



LA RADIOATTIVITÀ CHE CI CIRCONDA

DALLA SCOPERTA ALLE MISURE PIÙ RECENTI

Vera Montalbano

Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell' Ambiente, Università di Siena

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, sezione di Pisa

Associazione per l'Insegnamento della Fisica, sezione di Siena



PIANO NAZIONALE
LAUREE SCIENTIFICHE



SOMMARIO

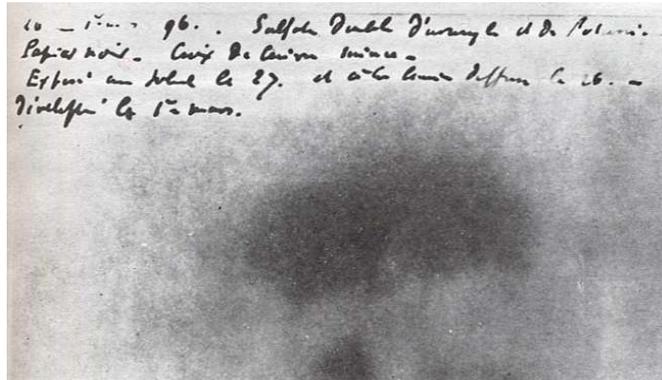
- La scoperta della radioattività naturale
- Cos'è, come si riconosce, perché è così rilevante
- La radioattività sulla Terra
- La radioattività nello spazio
- Radiodatazione: dalla Terra all'età dell'Universo

LA SCOPERTA DELLA RADIOATTIVITÀ NATURALE

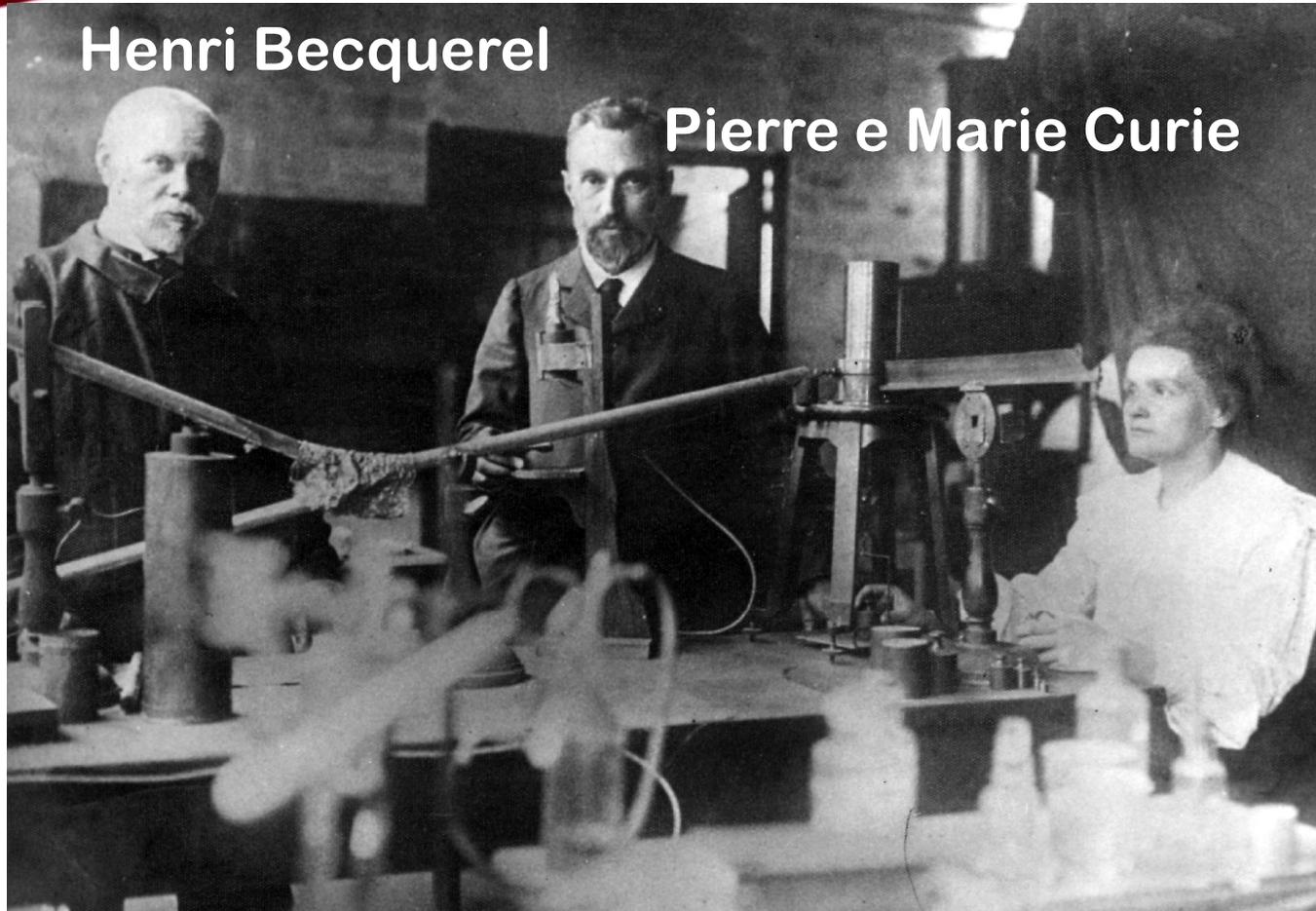


Il fisico francese Becquerel (1852-1908) osservò che un minerale contenente uranio, messo al di sopra di una lastra fotografica avvolta in carta nera, emetteva una radiazione spontanea capace di penetrare attraverso la carta e di impressionare la lastra fotografica che risultava annerita

La scoperta fu pubblicata nei "Comptes Rendus" dell'Accademia delle Scienze di Parigi nel 1896.



Premio Nobel 1903 per la fisica



RADIOATTIVITÀ COS'È E COME SI RICONOSCE

Alcuni elementi pesanti [tra cui uranio (U), radio (Ra), torio (Th), attinio (Ac), polonio (Po)] emettono spontaneamente radiazioni che non sono percepite direttamente dai nostri sensi ma vengono rivelate dagli effetti che producono.

- Azione fotografica
- Azione ionizzante
- Indipendenza dallo stato chimico o fisico
- Trasmutazione

Gli elementi che godono di queste proprietà vengono detti radioattivi.

RADIOATTIVITÀ AZIONE FOTOGRAFICA

Un elemento radioattivo, per esempio sali di uranio, posto accanto a una lastra fotografica per qualche ora, la impressiona. L'effetto si osserva anche se tra tubetto e lastra sono interposte sottili lamine metalliche.

Si deduce che la radiazione emessa dai sali di uranio, o almeno alcune componenti di essa, hanno un potere penetrante simile a quello dei raggi X.

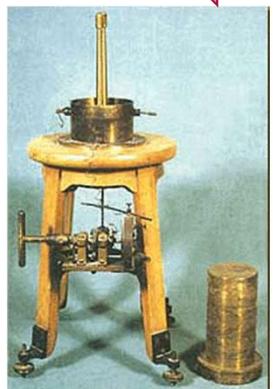
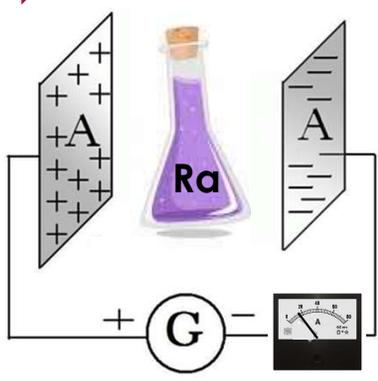
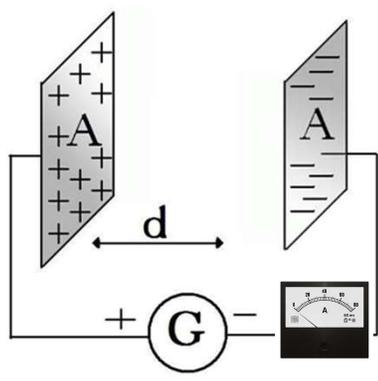
L'effetto è proporzionale al tempo di esposizione.

RADIOATTIVITÀ AZIONE IONIZZANTE

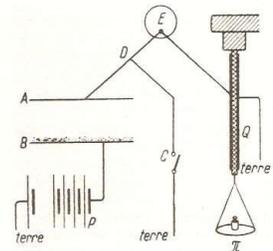
Prendiamo due lastre metalliche affacciate a una distanza di qualche centimetro una dall'altra e portate a diverso potenziale elettrico. Da una lastra all'altra non passa corrente; l'aria interposta è un buon isolante. Se ora si accosta un preparato radioattivo, si constata che l'aria diventa conduttrice; ciò è dovuto alla formazione di ioni (ionizzazione).

Le radiazioni emesse dai corpi radioattivi ionizzano fortemente l'aria.

➡ **RADIAZIONI IONIZZANTI** ⬅



Marie Curie usava l'elettrometro al quarzo piezoelettrico, capace di misurare correnti elettriche deboli (10^{-12} A).



