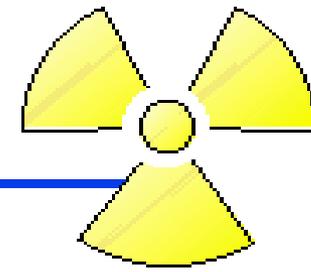


L'orologio Radioattivo

Ezio Previtali
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Università di Milano Bicocca

Decadimento Radioattivo

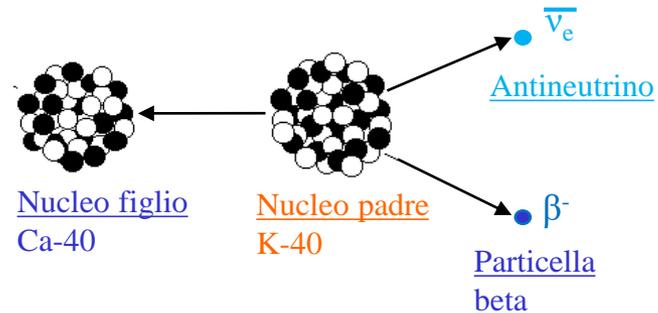
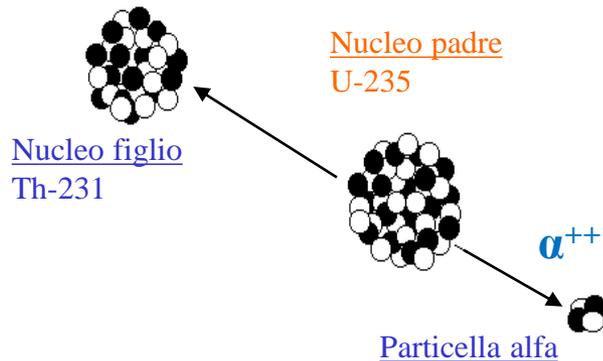


Il **Decadimento Radioattivo** è un **processo spontaneo** in cui **un nucleo si trasforma** attraverso **l'emissione di radiazione**.

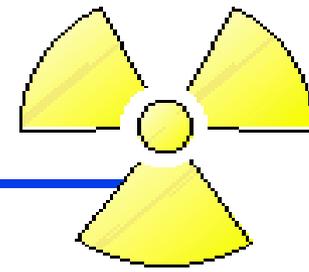
Decadimento alfa $\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A-4}{Z-2}Y + {}^4_2\text{He} (\alpha)$ (tipico dei nuclei pesanti)

Decadimento beta $\left\{ \begin{array}{l} \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z+1}Y + \beta^- + \bar{\nu}_e \\ \frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z-1}Y + \beta^+ + \nu_e \\ \frac{A}{Z}X + e^- \rightarrow \frac{A}{Z-1}Y + \nu_e \end{array} \right.$ (decadimento β^-)
 (decadimento β^+)
 (cattura elettronica)

Decadimento gamma $\frac{A}{Z}X \rightarrow \frac{A}{Z+1}Y^* + \beta^- + \bar{\nu}_e$
 \downarrow
 $\frac{A}{Z+1}Y^* \rightarrow \frac{A}{Z+1}Y + \gamma$ (dovuto a riassetto del nucleo)

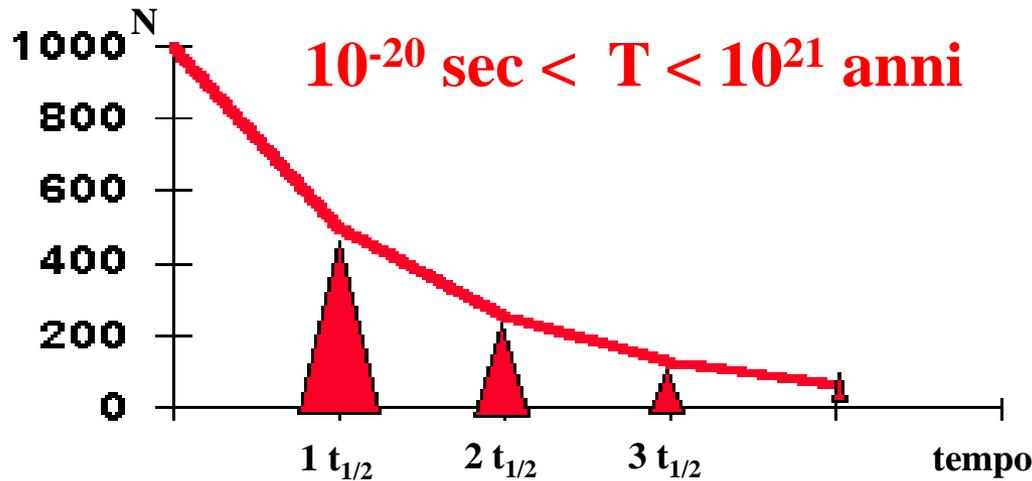


Legge del Decadimento Radioattivo



Il **Decadimento Radioattivo** è un **processo statistico**: non si sa quando un nucleo decadrà, osservandone **un gran numero** potremo dire quanti **in media** decadranno per unità di tempo.

Per ogni radionuclide esiste un **tempo caratteristico**, detto **tempo di dimezzamento (T)**, passato il quale **il numero di nuclei si sarà dimezzato**



Se N_0 sono i nuclei radioattivi a $t = 0$
Dopo un tempo t avremo:

$$N(t) = N_0 2^{-t/T} = N_0 e^{-t/\tau}$$

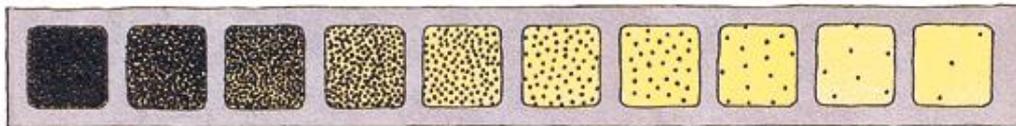
dove τ indica la vita media ($T = \tau \ln 2$)

Quindi:

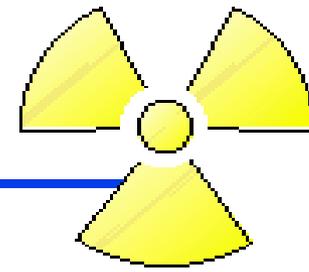
- Noto il tempo di dimezzamento T
- Nota la concentrazione iniziale N_0



$N(t)$ è di fatto una misura di tempo



Attività (Radioattività)



L'**attività** indica la **variazione dei nuclei instabili** nel tempo:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N = -\frac{N}{\tau} = A_0 e^{-t/\tau} = A_0 2^{-t/T}$$

L'**attività** ci dice:

- ✓ quanti **decadimenti al secondo** avverranno **in media** nel nostro campione
- ✓ quanta **radiazione verrà emessa** dal nostro campione
- ✓ fornirà la **misura diretta dei nuclei instabili** ad un certo tempo
- ✓ permetterà **l'identificazione del nucleo radioattivo**

