

Il laboratorio STELLA

Dr. Matthias Laubenstein

PID

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

21-25 ottobre 2019

Radioattività

Introduzione

- **Radioattività**, anche chiamato **decadimento radioattivo**, è la trasmutazione spontanea di nucleoni all'interno di un nucleo, con emissione di particelle ed emissione di radiazione elettromagnetica di alta frequenza.
- Ci sono cinque modi possibili:
 1. emissione di particelle alfa (nuclei di elio)
 2. emissione di elettroni/positroni
 3. cattura elettronica
 4. fissione nucleare spontanea
 5. emissione di protoni/neutroni/nuclei pesanti
- In più c'è l'emissione di raggi gamma.

Proprietà dei nuclei

- Tutti i nuclei sono fatti di protoni e neutroni
- *Numero atomico, Z*: numero di protoni nel nucleo
- *Numero neutronico, N*: numero di neutroni nel nucleo
- *Numero di massa, A*: numero totale di nucleoni

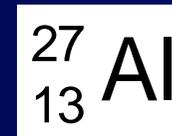
$$A = Z + N$$

- Notazione



- Esempio:

- » A è 27
- » Z è 13
- » contiene 13 protoni
- » contiene 14 = (27 - 13) neutroni



Isotopi

- Nuclei di un elemento con lo stesso numero atomico, ma numero di massa differente.

Isobari

- Nuclei con lo stesso numero di massa.

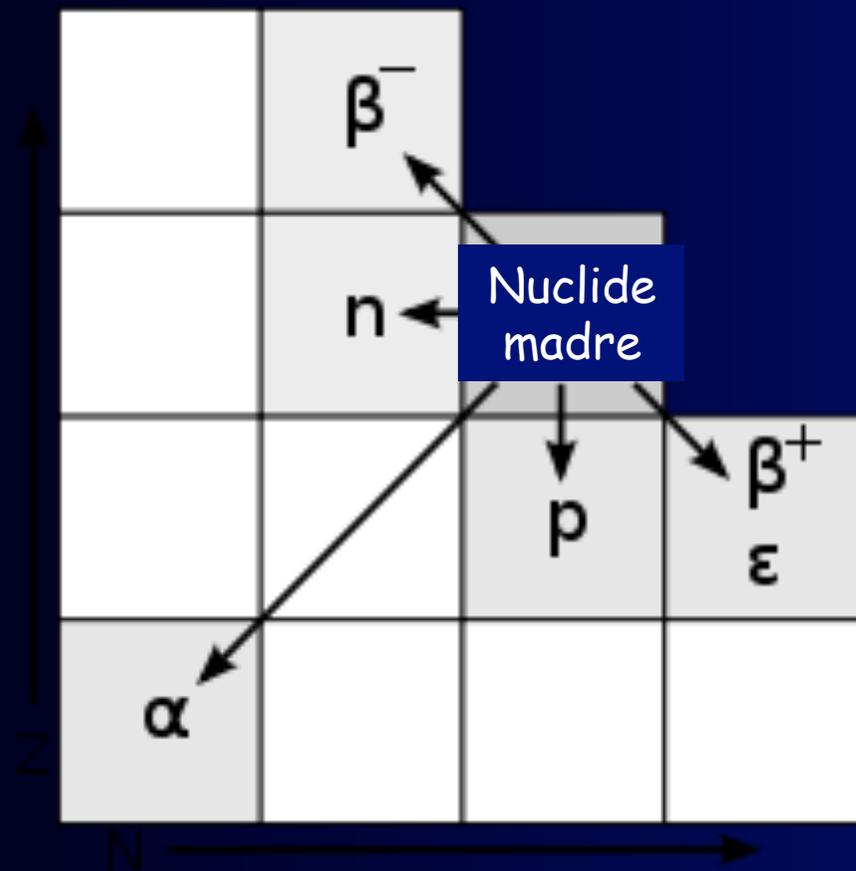
Isotoni

- Nuclei con lo stesso numero neutronico, ma numero di massa differente.

Proton number, Z

82	^{197}Pb 8 min	^{198}Pb 2.4 h	^{199}Pb 1.5 h	^{200}Pb 21.5 h	^{201}Pb 9.42 h	^{202}Pb 5250 y	^{203}Pb 52.0 h
81	^{196}Tl 1.84 h	^{197}Tl 2.83 h	^{198}Tl 5.3 h	^{199}Tl 7.4 h	^{200}Tl 26.1 h	^{201}Tl 73.6 h	^{202}Tl 12.2 d
80	^{195}Hg 9.5 h	^{196}Hg 0.15 %	^{197}Hg 64.1 h	^{198}Hg 10.0 %	^{199}Hg 16.9 %	^{200}Hg 23.1 %	^{201}Hg 16.2 %
79	^{194}Au 39.5 h	^{195}Au 183 d	^{196}Au 6.18 d	^{197}Au 100 %	^{198}Au 2.70 d	^{199}Au 3.14 d	^{200}Au 48.4 min
78	^{193}Pt 50 y	^{194}Pt 32.9 %	^{195}Pt 33.8 %	^{196}Pt 25.3 %	^{197}Pt 18.3 h	^{198}Pt 7.2 %	^{199}Pt 30.8 min
77	^{192}Ir 74.2 d	^{193}Ir 62.7 %	^{194}Ir 19.2 h	^{195}Ir 2.5 h	^{196}Ir 52 s	^{197}Ir 5.8 min	^{198}Ir 8 s
76	^{191}Os 15.4 d	^{192}Os 41.0 %	^{193}Os 30.5 h	^{194}Os 6.0 y	^{195}Os 6.5 min	^{196}Os 35 min	
	115	116	117	118	119	120	121

Neutron number, N



Decadimento alfa

- In un decadimento alfa abbiamo l'emissione di un nucleo di elio (particella alfa).

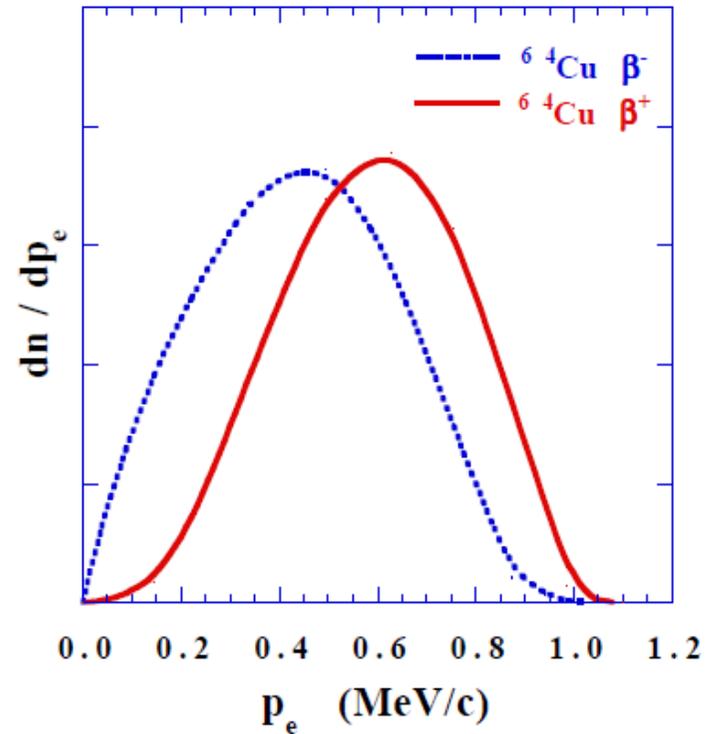


Decadimento beta

- Nel decadimento beta il nucleo figlio ha lo stesso numero di massa, ma il numero atomico cambia di un'unità.
- L'emissione dell'elettrone (positrone) avviene direttamente dal nucleo insieme ad un antineutrino (neutrino).

Decadimento beta

- Gli elettroni (positroni) rilasciati sentono la forza attrattiva (repulsiva) del potenziale nucleare.



Decadimento beta

- Generalmente:

emissione elettrone:

$$M(A,Z) > (M(A,Z+1) - m_e) + m_e = M(A,Z+1)$$

emissione positrone:

$$M(A,Z) > (M(A,Z-1) + m_e) + m_e = M(A,Z-1) + 2 m_e$$

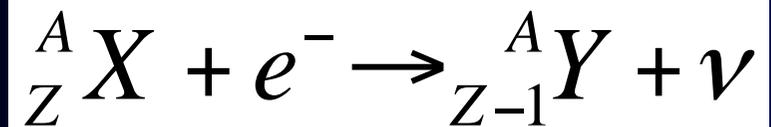


Cattura elettronica (EC)

La cattura elettronica è chiamata anche decadimento beta inverso. Il nucleo assorbe un elettrone dalle orbite elettroniche interne emettendo un neutrino, e seguito da emissione raggi X.

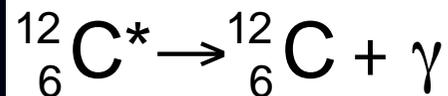
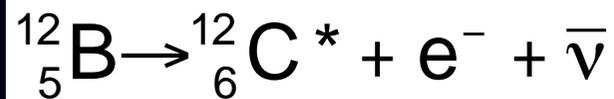
Generalmente:

$$M(A,Z) + m_e > M(A,Z-1) + m_e$$



Emissione di raggi gamma

- Raggi gamma sono emessi da livelli nucleari eccitati o meta-stabili durante il processo di diseccitazione.
- Gli stati nucleari eccitati sono normalmente prodotti o in un decadimento radioattivo o in una reazione nucleare.
- Qui sotto la sequenza di un decadimento:
 - Prima avviene il decadimento beta.
 - Poi c'è l'emissione del raggio gamma.

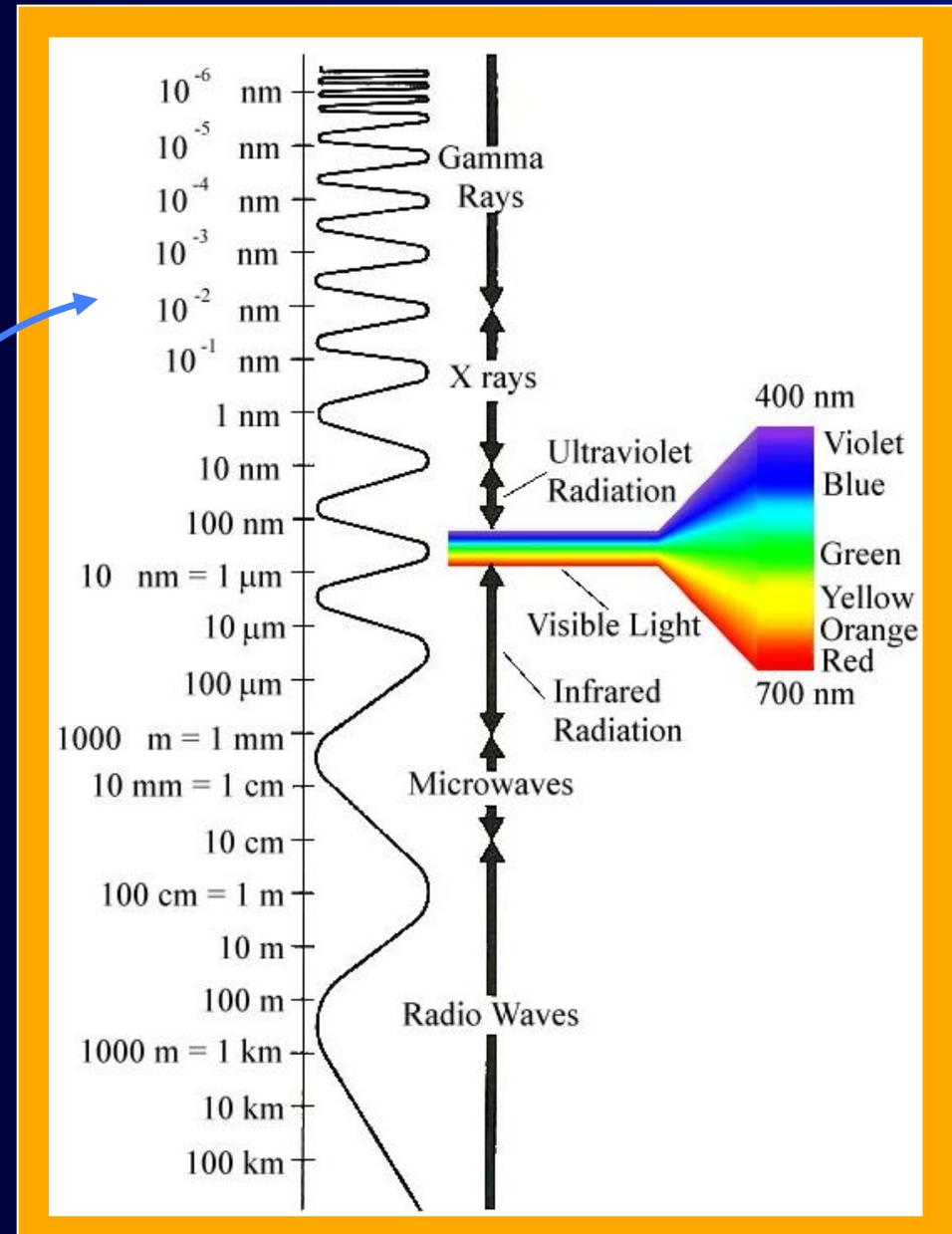
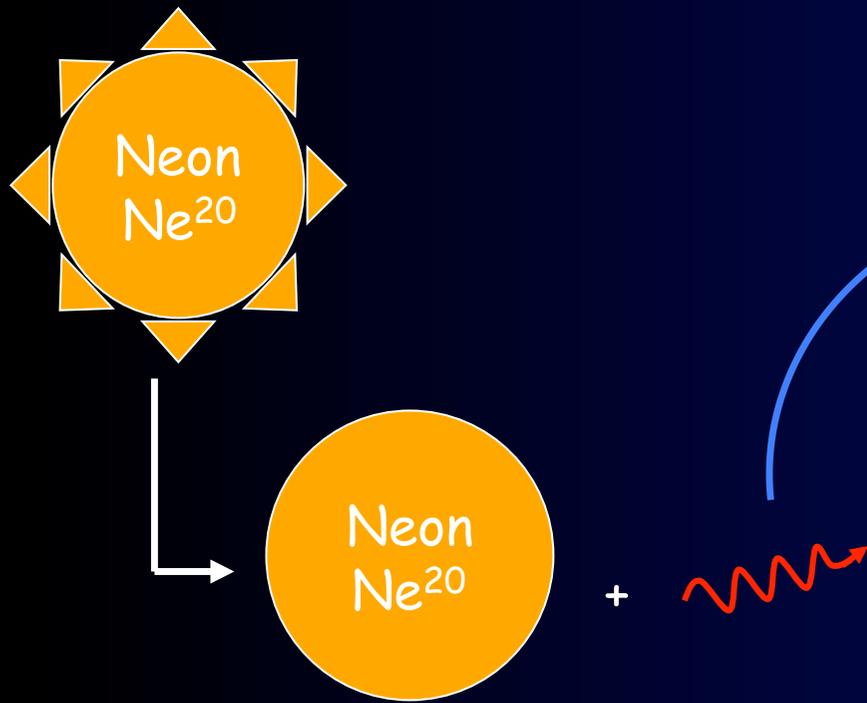


Conversione interna

- E' un processo concorrenziale per la diseccitazione.
- Il nucleo eccitato trasferisce la sua energia ad un elettrone di un orbita elettronica interna causandone l'emissione.
- Elettroni di conversione sono monoenergetici con energia:

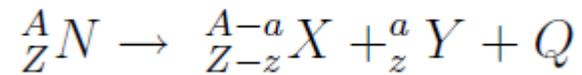
$$K_e = \Delta M c^2 - B E_e$$

Raggi gamma

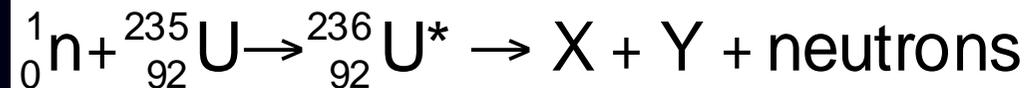


Fissione nucleare

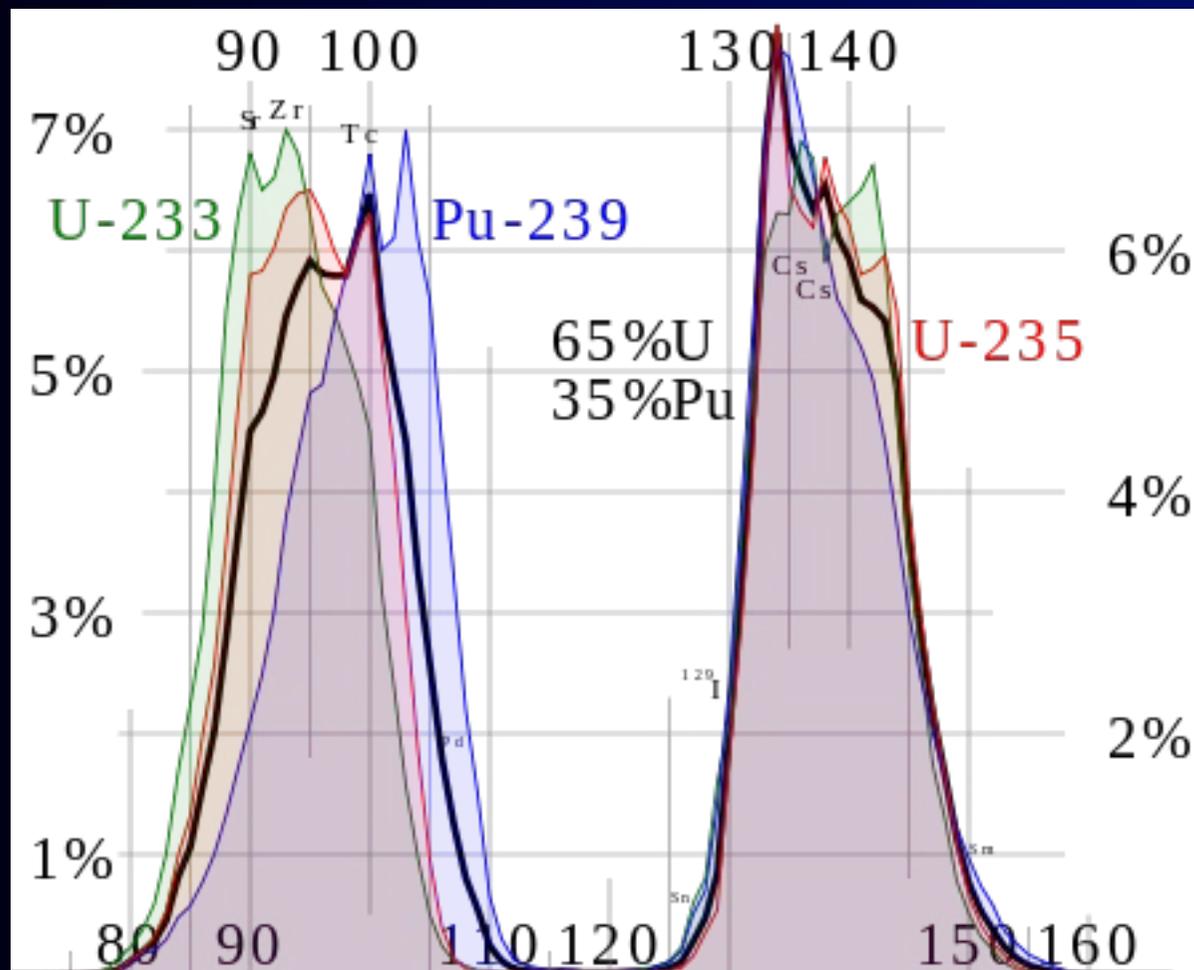
- Un nucleo pesante ($A \approx 240$) si divide in due nuclei più leggeri:



- La massa totale dei prodotti è minore della massa del nucleo originale (≈ 0.9 MeV/nucleone).
- La fissione di ${}^{235}\text{U}$ è indotta da neutroni termici



- ${}^{236}\text{U}^*$ è uno stato intermedio a vita breve
- X e Y sono frammenti di fissione, molte combinazioni sono possibili



La costante di decadimento

- Il numero di nuclei che decadono in un dato tempo è proporzionale al numero totale dei nuclei presenti nel campione

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

- λ è chiamata la *costante di decadimento* e determina il rateo con il quale il materiale decade
- Il *rateo di decadimento* o *l'attività*, A , è definita come il numero di decadimento al secondo $R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N$

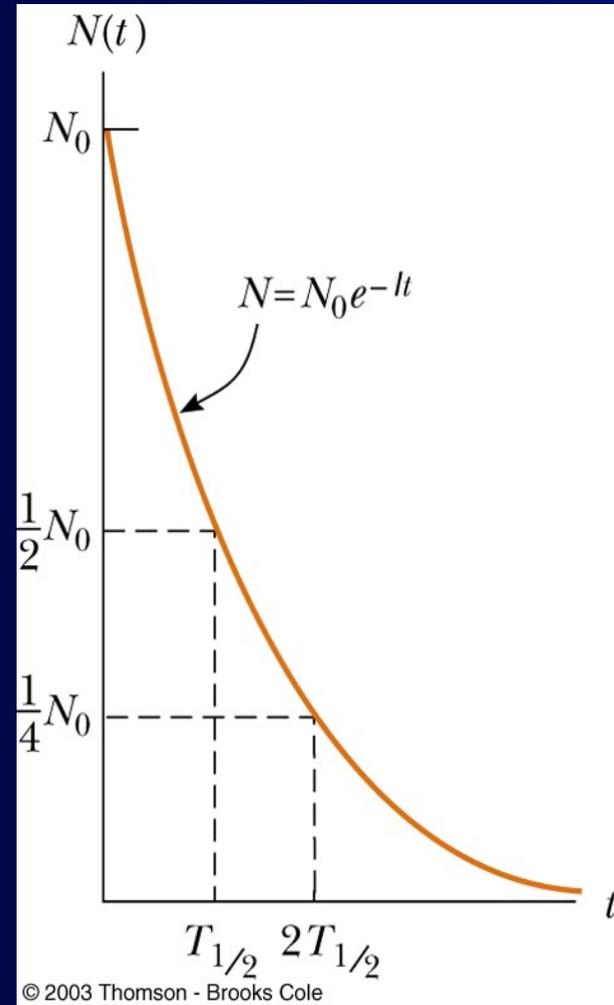
Curva di decadimento

- La curva di decadimento segue l'equazione

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

- La *vita di dimezzamento* è un altro parametro utile
- E' definita come il tempo necessario che deve passare affinché metà di una quantità di materiale radioattivo sia decaduto.

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



Formule per catene di decadimento



$$\frac{dN_1(t)}{dt} = -\lambda_1 N_1(t)$$

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t)$$

$$\frac{dN_3(t)}{dt} = \lambda_2 N_2(t) - \lambda_3 N_3(t)$$

.....

$$\frac{dN_N(t)}{dt} = \lambda_{N-1} N_{N-1}(t)$$

$$N_{20} = N_{30} = \dots = N_{N0} = 0$$

$$N_i(t) = C_1^i e^{-\lambda_1 t} + C_2^i e^{-\lambda_2 t} + \dots + C_i^i e^{-\lambda_i t}$$

$$C_1^i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_2 - \lambda_1)(\lambda_3 - \lambda_1) \dots (\lambda_i - \lambda_1)}$$

$$C_2^i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_2)(\lambda_3 - \lambda_2) \dots (\lambda_i - \lambda_2)}$$

.....

$$C_i^i = \frac{\lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{i-1}}{(\lambda_1 - \lambda_i)(\lambda_2 - \lambda_i) \dots (\lambda_{i-1} - \lambda_i)}$$

Formule per catene di decadimento

- Caso: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$

$$A_1(t) = N_0 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2(t) = \frac{N_0 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Equilibrio transiente

$$\tau_2 < \tau_1 \quad (\lambda_2 > \lambda_1)$$

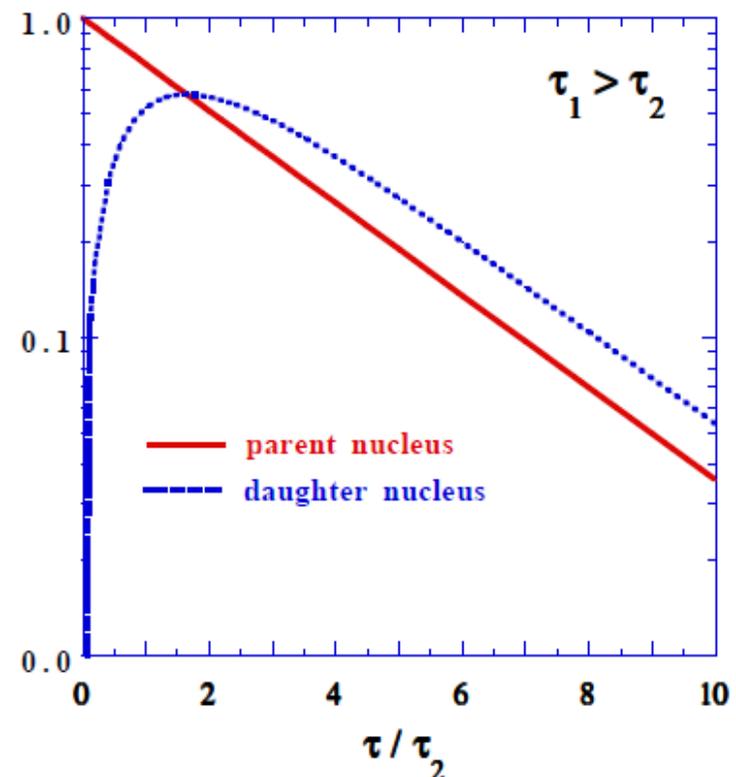
$$t^* = (\ln \lambda_2 / \lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

$$\frac{A_2(t)}{A_1(t)} = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} [1 - e^{-(\lambda_2 - \lambda_1)t}]$$

Equilibrium secolare

$$\tau_2 \ll \tau_1$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1$$



Formule per catene di decadimento

- Caso: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$

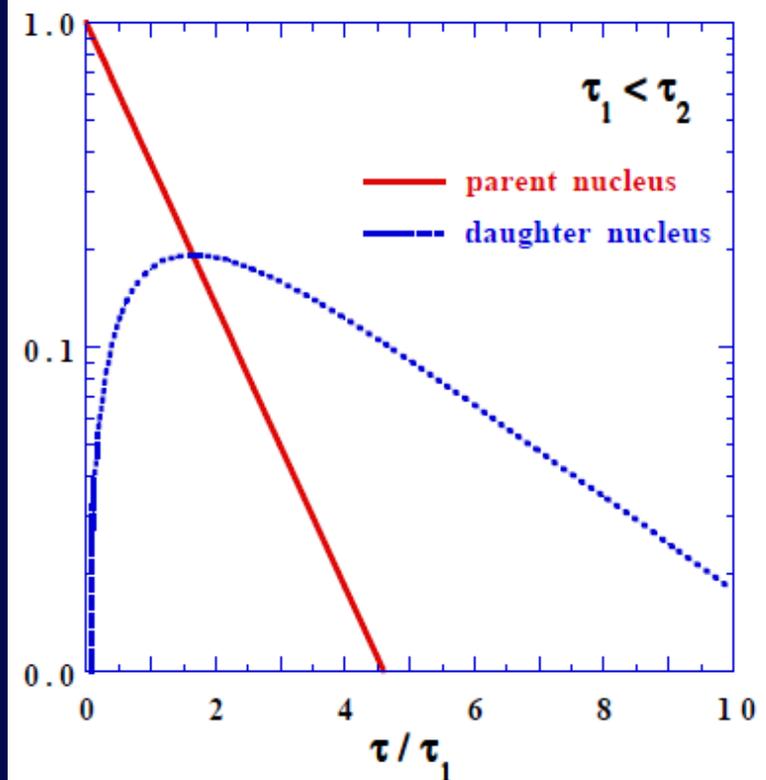
$$A_1(t) = N_0 \lambda_1 e^{-\lambda_1 t}$$

$$A_2(t) = \frac{N_0 \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Equilibrio non esiste

$$\tau_2 > \tau_1 \quad (\lambda_2 < \lambda_1)$$

$$t^* = (\ln \lambda_1 / \lambda_2) / (\lambda_1 - \lambda_2)$$



Unità di misura

- L'unità di misura storica è il *Curie, Ci* (attività di 1 g di ^{226}Ra)
 - $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10}$ decadimenti/secondo
- L'unità SI dell'attività è il *Becquerel, Bq*
 - $1 \text{ Bq} = 1$ decadimento/secondo
 - per cui, $1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Bq}$
- Le unità più usate sono MBq (prima mCi) e kBq (prima μCi).

Radioattività naturale

Introduzione

- Radionuclidi si trovano ovunque in natura, in aria, acqua e terreno. Anche noi conteniamo dei radionuclidi, perché siamo prodotti del ambiente circostante. Ogni giorno ingeriamo, inaliamo radionuclidi tramite cibo, acqua ed aria. La radioattività è comune anche in rocce e terreni, acque dolci e marine, e anche nei materiali edilizi delle nostre case.

Radioattività naturale

- Classificazione
 - Nuclei instabili presenti in natura
 - *Radioattività naturale*
 - Nuclei instabili prodotti in laboratori o altrove
 - *Radioattività artificiale*
- In natura ci sono quattro catene di decadimento.
 - ^{238}U
 - ^{235}U
 - ^{232}Th
 - ^{237}Np ($t_{\frac{1}{2}}=2.144 \cdot 10^6$ a, solo ^{209}Bi è rimasto)

Categorie

- a. **Primordiale** - provenienti da prima della creazione della Terra
- b. **Cosmogenica** - prodotta come risultato di interazioni con i raggi cosmici
- c. **Produzione antropogenica** - è incrementata o prodotta grazie ad azioni del genere umano (quantità minore di quella naturale)

Radionuclidi primordiali

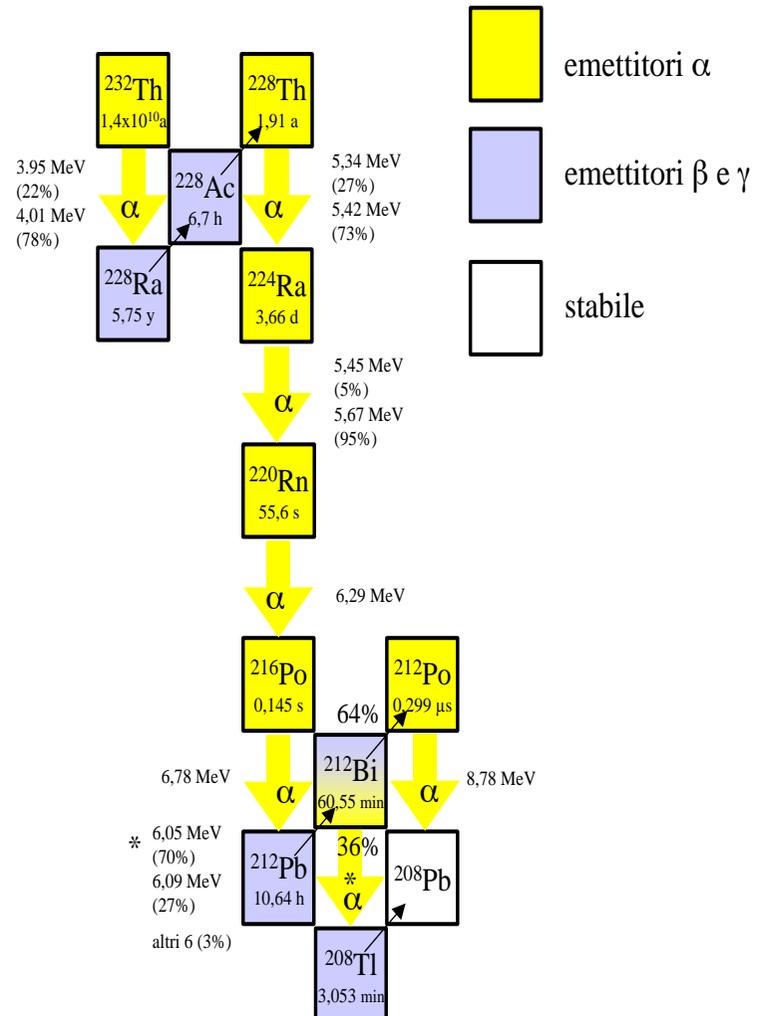
- Radionuclidi primordiali sono stati prodotti durante la creazione dell'universo. Hanno ovviamente una lunga vita di dimezzamento più grandi di migliaia di milioni di anni.
- ^{209}Bi : $1.9 \cdot 10^{19}$ a (decadimento alfa più longevo)
- ^{124}Xe : $1.8 \cdot 10^{22}$ a (decadimento EC più longevo conosciuto ad oggi)

Concentrazioni in natura

- La concentrazione di uranio è (6 - 60) Bq/kg in tipi di roccia comuni, ca. 15 Bq/kg nei terreni, 33 mBq/kg in acqua.
- La concentrazione di torio è (7 - 90) Bq/kg in tipi di roccia comuni (media crosta terrestre 45 Bq/kg), ca. 40 Bq/kg nei terreni, < 1 mBq/kg in acqua. Nelle rocce c'è normalmente 3-4 volte di più rispetto all'uranio.
- Radon contribuisce alla radioattività in aria, (0.6 -30) Bq/m³. I figli si attaccano all'aerosol ed ai vapori.

