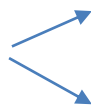


Radioattività ambientale

Radioattività ambientale

Radiazioni direttamente e indirettamente ionizzanti



Radiazione con energia sufficiente a liberare elettroni da atomi o molecole

Direttamente: particelle cariche

Indirettamente: particelle elettricamente neutre

Radioattività ambientale:

- **Radioattività naturale**
 - *Radionuclidi fossili*
 - *Radionuclidi secondari*
- **Radioattività artificiale**
- **Radiazioni di origine cosmica**
 - *Raggi cosmici primari e secondari*
 - *Radioattività cosmogenica*



Le famiglie radioattive naturali

Da discussione su catene radioattive
in 3 - Decadimenti radioattivi

In natura si trovano 3 (di 4) capostipiti di famiglie radioattive:

decadimento α cambia A di 4
mentre β non cambia A

Gruppo di nuclidi radioattivi connessi tra loro da
cascate di decadimenti

${}^{238}_{92}\text{U}$	$\tau = 4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$	serie: $A=4n+2$	nucleo finale (stabile):	${}^{206}\text{Pb}$
${}^{232}_{90}\text{Th}$	$\tau = 1,4 \cdot 10^{10} \text{ y}$	$A=4n$		${}^{208}\text{Pb}$
${}^{235}_{92}\text{U}$	$\tau = 7,13 \cdot 10^8 \text{ y}$	$A=4n+3$		${}^{207}\text{Pb}$
${}^{233}_{93}\text{Np}$	$\tau = 2 \cdot 10^6 \text{ y}$	$A=4n+1$		${}^{205}\text{Tl}$ e non ${}^{209}\text{Bi}$

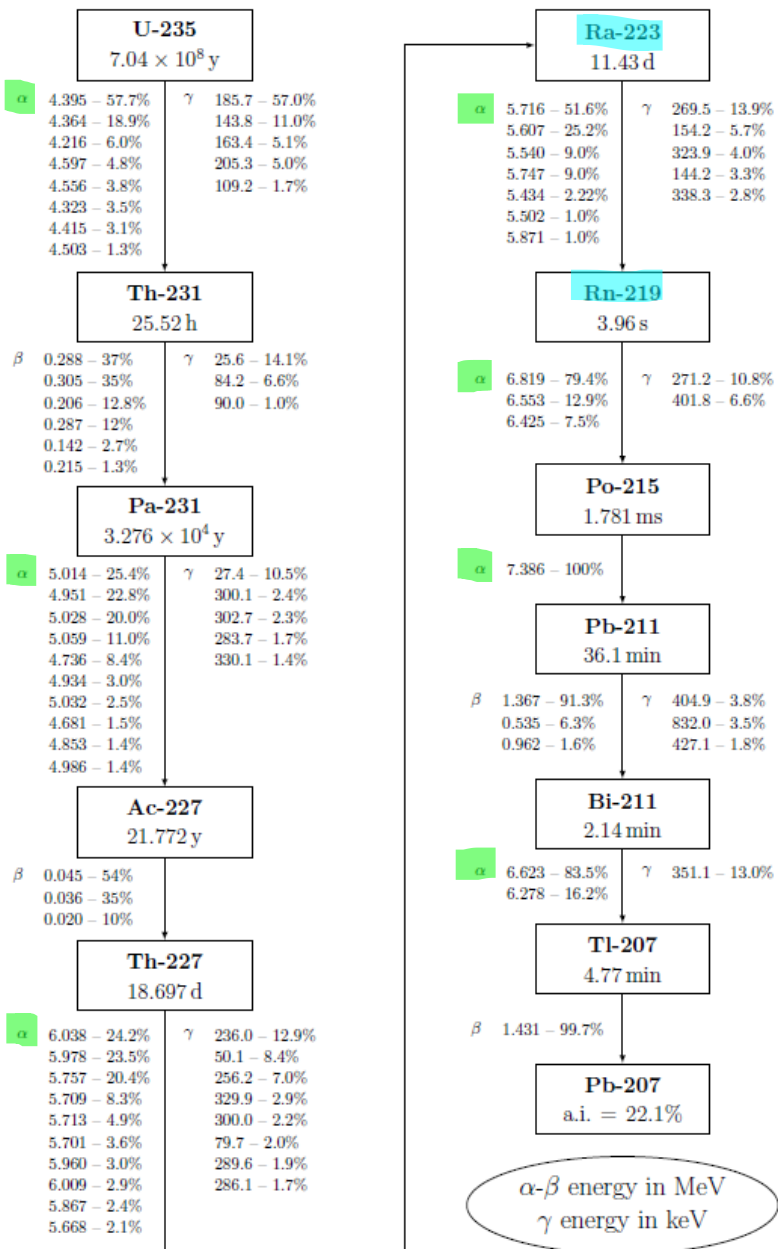
Non presente in natura (artificiale) perché
molto più veloce

La terra si è formata da $\sim 4,5 \cdot 10^9 \text{ y}$ (Big Bang $\sim 1,5 \cdot 10^{10} \text{ y}$)

Elementi pesanti decadono mentre elementi leggeri (H, He, ...) producono
elementi più pesanti nei processi nucleari nelle stelle

Dato che $\tau_{\text{capostipite}} \gg \tau_{\text{figli}}$ spesso le famiglie sono in **EQUILIBRIO SECOLARE**

Le famiglie radioattive – ^{235}U



Nelle catene radioattive:

- Considerazioni analoghe a ^{238}U
- La rottura dell'equilibrio secolare è meno probabile nella catena dell' ^{235}U perché i tempi di decadimenti del ^{223}Ra e ^{219}Rn sono molto più brevi