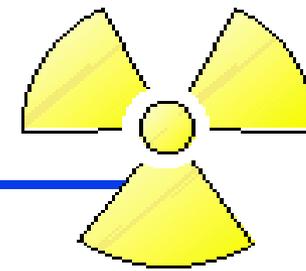


Utilizzando **un nucleo radioattivo a vita lunga** e **contando i decadimenti**

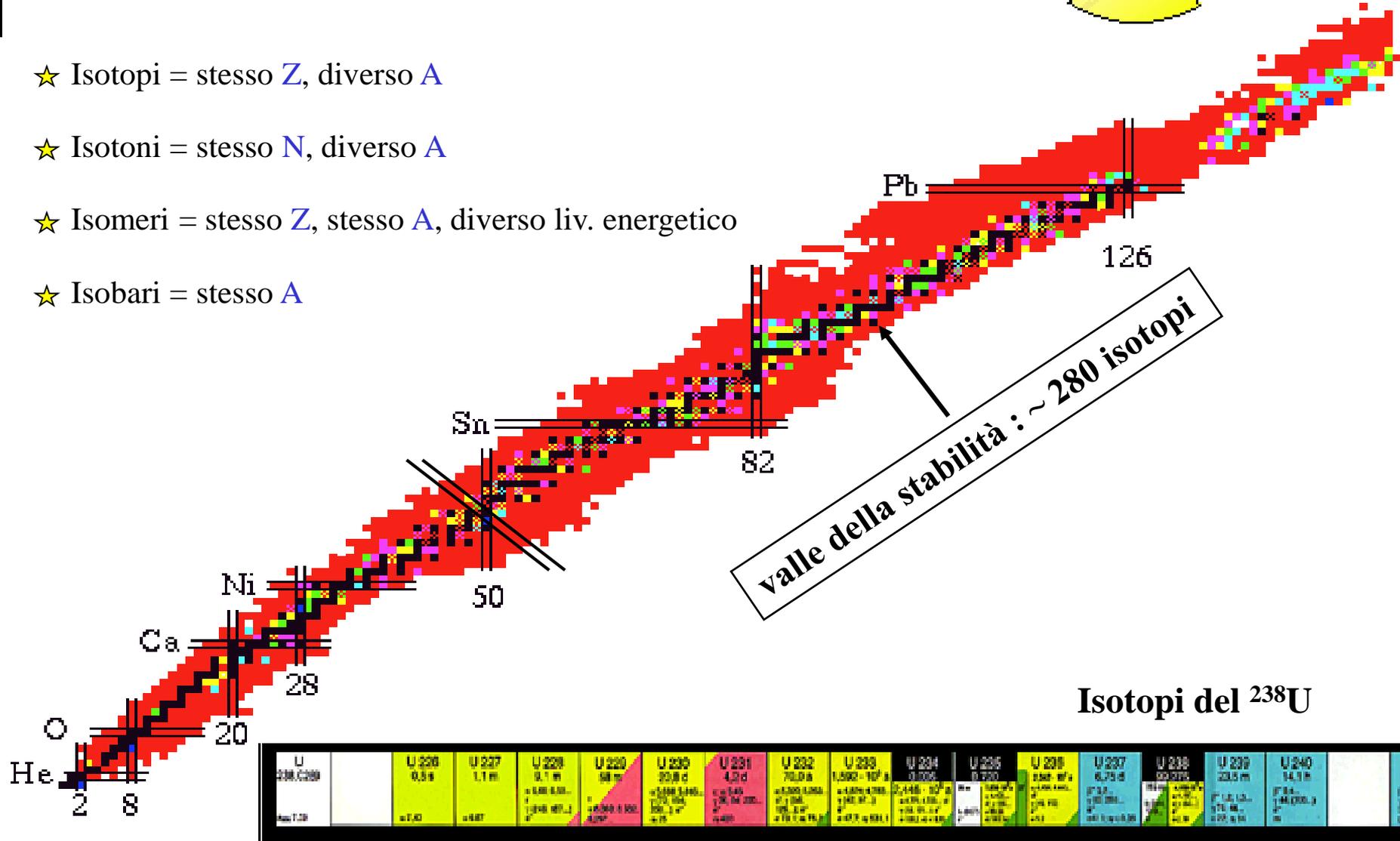
Si ha **un orologio "statistico"** basato sul numero **medio** di **decadimenti nell'unità di tempo**

Più **la sorgente di radioattività è intensa** e più **statisticamente** sarà preciso il nostro orologio

La carta dei nuclidi



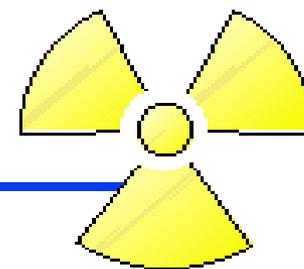
- ★ Isotopi = stesso Z , diverso A
- ★ Isotoni = stesso N , diverso A
- ★ Isomeri = stesso Z , stesso A , diverso liv. energetico
- ★ Isobari = stesso A



