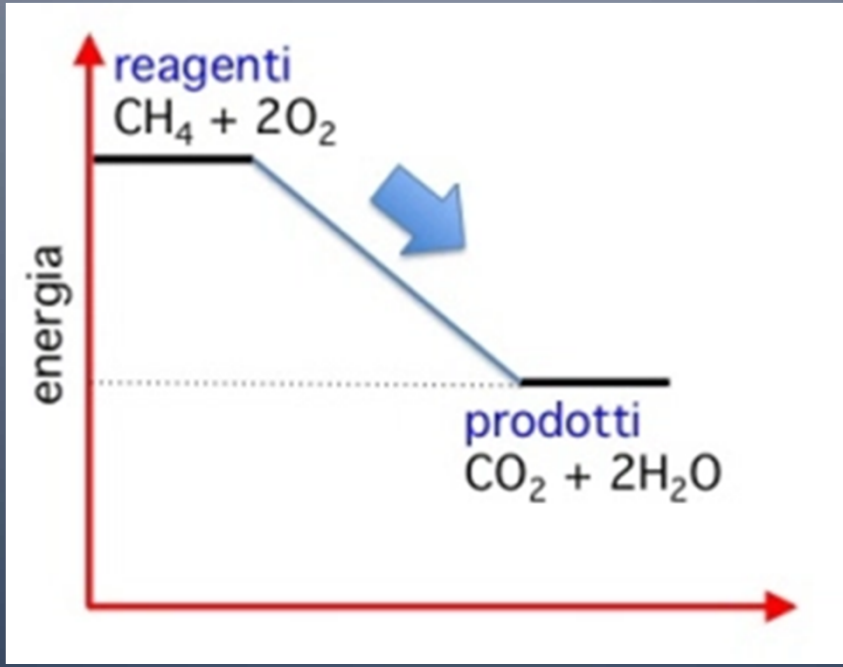


Combustione

- La combustione è una reazione chimica nella quale un combustibile (“sostanza ossidabile”) reagisce con un comburente (“sostanza ossidante”), liberando energia, in genere sotto forma di calore

Combustione

- La combustione è una reazione esotermica, che libera calore perché i reagenti possiedono più energia dei prodotti di reazione



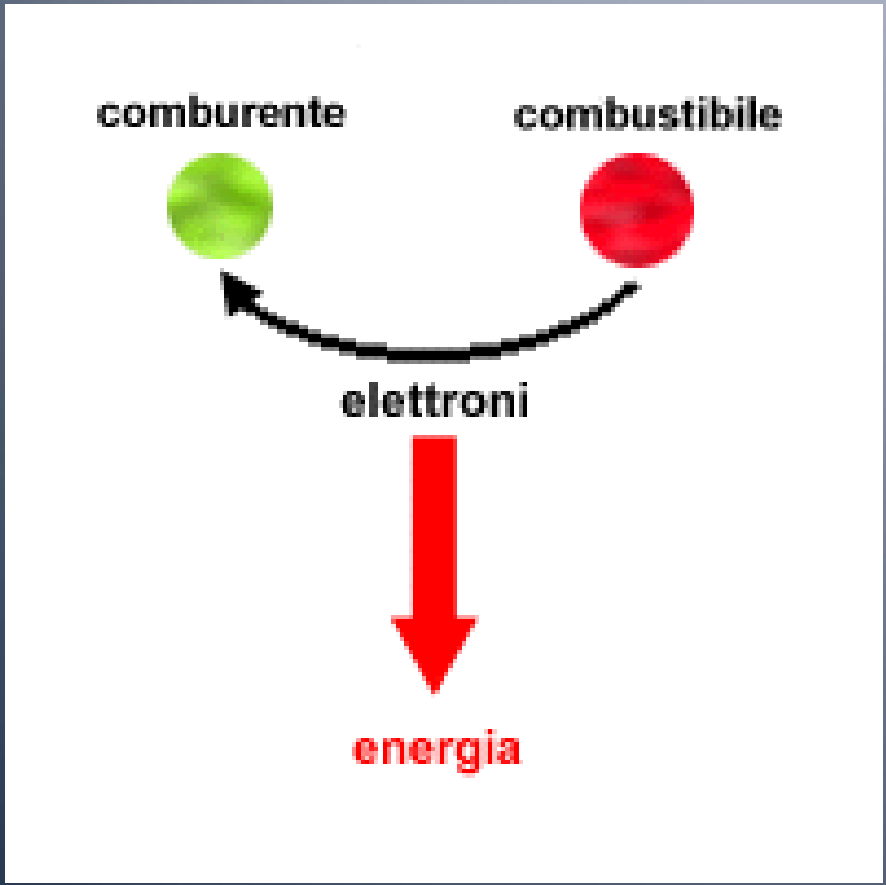
Combustione

- i combustibili, reagendo con i comburenti, perdono elettroni (si ossidano), mentre i comburenti acquistano elettroni (si riducono).

Combustione

- La combustione è un processo che avviene attraverso reazioni fortemente esotermiche tra una sostanza combustibile e una sostanza comburente, di solito l'ossigeno dell'aria.
- Una combustione di un idrocarburo (HC) viene definita completa quando tutto il C combustibile viene trasformato in CO2, tutto l'H in H2O

Combustione



Comburente elettronegativo attrae gli elettroni (si riduce)

Combustibile li perde (si ossida)

Esempio di combustione

Energia di attivazione

Calore

$2H_2 + O_2 \rightarrow 2(H_2O)$

Due molecole di Idrogeno allo stato di gas

Una molecola di ossigeno allo stato di gas

Due molecole di acqua allo stato di gas

Combustibili

- Le sostanze combustibili più comuni sono, in larga parte, composte di idrogeno e carbonio e si presentano sotto la forma solida, liquida o gassosa
- Il comburente è quasi sempre l'ossigeno dell'aria

Combustibili

- Composizione dell'aria: l'aria è un miscuglio gassoso costituito per il 78% in volume da azoto, per il 21% da ossigeno e per 1% da gas rari che si possono inglobare nell'azoto.
- Il rapporto 79/21 vale circa 3,8; 1 Nm3 di O2 è cioè accompagnato da 3,8 Nm3 di N2 e fa parte di 1 + 3,8 = 4,8 Nm3 di aria.

Combustibili

- Un combustibile di interesse pratico deve:
  - Essere facile da estrarre/produrre e da utilizzare
  - Reagire *velocemente, ma non troppo*
  - Non dare origine a sostanze inquinanti
  - Essere di costo relativamente contenuto

- I parametri che maggiormente interessano per la valutazione e l'impiego dei combustibili sono:
  - Il potere calorifico
  - L'aria teorica ed effettiva necessaria per lo sviluppo delle reazioni
  - Il volume e la composizione dei fumi
  - La temperatura adiabatica di fiamma
  - La temperatura di accensione
  - I limiti di infiammabilità
  - Il potenziale termico

- Volendo analizzare nel particolare la combustione del metano si ha che la reazione stechiometrica di combustione è:

  $CH_4 + 2O_2 = CO_2 + 2H_2O$

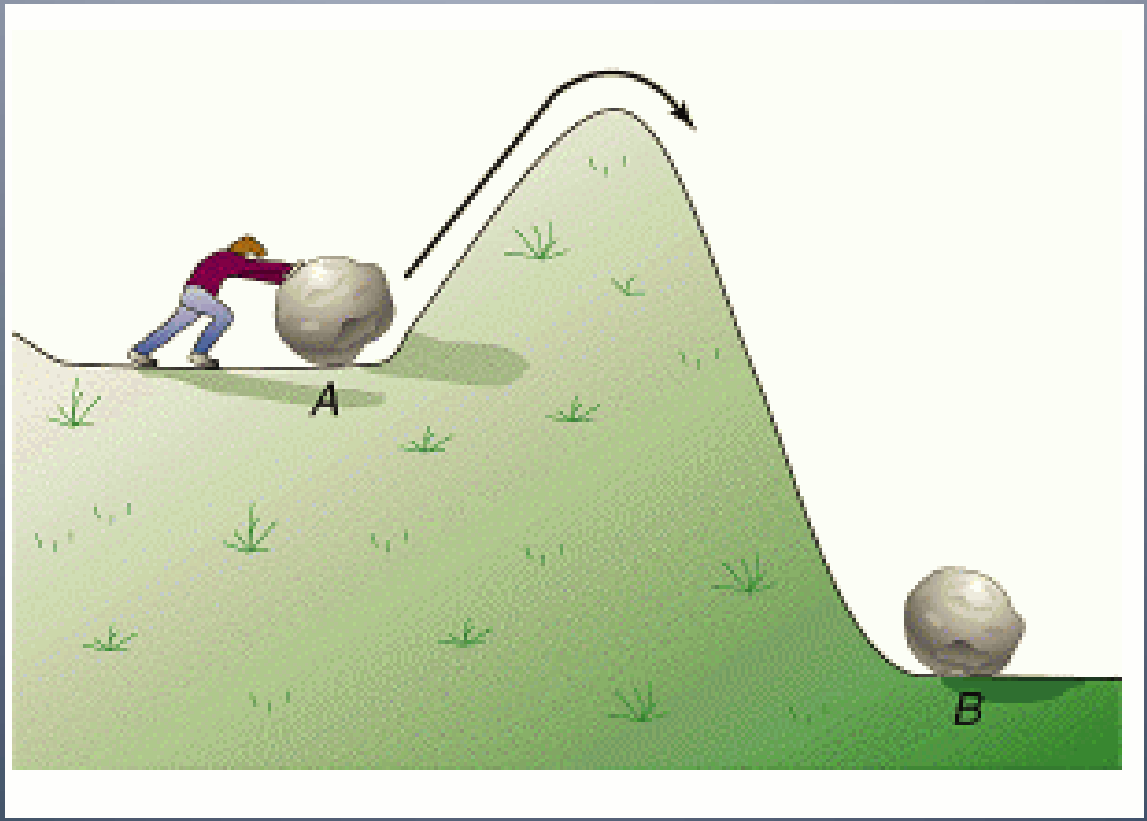
- Dato che le combustioni di nostro interesse avvengono utilizzando l'aria anziché l'ossigeno puro, bisogna tenere conto della presenza dell'azoto. L'aria è teoricamente formata dal 21% di ossigeno e dal 79% da azoto; ciò vuol dire che il rapporto ossigeno/azoto è di 1:3,76.
- Pertanto la reazione di combustione diventa:

  $CH_4 + 2O_2 + 7{,}52N_2 = CO_2 + 2H_2O + 7{,}52N_2$

Temperatura di accensione

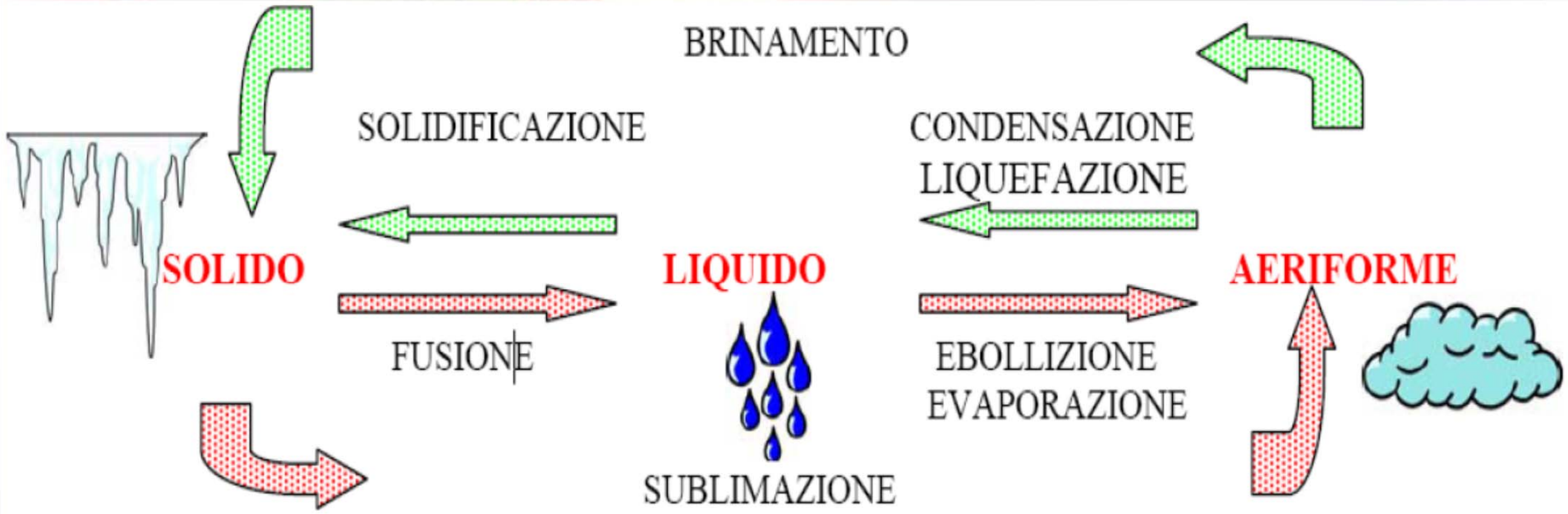
- È la minima temperatura alla quale la miscela combustibile-comburente inizia a bruciare spontaneamente in modo continuo senza ulteriore apporto di calore o di energia dall'esterno.

Temperatura di accensione



Temperatura di accensione

SOSTANZE	Temperatura di accensione (°C) *valori indicativi*
acetone	540
benzina	250
gasolio	220
idrogeno	560
alcool metilico	455
carta	230
legno	220-250
gomma sintetica	300
metano	537


BRINAMENTO
SOLIDIFICAZIONE
CONDENSAZIONE
LIQUEFAZIONE
SOLIDO
LIQUIDO
AERIFORME
FUSIONE
EBOLLIZIONE
EVAPORAZIONE
SUBLIMAZIONE

- Ciò che “brucia” nella combustione delle sostanze sono i vapori che i solidi e i liquidi emettono.

- I metodi di produzione dell'industria moderna sono ad alta concentrazione di carburante. Gran parte dell'energia consumata deriva da combustibili fossili: petrolio, gas, carbone. I processi di combustione avvengono all'interno delle apparecchiature industriali e la popolazione non è esposta direttamente al fuoco.
- Prodotto simbolo dell'industria moderna, le automobili, vengono messe in moto da combustibile fossile. Sono fatte di metallo, plastica e vetro che sono materiali che vengono prodotti ad alte temperature. Chi è alla guida difficilmente è consapevole di utilizzare il fuoco e i suoi prodotti

5. Il Fuoco Nucleare

5.1 Introduzione

In questo seminario non parleremo di come son fatte le centrali termonucleari né dei problemi ambientali, sociali e politici che pongono.

Si cercherà di capire "solo" che cosa sia l'energia nucleare, dove si manifesti in natura e cosa richiede per potersi "liberare"

5.2 Il Nucleo Atomico

Cominciamo a meglio specificare cosa sia il “nucleo” da cui l’energia “nucleare” prende appunto il nome.

Oggi sappiamo che il mondo materiale è composta da atomi, ma fino al XVIII secolo questo fatto non era affatto accettato da una buona parte del mondo scientifico

John
Dalton

Difatti solo all'inizio del XIX secolo John Dalton rielaborò e ripropose la teoria di Democrito fondando la **teoria atomica moderna**, con la quale diede una spiegazione ai fenomeni chimici:

- Tutta la materia è fatta da particelle microscopiche indistruttibili e indivisibili chiamate atomi.

- Tutti gli atomi di uno stesso elemento sono identici e hanno uguale massa.
- Gli atomi di un elemento non possono essere convertiti in atomi di altri elementi.
- Gli atomi di un elemento si combinano, per formare un composto, solamente con numeri interi di atomi di altri elementi.
- Gli atomi non possono essere né creati né distrutti, ma si trasferiscono interi da un composto ad un altro.

Ci volle però molto tempo prima che tale teoria fosse accettata e non fosse invece considerata solo come un utile artefatto matematico

Ma poi la notevole quantità delle evidenze sperimentali convinse quasi tutti.