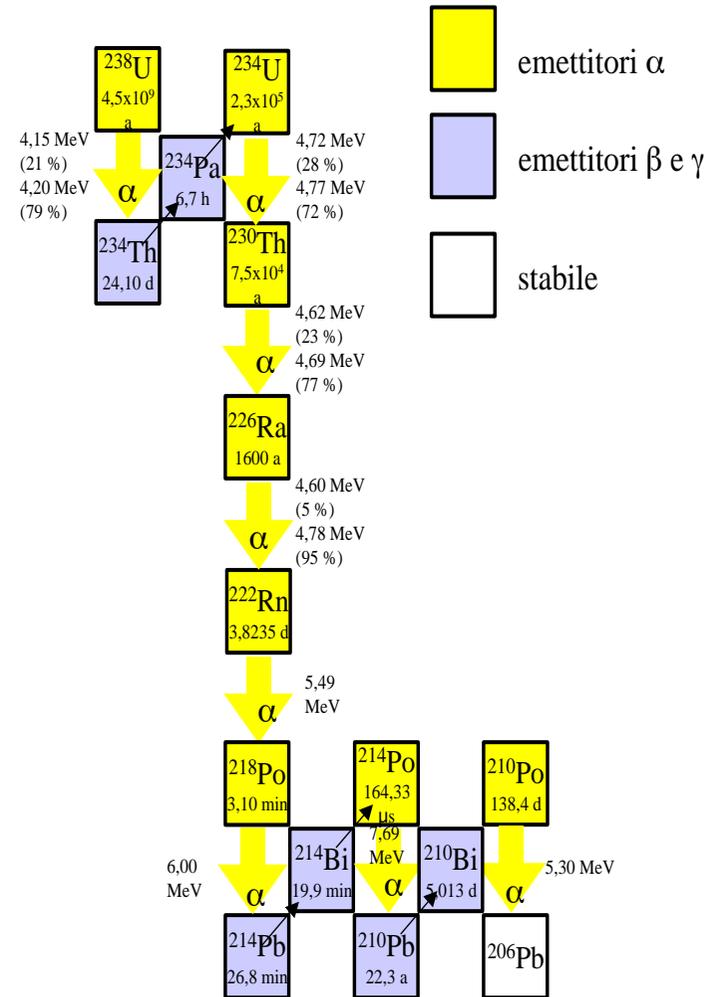
^{232}Th

- ^{232}Th
($t_{1/2}=1.405 \times 10^{10}$ a)
- Serie di decadimenti alfa e beta
- Finisce con un isotopo stabile del piombo, ^{208}Pb



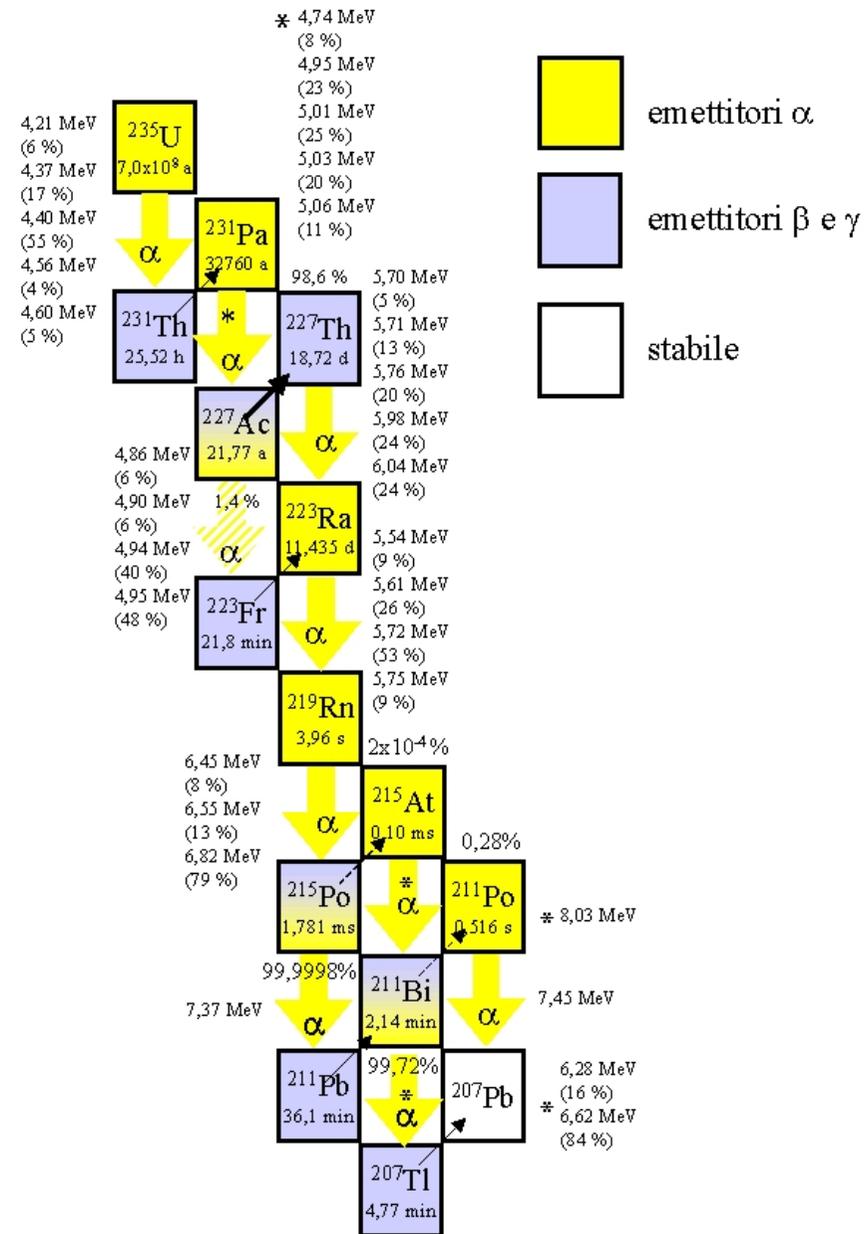
^{238}U

- ^{238}U
($t_{1/2} = 4.468 \times 10^9 \text{ a}$)
- Serie di decadimenti alfa e beta
- Finisce con un isotopo stabile del piombo, ^{206}Pb
- 99.2745% di tutto l'uranio



235U

- ^{235}U
($t_{1/2}=7.038 \times 10^8 \text{ a}$)
- Serie di decadimenti alfa e beta
- Finisce con un isotopo stabile del piombo, ^{207}Pb
- 0.72% di tutto l'uranio



Catena di decadimento del ^{237}Np

- La quarta catena di decadimento del ^{237}Np non si trova più in natura a causa della sua vita di dimezzamento relativamente breve ($t_{1/2} = 2.144 \times 10^6$ a).
- L'unico superstite in natura è il ^{209}Bi che a sua volta è radioattivo e decade tramite decadimento alfa ($t_{1/2} = 1.9 \times 10^{19}$ a).

Radionuclidi primordiali

nuclide	abbondanza [%]	$t_{1/2}$ [a]	decadimento
^{40}K	0.0117	1.277×10^9	β^- , EC
^{50}V	0.250	1.4×10^{17}	EC, β^+ , β^-
^{87}Rb	27.835	4.75×10^{10}	β^-
^{100}Mo	9.63	1.00×10^{19}	β^- β^-
^{113}Cd	12.22	7.7×10^{15}	β^-
^{115}In	95.7	4.41×10^{14}	β^-
^{123}Te	0.908	1.24×10^{13}	EC
^{138}La	0.0902	1.05×10^{11}	EC, β^+ , β^-
^{142}Ce	11.08	$> 5 \times 10^{16}$	(α)
^{144}Nd	23.8	2.29×10^{15}	α
^{147}Sm	15.0	1.06×10^{11}	α

Radionuclidi primordiali

nuclide	abbondanza [%]	$t_{1/2}$ [a]	decadimento
^{148}Sm	11.3	7×10^{15}	α
^{149}Sm	13.8	$> 2 \times 10^{15}$	–
^{152}Gd	0.20	1.08×10^{14}	α
^{156}Dy	0.06	$> 1 \times 10^{18}$	–
^{174}Hf	0.162	2.0×10^{15}	α
^{176}Lu	2.59	3.78×10^{10}	β^-
$^{180\text{m}}\text{Ta}$	0.012	$> 1.2 \times 10^{15}$	EC, β^-
^{186}Os	1.58	2.0×10^{15}	α
^{187}Re	62.60	4.35×10^{10}	α, β^-
^{190}Pt	0.01	6.5×10^{11}	α
^{204}Pb	1.4	$> 1.4 \times 10^{17}$	α

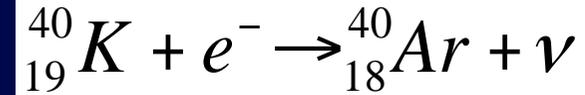
Potassio-40

Due possibilità di decadimento:

89.45%, $E_{\beta_{\max}}^{\beta}=1.33 \text{ MeV}$



10.55%, $Q=1.505 \text{ MeV}$



Con emissione gamma di
1.461 MeV

Concentrazione in roccia: 0.1% calcareo, 3.5% rocce ignee
Concentrazione in terreno: (0.037-1.1) Bq/g, varia secondo l'uso di
fertilizzanti
Concentrazione in acqua: ca. 10 Bq/g in acqua marina

Radionuclidi cosmogenici

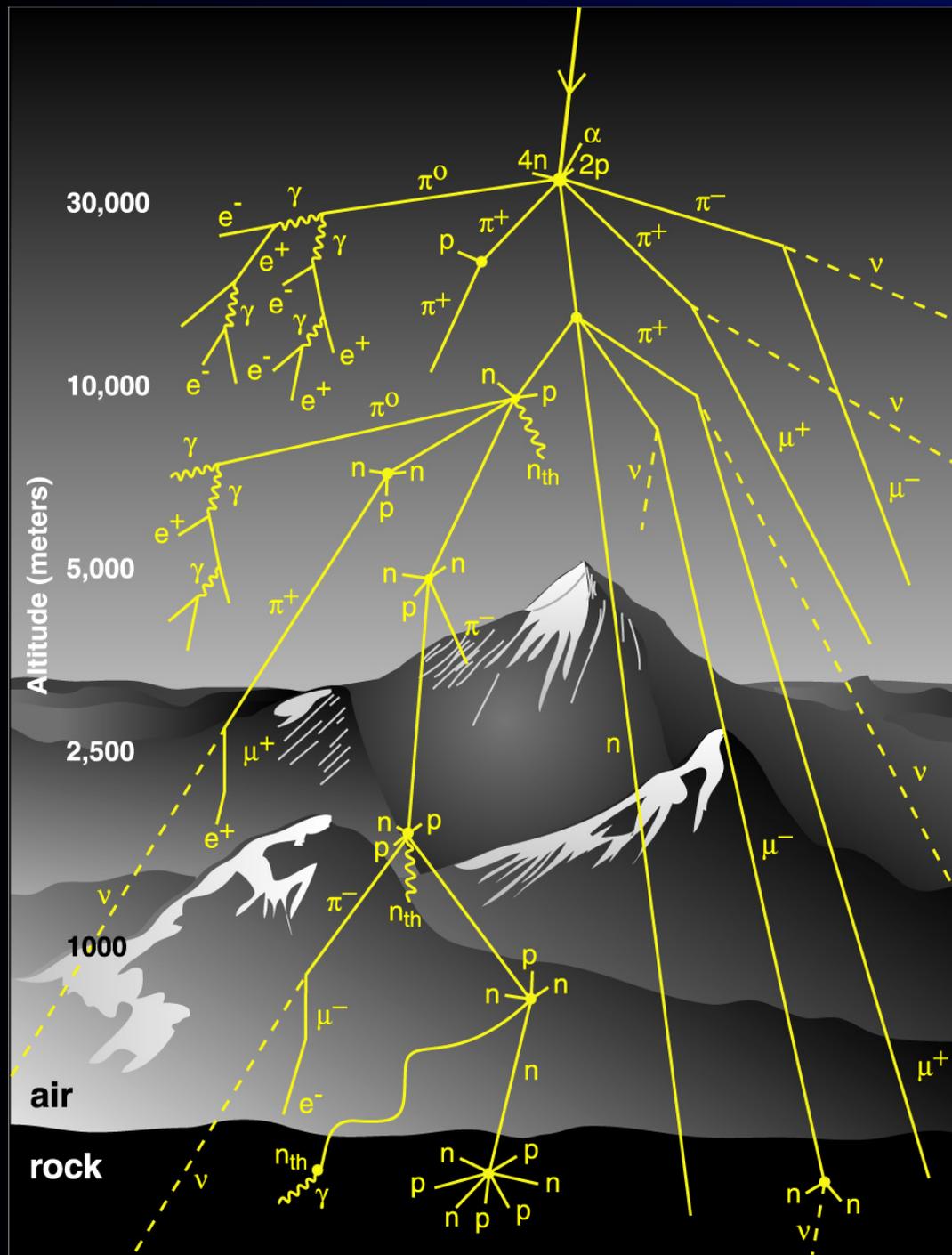
- La radiazione cosmica primaria riempie tutto lo spazio, le sue sorgenti sono di natura galattica. C'è anche una componente solare ed una intrappolata dal campo geomagnetico.
- 87% protoni, 11% particelle α , 1% nuclei leggeri ($Z \div 4 \rightarrow 26$), 1% elettroni di alta energia; $\langle E \rangle \approx 10^{10}$ eV, $E_{\max} = 100$ EeV (10^{20} eV).
- La maggior parte dei raggi cosmici primari è fermata nel primo 1/10 dell'atmosfera.