RADIOATTIVITÀ INDIPENDENZA DALLA STATO

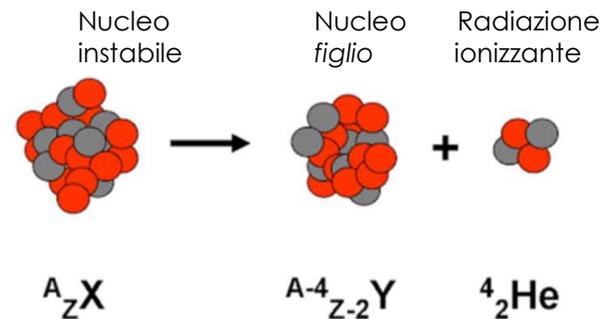
La radioattività, diversamente dalla stragrande maggioranza dei fenomeni fisici e chimici, non è affatto influenzata dallo stato di combinazione in cui si trova l'elemento radioattivo, né dalla pressione, né dalla temperatura né da altri mezzi fisici o chimici. Perciò si ritiene che la radioattività sia un fenomeno che interessa essenzialmente l'atomo, e più precisamente quella parte interna dell'atomo (nucleo) che per la sua stabilità non subisce l'influenza delle ordinarie azioni fisiche e chimiche.

RADIOATTIVITÀ TRASMUTAZIONE

La radioattività è accompagnata dalla 'trasmutazione' dell'elemento radioattivo in un altro elemento di diverse proprietà chimiche e fisiche.

Così il radio si trasmuta in radon e contemporaneamente si forma elio. Il nucleo figlio trasmuta un elemento anch'esso radioattivo, ecc.

Si forma così una famiglia radioattiva, finché dopo varie generazioni, si giunge a un elemento stabile (non radioattivo).



Essi emettono decadendo una serie di radiazioni, alfa, beta e gamma, tutte caratterizzate da una energia consistente.

ISOTOPIA

Il numero dei neutroni in un nucleo è indicato con la lettera N

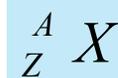
Il numero dei protoni, detto numero atomico, con la lettera Z

Il numero dei protoni più quello dei neutroni, il numero cioè dei nucleoni detto numero di massa, è indicato con la lettera A.

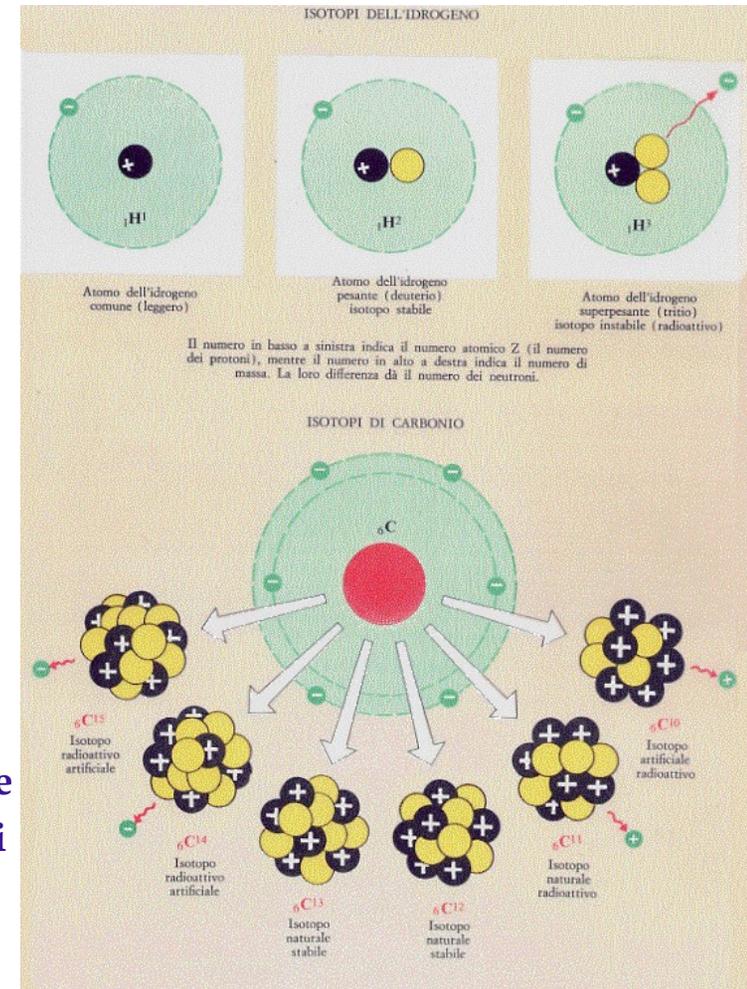
Per ogni nucleo

$$N = A - Z$$

Un qualsiasi elemento X della tavola periodica potrà essere indicato con il simbolo che gli compete con in basso Z e in alto



Si osserva che, tra gli atomi di uno stesso elemento ve ne sono alcuni che hanno, nel nucleo, stesso numero di protoni ma differente numero di neutroni. A questi elementi, costituiti da atomi con diverso numero di neutroni nel nucleo, si dà il nome di isotopi.



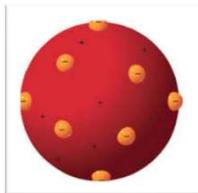
UN PO' DI STORIA

1896 *Henri Becquerel scopre il fenomeno della radioattività da sali di uranio (scoperta casuale).*

1897 *J. J. Thomson scopre l'elettrone e ne misura la carica e la massa. La presenza nella materia di una carica negativa fa supporre l'esistenza in essa di una carica positiva che però sfugge alla rivelazione.*

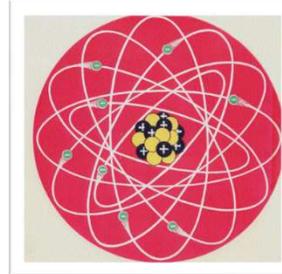
1898 *Pierre e Maria Curie scoprono altri elementi radioattivi: torio, polonio, radio (più attivo da cui il nome del fenomeno).*

1899 *Ernst Rutherford scopre delle radiazioni, che chiama alfa α e beta β , emesse da materiali radioattivi.*



DIMENSIONI ATOMO 10^{-10} m

DIMENSIONI NUCLEO 10^{-15} m



1911 *Rutherford elabora il suo modello atomico.*

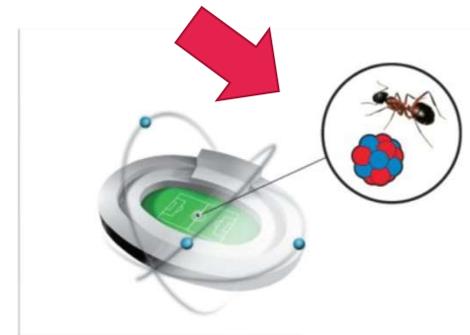
1913 *Il fisico danese Niels Bohr elabora il suo modello atomico che soppianta quello di Rutherford .*

1932 *Il fisico britannico James Chadwick scopre l'esistenza del neutrone, una particella neutra che è costituente del nucleo. Diventa così chiaro il fenomeno dell'isotopia: è il numero dei protoni che qualifica chimicamente una sostanza; un elemento resta chimicamente lo stesso anche se varia il numero dei neutroni che costituiscono il suo nucleo.*

$$m_e = 9 \cdot 10^{-31} \text{ Kg}$$

$$m_p \approx 1836 m_e$$

$$m_n \approx 1838 m_e$$



RADIAZIONI α

Sono costituite da nuclei di elio ${}_2\text{He}^4$, con carica +2, massa pari a 4,04 uma

Sono emesse con grande velocità dai nuclei (circa 20 000 Km/s), ma, a causa degli urti con le molecole d'aria, le ionizzano, perdendo gran parte della loro energia cinetica in tragitti che, in aria, vanno dai due agli otto centimetri.

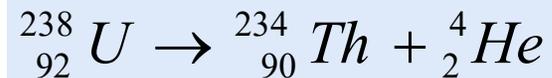
Nel caso poi queste particelle debbano attraversare materia solida, la loro perdita di energia avviene molto prima (sono bloccate da sottili fogli di carta o di alluminio, dai vestiti, dagli strati superiori della pelle).

POCO PENETRANTE

Al contrario, se la sorgente è posta all'interno di un organismo vivente (per ingestione o inalazione di pulviscolo radioattivo), i danni che essa provoca sono enormi.

In breve tempo i tessuti vicini alla sorgente sono distrutti da questi grandi proiettili dotati di una buona dose di energia.

Attraversando la materia vivente le particelle α , dotate di carica positiva, interagiscono con gli atomi provocandone la ionizzazione; come risultato si ha la distruzione o il danneggiamento delle molecole del tessuto in considerazione.



RADIAZIONI β

La radiazione beta è costituita da fasci di elettroni di carica negativa o di elettroni di carica positiva (positroni, particelle che hanno stessa massa e stessa carica, cambiata di segno, dell'elettrone e che si indicano con e^+) espulsi a gigantesche velocità (vicine a quelle della luce) dai nuclei atomici.

Le particelle β non hanno tutte la stessa energia come le particelle α . Essa può variare in un'ampia fascia di valori (da alcune centinaia di KeV ad alcuni MeV).

Anche le particelle β ionizzano l'aria che attraversano ma in misura molto minore di quanto fanno le particelle α .