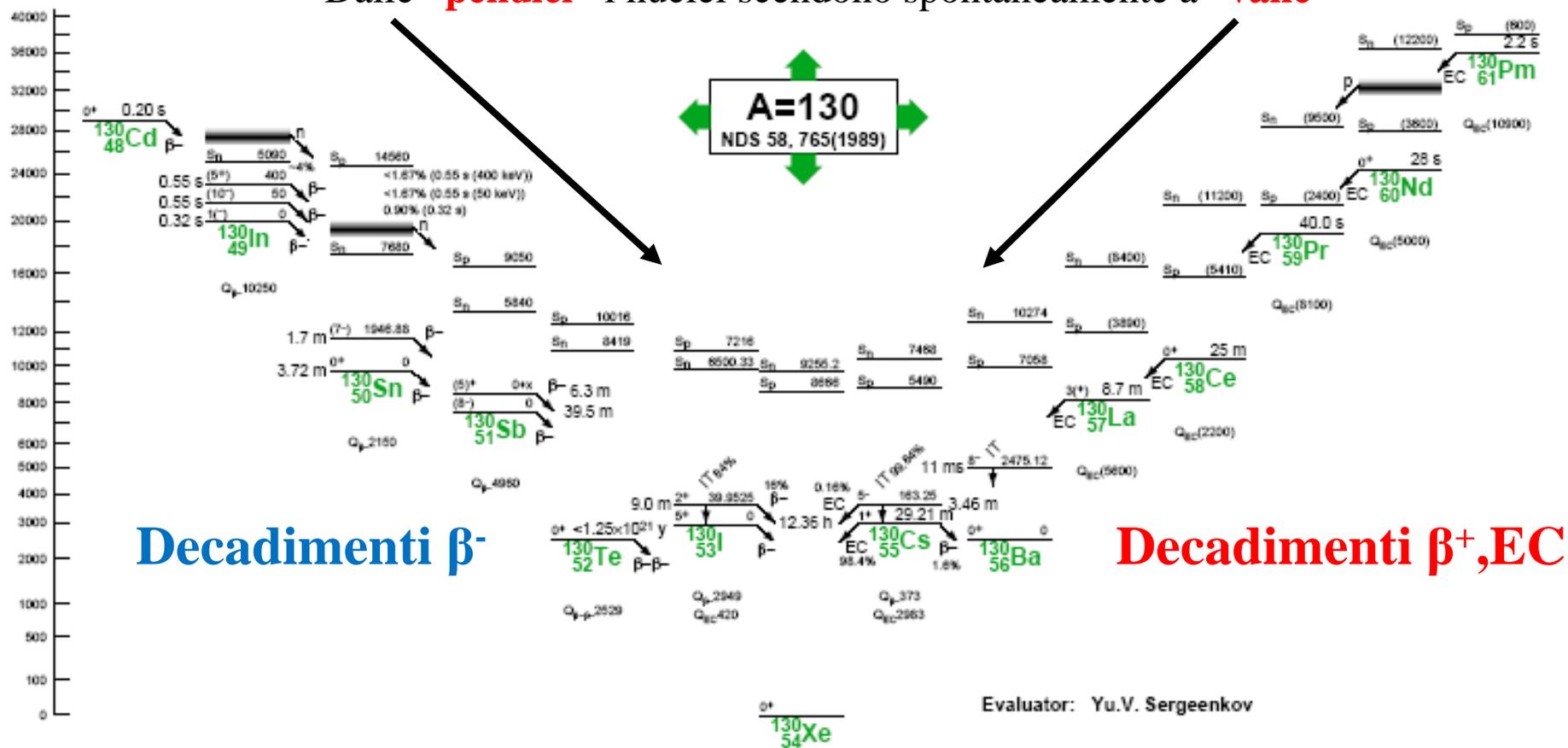
Isotopi del ^{238}U

U 238, 4.510 a	U 236 0.5 s	U 237 1.1 m	U 238 4.468 a	U 239 59 m	U 240 14.1 h	U 241 4.54 a	U 242 70.3 a	U 243 4.81 a	U 244 2.455 a	U 245 70.3 d	U 246 23.42 d	U 247 17.44 d	U 248 4.468 a	U 249 14.1 h	U 250 14.1 h	U 251 14.1 h	U 252 14.1 h	U 253 14.1 h	U 254 14.1 h	U 255 14.1 h	U 256 14.1 h	U 257 14.1 h	U 258 14.1 h	U 259 14.1 h	U 260 14.1 h	U 261 14.1 h	U 262 14.1 h	U 263 14.1 h	U 264 14.1 h	U 265 14.1 h	U 266 14.1 h	U 267 14.1 h	U 268 14.1 h	U 269 14.1 h	U 270 14.1 h	U 271 14.1 h	U 272 14.1 h	U 273 14.1 h	U 274 14.1 h	U 275 14.1 h	U 276 14.1 h	U 277 14.1 h	U 278 14.1 h	U 279 14.1 h	U 280 14.1 h
-------------------	----------------	----------------	------------------	---------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	------------------	-----------------	------------------	------------------	------------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------	-----------------

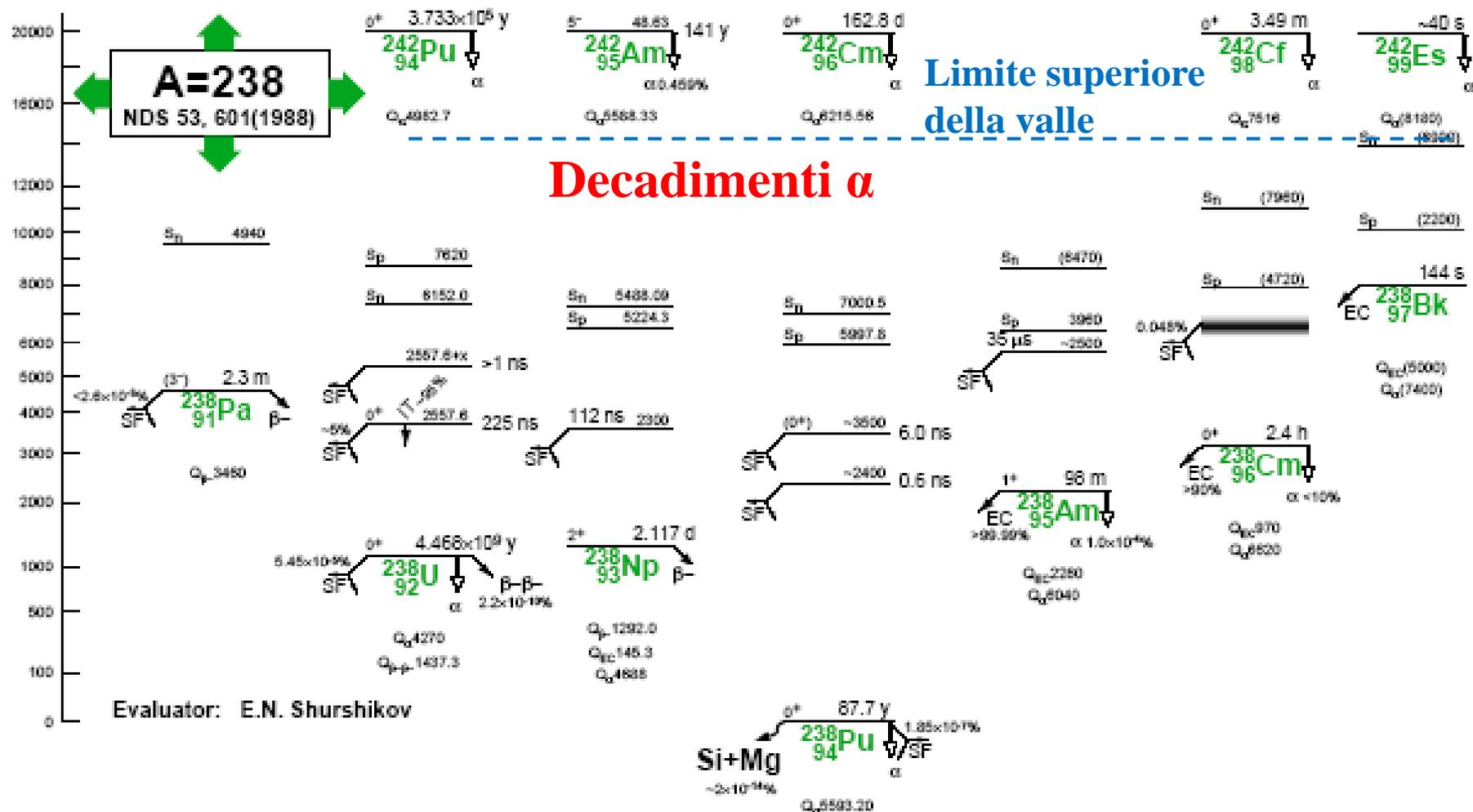
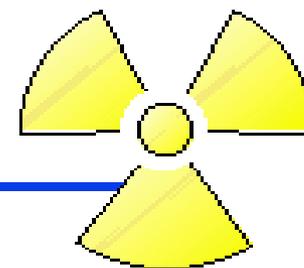
Schema dei livelli per A = 130



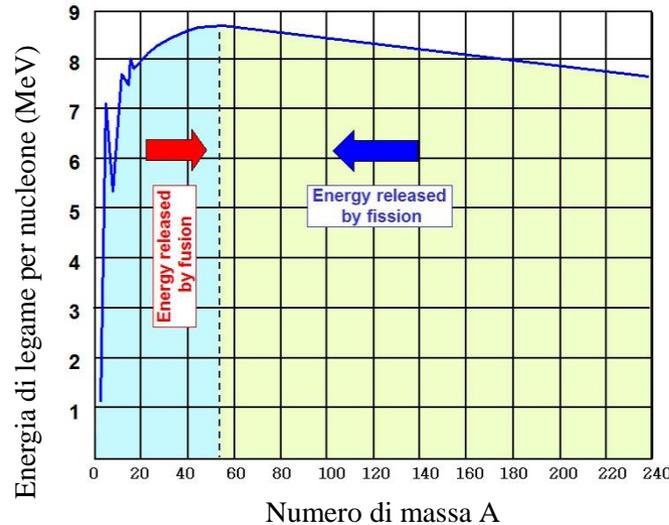
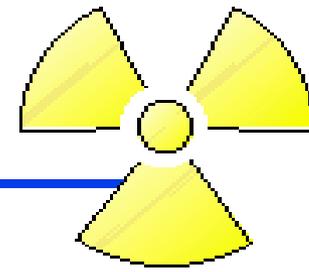
Dalle “pendici” i nuclei scendono spontaneamente a “valle”



Schema dei livelli per A = 238



Perchè esistono così tanti nuclei?