Radionuclidi cosmogenici

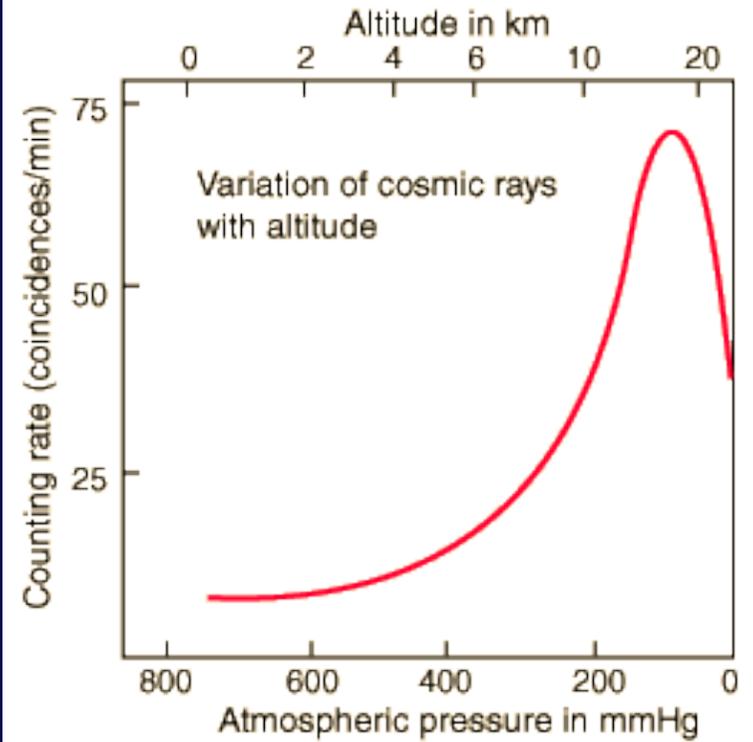
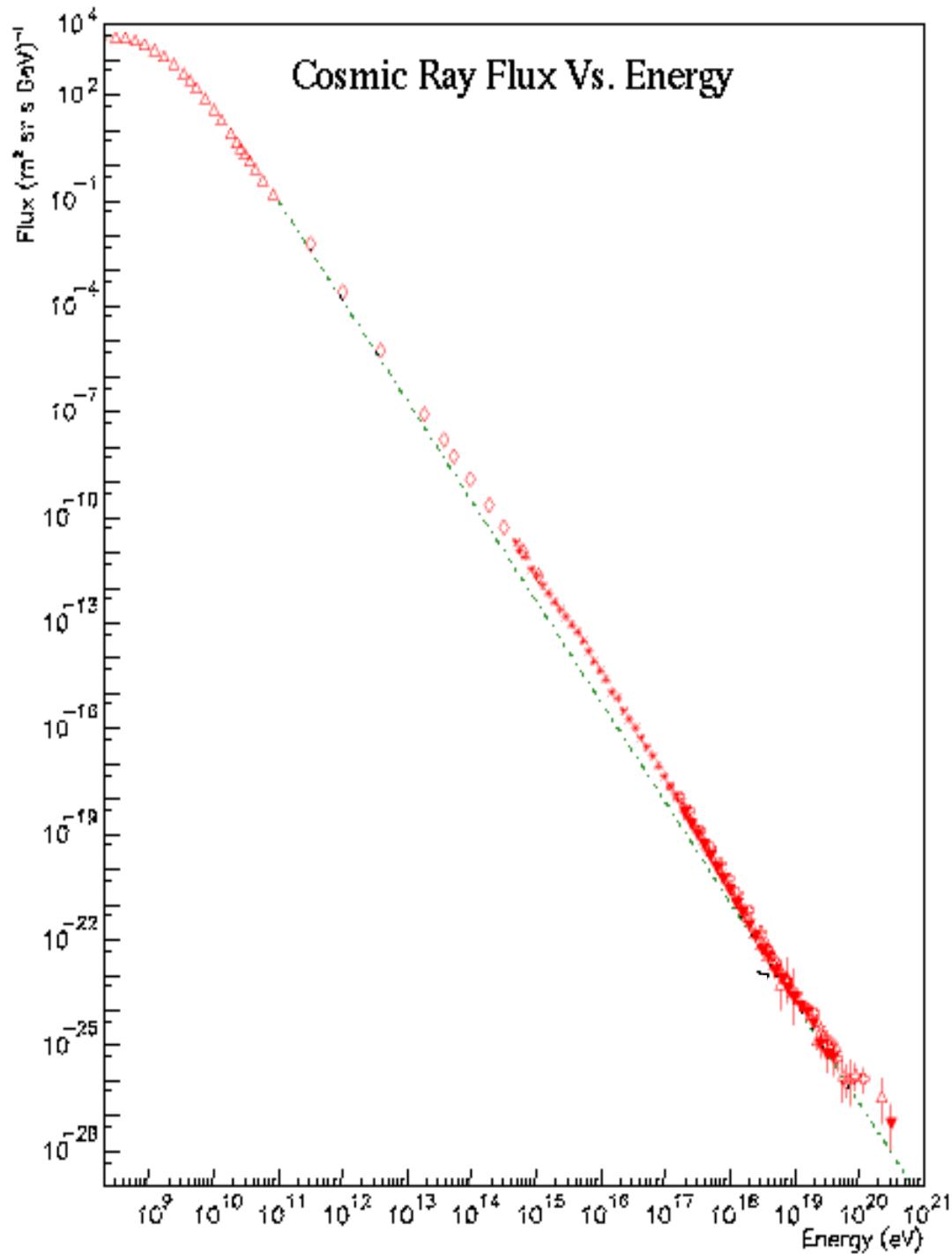
- La radiazione cosmica secondaria si crea durante l'interazione della parte primaria con l'atmosfera.
- 1 particella di radiazione cosmica primaria crea in media 10^8 particelle secondarie (sciame atmosferico) ($p, e, \gamma, n, \pi, \kappa, \mu, \nu$).
Ad altitudini < 20 km è presente solo la parte secondaria.
- Le intensità al di sopra dei 13 km risentono dell'effetto della latitudine geomagnetica.
- $A < 6$ km sono dominanti μ ed e .

Radionuclidi cosmogenici

- La radiazione cosmica terziaria si crea nell'interazione della parte secondaria con il terreno.
- A livello di mare c'è una componente dura (μ), una molle (e, γ) una nucleonica (p, n). La componente dura è il 75% del totale.
- Passando nel terreno rimangono solo μ and ν . I μ possono creare ulteriori neutroni, ma vengono comunque attenuati più si va sottoterra.

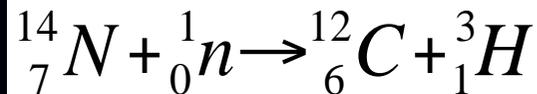
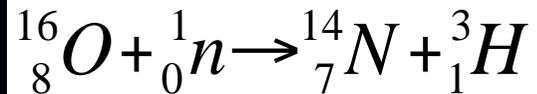


Sciame esteso di raggi cosmici (cascata)

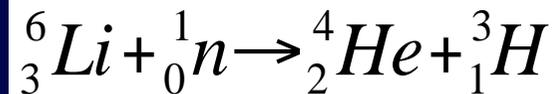


Trizio

- Produzione da spallazione in atmosfera; rateo di produzione $0.2 \text{ atomi cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- (1 T.U. = 1 atomo trizio ogni 10^{18} atomi di idrogeno; in acqua 118 mBq/l.).
- **In acqua in media (0.2 - 0.9) Bq/l.**



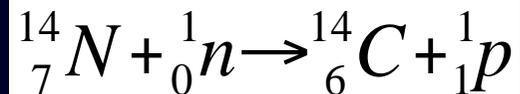
in aria



in raggi cosmici

Radiocarbonio

- Produzione tramite spallazione; rateo di produzione $2.23 \text{ atomi cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.
- **In organismi in media 0.22 Bq/g ;**
- $^{14}\text{CO}_2$ entra nelle piante tramite fotosintesi.



Radiocarbonio

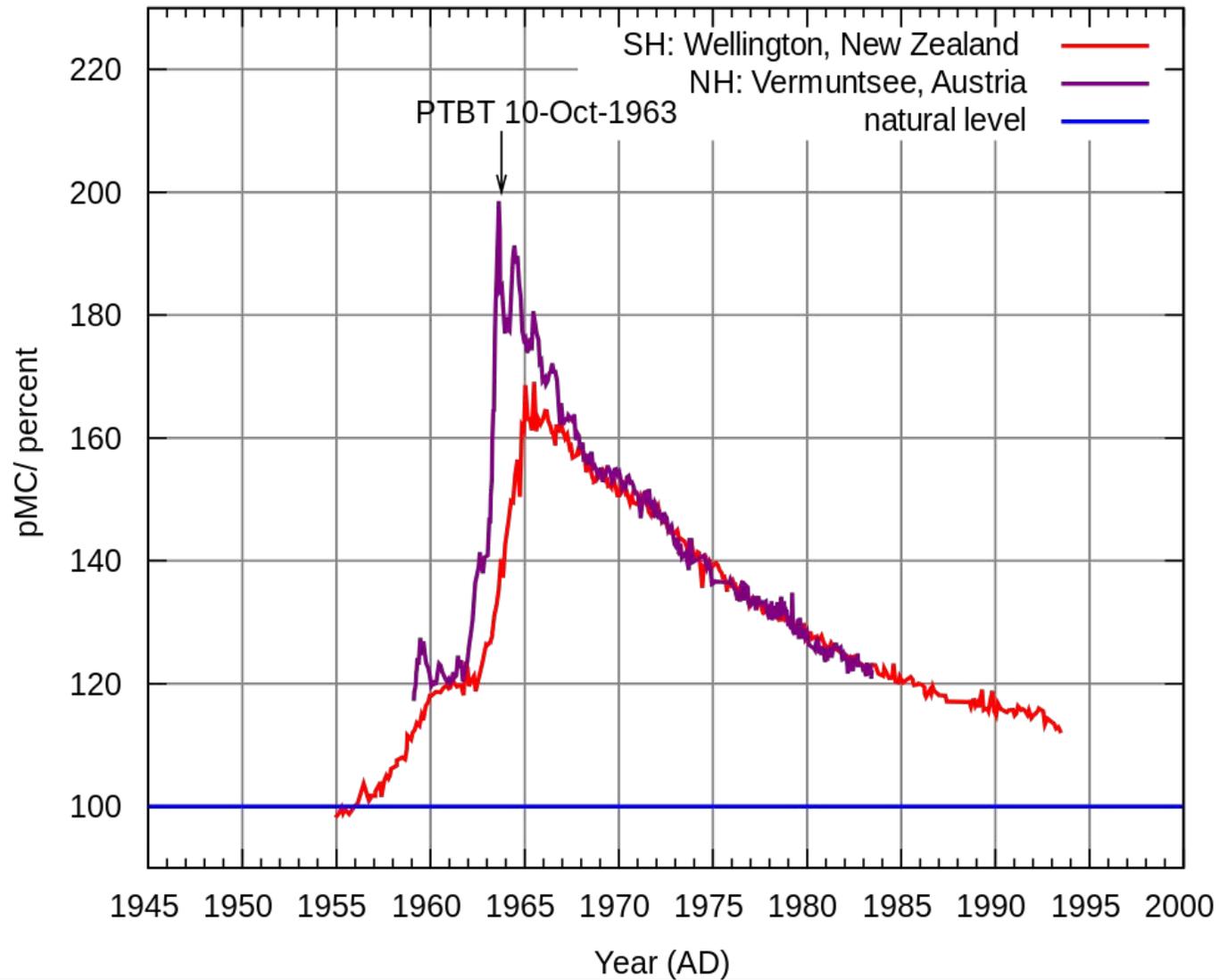


TABLE 12.1. COSMOGENIC NUCLIDES OF GEOLOGICAL INTEREST

Nuclide	Half-life, years	Decay constant, y^{-1}
^{14}C	5730	1.209×10^{-3}
^3H	12.33	5.62×10^{-2}
^{10}Be	1.500×10^6	4.62×10^{-5}
^{26}Al	7.16×10^5	9.68×10^{-5}
^{36}Cl	3.08×10^5	2.25×10^{-6}
^{32}Si	276	2.51×10^{-2}

Radionuclidi antropogenici

- Gli esseri umani stanno usando la radioattività da poco più di cento anni. Il contributo alla natura è piccolo rispetto alla radioattività naturale esistente e gran parte è anche decaduta da quando si sono fermati alcune attività (e.g. test nucleari).

Vie di produzione

- Test ordigni nucleari
- Impianti nucleari, trattamento combustibili nucleari
- Applicazioni mediche
- Carbone

Test ordigni nucleari

- fall-out
- La potenza distruttiva dell'ordigno cambia il tempo di residenza del fall-out
- MT: va in stratosfera \Rightarrow fino a 5 a
- kT: va in troposfera \Rightarrow da 1 mese ad 1 a
- Le vite di dimezzamento dei prodotti variano da frazioni di secondi fino a milioni di anni (^{90}Sr , ^{131}I , ^{14}C , ^3H , ^{85}Kr , ^{137}Cs , ^{55}Fe , ^{239}Pu)

Impianti nucleari

- preparazione del combustibile fissile
 - attività minatorie per uranio
 - produzione di U_3O_8
 - conversione da UO_3 , UF_4 a UF_6
 - arricchimento isotopico di ^{235}U
- fissione nel reattore
- trattamento rifiuti

Impianti nucleari

- Prodotti

nuclide	resa [%]	decadimento	$t_{1/2}$	analogo
^{89}Sr	4.79	β^-	50.5 d	Ca
^{90}Sr	5.77	β^-	28.5 a	Ca
^{131}I	3.1	β^-	8.02 d	I
^{133}I	2.9	β^-	20.8 h	I
^{134}Cs	6.15	β^-	2.06 a	K
^{137}Cs	0.7	β^-	30.17 a	K

Applicazioni mediche

- medicina nucleare (^{99m}Tc (85%), altri 15% are ^{131}I , ^{67}Ga , ^{133}Xe , ^{123}I)
- radioterapia (acceleratori, ^{60}Co)
- radiologia (PET)

Carbone

- Rilascio di ^{14}C , torio ed uranio bruciando la legna
- Ceneri sottili contribuiscono alla esposizione dei polmoni.

Corpo umano (70 kg)

nuclide	massa totale del nuclide	attività totale del nuclide	assunzione giornaliera nuclidi
Uranio	90 μg	30 pCi (1.1 Bq)	1.9 μg
Torio	30 μg	3 pCi (0.11 Bq)	3 μg
^{40}K	17 mg	120 nCi (4.4 kBq)	0.39 mg
^{226}Ra	31 pg	30 pCi (1.1 Bq)	2.3 pg
^{14}C	22 ng	0.1 μCi (3.7 kBq)	1.8 ng
^3H	0.06 pg	0.6 nCi (23 Bq)	0.003 pg
Polonio	0.2 pg	1 nCi (37 Bq)	$\sim 0.6 \mu\text{g}$

Alimenti

alimento	^{40}K [Bq/kg]	^{226}Ra [Bq/kg]
Banana	130	0.037
Noce di Brasile	200	37 - 260
Carota	125	0.022 - 0.074
Patate	125	0.037 - 0.093
Birra	14	---
Carne rossa	110	0.019
Fagiolo di Lima, crudo	170	0.074 - 0.185
Acqua potabile	---	0 - 0.006

