



IL DECADIMENTO RADIOATTIVO

Istituto di istruzione superiore G. Capellini N. Sauro
Elaborato concernente le discipline d'indirizzo



Esame di stato 2020-2021

FRANCESCO DE LUCCHINI

Classe 5DLs

1 Introduzione al nucleo atomico: nozioni fondamentali

In fisica con il termine nucleo atomico, teorizzato per la prima volta da Rutherford nel 1910, si intende la parte centrale di un atomo, estremamente piccola (*ordine di grandezza* $10^{-15}m$ ossia dei femtometri, indicati con *fm*) e carica positivamente, dove si concentra la quasi totalità della massa dell'atomo.

È costituito da protoni che possiedono carica positiva e neutroni che non possiedono carica (*proprio per questa ragione quest'ultimi vennero scoperti solo nel 1932 da Chadwick*), detti collettivamente nucleoni.

Il numero di nucleoni all'interno di un nucleo ne determina le proprietà principali, per questo è importante definire:

- Il numero atomico Z cioè il numero di protoni nel nucleo
- Il numero di neutroni N
- Il numero di massa $A = Z + N$ ovvero il numero di nucleoni

Questi numeri vengono indicati a sinistra dell'elemento, come segue: ${}^A_Z\text{Elemento}$; ad esempio una particella α (${}^4_2\text{He}$) possiede $Z = 2$ protoni e quindi $N = A - Z = 4 - 2 = 2$ neutroni

Gli isotopi, dal greco *isos topos*, ossia “stesso posto”, sono atomi chimicamente uguali tra loro, con lo stesso numero atomico Z ma con diverso numero di neutroni N , e di conseguenza anche diverso numero di massa A . L'abbondanza isotopica è la percentuale con cui dato un isotopo si trova in natura rispetto al totale degli atomi dell'elemento corrispondente, ad esempio l'uranio naturale è quasi totalmente formato da ${}^{238}_{92}\text{U}$ (99,2742%) e in minima parte da altri due isotopi: ${}^{235}_{92}\text{U}$ e ${}^{234}_{92}\text{U}$

In genere solo alcuni degli isotopi di un elemento sono stabili, la maggior parte sono instabili e sono detti radioisotopi, i cui nucleoni vengono chiamati radionuclidi.

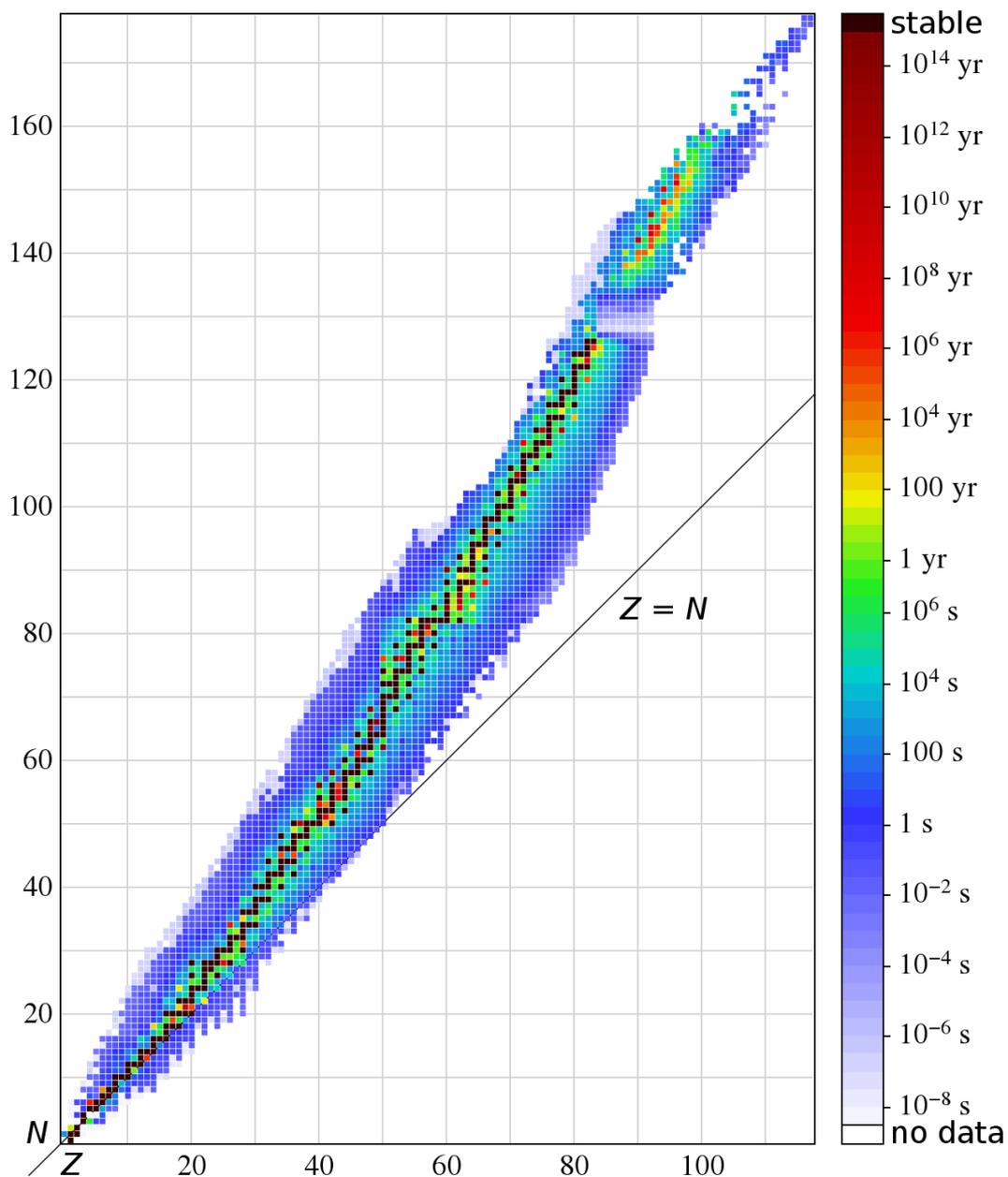


Figura 1 - Andamento rapporto N/Z (numero di neutroni su numero di protoni)

Nel grafico viene mostrato come all'aumentare del numero dei protoni Z , specialmente quando $Z > 30$, il numero dei neutroni N tenda ad essere superiore al numero di protoni, in quanto l'eccesso di neutroni allontana i protoni e diminuisce le forze repulsive che si instaurano tra quest'ultimi, contribuendo alla stabilità del nucleo.

2 Individua le forze presenti nei nuclei degli atomi e le loro caratteristiche

Nel nucleo atomico agiscono due forze, una è la forza elettrostatica repulsiva scoperta da Coulomb, che tende ad allontanare i protoni gli uni dagli altri e dunque a distruggere la struttura nucleare, la seconda è una forza attrattiva detta forza nucleare forte, che assicura la stabilità del nucleo.

Quest'ultima agisce tra nucleoni ed ha intensità molto simili a prescindere dal tipo di nucleoni tra cui avviene l'interazione (*neutrone-neutrone, protone-neutrone o protone-protone*); è repulsiva quando $r < 0.5 \text{ fm}$, attrattiva fino a 3 fm , e massima quando $r \approx 1 \text{ fm}$

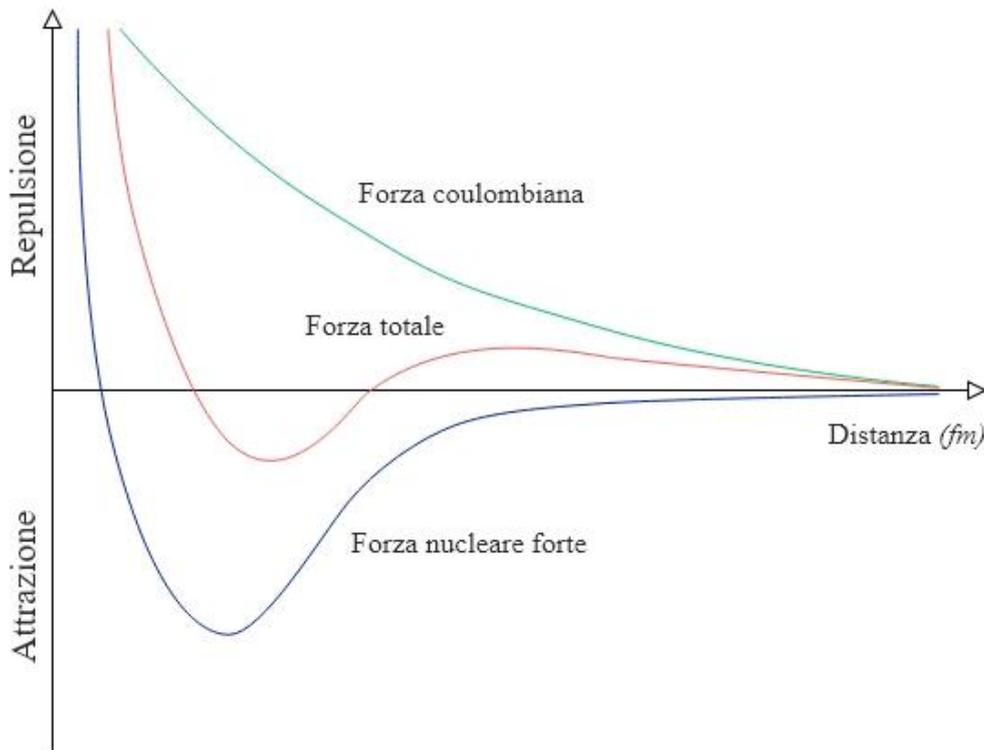


Figura 2 - Forze agenti all'interno di un nucleo

I protoni e i neutroni del nucleo sono in uno stato legato e per allontanarli in modo che non interagiscano più è necessario fornire al nucleo un'energia minima detta energia di legame E_L , che corrisponde all'energia necessaria per tenere uniti i nucleoni e può essere calcolata con la formula relativistica di Einstein $E = \Delta mc^2$.

In questo caso E è l'energia di legame ed Δm è il difetto di massa, ossia la differenza fra la massa dei singoli nucleoni e la massa del nucleo che essi formano: una parte di massa viene trasformata in energia di legame, che tiene i nucleoni in uno stato legato.

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n - m(A, Z)]$$

Il difetto di massa viene comunemente espresso in MeV/c^2 , in modo da semplificare facilmente c^2 durante il calcolo dell'energia di legame; la massa dei nuclei invece viene frequentemente espressa in u , ossia l'unità di massa atomica, che equivale ad un dodicesimo della massa dell'atomo di ^{12}C , ovvero $1,66 \cdot 10^{-27} kg$, che equivalgono a $931,5 MeV/c^2$.

Stilando una tabella della massa delle particelle elementari possiamo vedere come l'elettrone sia circa 1000 volte meno pesante di un nucleone e quindi non influisce in modo apprezzabile sulla massa di un atomo.

Particella	Massa in u	Massa in MeV/c^2
<i>Elettrone m_e</i>	$5.4858 \cdot 10^{-4}$	0.5110
<i>Protone m_p</i>	1.0073	938.27
<i>Neutrone m_n</i>	1.0087	939.56

La formula di Einstein così modificata diventa quindi:

$$E_L = [Zm_p + (A - Z)m_n - m(A, Z)]c^2$$

3 Spiega dal punto di vista energetico l'instabilità dei nuclei radioattivi

Per valutare la stabilità dei nuclei prendiamo in considerazione il rapporto tra l'energia di legame e il numero di massa (ovvero il numero dei nucleoni) E_L/A

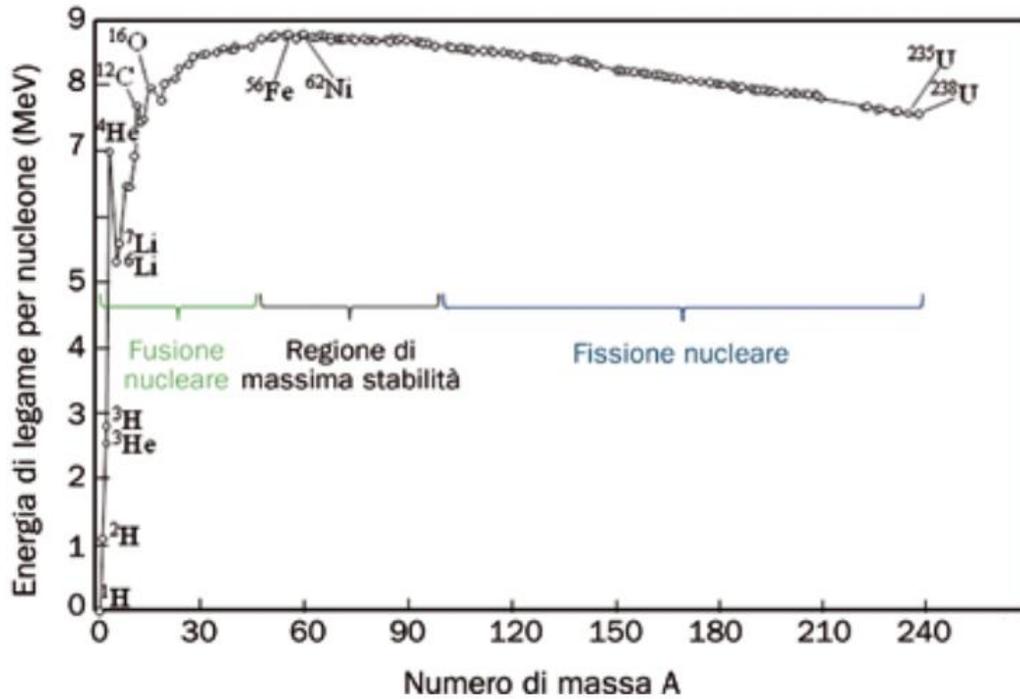


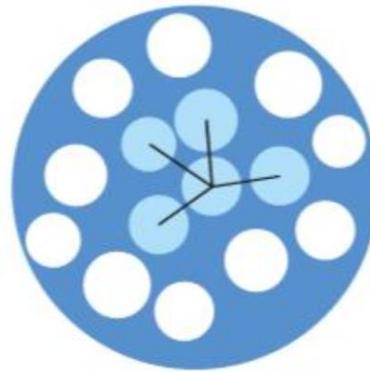
Figura 3 - Andamento rapporto E_L/A (energia di legame su numero di nucleoni)

Dal grafico si evince che dopo l'atomo di ^{12}C l'energia di legame per nucleone si può approssimare a 8 MeV , crescendo con un massimo di 9 MeV per ^{62}Ni e decrescendo lievemente con l'aumentare di A .