Mancava però di capire come l'atomo fosse composto

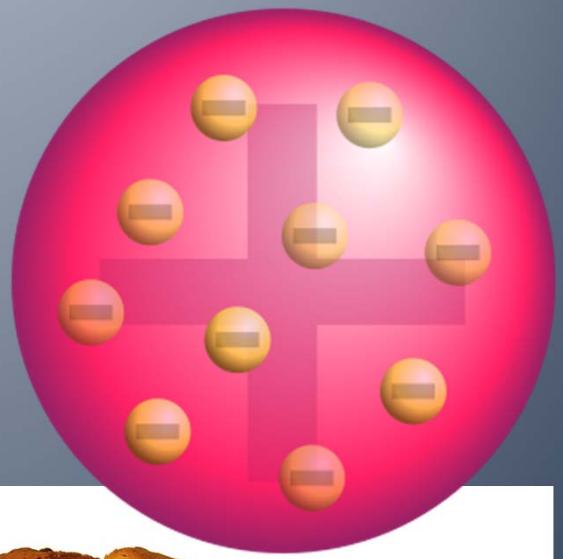
Il primo a formulare un modello credibile per l'atomo fu

Joseph John Thomson

(che aveva scoperto l'elettrone nel 1897)

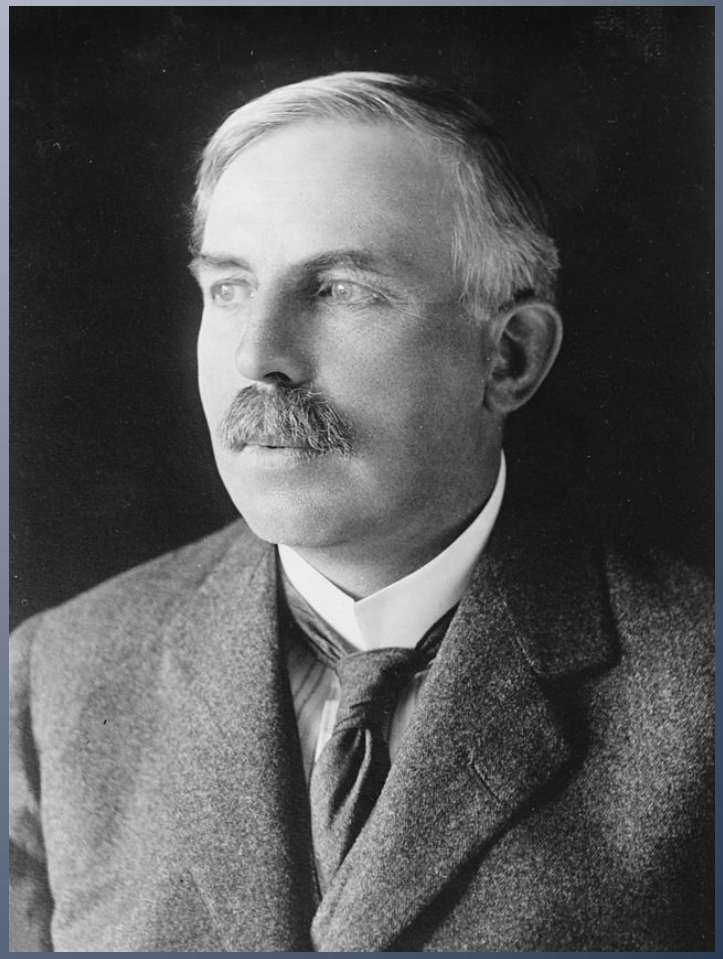
Thomson propose nel 1904 il modello atomico "a panettone" (in inglese, *plum pudding model*).

In questo modello, l'atomo è costituito da una distribuzione di carica positiva diffusa, all'interno della quale sono inserite le cariche negative (come l'uvetta nel panettone).

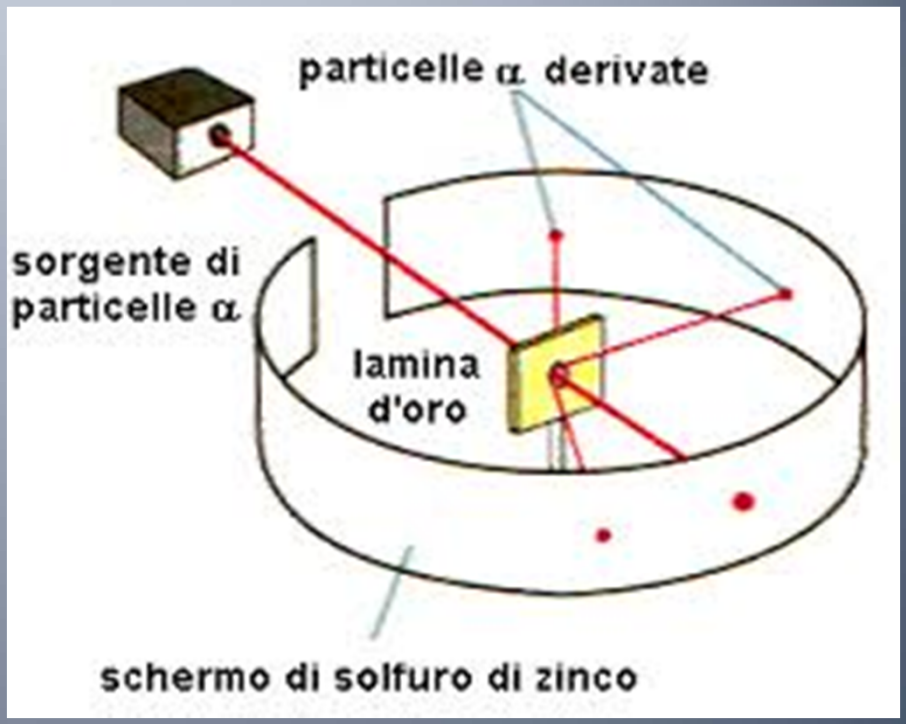


Thomson tentò, con scarso successo, di calcolare attraverso il suo modello alcune delle linee spettrali principali conosciute per alcuni elementi.

Nel 1909, cinque anni dopo la Formulazione da parte di Thomson del suo modello a "panettone" ,
Ernest Rutherford
diresse l'esperimento di
Geiger e Marsden
(anche noto, appunto, come esperimento di Rutherford), dedicato allo analisi sperimentale della struttura dell'atomo.

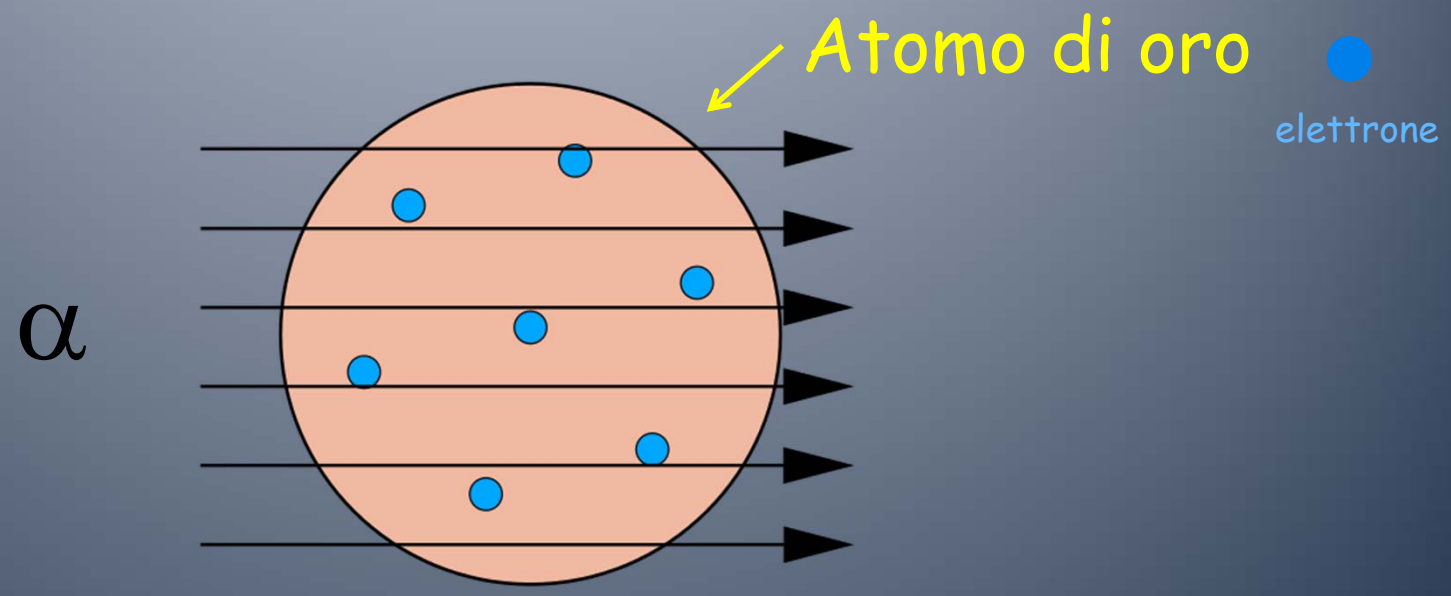


In questo esperimento un fascio di particelle alfa generate dal decadimento radioattivo del Polonio fu diretto ortogonalmente ad un foglio sottile d'oro.



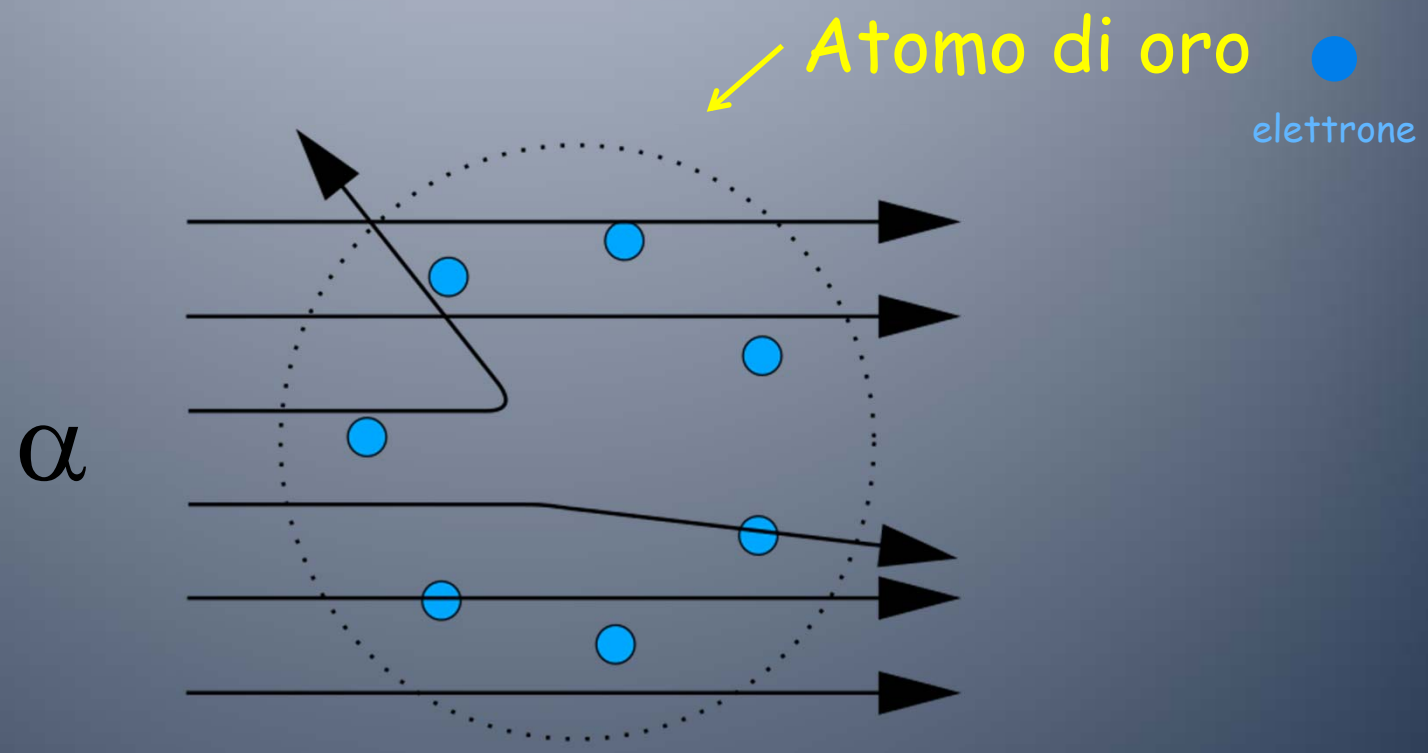
Il foglio d'oro era circondato da un foglio circolare ricoperto di solfuro di Zinco usato come rivelatore: il solfuro di Zinco emette scintille luminose quando viene colpito da particelle alfa.

Secondo il modello di Thomson, allora ben accettato, le particelle alfa avrebbero dovuto attraversare il foglio d'oro venendo deflesse al più di pochi gradi, anche considerando la possibilità di diffusione multipla.



Misurando la deflessione delle particelle si potevano ricavare informazioni sulla distribuzione di carica elettrica all'interno dell'atomo.

Tuttavia venne osservato che alcune particelle (1/8000) venivano riflesse ad angoli anche maggiori di 90°.



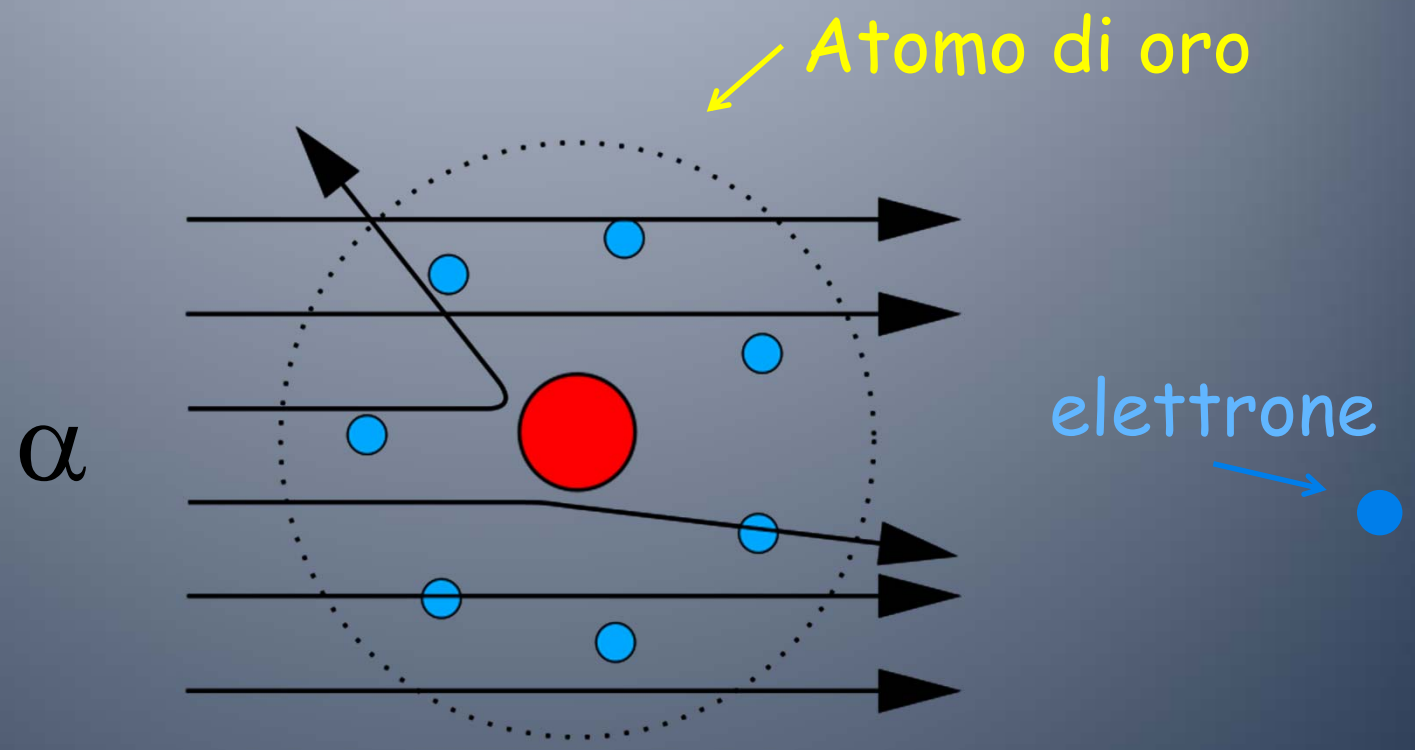
Questo era un evento completamente imprevisto, come risulta dalle parole di Rutherford:

Fu l'evento più incredibile mai successomi in vita mia.

Era quasi incredibile quanto lo sarebbe stato sparare un proiettile da 15 pollici su un foglio di carta velina e vederlo tornare indietro e colpirti.

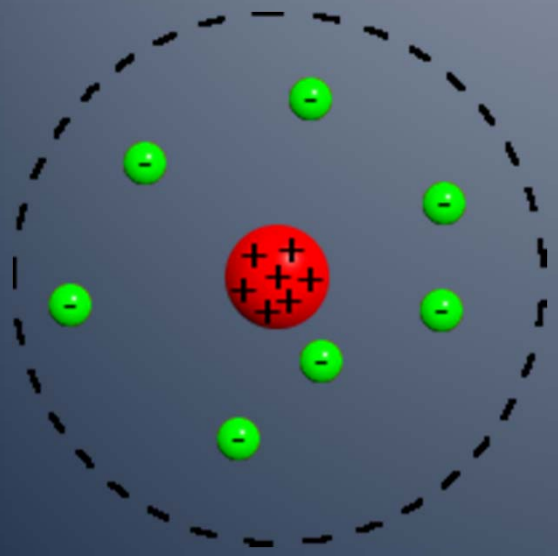
Fu allora che ebbi l'idea di un atomo con un piccolissimo centro massiccio e carico.

E dunque l'atomo per Rutherford doveva più o meno essere fatto così:



"… con un piccolissimo centro massiccio e carico."