PENETRANTI

Proprio perché ionizzano meno (e quindi cedono una minore quantità di energia) le particelle β possono penetrare più a fondo nella materia.

Nell'aria, ad esempio, possono percorrere (con una traiettoria a zig-zag, contrariamente alla traiettoria rettilinea seguita dalla particella α) tratti lunghi fino a 10 m; nella terra penetrano fino a 7 mm, nel calcestruzzo fino a 5 mm, nel piombo fino a circa 1 mm, mentre nella pelle possono penetrare per alcuni centimetri.

In seguito a questo ultimo fatto le radiazioni β assorbite dall'uomo sono dannose per la pelle e, soprattutto, per gli occhi. Se l'assorbimento avviene invece all'interno dell'organismo, le lesioni che vengono provocate sono molto gravi.



RADIAZIONI γ

La radiazione γ è costituita da fotoni molto energetici (da alcuni KeV a 2 MeV).

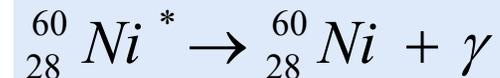
Le radiazioni γ sono fisicamente identiche ai raggi X di alta energia, l'unica differenza (oltre allo spettro di frequenza) è che i raggi γ sono prodotti dall'interno del nucleo atomico mentre i raggi X sono prodotti dagli elettroni.

Si tratta di onde elettromagnetiche della stessa natura di quella della luce, ma con lunghezze d'onda molto più piccole (da $3 \cdot 10^{-9}$ cm fino a valori di gran lunga più piccoli) e quindi con frequenze molto più elevate; queste radiazioni si propagano sotto forma di pacchetti (d'onda) di sola energia (fotoni) alla velocità della luce, sono prive di carica elettrica e, rispetto alle radiazioni α e β , hanno un potere ionizzante molto inferiore.

MOLTO PENETRANTI

La radiazione γ penetra in media spessori di 14 cm di terra, di 10 cm di calcestruzzo, di circa 2 cm di piombo, oltre a riuscire ad attraversare completamente il corpo umano (mentre i raggi X sono bloccati dalle ossa, queste ultime sono trasparenti per i raggi γ). Quest'ultimo fatto rende conto dell'estrema pericolosità per l'uomo di questo tipo di radiazione.

I raggi γ accompagnano usualmente l'emissione di radiazione α e β e sono emessi da quasi tutti gli isotopi radioattivi artificiali e da alcuni elementi dotati di radioattività naturale.



FORZE NEI NUCLEI

Proviamo a fare un conto per vedere quanto dovrebbero valere le forze elettriche repulsive all'interno di un nucleo atomico.

Supponiamo che un nucleo atomico sia costituito da due protoni alla distanza di 10^{-15} m. Ricordando che la carica del protone (opposta a quella dell'elettrone) vale $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ coulomb ed applicando la legge di Coulomb, si trova che la forza repulsiva tra i due protoni vale:

$$F_n = K \cdot \frac{p \cdot p}{R^2} = K \cdot \frac{p^2}{R^2} = 9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} N = 230 N$$

Per capire l'ordine di grandezza di questa forza, confrontiamola con quella attrattiva che tiene legato, ad esempio, un elettrone ad un protone in un atomo di idrogeno (ad una distanza $r \approx 5 \cdot 10^{-11}$ m):

$$F_e = K \cdot \frac{-e \cdot e}{r^2} = -K \cdot \frac{e^2}{r^2} = -9 \cdot 10^9 \cdot \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(5 \cdot 10^{-11})^2} N \cong -10^{-7} N.$$

Facendo il rapporto tra F_n ed F_e si ottiene

$$\frac{F_n}{F_e} = \frac{230}{10^{-7}} \cong 2 \cdot 10^9 \Rightarrow F_n \cong 2 \cdot 10^9 F_e.$$

Risulta quindi che la forza F_n repulsiva tra i due protoni dovrebbe essere più intensa di circa 2 miliardi di volte quella F_e che tiene un elettrone legato in un atomo di idrogeno.

Come fanno a coesistere in uno spazio così piccolo, il nucleo, due o più protoni? I fatti sperimentali mostrano che i nucleoni sono fortemente legati tra di loro nel nucleo, come è possibile?

INTERAZIONI FONDAMENTALI

Interazione elettromagnetica

F_{em}

Elettricità, magnetismo, induzione, onde elettromagnetiche, atomi, molecole, struttura della materia, reazioni chimiche, forze d'attrito

Interazione forte F_s

$F_s / F_{em} \sim 100$

nuclei, spettri di emissione ed assorbimento nucleari, decadimenti alfa

Interazione debole

F_w

$F_w / F_{em} \sim 10^{-2}$

decadimenti beta

Interazione gravitazionale

F_g

$F_g / F_{em} \sim 10^{-36}$

moto dei gravi, maree, moto di pianeti, stelle, galassie

NUCLEI INSTABILI

All'aumentare di Z le forze Coulombiane repulsive tra protoni predominano sulle interazioni forti attrattive.

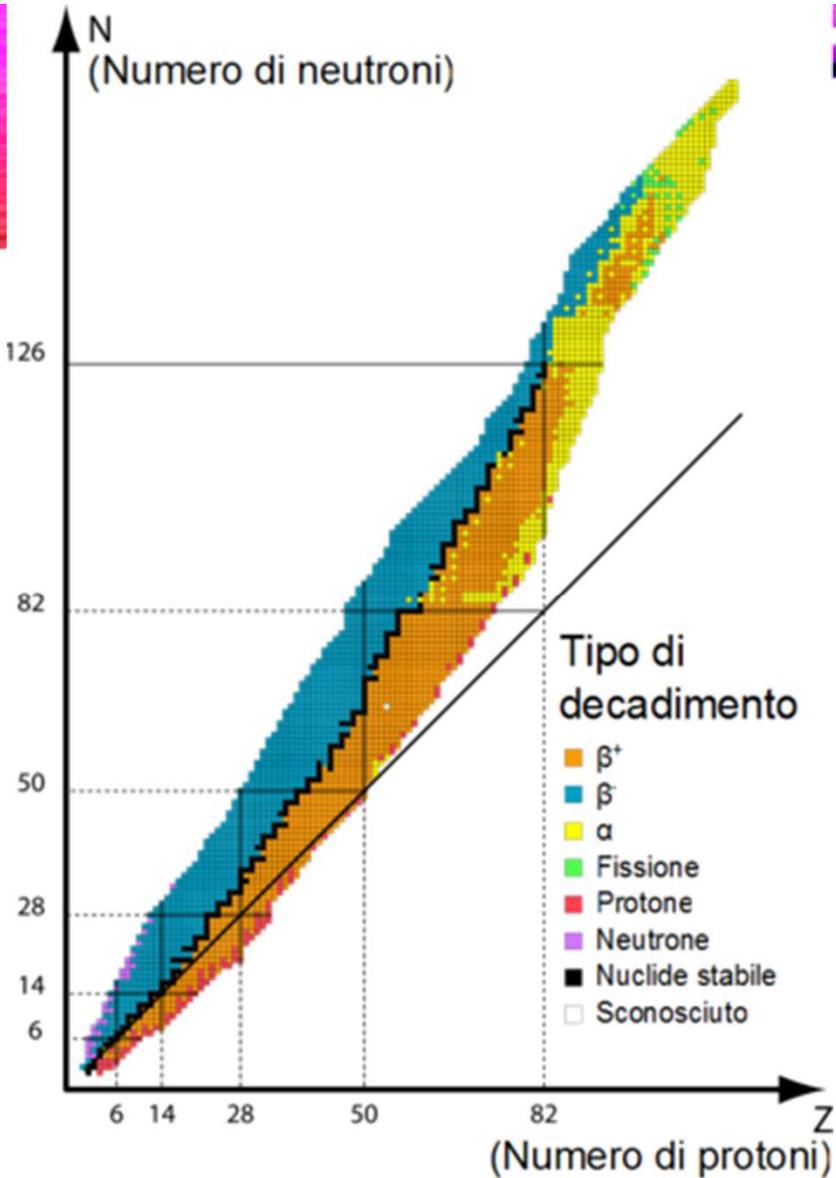
Tutti gli elementi chimici con numero atomico $Z > 83$ hanno nucleo instabile e decadono.

Non esistono nuclei stabili oltre il Bismuto ($Z = 83$).

[Nel 2003

$t_{1/2} = (2,01 \pm 0,08) \times 10^{19}$ anni

Per confronto la vita media di $H^1 > 10^{21}$ anni]



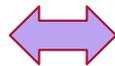
LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

Radioattività:

Emissione spontanea di radiazione dal nucleo di un atomo dovuta al decadimento o disintegrazione di nuclei instabili.

La modalità di emissione radioattiva è espressa dalla **legge del decadimento radioattivo** basata su due osservazioni sperimentali:

L'emissione radioattiva è
proporzionale



alla quantità di sostanza
radioattiva

al tempo trascorso

LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

Il numero di nuclei che decadono ΔN è direttamente proporzionale all'intervallo di tempo Δt e al numero di nuclei presenti N .

$$\Delta N \propto -N \Delta t$$

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

$$dN = -\lambda N dt$$

λ costante di decadimento.