a.i. (^{238}U) = 99.3 %

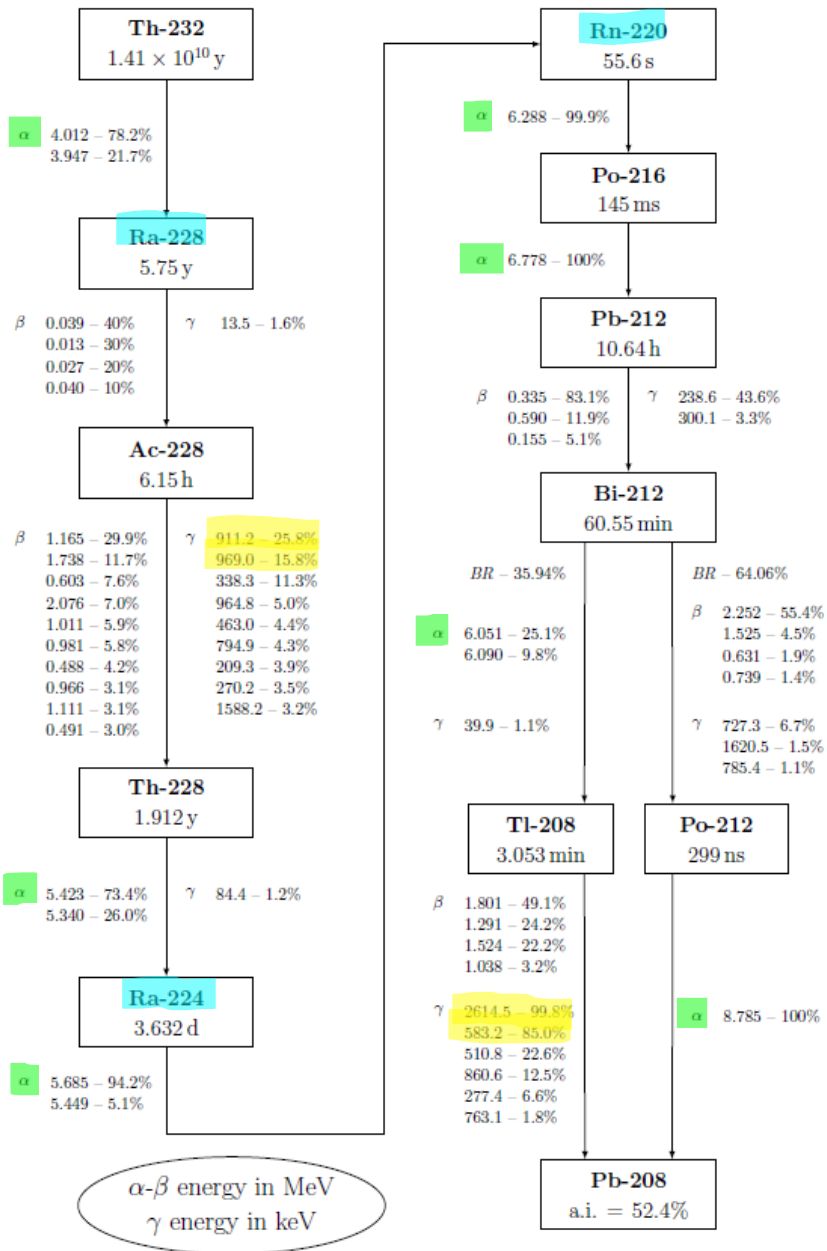
a.i. (^{235}U) = 0.7 %



In base alle abbondanze isotopiche e conoscendo i tempi di decadimento è possibile stimare (in modo approssimativo) quando è stato prodotto l'uranio (e gli altri nuclei pesanti) presenti in natura

- L'uranio si trova in natura (suolo, rocce, alimenti) e quindi nel nostro corpo ($\sim Bq$)

Le famiglie radioattive – ^{232}Th



Nelle catene radioattive:

- Considerazioni analoghe a U
- Essendo il ^{232}Th il capostipite con vita più lunga si ha che gli isotopi appartenenti a questa catena sono quelli con attività maggiore in natura

Se $A(^{228}\text{Ac}) = A(^{208}\text{Tl})$ allora catena all'equilibrio tra ^{228}Ra e ^{208}Tl ma non posso dire nulla ^{232}Th (perché $\tau_{1/2}(^{228}\text{Ra}) = 5.75$ y)

Le famiglie radioattive -

- I nuclidi delle catene decadono prevalentemente α
- Siccome per A grande si ha stabilità per $N/Z \approx 1,5$ per mantenere i nuclidi sulla fascia di stabilità β dovrebbero essere emessi 3 neutroni ogni 2 protoni

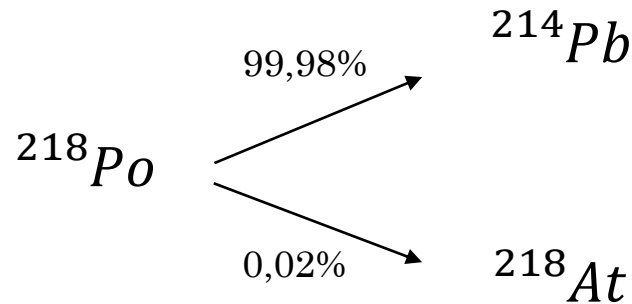


- I nuclidi si arricchiscono troppo in neutroni



Decadimenti β^-

- Alcuni nuclidi possono decadere sia α che β



- Le 3 catene naturali si concludono su un isotopo del Pb ($Z=82$, numero magico).
- In ogni catena vengono emessi, oltre a α e β , anche **svariati raggi γ** dato che molti **decadimenti avvengono su stati eccitati**.
- Ci sono alcuni punti critici in cui **l'equilibrio secolare si può rompere**.

Altri isotopi radioattivi presenti in natura

App. 27

Altre forme di radioattività naturale e artificiale facilmente osservabili:

- Altri nuclidi di lunga vita media fuori dalle catene
- ‘Fall-out’ \longrightarrow Particelle radioattive che vengono trasportate nell'atmosfera dopo un'esplosione o un incidente nucleare e gradualmente cadono come polvere o precipitazioni
- Esperimenti nucleari in atmosfera (anni 60)
- Chernobyl (fine anni 80)
- Produzione di nuclidi per applicazioni medico/industriali

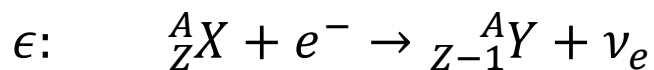
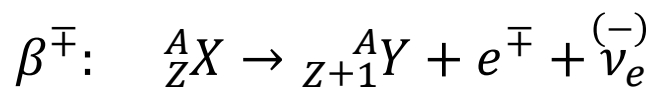
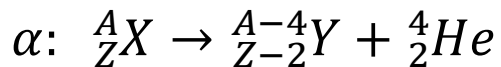
Isotopo	$\tau_{1/2}$ (y)
^{40}K	$1,28 \times 10^9$
^{113}Cd	9×10^{15}
^{115}In	$4,4 \times 10^{14}$
^{187}Re	5×10^{10}

Isotopo	$\tau_{1/2}$
^3H	12.3 y
^{131}I	8.04 d
^{129}I	1.57×10^7 y
^{137}Cs	30.17 y

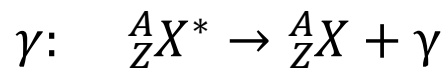
Isotopo	$\tau_{1/2}$	Decadimento	Applicazione
^{60}Co	5,26 y	γ	medicina, industria
^{55}Fe	2,73 y	EC	medicina, calibrazione
^{63}Ni	100 y	β^-	rivelatori a cattura elettronica
^{90}Sr	28 y	β^-	rivelatori a cattura elettronica
^{137}Cs	30 y	γ	medicina, industria
^{192}Ir	75 d	γ	medicina, industria
^{210}Po	138 d	α	antistatico
^{241}Am	458 y	α	antistatico, sensori di fumo, industria
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.03 h	γ	diagnostica clinica

Radioattività ambientale

Alcuni riferimenti **pratici** e **generali** delle energie e delle lunghezze di attenuazione per la radioattività ambientale:



← cattura elettronica



alle volte si può avere conversione interna in cui l'energia viene trasferita a elettrone atomico

γ dovuto al decadimento del ${}^{208}Tl$. Ad energie maggiori ci sono solo pochi γ (principalmente ${}^{214}Bi$) ma con B.R. molto bassi

Energie tipiche

4-8 MeV

<5 MeV

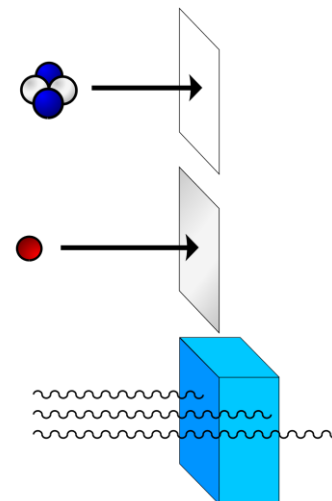
<2615 keV

Attenuazione in solidi (ordine di grandezza!!!)

