

# Laboratorio di Risorse- Economia- Ambiente

## Lezione 10

Giovedì 11 aprile 2019

## **Alternative alle fonti fossili di energia. L'energia nucleare.**

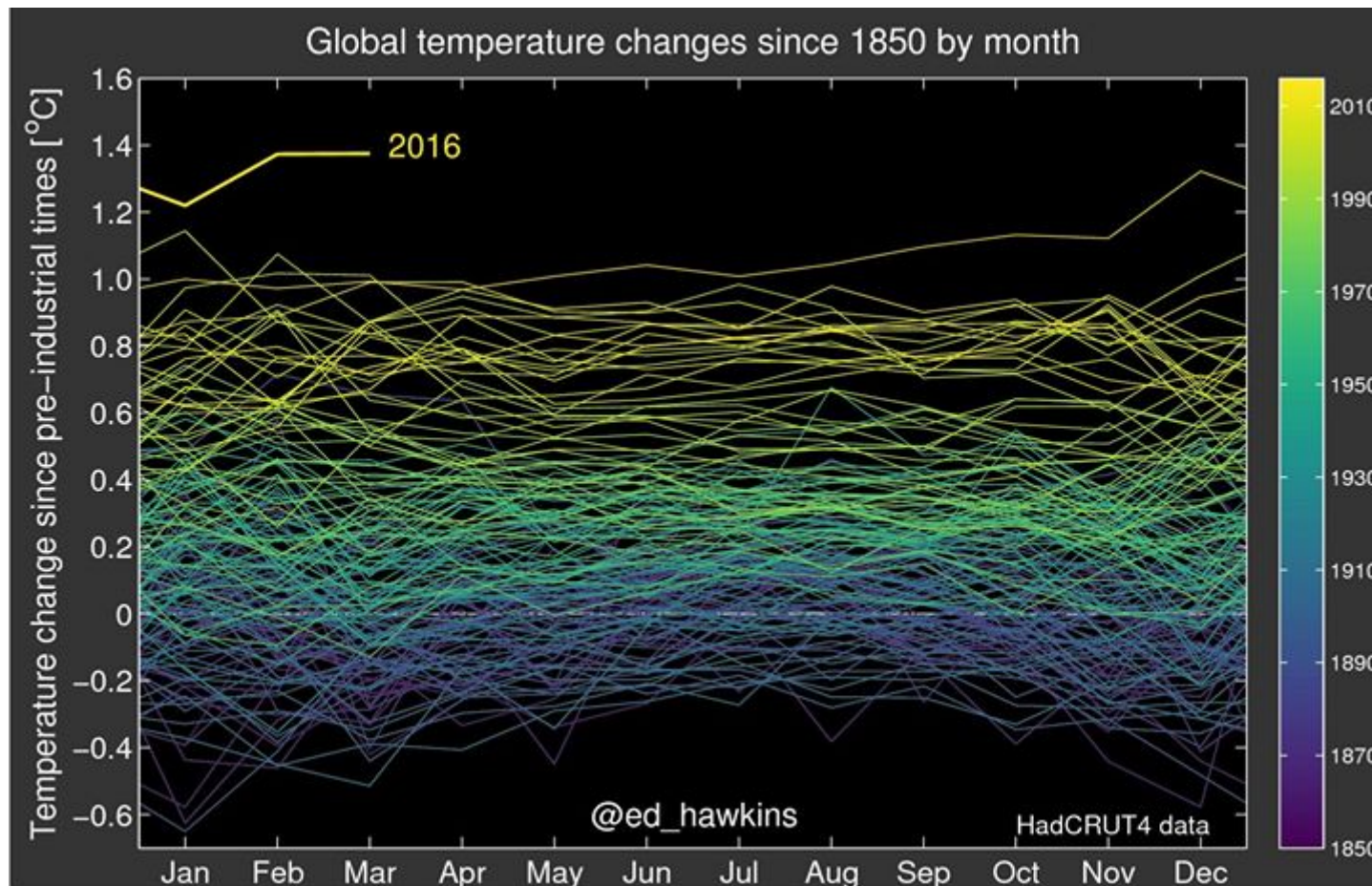
2 ore

Totale ore: 20/48

Da quanto abbiamo visto fino ad ora dovremmo aver capito che l'umanità nel suo insieme, e ciascun paese e gruppo di paesi che costituiscono la società globale, necessitano una transizione ad un nuovo paradigma energetico non più basato sui combustibili fossili. Su questa affermazione non ci sono praticamente contrapposizioni sostanziali. Le divisioni nascono sui tempi necessari per la transizione. Il docente di questo modulo è convinto che i tempi siano molto stretti. La transizione deve essere realizzata rapidamente se veramente si vuole contenere l'aumento di temperatura media dell'atmosfera entro i 2°C (e possibilmente entro gli 1,5°C) rispetto alla media pre-industriale come si è affermato al COP2015 di Parigi. Deve essere realizzata rapidamente per due ordini di ragioni. La prima è che lo stato generale della biosfera è preoccupante (lo vedremo nelle lezioni finali) la seconda è che per rendere possibile la transizione ad un nuovo paradigma energetico si devono usare le fonti energetiche di quello vecchio e per far questo è necessario sfruttare queste ultime prima che il loro EROEI declini oltre una soglia critica. Cioè prima che si manifestino in modo conclamato problemi di scarsità assoluta.

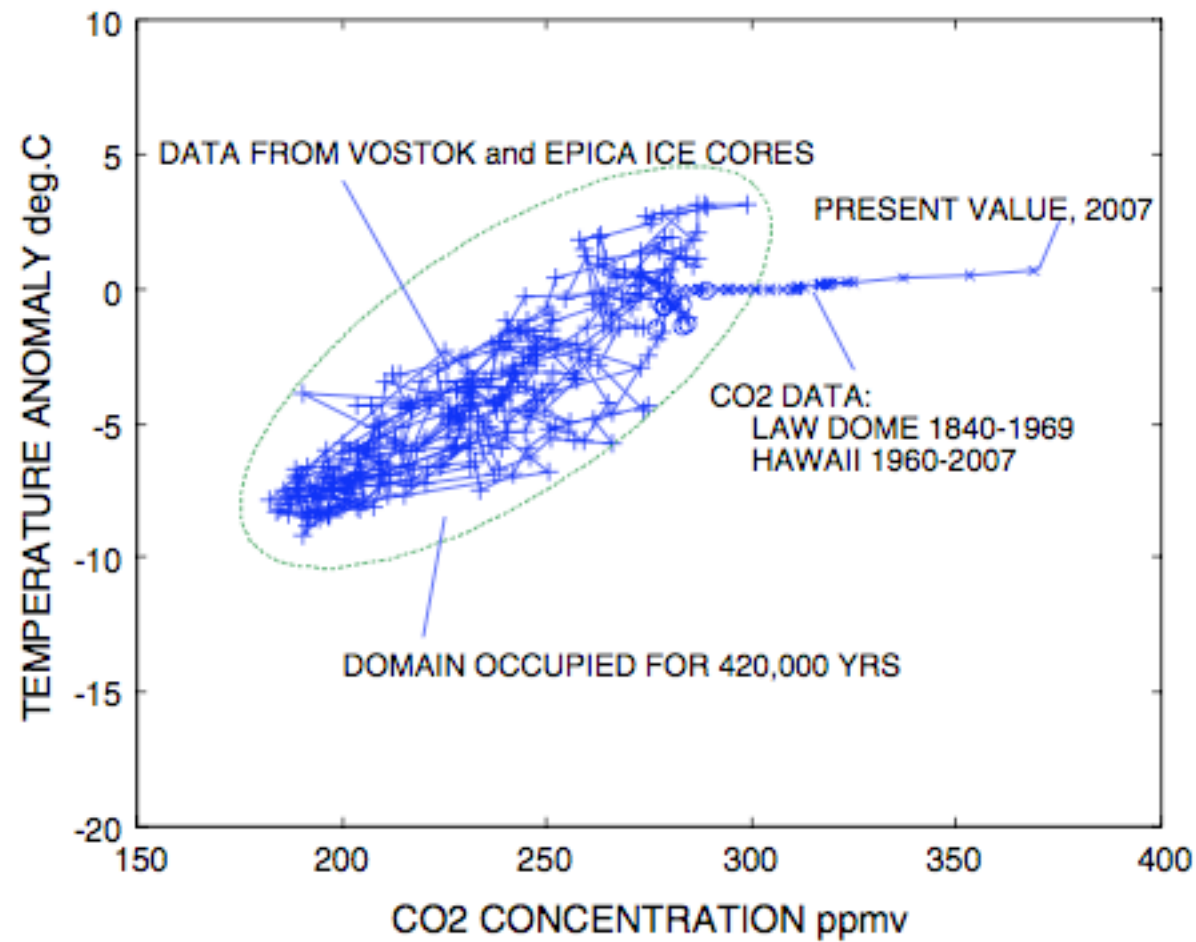
Quali sono le alternative ai combustibili fossili? E come possiamo stimare le loro potenzialità? Quali sono i problemi tecnici, economici, politici e sociali di una transizione di questo tipo? Il numero di domande è nutrito (e probabilmente incompleto). La prima questione, quali sono i problemi tecnici, ne apre molte altre. Il primo aspetto da considerare è che le fonti alternative (che non sono coincidenti con le fonti rinnovabili) sono praticamente tutte elettriche ad eccezione del "solare termico" e dei biocombustibili e, in parte, della biomassa. Dunque una società prevalentemente o interamente rinnovabile deve essere pensata come interamente o prevalentemente elettrica. L'impresa è possibile, ma non semplice. E diventa difficile se il vecchio paradigma resiste in modo efficace come sta facendo usando tutti i mezzi in suo possesso.

**Cambiamento climatico (e altri problemi ambientali) e *depletion* indicano la necessità di passare rapidamente oltre l'età dei combustibili fossili**



La figura che precede e quella che segue mostrano in modo chiaro l'eccezionalità della storia climatica recente. La figura ed il filmato della slide n. 3 ([link a youtube](#)) mostrano l'evoluzione della variazione della temperatura media terrestre rispetto alla media 1850-1900, a partire dalla metà dell'800. Cioè da quando sono iniziate le misure scientifiche della temperatura. Si noti che il dato è l'anomalia di temperatura, cioè quanto la temperatura (media globale) varia rispetto alla media indicata.

La figura della slide 5 invece mostra la stessa anomalia di temperatura in un periodo di tempo molto più lungo. I dati di temperatura e concentrazione di CO<sub>2</sub> sono stimati a partire dalle analisi effettuate sui campioni di atmosfera intrappolati nelle bolle d'aria presenti nel ghiaccio antartico e in altri luoghi. Da queste stime si può risalire alla temperatura media della Terra fino a 400mila anni fa e oltre. Diagrammando l'anomalia di temperatura contro la concentrazione di CO<sub>2</sub> si vede che per centinaia di migliaia di anni il sistema è rimasto confinato all'interno dell'ellisse tracciata con punti verdi e solo a partire da tempi recenti, in pratica dalla rivoluzione industriale in poi, ha iniziato ad esplorare un dominio del tutto nuovo rispetto al precedente.



**Fig. 1** State-space view of Antarctic ice-age cycles

Oltre al cambiamento climatico e agli altri problemi ambientali indotti dall'uso delle fonti fossili di energia, il progressivo esaurimento di queste fonti spinge comunque ad una transizione verso fonti energetiche alternative.

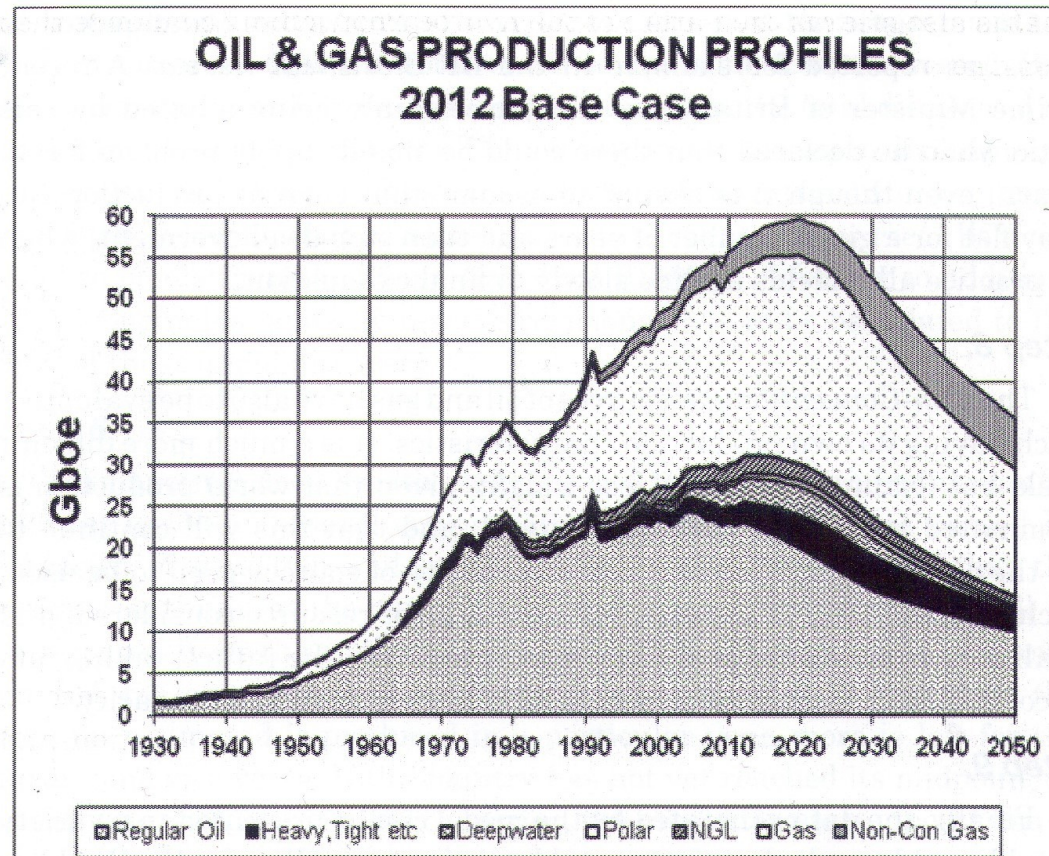
Queste fonti sono essenzialmente la fonte nucleare e le fonti rinnovabili. Si possono distinguere fonti rinnovabili di antica tradizione e le Nuove Fonti di Energia Rinnovabile (NFER). Le prime sono la biomassa usata in modo tradizionale per produrre calore e l'idroelettrico, tecnologia in uso già da oltre 1 secolo e il cui sviluppo ha attinto da conoscenze tecniche sviluppate nei secoli precedenti alla rivoluzione industriale, si pensi ai mulini ad acqua e a tutta la tecnologia accumulata per il loro sviluppo.

Le NFER sfruttano flussi energetici presenti in natura: il flusso geotermico, quello solare e l'energia dei venti e le biomasse usate per produrre energia elettrica e biocombustibili.

Ciascuna di queste fonti alternative alle fossili ha dei vantaggi e dei problemi, dei costi e dei benefici. Le considereremo tutte in modo critico in questa e nelle prossime lezioni.