(caratteristica del particolare isotopo dell'elemento radioattivo)

$$[\lambda] = [T]^{-1}$$

LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

$$\int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt$$

$$\ln N = -\lambda t + c$$

$$e^{\ln N} = e^{(-\lambda t + c)}$$

$$N = e^{-\lambda t} e^c$$

Posto $e^c = N_0$ numero di nuclei all'istante iniziale ($t = 0$)

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

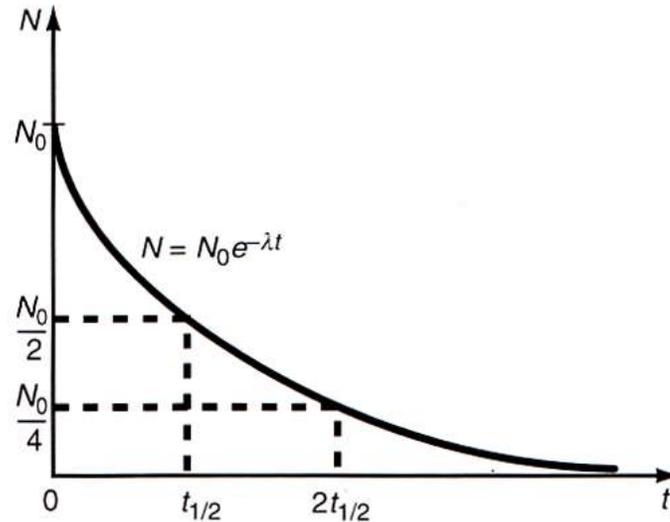
$$[\lambda] = [T]^{-1}$$

$N(t)$ = numero di nuclei radioattivi ancora presenti all'istante t

LA LEGGE DEL DECADIMENTO RADIOATTIVO

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

$$[\tau] = [T]$$



$$\tau = \frac{1}{\lambda}$$

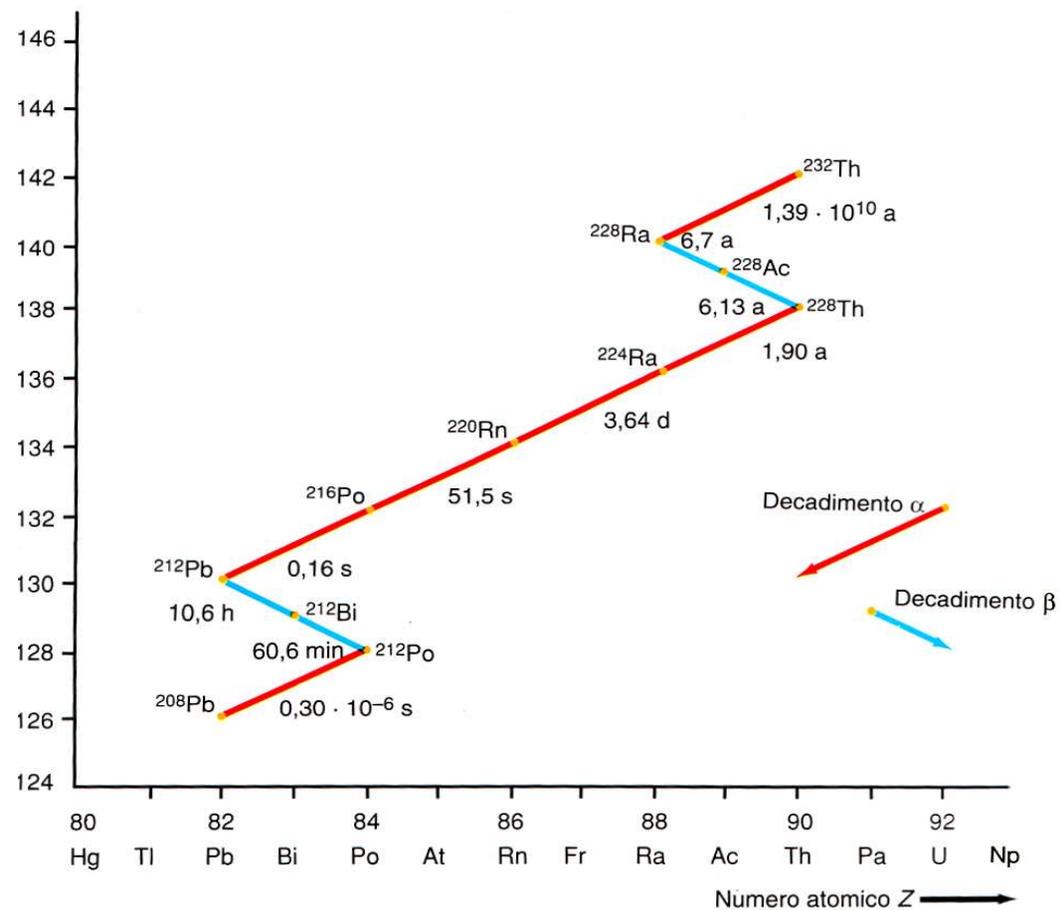
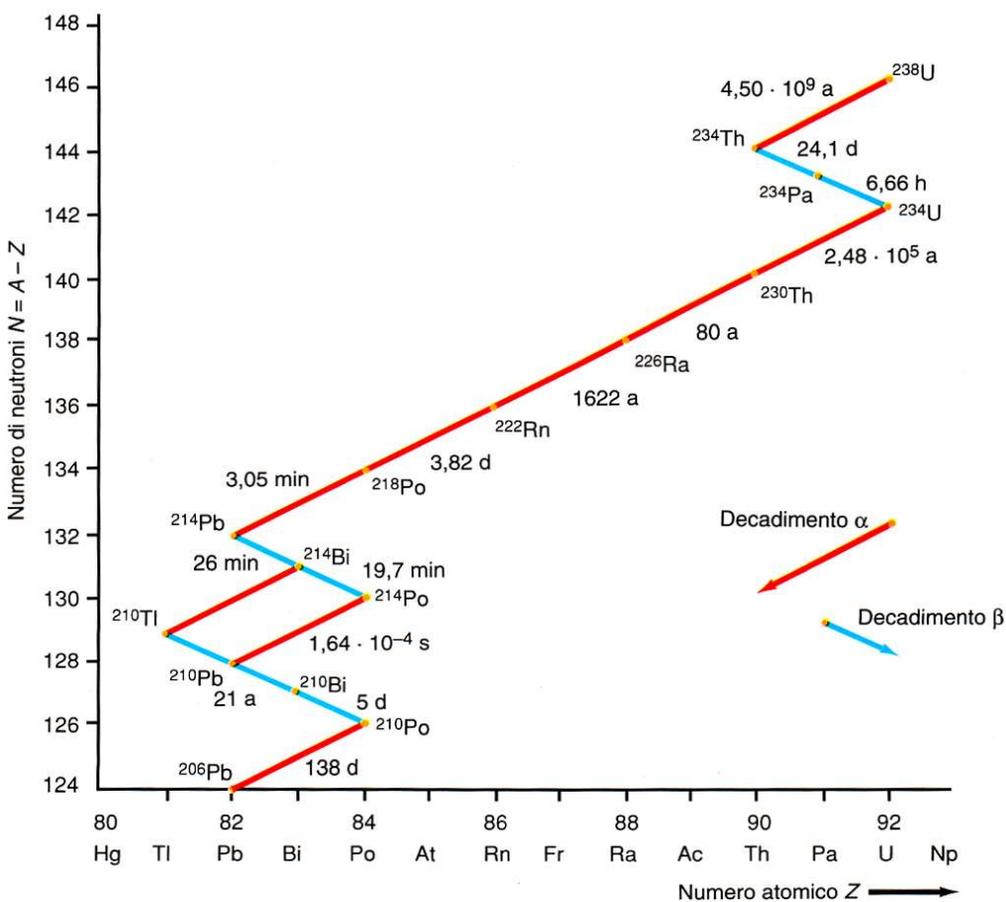
Una costante caratteristica è
vita media della sostanza radioattiva τ
Tempo di dimezzamento

$$t_{1/2} = \ln 2 \tau \cong 0,69 \tau \cong 70\% \tau$$



| Elemento | $t_{1/2}$ | Elemento | $t_{1/2}$ |
|-------------------|------------|-------------------|---------------------------|
| ^{222}Rn | 3,8 giorni | ^{238}U | $4,5 \cdot 10^9$ anni |
| ^{210}Pb | 22 anni | ^{40}K | $1,3 \cdot 10^9$ anni |
| ^{226}Ra | 1600 anni | ^{131}I | 8,04 giorni |
| ^{14}C | 5730 anni | ^{232}Th | $1,39 \cdot 10^{10}$ anni |