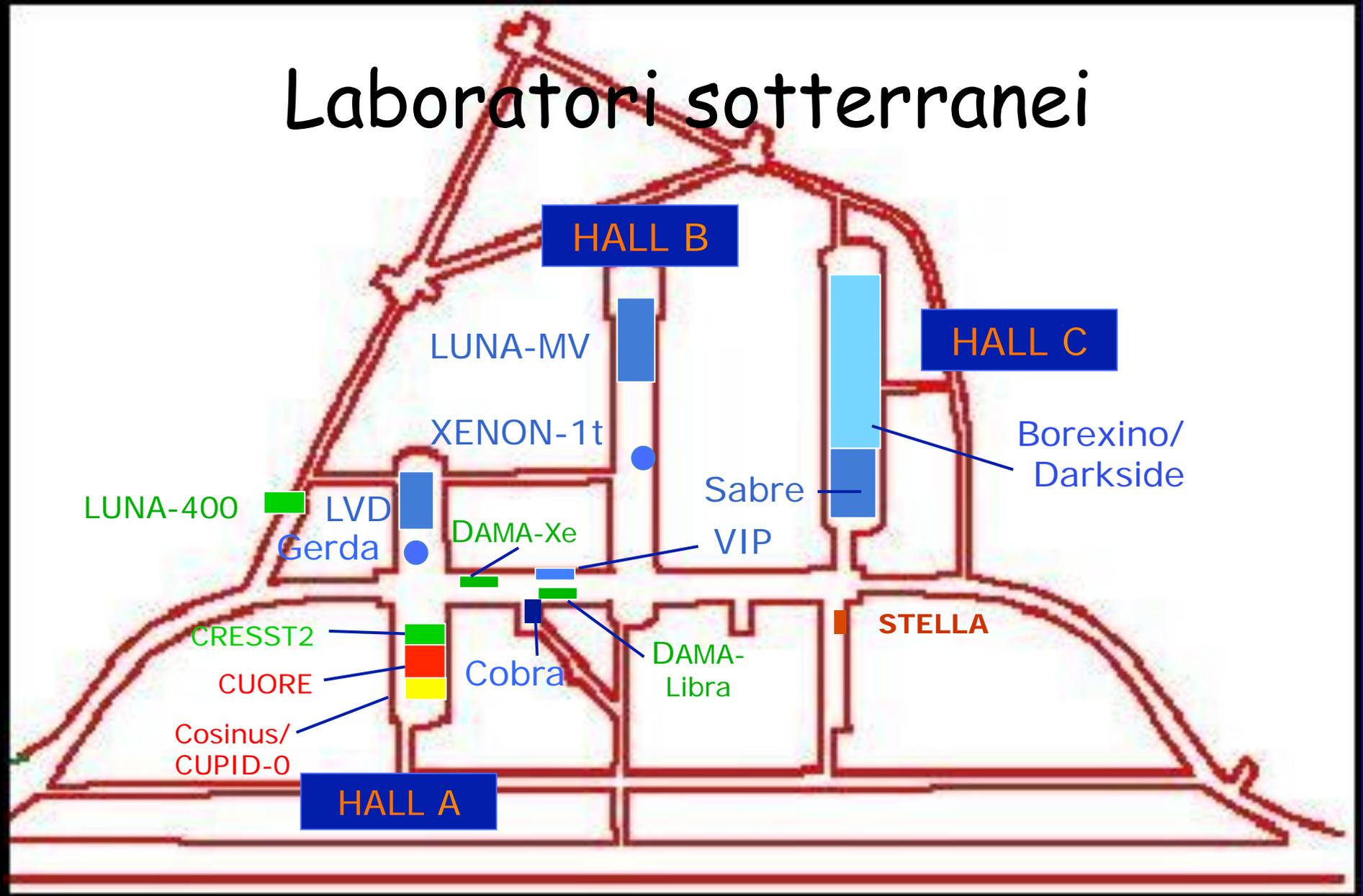
Il laboratorio STELLA

Introduzione

- Esperimenti di fisica fondamentale devono osservare a volte segnali molto deboli. Devono essere schermati per ridurre il più possibile il fondo che ha origini di natura varia:
 - radiazione cosmica
 - decadimenti nucleari
 - radioattività naturale

⇒ Spettrometria α e γ @ L.N.G.S.

Laboratori sotterranei







Proprietà roccia circostante

concentrazioni (in Bq kg⁻¹):

	Gran Sasso	M ⁺ Blanc
²³² Th	0.25-0.5	≈90
²³⁸ U	5	80-500
²²⁶ Ra	4.5	30-300
⁴⁰ K	5-50	100-2000

Proprietà roccia circostante

- composizione:

Ca 26 %, Si 1 %, Mg 9 %, O 51.5 %,
C 12.5 %

$$\langle \rho \rangle = (2.71 \pm 0.05) \text{ g cm}^{-3}$$

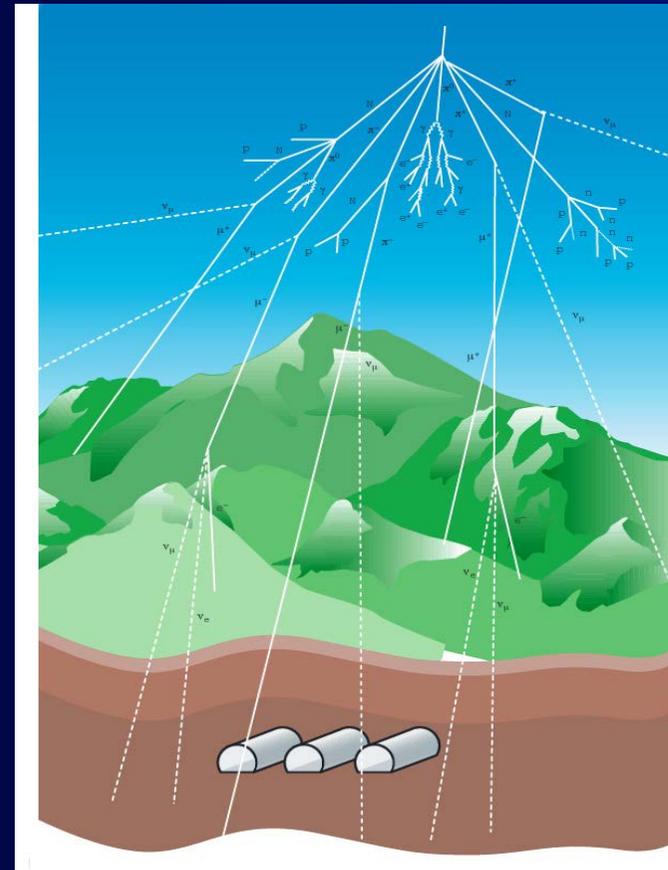
$$\langle Z \rangle = 11.4$$

$$\langle Z^2/A \rangle = 5.7$$

Caratteristiche del luogo

lat. $42^{\circ} 27' N$
long. $13^{\circ} 34' E$

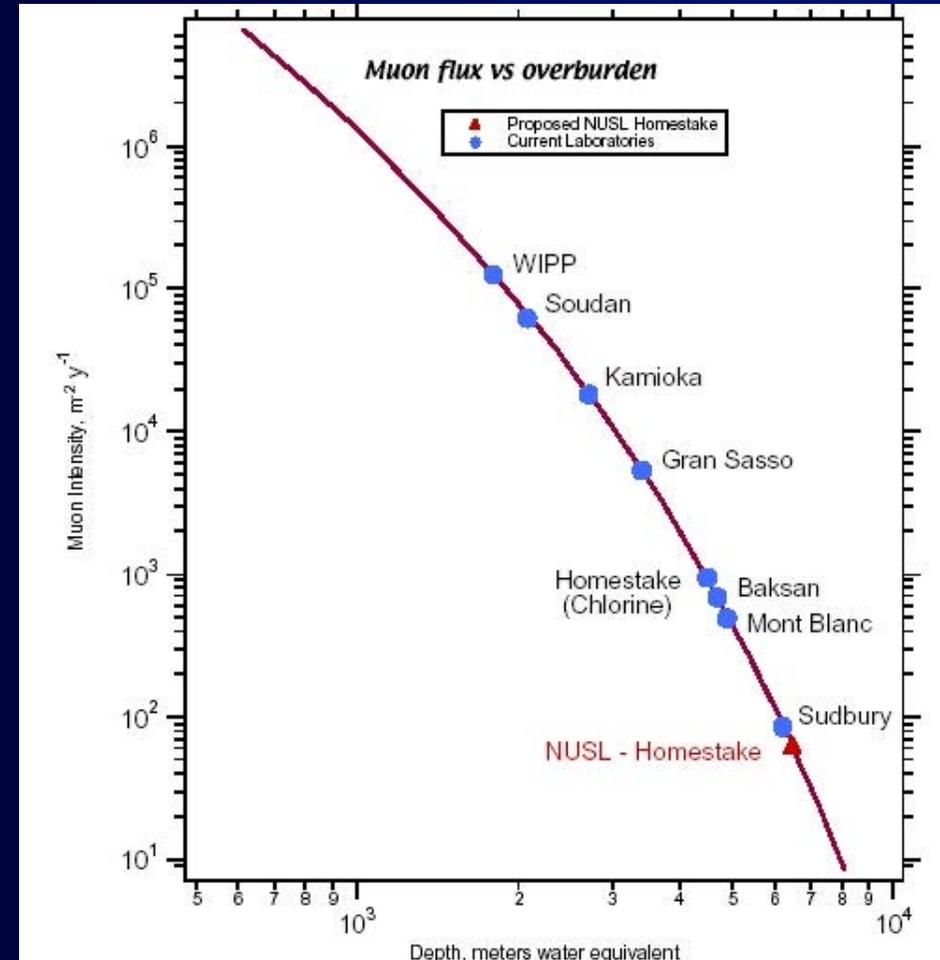
profondità media:
3800 m w.e.
profondità minima:
3000 m w.e.



Muoni

Flusso muonico:

$\approx 1 \mu / (\text{m}^2 \cdot \text{h})$, $E_\mu > 1 \text{ TeV}$
(10^6 riduzione rispetto alla superficie)



Neutroni

flusso neutronico:

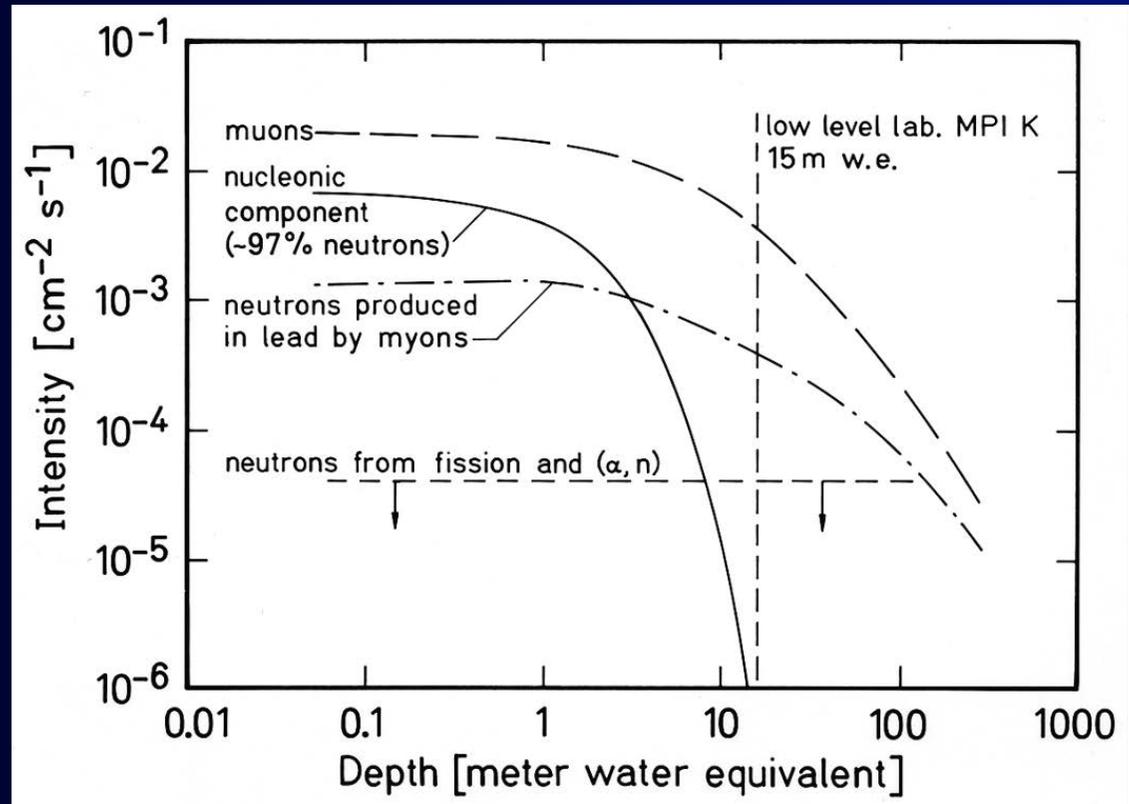
e.g. @ L.N.G.S.

fissione e (α, n)

$$\Phi_{th} \approx 3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

$$\Phi_{fc} < 0.3 \times 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

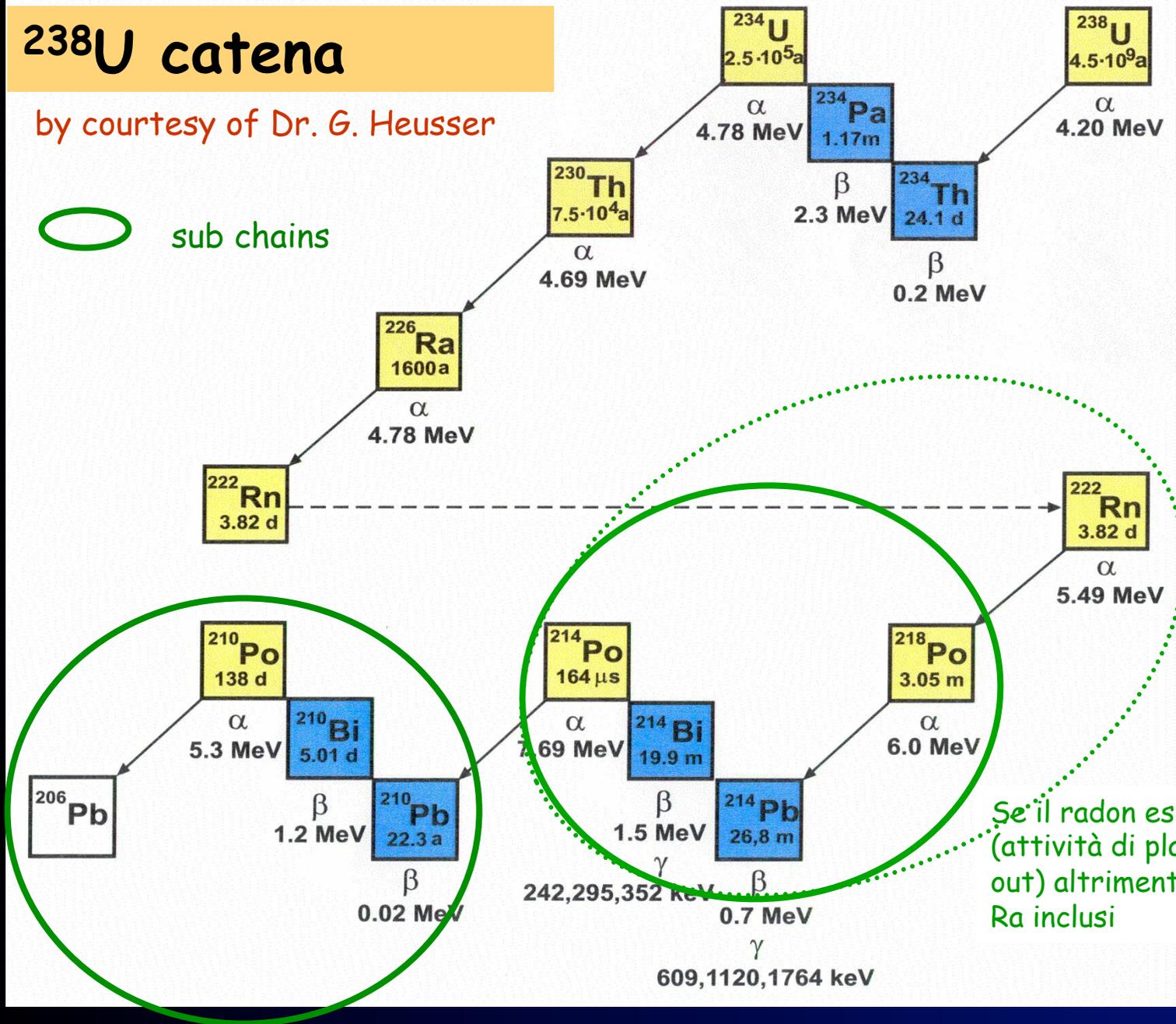
(10^3 riduzione)