Nel nuovo modello proposto da Rutherford la maggior parte della materia è dunque concentrata in un volume (il nucleo) molto piccolo rispetto alle dimensioni atomiche mentre gli elettroni ruotano intorno ad esso, come i pianeti del sistema solare attorno al sole.



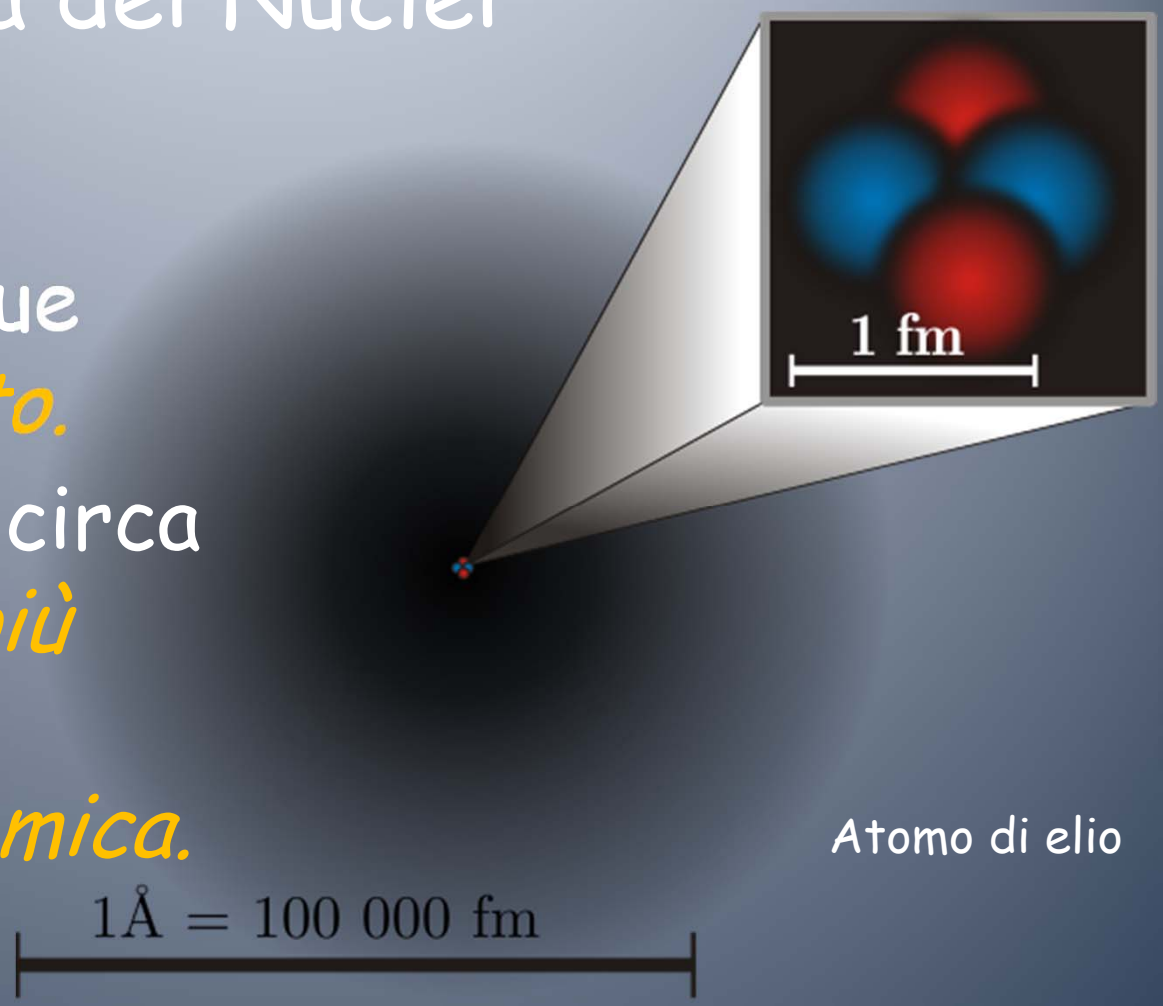
Questo modello tuttavia nulla dice sul "come" gli elettroni siano disposti e perché.

Bisognerà attendere Bohr e la Meccanica Quantistica.

5.3 La Massa dei Nuclei Atomici

L'atomo è dunque pressoché *vuoto.*

Il suo nucleo è circa *100000 volte più piccolo della dimensione atomica.*



Atomo di elio

Se rappresentiamo il nucleo come una sferetta di 1 cm di raggio, gli elettroni orbitano ad una distanza di 1 Km

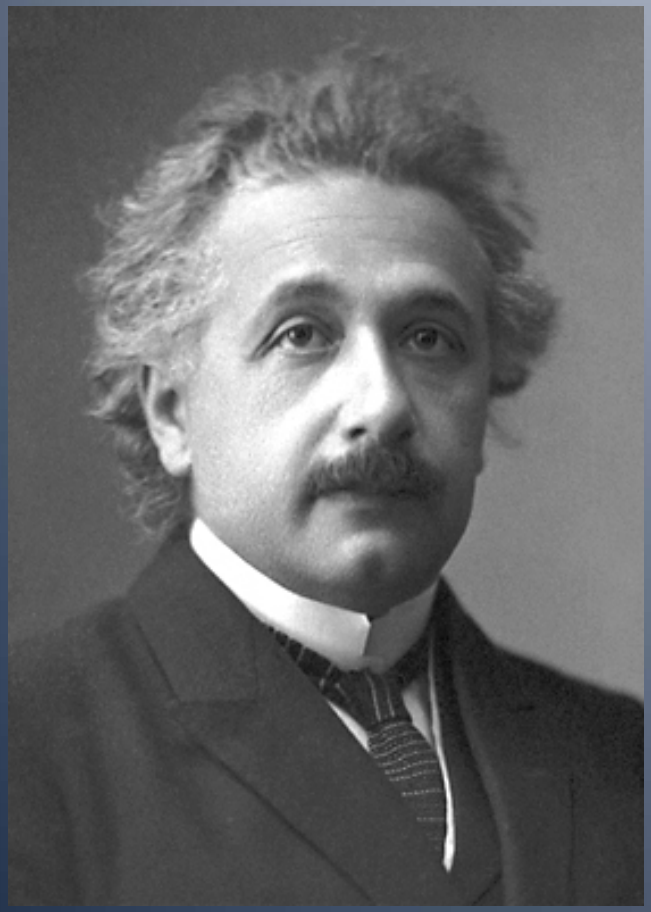
Nel nucleo è concentrata anche la quasi totalità della massa atomica (protoni e neutroni)

Basti pensare che un atomo stabile contiene all'incirca lo stesso numero di elettroni, protoni e neutroni, che pesano quasi

2000

volte di più di un elettrone.

La massa del nucleo non è però data semplicemente dalla somma delle masse dei suoi costituenti (protoni e neutroni)…



… c'è di mezzo l'energia di legame che tiene insieme i protoni e i neutroni nel nucleo, e, come ci dice la relazione energia-massa di Einstein

$$E = mc^2$$

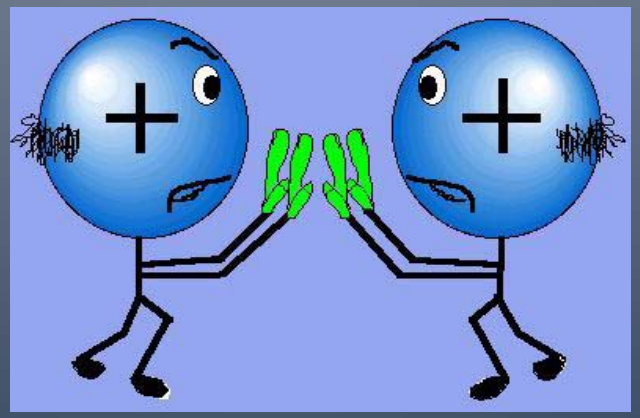
all'energia corrisponde una massa

La massa di un nucleo è data dalla somma della massa di ogni nucleone meno il contributo dato dall'energia di legame E_L/c^2, dove E_L è l'energia necessaria a riportare i nucleoni che compongono il nucleo al loro stato libero:

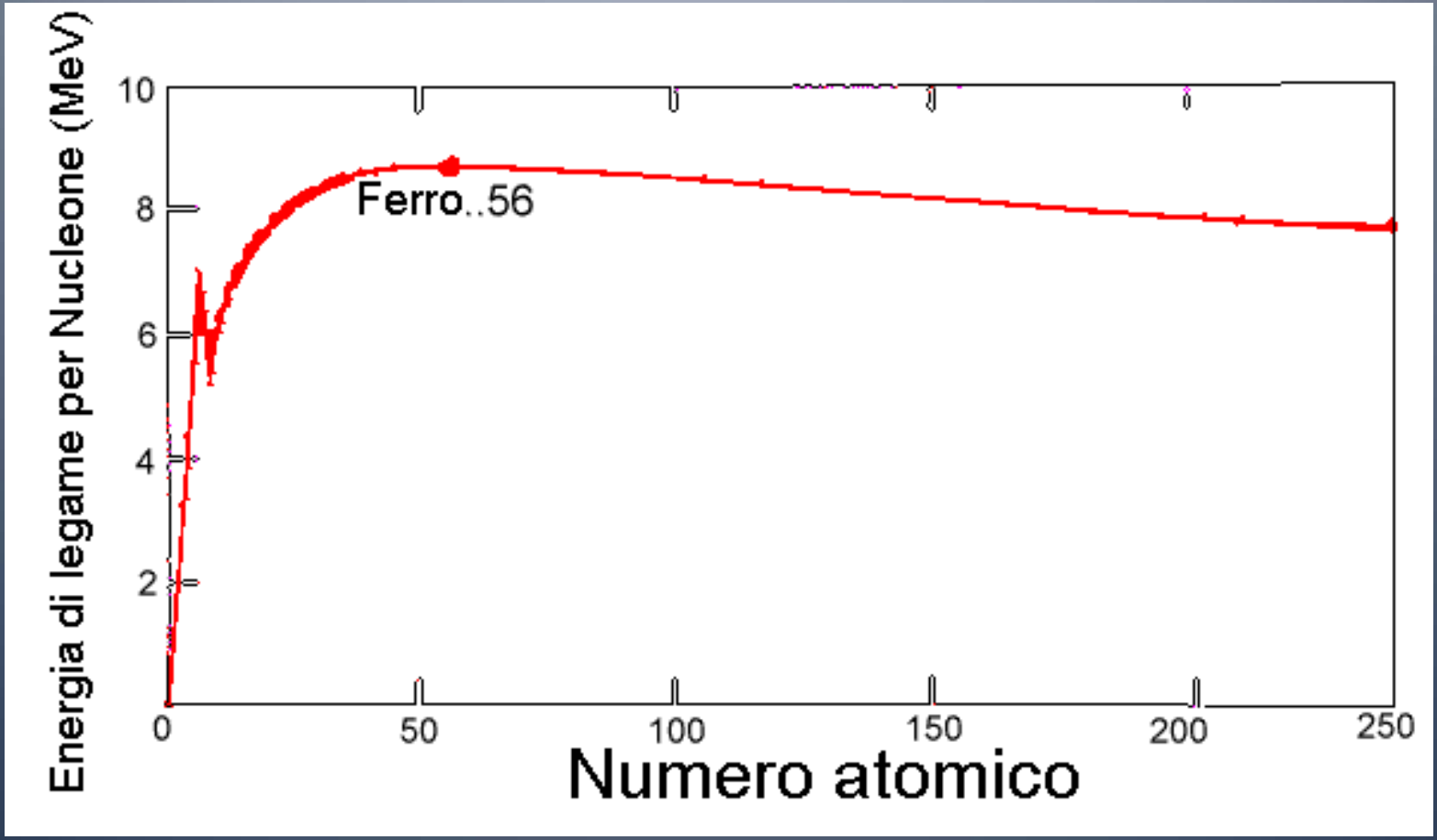
$$M_{nucleo} = \sum_{neutroni} M_{neutrone} + \sum_{protoni} M_{protone} - E_L / c^2$$

più alta è l'energia di legame E_L più leggero è il nucleo!

L'energia di legame è generata dalla saturazione dalla forza *forte* che tende a unire i nucleoni e dalla forza *elettromagnetica* che respinge tra loro i protoni.



L'energia di legame è massima per il Ferro



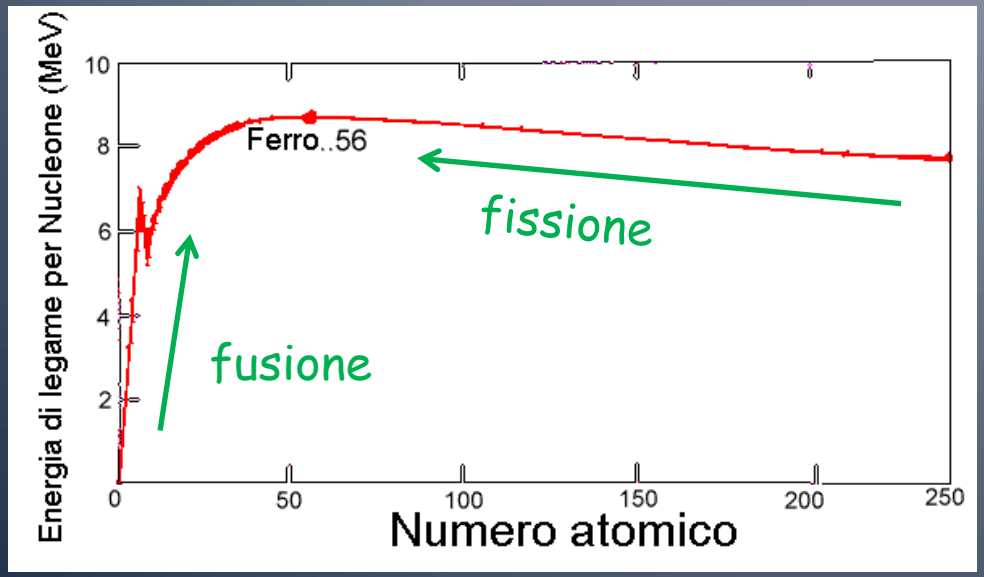
È grazie alle *differenze dell'energia di legame* che siamo in grado di utilizzare

l'energia nucleare:

tramite cioè processi in cui l'energia di legame totale dopo la reazione risulta superiore a quella iniziale, ovvero i nuclei sono legati maggiormente e quindi la massa totale è inferiore:

la differenza si tramuta in energia!

In linea di principio si può dunque ottenere energia sia dalla fusione di nuclei leggeri *(fusione)* che dalla frammentazione di nuclei pesanti *(fissione)*



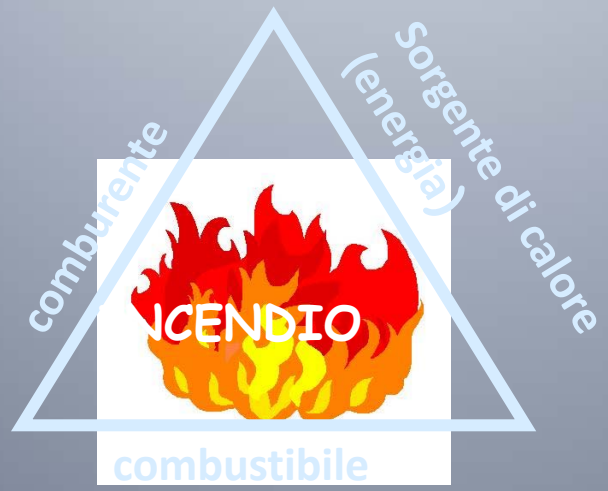
6. Quando il Fuoco ci scappa di Mano:

l'Incendio

Incendio

- L’incendio si può definire come una combustione “non controllata”, che avviene in un luogo non predisposto a contenerla

Affinché si verifichi un incendio è necessario che siano presenti:



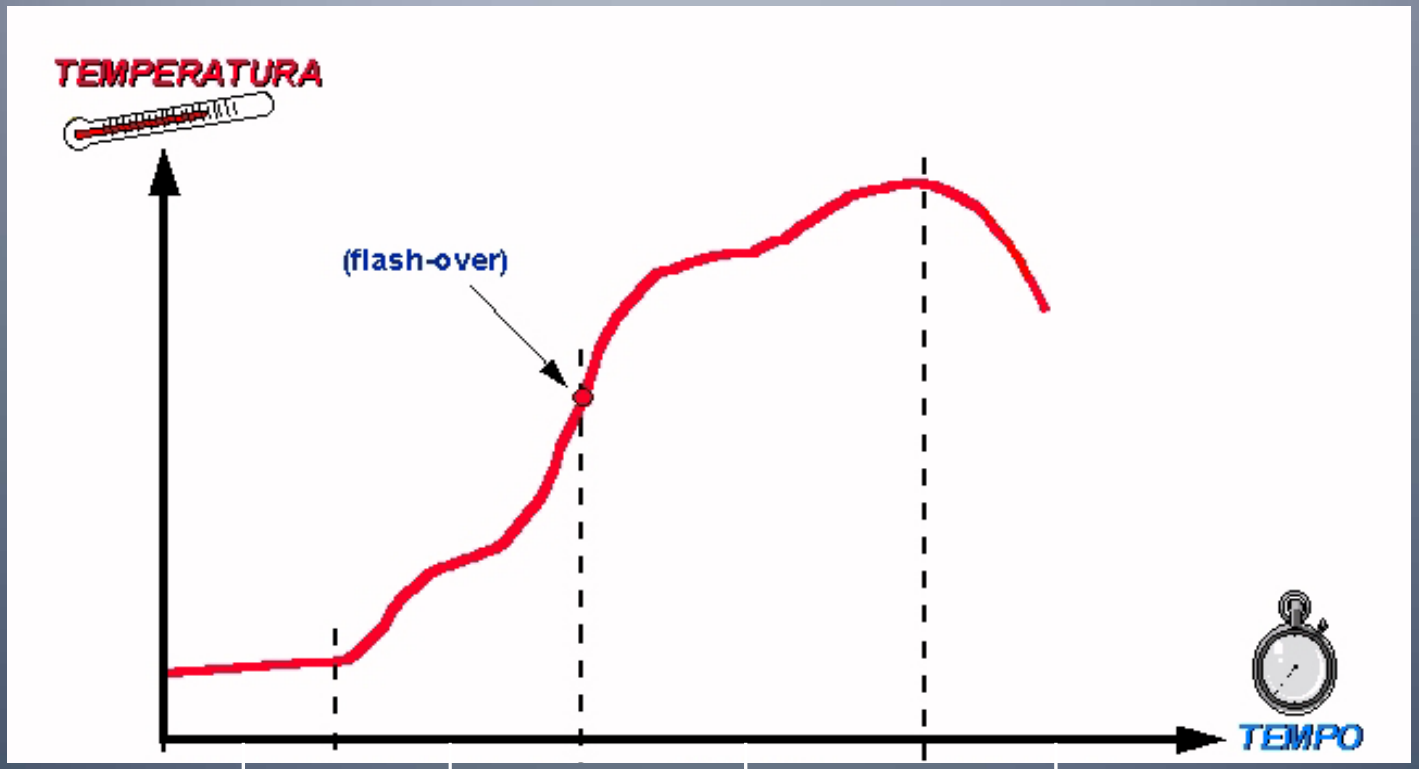
Per ottenere lo spegnimento dell'incendio si può ricorrere a tre sistemi:

soffocamento:
separazione del comburente dal combustibile o riduzione della concentrazione di comburente in aria

Esaurimento del combustibile:
allontanamento o separazione della sostanza combustibile dal focolaio d'incendio

raffreddamento:
sottrazione di calore fino ad ottenere una temperatura inferiore a quella necessaria al mantenimento della combustione

Incendio



1. IGNIZIONE

2. PROPAGAZIONE

3. INCENDIO GENERALIZZATO

4. SPEGNIMENTO

Terra dei fuochi

- La definizione “Terra dei fuochi” deriva da una frase utilizzata da Roberto Saviano nel libro *Gomorra,* che a sua volta riprende i Rapporti Ecomafia pubblicati
da Legambiente.

Terra dei fuochi

Terra dei fuochi

- La cosiddetta “Terra dei fuochi” comprende un’area molto vasta tra la provincia di Napoli e quella di Caserta.
- In questi posti esistono molte discariche abusive, in piena campagna o lungo le strade: quando queste si saturano, per liberare spazio per i rifiuti successivi, vengono appiccati degli incendi. La maggior parte dei rifiuti che vengono “smaltiti” in queste zone sono rifiuti speciali

Terra dei fuochi

- La designazione di una vasta area geografica del Napoletano e del Casertano come 'Terra dei fuochi' si deve a un rapporto di Legambiente sulle ecomafie datato 2003. Una denominazione per indicare un fenomeno di smaltimento illegale di rifiuti anche pericolosi e tossici, spesso anche in cumuli, in aree agricole, che venivano dati poi alle fiamme con la conseguente dispersione nell'aria di ingenti quantità di diossina noto fin dagli anni '80. Pratiche ricorrenti nel triangolo compreso tra Qualiano, Giuliano, Orta di Atella, Acerra, Nola, Marcianise, Succivo, Frattaminore, Frattamaggiore, Mondragone, Castel Volturno e Melito.

7. Utilizzo dell'energia nucleare

7.1 La Fissione Nucleare

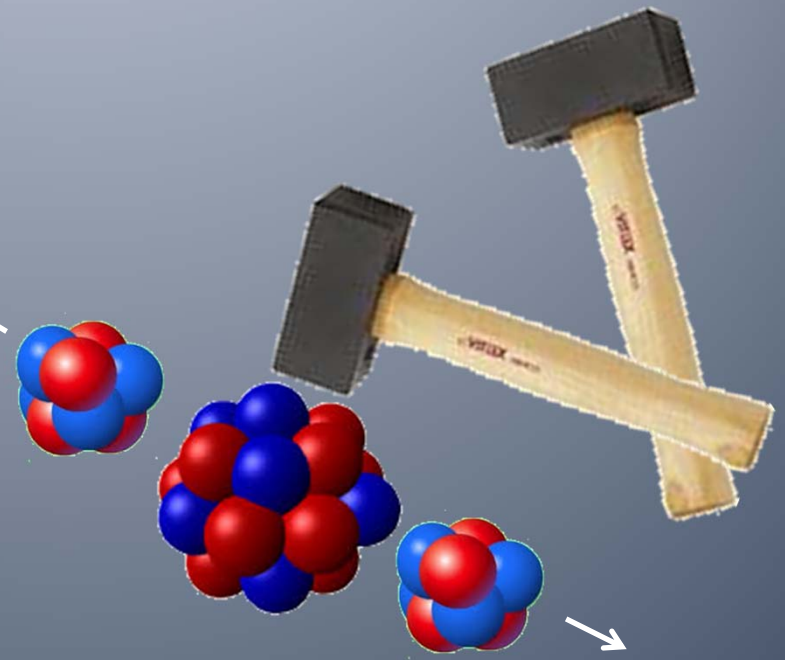
7.1.1 Un po' di storia
7.1.2 La reazione a catena
7.1.3 Un reattore a fissione molto, molto particolare

7.1.1 Un po' di storia

Da quello che abbiamo detto sembrerebbe dunque relativamente facile estrarre energia dai nuclei pesanti!

Basta spezzarli in due!

Sì! Ma come facciamo a spezzarli? Forse con un martello?



Come martello potremmo utilizzare un protone di alta energia prodotto da un acceleratore …

Il problema è che quasi tutti i nuclei atomici pesanti così non si spezzano …

… a causa della "spallata" espellono solo un po' di neutroni e tutto finisce lì.

E allora? Nessuna possibilità?

No! Una possibilità c'è:
la natura ci ha fatto un regalo …

… nell'opinione di alcuni è però un regalo avvelenato!

Esiste allo stato naturale

un elemento (uno solo!)

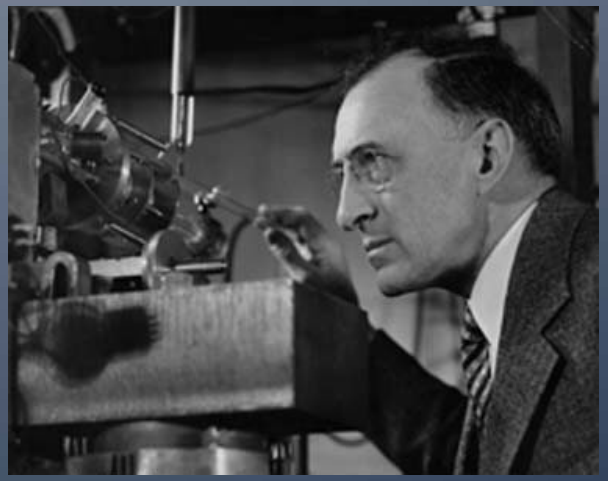
in grado di sviluppare una reazione molto speciale:

La Fissione Nucleare

La **fissione nucleare** è una reazione nucleare in cui il nucleo di un elemento pesante decade in frammenti di minori dimensioni, cioè in nuclei di atomi a numero atomico inferiore, con emissione di una grande quantità di energia e radioattività.

Questo elemento è l'isotopo 235 dell'Uranio:

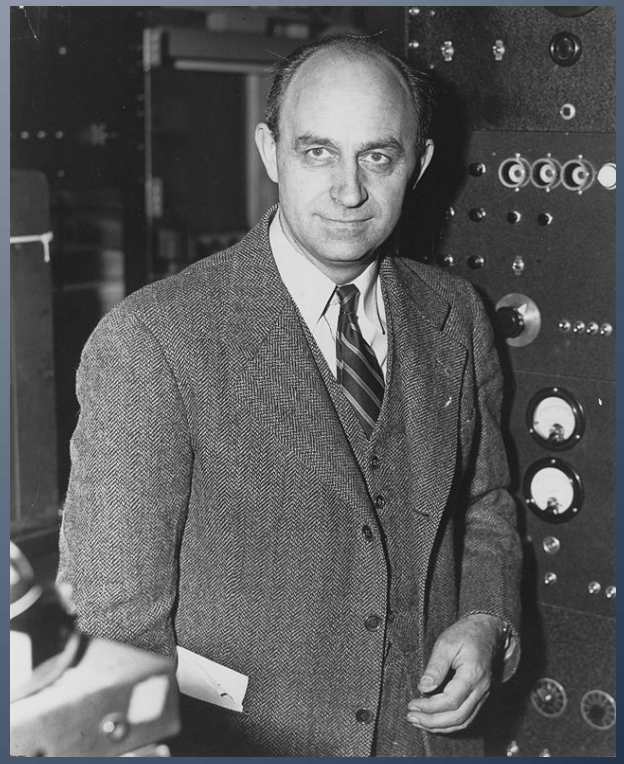
^{235}U



scoperto nel 1935 da
Arthur Jeffrey Dempster

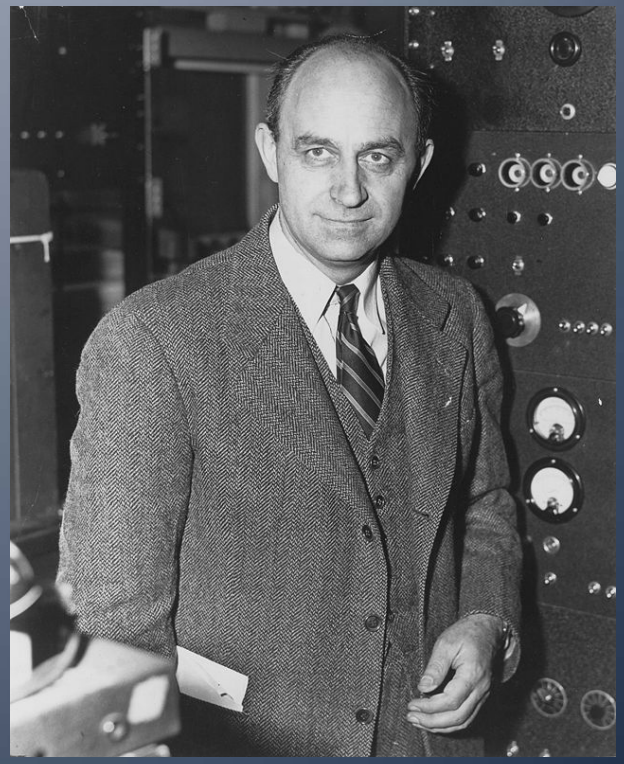
La fissione del ^{235}U avviene spontaneamente in natura ma può anche essere indotta artificialmente tramite opportuno bombardamento di neutroni

Il 22 ottobre 1934 la prima fissione nucleare artificiale di un atomo di Uranio fu realizzata da un gruppo di fisici italiani guidati da Enrico Fermi ("i ragazzi di via Panisperna") mentre bombardavano dell'uranio con neutroni. Però non si accorsero di ciò che era avvenuto ma ritennero invece di aver prodotto dei nuovi elementi transuranici.

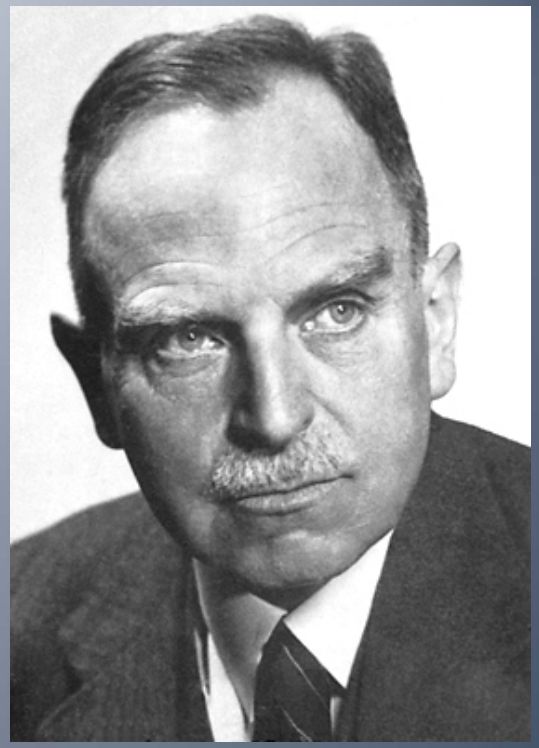


La fissione del ^{235}U avviene spontaneamente in natura ma può anche essere indotta artificialmente tramite opportuno bombardamento di neutroni

Nel 1938 Fermi ricevette il Premio Nobel per la fisica, per "*l'identificazione di nuovi elementi della radioattività e la scoperta delle reazioni nucleari mediante neutroni lenti*".



Che le "*reazioni nucleari mediante neutroni lenti*" fossero in realtà processi di fissione fu scoperto poco dopo da Otto Hahn e Fritz Strassmann



Otto Hahn

I neutroni devono dunque essere "lenti" per provocare il processo di fissione.

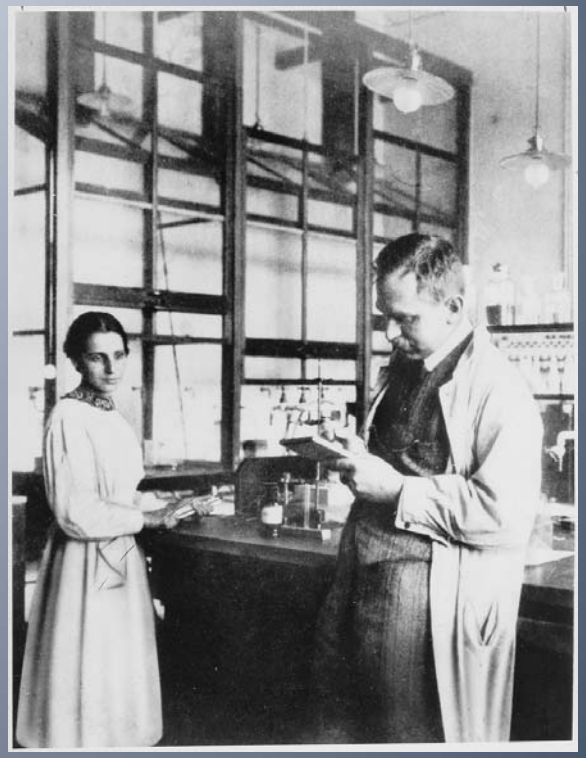
Il rallentamento si può ottenere semplicemente mettendo dell'acqua lungo il percorso dei neutroni.

In via Panisperna l'acqua era, per caso, quella nei secchi portati in laboratorio dalle donne delle pulizie!

C'era anche la fisica austriaca Lise Meitner.

Ma era ebrea e dovette fuggire dalla Germania!

Il Premio Nobel fu dato solo a Otto Hahn



Lise Meitner e Otto Hahn

I neutroni devono dunque essere "lenti" per provocare il processo di fissione.

Il rallentamento si può ottenere semplicemente mettendo dell'acqua lungo il percorso dei neutroni.

In via Panisperna l'acqua era, per caso, quella nei secchi portati in laboratorio dalle donne delle pulizie!