L'andamento **dell'energia di legame per nucleone** mostra che **il meccanismo di fusione** vale solo **fino al Fe**.



I nuclei di grande massa non sono stati prodotti quindi **all'interno del normale ciclo delle stelle**.

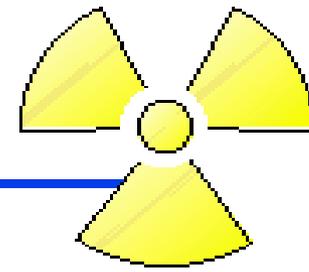
Quale è allora **l'origine** del nostro **Sistema Solare**?

Per produrre **nuclei molto pesanti** (fino $A=238$) servono **reazioni nucleari molto complesse**come quelle che avvengono durante **"l'esplosione" di una stella!!!**



Il nostro **Sistema Solare** nasce quindi sui resti **dell'esplosione di una stella molto massiva** che ha prodotto **i nuclei pesanti** che noi oggi osserviamo **sulla crosta terrestre**.

Quando è avvenuta l'esplosione?



Essendosi formati **tutti i nuclei** possiamo utilizzare **l'orologio radioattivo** per fare una stima.

$${}^{232}\text{Th} - T = 1.40 \cdot 10^{10} \text{ anni}$$

$${}^{235}\text{U} - T = 7.04 \cdot 10^8 \text{ anni}$$

$${}^{238}\text{U} - T = 4.47 \cdot 10^9 \text{ anni}$$

Sono tutti **radionuclidi fossili**, cioè presenti nel **Sistema Solare** fin dalla sua formazione

Si sono però **formati nello stesso istante** e **presumibilmente con concentrazioni uguali**

Le **concentrazioni attuali** sono però molto diverse e causa **del decadimento radioattivo**.

Ad esempio **a.i.({}^{238}\text{U}) = 99.27%** mentre **a.i.({}^{235}\text{U}) = 0.72%**, che ci porta a scrivere:

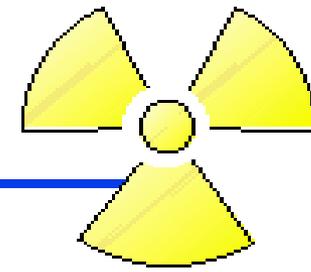
$$0.72\% = \frac{a.i.({}^{235}\text{U})}{a.i.({}^{235}\text{U}) + a.i.({}^{238}\text{U})} = \frac{1/2^{t/T_{235}}}{1/2^{t/T_{235}} + 1/2^{t/T_{238}}}$$

Con un po' **di algebra** e utilizzando **i valori dei tempi di dimezzamento** riportati otteniamo

$$t_{\text{SuperNova}} \approx 6 \text{ miliardi di anni}$$

Un risultato analogo si ottiene utilizzando il rapporto di concentrazione $\text{Th}/\text{U} \approx 3$

...e il Sistema Solare?



type of radiation	nuclide	half-life
α	uranium-238	4.47 billion years
β	thorium-234	24.1 days
β	protactinium-234m	1.17 minutes
α	uranium-234	245000 years
α	thorium-230	75380 years
α	radium-226	1600 years
α	radon-222	3.823 days
α	polonium-218	3.05 minutes
β	lead-214	26.8 minutes
β	bismuth-214	19.7 minutes
α	polonium-214	0.000164 seconds
β	lead-210	22.3 years
β	bismuth-210	5.01 days
α	polonium-210	138.4 days
	lead-206	stable

Vista la scala **dei tempi trovata** si può pensare di analizzare **la catena radioattiva del ^{238}U**

L' ^{238}U passa attraverso **13 decadimenti radioattivi** per raggiungere la **valle di stabilità** in corrispondenza del ^{206}Pb

Misurando quindi quanto ^{206}Pb **si è prodotto** partendo dal ^{238}U possiamo determinare **quanto tempo è trascorso**

ma.....

La **catena radioattiva** deve mantenersi **all'equilibrio secolare**

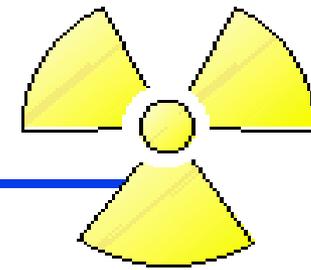
cioè.....

$$A_{^{238}\text{U}} = A_{^{234}\text{Th}} = \dots\dots\dots = A_{^{210}\text{Bi}} = A_{^{210}\text{Po}}$$

Si devono utilizzare **rocce antiche** rimaste **stabili dall'origine**

Da misure di **rocce lunari** si ottiene **~ 4.6 miliardi di anni**

...e se la catena si “rompe”?



type of radiation	nuclide	half-life
α	uranium-238	4.47 billion years
β	thorium-234	24.1 days
β	protactinium-234m	1.17 minutes
α	uranium-234	245000 years
α	thorium-230	75380 years
α	radium-226	1600 years
α	radon-222	3.823 days
α	polonium-218	3.05 minutes
β	lead-214	26.8 minutes
β	bismuth-214	19.7 minutes
α	polonium-214	0.000164 seconds
β	lead-210	22.3 years
β	bismuth-210	5.01 days
α	polonium-210	138.4 days
	lead-206	stable

L'equilibrio secolare si raggiunge dopo circa **5-10 tempi di dimezzamento del nucleo figlio a vita più lunga** (^{234}U)

L'azione di **agenti fisici e chimici** su tempi lunghi può separare parte della catena radioattiva.

Il Ra è metallo alcalino e l'acqua lo può “sciogliere”

Il Rn è un gas nobile e può “degasare” dai materiali

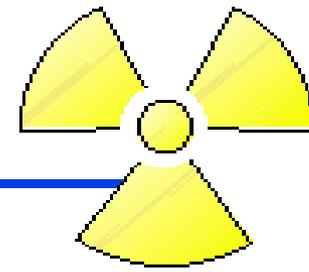
Il Pb è un metallo basso fondente che può essere “sciolto”

La rottura dell'equilibrio secolare porta quindi alla formazione di nuove catene dove però il “capostipite” ha tempi di dimezzamento ben diversi da ^{238}U

e.....

Questo vale per tutte le catene radioattive naturali oggi presenti in natura: ^{232}Th , ^{235}U e ^{238}U

Tempo archeologico.....



Circa 30 anni fa vennero trovati, al largo delle coste della Sardegna (Isola di Mal di Ventre), i resti di una **nave oneraria Romana**, che **trasportava lingotti di Piombo**



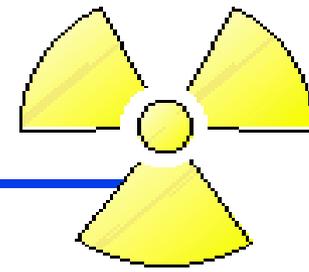
Se **effettivamente era Romana**, non ci doveva essere **radioattività residua** da ^{210}Pb ($T \sim 22$ anni)

Una misura di elevata sensibilità dimostrò che:

$$A(^{210}\text{Pb} - \text{Lingotti}) < 10^{-6} * A(^{210}\text{Pb} - \text{Piombo Moderno})$$

Quindi **l'età di quei lingotti** doveva essere **di oltre 500/600 anni**

...si può essere più precisi?