^{238}U catena

by courtesy of Dr. G. Heusser

 sub chains



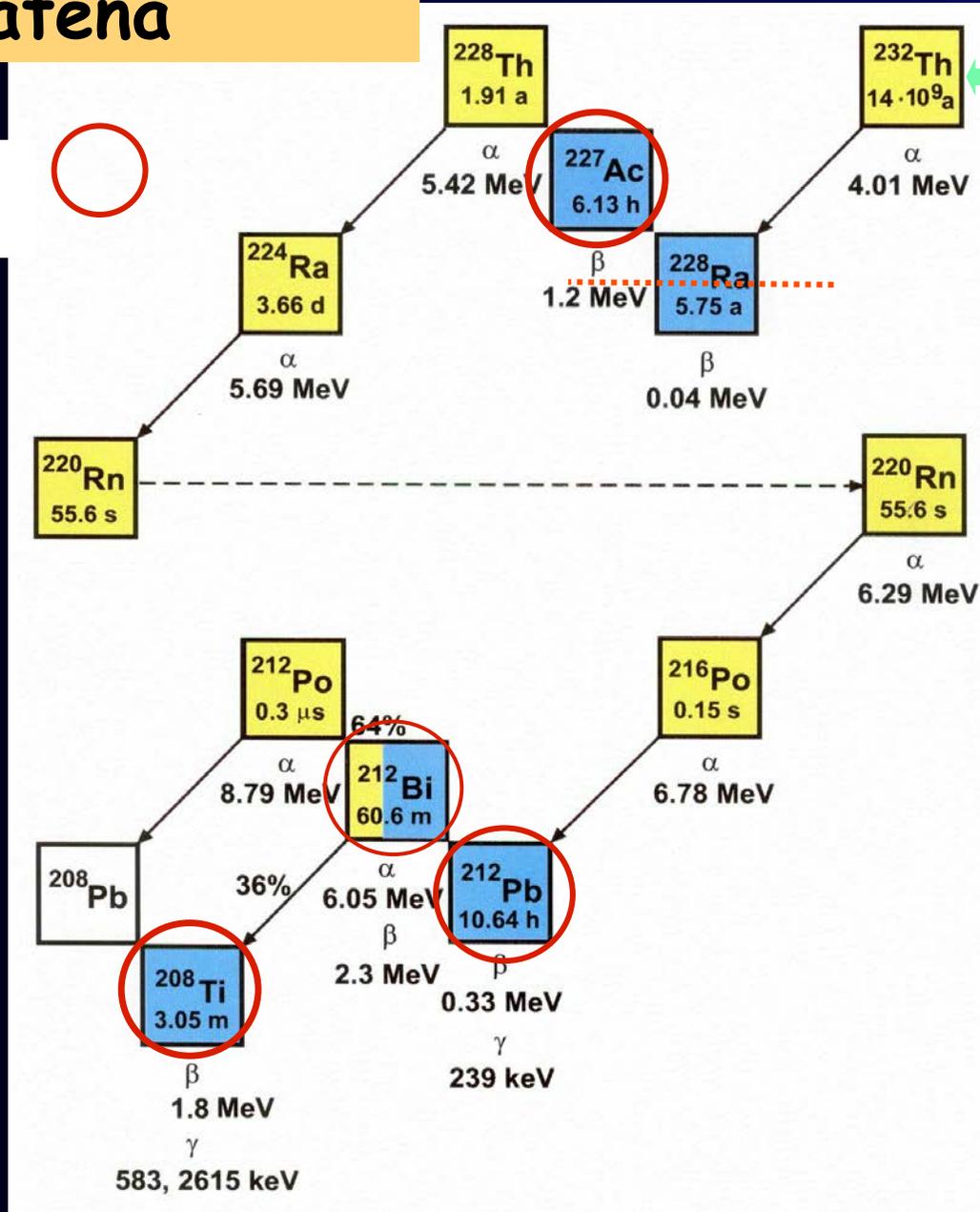
Se il radon esce (attività di plate out) altrimenti Rn e Ra inclusi

^{232}Th catena

by courtesy of Dr. G. Heusser

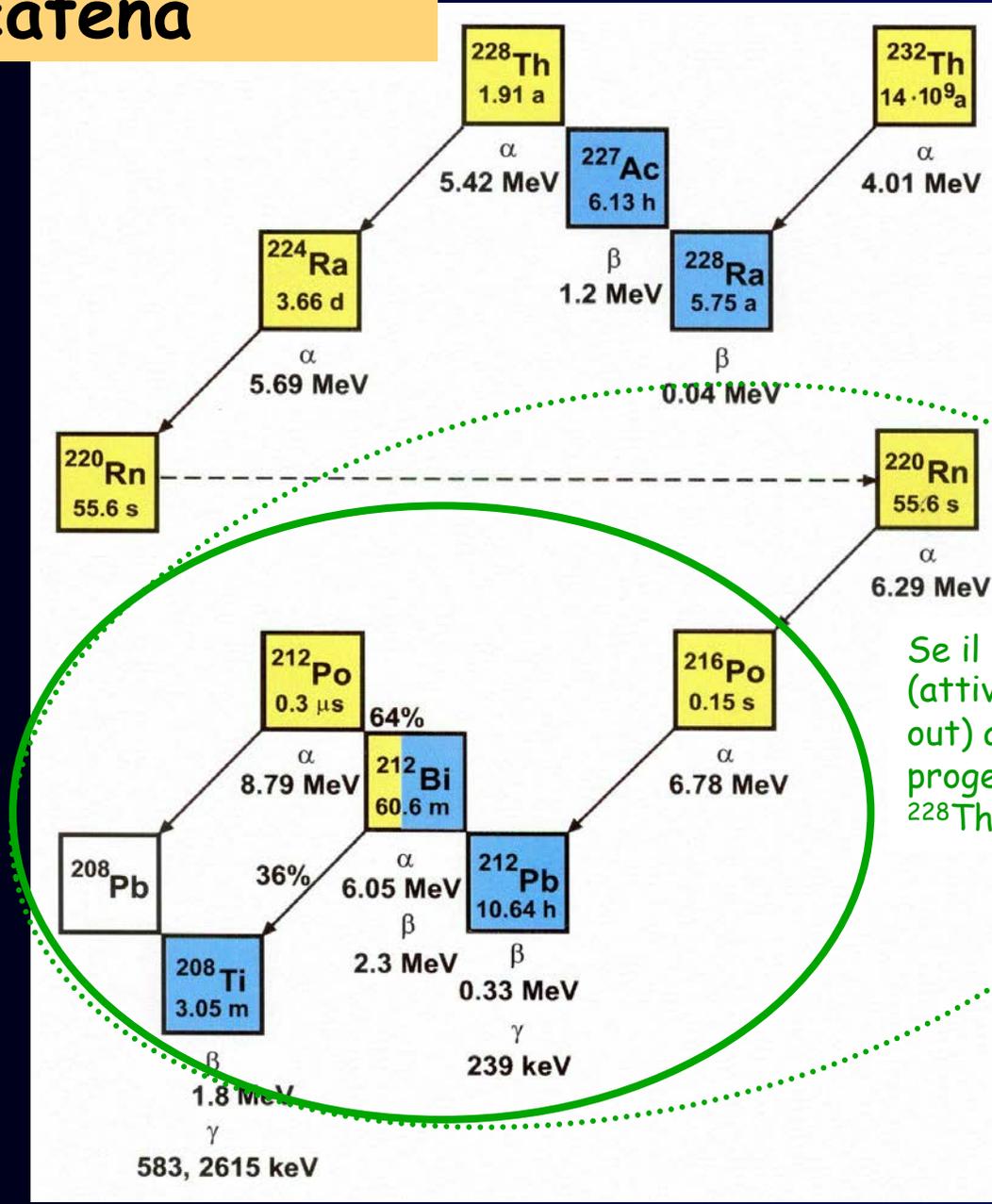
Radionuclidi con
emissione gamma

spettrometria di
massa

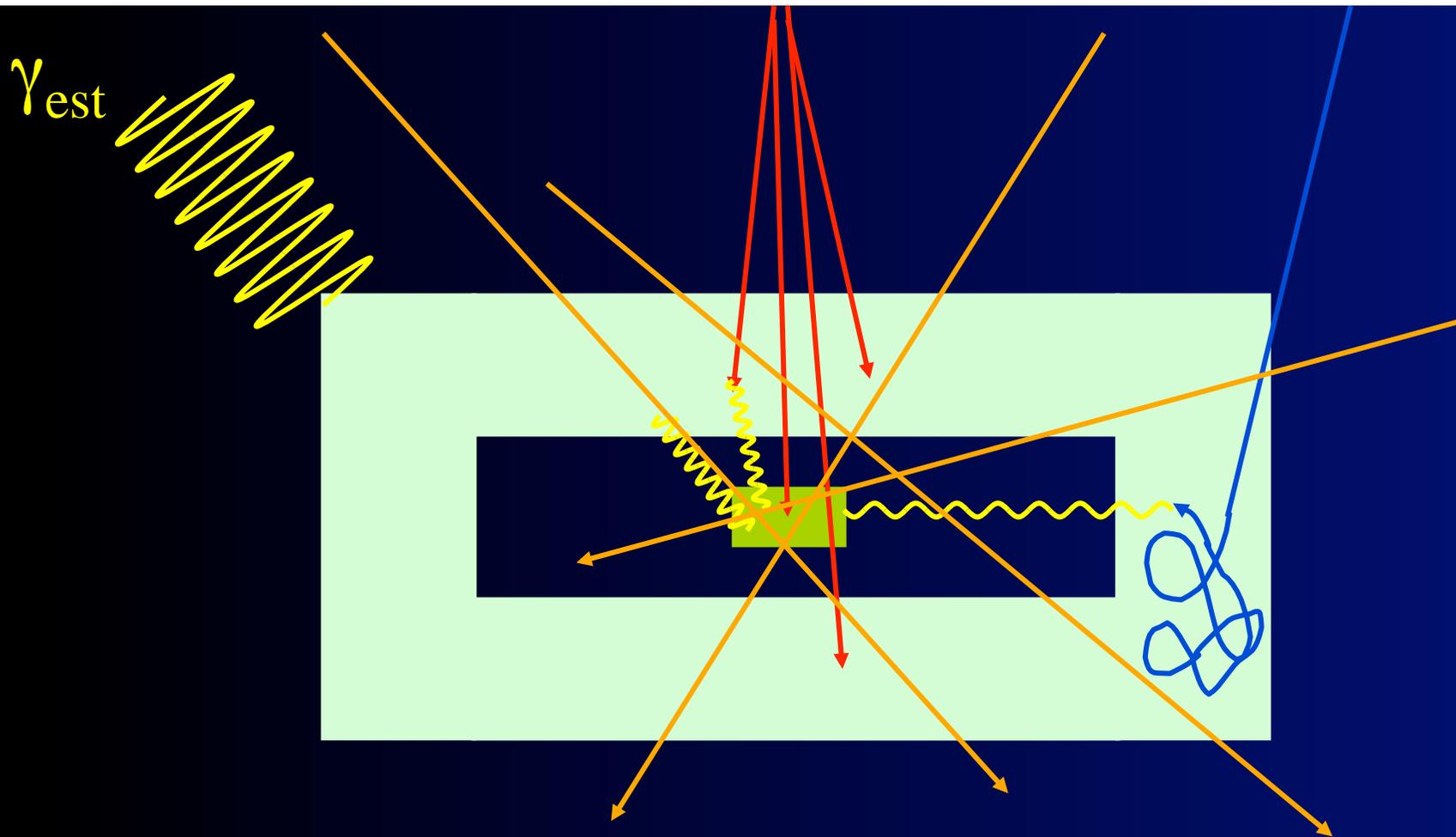


^{232}Th catena

by courtesy of Dr. G. Heusser



Se il radon esce (attività di plate out) altrimenti Rn e progenitori fino al ^{228}Th inclusi