# Cambiamento climatico (e altri problemi ambientali) e *depletion* indicano la necessità di passare rapidamente oltre l'età dei combustibili fossili

*The Oil Age*: Vol. 1, No. 1, January 2015



# Alternative ai combustibili fossili

## 1. Energia Nucleare

- > Fissione (varie tecnologie e varie generazioni)
- > *Fusione* (in sviluppo da decenni)

## 2. Idroelettrico

(verso la saturazione del grande idroelettrico.  
Prospettive per il mini-idroelettrico)

## 3. Geotermico

(saturazione sorgenti concentrate. Prospettive per  
le sonde geotermiche)

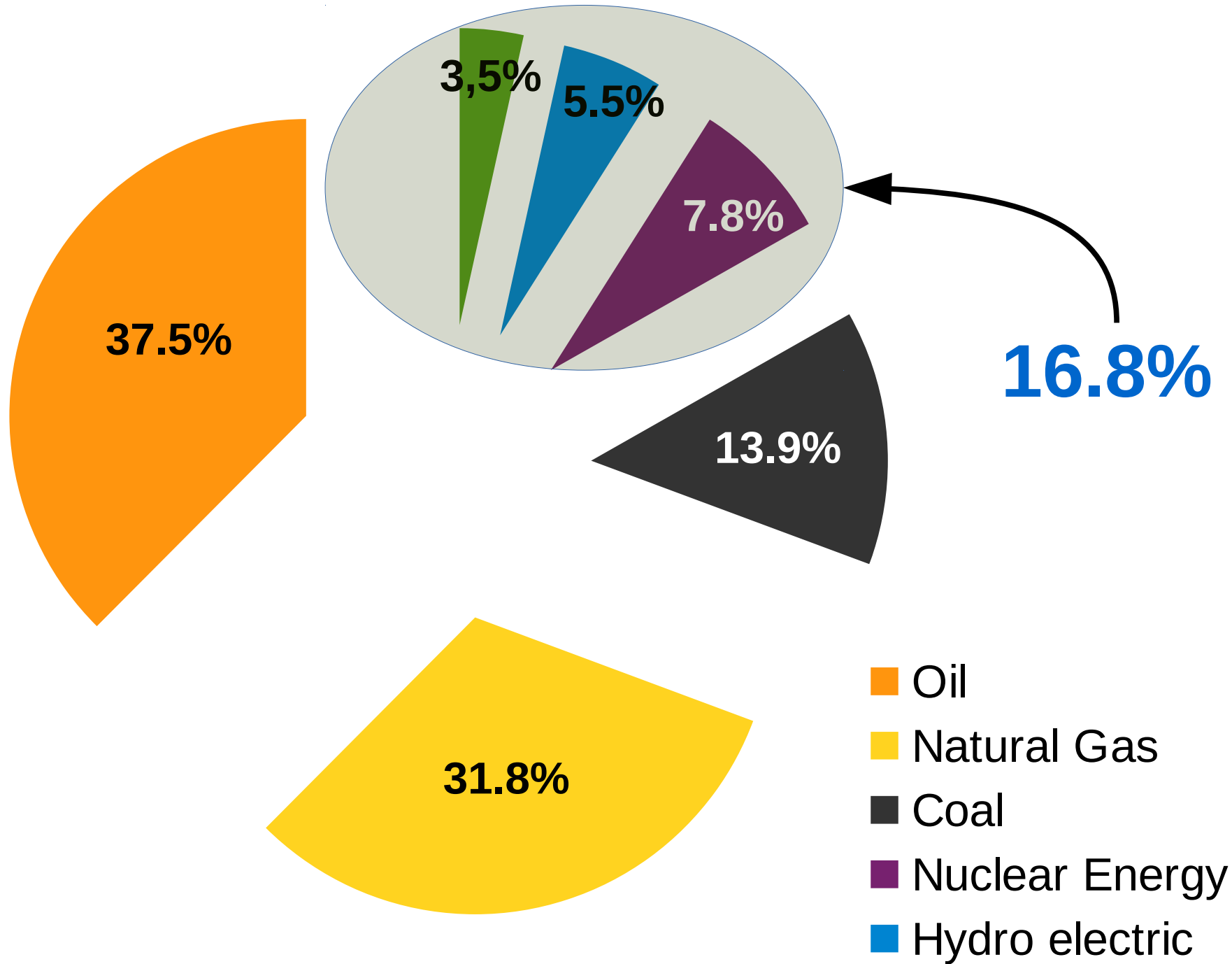
## 4. Biomassa

per potenza elettrica e usi termici (legna, pellet  
ecc)

## 5. Nuove Fonti di Energia Rinnovabile

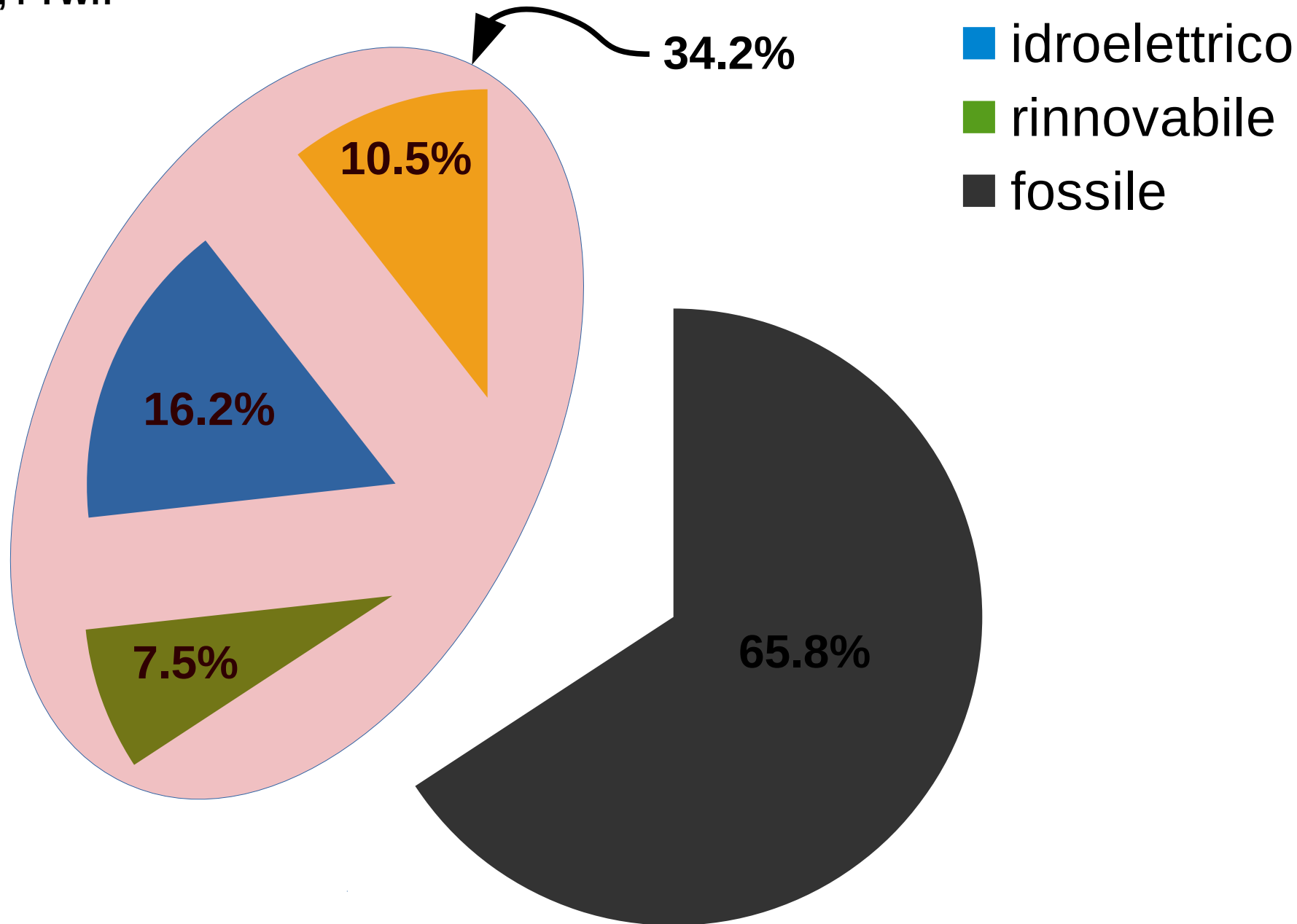


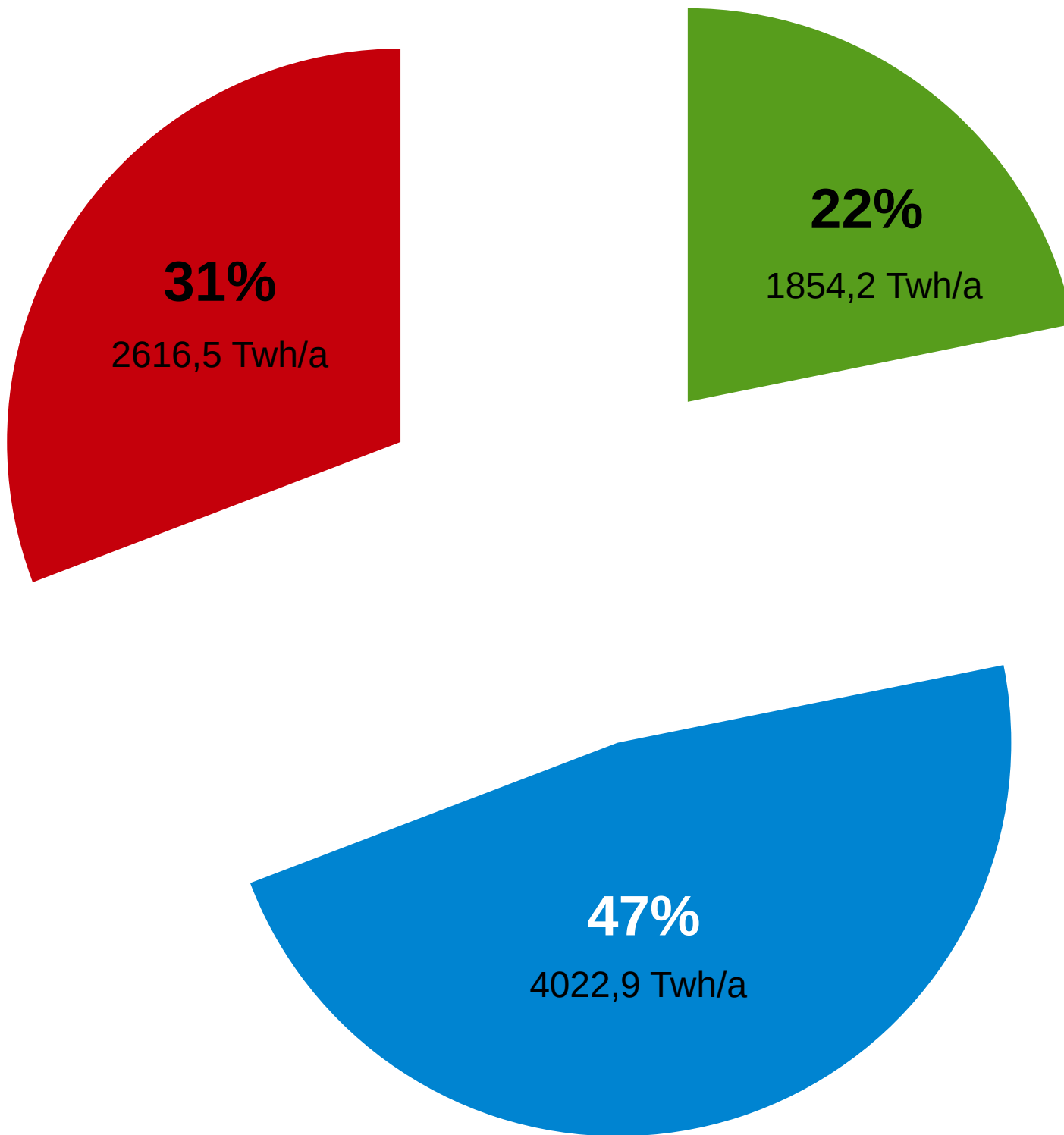
Le fonti alternative alle fossili coprono complessivamente nel 2016 meno del 17% del fabbisogno globale di energia primaria (pag 10), ma oltre 1/3 dei circa 25mila TWh di produzione elettrica globale del 2016 (pag 11). A sua volta la produzione di energia elettrica è divisa fra le rinnovabili come indicato a pag 12. Tutte queste fonti sono in crescita mentre le fossili, principalmente gas e carbone, che coprono i due terzi della produzione elettrica sono in costante declino.



Consumi globali di energia primaria per fonte nel 2016.  
 Dati: Statistical Review of World Energy 2017. British Petroleum.

Produzione globale di energia elettrica (2016)  
24816,4 TWh





- nucleare
- idroelettrico
- rinnovabili

Produzione globale  
di energia elettrica da  
fonti alternative.  
2016. TWh

**L'energia nucleare.** Questa fonte è una fonte elettrica (cioè produce potenza elettrica) basata, al momento, sul fenomeno della fissione nucleare. La fissione nucleare è il fenomeno in cui il nucleo atomico degli atomi di certi elementi si divide in nuclei più piccoli liberando la differenza di massa fra i prodotti della fissione e quella dell'atomo originale, sotto forma di energia. La quantità di energia liberata dipende dall'equazione einsteiniana:

$$E = mc^2$$

dove E è l'energia, m la massa e c la velocità della luce nel vuoto pari a circa  $3 \cdot 10^8$  m/s. Dunque:

$$c^2 = (3 \cdot 10^8)^2 = 9 \cdot 10^{16}$$

Un tasso di cambio molto favorevole alla massa. Una piccola quantità di massa si trasforma in una grandissima quantità di energia. Ad esempio 1 g di massa (cioè 0,001 Kg) che si annichila in un processo di fissione libera una quantità di energia pari a:

$$E = 10^{-3} (kg) * 9 * 10^{16} m^2 s^{-2} = 9 * 10^{13} \text{ Joule} = 90 \text{ TJ}$$

Una quantità di energia pari a quella contenuta in 9825 barili di petrolio.

Questo fenomeno è quello alla base degli ordigni nucleari a fissione, le cosiddette bombe A, di cui abbiamo già parlato nella lezione introduttiva sull'energia. Anche la **fusione nucleare** (il processo in cui due nuclei leggeri si fondono per formarne uno più pesante) è considerata come potenziale fonte di energia, ma ancora non esiste un prototipo industriale e anche a livello sperimentale si incontrano notevoli difficoltà.

La comprensione dei problemi tecnici e ambientali legati allo sfruttamento dell'energia nucleare richiede lo studio di due fenomeni fisici distinti: la **radioattività** e, come detto, la **fissione nucleare**. Per affrontare questi temi è a sua volta necessario avere cognizione, pur elementare, della natura e della costituzione della materia a livello atomico e sub-atomico.

L'**atomo** è la più piccola unità costituente la materia che ha le proprietà chimiche di un elemento. Gli atomi sono di dimensioni dell'ordine delle centinaia di picometri (pm).

$$1 \text{ pm} = 10^{-12} \text{ m} \Rightarrow 100 \text{ pm} = 10^{-9} \text{ m}$$

Ogni atomo è costituito da un **nucleo**, costituito a sua volta da Z **protoni** con carica elettrica positiva e N **neutroni** senza carica elettrica (in numero circa uguale), ed un numero Z di **elettroni** esterni al nucleo carichi negativamente. La carica dell'elettrone e del protone sono identiche in grandezza, ma opposte di segno. Il valore di questa carica elettrica è anche l'unità elementare più piccola di carica. Circa  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Coulomb.

Ciascun atomo è dunque caratterizzato dal numero Z (numero atomico uguale al numero di protoni nel nucleo ed elettroni e dal numero N di neutroni o dalla somma  $A = Z + N$  che per ogni dato valore di Z identifica un **Isotopo** dell'elemento in questione.)

Il comportamento chimico di un atomo e quindi le proprietà chimiche dell'elemento che esso rappresenta, sono determinati dal modo con cui questo atomo si combina con altri atomi degli elementi della tavola periodica per formare i composti chimici che costituiscono la materia intorno a noi.

Il **comportamento chimico** di un atomo è determinato dal numero degli elettroni di quell'atomo. Quindi le proprietà chimiche di un elemento sono prevalentemente definite dal numero Z.

Una rappresentazione grafica elementare di un atomo di carbonio viene proposta nella pagina 16. La rappresentazione "planetaria" dell'atomo con un nucleo centrale che contiene praticamente l'intera massa dell'atomo ed un numero Z di elettroni che orbitano intorno al nucleo (come una specie di sistema solare in miniatura) fu superata molto rapidamente nei primi decenni del secolo scorso da teorie più avanzate che si raccolgono nella **fisica quantistica**. Per completezza nella pagina che segue si danno alcune informazioni ulteriori sulle proprietà e la costituzione delle particelle subatomiche.

# Particelle subatomiche e loro proprietà

| NOME      | MASSA                     | CARICA ELETTRICA          | SPIN |
|-----------|---------------------------|---------------------------|------|
| Protone   | $1,672 \cdot 10^{-27}$ Kg | $1,602 \cdot 10^{-19}$ C  | 1/2  |
| Neutrone  | $1,675 \cdot 10^{-27}$ Kg | 0                         | 1    |
| Elettrone | $9,109 \cdot 10^{-31}$ Kg | $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C | 1/2  |

Dalla tabella risulta che il protone e il neutrone hanno una massa pari ad oltre 1800 volte quella dell'elettrone. E' perciò chiaro che la massa dell'atomo è concentrata quasi tutta nel nucleo atomico.