CATENE DI DECADIMENTO



RADIOATTIVITÀ NATURALE

PIANETA TERRA

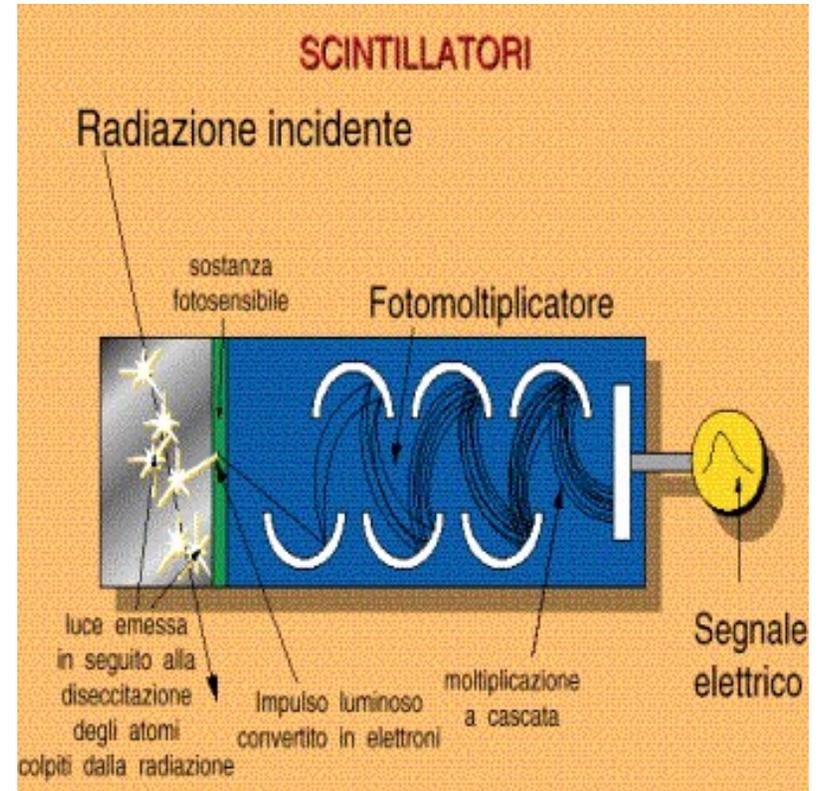
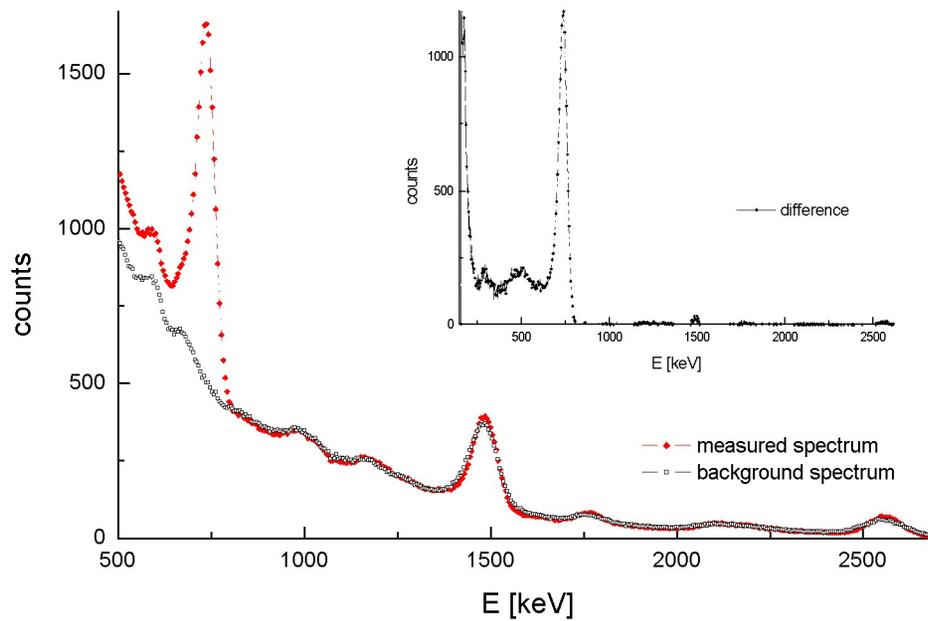
Crosta terrestre

I principali radionuclidi primordiali sono il potassio ^{40}K , il rubidio ^{87}Rb , l'uranio ^{238}U e il torio ^{232}Th .

La concentrazione di questi radionuclidi naturali nel terreno e nelle rocce varia sensibilmente secondo la conformazione geologica delle diverse aree.

| Radionuclide/serie radioattiva | ^{40}K | ^{238}U | ^{232}Th |
|---------------------------------------|--------------------|------------------|-------------------|
| Concentrazione media al suolo (Bq/kg) | 370(trà 100 e 700) | 25 (tra 10 e 50) | 25 (tra 7 e 50) |

RADIOATTIVITÀ NATURALE NELLA TERRA



Uno spettro di radioattività naturale in laboratorio misurato con un rivelatore NaI(Tl)

RADIOATTIVITÀ NATURALE NELLA TERRA

Mantello

Buona parte del calore sprigionato dalle viscere della Terra deriva dal decadimento radioattivo degli isotopi ^{238}U e ^{232}Th presenti nel mantello terrestre, spesso quasi 3.000 km, su cui poggia la crosta (4-70 km di spessore).

Da una serie di misure sui *geoneutrini** fatte nell'esperimento Borexino (INFN - LN del Gran Sasso) si è stimato che esiste radioattività nel mantello terrestre.

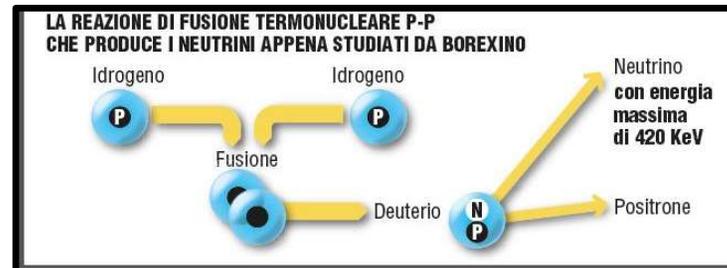
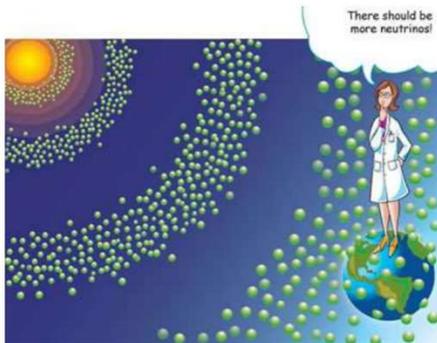
Ogni secondo circa un milione di *geoneutrini* attraversano ogni cm^2 della superficie della Terra. Queste particelle sono prodotte dalla radioattività naturale terrestre e rappresentano una delle poche sonde che abbiamo a disposizione per esplorare direttamente le viscere della Terra.

* *Geoneutrini*: antineutrini provenienti da decadimenti nucleari

STUDIANDO I NEUTRINI

I neutrini derivano dai decadimenti β e più in generale dalle relazioni nucleari elettrodeboli. In particolare c'è una produzione di neutrini nelle stelle a causa del processo di fusione che alimenta la nucleosintesi stellare. Ne vengono prodotti moltissimi (sono le particelle più abbondanti nell'universo) ma interagendo solo in modo debole con la materia non è semplice rilevarli. Le misure però indicano che i neutrini solari sono meno del previsto (problema che potrebbe essere spiegato recentemente con la scoperta dell'oscillazione di neutrini ipotizzata nel secolo scorso).

Per studiare questo problema si sono costruiti grandi rivelatori sotto le montagne (Kamiokande e Super-Kamiokande in Giappone, Borexino nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso).



INFN L'esperimento Borexino
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

- Borexino assomiglia a una "matrioska", immersa in 2400 tonnellate di acqua ultrapura. All'interno una sfera di acciaio contiene 1000 tonnellate di liquido schermante e, racchiusi in una sfera di nylon più piccola, 300 tonnellate di liquido scintillatore.
- Nella sfera più interna i neutrini interagiscono con il liquido scintillatore, e producono piccoli lampi di luce. Borexino ne osserva ogni giorno alcune decine.
- I fotomoltiplicatori, occhi tecnologici ultrasensibili, vedono e registrano i lampi di luce prodotti dai neutrini.

RADIOATTIVITÀ NATURALE NELLA TERRA

Mantello

Dall'analisi delle misure sui geoneutrini durate una decina di anni si è potuto osservare per la prima volta il segnale dei neutrini prodotti dai processi di decadimento radioattivo di uranio e torio distribuiti nel mantello terrestre, permettendo di **escludere al 99% l'ipotesi di assenza di radioattività nelle profondità della Terra**

Il risultato pubblicato dimostra che **buona parte del calore** sprigionato dalle viscere della Terra deriva dal **decadimento radioattivo di ^{238}U e ^{232}Th presenti nel mantello terrestre**, spesso quasi 3.000 km, su cui poggia la crosta terrestre.

I ricercatori di Borexino hanno stimato con un'alta probabilità (circa 85%) che siano i decadimenti radioattivi nelle rocce a produrre **più della metà del calore terrestre**, con un ruolo preponderante del mantello rispetto alla crosta **escludendo la possibilità di un georeattore nel centro del pianeta**.

Questa evidenza apre nuovi scenari nell'esplorazione geochimica globale del nostro pianeta. Essendo stato fissato un valore minimo di abbondanza di uranio e torio nel mantello terrestre, è possibile affermare che una porzione non trascurabile dell'**energia** che alimenta vulcani, terremoti e il campo magnetico terrestre sia prodotta dalla **radioattività terrestre**.