In particolare nei nuclei leggeri ($A < 62$) un nucleone ha in media un'energia di legame minore di quella che avrebbe in un nucleo con A maggiore e quindi, dal punto di vista energetico, il processo più favorevole per i due nuclei leggeri è la fusione nucleare, che consiste nell'unione dei due nuclei con il conseguente rilascio di energia.

Per i nuclei con $A > 62$ invece il processo energeticamente più favorevole è la fissione, che consiste nella divisione di un nucleo in due frammenti con valori di A tali che le loro energie di legame per nucleone siano più vicine al valore massimo.

Se ogni nucleone interagisse con tutti gli altri $A - 1$ nucleoni, nel grafico l'energia di legame dovrebbe crescere proporzionalmente ad A , ma ciò non avviene. Ne consegue che ogni nucleone è legato tramite la forza nucleare forte solo a un numero limitato N_0 di nucleoni più vicini.



$A = 15$
Ogni nucleone si lega ai nucleoni più vicini

Figura 4 - Interazione nucleare forte tra singoli nucleoni

Il comportamento dei nuclei può essere compreso solo facendo ricorso alla quantizzazione dell'energia: come nell'atomo di Bohr gli elettroni possono occupare solamente livelli di energia discreti, anche i nucleoni occupano livelli di energia discreti all'interno del nucleo. La differenza sostanziale sta nella scala energetica: mentre le energie di legame degli elettroni sono nell'ordine dei keV , le energie tipiche dei nuclei sono dell'ordine dei MeV (circa 1000 volte maggiori).

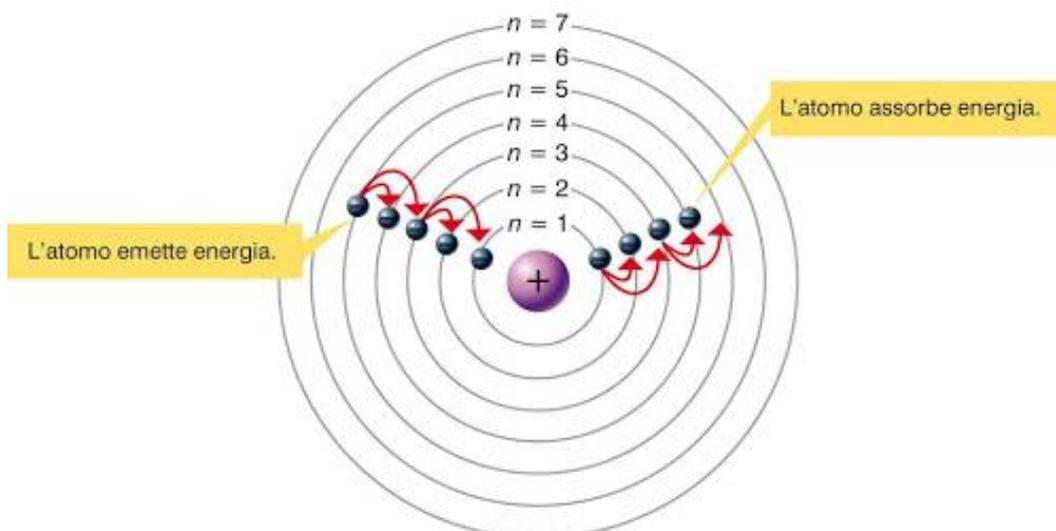


Figura 5 - Modello atomico di Bohr

L'esistenza dei livelli nucleari venne teorizzata da Franck Hertz nel 1914 con esperimenti di diffusione di particelle su nuclei.

Sia K_p l'energia cinetica di una particella e E_1 l'energia del primo livello eccitato del nucleo:

Se $K_p < E_1$ l'urto è elastico e il nucleo rimane nel suo stato fondamentale

Se $K_p \geq E_1$ l'urto è anelastico, il nucleo sale al primo stato eccitato e in seguito al suo decadimento si osserverà l'emissione di un fotone γ di energia pari a E_1

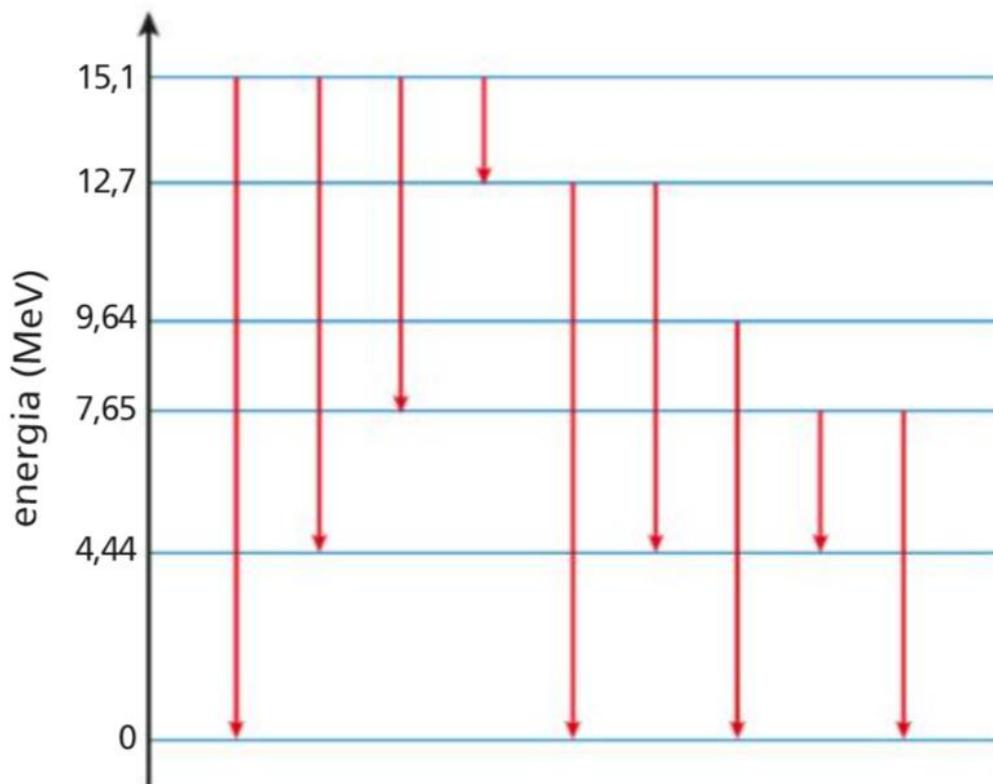


Figura 6 - Spettroscopia nucleare del Carbonio stabile

Lo studio delle reazioni anelastiche particella-nucleo è alla base della spettroscopia nucleare, che studia i livelli energetici nucleari. Il grafico sopra mostra i livelli energetici del ^{12}C e le transizioni che possono avvenire fra i vari livelli nucleari quando uno stato eccitato decade.

4 Ricava la legge del decadimento radioattivo

La radioattività consiste nella trasformazione spontanea, detta decadimento radioattivo, di nuclei instabili, detti radionuclidi, con la conseguente emissione di una o più particelle. Questo fenomeno è intrinsecamente probabilistico (*non è possibile stabilire con certezza quando un singolo nucleo decadrà*), ed è approssimato dalla legge del decadimento radioattivo.

Innanzitutto sappiamo che la velocità di decadimento dN/dt deve essere proporzionale a meno (*perché diminuisce*) il numero di radionuclidi all'istante t , rappresentati da $N(t)$.

$$\frac{dN}{dt} \propto -N(t)$$

Viene introdotta la costante di decadimento λ [s^{-1}] ovvero la probabilità che un dato nucleo del campione decada nell'unità di tempo. Questo valore non dipende dall'istante t , né da parametri fisici macroscopici come temperatura e pressione, ma varia a seconda dell'elemento.

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t)$$

Quella che otteniamo è un'equazione differenziale, risolvibile separando le variabili ed integrando entrambi i membri.

$$\frac{dN}{N(t)} = -\lambda dt$$

$$\int_{N(0)}^{N(t)} \frac{dN}{N(t)} = - \int_0^t \lambda dt$$

$$[\ln N(t)]_{N_0}^{N(t)} = -[\lambda dt]_0^t$$

$$\ln N(t) - \ln N_0 = -\lambda t$$

$$\ln \frac{N(t)}{N_0} = -\lambda t$$

Elevando e a entrambi i membri e applicando la definizione di logaritmo naturale $e^{\ln x} = x$ possiamo esprimere l'equazione come curva esponenziale

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

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

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

L'equazione ottenuta e rappresentata graficamente è la legge del decadimento radioattivo

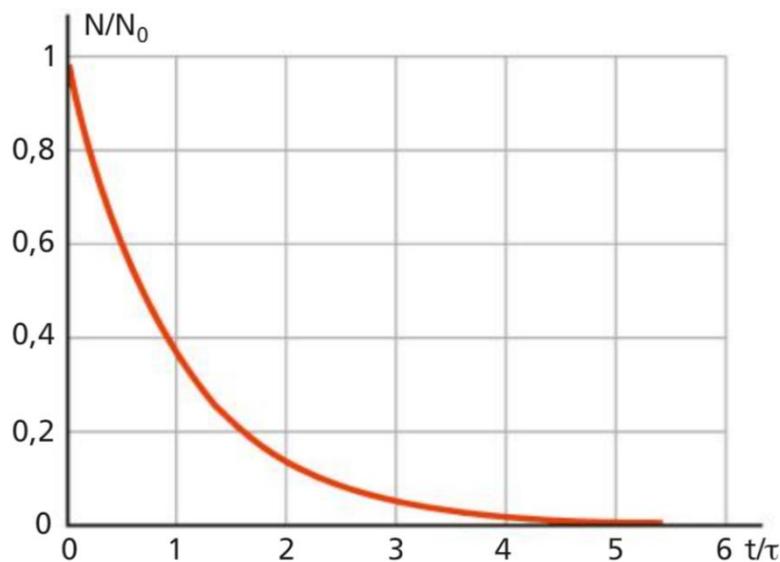


Figura 7 - Legge del decadimento radioattivo

La formula può essere scritta nei termini di τ , vita media del radionuclide, definita come l'inverso della costante di decadimento $1/\lambda$

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

Sebbene sia impossibile prevedere quando un singolo radionuclide decadrà, la vita media dà un'indicazione statistica del tempo impiegato dai radionuclidi a decadere

- dopo un tempo $t = \tau$ circa il 63% dei radionuclidi è decaduto
- dopo un tempo $t = 5\tau$ circa il 99% dei radionuclidi è decaduto

5 Considera la funzione precedente dove si sia sostituita la variabile t con x e imponendo che $N_0 = 4$ e $\tau = 3$, studia la funzione $f(x)$ così modificata

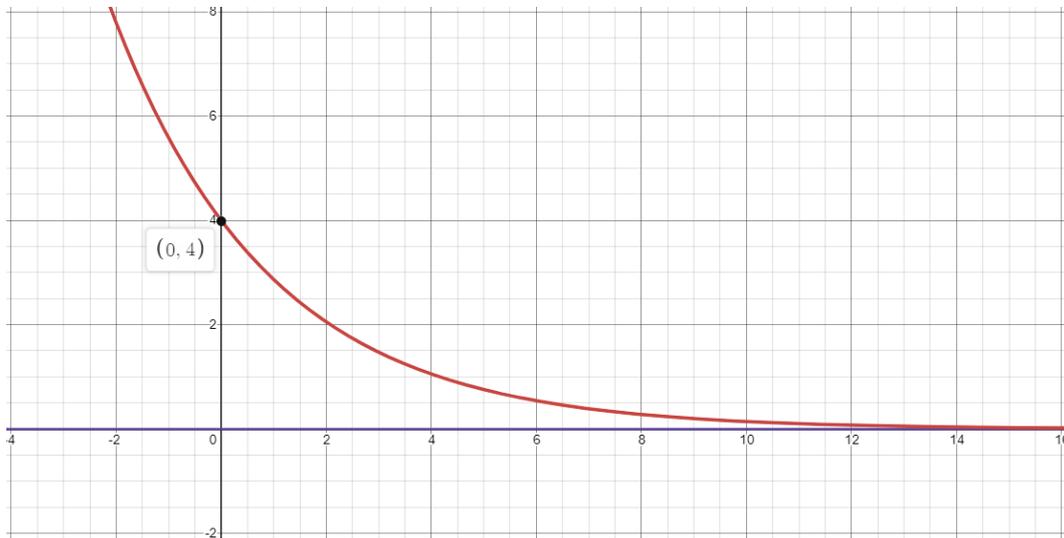


Figura 8 - Grafico di $f(x) = 4e^{-\frac{x}{3}}$ - Desmos

$$f(x) = 4e^{-\frac{x}{3}}$$

Dominio: $\forall x \in \mathbb{R}$

Nessun'intersezione con l'asse x delle ascisse.