Rapporto fra masse di protone ed elettrone.  $\longrightarrow \frac{1,602 \cdot 10^{-27}}{9,109 \cdot 10^{-31}} = \frac{1,602}{9,109} 10^4 = 1805,5$

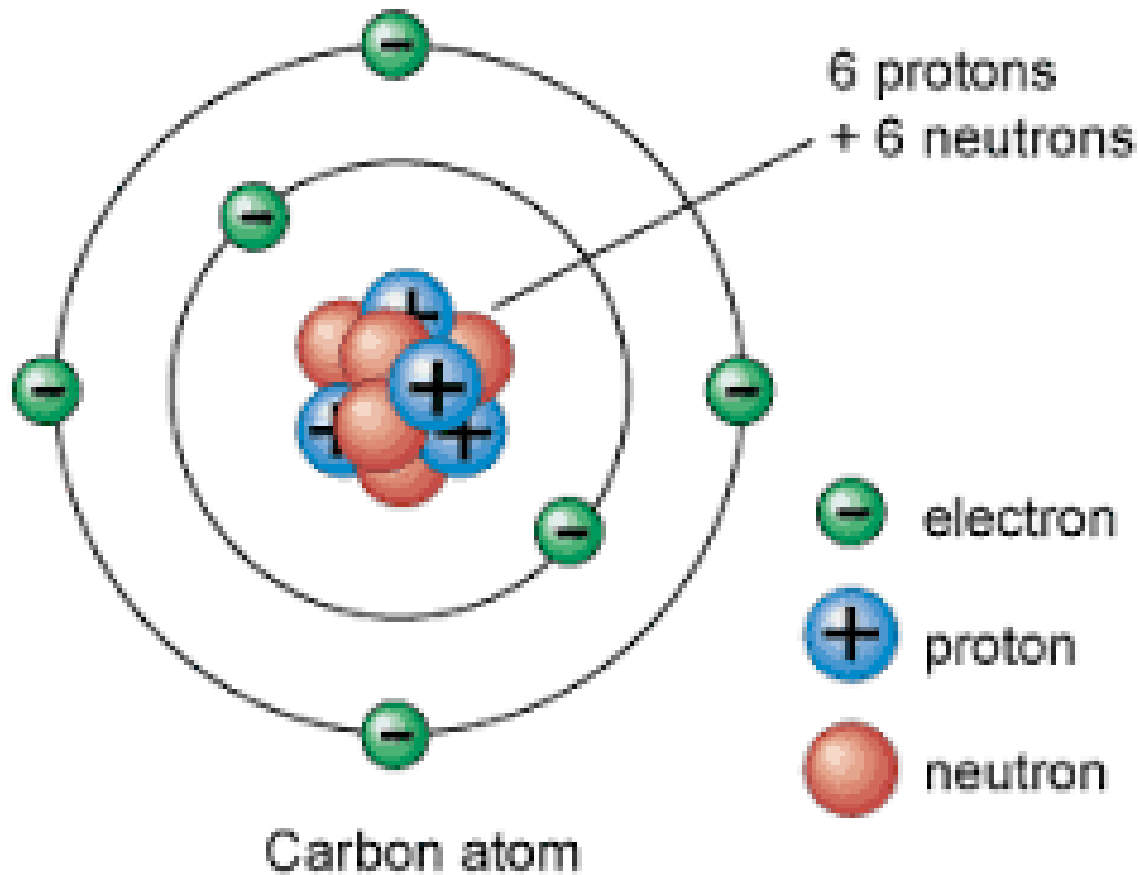
Le particelle che costituiscono il nucleo atomico, protone e neutrone, sono a loro volta costituite da particelle elementari denominate quark che ne determinano le proprietà fisiche cioè massa, carica elettrica, spin ecc.

Il protone è costituito da due quark up ed un quark down, il neutrone da due quark down e un quark up.

L'elettrone è una particella elementare cioè non ha un'ulteriore struttura interna.

Lo spin delle particelle subatomiche, elementari o composte, e dei nuclei è una proprietà fisica legata alla natura quantistica delle particelle ed è definito come il momento angolare intrinseco degli oggetti in questione.

# Atomo di carbonio

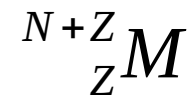


Rappresentazione planetaria dell'atomo con Z protoni ed N neutroni nel nucleo e Z elettroni che ruotano intorno al nucleo.

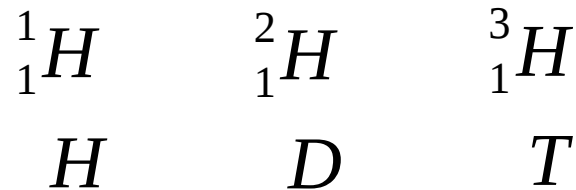


Gli atomi di un dato elemento (stesso valore di Z) possono presentarsi con un certo numero di sottospecie aventi diversi numeri di neutroni N. Questi sono indicati come ISOTOPI dell'elemento in questione.

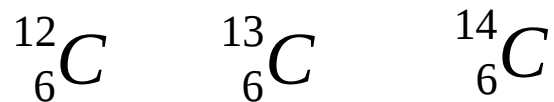
In genere gli isotopi di un elemento sono indicati con il simbolo dell'elemento e due numeri ad apice e a pedice indicanti il primo il valore di Z+N e il secondo Z, per ciascun isotopo del generico elemento M si ha perciò il seguente simbolo:



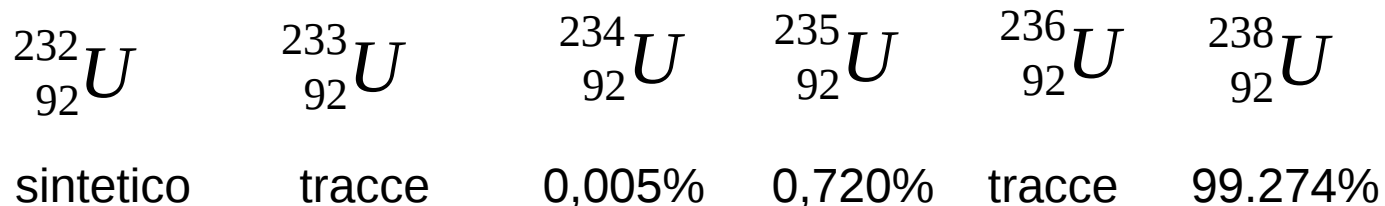
Esempi di isotopi: idrogeno-1 (prozio) idrogeno-2 (deuterio), idrogeno-3 (trizio):



Carbonio 12, 13 e 14

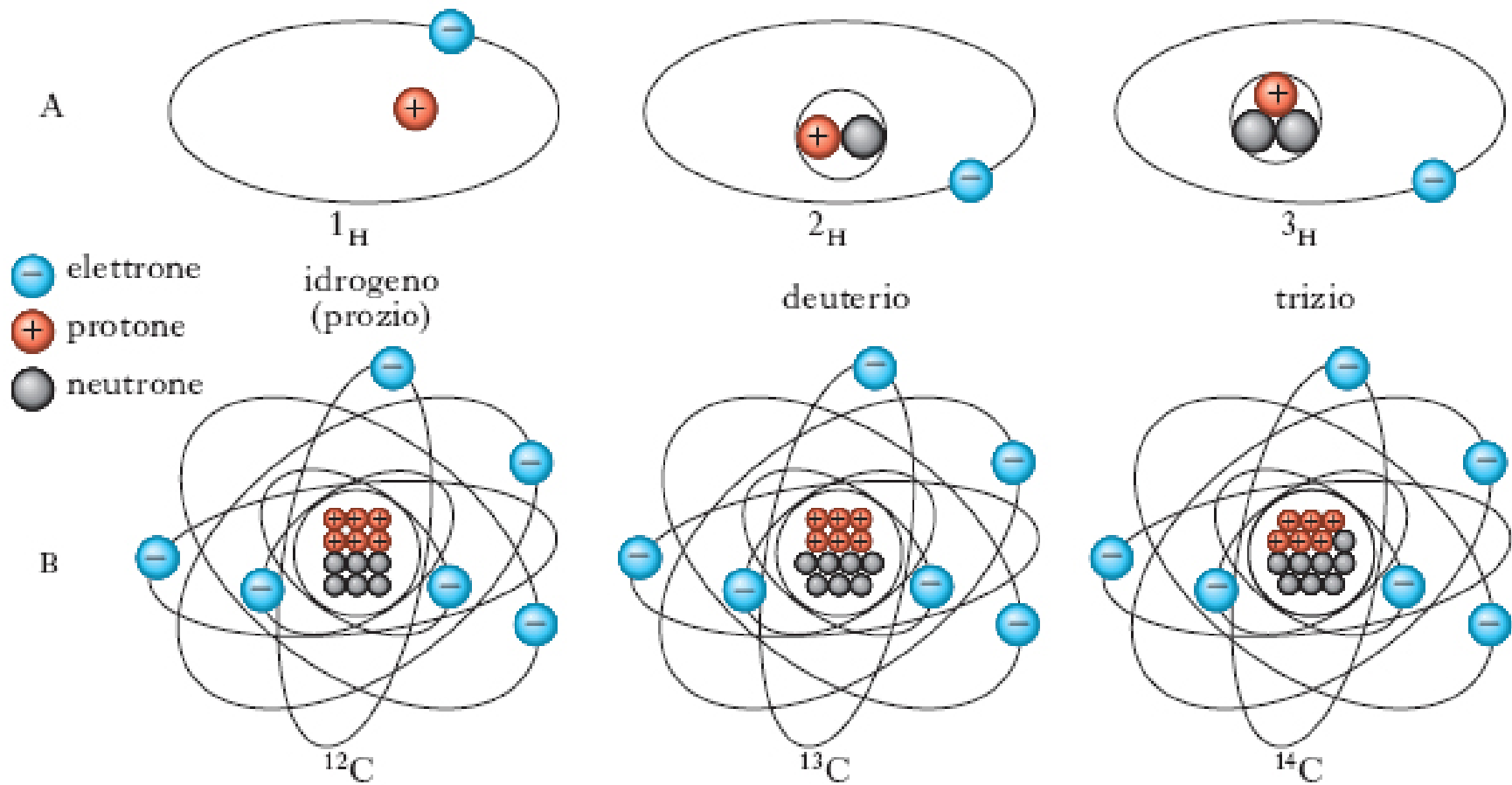


E isotopi dell'uranio



Abbondanza naturale

# Isotopi



**La Radioattività.** La radioattività, o decadimento radioattivo, è un fenomeno fisico che interessa i nuclei atomici. Alcuni nuclei atomici instabili o radioattivi (radionuclidi o radioisotopi) si trasformano (o decadono, o trasmutano), in nuclei di più stabili attraverso l'emissione di tre tipi di radiazione: la radiazione alfa, che è costituita da nuclei di Elio (He costituiti a loro volta da 2 protoni e 2 neutroni), la radiazione beta, costituita da un elettrone (perciò una carica negativa unitaria vedi tabella a pag 15) e raggi gamma, radiazione elettromagnetica di frequenza superiore ai  $10^{20}$  Herz (e dunque lunghezza d'onda inferiore a  $3 \times 10^{-12}$  m). L'emissione di uno di questi tipi di radiazione è denominato anche decadimento. Si ha quindi decadimento alfa quando il nucleo emette una particella alfa, cioè perde due protoni (2 cariche positive) e due neutroni cambiando perciò di 4 unità nel numero  $N+Z$  e di due unità nel numero  $Z$ . Il decadimento beta (1 carica negativa) dal nucleo fa aumentare il numero  $Z$  di una unità, mentre l'emissione di raggi gamma lascia inalterati i numeri  $Z$  ed  $N$ , ma non si verifica mai da sola. La trasmutazione avviene ad un certo tasso nel tempo detto: tempo di decadimento. Il processo radioattivo continua nel tempo seguendo per ogni isotopo radioattivo una sequenza nota con il nome di catena di decadimento. Ogni isotopo ha una dinamica di decadimento caratteristica che descrive la tramutazione dell'isotopo nel tempo. Tale dinamica è di tipo esponenziale negativa ed è caratterizzata dal cosiddetto tempo di dimezzamento. Quest'ultimo è il tempo nel quale una data quantità macroscopica di quell'isotopo si riduce alla metà. Dalla **formula** riportata qui sotto infatti si vede che quando  $t = t_{1/2}$ :

$$N = \frac{N_0}{2}$$

$$N = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

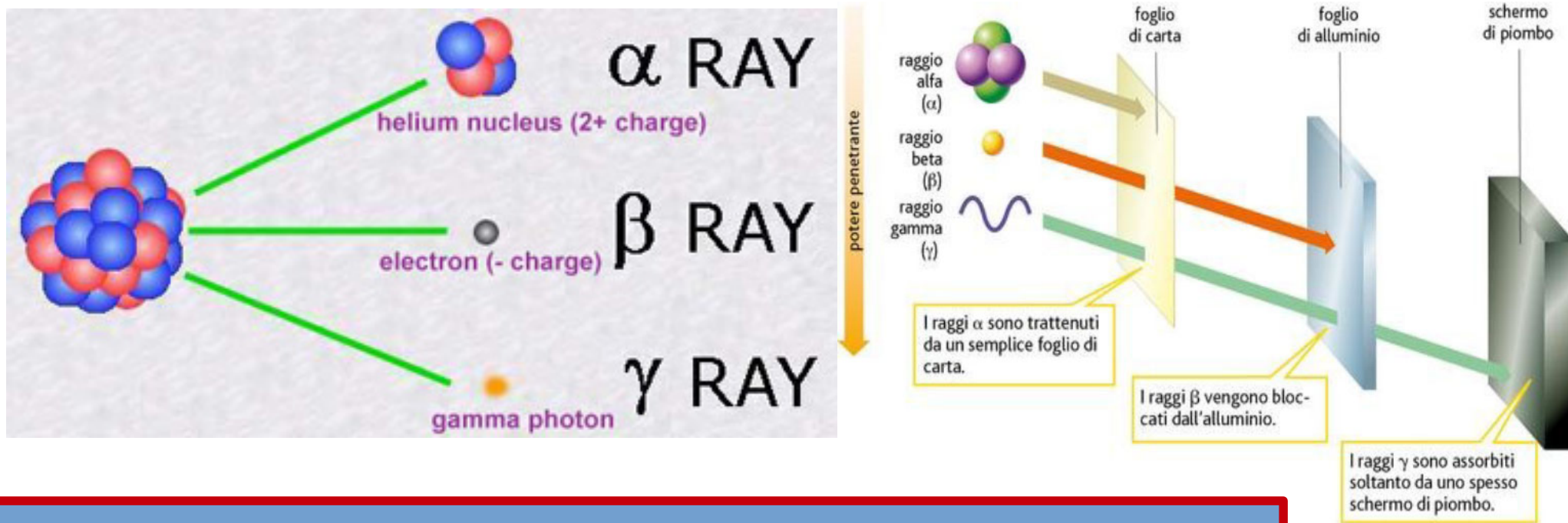
Tempo di dimezzamento o "half life"

Decadimento esponenziale

I tre diversi tipi di radiazione alfa, beta e gamma hanno un diverso modo di interagire con la materia che attraversano. I raggi gamma, che sono radiazione elettromagnetica ad alta frequenza, sono quelli che si propagano maggiormente nella materia e sono assorbiti solo da spessi strati di materiali come ad esempio il piombo. Questo tipo di radiazione è la più pericolosa a distanza. I raggi beta, costituiti da elettroni (particelle elementari di piccola massa) sono bloccati da un foglio di alluminio, hanno comunque un cammino relativamente breve anche nell'aria. I raggi alfa, costituiti da nuclei di elio (2 protoni e 2 elettroni) interagiscono intensamente con la materia e basta un foglio di carta a bloccarli. La pericolosità della radiazione alfa e beta che interagisce più intensamente con la materia sta nel fatto che, proprio per questo motivo, fa danni molecolari, ad esempio danni a livello cellulare, molto ingenti e sono pericolosissimi quando il nucleo emettitore viene ingerito o inalato e si trova a risiedere all'interno dei tessuti.

# Radioattività

Insieme di processi fisico- nucleari attraverso cui un nucleo instabile (radionuclide) *trasmuta* nel tempo in nuclei più stabili attraverso la possibile emissione tre tipi di radiazione.