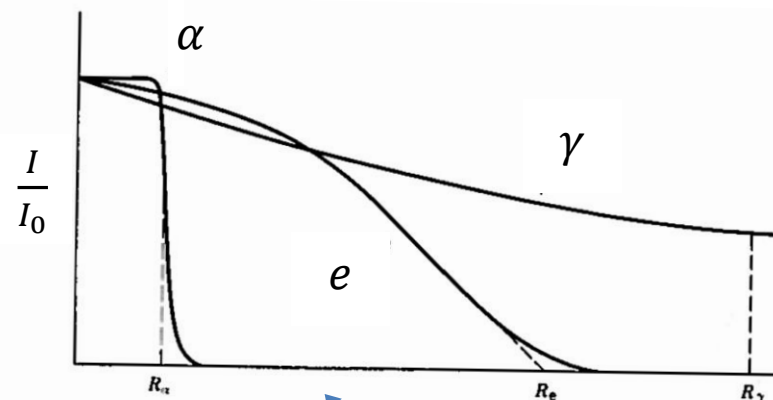
μm

mm

cm



un γ da 2615 keV in Pb percorre ~2cm



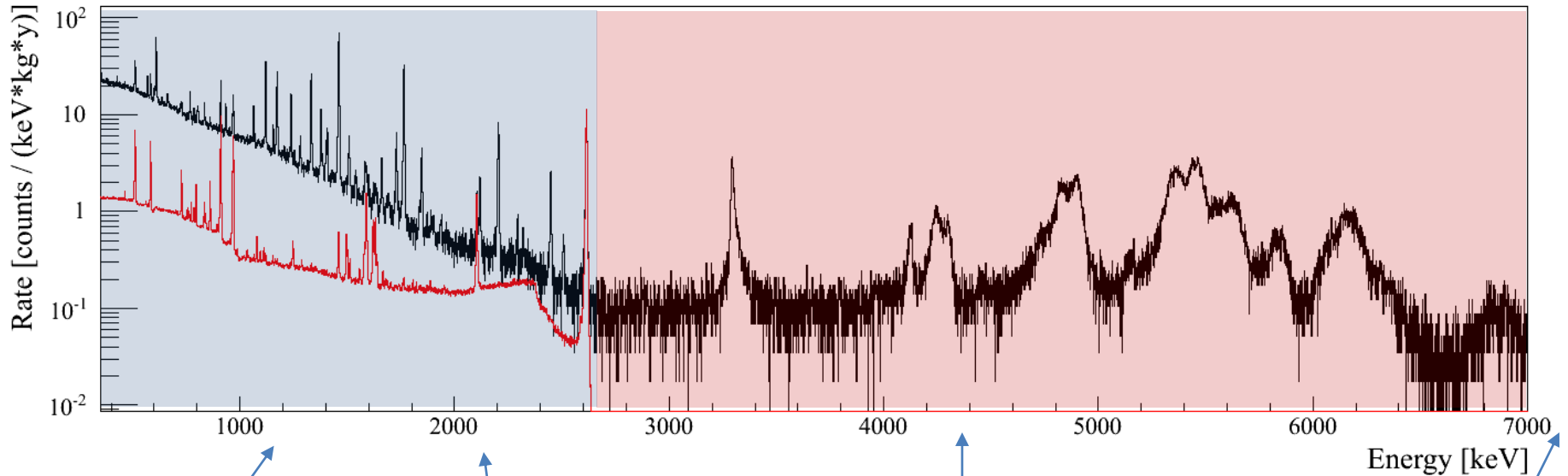
scala non lineare

Spettro energetico

'Tipico' spettro dovuto alla radioattività ambientale e spettro da sorgente di ^{232}Th

'Regione beta/gamma'

'Regione alfa'



Decadimenti gamma prodotti in materiali 'esterni'

Decadimenti alfa dovuti a contaminazioni interne al rivelatore stesso

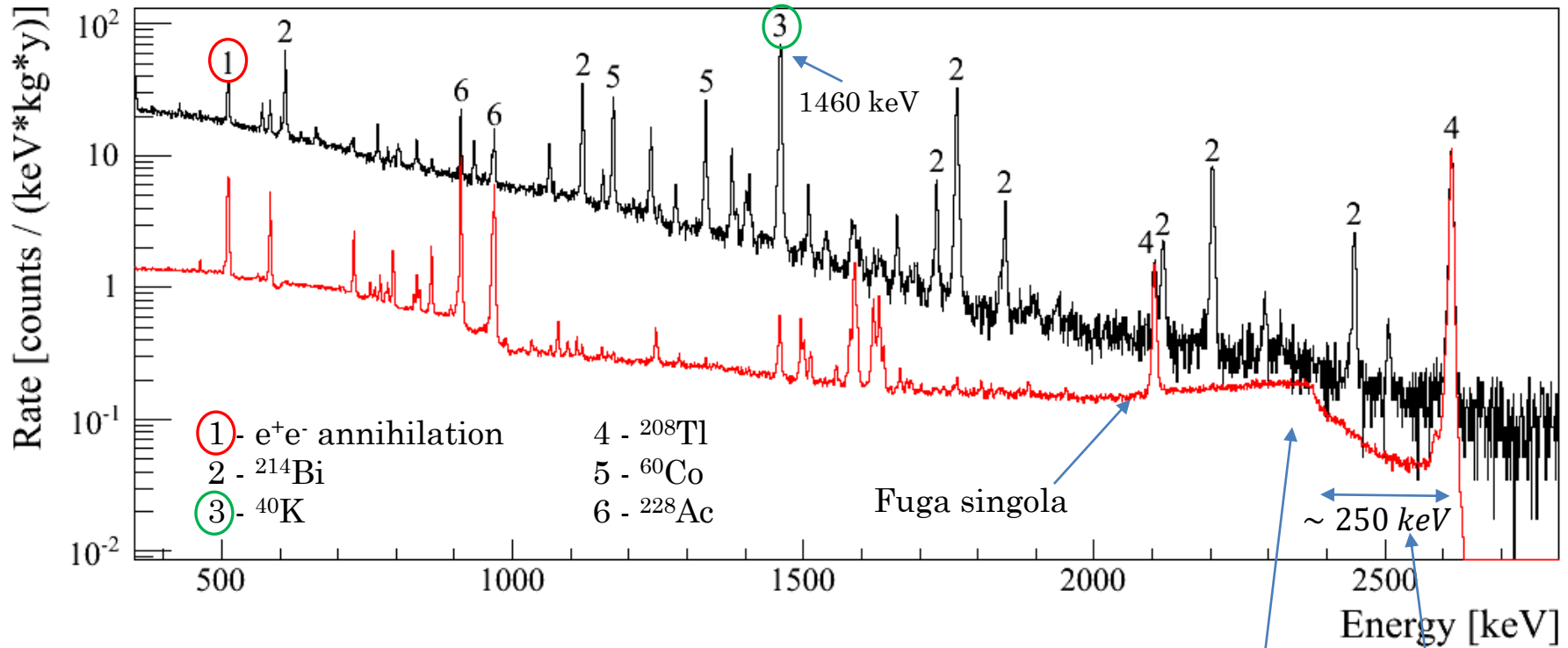
I decadimenti beta di contaminazioni interne al rivelatore o in materiali vicini producono eventi in questa regione ma spettro continuo

Misura effettuata nei laboratori sotterranei del Gran Sasso. Per questo motivo non ci sono i μ altrimenti sempre presenti.