7.1.2 La reazione a catena

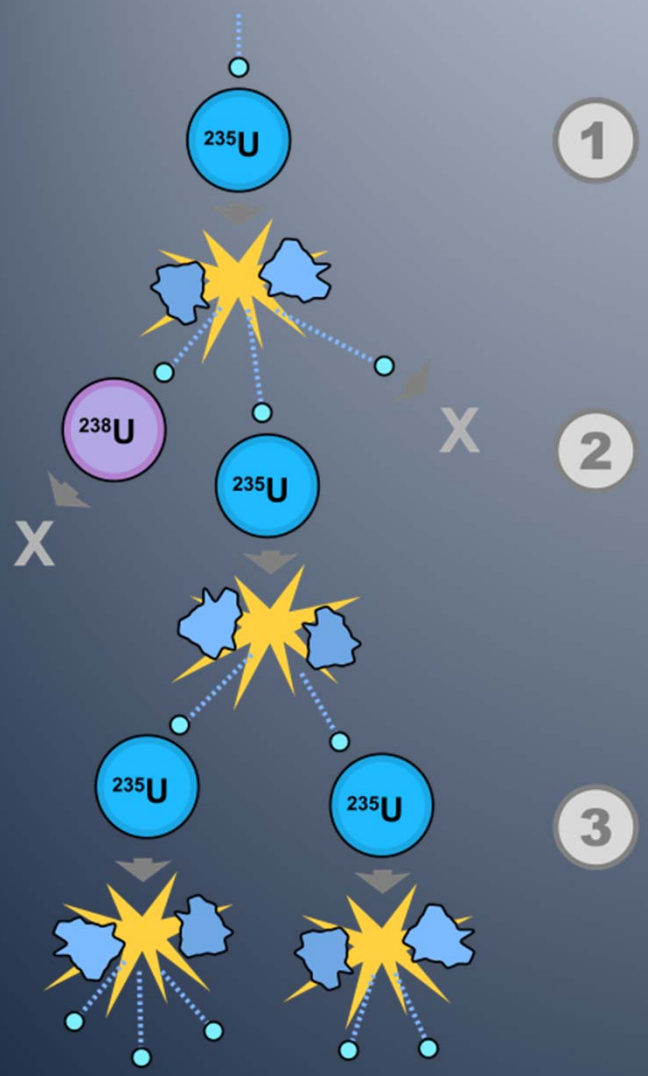
La fissione indotta artificialmente tramite bombardamento di neutroni è alla base dello sfruttamento dell'energia nucleare di fissione per il tramite della cosiddetta

"Reazione a Catena"

Fissione indotta artificialmente tramite bombardamento di neutroni

Il "bello" è che nella fissione si producono altri neutroni, che possono produrre altre fissioni.

"Reazione a Catena"

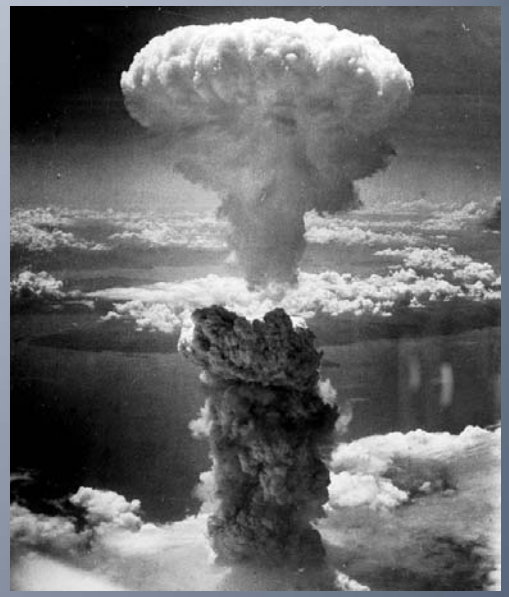


1) Un nucleo di ^{235}U viene "bombardato" da un neutrone e avviene la fissione che spezza il nucleo in due atomi (Kr e Ba) e libera tre neutroni e dell'energia.

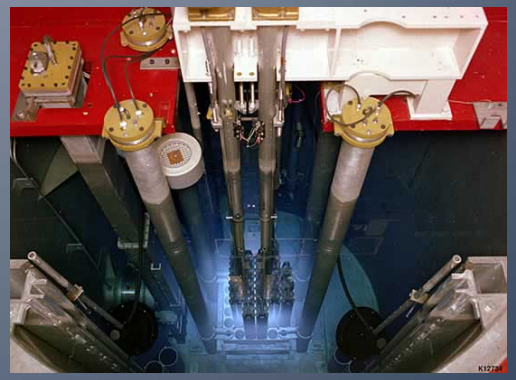
2) Uno di questi neutroni è assorbito da un altro nucleo di uranio ^{238}U ed è perso nel bilancio. Un secondo neutrone può "fuggire" dal sistema. Il terzo neutrone viene assorbito da un nucleo di ^{235}U che si spezza in due atomi liberando due neutroni e dell'energia.

3) I due neutroni liberati si scontrano con due nuclei di ^{235}U e ogni nucleo libera da uno a tre neutroni che provvedono a continuare la reazione a catena

Se il numero medio di neutroni che danno luogo a nuove fissioni è maggiore di 1 si ha una reazione a catena in cui il numero di fissioni aumenta esponenzialmente



se tale numero è uguale a 1 si ha una reazione stabile



se inferiore a 1 (troppe perdite di neutroni) la reazione a catena si spegne

Dobbiamo dunque, in particolare:

- disporre di una sufficiente massa di ^{235}U
- ridurre al minimo le perdite di neutroni, cosa che si può ottenere …:
  - … riducendo la quantità di ^{238}U (che assorbe neutroni) rispetto al ^{235}U: ciò vuol dire che è necessario "arricchire" il combustibile nucleare , portando la frazione di ^{235}U dall'attuale 0,71% a, almeno, il 3%,oppure …
  - … utilizzando come "moderatore" acqua pesante (arricchita con deuterio) al posto di quella naturale (che assorbe troppi neutroni)

^{235}U non è l'unico isotopo fissile.

Ve ne sono molti altri:

^{233}U

$^{238-239-240-241-242}Pu$

$^{236-237}Np$

$^{243-244-245-246-247}Cm$

$^{249-251-252}Cf$

$^{241-242-243}Am$

Ma sia ^{233}U che i "transuranici"
Pu, Np, Cm, Cf, Am
sono artificiali!

Il ^{235}U è l'unico isotopo fissile naturale presente sulla terra in quanto è l'unico ad avere una emivita abbastanza lunga (700 milioni di anni) da essere sopravvissuto in quantità considerevoli dal giorno in cui l'esplosione di una supernova generò il sistema solare, cioè
≈ 4,5 miliardi di anni fa.

Per quelli artificiali si va invece dai 14 anni del
^{241}Pu
ai 16 milioni di anni (ancora troppo poco!) del
^{247}Cm

Ma quanta energia si sviluppa con la fissione nucleare?

In un comune processo di combustione l'ossidazione di un *atomo di carbonio* fornisce un'energia di circa

4 eV

mentre la fissione di un nucleo di ^{235}U produce

211 Milioni di eV

cioè un'energia circa

cinquanta milioni di volte

quella prodotta nella reazione di combustione di un atomo di carbonio

Bombe nucleari a fissione …
Centrali termonucleari …
Ciclo del combustibile …
Depositi geologici …
Security e Safety …

Ad un prossimo seminario
(possibilmente tenuto da relatori molto più esperti di noi in questi campi)

Oggi ci limiteremo ad esaminare solo un reattore molto, molto particolare

7.1.3 Un reattore a fissione molto, molto particolare

È il 2 giugno 1972.

Il dottor Bouzigues, impiegato in un impianto di riprocessamento del combustibile nucleare presso Pierrelatte, in Francia, è impegnato a quantificare l'abbondanza relativa degli isotopi 235 e 238 dell'uranio nei campioni che giungevano dalle miniere di Oklo nel Gabon.

Il rapporto naturale tra gli isotopi 235 e 238 è

0,7202% ± 0,0006%,

ma Bouzigues scoprì un valore di

0,7171% ± 0,0007%,

abbastanza diverso per destare sospetti e preoccupazioni.

Sembrava che una parte dell'isotopo 235 fosse stata usata prima dell'estrazione dalla miniera: in un primo tempo si pensò a errori, sabotaggio, contaminazione, addirittura a depositi di origine extraterrestre!

Il *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives* (CEA) ordinò controlli accurati in ogni fase del trasporto e della lavorazione dal minerale grezzo a Pierrelatte, ma la risposta fu inequivocabile:

il minerale estratto a Oklo è diverso da quello che si trova in ogni altro posto del Mondo.

La parola fine alla ingarbugliata vicenda fu il ritrovamento nella miniera di tracce di circa trenta elementi che sono sottoprodotti caratteristici di una reazione di fissione nucleare:

non c'era più dubbio,
1,7 miliardi di anni fa
si verificò una reazione di fissione nucleare auto-sostenuta senza intervento di tecnologia.

Si ritiene che il reattore sia rimasto in funzione per svariate centinaia di migliaia di anni con una potenza di 15 GW.

Come è stato possibile?

Questa reazione è stata possibile grazie all'abbondanza dell'isotopo 235 dell'uranio che all'epoca ammontava a circa il 3,8% e non 0,7% come è oggi

Era passato meno tempo dalla supernova che creò il sistema solare, "solo" 2,8 miliardi di anni invece di 4,6

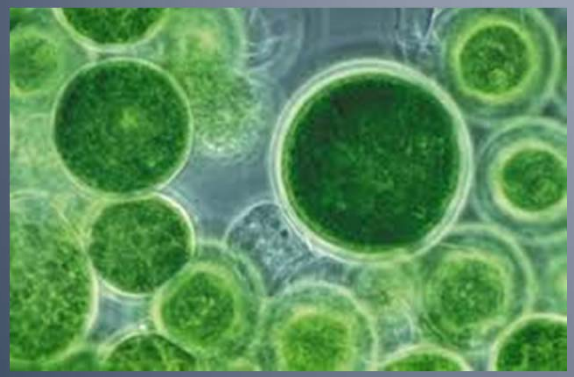
L'acqua (ovviamente naturale) presente nella miniera ha agito contemporaneamente come moderatore dei neutroni e come fluido di raffreddamento senza compromettere la reazione a catena.

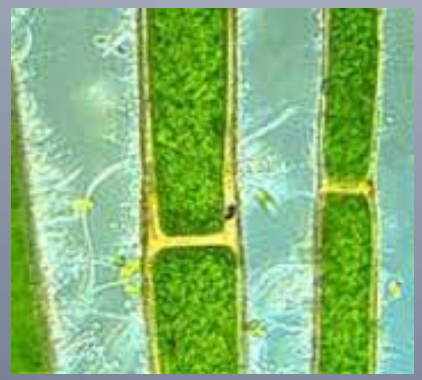
L'abbondanza dell'isotopo ^{235}U rispetto all'isotopo ^{238}U era sufficientemente alta (3,8%)!

Era presente una quantità giusta di Cadmio, che rendeva stabile la reazione a catena

Ma vi è stato anche in altro fattore …

… due miliardi di anni fa si verificò sulla Terra una grande rivoluzione:
lo sviluppo delle alghe verdi-azzurre.





Questi microorganismi, antesignani delle piante, effettuano la fotosintesi clorofilliana.

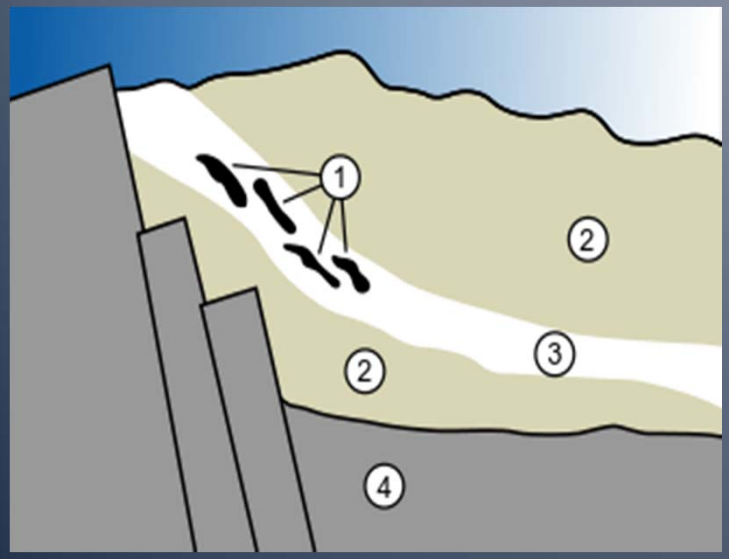
La loro diffusione diede il via alla creazione dell'atmosfera ad alto contenuto di ossigeno che caratterizza ancora oggi il nostro pianeta.

L'Uranio è solubile in acqua solo in presenza di ossigeno.
L'aumentare dei livelli d'ossigeno durante le ere geologiche ha permesso la soluzione dell'Uranio in acqua e il suo trasporto fino a luoghi in cui finiva col depositarsi, in concentrazioni via via maggiori.

UO_2 (pechblenda)

Infine caratteristica importante fu la conformazione particolare del terreno dove si trova la vena uranifera.

La sua inclinazione a circa 45° permise infatti l'accumulo di acqua in un serbatoio naturale, dove l'uranio si potesse concentrare.



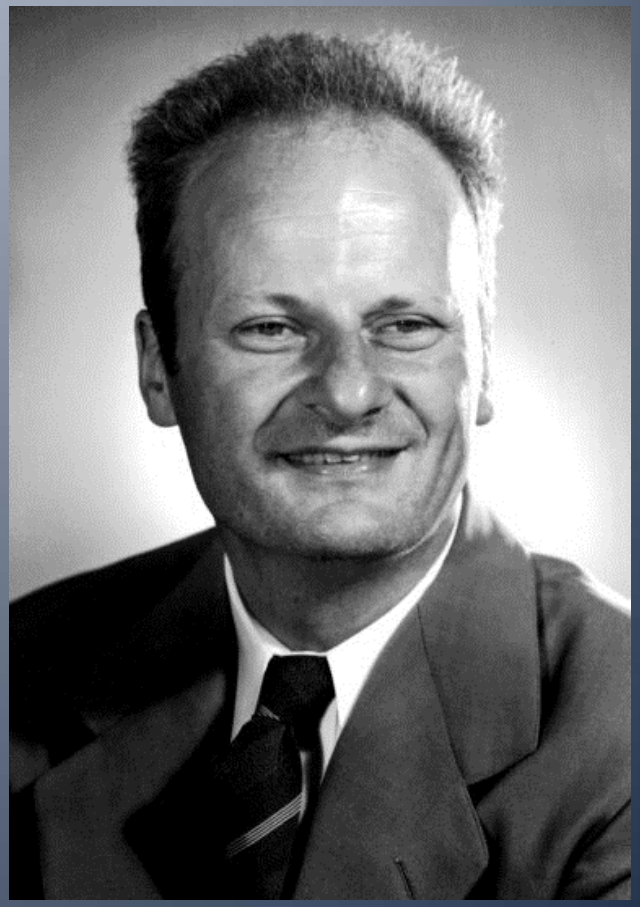
1. Zona di reazione nucleare
2. Arenaria
3. Strato di uranio
4. Granito

Se la conformazione geologica ad Oklo fosse stata diversa e fosse stato presente meno cadmio (uno dei materiali in grado di rallentare la fissione), le reazioni sarebbero state incontrollate e di conseguenza sarebbero avvenute diverse esplosioni nucleari, questo però non si è verificato: le reazioni a catena erano autocontrollate!

7.2 La Fusione Nucleare

7.2.1 Un po' di storia

Durante gli anni '30 gli stadi del ciclo principale della fusione nucleare nelle stelle furono ricavati da Hans Bethe.



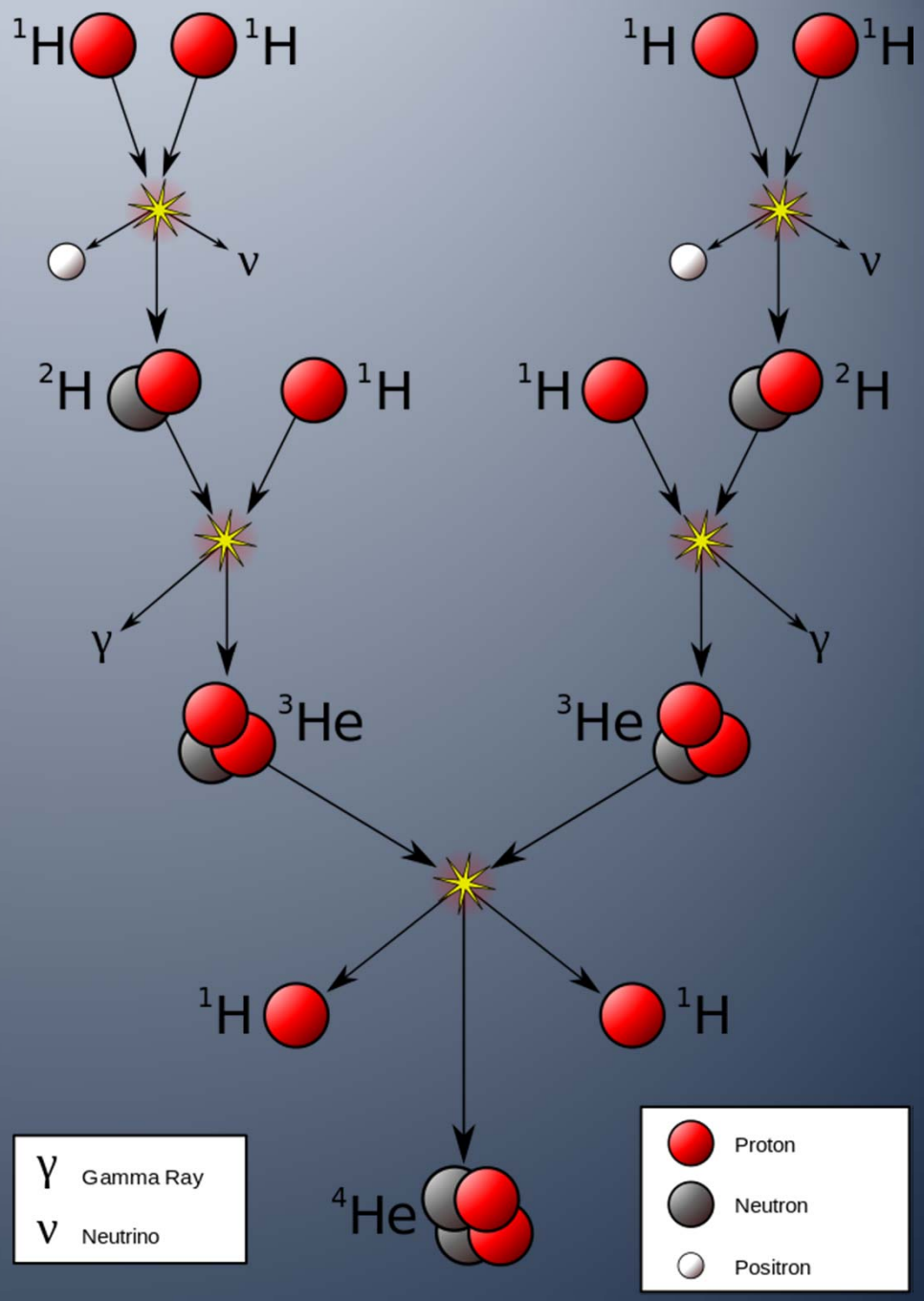
Nel 1938 individuò un ciclo di reazioni termonucleari all'origine dell'energia del sole e della maggior parte delle stelle (ciclo di Bethe).