Il processo è descritto analiticamente da una formula che riporta la variazione nel tempo della quantità dell'elemento.

$$N = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Tempo di dimezzamento o "half life"

Decadimento esponenziale

Nelle tre pagine che seguono sono rappresentati di nuovo gli isotopi dell'Uranio e la rappresentazione cartesiana della funzione di decadimento esponenziale in due casi tempo di dimezzamento breve (curva blu) e tempo di dimezzamento lungo (curva rossa). Le curve possono essere generate con un semplice foglio di calcolo in cui la funzione riportata nella formula viene programmata in funzione del tempo (un foglio di calcolo è allegato per gli studenti interessati a giocare con diversi valori di  $t_{1/2}$ ).

A pag 24 viene data una rappresentazione della catena di decadimento dell' $^{238}\text{U}$ . In questa rappresentazione si riporta il valore Z in funzione del numero di neutroni N. Ciascun processo di decadimento nella catena ha un meccanismo (alfa, beta o gamma) ed un tempo di dimezzamento specifico. Ad esempio se partiamo da una certa quantità di  $^{238}\text{U}$ , dopo  $4,5 \cdot 10^9$  anni troveremo la metà della quantità iniziale mentre la metà del materiale di partenza sarà costituito da una miscela di tutti gli isotopi di decadimento dal  $^{234}\text{Th}$  (Torio) fino all'isotopo stabile del piombo  $^{206}\text{Pb}$ . Questo perché appena inizia a formarsi ogni isotopo radioattivo inizia anche a decadere lungo la catena seguendo il suo specifico percorso in termini di meccanismo e tempo di dimezzamento.

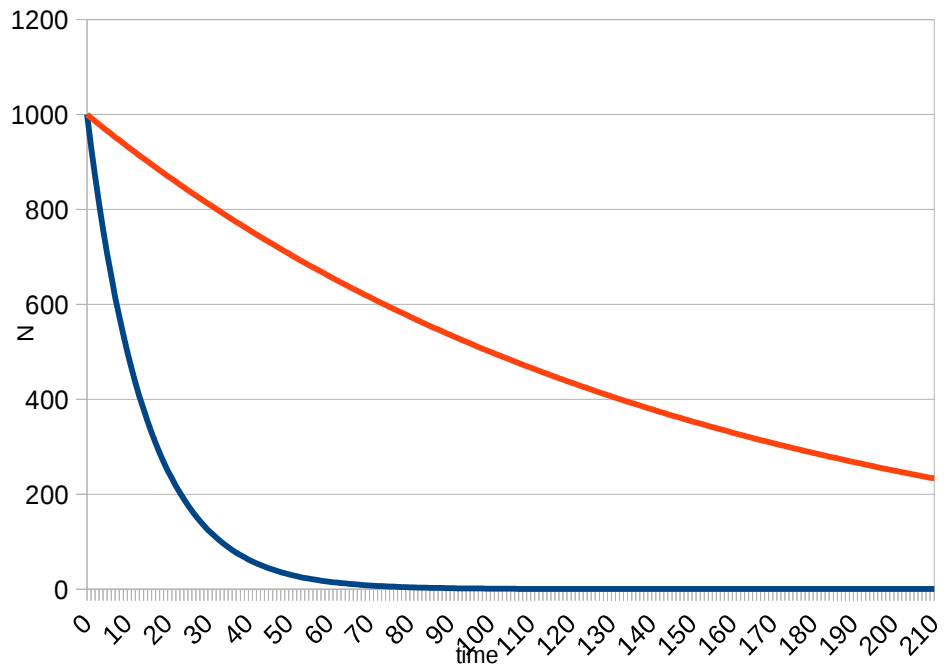
A pag 25 sono rappresentate le diverse catene di decadimento osservate in natura. Queste sono anche denominate come "sequenze" o serie radioattive.

Sui tempi di decadimento e le serie radioattive sono basati i sistemi di datazione in geologia, paleontologia, paleoantropologia, storia e storia dell'arte.

# Isotopi dell'Uranio

| $^{232}_{92}\text{U}$ | $^{233}_{92}\text{U}$ | $^{234}_{92}\text{U}$ | $^{235}_{92}\text{U}$ | $^{236}_{92}\text{U}$ | $^{238}_{92}\text{U}$ |
|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| sintetico             | tracce                | 0,005%                | 0,720%                | tracce                | 99,274%               |
| 68,9 y                | $1,592 \cdot 10^5$ y  | $2,455 \cdot 10^5$ y  | $7,04 \cdot 10^8$ y   | $2,342 \cdot 10^7$ y  | $4,468 \cdot 10^9$ y  |

Tempo di dimezzamento



$$N = N_0 \left( \frac{1}{2} \right)^{\frac{t}{t_{1/2}}}$$

Decadimento esponenziale

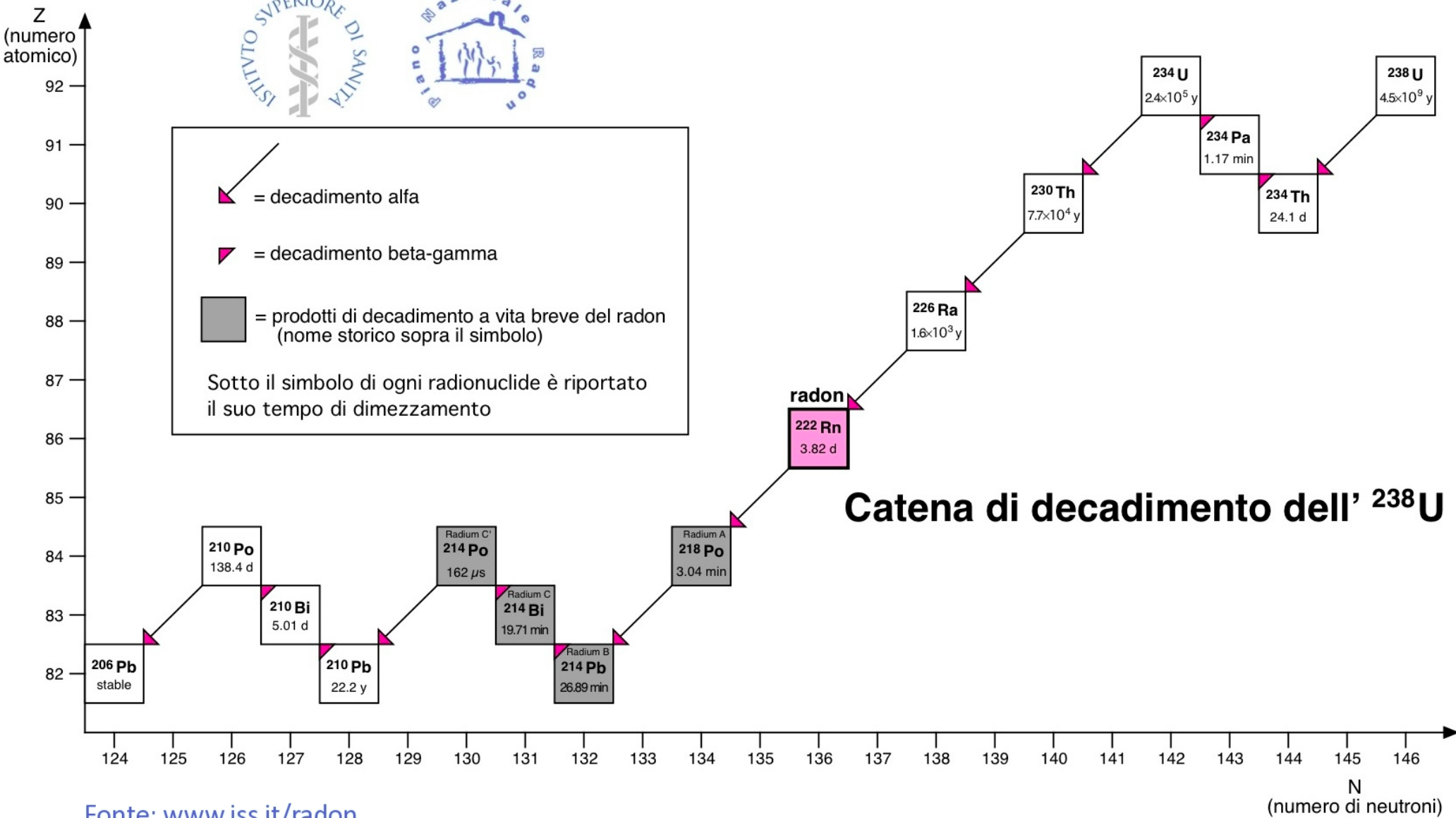
— Case 1  
— Case 2

# Catena di decadimento: $^{238}\text{U}$



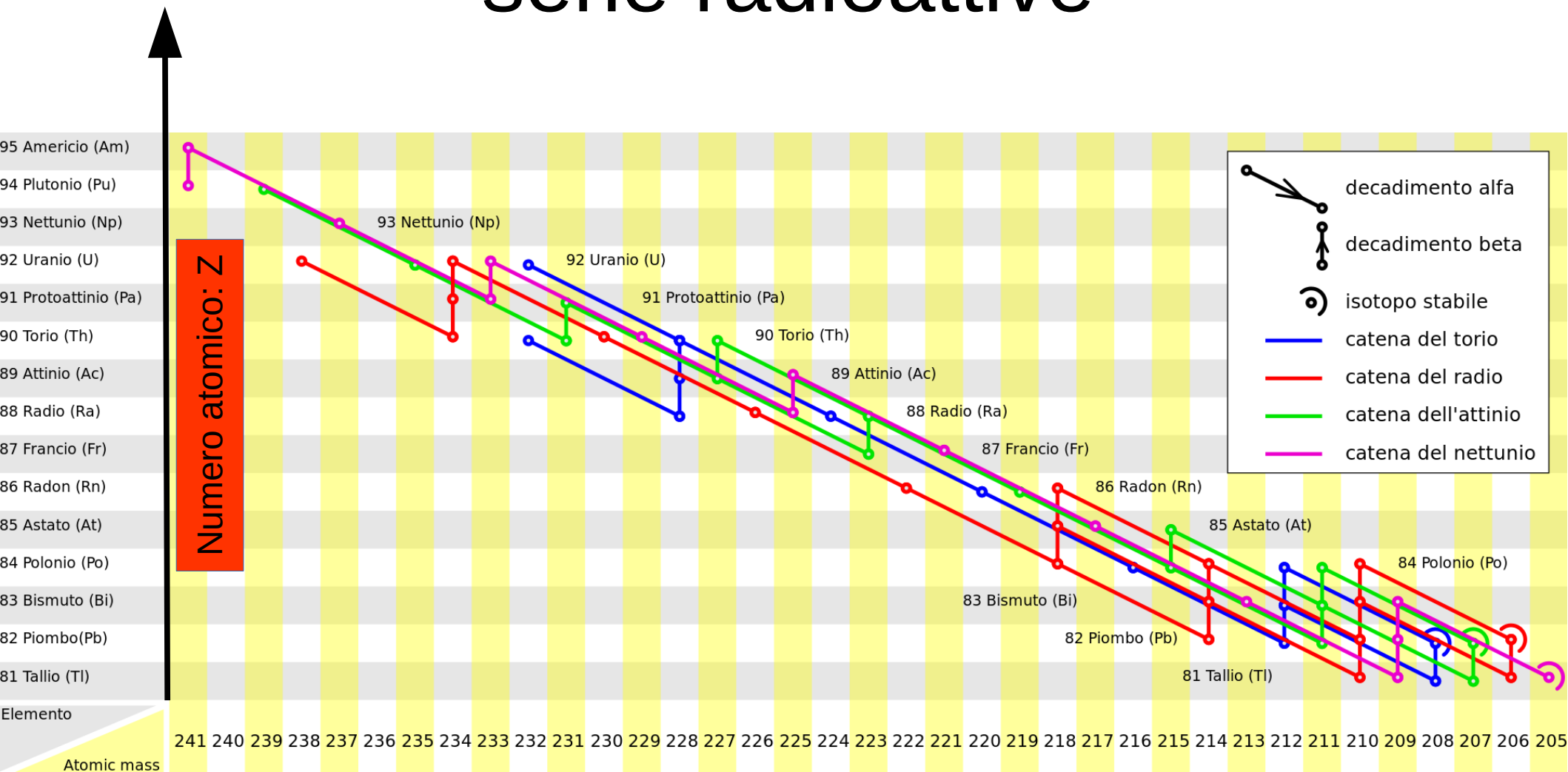
= decadimento alfa  
 = decadimento beta-gamma  
 = prodotti di decadimento a vita breve del radon (nome storico sopra il simbolo)  
 Sotto il simbolo di ogni radionuclide è riportato il suo tempo di dimezzamento

## Catena di decadimento dell' $^{238}\text{U}$





# Catene di decadimento o serie radioattive



Nelle due pagine che seguono si trova una rappresentazione della tavola periodica degli elementi in cui vengono rappresentati con colori diversi gli isotopi più stabili di ciascun elemento. Da questa rappresentazione si vede che all'aumentare del peso atomico la stabilità degli isotopi più stabili tende a diminuire e che il fenomeno della radioattività (legata alla massa ed alla instabilità dei nuclei) diventa preponderante negli isotopi degli elementi oltre il numero 83, il Bismuto. Fanno eccezione il Promezio (Pm) ed il Tecnezio (Tc) che sono artificiali. Cioè non esistono in natura se non in concentrazioni infinitesimali.

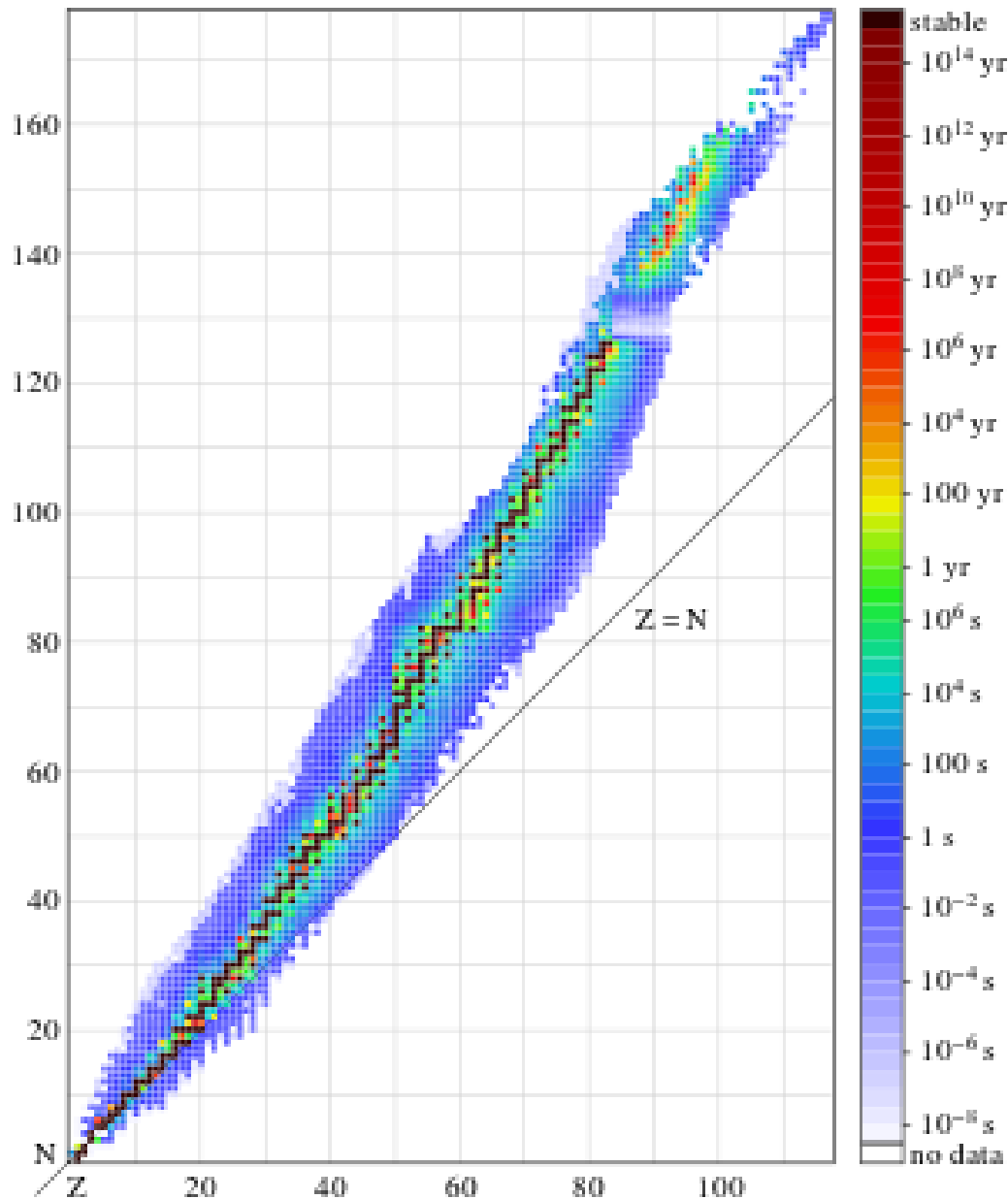
A pag 27 si trova una rappresentazione di tutti gli isotopi in funzione del numero di neutroni e protoni e della loro stabilità.