Un'intersezione con l'asse y delle ordinate, ponendo $x = 0$ si ottiene:

$$y = 4e^{-\frac{0}{3}} = 4e^0 = 4$$

Per studiare i segni bisogna porre $f(x) > 0$ quindi $4e^{-\frac{x}{3}} > 0$ che, essendo un'equazione esponenziale è sempre maggiore di zero, $f(x) > 0 \forall x \in \mathbb{R}$

Esistendo per ogni numero razionale la funzione non può avere asintoti verticali; per trovare gli asintoti orizzontali bisogna invece calcolare il limite della funzione per $x \rightarrow \pm\infty$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} 4e^{-\frac{x}{3}} = 4e^{-\frac{\infty}{3}} = 4e^{-\infty} = 4 \cdot 0^+ = 0$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} 4e^{-\frac{x}{3}} = 4e^{+\frac{\infty}{3}} = 4e^{+\infty} = +\infty$$

È presente un asintoto orizzontale di equazione $y = 0$, che esclude la presenza di un asintoto obliquo per $x \rightarrow +\infty$, basterà quindi cercare l'asintoto per $x \rightarrow -\infty$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{4e^{-\frac{x}{3}}}{x} = \frac{4e^{+\frac{\infty}{3}}}{-\infty} = \frac{+\infty}{-\infty}$$

Per risolvere questa forma indeterminata bisogna applicare il teorema di De l'Hôpital, svolgendo il limite con al numeratore e al denominatore le rispettive derivate.

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\left(-\frac{1}{3}\right)4e^{-\frac{x}{3}}}{1} = \left(-\frac{1}{3}\right)4e^{+\frac{\infty}{3}} = -\frac{4e^{+\infty}}{3} = -\frac{\infty}{3} = -\infty$$

Il limite non ha come risultato un valore finito, quindi non esiste alcun asintoto obliquo.

Per studiare i punti di massimo e minimo bisogna porre $f'(x) \geq 0$, la derivata prima è già stata calcolata per applicare il teorema di De l'Hôpital ed equivale a:

$$f'(x) = -\frac{4}{3}e^{-\frac{x}{3}}$$

Essendo una funzione esponenziale con un segno meno davanti la funzione non potrà mai essere maggiore o uguale a zero, quindi non sono presenti né punti di massimo né di minimo.

Per studiare i punti di flesso bisogna porre la derivata seconda maggiore di zero.

$$f''(x) = -\frac{4}{3}e^{-\frac{x}{3}} \cdot \left(-\frac{1}{3}\right) = \frac{4}{9}e^{-\frac{x}{3}}$$

Essendo una funzione esponenziale quest'ultima risulta sempre maggiore di zero e di conseguenza non sono presenti punti di flesso.

6 Valuta $\int_0^{+\infty} f(x)dx$ e spiega il significato di integrale divergente

$$\int_0^{+\infty} 4e^{-\frac{x}{3}} dx$$

Per risolvere questo integrale improprio bisogna sostituire l'estremo indefinito con k (o qualsivoglia variabile) e calcolarne in limite per k tendente all'estremo sostituito.

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \int_0^k 4e^{-\frac{x}{3}} dx$$

$$\lim_{k \rightarrow +\infty} \int_0^k 4e^{-\frac{x}{3}} dx = \lim_{k \rightarrow +\infty} \left[-12e^{-\frac{x}{3}} \right]_0^k = \lim_{k \rightarrow +\infty} \left[-12e^{-\frac{k}{3}} + 12e^{-\frac{0}{3}} \right] =$$

$$= -12e^{-\frac{\infty}{3}} + 12e^0 = -12e^{-\infty} + 12 = -12 \cdot 0^+ + 12 = 12$$

Un integrale è definito improprio se ha come estremo dell'intervallo di integrazione $\pm\infty$ o se la funzione integranda non è definita in uno o più punti interni all'intervallo di integrazione.

Nel caso proposto dal quesito l'integrale è di tipo improprio convergente, in quanto ha come risultato un numero finito, cioè 12.

Un integrale improprio divergente ha invece come risultato $\pm\infty$, in questo caso $f(x)$ si dice non integrabile.

7 Dopo aver studiato la funzione $y = |x - 3|e^x$ spiega come può essere utilizzata per discutere l'equazione $|x - 3| = ke^{-x}$

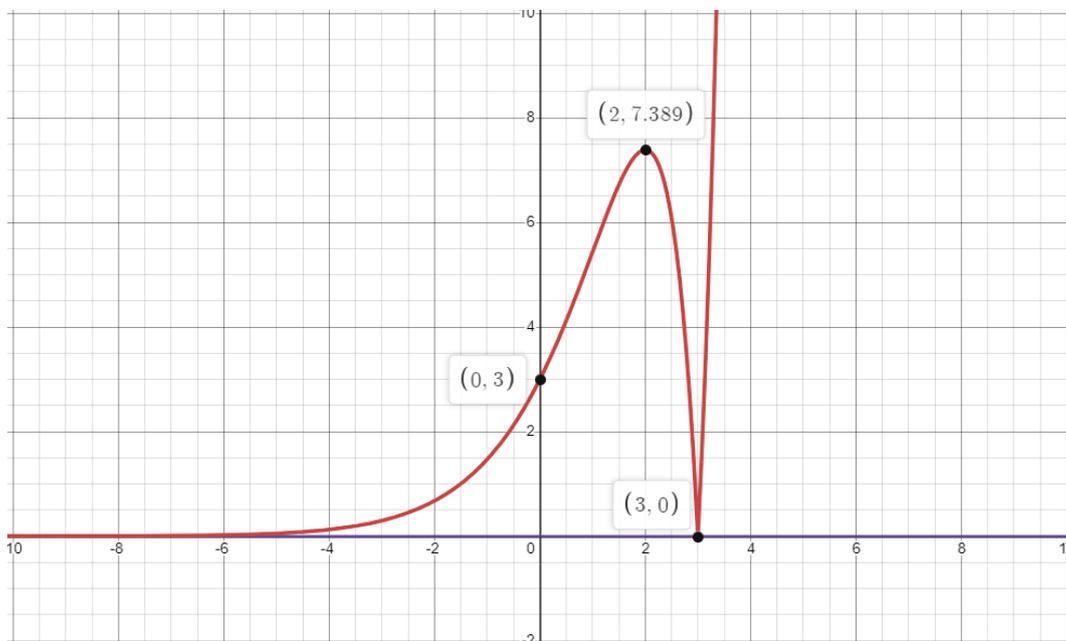


Figura 9 - Grafico di $y=|x-3| e^x$ - Desmos

Dominio: $\forall x \in \mathbb{R}$

Un'intersezione con l'asse x delle ascisse, ponendo $y = 0$ si ottiene:

$$|x - 3|e^x = 0 \quad \text{quindi} \quad \begin{cases} |x - 3| = 0 & x = 3 \\ e^x = 0 & x \in \emptyset \end{cases}$$

Un'intersezione con l'asse y delle ordinate, ponendo $x = 0$ si ottiene:

$$y = |0 - 3|e^0 = 3 \cdot 1 = 3$$

Per studiare i segni bisogna porre $f(x) > 0$ quindi $|x - 3|e^x > 0$ che, essendo un esponenziale moltiplicato per un modulo, è sempre maggiore di zero.

Esistendo per ogni numero razionale la funzione non può avere asintoti verticali; per trovare gli asintoti orizzontali bisogna calcolare il limite per $x \rightarrow \pm\infty$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} |x - 3|e^x = |+\infty - 3|e^{+\infty} = +\infty \cdot \infty = +\infty$$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} |x - 3|e^x = |-\infty - 3|e^{-\infty} = +\infty \cdot 0^+$$

Il limite per $x \rightarrow +\infty$ ha come risultato ∞ , quindi non è presente alcun asintoto orizzontale nel primo quadrante.

Il limite per $x \rightarrow +\infty$ è una forma indeterminata e per risolverla bisogna riscrivere il limite in modo da ottenere come risultato $\frac{0}{0}$ o $\frac{\infty}{\infty}$, e poter quindi applicare il teorema di De l'Hôpital.

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{|x-3|}{e^{-x}} = \frac{|-\infty-3|}{e^{+\infty}} = \frac{+\infty}{+\infty}$$

La derivata prima del numeratore $|x-3|$ è $\frac{x-3}{|x-3|}$

La derivata prima del denominatore e^{-x} è $-e^{-x}$

$$\lim_{x \rightarrow -\infty} \frac{\frac{x-3}{|x-3|}}{-e^{-x}} = \frac{-1}{-e^{+\infty}} = \frac{1}{+\infty} = 0^+$$

È presente un asintoto orizzontale di equazione $y = 0$, che esclude quindi la presenza di un asintoto obliquo per $x \rightarrow -\infty$, basterà quindi cercare l'asintoto obliquo per $x \rightarrow +\infty$

$$\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|x-3|e^x}{x} = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{|x-3|}{x} \cdot \lim_{x \rightarrow +\infty} e^x = \frac{1}{1} \cdot (+\infty) = +\infty$$

Il limite per $x \rightarrow +\infty$ ha come risultato $+\infty$, quindi non è presente alcun asintoto obliquo.

Per studiare i punti di massimo e minimo bisogna porre $f'(x) \geq 0$, la derivata prima equivale a:

$$f'(x) = \frac{d}{dx} [|x-3|] \cdot e^x + |x-3| \cdot \frac{d}{dx} [e^x]$$

$$f'(x) = \frac{x-3}{|x-3|} \cdot e^x + |x-3| \cdot e^x$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x-3}{|x-3|} + |x-3| \right)$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x-3 + |x-3|^2}{|x-3|} \right)$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x-3 + (x-3)^2}{|x-3|} \right)$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x-3 + (x^2 - 6x + 9)}{|x-3|} \right)$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x-3 + x^2 - 6x + 9}{|x-3|} \right)$$

$$f'(x) = e^x \left(\frac{x^2 - 5x + 6}{|x-3|} \right)$$

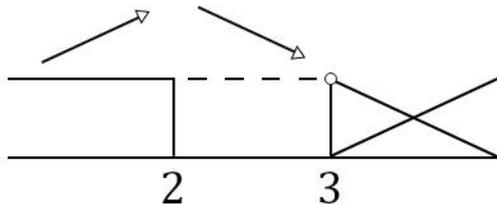
$$f'(x) = \frac{(x^2 - 5x + 6)e^x}{|x-3|}$$

Divido nei casi possibili:

$$\frac{(x^2 - 5x + 6)e^x}{x-3} \geq 0 \begin{cases} x^2 - 5x + 6 \geq 0 \\ e^x \geq 0 \\ \text{Per } x-3 \geq 0 \end{cases} \begin{cases} x \leq 2 \cup x \geq 3 \\ \forall x \in \mathbb{R} \\ \text{Per } x \geq 3 \end{cases}$$

Si ottiene un minimo in $x = 3$, che sostituito nella funzione principale restituisce $y = |3-3|e^3 = 0$, $Min(3, 0)$

$$\frac{(x^2 - 5x + 6)e^x}{-x+3} \geq 0 \begin{cases} x^2 - 5x + 6 \geq 0 \\ e^x \geq 0 \\ \text{Per } -x+3 \geq 0 \end{cases} \begin{cases} x \leq 2 \cup x \geq 3 \\ \forall x \in \mathbb{R} \\ \text{Per } x \leq 3 \end{cases}$$



Si ottiene un massimo in $x = 2$, che, sostituito nella funzione principale restituisce $y = |2-3|e^2 \approx 7.389$, $Max(2, 7.389)$