Raggi cosmici

Spettro energetico

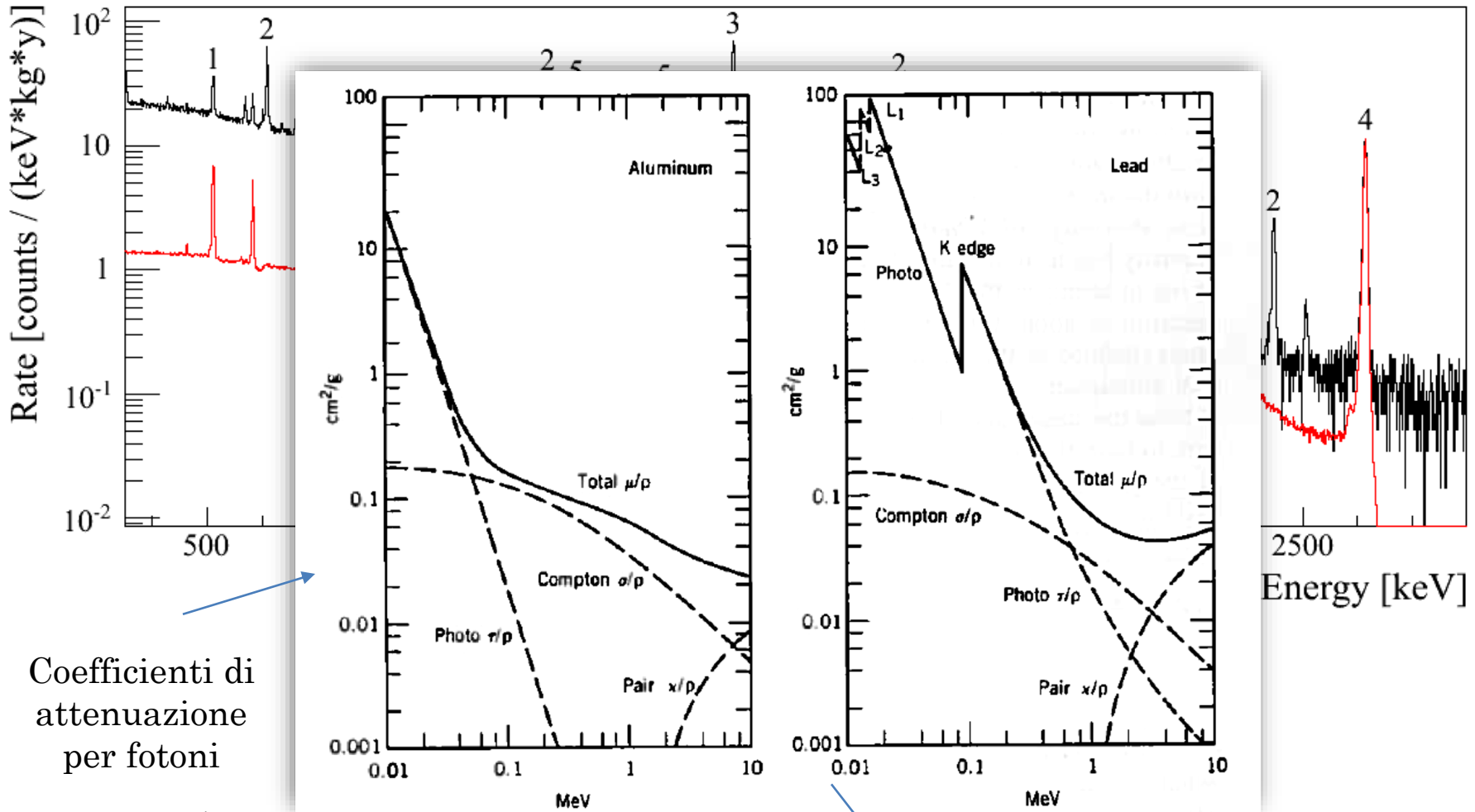
'Tipico' spettro **gamma** dovuto alla radioattività ambientale e spettro da sorgente di ^{232}Th



$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + (E_\gamma/mc^2)(1 - \cos\theta)}$$

Spettro energetico

'Tipico' spettro **gamma** dovuto alla radioattività ambientale e spettro da sorgente di ^{232}Th