# Radioattività

|   |          | Group    |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |            |           |            |           |            |            |          |          |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|------------|-----------|------------|------------|----------|----------|
|   |          | I        | II       |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          | III       | IV        | V         | VI        | VII       | VIII      |           |           |           |           |           |           |           |            |           |            |           |            |            |          |          |
| 1 | 1<br>H   |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           | 2<br>He   |           |           |            |           |            |           |            |            |          |          |
| 2 | 3<br>Li  | 4<br>Be  |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           | 5<br>B    | 6<br>C    | 7<br>N    | 8<br>O    | 9<br>F    | 10<br>Ne  |           |           |            |           |            |           |            |            |          |          |
| 3 | 11<br>Na | 12<br>Mg |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           | 13<br>Al  | 14<br>Si  | 15<br>P   | 16<br>S   | 17<br>Cl  | 18<br>Ar  |           |           |            |           |            |           |            |            |          |          |
| 4 | 19<br>K  | 20<br>Ca |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           | 21<br>Sc  | 22<br>Ti  | 23<br>V   | 24<br>Cr  | 25<br>Mn  | 26<br>Fe  | 27<br>Co  | 28<br>Ni  | 29<br>Cu   | 30<br>Zn  | 31<br>Ga   | 32<br>Ge  | 33<br>As   | 34<br>Se   | 35<br>Br | 36<br>Kr |
| 5 | 37<br>Rb | 38<br>Sr |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |          |           |           |           |           |           | 39<br>Y   | 40<br>Zr  | 41<br>Nb  | 42<br>Mo  | 43<br>Tc  | 44<br>Ru  | 45<br>Rh  | 46<br>Pd  | 47<br>Ag   | 48<br>Cd  | 49<br>In   | 50<br>Sn  | 51<br>Sb   | 52<br>Te   | 53<br>I  | 54<br>Xe |
| 6 | 55<br>Cs | 56<br>Ba | 57<br>La | 58<br>Ce | 59<br>Pr | 60<br>Nd | 61<br>Pm | 62<br>Sm | 63<br>Eu | 64<br>Gd | 65<br>Tb | 66<br>Dy | 67<br>Ho | 68<br>Er  | 69<br>Tm  | 70<br>Yb  | 71<br>Lu  | 72<br>Hf  | 73<br>Ta  | 74<br>W   | 75<br>Re  | 76<br>Os  | 77<br>Ir  | 78<br>Pt  | 79<br>Au  | 80<br>Hg  | 81<br>Tl   | 82<br>Pb  | 83<br>Bi   | 84<br>Po  | 85<br>At   | 86<br>Rn   |          |          |
| 7 | 87<br>Fr | 88<br>Ra | 89<br>Ac | 90<br>Th | 91<br>Pa | 92<br>U  | 93<br>Np | 94<br>Pu | 95<br>Am | 96<br>Cm | 97<br>Bk | 98<br>Cf | 99<br>Es | 100<br>Fm | 101<br>Md | 102<br>No | 103<br>Lr | 104<br>Rf | 105<br>Db | 106<br>Sg | 107<br>Bh | 108<br>Hs | 109<br>Mt | 110<br>Ds | 111<br>Rg | 112<br>Cn | 113<br>Uut | 114<br>Fl | 115<br>Uup | 116<br>Lv | 117<br>Uus | 118<br>Uuo |          |          |

Periodic table with elements colored according to the half-life of their most stable isotope. 32-column format is helpful in showing stability pattern. Elements that contain at least one stable isotope. Radioactive elements: the most stable isotope is very long-lived, with half-life of over four million years. Radioactive elements: the most stable isotope has half-life between 800 and 34.000 years. Radioactive elements: the most stable isotope has half-life between one day and 103 years. Highly radioactive elements: the most stable isotope has half-life between several minutes and one day. Extremely radioactive elements: the most stable isotope has half-life less than several minutes. Very little is known about these elements due to their extreme instability and radioactivity. Note that this table only addresses the most stable isotope of each element. Therefore it would be erroneous to conclude that all naturally occurring elements from hydrogen through lead are non-radioactive. For example, if you hold a geiger counter up to a banana, you will detect radioactivity because of the potassium isotope  $^{40}\text{K}$ , which is also the most common radioisotope in the human body.

# Stabilità degli isotopi



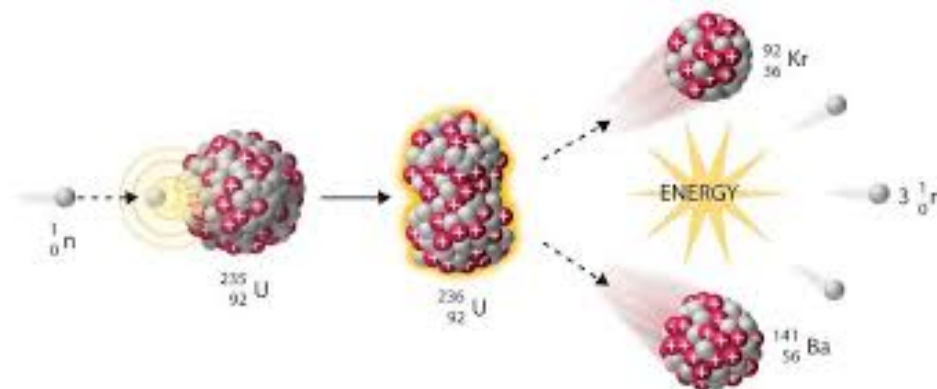
Nel diagramma a fianco si riporta in ascisse il valore di Z e in ordinate il valore di N per ciascuno degli isotopi esistenti in natura o creati in laboratorio. Il colore ne determina la stabilità indicata dal tempo di emivita ( $t_{1/2}$ ).

Come si vede all'aumentare di Z la linea di maggior stabilità, quella più scura, si discosta dalla retta  $N = Z$  cioè quella in cui il numero di neutroni è uguale a quello di protoni.

In questa rappresentazione tracciando una linea verticale per un dato valore di Z si ha la misura del numero di isotopi che l'elemento con quel valore di Z ha in natura o che sono stati sintetizzati. Questo diagramma e la tavola degli elementi della pagina precedente mostrano che non è corretto dire che solo gli elementi con numero atomico superiore a quello del Bismuto sono radioattivi. Ad esempio due elementi leggeri e importanti per la vita come il Calcio e il Potassio hanno isotopi radioattivi con abbondanza naturale non trascurabile.

# Fissione nucleare

La fissione nucleare è un processo fisico che porta alla divisione di un nucleo atomico pesante in due o più frammenti più leggeri con emissione di energia ed altre particelle in genere alcuni neutroni. La fissione può essere spontanea o indotta dal bombardamento del nucleo con neutroni. Si noti la differenza fra radioattività, una reazione nucleare spontanea in cui un isotopo decade lungo una serie radiattiva in seguito all'emissione di radiazioni alfa, beta o gamma e la fissione un processo indotto o spontaneo in cui il nucleo si "rompe" in due pezzi di massa simile e di circa la metà della massa del nucleo originario e parte della massa del nucleo originario si converte in energia secondo l'equazione einsteiniana. Nella reazione si liberano generalmente due o tre neutroni. Questo avviene perché in genere i nuclei fissili più pesanti contengono in proporzione un numero di neutroni maggiore dei nuclei più leggeri. La somma della massa dei frammenti originati dalla reazione è inferiore a quella del nucleo iniziale e la differenza di massa si è trasformata in energia.



La fissione nucleare è la reazione utilizzata sia nei reattori nucleari (in modo controllato), sia nelle armi nucleari più semplici quelle all'Uranio o al Plutonio come quelle di Hiroshima e Nagasaki. Gli ordigni nucleari a fissione sono indicati come Bombe A quelli all'idrogeno, basati sulla fusione nucleare, come bombe H.

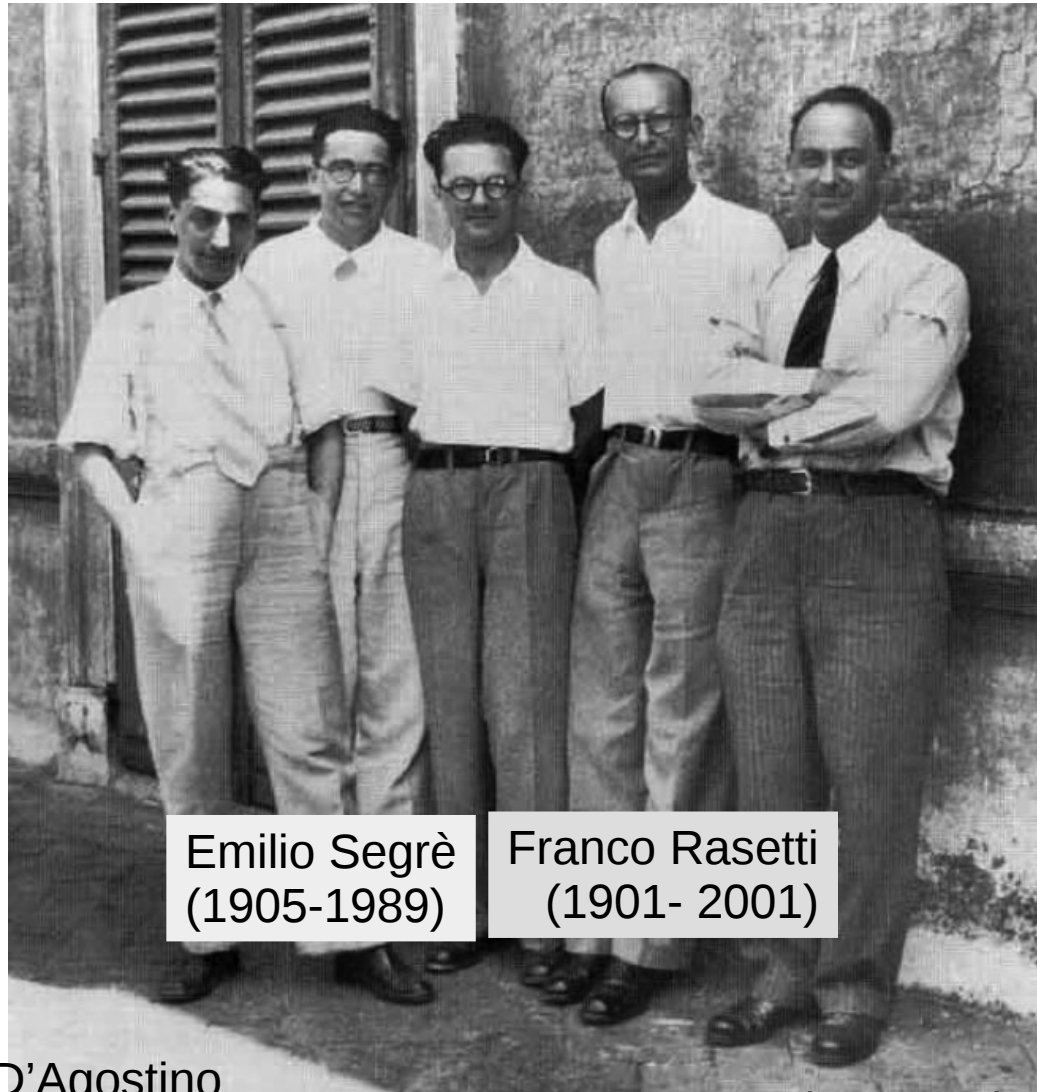
Per una breve storia della fissione nucleare e per ulteriori approfondimenti sull'argomento si invita lo studente a consultare la [voce corrispondente di wikipedia](#) che è compatta e ben fatta.

# Fissione. Enrico Fermi e i ragazzi di via Panisperna.



Bruno Pontecorvo  
(1913- 1993)

1934



Emilio Segrè  
(1905-1989)

Franco Rasetti  
(1901- 2001)

Oscar D'Agostino  
(1901- 1975)

Edoardo Amaldi  
(1908-1989)

Enrico Fermi  
(1901- 1954)

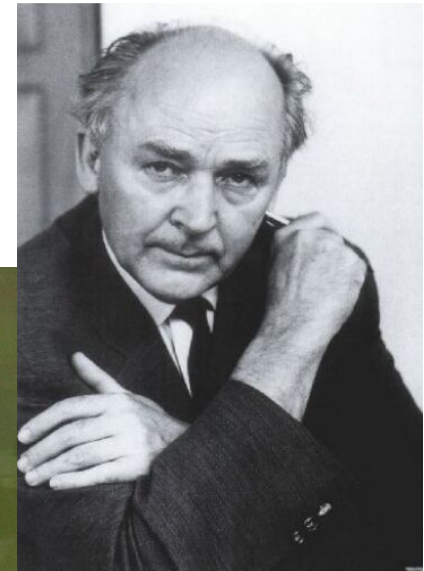


Ettore Majorana  
(1906 –  
scomparso (1938)  
ritenuto ancora  
vivo in Venezuela  
nel 1959)