Per studiare i punti di flesso bisogna porre $f''(x) \geq 0$, la derivata seconda è:

$$\frac{\frac{d}{dx}[(x^2 - 5x + 6)e^x] \cdot |x - 3| - (x^2 - 5x + 6)e^x \cdot \frac{d}{dx}[|x - 3|]}{|x - 3|^2}$$

$$\frac{\left(\frac{d}{dx}[x^2 - 5x + 6] \cdot e^x + (x^2 - 5x + 6) \cdot \frac{d}{dx}[e^x]\right) \cdot |x - 3| - (x^2 - 5x + 6)e^x \cdot \frac{x - 3}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$\frac{\left(\frac{d}{dx}[x^2 - 5x + 6] \cdot e^x + (x^2 - 5x + 6) \cdot e^x\right) \cdot |x - 3| - (x^2 - 5x + 6)e^x \cdot \frac{x - 3}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$\frac{((2x - 5)e^x + (x^2 - 5x + 6)e^x) \cdot |x - 3| - \frac{(x - 3)(x^2 - 5x + 6)e^x}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$\frac{\frac{((2x - 5)e^x + (x^2 - 5x + 6)e^x) \cdot (x - 3)^2 - (x - 3)(x^2 - 5x + 6)e^x}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$\frac{\frac{((2x - 5)e^x + (x^2 - 5x + 6)e^x) \cdot (x - 3)^2 - (x - 3)(x^2 - 5x + 6)e^x}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$(x - 3)^2 \frac{\frac{((2x - 5)e^x + (x^2 - 5x + 6)e^x) - \frac{(x - 3)(x^2 - 5x + 6)e^x}{(x - 3)^2}}{|x - 3|}}{(x - 3)^2}$$

$$\frac{(2x - 5)e^x + (x^2 - 5x + 6)e^x - \frac{(x^2 - 5x + 6)e^x}{(x - 3)}}{|x - 3|}$$

$$\frac{e^x \frac{(2x - 5)(x - 3) + (x^2 - 5x + 6)(x - 3) - (x^2 - 5x + 6)}{(x - 3)}}{|x - 3|}$$

$$\frac{e^x \frac{(2x - 5)(x - 3) + (x^2 - 5x + 6)(x - 3) - (x^2 - 5x + 6)}{(x - 3)}}{|x - 3|}$$

$$\frac{e^x \frac{(2x-5)(x-3) + (x^2-5x+6)(x-3) - (x^2-5x+6)}{(x-3)}}{|x-3|}$$

$$\frac{e^x \frac{2x^2 - 6x - 5x + 15 + x^3 - 3x^2 - 5x^2 + 15x + 6x - 18 - x^2 + 5x - 6}{(x-3)}}{|x-3|}$$

$$\frac{e^x \frac{x^3 - 7x^2 + 15x - 9}{(x-3)}}{|x-3|}$$

Scompongo $x^3 - 7x^2 + 15x - 9$ usando la regola di Ruffini:

In questo caso il termine noto è -9 e il coefficiente del termine di grado massimo è 1 , dunque cerco i candidati al ruolo di radice del polinomio tra i divisori di $\frac{-9}{1}$

Divisori di $\frac{-9}{1}$, cioè $-9 = \{\pm 1, \pm 3, \pm 9\}$

Sostituisco i valori della lista dei possibili divisori al posto di x nella funzione, cercandone uno che la annulli:

$$P(-1) = (-1)^3 - 7(-1)^2 + 15(-1) - 9 = -1 - 7 - 15 - 9 \neq 0$$

$$P(1) = (1)^3 - 7(1)^2 + 15(1) - 9 = 1 - 7 + 15 - 9 = 0$$

	1	-7	+15	-9
1		1	-6	
	1	-6	9	0

Figura 10 – Regola di Ruffini per $x^3 - 7x^2 + 15x - 9$

Procedo applicando la regola di Ruffini usando come divisore 1 :

Il risultato della scomposizione è dunque $(x-1)(x^2-6x+9)$, che può essere ulteriormente semplificato con $(x-1)(x-3)^2$

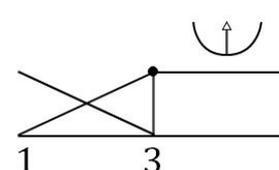
La derivata seconda diventa quindi:

$$\frac{e^x \frac{(x-1)(x-3)^2}{(x-3)}}{|x-3|}$$

$$\frac{e^x(x-1)(x-3)}{|x-3|}$$

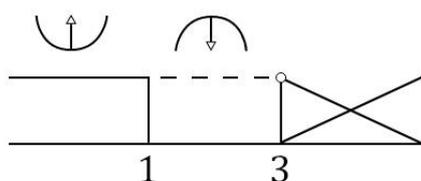
$$\frac{e^x(x^2 - 4x + 3)}{|x-3|}$$

Divido nei casi possibili:

$$\frac{e^x(x^2 - 4x + 3)}{x-3} \geq 0 \begin{cases} x^2 - 4x + 3 \geq 0 \\ e^x \geq 0 \\ \text{Per } x-3 \geq 0 \end{cases} \begin{cases} x \leq 1 \cup x \geq 3 \\ \forall x \in \mathbb{R} \\ \text{Per } x \geq 3 \end{cases}$$


In questo caso non otteniamo nessun punto di flesso

$$\frac{e^x(x^2 - 4x + 3)}{-x+3} \geq 0 \begin{cases} x^2 - 4x + 3 \geq 0 \\ e^x \geq 0 \\ \text{Per } -x+3 \geq 0 \end{cases} \begin{cases} x \leq 1 \cup x \geq 3 \\ \forall x \in \mathbb{R} \\ \text{Per } x \leq 3 \end{cases}$$



Si ottiene un flesso in $x = 1$, che sostituito nella funzione principale restituisce $y = -(1-3)e^1 = 2e \approx 5.437$, $F(1, 5.437)$

La funzione precedente è necessaria per studiare $|x - 3| = ke^{-x}$ in quanto quest'ultima non è altro che la stessa funzione ma scritta in modo differente, infatti:

$$|x - 3| = ke^{-x}$$

$$|x - 3| = \frac{k}{e^x}$$

$$|x - 3|e^x = k$$

$$k = |x - 3|e^x$$

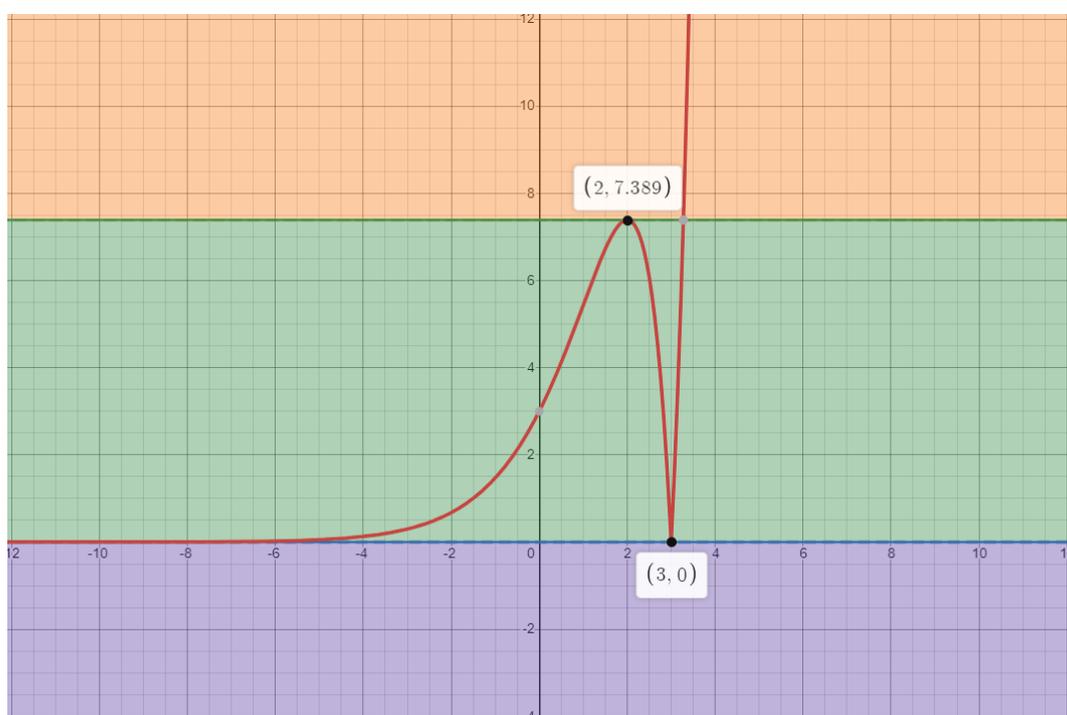


Figura 11 - Grafico di $|x-3|=ke^{(-x)}$ - Desmos

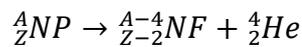
Sfruttando lo studio di funzione precedente possiamo giungere alle seguenti conclusioni, la funzione presenta:

- Nessuna soluzione per $k < 0$ (parte del grafico colorata in viola)
- Una soluzione per $k = 0$ (parte del grafico colorata in blu)
- Tre soluzioni per $0 < k \leq e^2$ (parte del grafico colorata in verde)
- Una soluzione per $k > e^2$ (parte del grafico colorata in arancione)

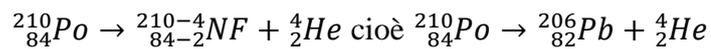
8 L'isotopo 210 del Polonio mediante un decadimento alfa si trasforma in un isotopo del piombo con tempo di dimezzamento di 138 giorni, scrivi la reazione di decadimento e calcola l'energia rilasciata

Il fenomeno del decadimento α consiste nell'emissione spontanea di una particella α ${}^4_2\text{He}$ da parte di un nucleo con un elevato numero di nucleoni ($A > 83$).

Il nucleo padre NP si trasforma in un nucleo figlio NF con due protoni e due neutroni in meno; la reazione che avviene è quindi la seguente:



che, nel caso proposto da questo quesito, diventa:



Essendo note le masse atomiche degli elementi che reagiscono, tramite l'equazione di Einstein $E = \Delta mc^2$ possiamo calcolare l'energia rilasciata durante la reazione

Nucleo	Massa in u	Massa in MeV/c^2
Polonio m_{Po}	209.9829	195599.07
Piombo m_{Pb}	205.9745	191865.25
Elio m_{He}	4.0026	3728.42

$$\begin{aligned} \Delta m &= m_{Po} - (m_{Pb} + m_{He}) = 209.9829u - (205.9745u + 4.0026u) \\ &= 0.0058u \end{aligned}$$

Sapendo che $1u = 931.5 \text{ MeV}/c^2$ allora $\Delta m = 0.0058 \cdot 931.5 = 5.4 \text{ MeV}/c^2$

L'energia rilasciata è $E = \Delta mc^2 = 5.4 \frac{\text{MeV}}{c^2} \cdot c^2 = 5.4 \text{ MeV}$

9 Spiega compiutamente il meccanismo della datazione dei reperti fossili tramite il radiocarbonio - 14 e utilizza tale metodo per rispondere al seguente quesito: da un campione di osso di mammut viene estratto 1g di carbonio la cui attività è il 21% di quella del reperto vivo, trova l'età del reperto

Il carbonio 14 è un isotopo radioattivo del carbonio avente 6 protoni e 8 neutroni, con tempo di dimezzamento (*o emivita*) di 5730 anni e presente sulla terra con un'abbondanza relativa di 1 atomo su 10^{12} (*mille miliardi*) atomi di ^{12}C .

Il metodo del radiocarbonio 14 è un metodo di datazione radiometrica limitato a circa 50.000 anni, in quanto dopo tale periodo la concentrazione dell'isotopo sarebbe troppo bassa per poter essere misurata con sufficiente accuratezza.

Il ^{14}C viene prodotto continuamente nell'alta atmosfera da reazioni nucleari tra l'azoto e le particelle provenienti dallo spazio (*raggi cosmici*); il radiocarbonio 14 così prodotto reagisce con l'ossigeno per dare anidride carbonica $^{14}\text{CO}_2$, che viene utilizzata dalle piante durante la fotosintesi, e così entra nel ciclo alimentare.

Ogni essere vivente attraverso il suo metabolismo mantiene nei suoi tessuti la stessa concentrazione di ^{14}C presente nell'atmosfera, questo equilibrio dinamico cessa quando l'organismo muore: cessando lo scambio di carbonio 14 con l'esterno la sua concentrazione inizierà a diminuire secondo la legge del decadimento radioattivo. Misurando la concentrazione di ^{14}C in un campione organico si può quindi risalire alla data del decesso.

Sapendo che l'attività è direttamente proporzionale al numero di nucleoni possiamo stabilire che un'attività del 21% equivale ad un rapporto tra nucleoni all'istante attuale e nucleoni all'istante iniziale di $\frac{N(t)}{N_0} = 0.21$

Sapendo che il tempo di dimezzamento del ^{14}C è di 5730 *anni* possiamo ricavare la costante di decadimento λ usando il tempo di dimezzamento $T_{\frac{1}{2}}$ al posto di t e la metà dei nucleoni di partenza $\frac{1}{2}N_0$ al posto di $N(t)$.

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{\frac{1}{2}}}$$

$$e^{\lambda T_{\frac{1}{2}}} = 2$$

$$\lambda T_{\frac{1}{2}} = \ln 2$$

$$\lambda = \frac{\ln 2}{T_{\frac{1}{2}}} = \frac{0.693}{5730} = 1.2 \cdot 10^{-4} \text{ anni}^{-1}$$

Per trovare l'età del campione scrivo la legge di decadimento come rapporto tra nucleoni all'istante attuale e nucleoni all'istante iniziale e sostituisco i dati noti:

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

$$0.21 = e^{-1.2 \cdot 10^{-4} t} \quad -1.2 \cdot 10^{-4} t = \ln 0.21 \quad t = -\frac{\ln 0.21}{1.2 \cdot 10^{-4}}$$

$$\approx 13005 \text{ anni}$$

10 Dopo aver definito il sistema di datazione assoluta e datazione relativa per lo studio della storia della Terra, approfondisci i concetti di: fossile guida, zona di acme e zona concomitante

La datazione assoluta o cronometrica è il processo di determinazione dell'età cronologica di un campione, che fornisce un'età o un intervallo di età numerico sulla base di proprietà fisiche o chimiche del materiale da datare.