Coefficienti di attenuazione per fotoni

$$\sigma_{ph} \propto Z^5$$

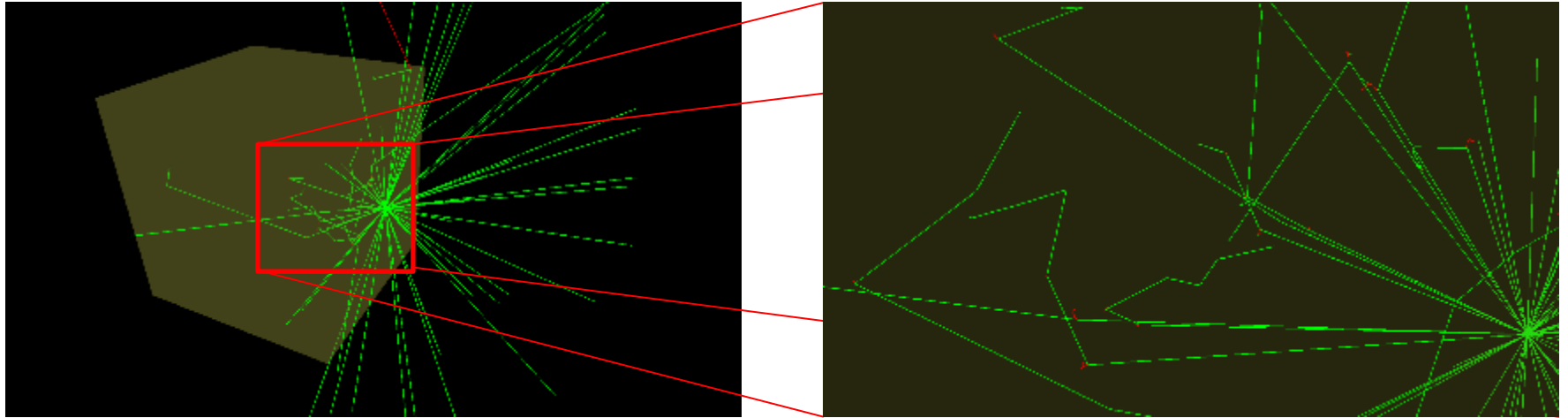
$$\sigma_{Comp} \propto Z$$

$$\sigma_{pair} \propto Z^2$$

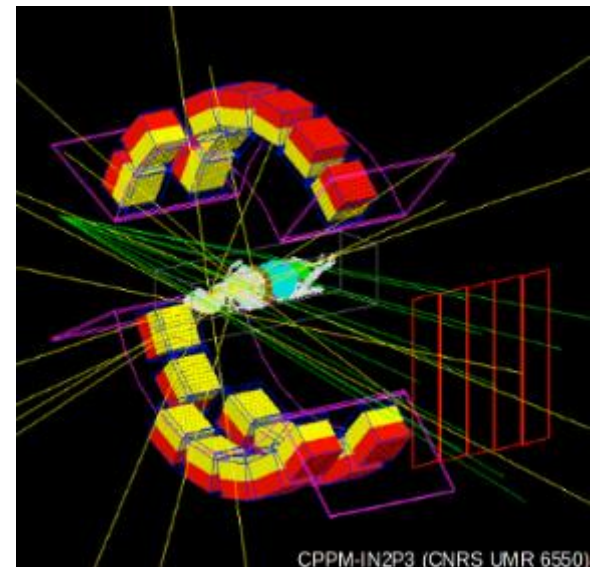
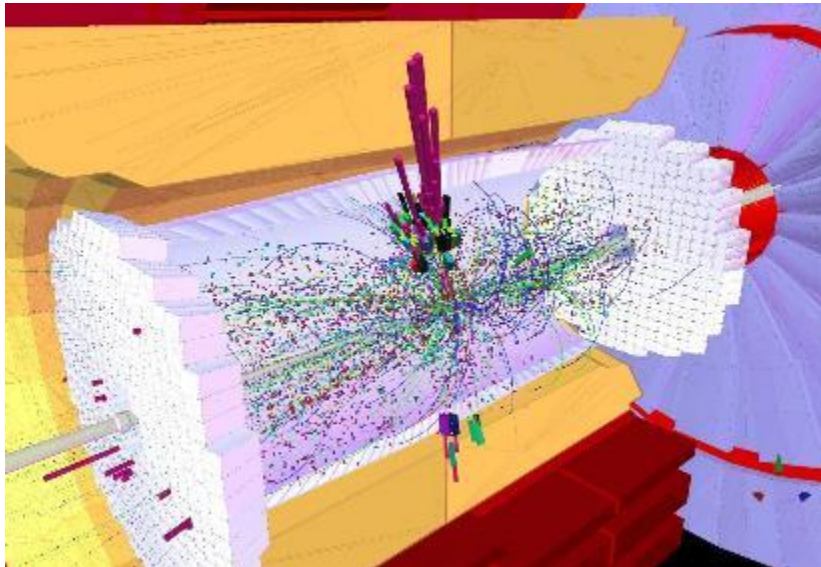
Ricostruzione delle contaminazioni radioattive attraverso **simulazioni numeriche Monte Carlo**

Simulazioni numeriche Monte Carlo

L'esempio più semplice: un cubo di materiale e una sorgente puntiforme



Generalmente utilizzati per sistemi molto più complessi....



CPPM-IN2P3 (CNRS UMR 6550)

Radioattività ambientale:

- **Radioattività naturale**
 - *Radionuclidi fossili*
 - *Radionuclidi secondari*
- **Radioattività artificiale**
- **Radiazioni di origine cosmica**
 - raggi cosmici primari e secondari
 - radioattività cosmogenica



Radiazioni di origine cosmica - Raggi cosmici

App. 33

Particelle di origine cosmica che colpiscono l'atmosfera



primari

secondari

Raggi cosmici primari

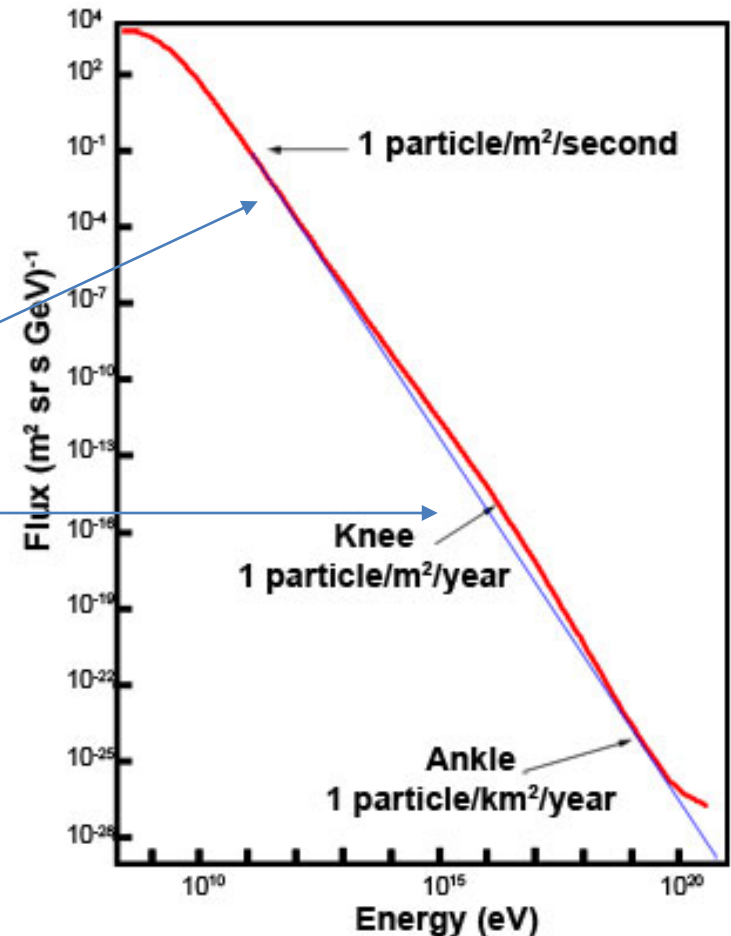
- origine solare, galattica e extragalattica (supernove, ...)
- spettro continuo fino a 10^{20} eV