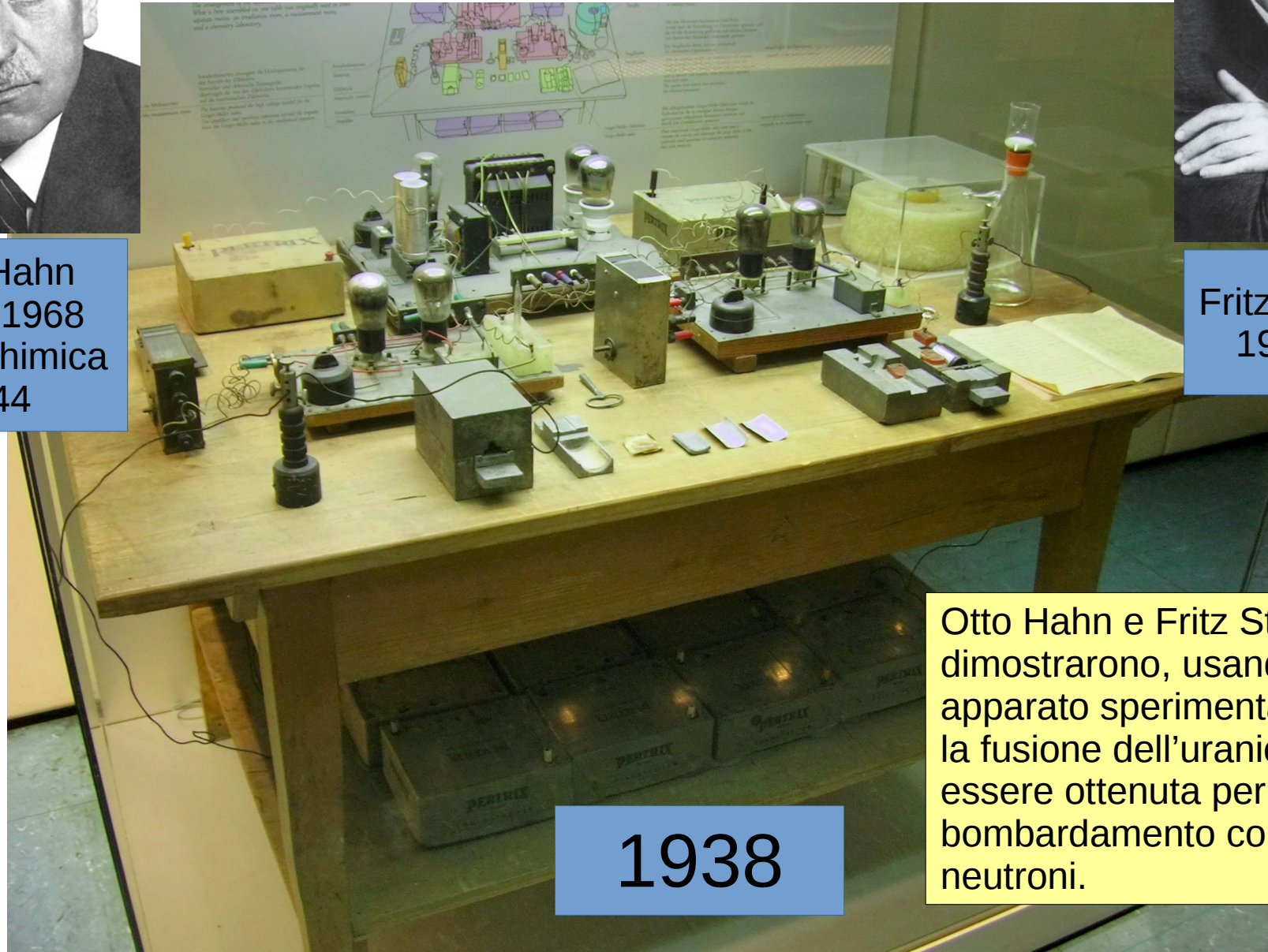
# Fissione



Otto Hahn  
1879- 1968  
Nobel chimica  
1944



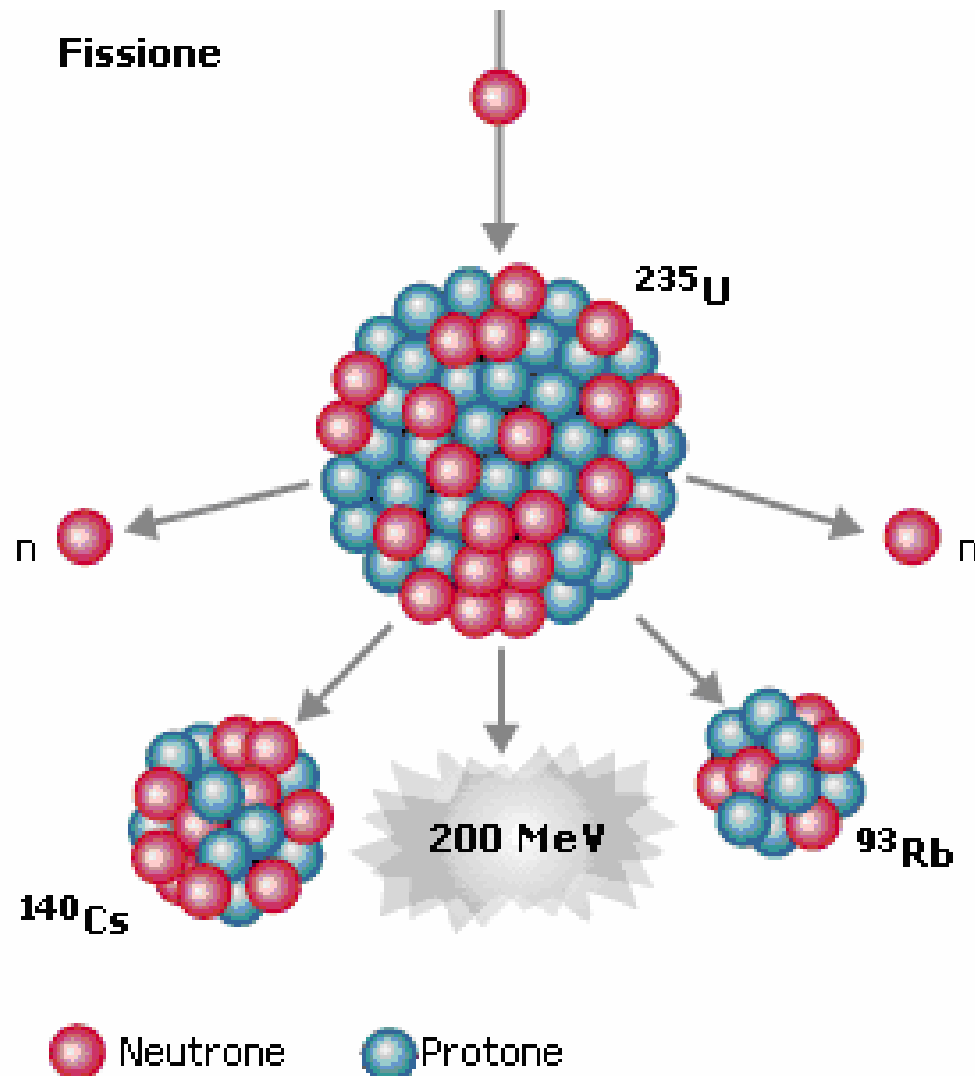
Fritz Strassman  
1902- 1980



1938

Otto Hahn e Fritz Strassman dimostrarono, usando questo apparato sperimentale, che la fusione dell'uranio poteva essere ottenuta per bombardamento con neutroni.

# Fissione dell'atomo di Uranio-235



eV = elettronvolt

Unità di misura dell'energia usata in fisica subatomica, atomica e molecolare.

E' l'energia guadagnata o persa dalla carica di 1 elettrone che si muove nel vuoto di 1 metro attraverso una differenza di potenziale di 1 Volt.

$$1 \text{ eV} = 1,602176565 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$



# La mole (unità di misura di individuo chimico)

Abbiamo visto che dalla fissione di un atomo di Uranio-235 si ottengono circa 200 MeV di energia corrispondenti a  $3,2 \cdot 10^{-11}$  Joule. L'energia corrisponde ad una certa quantità di massa che si converte secondo l'equazione relativistica  $E = mc^2$ . Ma quanta energia si può ottenere dalla fissione di 1 grammo, o 1 Kg di uranio? Per calcolare la quantità di energia che può essere prodotta da una certa quantità macroscopica di Uranio dobbiamo sapere quanti atomi di uranio sono in essa contenuti. Per ottenere questa informazione abbiamo bisogno di conoscere il concetto di mole che è l'unità di misura delle quantità in chimica o l'unità di misura di individuo chimico.

Numero di Avogadro.  $N = 6,022 \cdot 10^{23}$

Il numero di Avogadro è la base dell'unità di misura delle quantità chimiche definita "**mole**".  
1 Numero di Avogadro di atomi o molecole costituiscono 1 mole della sostanza in questione.

Per quanto riguarda le sostanze elementari (gli elementi della tavola periodica) 1 mole di un dato elemento, cioè 1 numero di Avogadro di atomi di quell'elemento, è costituito da un numero di grammi pari al Peso Atomico (PA) di quell'elemento. Il PA degli elementi è riportato nella Tavola Periodica degli elementi come mostrato sotto per l'Azoto (N).

Così in 14,0067 grammi di Azoto (vedi figura sotto) si trovano  $6,022 \cdot 10^{23}$  atomi di azoto.  
e in circa 235 grammi di Uranio si trovano N atomi.

Numero atomico

|                  |
|------------------|
| 7                |
| <b>N</b>         |
| Azoto            |
| <b>14,0067</b>   |
| [He] $2s^2 2p^3$ |

Simbolo atomico

Nome dell'elemento

Peso atomico

Configurazione elettronica

Il PA dunque esprime il numero di grammi di una mole dell'elemento considerato e può essere espresso in grammi/mole o  $g \text{ mol}^{-1}$ . Nel Sistema Internazionale dovremmo esprimerlo in Kg/mole, ma per ragioni pratiche conviene esprimere le quantità in grammi. Da questa definizione segue che dividendo la quantità di un elemento espressa in grammi per il PA si ottiene il numero di moli corrispondente a quella quantità. Moltiplicando questo numero per N si ottiene il numero di atomi di quell'elemento contenuti nella quantità considerata.

# Quanta energia dalla fissione di 1 grammo di Uranio- 235?

In 235 grammi circa di Uranio-235 si trovano  $6,022 \cdot 10^{23}$  atomi.

$$\frac{1 \text{ g}}{235 \text{ g mol}^{-1}} = 0,004255 \text{ mol} = 4,255 \cdot 10^{-3} \text{ mol}$$

Numero di moli in 1 g di U-235

$$4,255 \cdot 10^{-3} \text{ mol} * 6,022 \cdot 10^{23} \text{ atomi mol}^{-1} = 2,5624 \cdot 10^{21} \text{ atomi}$$

Numero di atomi in 1 g di U-235

$$2,56 \cdot 10^{21} \text{ atomi} * 2,00 \cdot 10^8 \text{ eV / atomo} = 5,12 \cdot 10^{29} \text{ eV}$$

Energia prodotta dalla fissione di 1 g di U-235 in eV

$$5,12 \cdot 10^{29} \text{ eV} * 1,602 * 10^{-19} \text{ J eV}^{-1} = 8,21 * 10^{10} \text{ J}$$

Energia prodotta dalla fissione di 1 g di U-235 in J

# Reazione a catena nucleare

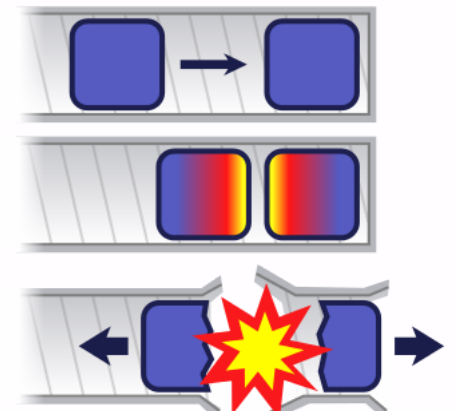
La reazione a catena nucleare si verifica perché dalla fissione di un nucleo fissile, ad esempio quello di U-235, vengono prodotti, oltre all'energia di cui abbiamo parlato e ai frammenti nucleari più leggeri (ad esempio i nuclei di Rb e Cs) anche tre neutroni che, entrando in collisione con nuovi atomi di U-235, e possono dare inizio ad altre reazioni di fissione in un processo a valanga. Statisticamente solo due dei tre neutroni raggiunge un atomo di U perciò dalla fissione di un atomo se ne producono 2 e da queste 2 altre 4 in un processo che, se lasciato libero si sviluppa con progressione geometrica.

Nei reattori nucleari si controlla in vari modi questa reazione catturando con opportuni materiali una parte dei neutroni emessi in modo da evitare lo sviluppo di una reazione a catena incontrollata.

Le armi nucleari sono create invece proprio per sviluppare tutta la potenzialità della reazione a catena fino al consumo totale del combustibile nucleare.

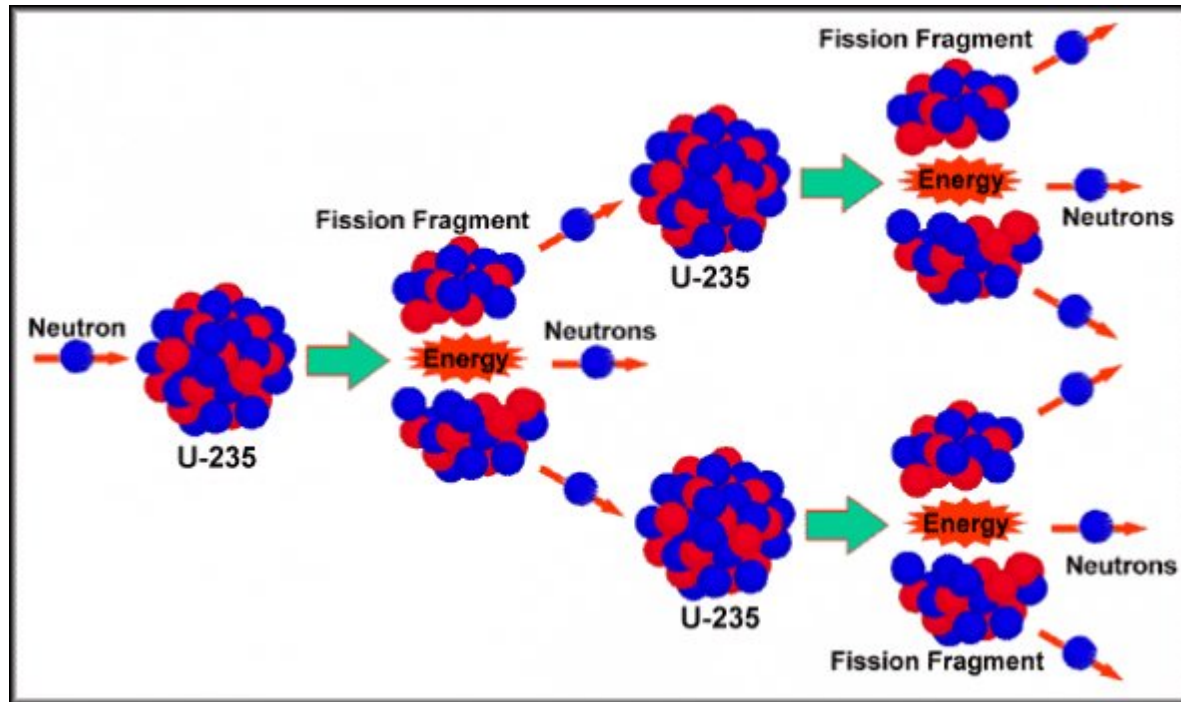
Affinché la reazione a catena abbia inizio è necessario che la massa di materiale fissile (ad esempio U-235) sia al di sopra di un certo valore e abbia una forma determinata a formare la cosiddetta "massa critica". In un ordigno nucleare due masse sub-critiche vengono fatte collidere con un esplosivo convenzionale per formare una massa critica che dà luogo alla detonazione dell'ordigno.

Nel caso dei reattori nucleari una detonazione è resa impossibile anche in caso di fallimento di tutti i sistemi di sicurezza.



Due masse sub-critiche collidono a formare una massa critica in cui si sviluppa la reazione a catena

# Reazione a catena



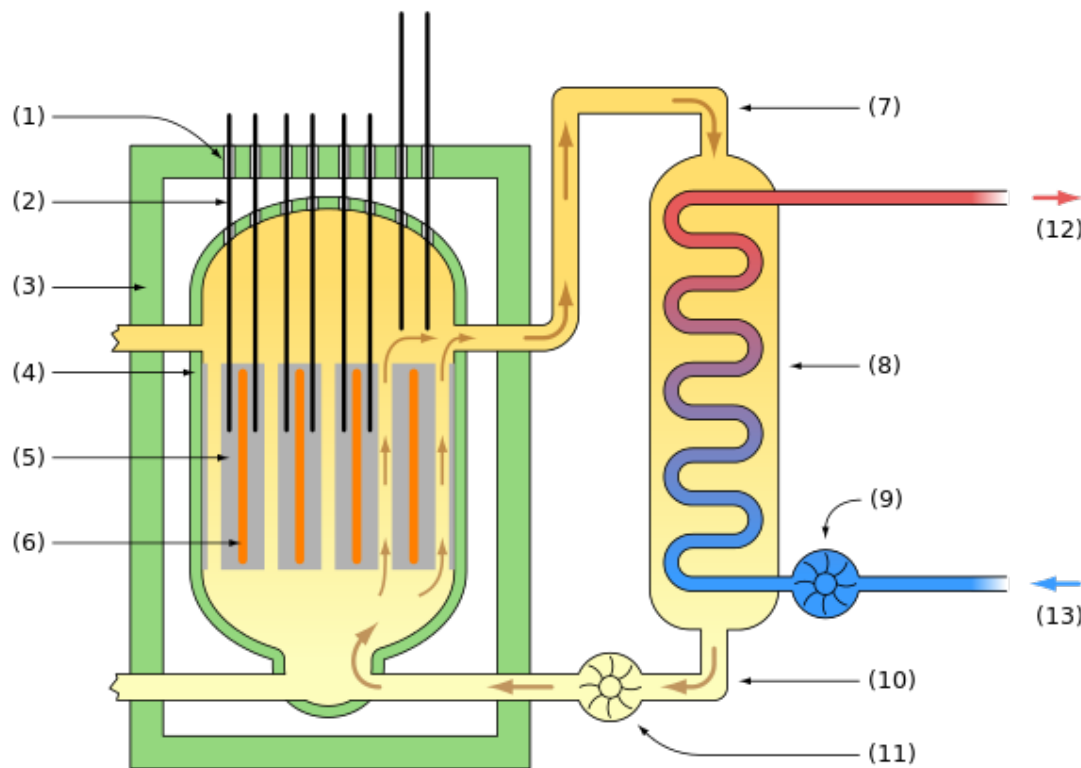
# Reattori nucleari a fissione

Un reattore nucleare è una macchina nella quale la reazione nucleare a catena si svolge in modo controllato. La maggior parte dei reattori nucleari sono usati per la produzione di energia termica che viene poi convertita in energia elettrica attraverso un ciclo di conversione acqua liquida/capore come nelle centrali termoelettriche basate sulla combustione dei combustibili fossili. Vi sono anche reattori nucleari di tipo sperimentale sia per lo sviluppo della tecnologia, sia per la generazione di neutroni, sia per scopi militari (generazione di Plutonio per gli ordigni nucleari).