Precisò, infatti, come si svolge in una stella il processo di trasformazione dell'idrogeno in elio.

Per questa scoperta nel 1967 gli fu assegnato il premio Nobel per la fisica.

Catena di reazioni (ciclo di Bethe) che porta alla formazione di ^4He a partire dai protoni

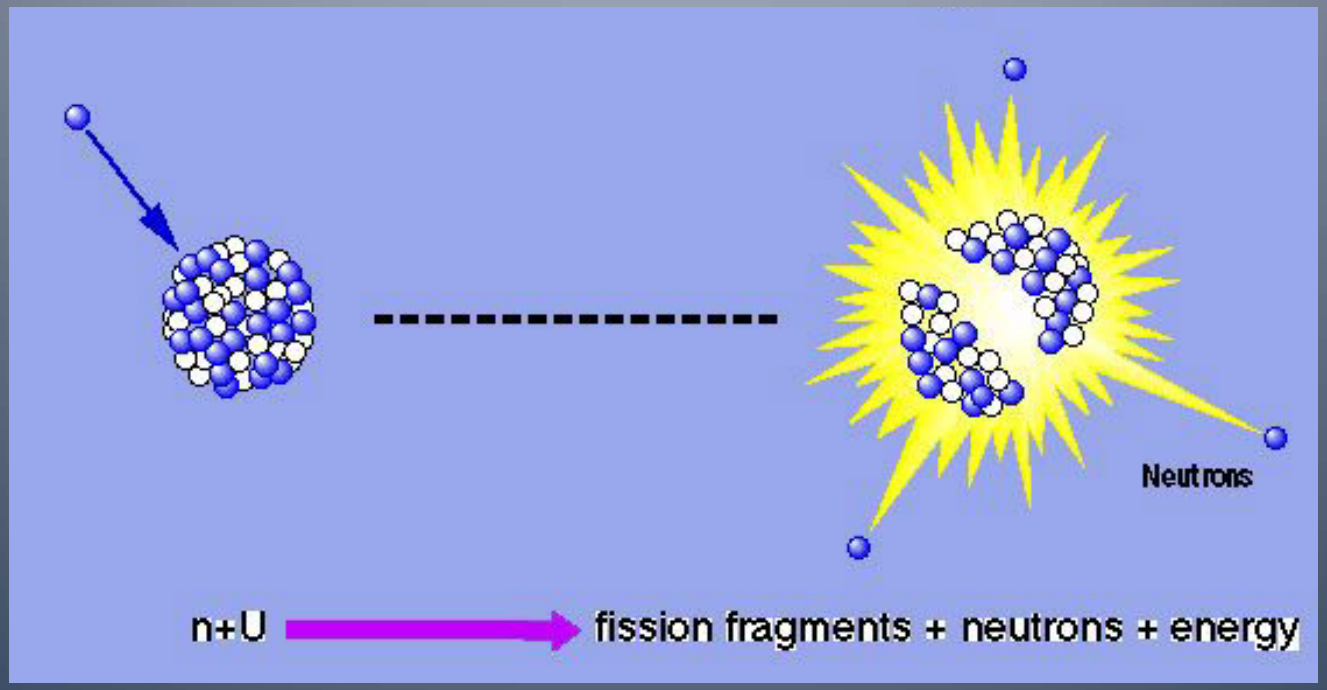
Con questo processo (nucleosintesi) si generano nelle stelle via via tutti gli elementi che costituiscono l'universo dall'elio fino all'uranio



7.2.2 Come si realizza la fusione?

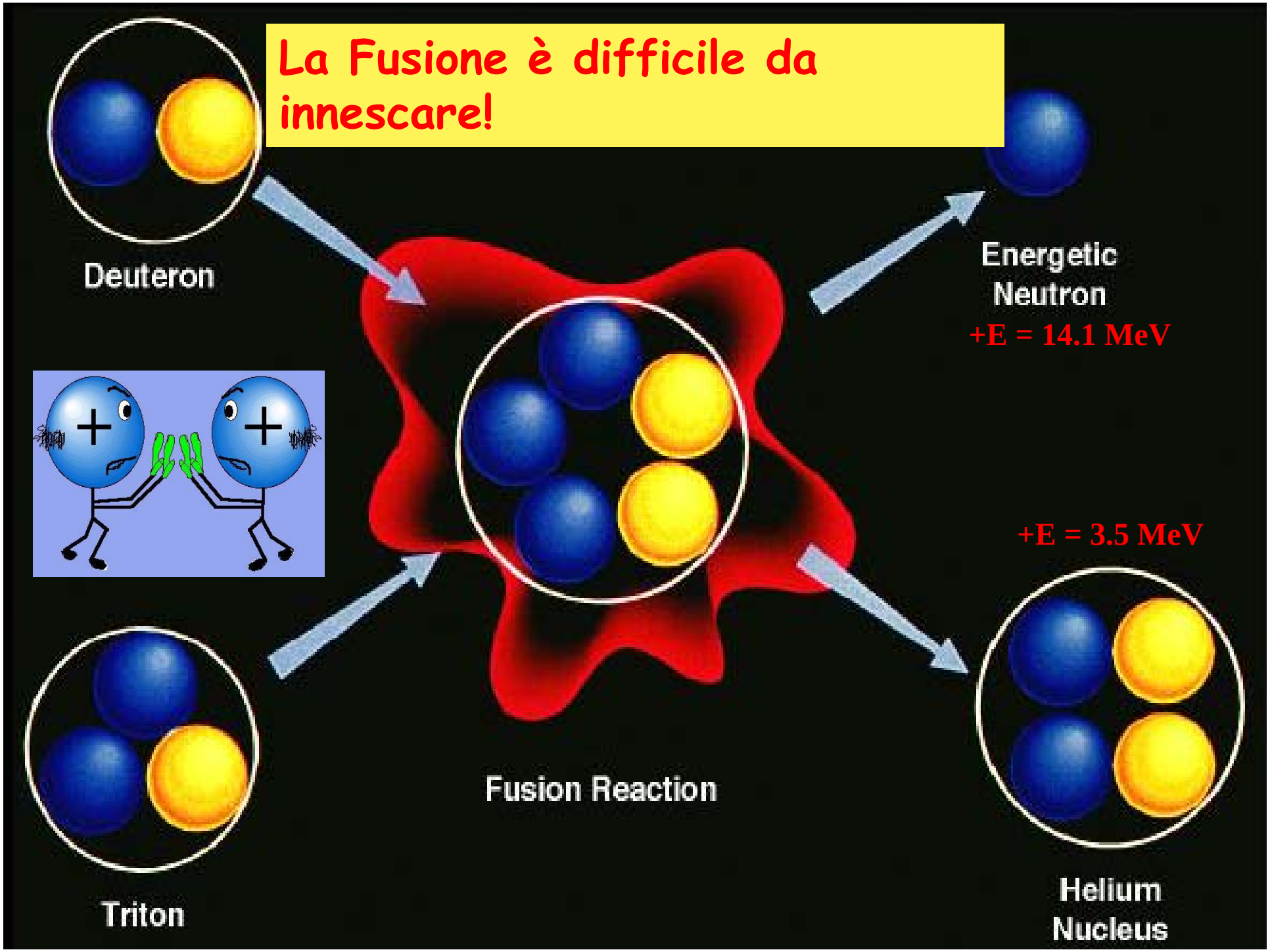
Per realizzare il processo di fusione i nuclei di due o più atomi devono venire avvicinati o compressi a tal punto da far prevalere l'interazione forte sulla repulsione elettromagnetica, unendosi tra loro e andando così a generare un nucleo di massa minore della somma delle masse dei nuclei reagenti nonché, talvolta, uno o più neutroni liberi.

La fissione è un processo spontaneo:
un neutrone, disponibile dai decadimenti radioattivi, colpisce un nucleo di Uranio frammentandolo, la differenza di massa costituisce l'energia guadagnata nel processo.



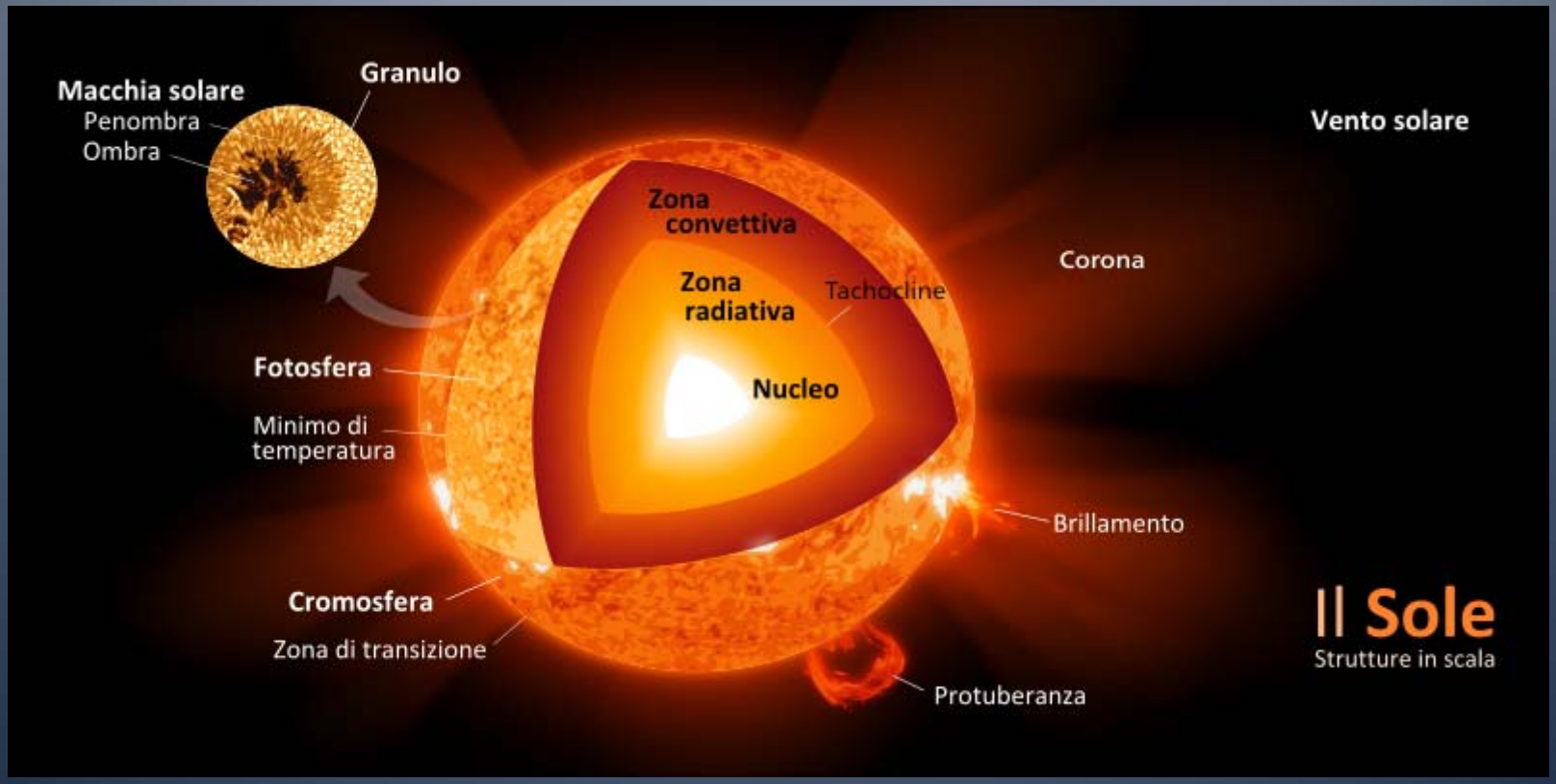
Produrre energia significa controllare la reazione a catena

La Fusione è difficile da innescare!

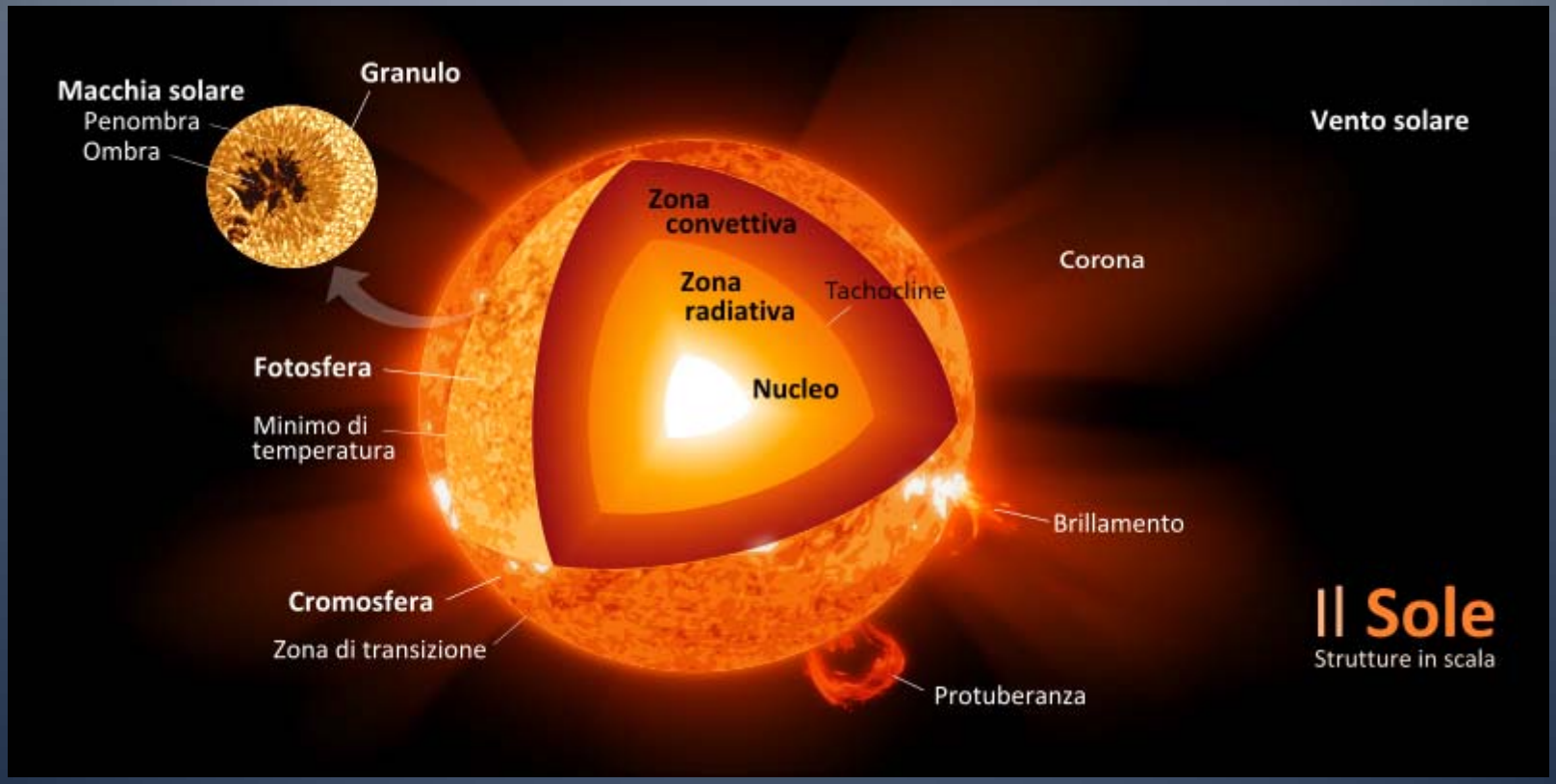


Nel Sole è la forza di gravità che, confinando il combustibile ad altissima pressione e temperatura, rende possibile il processo di fusione.

Le reazioni di fusione nucleare hanno luogo nel nucleo solare, che rappresenta in volume il 10% della stella, in massa oltre il 40%.