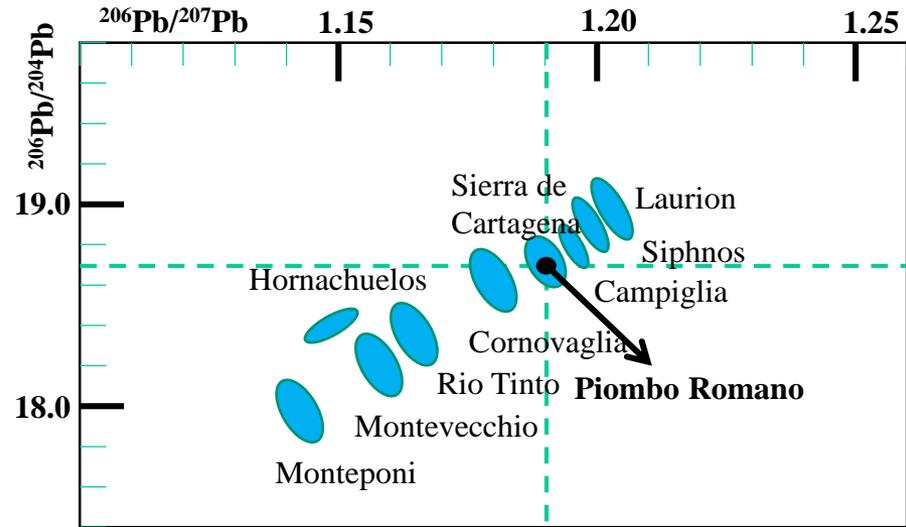
Il piombo presenta quattro isotopi principali:

- ^{204}Pb di origine fossile
- ^{206}Pb prodotto dalla catena del ^{238}U
- ^{207}Pb prodotto dalla catena del ^{235}U
- ^{208}Pb prodotto dalla catena del ^{232}Th

Spettrometria di massa
Misura rapporti isotopici



A seconda della sua **storia geologica** ogni miniera avrà **rapporti isotopici differenti**



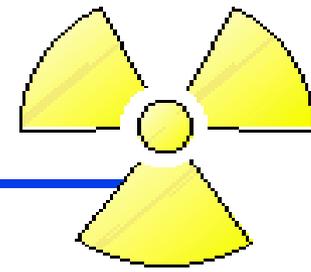
Misura indiretta del tempo di un **evento storico**



Con misure di precisione si conclude che il piombo:

- **Proveniva dalla Spagna** (contraddicendo molti archeologi)
- **Requisito dai romani** a seguito **di una rivolta**
- Prodotto dalle **fonderie Spagnole attorno al 80 A.C.**

Radioattività cosmogenica



I Raggi Cosmici sono **Particelle di Origine Cosmica** che colpiscono **l'atmosfera terrestre**.

Escludendo il vento solare $10^9 \text{ eV} < E < 10^{20} \text{ eV}$

Sono composte da circa: **90% p**, **9% α** , **1% altri nuclei**

Nell'atmosfera **si trasformano in altre particelle** e **si moltiplicano in sciami variegati** a seguito **di reazioni nucleari**

A terra arrivano principalmente **muoni (75%)** in quanto essendo **particelle ultra-relativistiche** il tempo nel loro sistema di riferimento **NON** scorre allo **stesso ritmo del nostro**

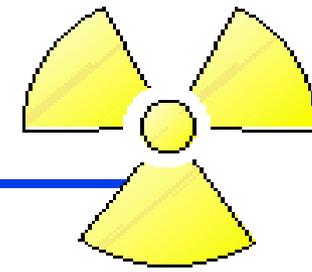
Il flusso totale che osserviamo a terra è di $\sim 100 \mu /(\text{m}^2 \text{ srad})$

Particelle di alta energia producono **reazioni nucleari** varie

Due tra le più interessanti sono:



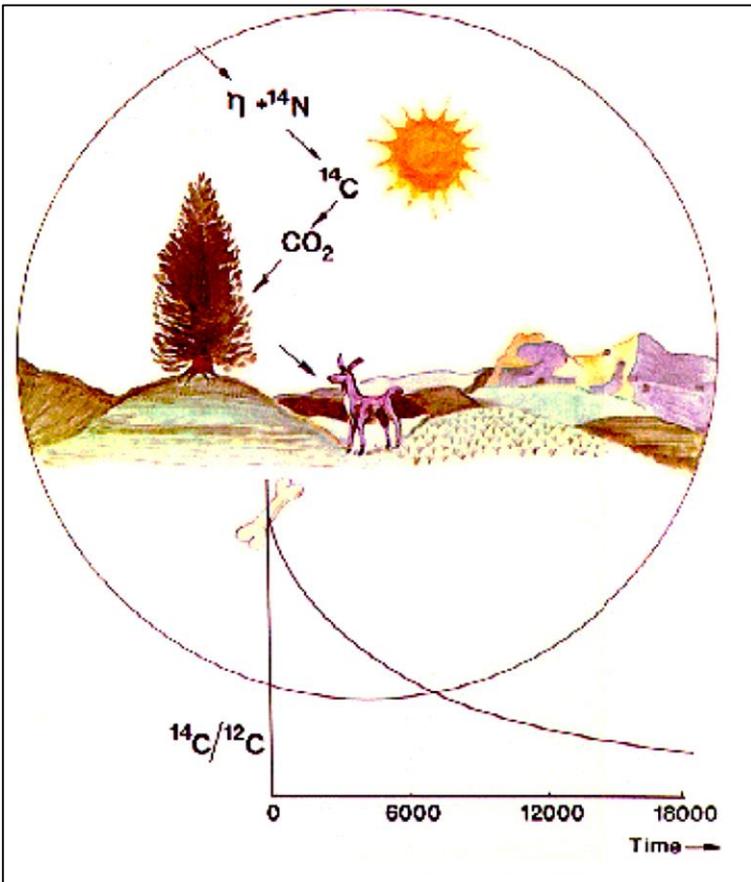
Datazione Radio-Carbonio



Supponendo costante il flusso di Raggi Cosmici



Costante produzione di ^{14}C
 $T(^{14}\text{C}) = 5730$ anni



Il carbonio entra nel ciclo della CO_2
E quindi nel metabolismo delle piante e degli animali
Per cui una parte del C negli esseri viventi è ^{14}C

Fintanto che la pianta o l'animale sono vivi

$$\frac{^{14}\text{C}}{^{12}\text{C}} = \text{costante}$$

Quando l'essere vivente muore il ^{14}C decade senza essere più rimpiazzato dal nutrimento

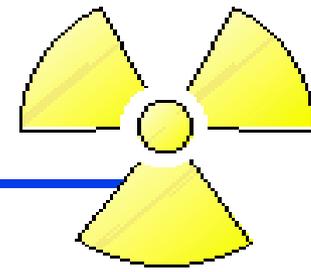
Dalla misura $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ si può risalire alla data della morte

In base al suo tempo di dimezzamento il ^{14}C permette di risalire fino a circa 50/60 mila anni



Uomo SI – Dinosaurio NO

...e in futuro



L'impatto delle attività umane fortemente influenza e modifica il mondo in cui viviamo
Con “**Antropocene**” si identifica un'era in cui è **l'uomo e non più la terra** l'elemento scatenante

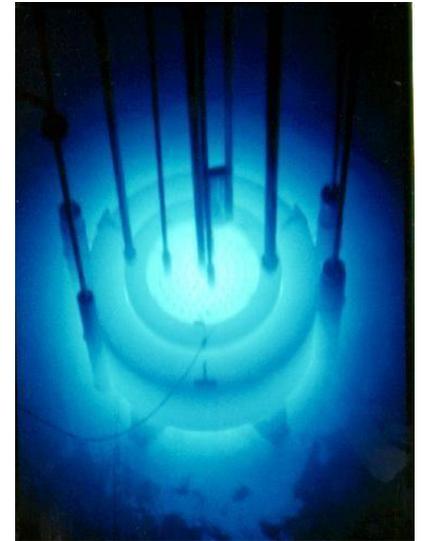
Quali **conseguenze** ci aspettiamo sull'utilizzo degli “orologi radioattivi” in futuro



L'utilizzo di **combustibili fossili** ha alterato il rapporto **$^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ in atmosfera**

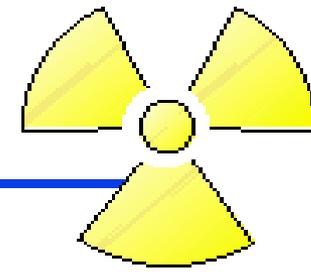


Bombe e reattori introducono **nuovi isotopi** e inducono nuove reazioni (es. più ^{14}C)



L'uso del **Radio-Carbonio** in futuro non è così scontato!