flusso dei raggi
cosmici primari

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

$$\gamma = 2,7$$

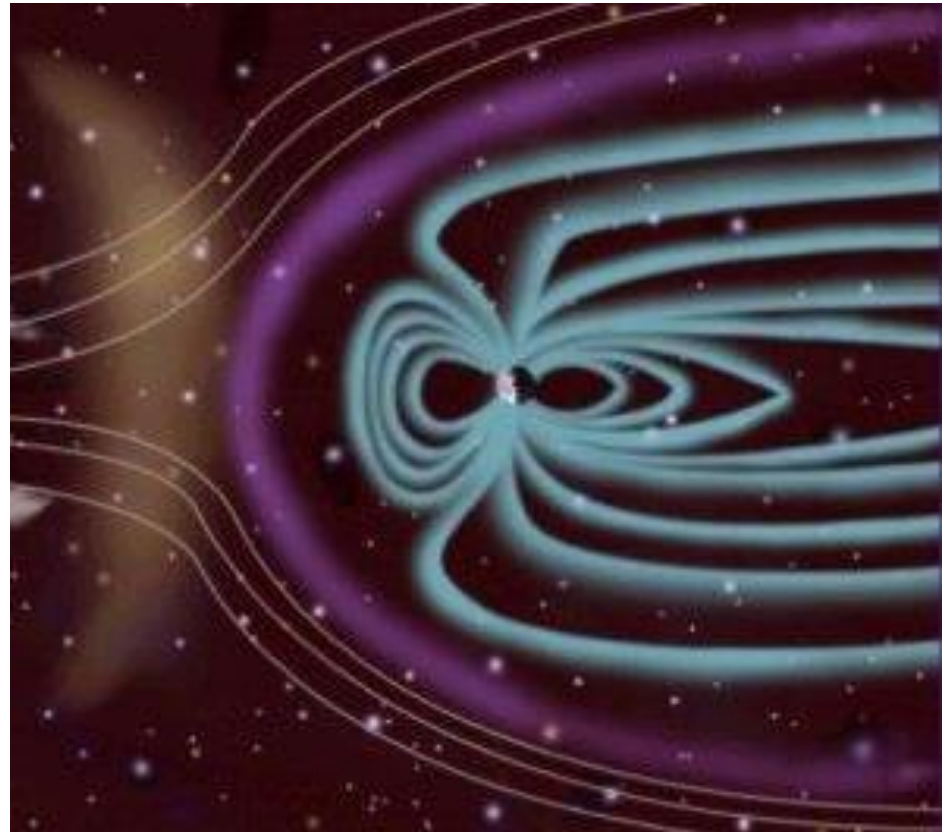
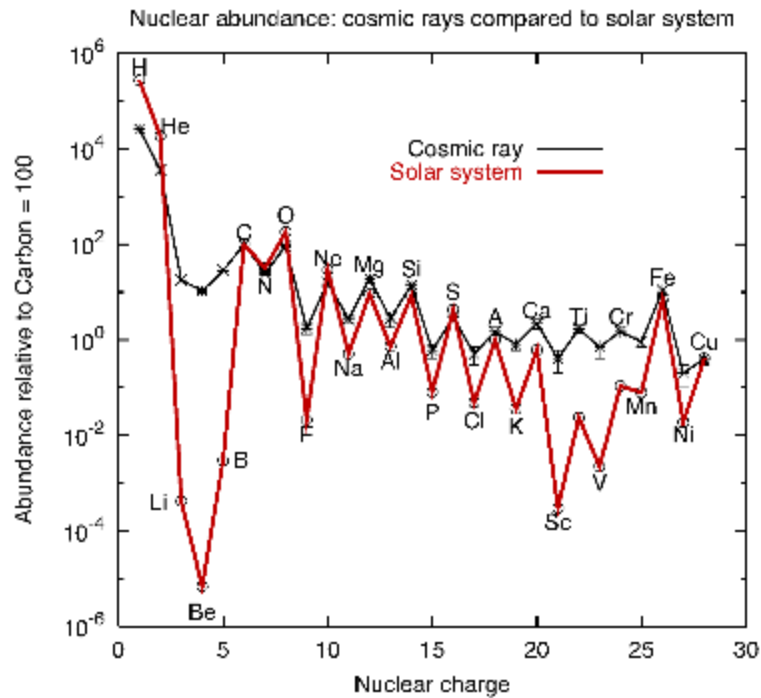
$$\gamma = 3$$



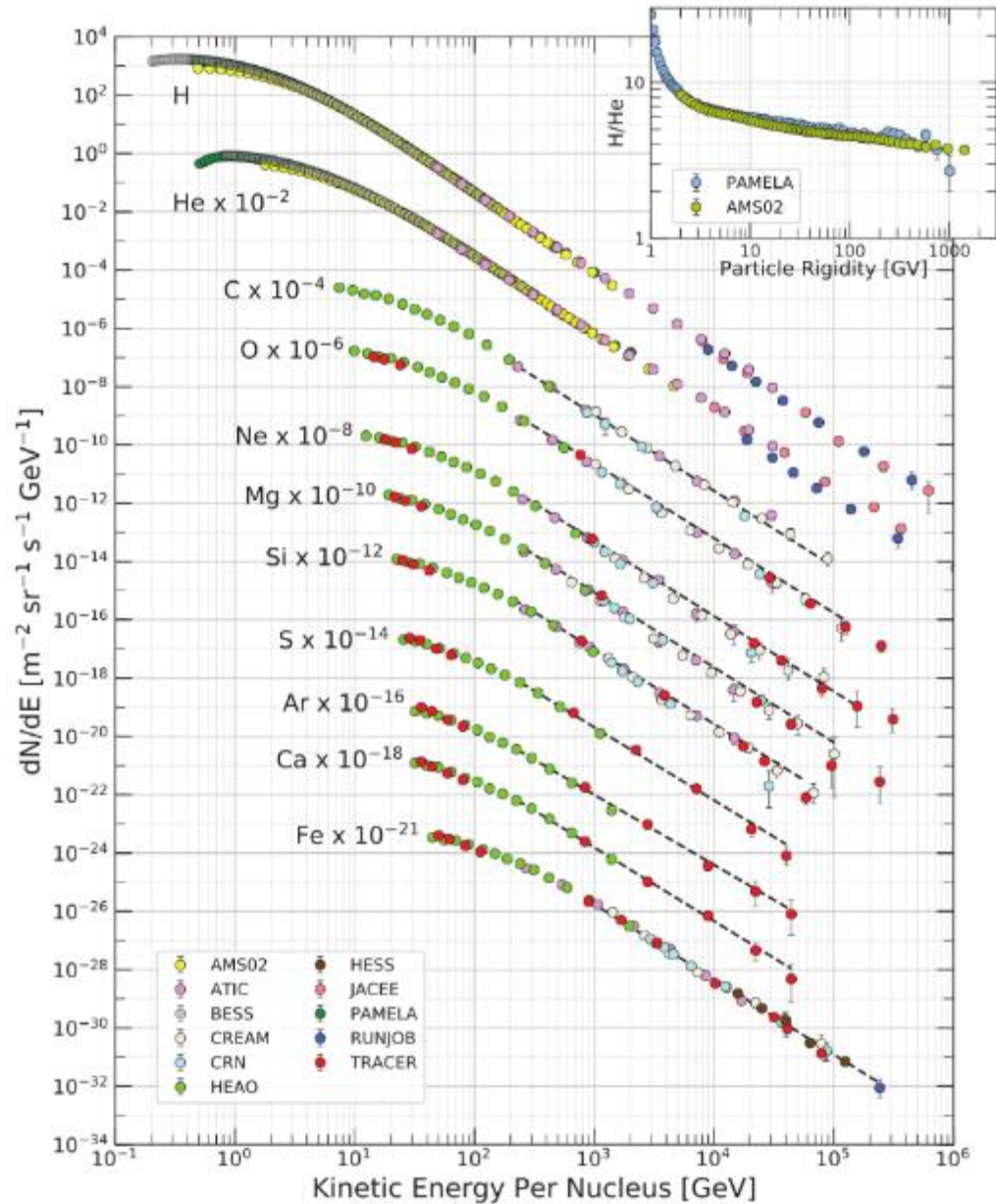
Si ritiene che le sorgenti di raggi cosmici primari con flussi fino alla regione della caviglia siano all'interno della Galassia mentre per $E > 10^{19}$ eV è necessario ipotizzare sorgenti extragalattiche.