I metodi di datazione assoluta sono principalmente tre:

- **Datazione radiometrica**

Ad oggi è il metodo di datazione più diffuso e più preciso.

Per tempi inferiori ai 50'000 anni si utilizza l'isotopo $^{14}_6C$, mentre per datare campioni più antichi si utilizza lo stesso processo ma con altri isotopi, in particolare si sfrutta la catena di decadimento che parte dall' $^{238}_{92}U$ e termina con il $^{206}_{82}Pb$ (*catena avente tempo di dimezzamento totale di circa 4.5 miliardi di anni*).

Il più antico campione datato con questa particolare catena di decadimento è un frammento di roccia metamorfica dall'età di circa 4.5 miliardi di anni, ovvero una roccia formatasi da una serie di trasformazioni mineralogiche e strutturali. Non è corretto affermare che l'età del pianeta Terra equivalga esattamente all'età di tale roccia in quanto, essendo il campione una roccia metamorfica, questa è il risultato del cambiamento di qualcosa già esistente, quindi si può solo dire che la Terra è più vecchia di 4.5 miliardi di anni.

- **Datazione a termoluminescenza**

Metodo che fornisce l'età dell'ultima volta in cui il campione è stato riscaldato, è raramente usato per via della sua insufficiente accuratezza (*circa il 15%*).

- **Dendrocronologia**

Metodo di datazione messo a punto dall'americano Andrew Douglass nel 1906 che si basa sul conteggio degli anelli di accrescimento annuale degli alberi, e perciò è molto limitato.

La datazione relativa è la disciplina che permette di determinare l'ordine relativo di svolgimento di alcuni eventi avvenuti nel passato, senza necessariamente determinare la loro età assoluta. Fondamentale è il principio di sovrapposizione degli strati, in base alla quale gli strati rocciosi più antichi si trovano a profondità maggiori di quelli più recenti.

L'unione di questi due metodi di datazione produce una ricostruzione più o meno precisa della storia della Terra, è qui che entrano in gioco i concetti di fossile guida, zona di acme e zona di concomitanza.

Un **fossile guida** è un resto di un organismo che: aveva un'ampia distribuzione geografica, è rinvenibile nelle rocce sedimentate nel periodo della sua esistenza ed ha vissuto in uno spazio temporale breve. Questi fossili sono prevalentemente marini in quanto sui fondali oceanici i resti organici sono meno esposti a fattori di degradazione e quindi hanno più possibilità di fossilizzarsi, come ad esempio le ammoniti.

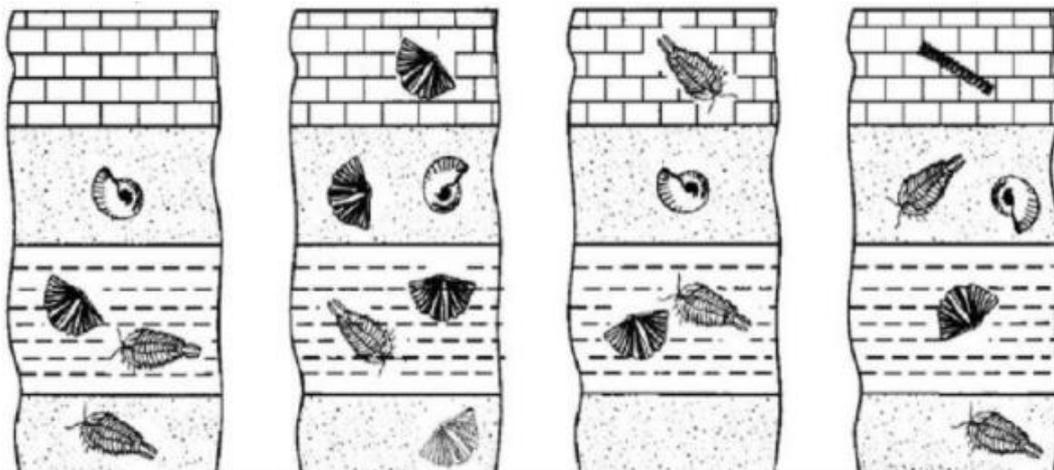


Figura 12 - Esempio di fossile guida

Un esempio di fossile guida può essere la conchiglia presente nel secondo strato, in quanto ha ampia distribuzione (*è presente in tutti i campioni*) e arco vitale breve (*in ogni campione appare in un solo strato*).

Una **zona di distribuzione concomitante** è una parte di successione rocciosa caratterizzata dalla presenza concomitante di due specie. Sapere che due esseri viventi hanno vissuto contemporaneamente nella stessa area geografica può essere molto utile ai fini della ricostruzione del clima, dell'ecosistema e degli equilibri

naturali presenti in una determinata area nel tempo di vita concomitante dei due fossili.

Una **zona di acme** è una parte di successione rocciosa caratterizzata dal variare della frequenza di presenza di un fossile. Ciò è impreciso dal punto di vista stratigrafico, ma il variare della quantità di un dato fossile ci può dare informazioni sulla vita dell'organismo e sul clima della determinata area geografica di vita del reperto, nel determinato tempo di vita del reperto. Nel caso di abbondanza di frequenza possiamo dedurre che nel tempo corrispondente alla stratificazione del dato strato roccioso si siano verificate condizioni favorevoli alla vita del fossile; viceversa se in un dato strato si verifica una diminuzione di frequenza, allora nel tempo corrispondente alla stratificazione del dato strato roccioso si saranno verificate condizioni ambientali sfavorevoli alla vita del fossile.

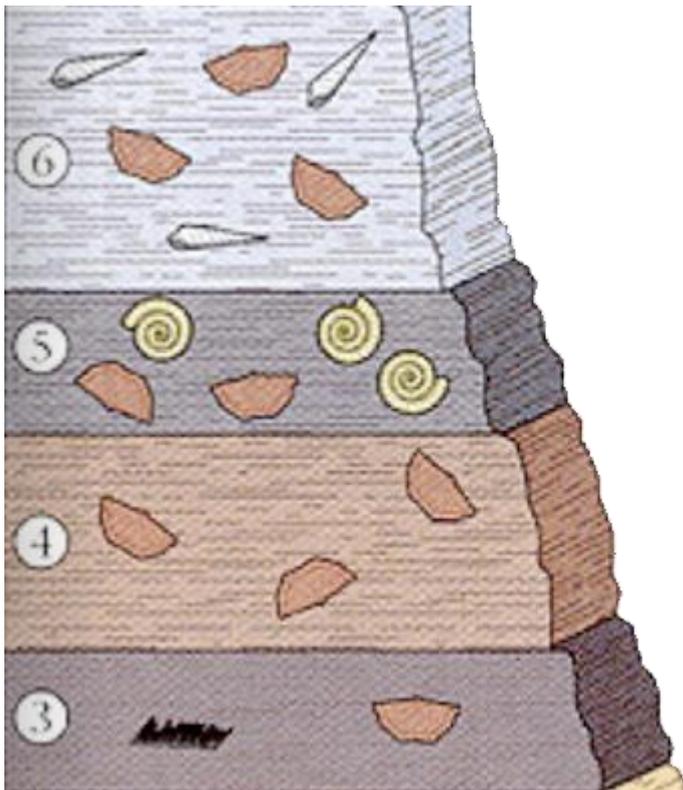


Figura 13 - Esempio di zona di concomitanza e di zona di acme

Un esempio di zona di acme può essere lo strato numero 4, dove si può notare un aumento della frequenza del fossile di colore marroncino rispetto agli strati adiacenti, mentre un esempio di zona di concomitanza può essere lo strato numero 5, dove sono presenti due specie di fossili in un solo strato roccioso.

11 PCTO: lezione del professore Franco Elter, Geologo presso l'università di Genova

Tramite lo studio dei fossili e la datazione di quest'ultimi tramite isotopi radioattivi è possibile ricostruire la storia della tettonica a placche, ovvero il modello di dinamica della Terra su cui concorda la maggior parte degli scienziati che si occupano di scienze della Terra, secondo cui la Terra è divisa in una ventina di placche principali.

Tra le prove della teoria della deriva dei continenti troviamo:

- Prove morfologiche, ovvero la corrispondenza di forme.
- Prove litologiche, ovvero la corrispondenza di rocce.
- Prove paleoclimatiche, come lo studio dei pollini.
- Prove paleontologiche, ossia la corrispondenza di fossili: resti integri o parziali di organismi un tempo viventi, in generale sono la prova di una qualsiasi testimonianza di vita

La teoria della deriva dei continenti è una teoria geologica formulata nel 1912 da Alfred Wegener secondo la quale i continenti migrano, spostandosi analogamente a zattere galleggianti sullo strato inferiore della crosta terrestre, come definito dal principio dell'isostasia.

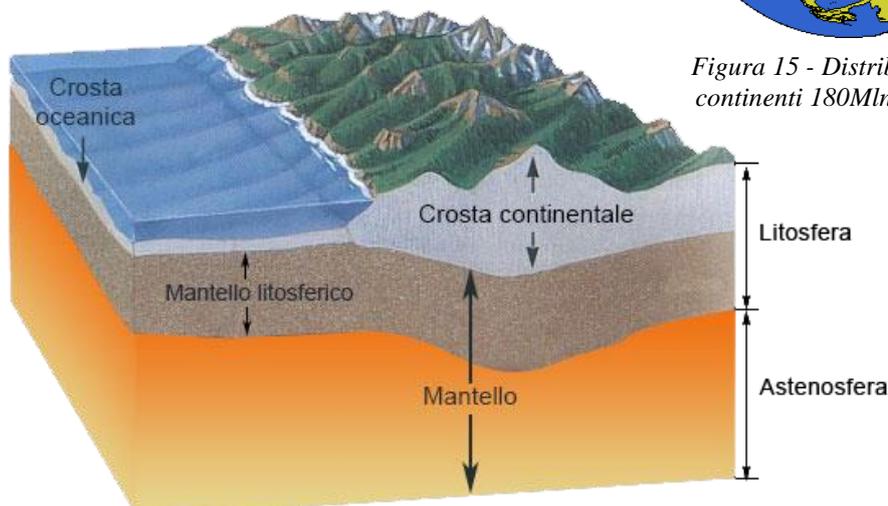


Figura 14 – Struttura della Terra (parte più esterna)

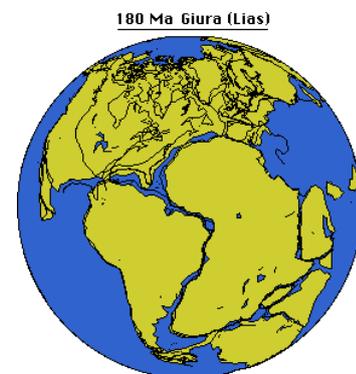


Figura 15 - Distribuzione dei continenti 180Mln di anni fa

Per capire la teoria della deriva dei continenti e di come hanno fatto gli studiosi a ricostruire l'esatta posizione di quest'ultimi nel corso del tempo è necessario comprendere cosa genera il movimento delle placche.

Il motore della tettonica a placche sono i flussi di calore che si generano nel substrato della crosta (*astenosfera*), che provocano la formazione di celle convettive all'interno del mantello; tuttavia a spostarsi non sono i continenti in sé, ma le placche su di cui essi poggiano (*litosfera*), che a loro volta galleggiano su di un fluido molto viscoso presente nel substrato della crosta, da cui per l'appunto provengono i flussi di calore o *heat flows*.