Affinché nel reattore nucleare la reazione si autosostenga nel tempo è necessaria la presenza di una sostanza che controlli l'energia dei neutroni prodotti nella fissione. Tale sostanza è definita "moderatore" ed ha la funzione di ridurre l'energia dei neutroni prodotti, in pratica di rallentarli, in modo tale che "abbiano tempo" di interagire con i nuclei del materiale fissile su cui si basa il reattore (ad esempio U-235). Il moderatore può essere acqua pesante  $D_2O$  (acqua con deuterio al posto del prozio H), grafite, o anche acqua leggera.

Inoltre i reattori sono dotati di dispositivi dette "barre di controllo" che hanno la funzione di regolare la potenza della reazione fino a ridurla a zero. Queste barre di controllo sono costituite di particolari leghe metalliche che assorbono i neutroni sottraendoli alla reazione a catena e possono essere affondate nel nucleo del reattore più o meno profondamente in modo da ridurre la potenza del reattore. Anche quando la reazione è interamente fermata il decadimento radioattivo dei prodotti delle reazione nucleare richiede un continuo raffreddamento del nocciolo affinché la temperatura non raggiunga temperature sufficienti alla fusione del nocciolo stesso.

# Nocciolo del reattore nucleare. Moderazione e controllo.



Schema di un reattore Magnox.

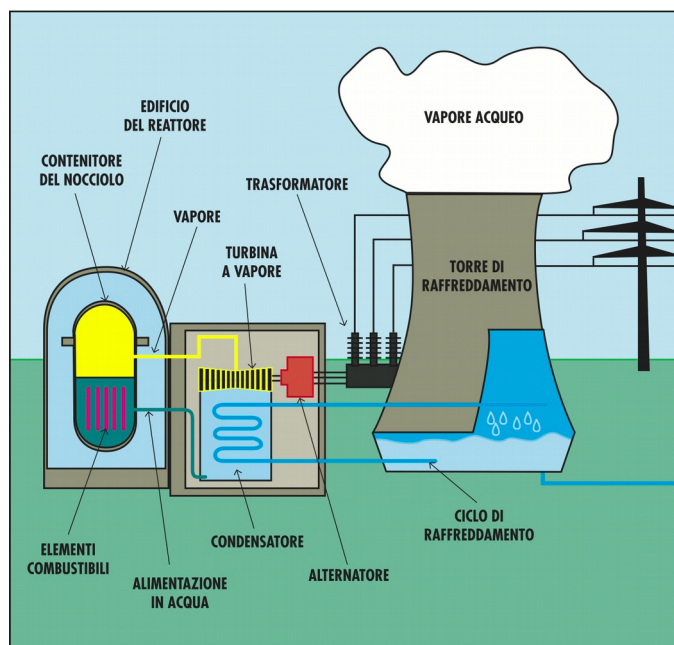
1. Meccanismo di controllo
2. Barre di controllo
3. Edificio del reattore
4. Contenitore del nocciolo
5. Moderatore di grafite
6. Barre di combustibile
7. Condotto gas caldo
8. Condensatore
9. Pompa
10. Condotto gas raffreddato
11. Circolatore
12. Uscita vapore
13. Acqua di raffreddamento

# Centrali elettro-nucleari.

Vi sono molti tipi diversi di centrali nucleari e diverse generazioni di tecnologie utilizzate. Non c'è il tempo e lo spazio per esaminare l'intera filiera nucleare basti dire che le centrali di nuova generazione utilizzano schemi di sicurezza sempre più complessi e raffinati in modo da minimizzare la probabilità degli incidenti nucleari e ridurre la portata dei loro effetti.

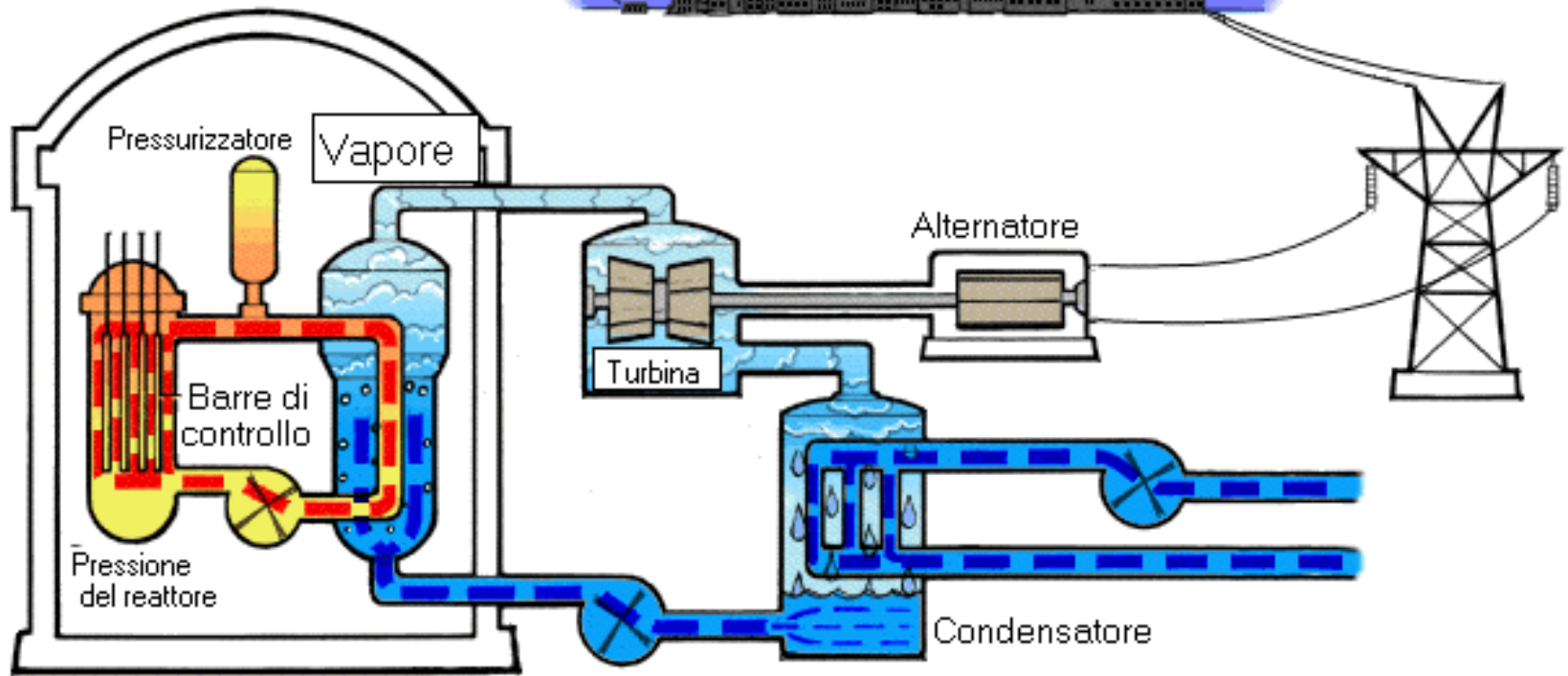
Una centrale nucleare è una centrale termoelettrica che usa un certo ciclo acqua/vapore per mettere in moto una turbina che, a sua volta, aziona un alternatore che genera energia elettrica.

Le centrali nucleari sono costituite in genere da uno o più reattori nucleari con potenza complessiva data dalla somma delle potenze dei reattori. Tipicamente oggi sono in esercizio centrali con potenza complessiva da 1 a qualche giga-Watt. Ulteriori informazioni possono essere trovate sul sito dell'IAEA ([Internationa Atomic Energy Agency](http://www.iaea.org)).



# Centrali nucleari a fissione o centrali elettro-nucleari

Contenitore del nocciolo





I problemi principali della tecnologia nucleare sono non la frequenza, ma la gravità degli incidenti e la durata temporale dei loro effetti. A distanza di 30 anni dall'incidente di Chernobyl la contaminazione delle aree colpite è sempre rilevante, l'area evacuata non è mai stata ripopolata. Il nocciolo della centrale è ancora in uno stato "plastico" (si tratta di una massa calda e semifusa come lava vulcanica molto densa e viscosa) e resterà tale per decenni. Il vecchio sarcofago è in via di sostituzione con uno nuovo che costerà oltre due miliardi di euro che è stato progettato per durare 100 anni (cfr Radio 24 programma l'Altro Pianeta di Laura Bettini trasmissione del 23 aprile 2016 podcast disponibile all'URL: <http://www.radio24.ilsole24ore.com/programma/altro-pianeta/trasmissione-aprile-2016-150217-gSLA77OpcB> .)

Nonostante che l'incidente di Fukushima sia considerato meno grave di quello di Chernobyl (circa 1/10 il livello di contaminazione) anche per questo caso i problemi sono gravi e in parte irrisolti. Si vedano i riferimenti internet riportati in fondo a questa pagina.

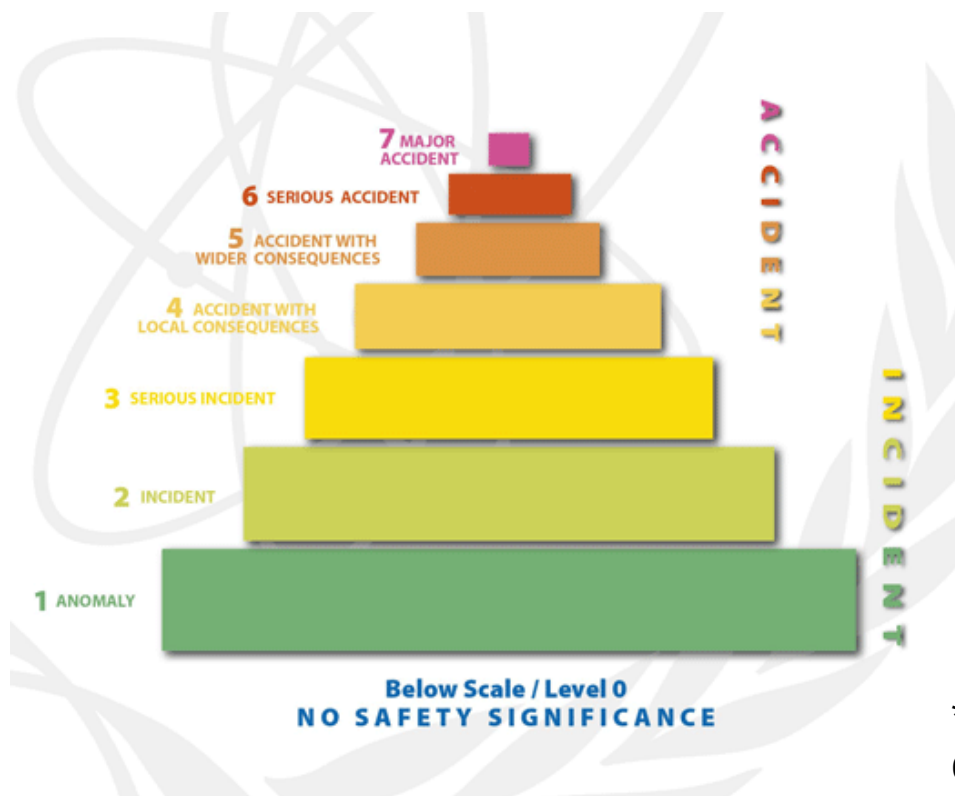
Un altro problema del nucleare è quello legato allo smantellamento delle centrali a fine vita ed allo stoccaggio del materiale radioattivo. Nonostante le rassicurazioni di molti tecnici nucleari il problema del trattamento di materiali radioattivi e la gestione di sistemi industriali estremamente complessi e pericolosi per centinaia di anni non sembra un problema semplice. Implica, ad esempio, la presenza di documentazione e competenze che nessuno può garantire oggi per tempi lontani nel futuro quanto è la durata delle strutture e dei materiali.

<http://www.greenpeace.org/italy/it/ufficiostampa/rapporti/Radiation-reloaded/>

<http://www.focus.it/tecnologia/innovazione/il-sarcofago-della-centrale-nucleare-di-chernobyl>

# Incidenti nucleari

Gli incidenti nucleari sono classificati secondo la scala INES (International Nuclear and radiological Event Scale) introdotta dall'IAEA. La scala INES è una scala logaritmica che prevede 7 gradi in ordine crescente di gravità. Essendo la scala logaritmica il passaggio da un livello a quello successivo implica un aumento dei danni di un fattore 10. In Italiano fino al livello 3 incluso si parla di **Guasto**, al di sopra di **Incidente**. In lingua inglese fino a INES = 3 incluso si parla di **Incident** e per INES > 3 si parla di **Accident**.



## I cinque maggiori incidenti nucleari della storia

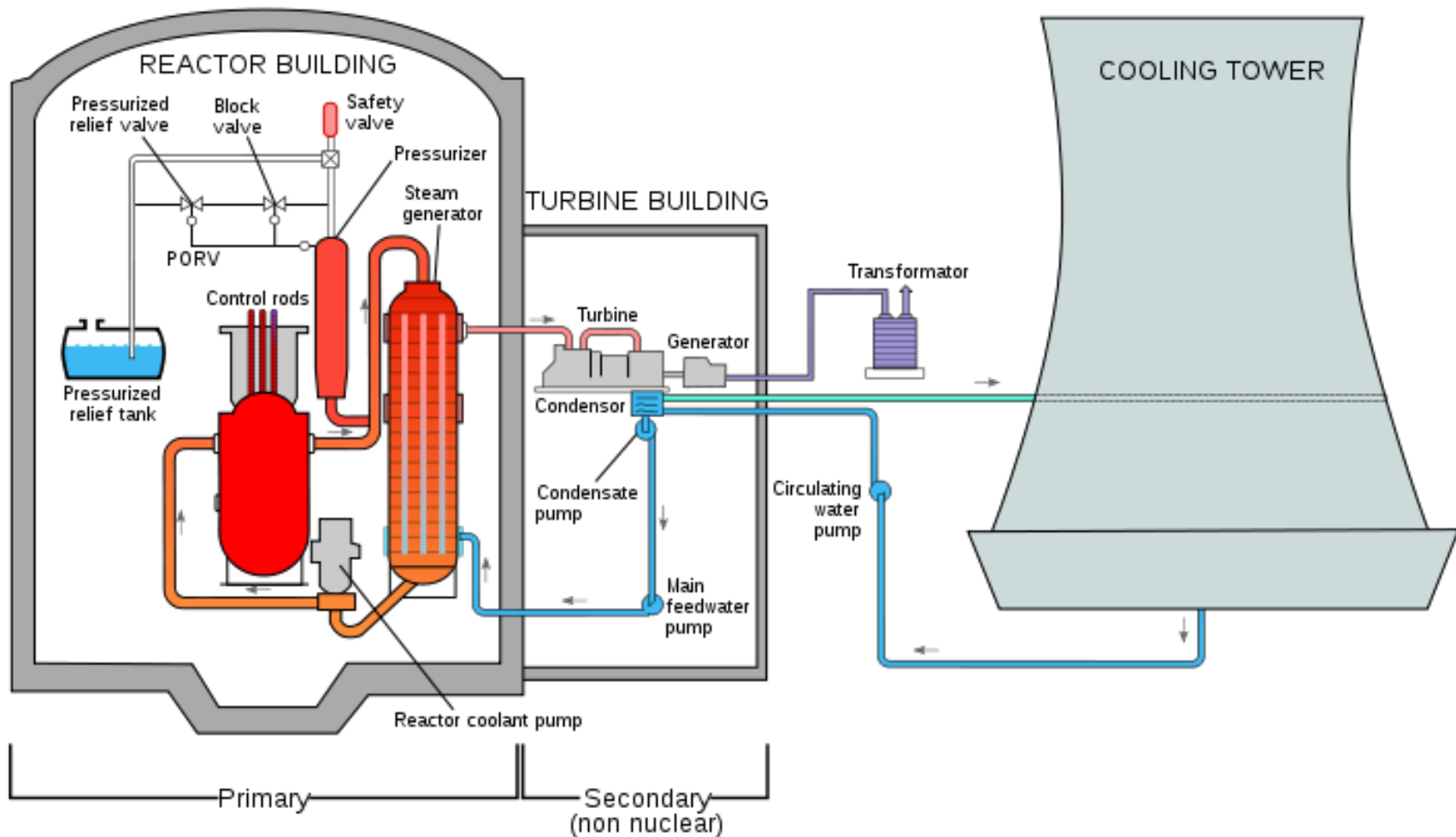
| Località                      | Data | INES |
|-------------------------------|------|------|
| Kyshtym (URSS)*               | 1957 | 6    |
| Three Miles Island (USA)      | 1979 | 5    |
| Chernobyl (URSS)              | 1986 | 7    |
| Tokiamura (Giappone)**        | 1999 | 4    |
| Fukushima Dai-ichi (Giappone) | 2011 | 5-7  |

\* Incidente in un impianto militare per la produzione di Plutonio per ordigni nucleari.