Radiazioni di origine cosmica - Raggi cosmici primari

- il flusso è modulato nel tempo dall'attività solare
- composizione: 90% protoni, 9% ^4He , 1% nuclei più pesanti
- il flusso è modificato dal campo geomagnetico
 - effetto latitudine



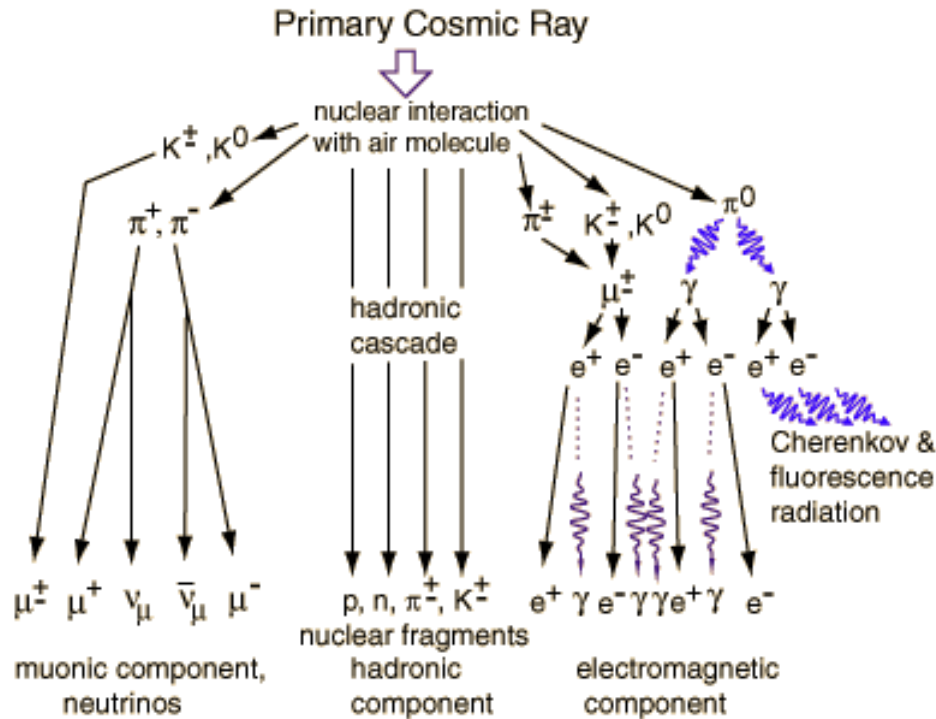
Radiazioni di origine cosmica - Raggi cosmici primari



Radiazioni di origine cosmica - Raggi cosmici

Raggi cosmici secondari

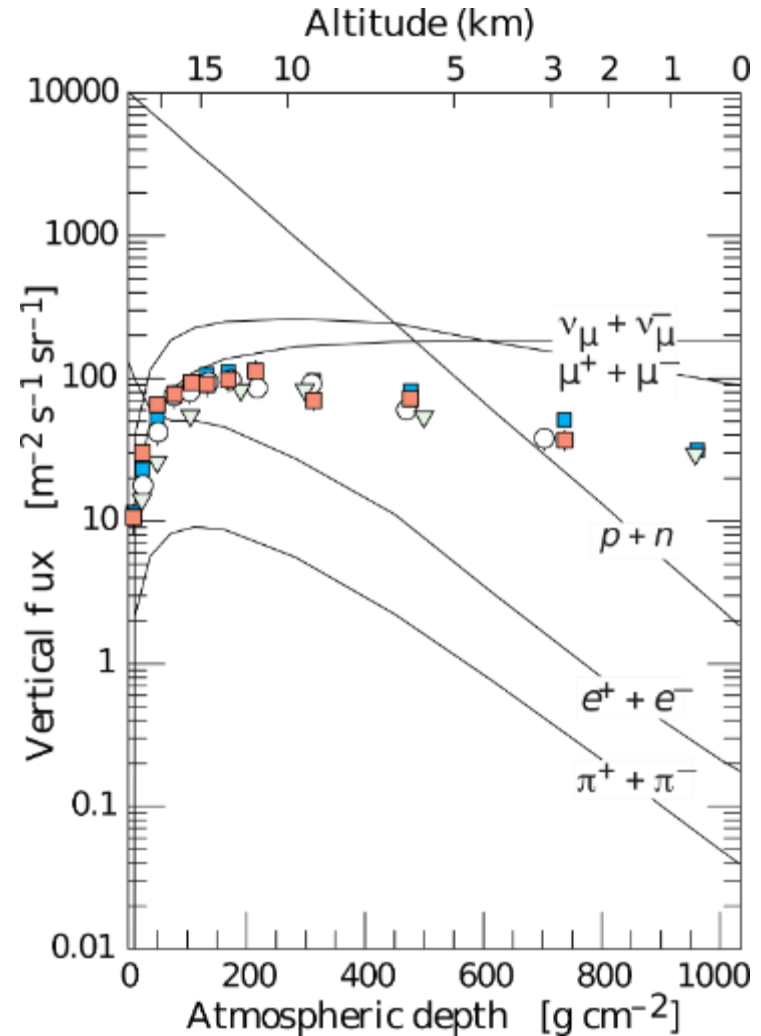
- Prodotti dall'interazione dei primari con i nuclei dell'atmosfera
- Sotto i 3 km arrivano praticamente solo i secondari prodotti nell'atmosfera (il 90 % dell'atmosfera sotto i 16 km)



sciami adronici

sciami elettromagnetici

Flusso verticale dei secondari



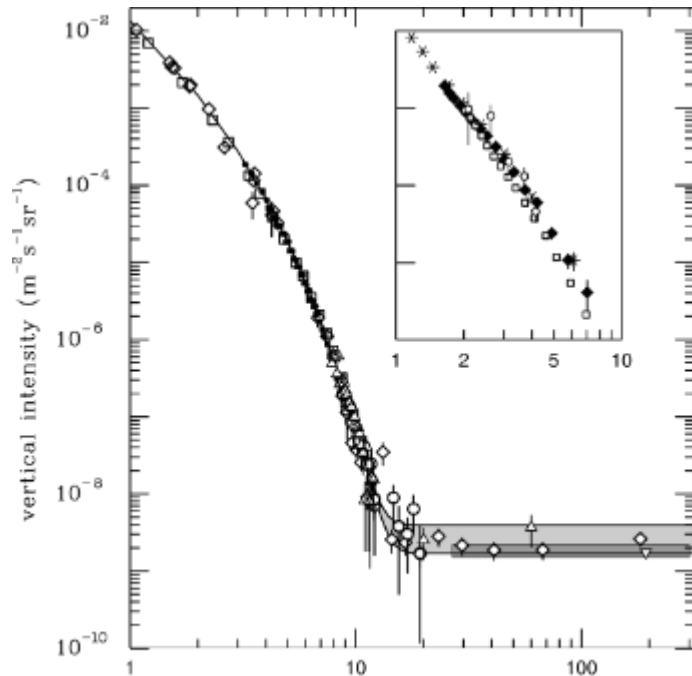
Radiazioni di origine cosmica - Raggi cosmici