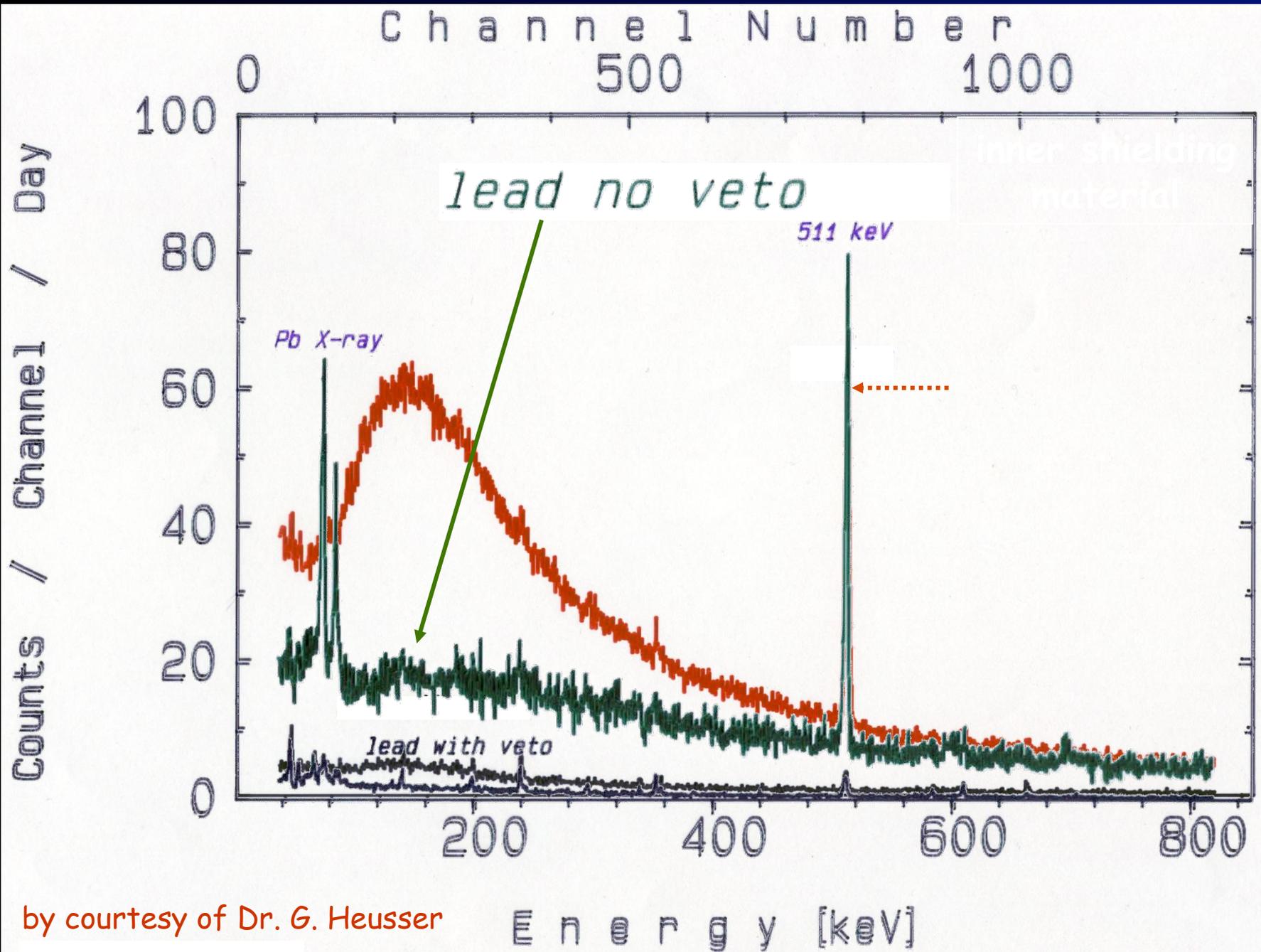


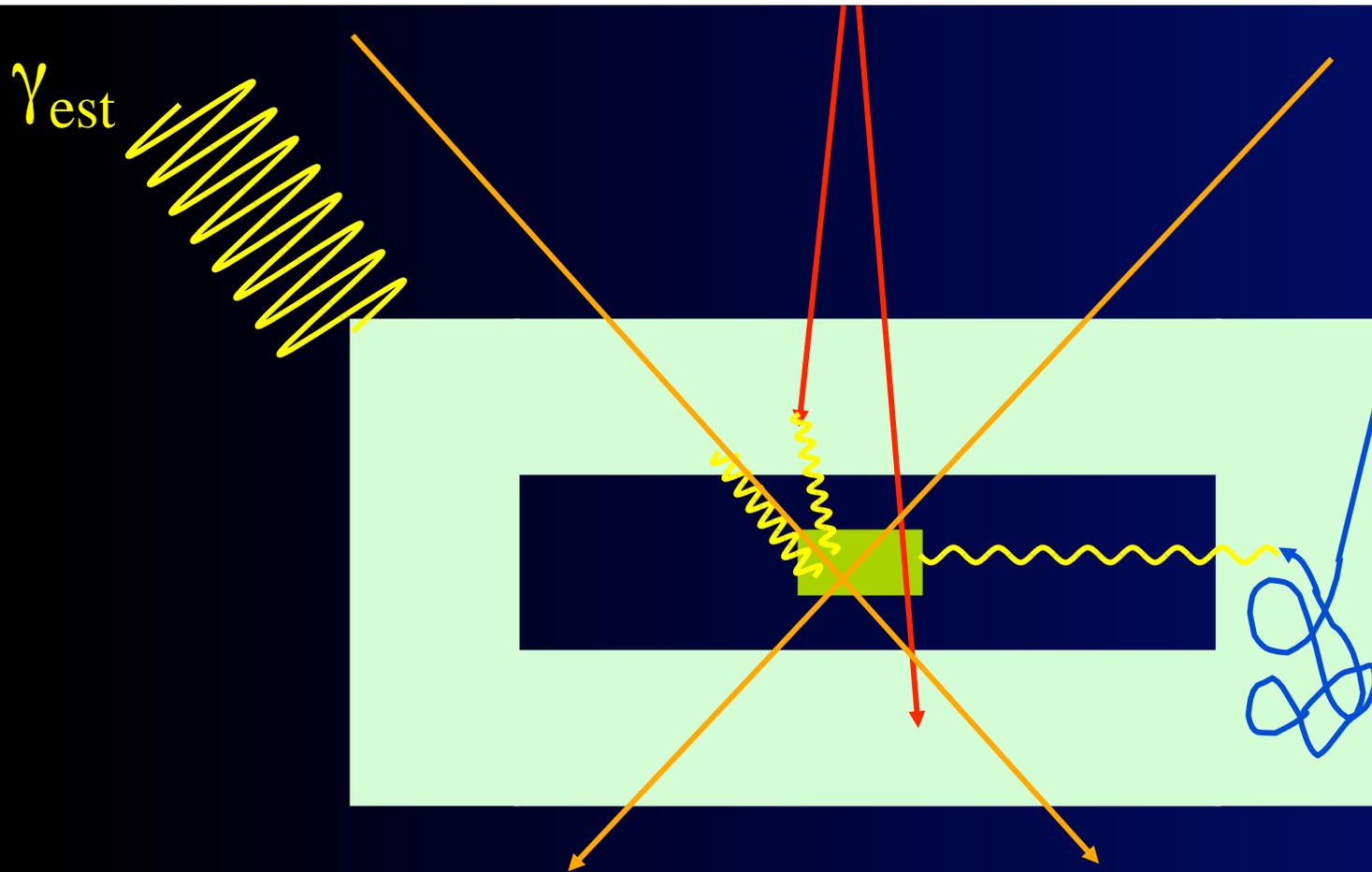
Muoni di alta energia non vengono fermati

Sciame elettromagnetico sono solo parzialmente attenuati

Termalizzazione dei neutroni produce gamma attraverso cattura (n, γ)

Fondo secondario indotto da interazioni particelle ad alta energia - schermatura



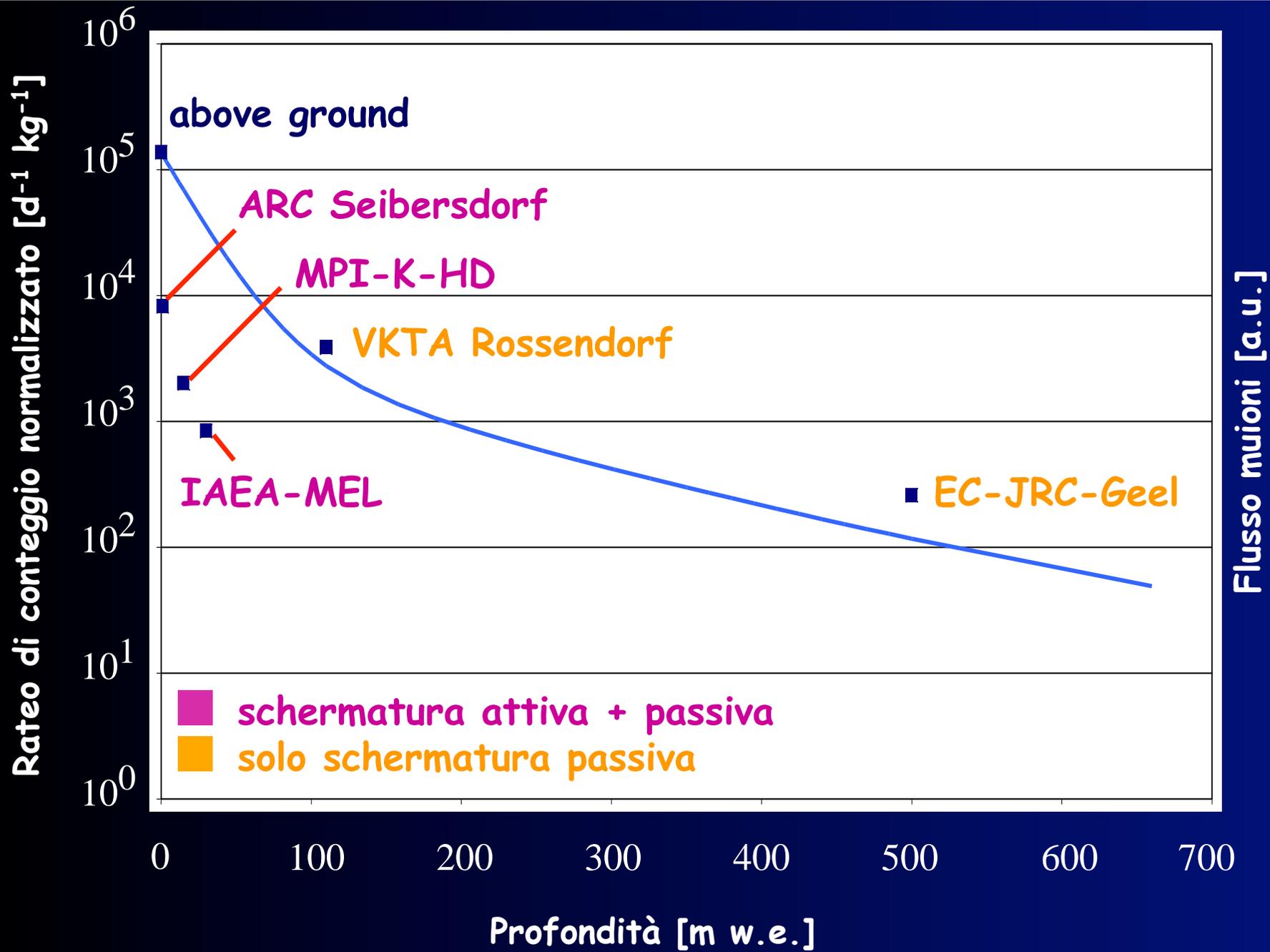


Muoni di alta energia ridotti da strato di copertura e/o schermo attivo

Sciame elettromagnetici sono attenuati

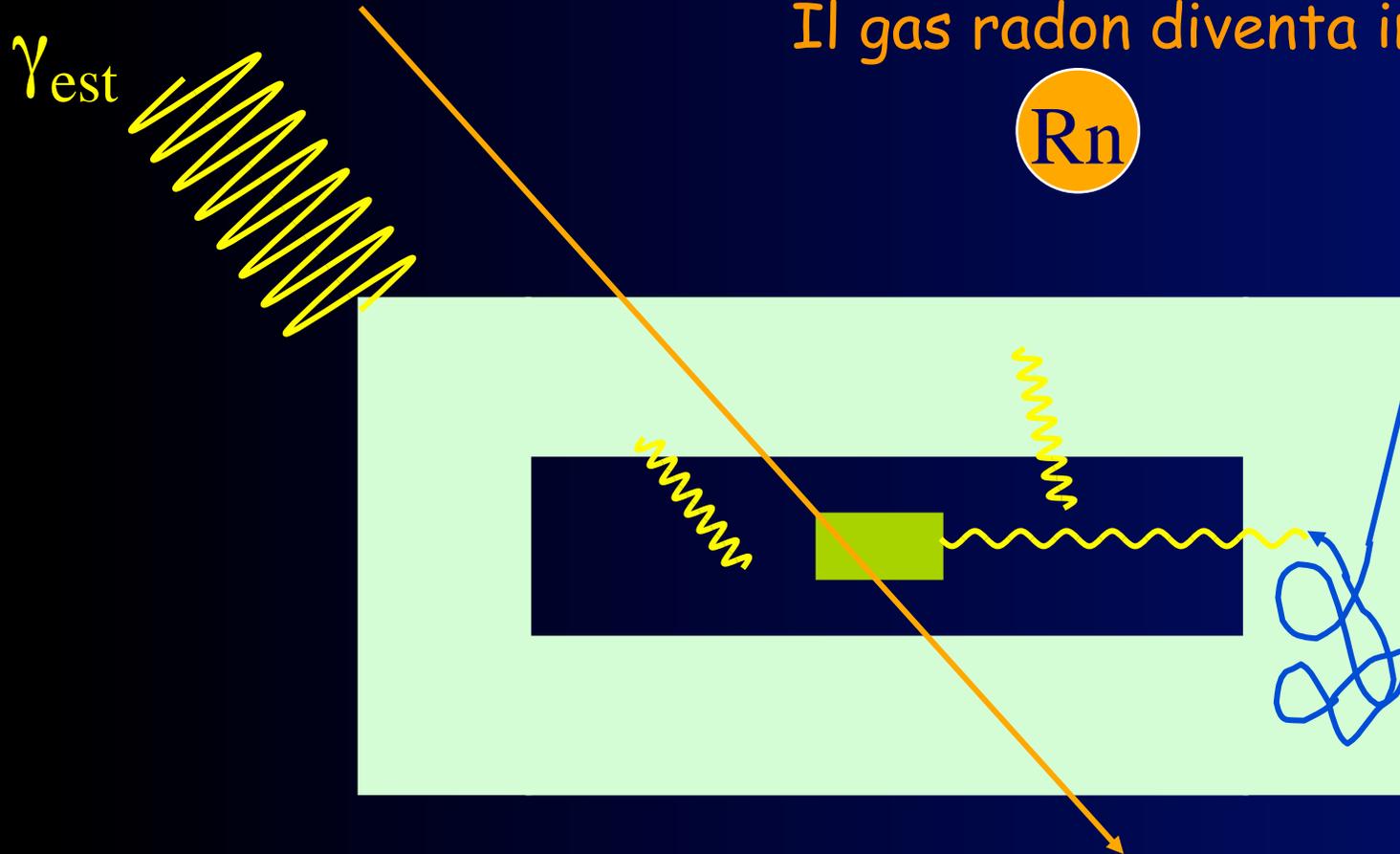
Termalizzazione dei neutroni produce gamma attraverso cattura (n, γ)