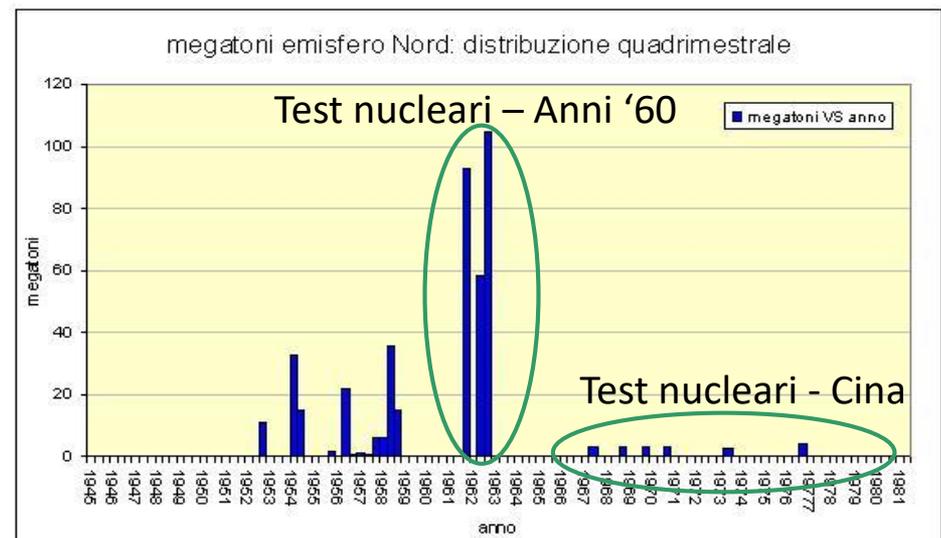
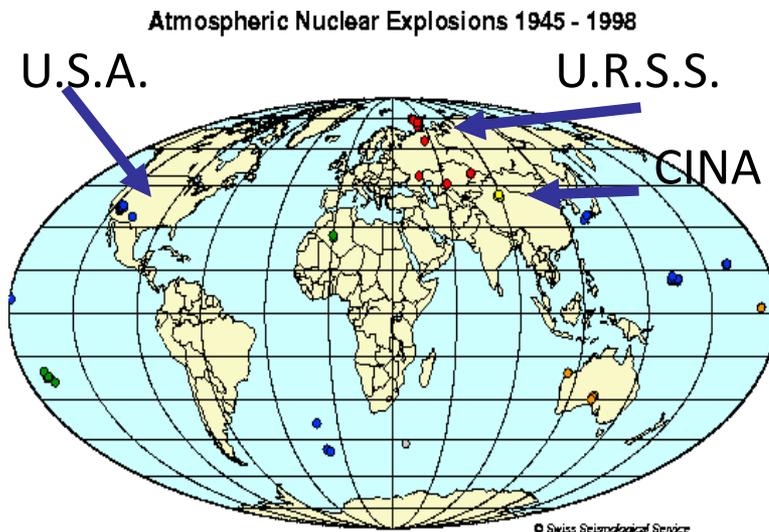
Si può sfruttare la situazione?



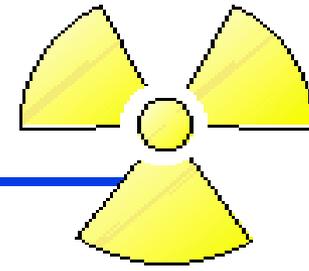
Negli ultimi 100 anni l'uomo ha introdotto **elementi che non esistevano** in naturama allora possiamo utilizzarli **come traccianti**.....

Negli **studi Glaciologici/Climatologici** è importante datare il profilo **delle carote di ghiaccio** estratte dai ghiacciai

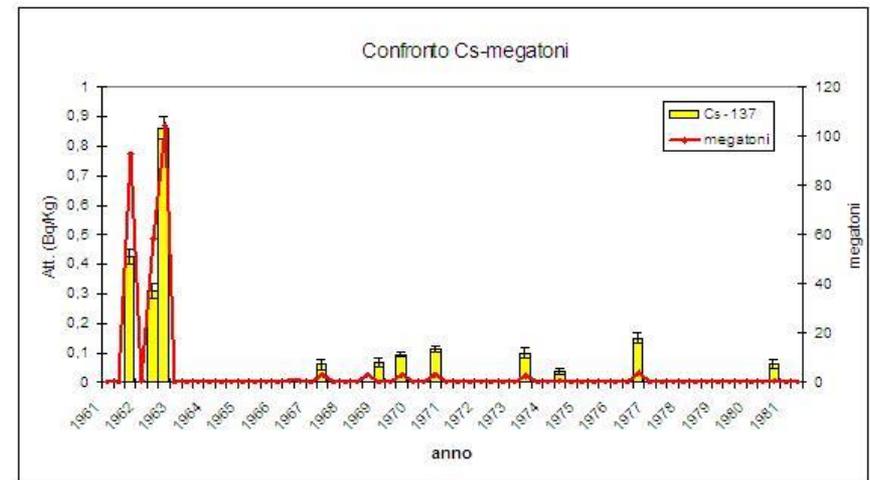
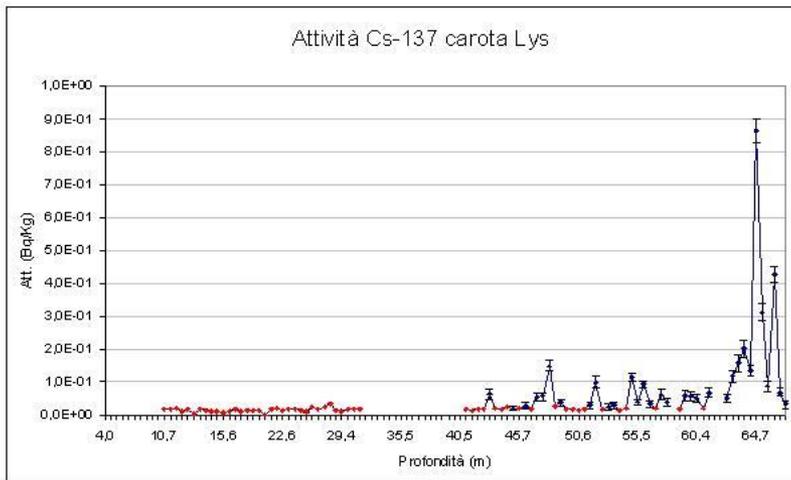
E' necessario individuare **eventi temporalmente identificabili**
Per le **carote di ghiaccio alpine** si possono sfruttare **le ricadute radioattive da esplosioni termonucleari in atmosfera**



Si può misurare il fall-out....