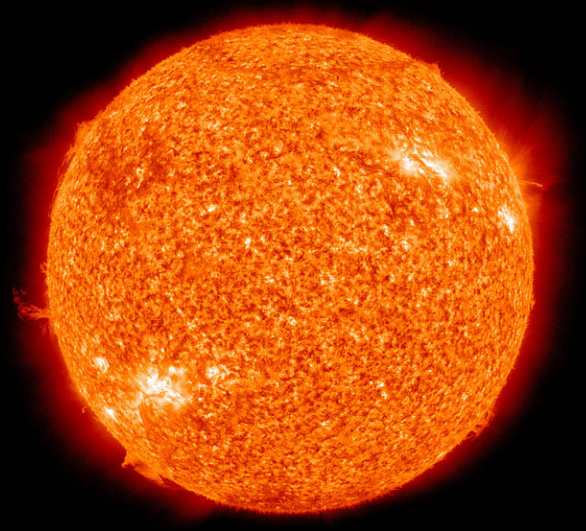


Il nucleo ha dimensioni ≈ 0,2 raggi solari, con una densità > 150.000 kg/m³ (150 volte quella dell'acqua), una temperatura ≈ 13.600.000 K ed una pressione ≈ 500 miliardi di atmosfere.



Per dare un'idea intuitiva della dimensione del processo, la fusione nucleare che avviene al centro del Sole è quasi la stessa di quella di una bomba H.

In effetti una stella è un'esplosione atomica continua, contenuta dal suo stesso peso.



All'interno del Sole vengono fuse 600 milioni di tonnellate di idrogeno *al secondo*, e di queste 4 milioni di tonnellate vengono convertite in energia.

Nelle stelle vengono prodotti tutti gli elementi chimici tranne l'idrogeno, che fa da carburante iniziale.

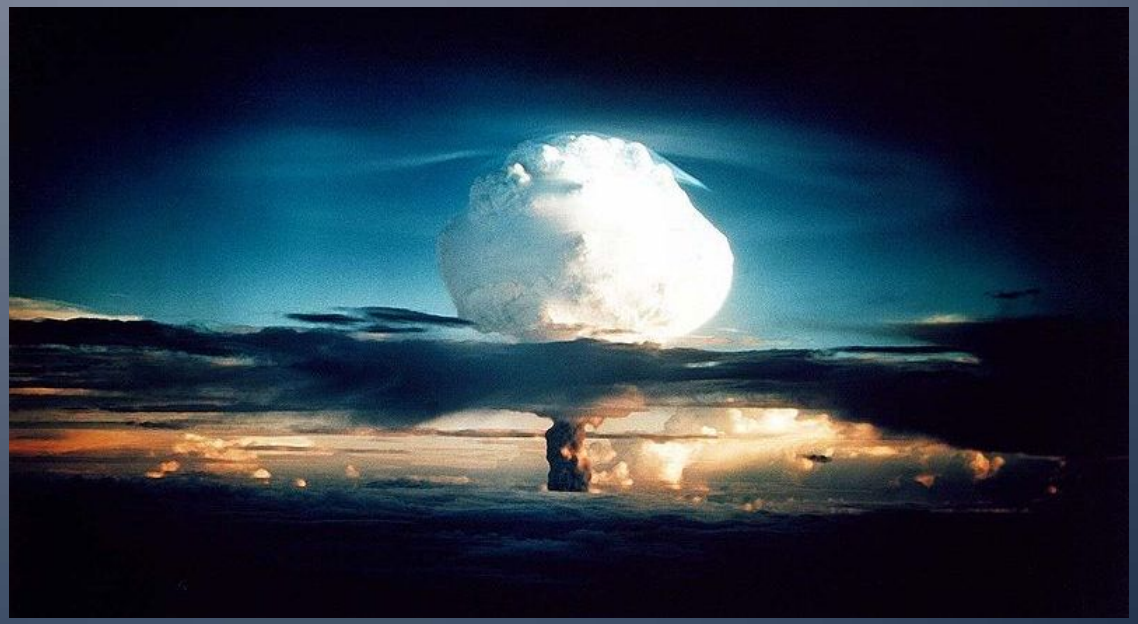
7.2.3 Quali reattori sulla terra?

Viste le condizioni nelle quali avviene il processo di fusione nucleare nelle stelle, si capisce facilmente perché sia così difficile da realizzare sulla terra.

Nella bomba H si è riusciti fin da subito a realizzare sulla terra la fusione nucleare …

… ma utilizzando bombe a fissione per realizzare le condizioni di temperatura e pressione necessarie!

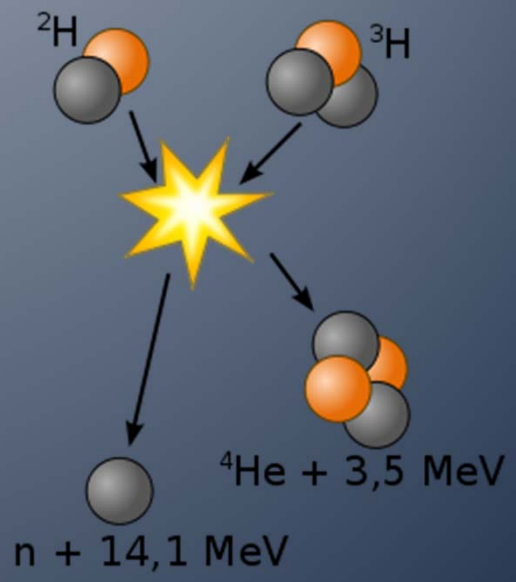
Esplosione della prima bomba H della storia: Ivy Mike test (novembre 1952)



In realtà non è necessario realizzare le condizioni estreme che si trovano nelle stelle per produrre la fusione.

Dobbiamo scegliere la reazione più conveniente, che è quella che utilizza due particolari isotopi dell'idrogeno:
il deuterio (^2H) e il trizio (^3H)

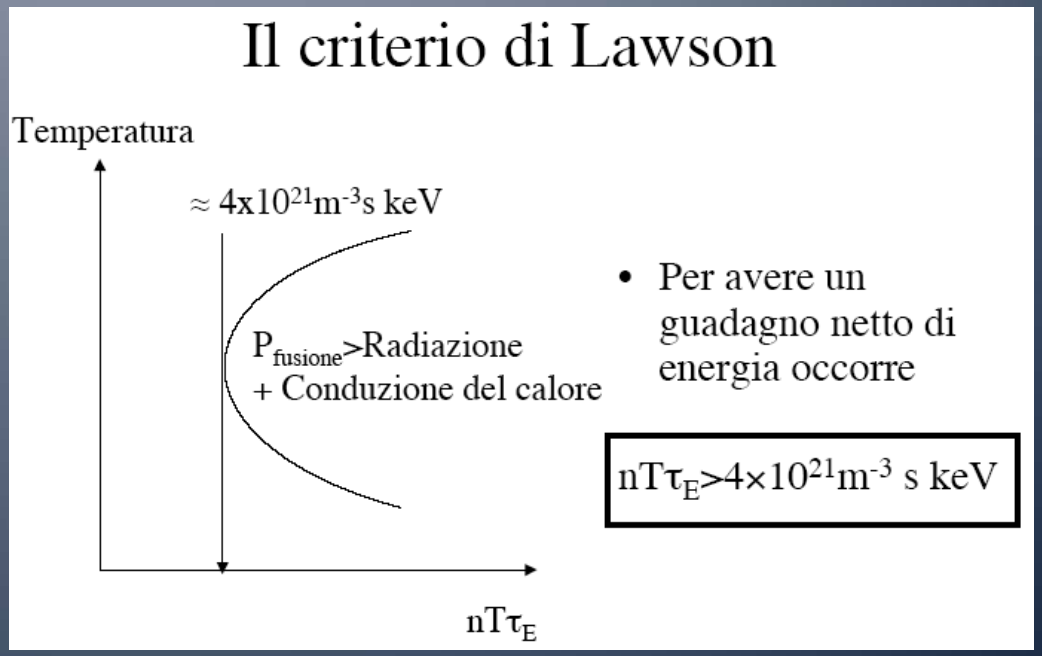
In questo caso si ha la più bassa "energia di soglia", cioè la minima energia necessaria per superare la "repulsione coulombiana"



Ma non basta realizzare una altissima temperatura se vogliamo sfruttare la fusione nucleare per produrre energia...

... per avere un guadagno netto di energia è necessario realizzare anche opportune condizioni di densità e di durata di "confinamento"...

... tutto questo è sintetizzato nel "Criterio di Lawson"



Ma come realizzare questo obiettivo?

Sono due le strade principali che vengono percorse per arrivare allo sfruttamento pacifico dell'energia da fusione nucleare:

- Fusione inerziale
- Fusione magnetica

In più c'è una terza strada molto particolare:

- Fusione fredda

Daremo solo un cenno sui principi di funzionamento di queste tecniche …

… rimandiamo ad un futuro seminario specialistico l'esposizione dettagliata.

7.2.4 FUSIONE INERZIALE

Una strada per realizzare le condizioni richieste per la fusione di due atomi di idrogeno in uno di elio è quella di sfruttare l'inerzia della materia, comprimendo in tempi brevissimi una sfera di combustibile, tipicamente una miscela di

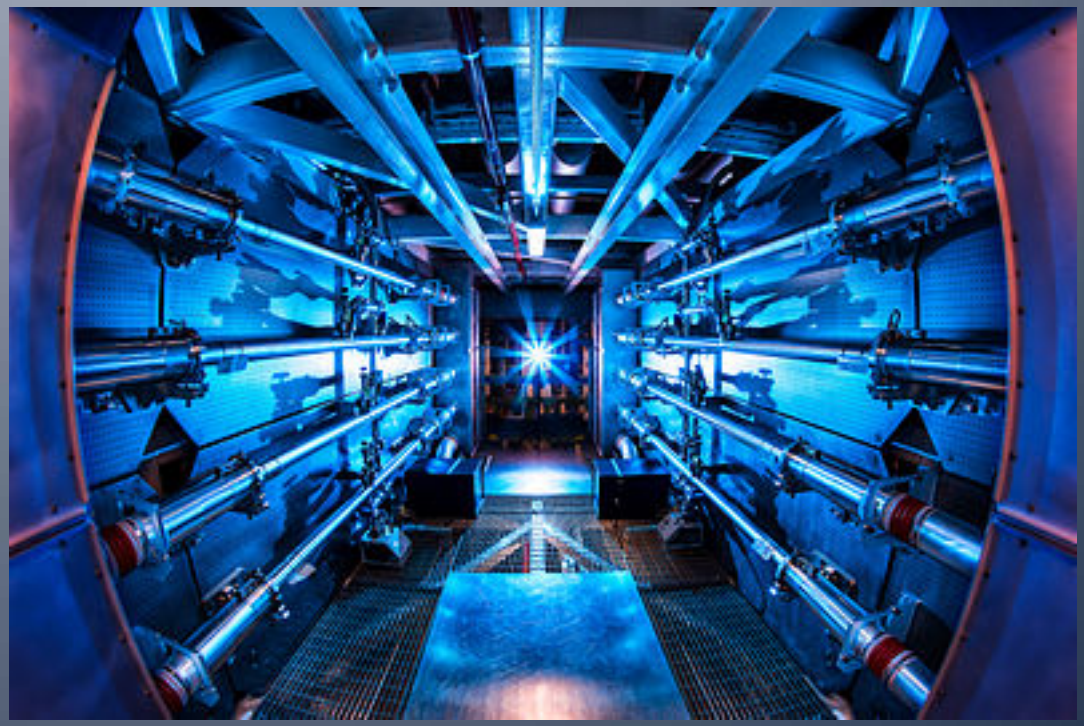
Deuterio e Trizio

fino ad ottenere densità e temperatura sufficientemente elevate, anche se per tempo brevissimo.

È così che funziona la *bomba H*, e così si spera possano funzionare i sistemi nei quali la compressione non è ottenuta dall'esplosione di ordigni nucleari, ma da *fasci di luce*.

Il progetto più avanzato è in via di sviluppo a Livermore (USA): National Ignition Facility (NIF)

Il 2 ottobre 2013 viene annunciato che per la prima volta è stato raggiunto il punto di pareggio: *l'energia prodotta dalla fusione era pari a quella usata per alimentare i 192 laser UV che l'hanno prodotta (≈ 2MJ)*



7.2.5 FUSIONE MAGNETICA

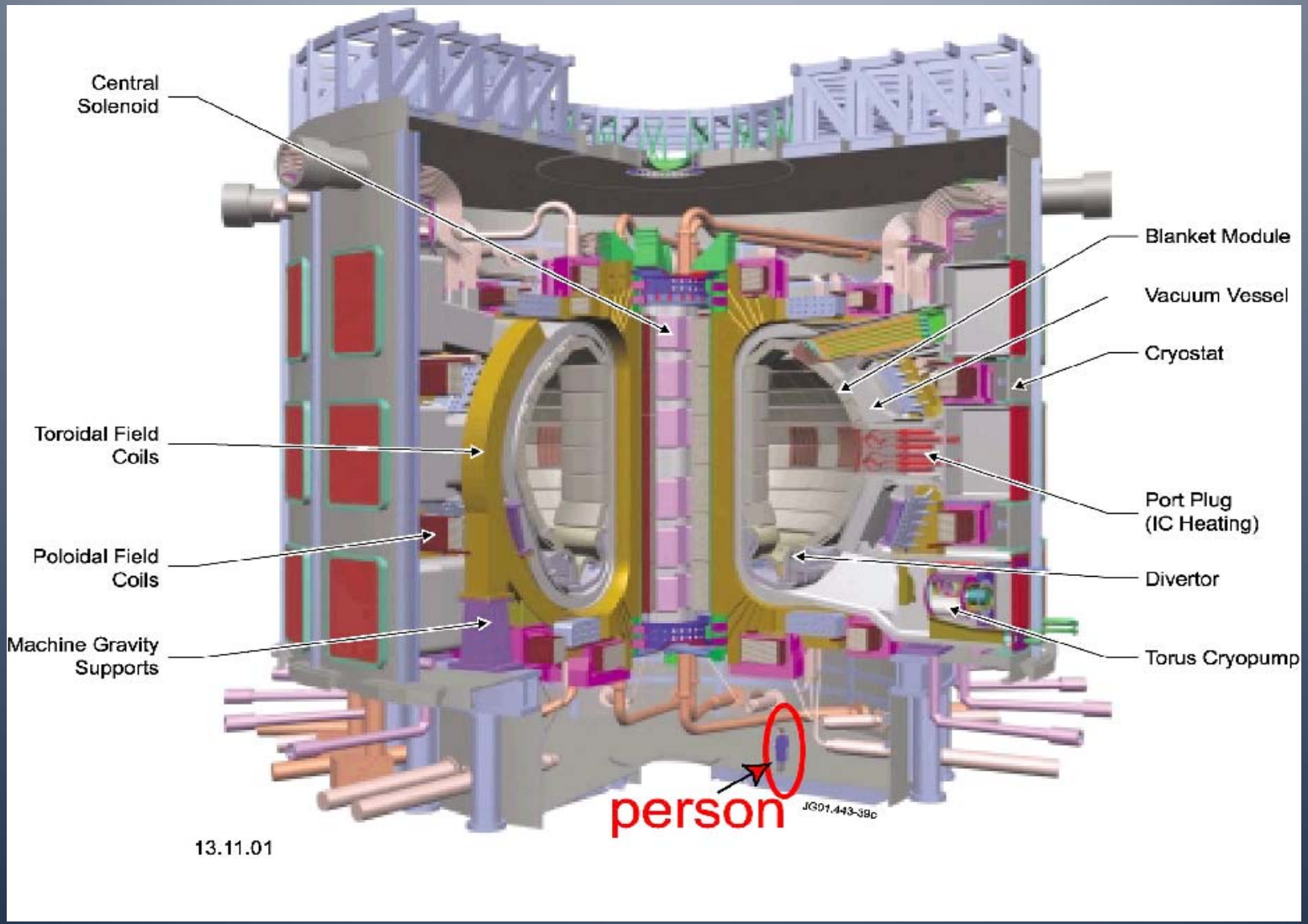
Alle temperature richieste per innescare la fusione la miscela di gas deuterio-trizio si trova nello stato di plasma, che è una "miscela" di atomi completamente ionizzati e di elettroni.