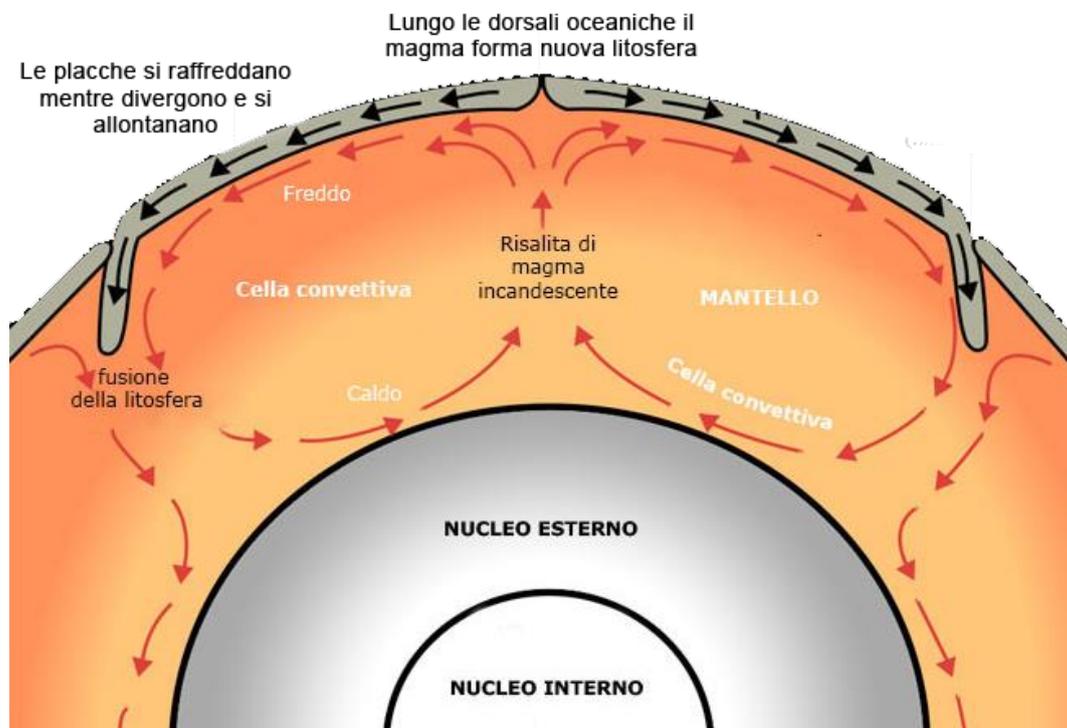


Figura 16 - Struttura interna della Terra

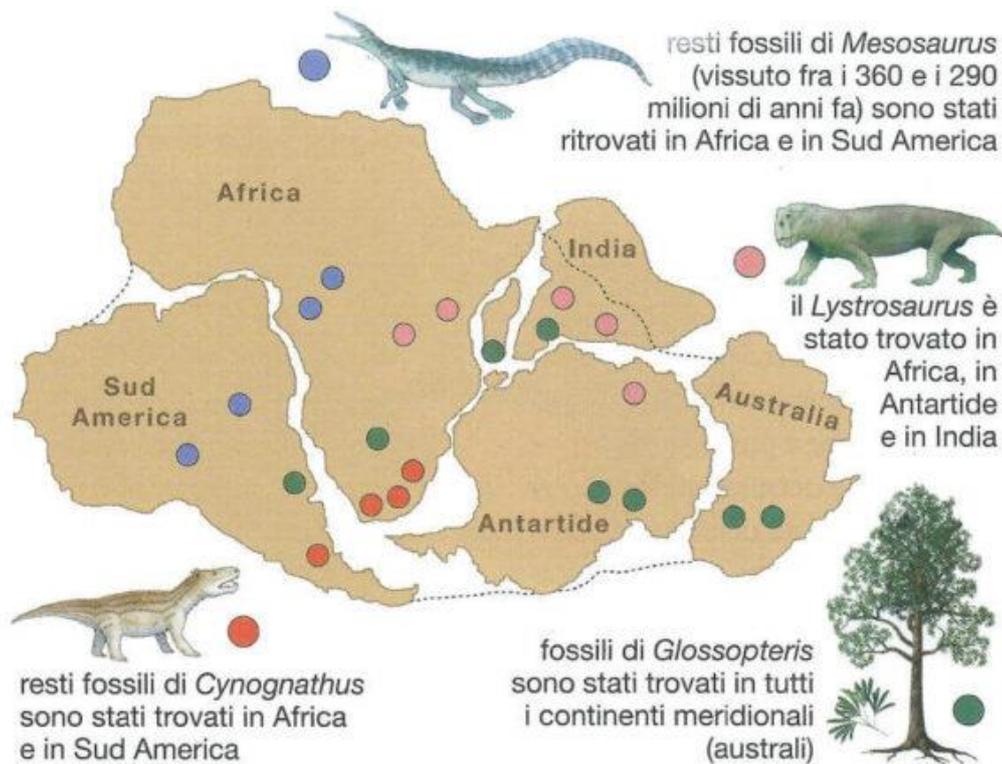


Figura 17 - Prove paleontologiche della deriva dei continenti

Prendendo come esempio il *Mesosaurus*, animale vissuto fra i 360 e i 290 milioni di anni fa, possiamo notare come resti di tale animale siano stati trovati in Africa e in Sud America. Se i continenti fossero sempre stati disposti come lo sono oggi, l'animale in questione sarebbe per esempio potuto vivere in Africa, ma per giustificare la presenza di suoi resti anche in Sud America il *Mesosaurus* avrebbe dovuto nuotare attraverso approssimativamente 8000 km di oceano, fatto alquanto improbabile. Molto più plausibile invece risultò fin da subito l'ipotesi avanzata da Wegener, ossia che l'animale abbia vissuto in una zona che un tempo era unita, e che al giorno d'oggi è separata, anche di migliaia di chilometri.

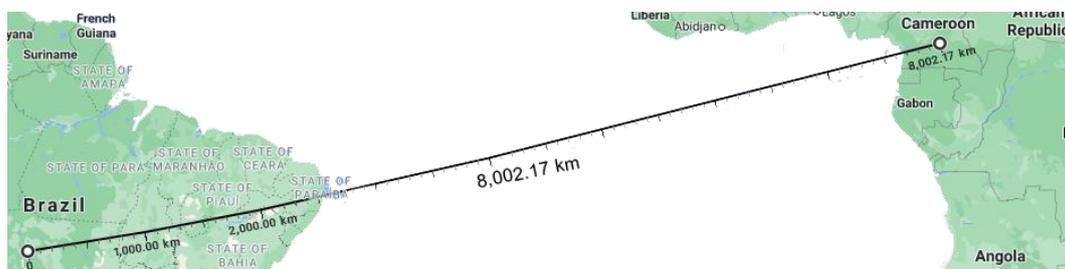


Figura 18 - Distanza tra i punti di ritrovamento dei fossili di *Mesosaurus* - Google Maps

Sentendo sempre parlare di fatti avvenuti milioni di anni fa possiamo immaginare che i continenti si siano spostati solamente nell'antichità e che al giorno d'oggi siano in uno stato di quiete o di equilibrio, ma non è così.

La NASA da decenni raccoglie dati sullo spostamento delle placche tramite tecnologia GPS, nell'immagine sottostante viene preso come esempio lo spostamento che il Giappone ha registrato tra il 1999 e il 2000; circa 5 cm in un anno possono sembrare pochi, quasi insignificanti, ma è quel poco che basta per cambiare completamente la disposizione dei continenti nel giro di pochi milioni di anni.

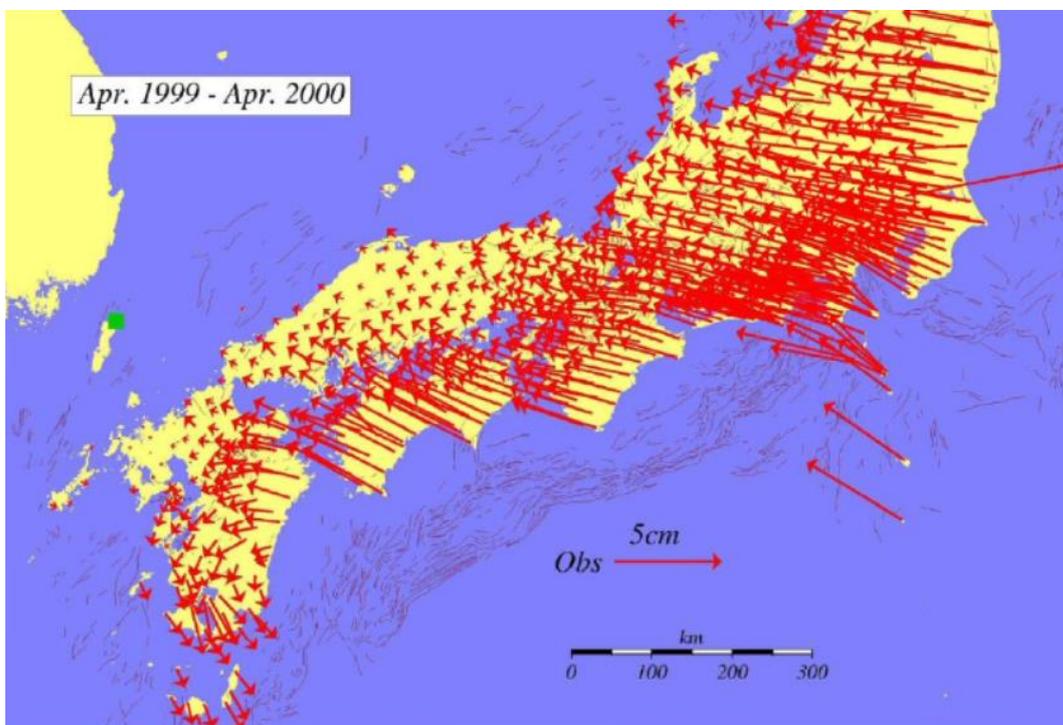


Figura 19 - Spostamento del Giappone registrato dalla NASA tramite GPS tra il 1999 e il 2000



Figura 20 - Placche esercitanti pressione sul Giappone

Prendendo sempre come esempio il Giappone, luogo notoriamente sismico, possiamo notare come quest'ultimo sia collocato lungo il confine di tre placche: Pacifica, Asiatica e Filippina. Questa particolare collocazione rende il Giappone l'isola più sismica al mondo, con una media di tre eventi sismici giornalieri, causati dai processi di subduzione delle placche su di cui esso poggia.

Conoscendo la velocità di movimento del Giappone, presupponendo che questa sia rimasta costante e conoscendo la larghezza del Mar Del Giappone (*situato a nord dell'Isola, tra Corea e Cina*), ovvero circa 1000 km; applicando la legge del primo principio della dinamica è possibile calcolare quanti anni hanno impiegato i movimenti di estensione della placca asiatica a formarlo.

$$t = \frac{s}{v} = \frac{1000 \text{ km}}{5 \cdot 10^{-5} \text{ km/anno}} \approx 2 \cdot 10^7 \text{ anni} = 20 \text{ milioni di anni}$$

12 Educazione civica: problematiche ambientali dei decadimenti radioattivi

Un incidente nucleare o incidente radiologico è un evento in cui si produce un'emissione di materiale radioattivo sufficiente da pregiudicare la salute pubblica.

Allo scopo di valutare tempestivamente la gravità di un incidente nucleare viene usato un modello internazionale, la scala INES, che classifica gli eventi nucleari che coinvolgono ambiti civili (*quindi esclude ambiti militari o incidenti secretati*).

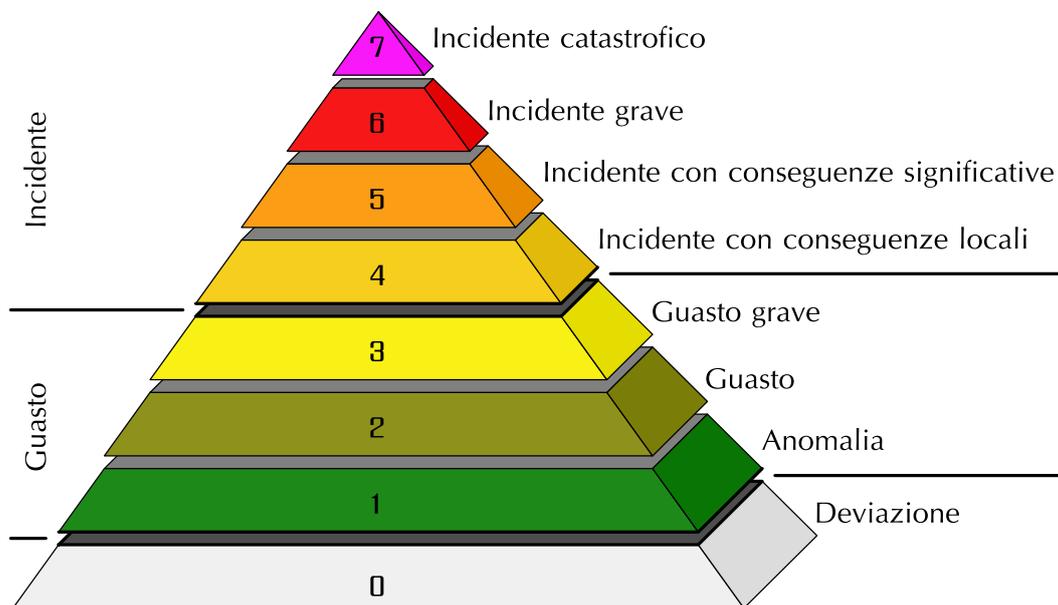


Figura 21 - Scala INES - Wikipedia

Per valutare la pericolosità dei decadimenti radioattivi e l'impatto ambientale che essi comportano è necessario analizzare alcuni degli incidenti nucleari avvenuti nel corso della storia; tra i più conosciuti e significativi troviamo:

- Disastro nucleare di Fukushima Dai-ichi, livello 7, Giappone, 2011.
- Disastro di Chernobyl, livello 7, Unione Sovietica, 1986.



Figura 22 - Centrali nucleari in Giappone (in rosso quelle attive), aggiornato a febbraio 2020

Nonostante la sua particolare posizione geografica e nonostante abbia sperimentato sulla propria pelle i devastanti danni causati dal nucleare nella seconda guerra mondiale, in Giappone fin dagli anni sessanta si è deciso di colmare la carenza di risorse naturali proprio con la produzione di energia nucleare.

Ma in seguito all'incidente di Fukushima Dai-ichi, nel maggio 2012 anche l'ultimo reattore venne spento, lasciando il Giappone privo di energia nucleare, e di conseguenza le importazioni di combustibili fossili dal Medio Oriente iniziarono ad aumentare enormemente, portando all'aumento dei prezzi dell'energia e delle emissioni di CO₂.