La ricaduta **al suolo (fall out)** delle esplosioni nucleari è composta **da molti isotopi radioattivi**
In particolare l'isotopo ^{137}Cs ha un $T \sim 30$ anni ed è facilmente identificabile nella misure



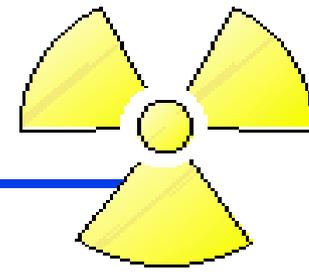
Dalla correlazione tra **le esplosioni termonucleari** e **la concentrazione di ^{137}Cs** nelle carote di ghiaccio alpino è possibile datarle con **una precisione di alcuni mesi su circa 60 anni.**

Elementi con **tempi di dimezzamento brevi** hanno **attività specifiche superiori (A/m)**



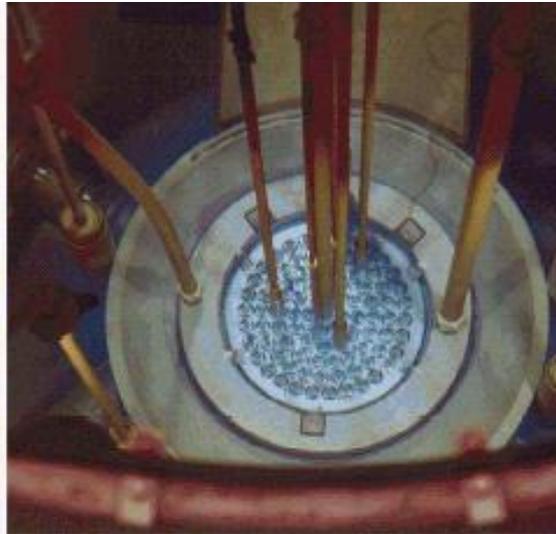
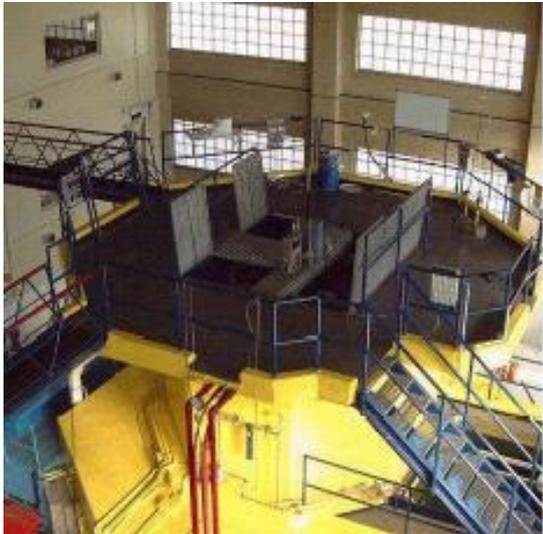
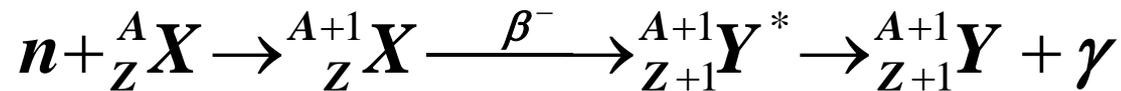
Sensibilità di misura più elevate – $A = N/\tau$

Analisi per attivazione



Aumentando l'**attività specifica** è possibile aumentare la **sensibilità di misura**

- ✓ Il bombardamento con **neutroni** produce nuclei radioattivi
- ✓ **Tramite spettroscopia** si misurano i nuclei radioattivi prodotti
- ✓ L'analisi del campione non è distruttiva
- ✓ **Elevata sensibilità di misura** anche su piccoli campioni per nuclei con **T brevi**

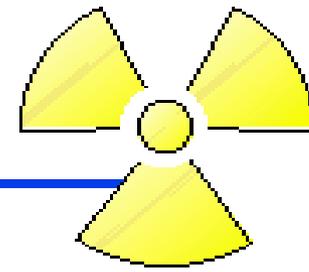


La tecnica risulta molto potente
Ma richiede grandi flussi di n

Sorgente di neutroni:
Reattore Nucleare di Ricerca

← **Reattore Triga MARK II**
Università degli Studi di Pavia

Studio di un evento storico.....



Chi ha ucciso Napoleone Bonaparte?

Forshufvud, nel 1960, ipotizza **avvelenamento cronico da As**

Alcuni sintomi potevano essere interpretati con assunzione di As

Nel 1840 il cadavere riesumato era in perfetto stato di conservazione
questo sarebbe giustificabile con pesanti assunzioni di As

Napoleone aveva sicuramente molti nemici che lo volevano morto

Gen. Lowe capo della guarnigione a S. Elena

Dr. Antommarchi medico di Napoleone

Conte di Motolon, geloso di Napoleone per la moglie

Marchand e altri attendenti francesi inchiodati a Sant'Elena

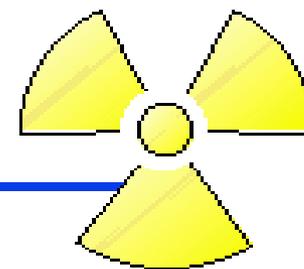


L'assunzione di As da parte di Napoleone è sempre stata legata all'avvelenamento

**5 Maggio 1821
Napoleone Muore**

Da quella prima ipotesi tutta una serie di studi e analisi sono stati effettuati utilizzando **i capelli tagliati da Marchand a Napoleone dopo la sua morte**

Verifica dell'ipotesi veleno



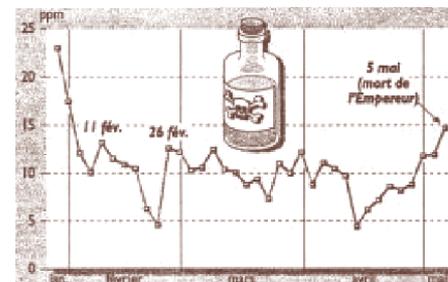
Molti iniziano a indagare l'ipotesi di Forshufvud

Si coinvolgono **esperti patologi**

Si utilizzano **varie tecniche di misura**

NAA Harwell

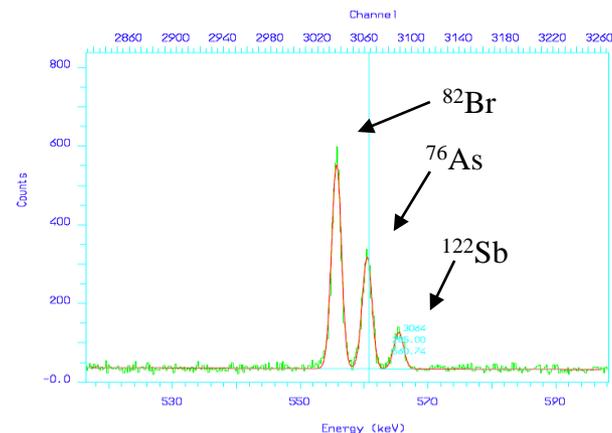
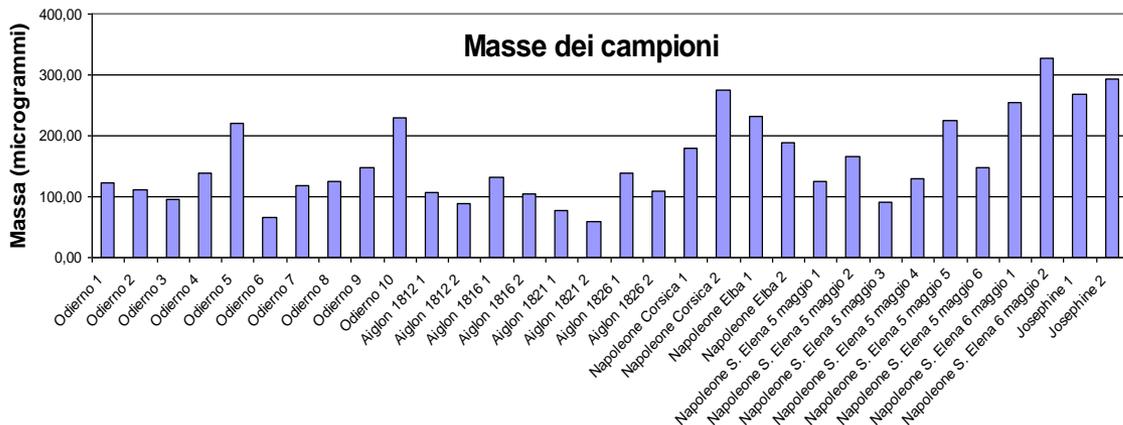
AAS FBI