A livello del mare

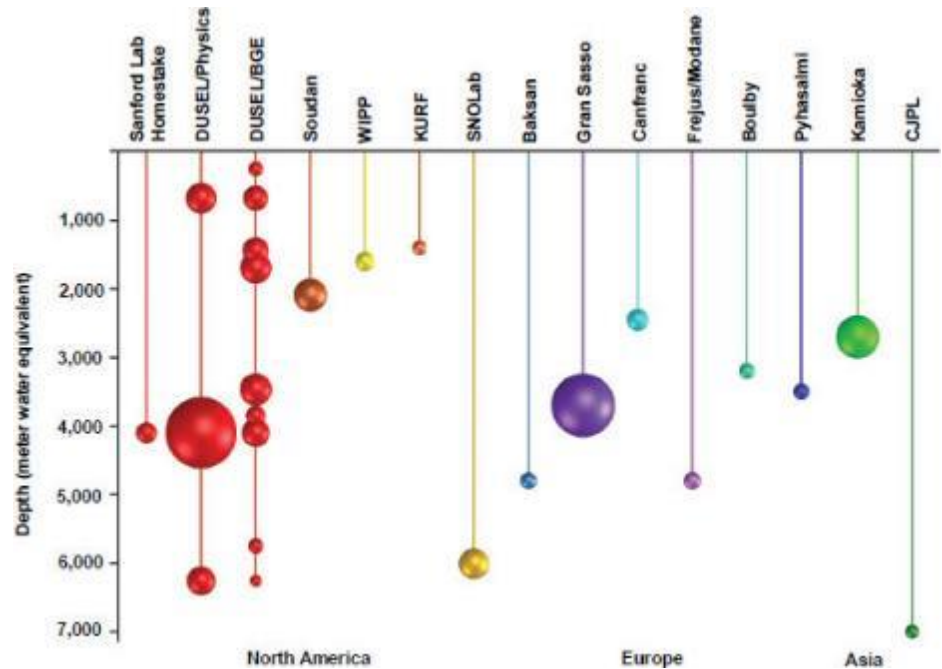
- totale: $\sim 1,1 \cdot 10^2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ intorno alla verticale
 - distribuzione angolare $\propto \cos^2 \theta$ (con θ angolo rispetto allo zenith e per $E_\mu \sim 3 \text{ GeV}$)
 - per area orizzontale $\sim 1 \text{ cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$
- muoni
 - $\langle E_\mu \rangle \sim 2 \text{ GeV} \rightarrow$ MIP (Minimum Ionizing Particle)

App. 34

Sotto il Gran Sasso e altri laboratori sotterranei

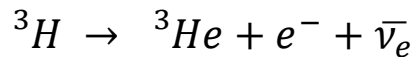
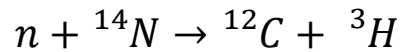


depth (km.w.e.) \rightarrow km water equivalent - ($1 \text{ km.w.e.} = 10^5 \text{ g cm}^{-2}$)

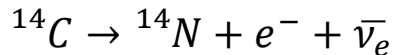
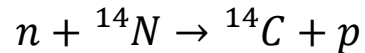


Radiazioni di origine cosmica - Radioattività cosmogenica

Radionuclidi cosmogenici → Radio-nuclidi prodotti nelle collisioni della componente adronica (p, n, ...) dei raggi cosmici con elementi stabili dell'atmosfera



Usato per bombe nucleari, fusione nucleare, ricerca, ...



Presente nei materiali organici (organismi viventi) e usato per radio datazione

Isotopo	$\tau_{1/2}$
${}^3\text{H}$	12 y
${}^7\text{Be}$	53 d
${}^{10}\text{Be}$	10^6 y
${}^{11}\text{C}$	20 min
${}^{14}\text{C}$	5730 y
...	
...	

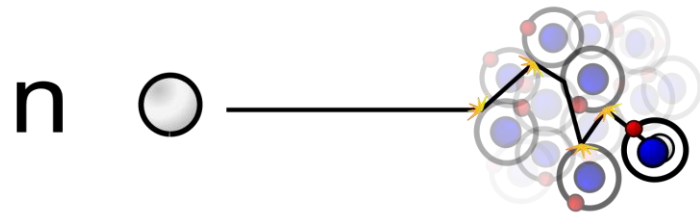
Radiodatazione

App. 39

Emissione di neutroni

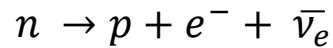
Radioattività ambientale:

- **Radioattività naturale**
 - *Radionuclidi fossili*
 - *Radionuclidi secondari*
- **Radioattività artificiale**
- **Radiazioni di origine cosmica**
 - raggi cosmici primari e secondari
 - radioattività cosmogenica
- **Emissione di neutroni**



Neutroni

- I neutroni liberi sono instabili



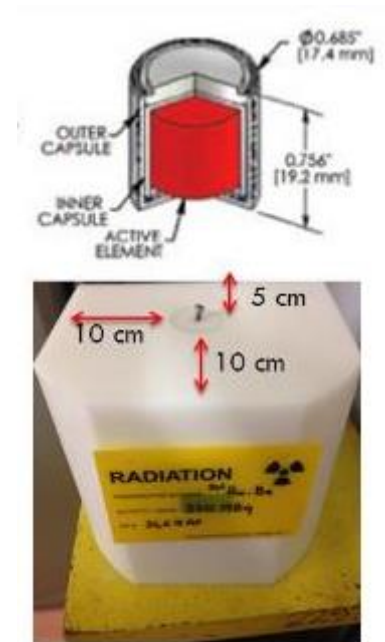
$$\tau_n = 14,8 \text{ min}$$

$$M_n = M_p + 1,29 \text{ MeV} = 939,56 \text{ MeV}$$

- Particelle neutre \longrightarrow Interazione e.m. trascurabili
 - Al contrario dei fotoni realmente non ionizzano e interagiscono 'solo' attraverso le forze nucleari forti ed esclusivamente con i nuclei

Sorgenti di neutroni

- Fissione spontanea
- Sorgenti radioattive composite
 - ${}^9\text{Be}(\alpha, n){}^{12}\text{C}$ \longrightarrow $\sim 100 \text{ n}/10^6 \alpha$
la sorgente α può essere ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{241}\text{Am}$, ...
 - ${}^9\text{Be}(\gamma, n){}^8\text{Be}$ \longrightarrow la sorgente γ può essere ${}^{124}\text{Sb}$, ${}^{24}\text{Na}$, ...
 - ${}^2\text{H}(\gamma, n){}^1\text{H}$



Neutroni

Classificazione dei neutroni

Neutron energy	Energy range
0,025 eV	Thermal neutrons
0,025 – 1 eV	Epithermal neutrons
1 – 10 eV	Slow neutrons
10 eV – 20 MeV	Fast neutrons
> 20 MeV	Ultrafast neutrons

$E \sim k_B T \sim 0,025 \text{ eV}$

$k_B = 8.6 * 10^{-5} \text{ eV}/^\circ\text{K}$

Processi di scattering del neutrone e interazione con la materia

- Diffusione
 - Elastica (n, n) → Conservazione di E e momento
 - Anelastica ($n, n\gamma$) (n, np) ($n, 2n$) ...
- Cattura
 - Radiativa (n, γ)
 - Non radiativa (n, α) (n, p) ...
- Fissione → moltiplicazione dei neutroni

I neutroni termici si comportano come un gas e materiali ad alto Z non li fermano...