La carenza di risorse naturali nell'isola, lo sviluppo ancora acerbo di fonti di energia rinnovabile e le pressioni riguardanti le emissioni esercitate dal protocollo di Kyoto indussero il governo giapponese a ricorrere nuovamente all'uso di energia nucleare, nonostante il forte dissenso espresso dalla popolazione.

Approfondimento: Il disastro nucleare di Fukushima Dai-ichi

Il disastro di Fukushima Dai-ichi è un incidente nucleare avvenuto in Giappone nel marzo del 2011 in conseguenza del terremoto del Tōhoku di magnitudo 9.0, il quarto più potente mai misurato a livello mondiale, che generò onde anomale alte fino a 40.5 metri.

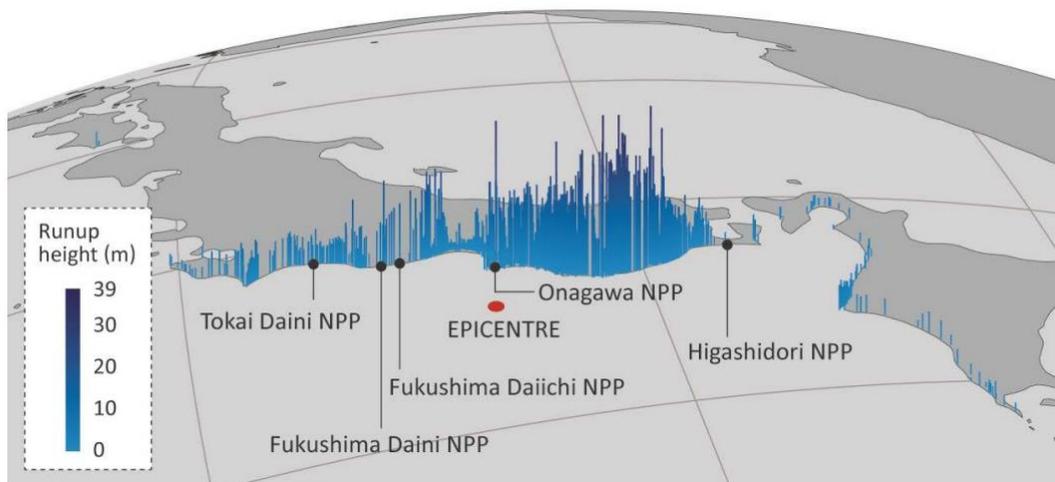


Figura 23 – Luogo d’impatto e altezza onde generate dal maremoto del Tōhoku

I reattori della centrale di Fukushima Dai-ichi si spensero automaticamente, come da protocollo per eventi sismici, ma lo tsunami che si abbatté sulla centrale alcune decine di minuti dopo superò le barriere esistenti di soli 5 metri e distrusse i generatori di emergenza a diesel, che alimentavano i sistemi di raffreddamento dei noccioli. Questi, privi di ogni fonte di raffreddamento, subirono il meltdown (*fusione per surriscaldamento*) completo, che provocò l’aumento della pressione e di conseguenza un’esplosione, che contribuì al rilascio di elementi radioattivi.

Per raffreddare le barre di combustibile nucleare subito dopo l’incidente e mantenerle alla giusta temperatura, in dieci anni sono stati usati circa 1.25 milioni di tonnellate d’acqua (*equivalente di cinquecento piscine olimpioniche*), filtrata in modo da rimuovere la maggior parte delle scorie radioattive e conservata in appositi serbatoi adiacenti all’impianto.

Recentemente il governo giapponese ha annunciato che la migliore soluzione possibile per lo smaltimento delle scorie radioattive è quella di versare circa 1.25 milioni di tonnellate d'acqua radioattiva nell'oceano; detta così la notizia sembra una follia, ma la verità è tutt'altra: i giornali spesso ne approfittano per fare visualizzazioni, a discapito dei dati scientifici, che difficilmente fanno notizia.

Il problema deriva dal fatto che non essendoci più spazio per installare nuovi serbatoi all'esterno della centrale, ed essendo che i serbatoi attuali sono quasi al massimo della capacità (*si stima che verranno saturati nel 2022*), il governo giapponese ha dovuto necessariamente trovare una soluzione.



Figura 24 – Serbatoi contenenti acqua trattata costruiti intorno alla centrale di Fukushima

Innanzitutto come detto prima si tratta di acqua filtrata di tutti gli isotopi radioattivi tranne che il trizio che, essendo chimicamente uguale all'idrogeno, è impossibile da separare; o meglio, l'acqua triziata ha un punto di ebollizione diverso dall'acqua normale quindi teoricamente sarebbe possibile separare i due composti, ma la produzione dell'energia necessaria per portare a ebollizione 1.25 milioni di tonnellate d'acqua comporterebbe un impatto ambientale notevolmente maggiore rispetto a versare direttamente l'acqua trattata in mare.

Il trizio ha tempo di dimezzamento relativamente breve, di circa 12.3 anni (*essendo passati dieci anni dall'incidente il trizio ha già quasi raggiunto metà dell'attività*), mentre se immesso all'interno del corpo umano tramite acqua radioattiva la sua emivita biologica, ovvero il tempo in cui il corpo ne espelle la metà è molto più breve, compresa tra i 7 e i 10 giorni; inoltre il trizio è considerato poco pericoloso per la salute umana anche perché non può penetrare attraverso la pelle.

Secondo l'OMS la quantità massima di trizio consentita è di 10'000 becquerel (*unità di misura della radioattività, indica i decadimenti al secondo*) per litro d'acqua, il piano del governo giapponese è quello di diluire l'acqua trattata fino ad arrivare a una quantità di trizio inferiore ai 1.500 becquerel per litro, prima di riversarla gradualmente nell'arco di decenni nell'oceano, dove sarà ulteriormente diluita tanto da non influire in modo apprezzabile sulla naturale concentrazione di trizio nell'oceano pacifico (*la massa che avrebbe l'acqua radioattiva se non fosse diluita sarebbe di appena 20 grammi*).

Gli stati adiacenti al Giappone come Cina e Corea, e gli stessi pescatori giapponesi stanno contestando questa scelta non per il pericolo ambientale, che abbiamo visto essere notevolmente ridotto, ma per paura che la gente, sentendo di questa notizia, diffidi dal comprare prodotti provenienti dalle acque giapponesi e adiacenti, creando un notevole danno economico.



Figura 25 - Manifestanti giapponesi contro la scelta di rovesciare l'acqua trattata in mare

Approfondimento: Il disastro di Chernobyl, livello 7, Unione Sovietica, 1986.

Innanzitutto possiamo dire che il disastro nucleare di Chernobyl venne causato da una serie di errori umani, molto diverso dal disastro di Fukushima Dai-ichi che, sebbene appartenga allo stesso livello della scala INES (7, il massimo), fu circa 10 volte meno dannoso, e, come visto nelle pagine precedenti, venne causato da un terremoto e non da un errore umano.

Il disastro di Chernobyl è un incidente nucleare avvenuto la notte del 26 aprile 1986 presso la centrale a fissione termonucleare “Vladimir Ilyich Lenin” a Prypjat, località vicina al confine con la Bielorussia costruita ad hoc per ospitare i lavoratori della centrale, nell’allora Repubblica Socialista Sovietica Ucraina.

L’incidente avvenne in piena guerra fredda (1947-1991), periodo di contrasti tra le due superpotenze mondiali: Unione Sovietica e Stati Uniti. In quegli anni il programma nucleare sovietico era stato fortemente accelerato dal desiderio di dimostrare al mondo e soprattutto agli stati uniti la potenza del comunismo; questo portò alla prematura apertura del quarto reattore della centrale, che non aveva ancora ultimato tutti i test di sicurezza.



Figura 26 - Schema reattori della centrale di Chernobyl

L'ultimo test di sicurezza consisteva nel simulare un blackout impostando la potenza a soli 700 MW (*di norma erano 3200 MW*), in modo da vedere se il moto per inerzia delle turbine spente riuscisse a generare l'energia necessaria ai sistemi di raffreddamento per continuare a funzionare prima che si accendessero i generatori di emergenza, che richiedevano quasi un minuto per entrare in funzione. Il test era fallito più volte in passato e l'attuale direttore della centrale era determinato ad ultimarlo ad ogni costo, in modo da ricevere una promozione; la potenza del reattore venne quindi abbassata a 1600 MW, per essere ridotta ulteriormente nel pomeriggio, in modo da ultimare il test, ma i tecnici vennero interrotti all'ultimo dalle lamentele dei direttori delle fabbriche, che volevano ultimare i processi produttivi di fine mese, e di conseguenza l'energia non poteva essere ulteriormente abbassata ai 700 MW richiesti dal test.

Questa fu la prima di una serie di decisioni catastrofiche, per due motivi: prima di tutto a mezzanotte avveniva il cambio turno e i tecnici in arrivo non erano stati avvisati del test, né sapevano portarlo a termine, il secondo motivo è che quando l'uranio (*combustibile nucleare*) scinde produce xenon 135, una sorta di veleno per il reattore poiché diminuisce la reattività; in condizioni di potenza normali viene bruciato immediatamente dal reattore, ma in condizioni di bassa potenza, come quelle richieste dal test, lo xenon si accumula e avvelena il reattore.

Passate le 10 ore, gli operatori inesperti¹ del turno di notte iniziarono a ridurre la potenza gradualmente fino ad ottenere i desiderati 700 MW per compiere il test, ma, data l'alta concentrazione di xenon, il reattore era instabile, e andò in stallo a soli 30 MW; per fretta di iniziare il test gli operatori provarono ad estrarre quasi tutte² le barre di controllo del nocciolo in modo da rialzare velocemente la potenza, questa fu la seconda scelta critica che portò al disastro.

¹ Il capo ingegnere anziano Leonid Toptunov aveva appena 24 anni, questo dimostra l'impreparazione sovietica al nucleare sia a livello degli impianti sia a livello di preparazione del personale.

² Disattivando qualsiasi tipo di controllo automatico gli operatori estrassero 205 barre di controllo su 211, ignorando il minimo di 30 barre di controllo da tenere sempre inserite, togliendo di fatto il freno più importante del reattore.

Il nocciolo o core è il cuore di un reattore nucleare; per moderare le reazioni di fissione che avvengono al suo interno sono necessarie delle barre di controllo, in particolare quelle usate in un reattore di tipo RBMK sovietico sono rivestite in zirconio, con punta in grafite (*materiali con punto di fusione molto alto*) e con all'interno boro (*rallenta le reazioni di fissione*).

Rimuovendo le barre di controllo rimanevano solo l'acqua di raffreddamento e lo xenon a regolare il nocciolo: la potenza aumentò lievemente fino a 200MW e gli operatori decisero di iniziare ugualmente il test, spegnendo le pompe che immettevano acqua nel nocciolo. Il reattore così completamente privo di freni vaporizzò l'acqua restante nel nocciolo e la reattività aumentò improvvisamente, bruciando anche lo xenon accumulato.



Figura 27 - Sala di controllo del reattore 4 di Chernobyl

In ogni sala controllo di ogni reattore nucleare c'è un pulsante che ha un solo ed unico scopo: bloccare all'istante la reazione immettendo tutte le barre di controllo, nei reattori sovietici questo pulsante si chiama AZ-5. Questo sistema di arresto però aveva un difetto fatale: le barre di controllo avevano punta in grafite, che accelera la reazione di fissione, una volta premuto il pulsante la prima parte delle barre che entrò in contatto con l'uranio non fu il boro, ma la punta in grafite; questa provocò un aumento esponenziale della reattività e di conseguenza della temperatura, che deformò le barre bloccandone la punta, rendendo impossibile il contatto tra l'uranio e il boro; la pressione data dall'acqua vaporizzata divenne insostenibile e così il reattore esplose.

Gli operatori premetterono il pulsante AZ-5 perché semplicemente non erano a conoscenza di questo difetto, che era invece ben noto al governo sovietico: nel 1975 a Leningrado sempre in un reattore RBMK si verificò un aumento di potenza in seguito alla pressione del pulsante per lo spegnimento immediato del reattore; questo incidente fu però oscurato dal governo perché non potevano esserci dubbi sulla supremazia dell'industria nucleare sovietica.

Il quarto reattore di Chernobyl, come tutti i reattori sovietici, aveva un altro grande difetto: il tetto era poco resistente perché era stato progettato in modo che una gru potesse occasionalmente prelevare plutonio 239, un prodotto di fissione usato per la costruzione di bombe atomiche; il tetto crollò immediatamente e fu l'apertura principale da cui fuoriuscì la nube radioattiva che si espanse in tutto il continente.