M. Agostini *et al.* (Borexino Collaboration) Comprehensive geoneutrino analysis with Borexino

Phys. Rev. D **101**, 012009 – Published 21 January 2020

RADIOATTIVITÀ NATURALE NELL'ARIA

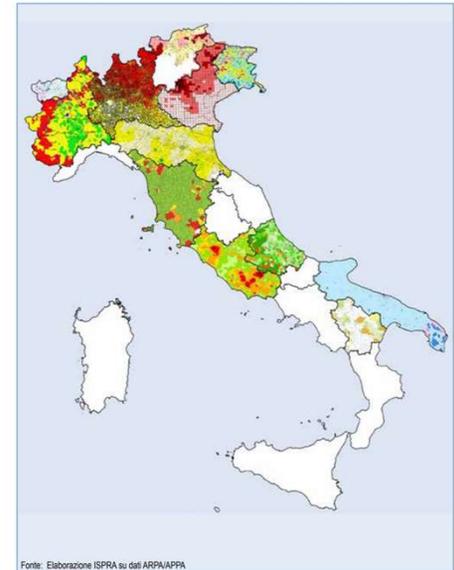
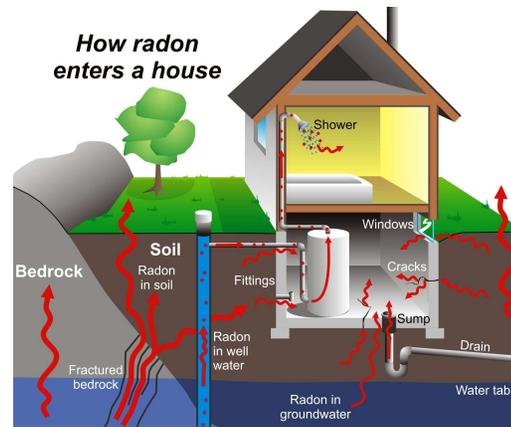
In aria, la radiazione naturale è causata principalmente alla presenza di radon, cioè dell'unico elemento delle catene di decadimento naturali che è un gas nobile radioattivo sette volte più pesante dell'aria.

Tavola Periodica degli Elementi

The periodic table shows the following legend for element groups:

- Metalli Alcalini
- Metalli Alcalino-Terrosi
- Lantanidi
- Altridi
- Elementi di Transizione
- Metalloidi / Non Metalli
- Algeni
- Gas Nobili

The noble gases (Group 18) are highlighted in yellow, and Radon (Rn) is specifically highlighted with a red box.



Fonte: Elaborazione ISPRA su dati ARPA/APPA

Figura 12.12: Mappe radon prodotte in ambito regionale

L'inquinamento indoor di radon è un problema sanitario mondiale.





RADIOATTIVITÀ NATURALE NELL'ACQUA

Nelle acque è presente una certa quantità di radioattività originata dalle piogge che vi riversano le sostanze radioattive disperse nell'aria, e dalle acque dei corsi d'acqua naturali che convogliano nei bacini di accumulo le sostanze radioattive delle rocce e del suolo.

Sono sensibilmente radioattive le acque calde e solfuree degli impianti termali.

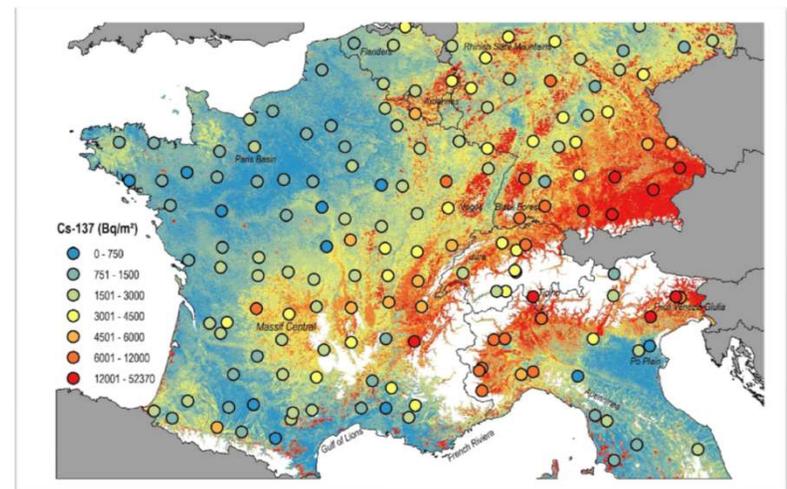
RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE FALLOUT RADIOATTIVO

Test nucleari

Sono iniziati nel 1945 e fino al 2019 sono stati poco più di 2000, di cui 528 all'aperto (vietati dal 1963).



Test nucleare nel Sahara occidentale negli anni '60



Concentrazione di Cesio in campioni di roccia fallout test nucleari nel Sahara

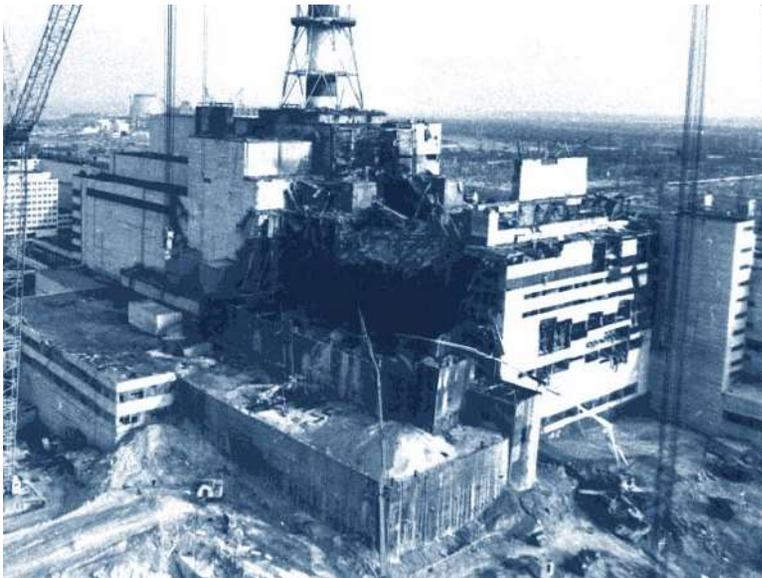
Meusburger, K., Evnard, O., Alewell, C. et al. Plutonium aided reconstruction of caesium atmospheric fallout in European topsoils. *Sci Rep* 10, 11858 (2020).

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68736-2>

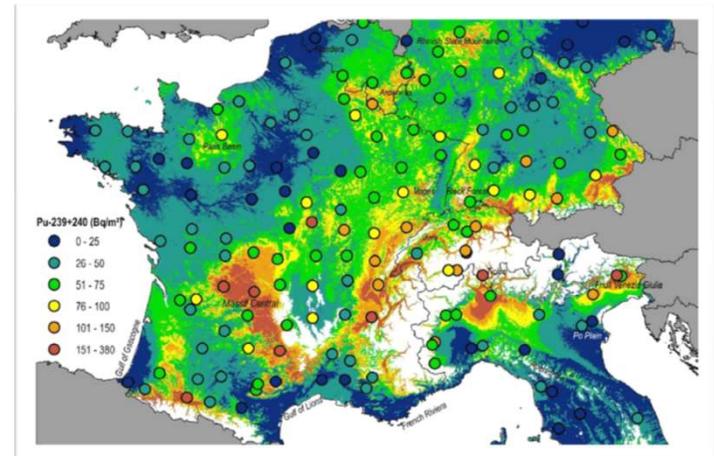
RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE FALLOUT RADIOATTIVO

Incidenti nucleari

Il fallout delle ceneri radioattive di Černobyl' (1986) è ben presente nell'Italia del nord e continua ad essere monitorato.



Il reattore della centrale nucleare dopo l'incendio.



Concentrazione di Plutonio in campioni di roccia fallout incidente centrale Černobyl

Meusburger, K., Evnard, O., Alewell, C. et al. Plutonium aided reconstruction of caesium atmospheric fallout in European topsoils. Sci Rep 10, 11858 (2020).

<https://doi.org/10.1038/s41598-020-68736-2>

RADIOATTIVITÀ ARTIFICIALE

RIFIUTI RADIOATTIVI

L'importante presenza di stabilimenti nucleari che producono energia (circa il 40% dell'energia elettrica americana era prodotta in centrali nucleari), permette agli USA di possedere circa 560,000 tonnellate di "materiale di scarto" derivante da questi processi (uranio impoverito) sotto forma di esafluoruro (UF_6) attualmente stoccate in cilindri.

Rifiuti stoccati all'aperto in attesa di collocazione definitiva



Rifiuti stoccati in miniera

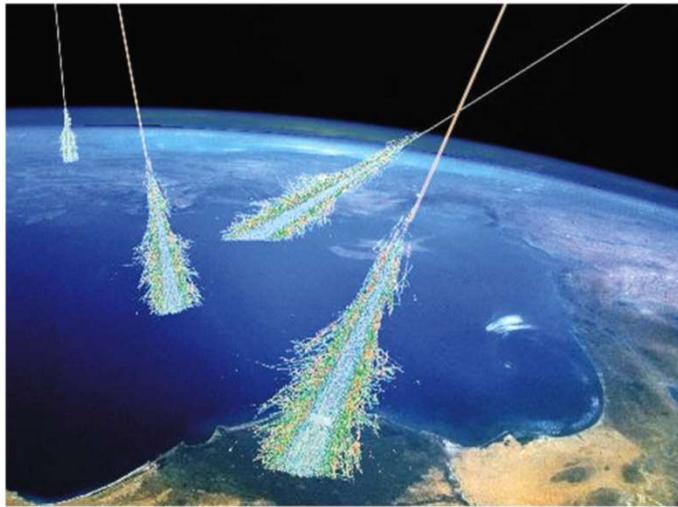
- Materiale esausto centrali
- Dismissioni impianti nucleari
- Radionuclidi in medicina nucleare
- Scarti di processi industriali

In Italia sono attive 90 strutture autorizzate all'uso di sorgenti radioattive.