\*\* Incidente sul sito della JCO azienda che produceva combustibile nucleare.

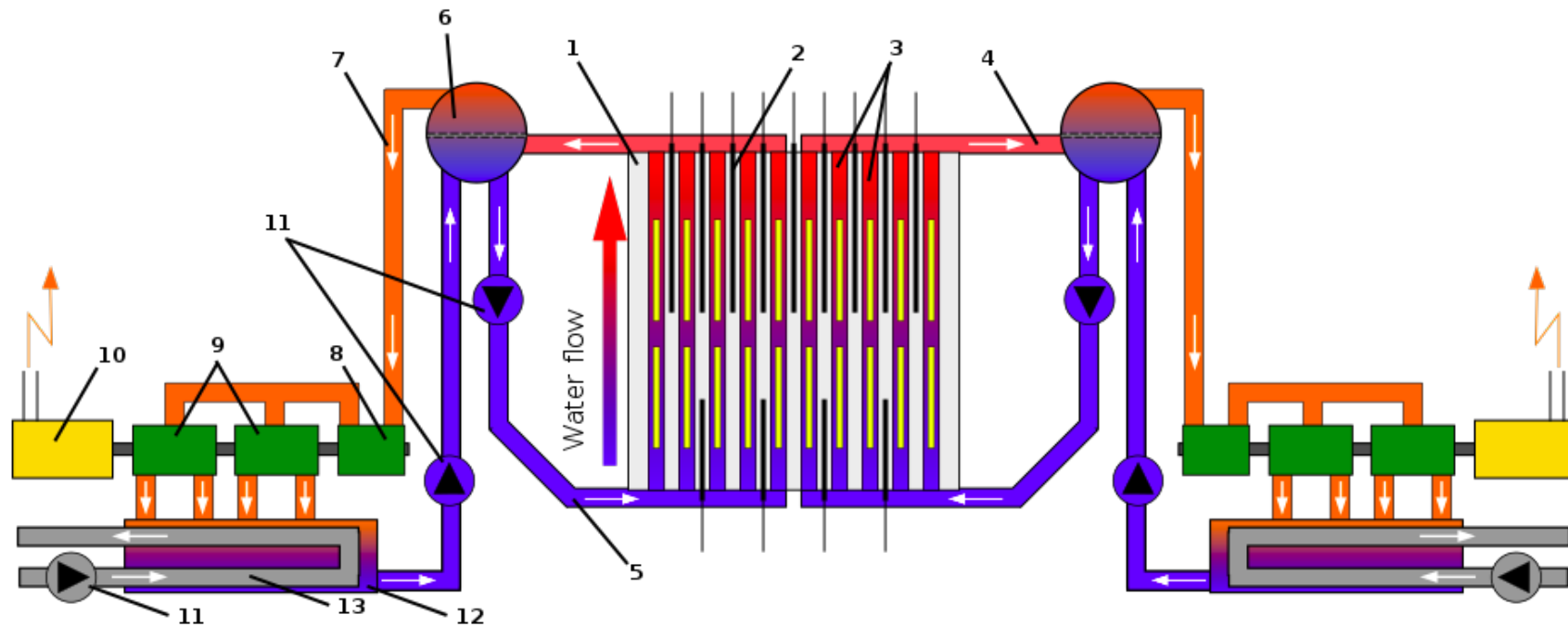
# Three Miles Island (1979)

Vedere su Wikipedia la sequenza degli eventi.



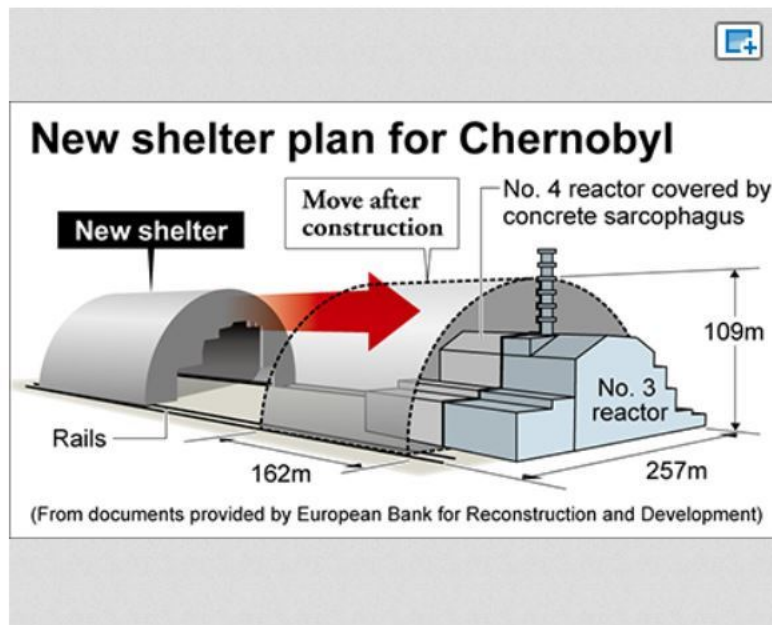
# Chernobyl (1986)

Vedere in rete la sequenza degli eventi. Ci sono anche validi documentari che fanno la ricostruzione dell'incidente.



## Legend :

- |                                     |   |
|-------------------------------------|---|
| 1. Graphite moderated reactor core  | 8. High-pressure steam turbine            |
| 2. Control rods                     | 9. Low-pressure steam turbine             |
| 3. Pressure channels with fuel rods | 10. Generator                             |
| 4. Water/steam mixture              | 11. Pump                                  |
| 5. Water                            | 12. Steam condenser                       |
| 6. Water/steam separator            | 13. Cooling water (from river, sea, etc.) |
| 7. Steam inlet                      |   |



Nuova struttura di contenimento.  
Durata 100 anni.

# Fukushima Da-i-Chi (2011)



Il livello di radiazioni nelle aree contaminate da un incidente nucleare o da test militari, è determinato nei primi giorni dagli isotopi a emivita breve come lo I-131 e il Ba-140. Poi man mano che passa il tempo assumono importanza crescente gli isotopi a emivita lunga come il Cs-137.

| isotopo          | radiazione | emivita     |
|------------------|------------|-------------|
| Sr-90<br>Y-90    | β          | 28 anni     |
| Cs-137           | β, γ       | 30 anni     |
| Pm-147           | β          | 2,6 anni    |
| Ce-144           | β, γ       | 285 giorni  |
| Ru-106<br>Rh-106 | β, γ       | 1 anno      |
| Zr-95            | β, γ       | 65 giorni   |
| Sr-89            | β          | 51 giorni   |
| Ru-103           | β, γ       | 39,7 giorni |
| Nb-95            | β, γ       | 35 giorni   |
| Ce-141           | β, γ       | 33 giorni   |
| Ba-140<br>La-140 | β, γ       | 12,8 giorni |
| I-131            | β, γ       | 8,05 giorni |
| H-3              | β          | 33 giorni   |

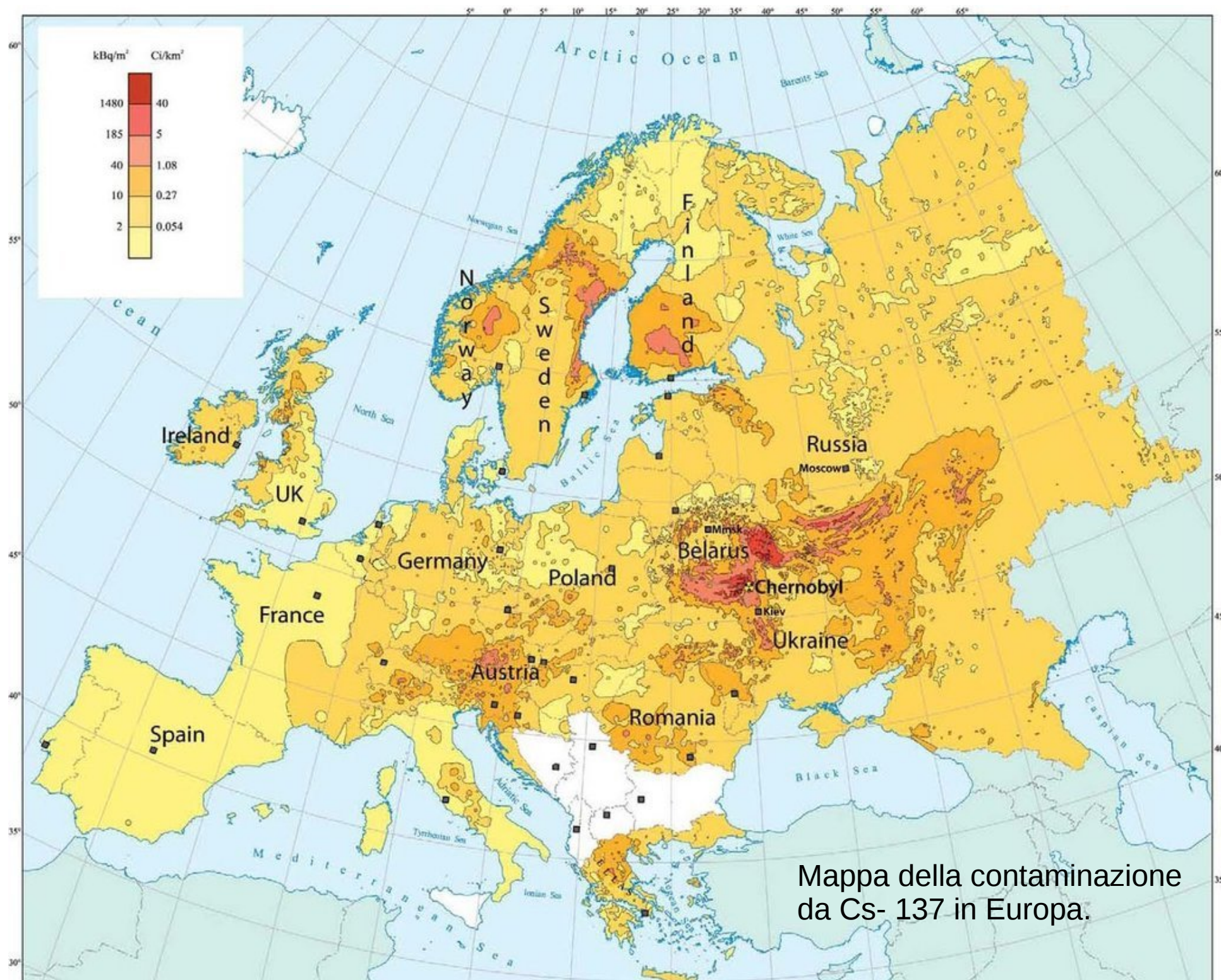
Tempo di emivita effettivo determinato dal tempo di emivita fisico e i tempi relativi ai processi biologici di escrezione.

$$t_{1/2}^{eff} = \frac{t_{1/2}^{fis} * t_{1/2}^{bio}}{t_{1/2}^{fis} + t_{1/2}^{bio}}$$

| isotopo | $t_{1/2}^{fis}$ | $t_{1/2}^{bio}$ | $t_{1/2}^{eff}$ |
|---------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Trizio  | 12,3 anni       | 10 giorni       | 10 giorni       |
| I-131   | 8 giorni        | 80 giorni       | 7,2 giorni      |
| Cs-134  | 2,1 anni        | 110 giorni      | 96 giorni       |
| Cs-137  | 30,2 anni       | 110 giorni      | 109 giorni      |
| Pu-239  | 24.100<br>anni  | 50 anni         | 49,9 anni       |







Mappa della contaminazione da Cs- 137 in Europa.

### Unità di misura della radiazione.

bequerel (Da = Bq: è l'unità SI e corrisponde alla radioattività di una quantità di materiale radioattivo in cui decade 1 nucleo al secondo. Pertanto:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$$

Precedentemente si usava come unità il curie (da Maria Sklodowska Curie) con simbolo, Ci, definita in base ad uno standard basato sul Radio.

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} = 37 \text{ GBq}$$

### Dose assorbita.

La dose assorbita è la quantità di energia assorbita da un mezzo (ad esempio il corpo di un essere vivente) dalla radiazione. Si misura in Gray (Gy). Il Gray è l'energia di 1 Joule assorbita da 1 Kg di massa.

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J Kg}^{-1}$$

Il danno biologico della dose assorbita è diverso a seconda del tipo di radiazione ad esempio il danno provocato dalla radiazione  $\alpha$  è 20 volte più grave da una stessa dose di radiazione gamma. Per questo si usa generalmente dose equivalente.

### La dose equivalente e il Sievert.

Il Sievert (**Sv**) è l'unità del sistema internazionale di misura che quantifica gli effetti (il danno) provocato dalla radiazione su un organismo vivente, la cosiddetta dose equivalente  $H_T$ . L'effetto della dose assorbita **D** è la quantità in assoluto assorbita dall'organismo la dose equivalente quantifica i danni effettivi di una dose assorbita in quanto i diversi tipi di radiazione hanno diversi effetti. La dose equivalente è perciò definita dalla somma delle dosi assorbite delle diverse radiazioni ognuna con il suo fattore di pericolosità  $w_R$ :

$$H_T = \sum_R w_R * D_R$$

La dose equivalente ha le stesse dimensioni della dose assorbita, perciò energia per unità di massa:

$$1 \text{ Sv} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ Kg}} = 1 \text{ m}^2 * \text{s}^{-2} * \text{Kg} * \text{Kg}^{-1} = 1 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

Si usano di solito sottomultipli del sievert. Per chi volesse approfondire il tema si consiglia la voce in inglese di wikipedia.

# Nucleare nel mondo.

|                             | % consumi totali | TWh           |
|-----------------------------|------------------|---------------|
| <b>Nord America</b>         | <b>7,7</b>       | <b>954,9</b>  |
| <b>Sud e Centro America</b> | <b>0,7</b>       | <b>20,9</b>   |
| <b>Europa- Eurasia</b>      | <b>9,4</b>       | <b>1175,8</b> |
| Francia                     | 41,5             | 435,9         |
| Federazione Russa           | 6,0              | 180,8         |
| Regno Unito                 | 6,6              | 63,7          |
| Germania                    | 7,1              | 97,1          |
| <b>Medio Oriente</b>        | <b>0,1</b>       | <b>4,4</b>    |
| <b>Africa</b>               | <b>0,9</b>       | <b>16,1</b>   |
| <b>Asia Pacifico</b>        | <b>1,5</b>       | <b>364,8</b>  |
| <b>Totale mondiale</b>      | <b>4,4</b>       | <b>2536,8</b> |
| OCSE                        | 8,2              | 1988,0        |
| Non- OCSE                   | 1,7              | 548,8         |
| <b>UE</b>                   | <b>12,3</b>      | <b>876,4</b>  |

| 2014 | n. reattori | GW(e) | In constr. | GW(e) | TWh/y         | Anni oper. | mesi |
|------|-------------|-------|------------|-------|---------------|------------|------|
| IAEA | <b>438</b>  | 376,2 | 70         | 68,4  | <b>2410,4</b> | 16096      | 10   |