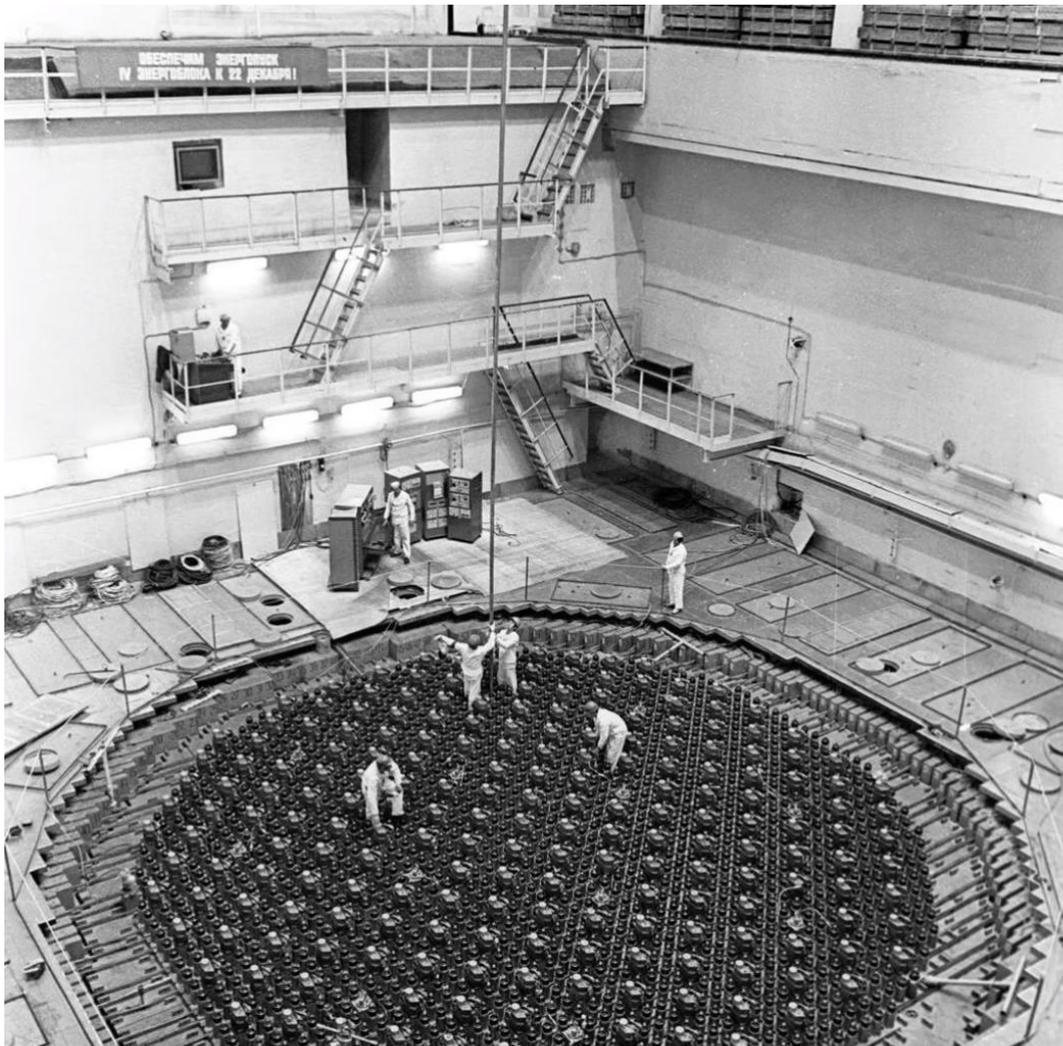


Figura 28 - Gru in azione per prelevare il plutonio necessario alla costruzione di armi nucleari

Il pericolo principale non erano le radiazioni emesse dall'uranio, una particella molto pesante usata come combustibile, ma era la nube radioattiva che trasportava i prodotti di fissione più leggeri (*anch'essi radioattivi*) come iodio 131 e cesio 137 per migliaia di chilometri, entrando nel ciclo alimentare e contaminando la natura.

L'isotopo radioattivo dello ^{131}I è particolarmente pericoloso perché, essendo chimicamente uguale all'iodio stabile, può essere assorbito dalla tiroide, ghiandola dove viene conservato a lungo; lo iodio emette quindi radiazioni dall'interno del corpo che, non essendo schermate da niente, colpiscono direttamente la ghiandola, provocando mutazioni cellulari che possono evolvere in cancro.



Figura 29 - Espansione della nube radioattiva dopo 36h - Edizione del TG1 del 27 aprile 1986

La radiazione emessa da questa nube radioattiva era di circa 15000 *röntgen/ora*, l'equivalente di due volte la bomba di Hiroshima ogni singola ora che passava; una quantità tale di radiazioni fu disastrosa per i primi soccorritori e per gli operai della centrale, che contrassero la sindrome da radiazione acuta, una condizione che provoca la distruzione della struttura cellulare con successiva morte del midollo osseo, decomposizione degli organi interni e crollo del sistema immunitario, con conseguente morte nel giro di pochi giorni o settimane.

Dopo il raffreddamento del nocciolo, durato circa quattro mesi, la priorità era dunque limitare il più possibile la fuoriuscita della nube radioattiva costruendo un sarcofago intorno al reattore, ma per fare questo era prima necessario liberare il tetto adiacente al reattore dai detriti radioattivi.

Il tetto adiacente era composto da tre livelli, i primi due vennero puliti tramite l'uso di Rover lunari schermati in piombo; l'uso di robot per la sicurezza è stato argomento dell'esperienza di PCTO del CMRE, dove robot di dimensioni analoghe si sfidarono in una competizione in cui l'obiettivo era compiere vari passaggi (come la rotazione di manopole o il recupero di oggetti) all'interno di un perimetro prestabilito. Il terzo livello del tetto, il più vicino al nocciolo scoperto del reattore, venne considerato per mesi il posto più pericoloso della terra e venne ripulito da esseri umani (passati alla storia con il nome di liquidatori), in quanto una quantità così elevata di radiazioni distrugge tutto ciò che incontra, compreso qualsiasi apparecchio elettronico.



Figura 30 - Robot "Joker", prestato dalla polizia tedesca (ricostruzione)



Figura 31 - Rover lunare sovietico rivestito in piombo (ricostruzione)



Figura 32 - Tetto del quarto reattore dopo l'esplosione (ricostruzione)

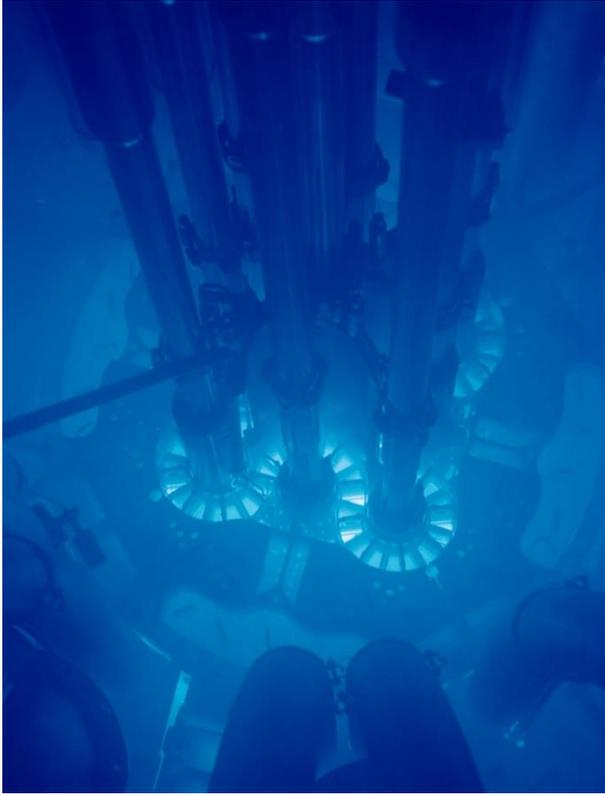


Figura 34 - Effetto Cherenkov¹ dato dall'Advanced Test Reactor core, Idaho National Laboratory



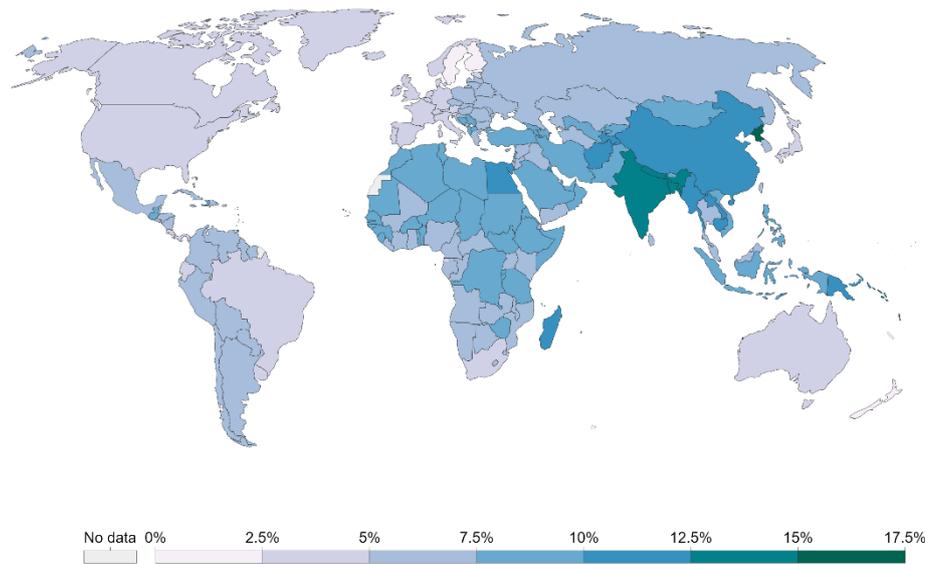
Figura 33 - Effetto Cherenkov¹ dato dall'esplosione del reattore, visto dal ponte della città di Prypjat (ricostruzione)

¹ L'effetto Cherenkov consiste nell'emissione di una radiazione luminosa di un caratteristico colore azzurro da particelle che viaggiano in un dato mezzo più velocemente della velocità di fase della luce nello stesso mezzo (senza però superare mai la velocità della luce nel vuoto).

“Il nucleare spaventa molto perché anche se la probabilità di incidente è molto bassa, il danno è potenzialmente molto grande; la probabilità di fare un incidente in macchina è molto alta, ma dato che il possibile danno è relativamente basso, questo è un rischio che le persone sono disposte a correre.”

Prof. Campi, docente di fisica nucleare al politecnico di Milano.

L'energia nucleare pur essendo di gran lunga la migliore e la più sicura fonte di energia a nostra disposizione, è vista in modo scettico dalle persone, in quanto si tratta di una tecnologia relativamente nuova, potenzialmente distruttiva e in quanto è stata usata come minaccia e come arma; è pertanto vittima del cosiddetto paradosso dell'eccellenza: *“Quando le performance sono di qualità, anche crescente, queste, se non adeguatamente evidenziate, vengono date per scontate, mentre l'errore occasionale è giudicato senza attenuanti”*¹.



Source: IHME, Global Burden of Disease

OurWorldInData.org/air-pollution • CC BY

Figura 35- Percentuali di morti date dall'inquinamento dell'aria causato dai combustibili fossili sulle morti totali, per paese, nel 2017

¹ *“Far percepire la qualità”, Antonio Caneva, 4 gennaio 2008, tratto da: “Il paradosso dell'eccellenza”, David Mosby – Michael Weissman, 2007.*

Sebbene l'incidente di Chernobyl fu una vera e propria catastrofe con morti accertate tra 4 e 100 mila, l'inquinamento prodotto dai combustibili fossili uccide circa 5 milioni di persone all'anno (*dato del 2017*), inoltre, come visto prima, quello di Chernobyl fu un incidente causato da errori umani e di progettazione, rischio che al giorno d'oggi è notevolmente ridotto in quanto la tecnologia ha fatto passi da gigante: ogni centrale nucleare è oggi dotata di sistemi di controllo automatici impossibili da disattivare, inoltre ci sono varie organizzazioni internazionali (*come la IAEA: International Atomic Energy Agency*) che vigilano costantemente sulla manutenzione degli impianti e perfino sul personale tecnico.

“Immaginate di avere una macchinetta dove metti un euro ed esce un panino e una macchinetta identica dove metti sempre un euro ed escono un milione di panini. Voi che scegliereste? Un milione, è chiaro. Ecco questo è il vantaggio dell'energia nucleare per il genere umano.”

Antonio Zichichi, fisico nucleare.

FONTI

Claudio Romeni – “Fisica e realtà.blu”, seconda edizione, 2017

Craig Mazin – “Chernobyl”, documentario per HBO e Sky Atlantic, 2019

[Desmos | Elaboratore grafico](#)

[The Fukushima Daiichi Accident - Technical Volume - IAEA](#)

[Disastro di Chernobyl TG1 del 1986 - YouTube](#)

[La questione dell'acqua di Fukushima, spiegata - Il Post](#)

[La radioattività: Il nucleo e le particelle elementari | Sapere.it](#)

[Chernobyl aprirà la sala di controllo del reattore ai turisti - Wired](#)

[Alfonso Bosellini - Le scienze della Terra - I materiali della Terra](#)

[Biozona - Wikipedia](#)

[Effetto Čerenkov - Wikipedia](#)

[Deriva dei continenti - Wikipedia](#)

[Disastro di Černobyl' - Wikipedia](#)

[Radioattività - LNGS \(inf.n.it\)](#)

[Dendrocronologia - Wikipedia](#)

[Incidente nucleare - Wikipedia](#)

[Datazione radiometrica - Wikipedia](#)

[Metodo del carbonio-14 - Wikipedia](#)

[Air Pollution - Our World in Data](#)

[Centrali nucleari in Giappone: storia recente e prospettive](#)

[Più veloci della luce: L'effetto Cherenkov - Scientificast](#)

[I composti del nucleo atomico: Il nucleo e le particelle elementari](#)