RADIOATTIVITÀ EXTRATERRESTRE RAGGI COSMICI

Particelle energetiche provenienti dallo spazio esterno, alle quali è esposta la Terra e qualunque altro corpo celeste, i satelliti e gli astronauti.



Batignani, G., et al. "L'esperimento di Pacini sull'origine dei raggi cosmici." *GIORNALE DI FISICA* 42.2 (2011).

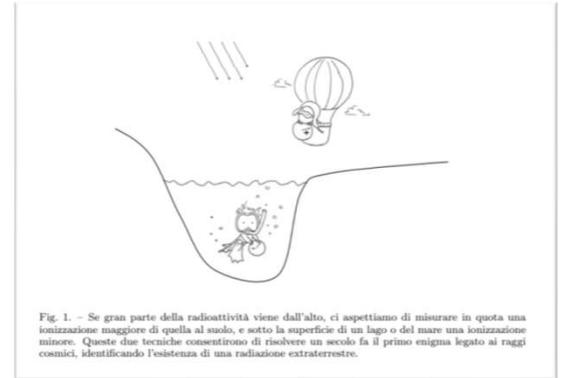


Fig. 1. - Se gran parte della radioattività viene dall'alto, ci aspettiamo di misurare in quota una ionizzazione maggiore di quella al suolo, e sotto la superficie di un lago o del mare una ionizzazione minore. Queste due tecniche consentirono di risolvere un secolo fa il primo enigma legato ai raggi cosmici, identificando l'esistenza di una radiazione extraterrestre.

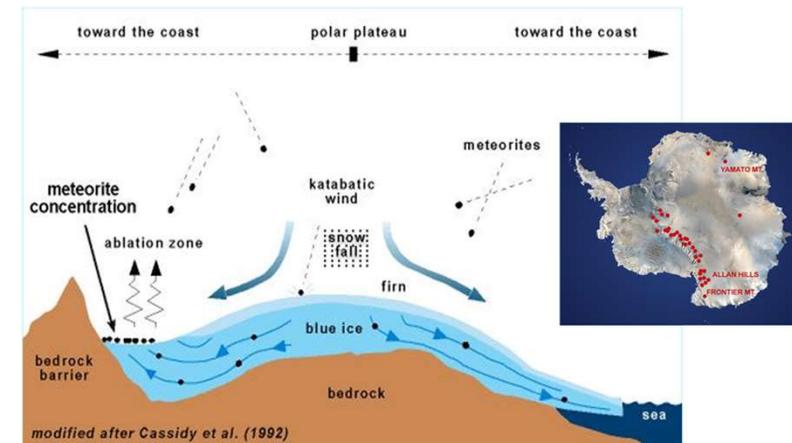
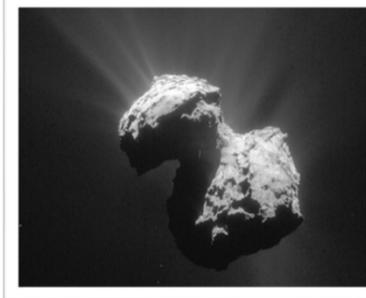
Al di là dell'atmosfera, i raggi cosmici sono costituiti da protoni (per circa il 90%) e da nuclei di elio (quasi il 10%); tuttavia, anche elettroni ed altri nuclei leggeri, fotoni, neutrini ed in minima parte antimateria (positroni ed antiprotoni) fanno parte dei raggi cosmici primari. Giunte nell'atmosfera terrestre, tali particelle interagiscono con i nuclei delle molecole dell'atmosfera, formando così, in un processo a cascata, nuove particelle proiettate in avanti, che prendono il nome di raggi cosmici secondari che contribuiscono alla radioattività sulla superficie della Terra.

RADIOATTIVITÀ EXTRATERRESTRE

ISOTOPI RADIOATTIVI

Meteoriti, asteroidi, polvere di stelle e i minerali di altri pianeti contengono isotopi radioattivi.

Lo studio di questi campioni rocciosi extraterrestri ha permesso di comprendere l'origine del sistema solare, di dare un'età alla nostra stella e insieme ad altre misure tra cui la radiodatazione degli elementi chimici è uno dei modi per misurare l'età dell'Universo.



RADIOATTIVITÀ EXTRATERRESTRE UN OSTACOLO ALL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

L'analisi delle problematiche legate all'esposizione degli astronauti a dosi di radiazioni ionizzanti impegna le agenzie spaziali da decenni.

La misura dell'esposizione unisce concetti fisici e osservazioni sui danni biologici che causano negli organismi viventi.

La dose assorbita di radiazioni è la quantità di energia depositata dalle radiazioni per unità di massa di un certo materiale. Ogni tipologia di radiazione è portatrice di una specifica quantità di energia, e per questo si rende necessario definire una dose biologica equivalente per stimare gli effetti dei diversi tipi di radiazione. La dose equivalente si misura in milliSieverts (mSv), che considera anche quanto danno quel particolare tipo di radiazione può infliggere. Maggiore è il danno provocato da una certa quantità di radiazione, maggiore è il valore in mSv.

RADIOATTIVITÀ EXTRATERRESTRE UN OSTACOLO ALL'ESPLORAZIONE SPAZIALE

| Missione | Dose |
|---|----------|
| Superficie terrestre, in media (dato annuale) | 2,4 mSv |
| STS 41-C (8 giorni in orbita terrestre a ~460 km) | 5,59 mSv |
| Apollo 14 (9 giorni sulla Luna) | 11,4 mSv |
| Skylab 4 (87 giorni in orbita terrestre a ~473 km) | 178 mSv |
| Expedition ISS (fino a 6 mesi in orbita terrestre a ~360 km) | 160 mSv |
| Missione triennale verso Marte | 1200 mSv |

1 mSv corrisponde all'irraggiamento subito nel corso di 5 radiografie ai polmoni. Per paragone, sulla Terra esiste ovunque il fenomeno della radioattività naturale che causa in media un'esposizione di 2,4 mSv l'anno (3,3 mSv per l'Italia).

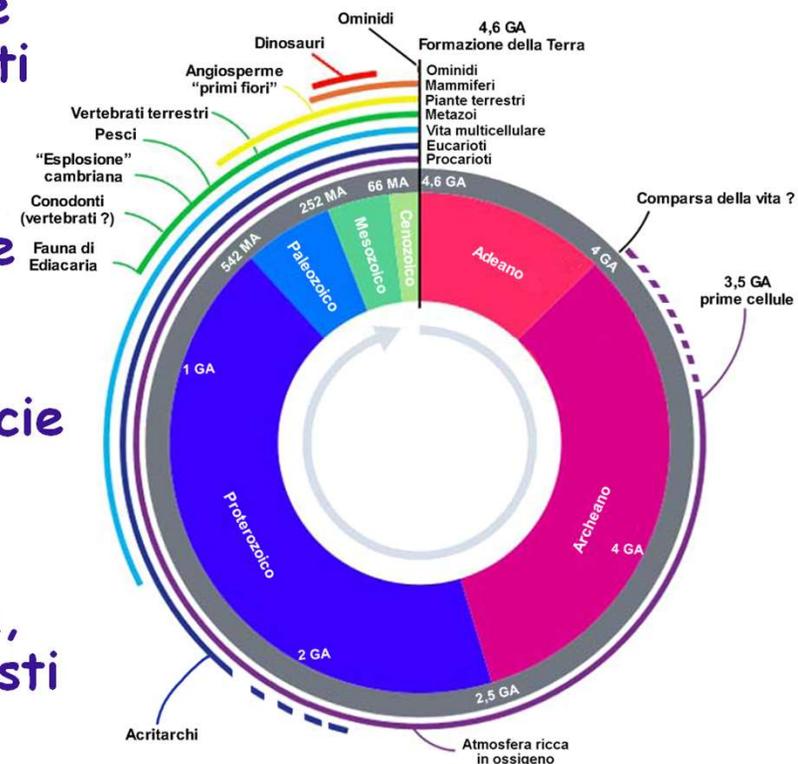
| Esame | | Dose [mSv] | Corrisponde a x volte la dose di radiazioni di una radiografia dei polmoni |
|---|------|------------|--|
| R = Radiografie/ esami radiologici ai raggi X N = Esami di medicina nucleare | | | |
| Radiografia degli arti | R | 0.005 | 0.25 |
| Radiografia di un dente | R | 0.02 | 1 |
| Radiografia dell'intero volume mascellare | R | 0.2 | 10 |
| Esame della ventilazione polmonare (Tc-99m) | N | 0.3 | 15 |
| Radiografia del seno femminile | R | 0.4 | 20 |
| Radiografia del tronco | R | 0.7 | 35 |
| Esame della tiroide (Tc-99m) | N | 1.0 | 50 |
| Esame dei reni | N | 1.1 | 55 |
| Radiografia della colonna vertebrale lombare | R | 1.5 | 75 |
| Tomografia computerizzata del cranio | R | 2.0 | 100 |
| Esame del cranio, ricerca di tumori | N | 4.8 | 240 |
| Tomografia computerizzata della colonna vertebrale lombare | R | 6.0 | 300 |
| Esame dell'intero corpo, ricerca di tumori | N | 6.7 | 335 |
| Tomografia computerizzata dei polmoni | R | 7.0 | 350 |
| Tomografia computerizzata del tronco | R | 8.0 | 400 |
| Esame dell'intero corpo, ricerca di tumori | N | 10.0 | 500 |
| Esame combinato dell'intero corpo (ibrido PET-TC, F-18), ricerca di tumori e tomografia computerizzata a bassa dose | R, N | 11 | 550 |

RADIODATAZIONE DALLO SPAZIO ALLA TERRA

La datazione radiometrica (o radiodattazione) è uno dei metodi per determinare l'età di oggetti antichi, fossili, rocce, asteroidi, ecc.