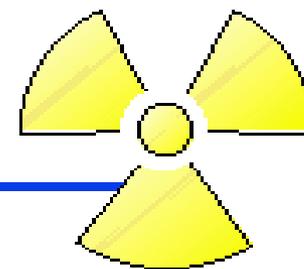
L'analyse du cheveu n°3 de l'Empereur.

Una decina di anni fa (per un caso fortuito) **anche MiB si occupa del caso**

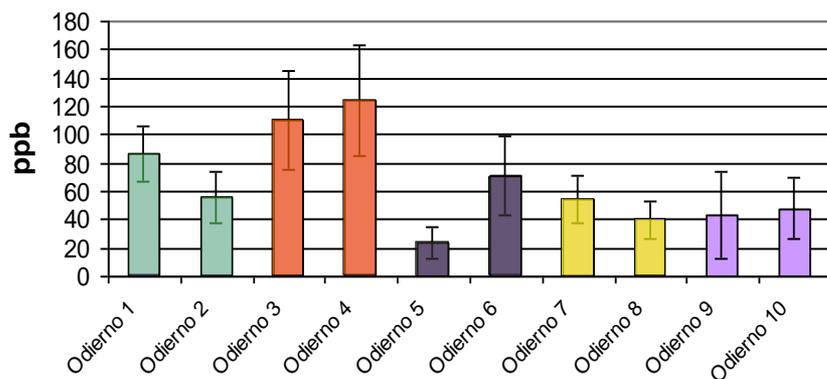
- si reperiscono **capelli di Napoleone a differenti età**
- si ottengono anche **capelli del figlio e della moglie**
- i musei ci forniscono i campioni a patto **che non vengano distrutti**
- la misura è molto difficile perchè **la massa del capello è piccola**



Misura della concentrazione di As

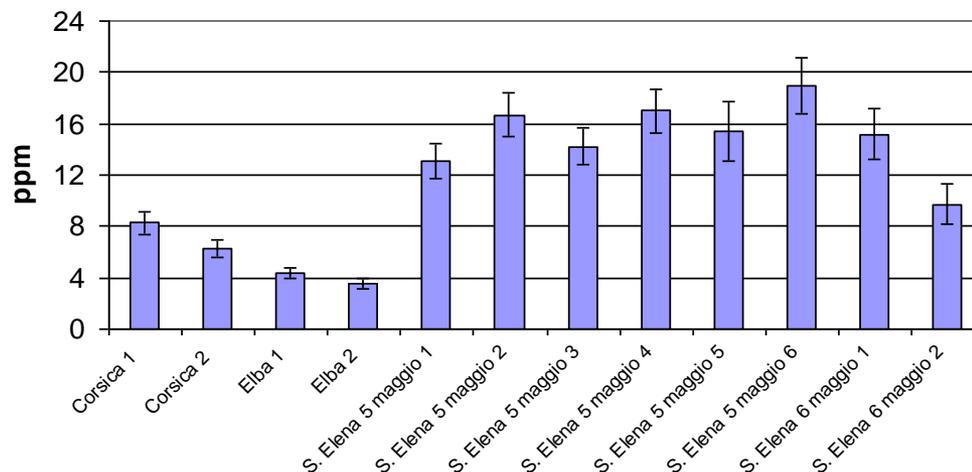


Contaminazione As capelli odierni



Sono stati misurati capelli odierni per riscontro
Il livello medio è inferiore a 100 ppb

Contaminazione As Napoleone



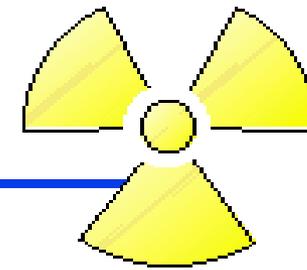
Sono stati misurati i capelli di:

- Napoleone bambino ad Ajaccio
- Napoleone in esilio all'Elba
- Napoleone in esilio a Sant'Elena

La concentrazione media di As nei capelli di Napoleone è **100 volte superiore ad oggi (10 ppm)**
Non si osservano però variazioni di rilievo **nelle varie fasi della vita dell'Imperatore**
Le misure sui capelli dei suoi familiari ci danno **risultati completamente confrontabili**

Questi risultati non sono compatibili con l'ipotesi di avvelenamento da As

...dopo molto tempo (200 anni)...



The New York Times

Science

Hair Analysis Deflates Napoleon Poisoning Theories

By WILLIAM J. BROAD
Published June 10, 2008

Was [Napoleon](#) poisoned?

 [Enlarge This Image](#)



Bild: rchiv Preussischer Kulturbesitz

NEW EVIDENCE Napoleon may not have died of arsenic.

RSS Feed

• [Get Science News From The New York Times »](#)

For decades, scholars and scientists have argued that the exiled dictator, who died in 1821 on the remote island of St. Helena in the South Atlantic, was the victim of arsenic, whether by accident or design.

The murder theory held that his British captors poisoned him; the accident theory said that colored wallpaper in his bedroom contained an arsenic-based dye that mold transformed into poisonous fumes.

The evidence behind both theories was that scientists had found arsenic in hairs from Napoleon's head, which diminished the idea that he had died of [stomach cancer](#). Arsenic is highly toxic, and its poisoning symptoms include violent stomach pains.

"There is nothing improbable about the hypothesis of arsenic poisoning," wrote Frank McLynn in "Napoleon: A Biography" (Arcade, 2002). "Science gives it rather more than warranted assertibility."

But now, a team of scientists at Italy's National Institute of Nuclear Physics in Milan-Bicocca and Pavia has uncovered strong evidence to the contrary. They conducted a detailed analysis of hairs taken from Napoleon's head at four times in his life — as a boy in Corsica, during

his exile on the island of Elba, the day he died on St. Helena, at age 51, and the day afterward — and discovered that the arsenic levels underwent no significant rises.

Casting a wide net, the scientists also studied hairs from his son, Napoleon II, and his wife, Empress Josephine. Here, too, they found that the arsenic levels were similar and uniformly high.

SIGN IN TO E-MAIL OR
SAVE THIS

 PRINT

 REPRINTS

 SHARE

ARTICLE TOOLS

SPONSORED BY

CLICK FOR

WIDGET

.....si chiude un importante capitolo della storia

Il cinque maggio

.....e i dì nell'ozio
chiuse in sì breve sponda,
segno d'immensa invidia
e di pietà profonda,
d'instinguibil odio
e d'indomato amor.

....e anche la mia storia sul
tempo finisce qui!