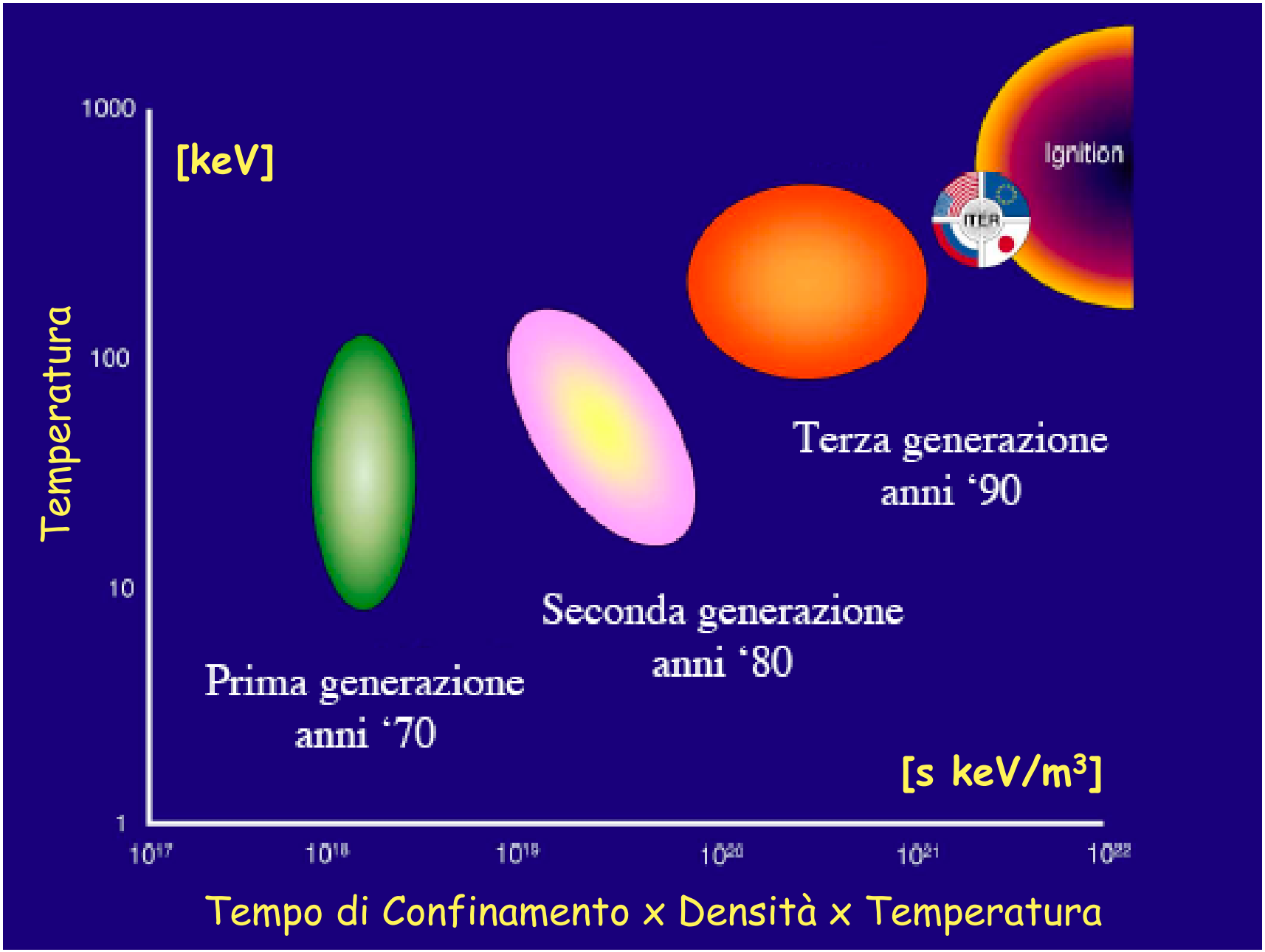
Essendo dunque costituito da particelle cariche può essere confinato da un appropriato campo magnetico.

Esistono diverse configurazioni di campo magnetico che riescono a "confinare" il plasma, quelle che sembrano dare maggiori speranze sono le "toroidali":

Stellaretor, Reversed -Field Pinch, Tokamak, …

E proprio la configurazione Tokamak è stata scelta per la realizzazione del progetto internazionale ITER

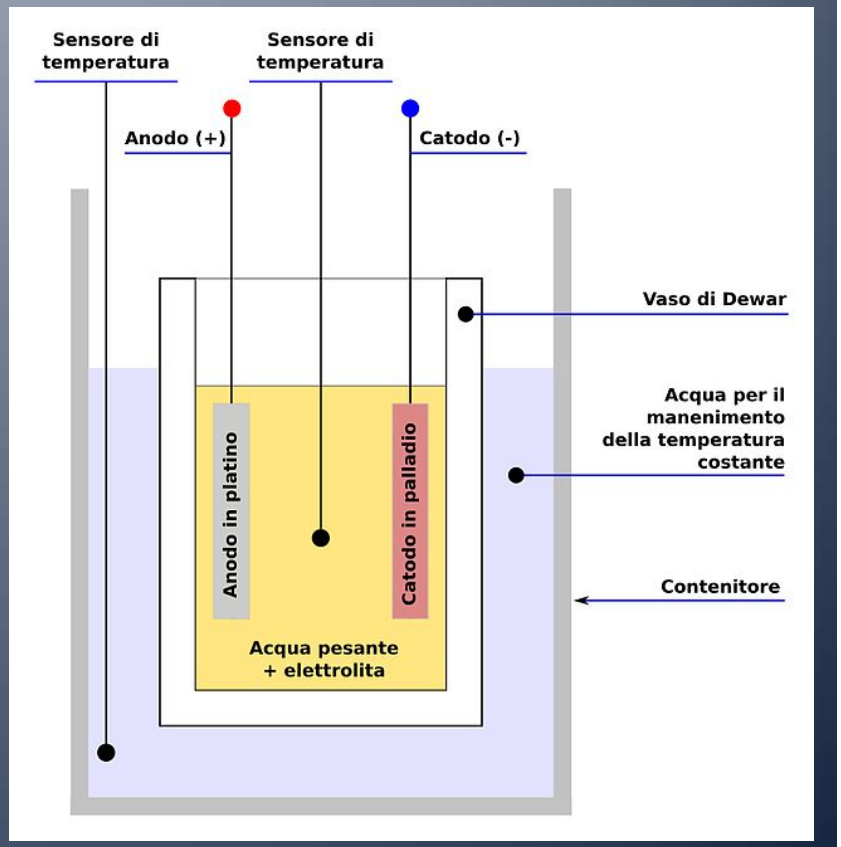



1000
100
10
1
[keV]
Temperatura
Ignition
ITER
Terza generazione
anni '90
Seconda generazione
anni '80
Prima generazione
anni '70
[s keV/m³]
10¹⁷
10¹⁸
10¹⁹
10²⁰
10²¹
10²²
Tempo di Confinamento x Densità x Temperatura

7.2.6 FUSIONE FREDDA

La fusione nucleare fredda è un nome generico attribuito a presunte reazioni di natura nucleare, che si produrrebbero a pressioni e a temperature molto minori di quelle necessarie per ottenere la fusione nucleare "calda".

Il termine "fusione fredda" divenne molto popolare nel 1989 a seguito dei primi esperimenti di Martin Fleischmann e Stanley Pons dell'Università di Salt Lake City nello Utah



Fino ad oggi, l'esistenza stessa di questi fenomeni non è stata dimostrata in modo definitivo, anzi *l'opinione prevalente nella comunità scientifica è che tutte le evidenze proposte siano effetto di errori di misurazione o di fenomeni non nucleari.*

Va tenuto presente che una notevole attività è stata svolta (in particolare negli USA, in Italia, in Giappone) da quell'ormai lontano 1989.

Un futuro seminario, tenuto da esperti, sarebbe auspicabile.

7.3 Un po' di Fantascienza

Supponiamo di voler costruire l’astronave Enterprise di Star Trek.

Di cosa abbiamo bisogno?

Sicuramente abbiamo bisogno di una fonte di tanta, tanta, ma proprio tanta energia!

Sentiamo cosa ci dice il Dr. Spock

La materia stabile è prevalentemente costituita da quattro mattoni:

Protoni, Neutroni, Elettroni e Neutrini

La massa è concentrata nei protoni e neutroni, che sono ≈ 2000 volte più massicci degli elettroni, mentre i neutrini sono quasi privi di massa.
Se dunque vogliamo estrarre il massimo di energia dalla materia dovremmo cercare di *trasformare in energia il più possibile della massa di protoni e neutroni*

L'energia nucleare di cui abbiamo parlato finora proviene dalla piccola differenza di massa che si ha tra diversi nuclei atomici.

Ad esempio dalla fissione un nucleo di ^{235}U viene rilasciata una energia di 211 MeV che corrisponde a

211/235 MeV ≈ 0,9 MeV/nucleone

Se, invece, trasformassimo tutta la massa dei protoni e neutroni del ^{235}U in energia avremmo

≈ 1000 MeV/nucleone

Cioè circa 1000 volte di più!

Ma come fare?

Un sistema semplice potrebbe essere, ad esempio, quello di
far annichilire un protone con un antiprotone

Ottima idea ragazzi … però purtroppo
non avete miniere di antimateria!

Non c'è dunque alcuna speranza?

Una remotissima speranza c'è …

… è legata al *decadimento del protone*

Diversi modelli teorici di grande unificazione (GUT) propongono infatti processi di non conservazione del numero barionico, tra cui proprio il decadimento del protone.

$$p \rightarrow e^{+} + \pi^{0}$$

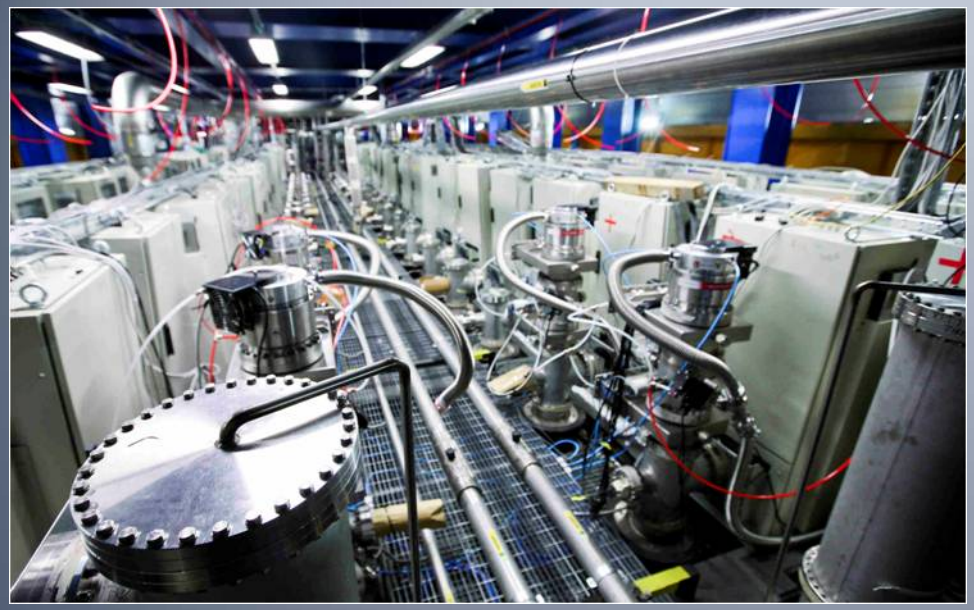
con un limite inferiore per la emivita pari a

$1{,}6 \times 10^{33}$ anni

cioè molto superiore all'età dell'universo

(centomila miliardi di miliardi di volte)

Studiando questo eventuale fenomeno sarebbe possibile indagare una regione energetica attualmente irraggiungibile *(circa 10^{15} GeV)* e scoprire l'esistenza o meno di una unica forza fondamentale



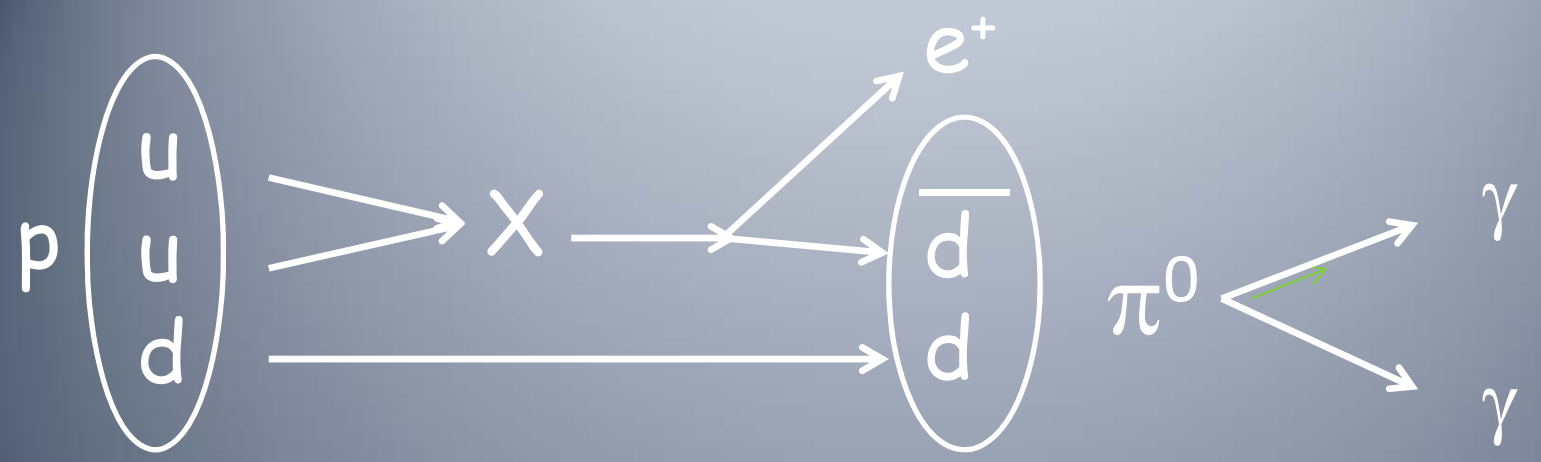
ICARUS: NEUTRINI IN 3D SOTTO IL GRAN SASSO

ICARUS ha, fra gli altri, *l'ambizioso obiettivo dell'osservazione del decadimento dei nucleoni (protoni e neutroni), fenomeno mai osservato finora ed inseguito dai fisici di tutto il mondo.*

ICARUS è il più grande rivelatore ad argon liquido mai realizzato al mondo, che permette di disporre di immagini ad alta risoluzione degli eventi di interazione in tempo reale misurando le caratteristiche fisiche delle particelle prodotte negli eventi

Il decadimento del protone avverrebbe per il tramite del bosone X.

Il bosone X è una particella elementare ipotetica, responsabile (insieme a un ipotetico bosone Y) di un nuovo tipo di forza prevista dal
modello di Georgi–Glashow
della teoria della grande unificazione.



Alla fine tutta la massa si è trasformata in energia, anche e^+,incontrandosi con un e^-, si annichilerà in fotoni.

Se si riuscisse a sfruttare questo processo, qualsiasi tipo di elemento potrebbe diventare "carburante" utile a produrre energia, non solo quelli fissili o quelli leggeri!

Ma non possiamo aspettare

$1{,}6 \times 10^{33}$ anni

per disporre dell'energia prodotta!

Un metodo ci potrebbe essere per affrettare i tempi, anche se non è così facile da applicare.

"Basterebbe" investire i protoni con un fascio di pioni π^0 "ben preparati", cioè della giusta energia e impulso, in modo da provocare un

Decadimento Stimolato:

$$\pi^0 + p \rightarrow 2\pi^0 + e^+$$

come nei laser, dove il decadimento di stati atomici o molecolari eccitati $(A^* \rightarrow A)$ a lunga vita media viene stimolato da fotoni di opportuna qualità:

$$\gamma + A^* \rightarrow 2\gamma + A$$

"Basterebbe" investire i protoni con un fascio di pioni π^0 "ben preparati", cioè della giusta energia e impulso, in modo da provocare un

Decadimento Stimolato:

$$\pi^0 + p \rightarrow 2\pi^0 + e^+$$

I pioni π^0 prodotti potrebbero così poi andare a stimolare altri decadimenti creando una sorta di *"reazione a catena"*

Ma è possibile provocare un decadimento nucleare stimolato?

Questo sembra accadere per gli "isomeri"

Un isomero nucleare è uno stato metastabile prodotto dall'eccitazione di un protone o neutrone nel nucleo atomico.

L'isomero $^{180\text{-}m}Ta$ del Tantalio è presente in natura in ragione di una parte su 8300

La sua emivita è di circa 10^{15} *anni*

Quando si diseccita e torna al suo stato base rilascia fotoni molto energetici con lunghezza d'onda di

16 nm (raggi X)

$$^{180\text{-}m}Ta \rightarrow \gamma + {}^{180}Ta$$

Sono stati riportati eventi in cui il $^{180\text{-}m}Ta$ *è stato stimolato ad emettere la sua energia bombardandolo con opportuni raggi X*

$$\gamma + {}^{180\text{-}m}Ta \rightarrow 2\gamma + {}^{180}Ta$$

L'energia è tanta, ad es. un chilogrammo di $^{178\text{-}2m}Hf$ contiene circa 900 MJ di energia, cioè un quarto di kiloton!

una micro-bomba atomica!

Purtroppo, a parte il fatto che ancora non sappiamo se realmente il protone decade,

la realizzazione di fasci di π^0 "ben preparati" per innestare questa speciale "reazione a catena", pur essendo permessa dalle leggi della fisica, è sicuramente fuori della portata delle nostre attuali capacità tecnologiche

Questo vuol dire che per il combustibile dell'astronave „Enterprise" dobbiamo aspettare ancora un po'!

Grazie per l'attenzione!