Si basa sul rapporto tra le abbondanze osservate di un opportuno isotopo radioattivo e dei suoi prodotti di decadimento ed è la principale fonte di informazioni sull'età della Terra e sulla velocità dell'evoluzione delle specie viventi.

Esistono vari metodi di datazione radiometrica, differenti nella precisione della misura, nei costi e nelle scale temporali per le quali possono essere utilizzati.



RADIODATAZIONE DALLO SPAZIO ALLA TERRA

Il metodo più noto (nonché il primo ad essere stato sviluppato) è quello del ^{14}C con un tempo di dimezzamento di 5.730 anni che viene continuamente creato attraverso le collisioni di neutroni, generati da raggi cosmici, con l'azoto dell'atmosfera, tanto da costituire una frazione non indifferente del carbonio presente nell'anidride carbonica (CO_2).

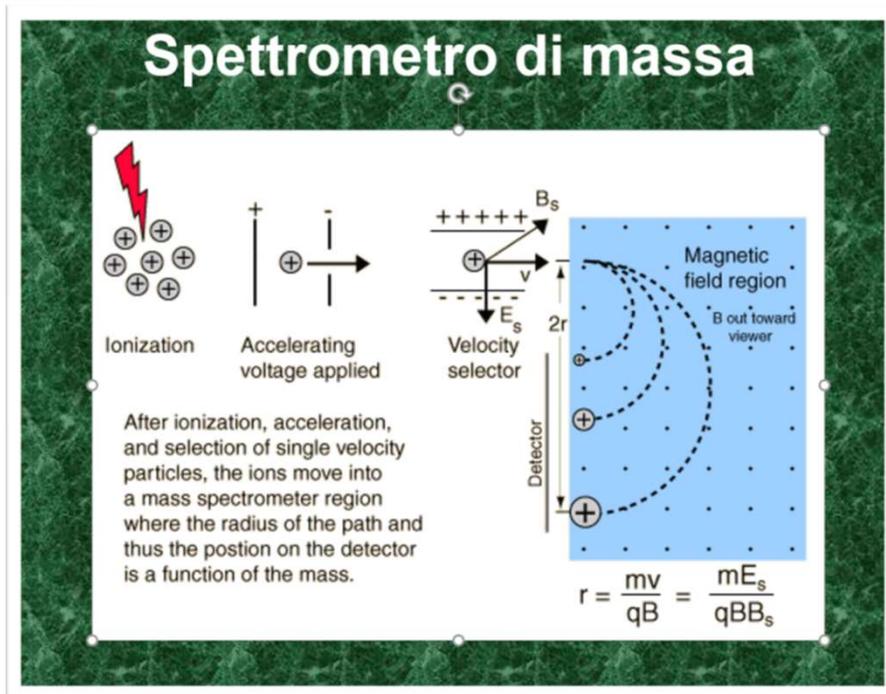
Gli organismi viventi acquisiscono carbonio, la cui concentrazione deriva da un equilibrio dinamico con l'atmosfera attraverso l'anidride carbonica : le piante attraverso la fotosintesi, gli animali nutrendosi di piante o di altri animali. Quando un organismo muore, cessa di assumere ^{14}C e gli isotopi presenti nel suo corpo continuano a decadere. La quantità di ^{14}C rilevata esaminando i resti dell'organismo fornisce un'indicazione del tempo passato dalla sua morte. Questa datazione non può spingersi però indietro oltre 60000 anni circa.

RADIODATAZIONE DALLO SPAZIO ALLA TERRA

La misura del ^{14}C si può effettuare in due modi:

- metodo del contatore proporzionale: con un contatore si misurano gli elettroni prodotti dal decadimento in un certo intervallo di tempo
- metodo della spettrometria di massa (*AMS, Accelerator Mass Spectrometry*): utilizzando uno spettrometro di massa si misura direttamente la concentrazione di ^{14}C presente nel campione.

RADIODATAZIONE DALLO SPAZIO ALLA TERRA



Rispetto al metodo del contatore proporzionale, il metodo AMS presenta il vantaggio di poter lavorare con campioni più piccoli e di fornire un risultato in un tempo molto più breve. e lo svantaggio di essere un metodo distruttivo: esso richiede infatti che il campione venga bruciato e ridotto in forma gassosa.

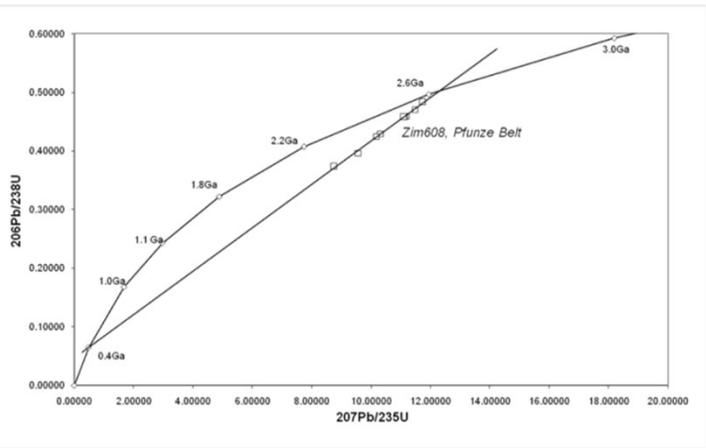
Entrambi i metodi di misura permettono di ottenere datazioni con un margine di errore tra il 2 e il 5%.

RADIODATAZIONE

OGNI SCALA TEMPORALE HA IL SUO NUCLIDE

Per misurare l'età delle rocce si utilizzano vari isotopi e la misura dei rapporti isotopici misurati con lo spettrometro di massa.

La datazione uranio-piombo è una delle tecniche più usate: la sua precisione è tale che l'errore nel datare una roccia di circa tre miliardi di anni con questa tecnica è inferiore ai due milioni di anni. Uno dei grandi vantaggi di questa tecnica è che sfrutta due differenti orologi isotopici presenti nel campione, uno basato sul decadimento dell' U^{235} a Pb^{207} (con un tempo di dimezzamento di circa 700 milioni di anni) ed uno basato sul decadimento dell' U^{238} a Pb^{206} (con un periodo di dimezzamento di circa 4.5 miliardi di anni), i quali forniscono un controllo incrociato che permette la determinazione precisa dell'età del campione anche se sono state perse delle quantità di piombo.



RADIODATAZIONE

OGNI SCALA TEMPORALE HA IL SUO NUCLIDE

La datazione Rubidio-Stronzio è basata sul decadimento beta del Rb^{87} in Sr^{87} , con un tempo di dimezzamento di 50 miliardi di anni; questo processo è usato per datare le rocce ignee e metamorfiche più antiche e nei campioni di rocce lunari.

Ai primordi del sistema solare esistevano numerosi radionuclidi con breve periodo di dimezzamento presenti all'interno della nebulosa solare. Questi isotopi radioattivi, probabilmente residui dell'esplosione di una supernova, sono oggi estinti, ma i prodotti del loro decadimento possono essere rilevati in oggetti estremamente antichi come i meteoriti.

Datazione con radionuclidi estinti come $^{129}\text{I} - ^{129}\text{Xe}$ e $^{26}\text{Al} - ^{26}\text{Mg}$.

RADIODATAZIONE

OGNI SCALA TEMPORALE HA IL SUO NUCLIDE

Ci sono più modi per stimare l'età dell'Universo

- l'età degli elementi chimici
- l'età di alcune stelle antiche
- l'età dei più antichi ammassi stellari
- l'età delle più antiche nane bianche
- dai parametri cosmologici

13,59±0,13 miliardi di anni

La radiodattazione è utilizzata nei primi due, è nettamente meno precisa degli altri ma fornisce misure indipendenti e in accordo con le misure considerate più dirette e affidabili che utilizzano il modello cosmologico standard e misure sulla radiazione di fondo in tutto l'universo noto.



GRAZIE PER L'ATTENZIONE