Fondo secondario indotto da interazioni particelle ad alta energia - schermatura



Il gas radon diventa importante

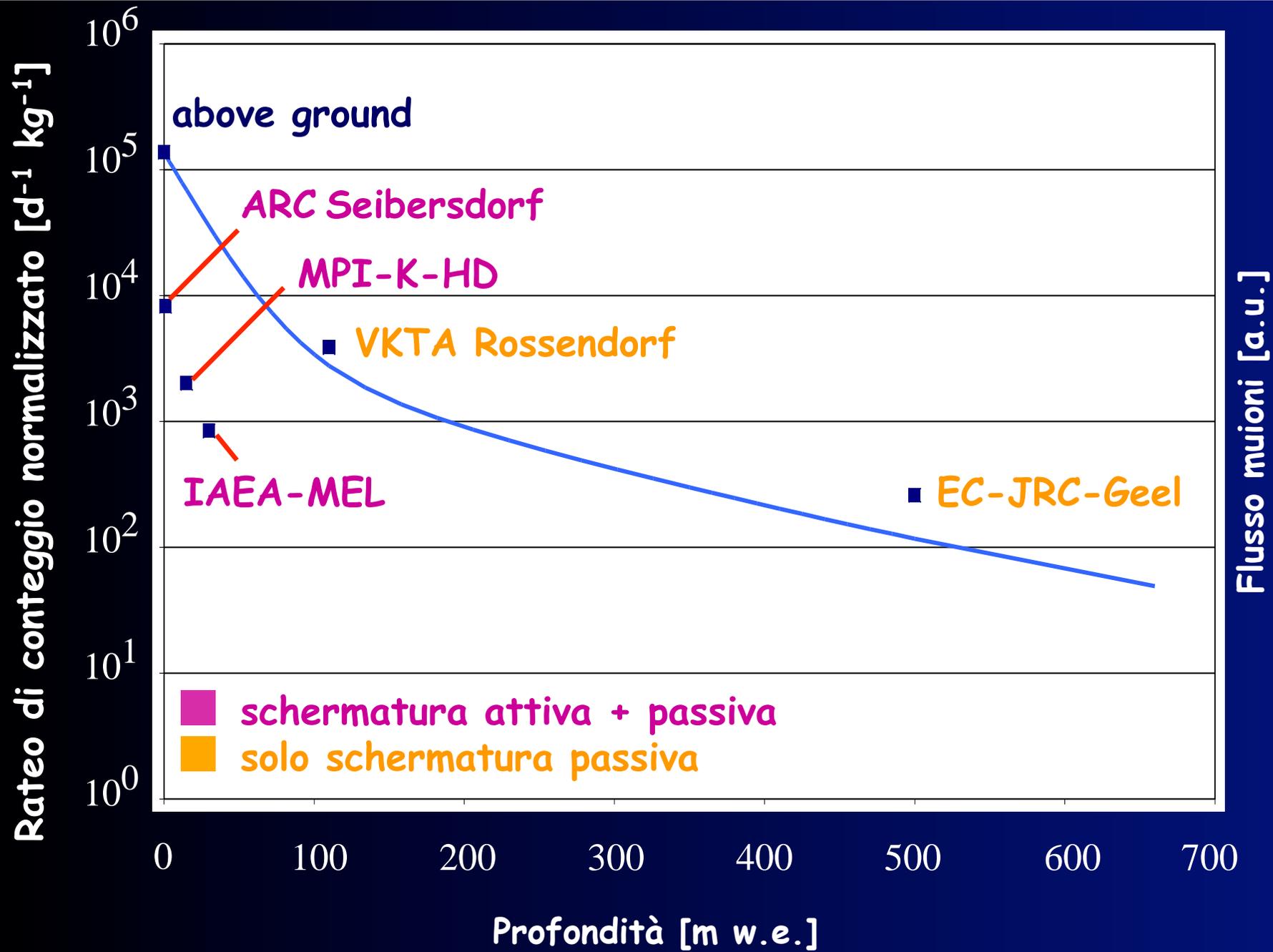
Rn

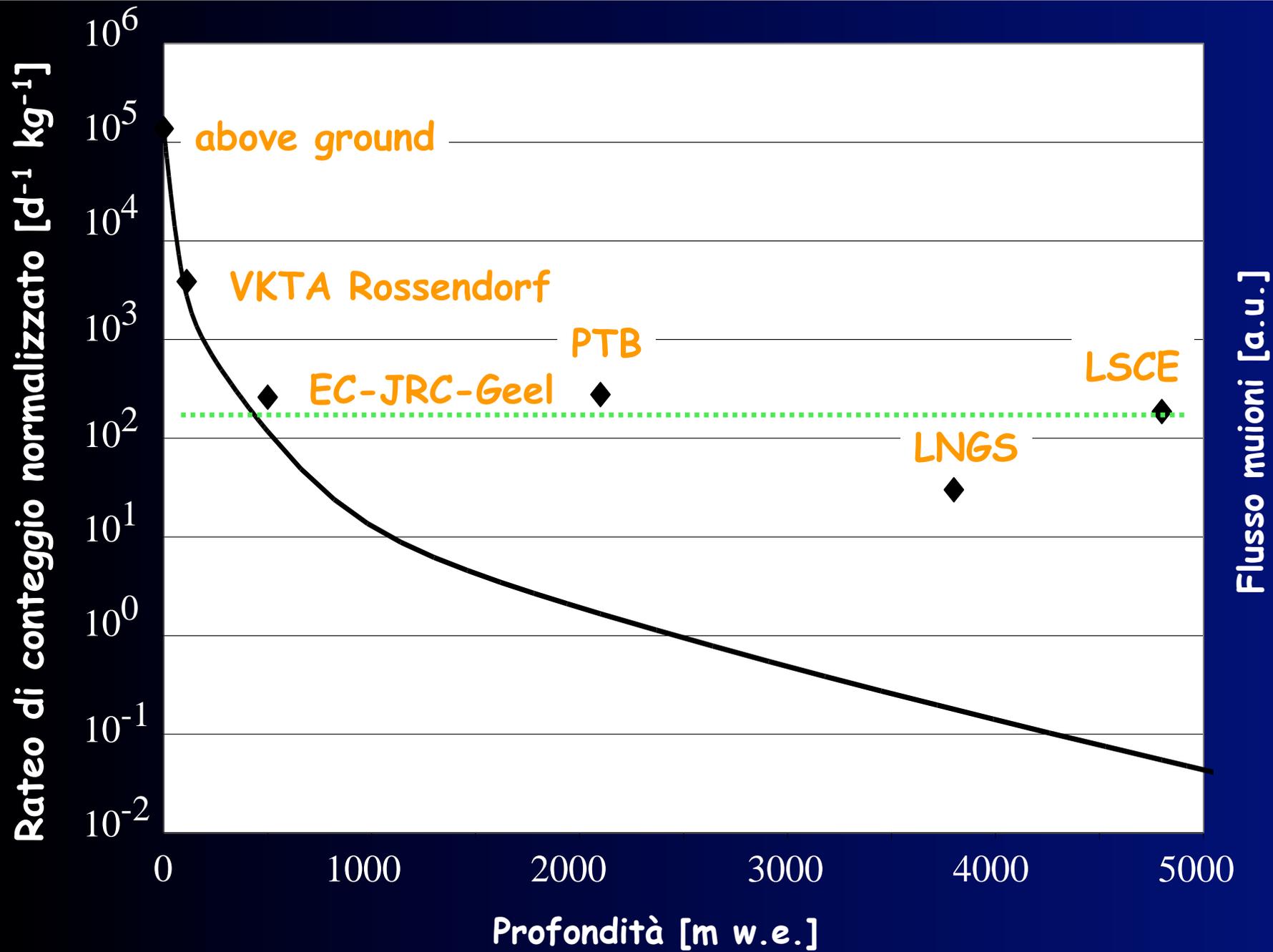


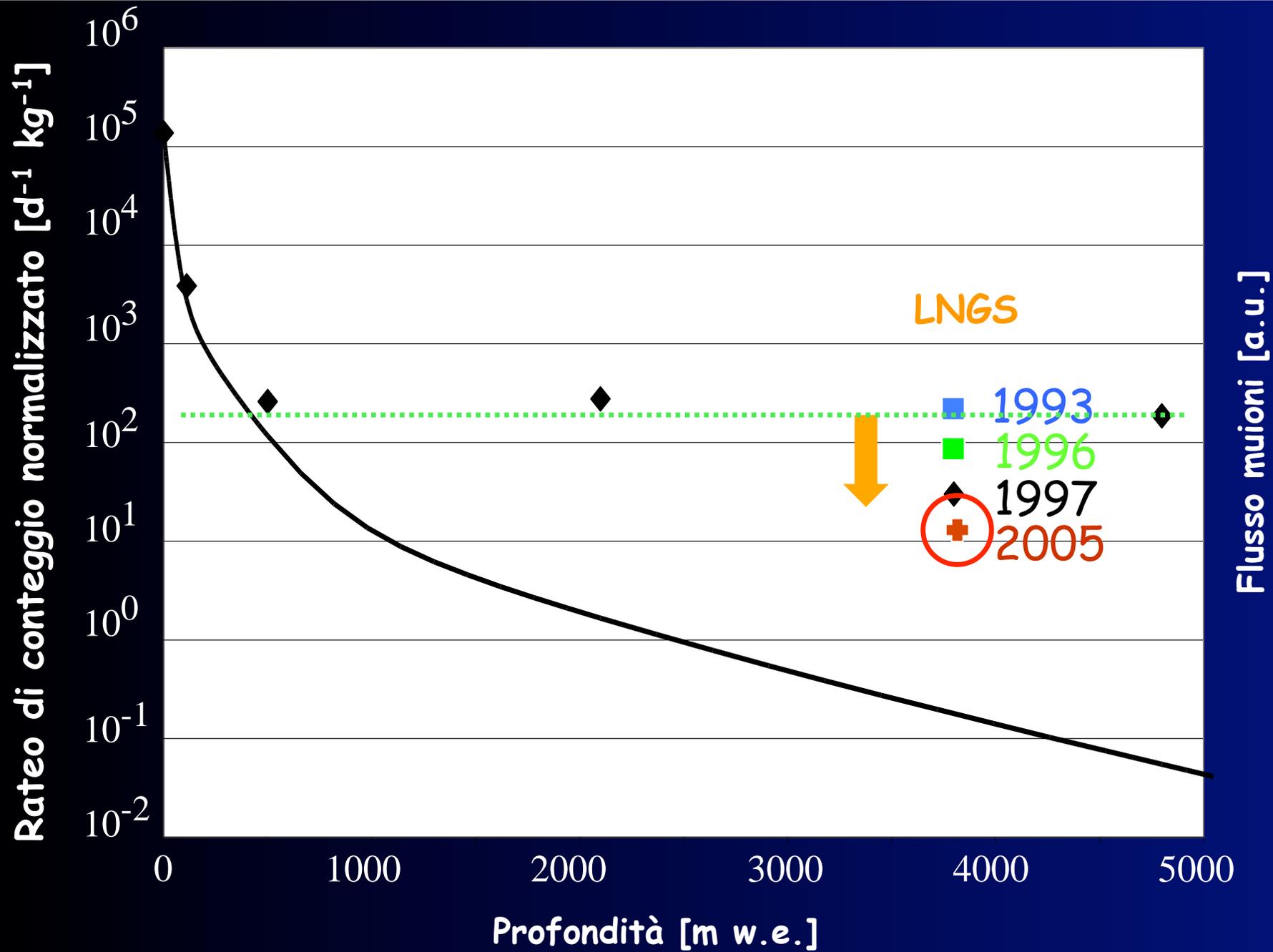
Muoni di alta energia non sono ulteriormente ridotti andando
Sempre più in profondità (fattore $>10^{-6}$ di riduzione @ LSCE & LNGS)

Praticamente solo neutroni indotti da radioattività naturale
((α,n) & fission), (fattore 10^{-3} di riduzione @ LNGS)

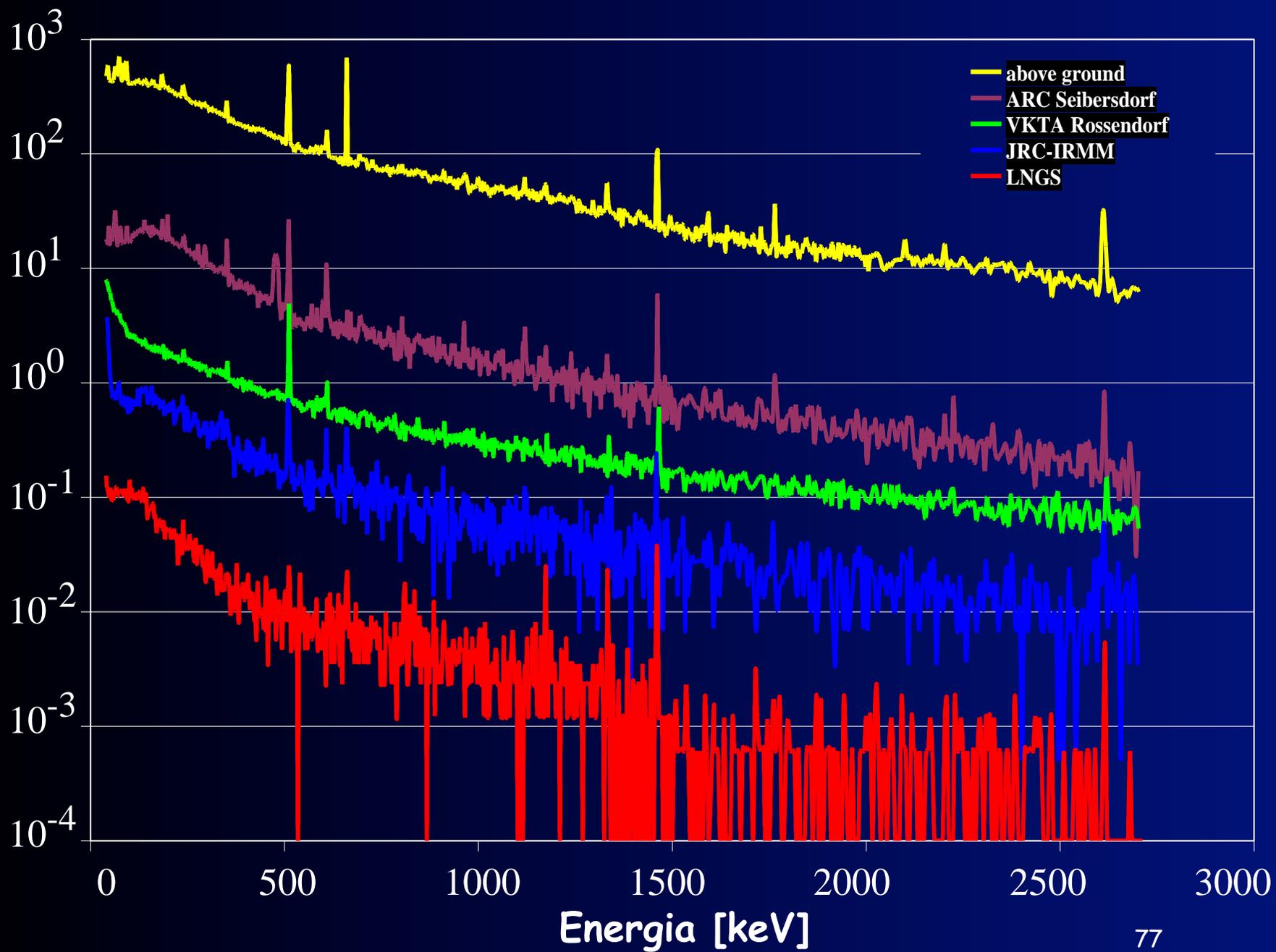
Raggi γ ora provenienti da radioattività naturale nella schermatura e nel rivelatore







Rateo di conteggio normalizzato [$\text{d}^{-1} \text{keV}^{-1} \text{kg}^{-1}$]



Rivelatori al germanio

schermatura:

20 cm piombo bassa attività ($^{210}\text{Pb} < 20 \text{ Bq kg}^{-1}$)

5 cm rame elettrolitico, privo di ossigeno

5 cm acrilico (sul fondo)

riduzione Rn:

1 cm box acrilico con flussaggio continuo N_2

selezione materiali:

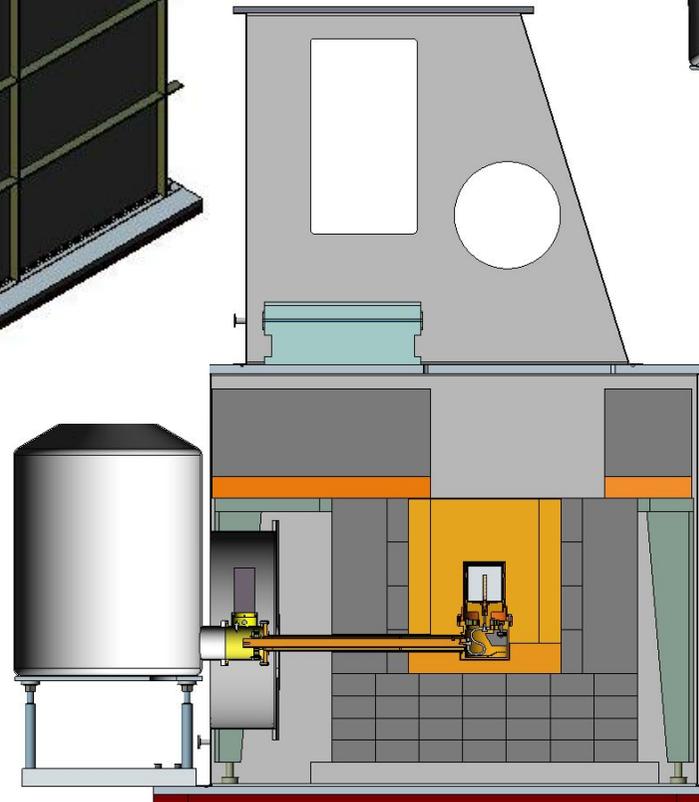
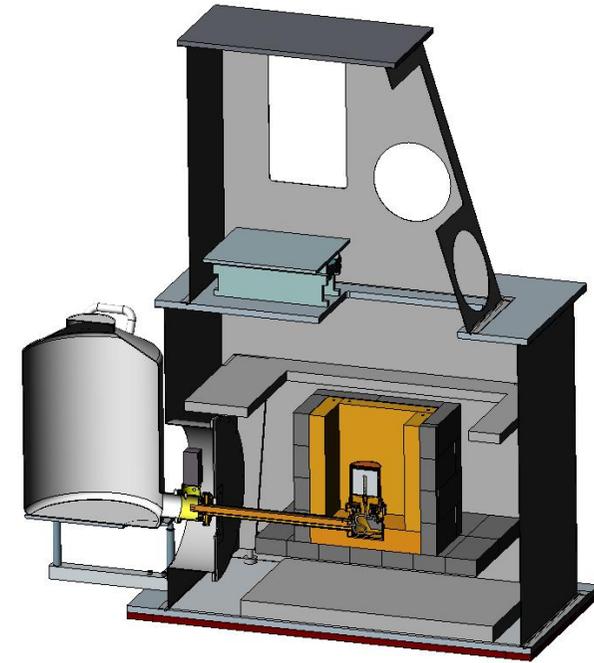
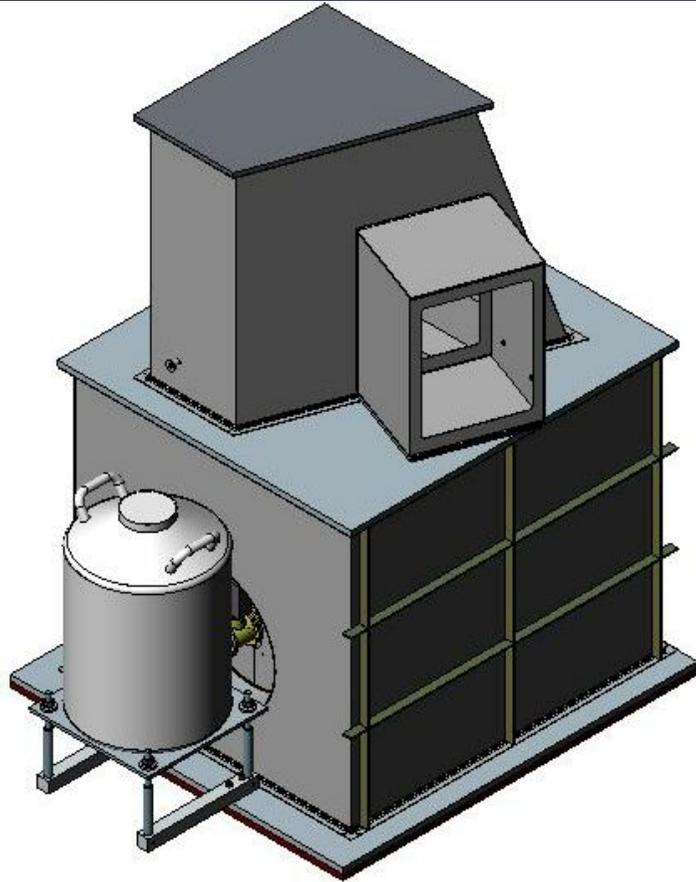
alta "radio-purezza", (quasi) nessuna attivazione

GeMPI

Operato al

LNGS

(3800 m w.e.)

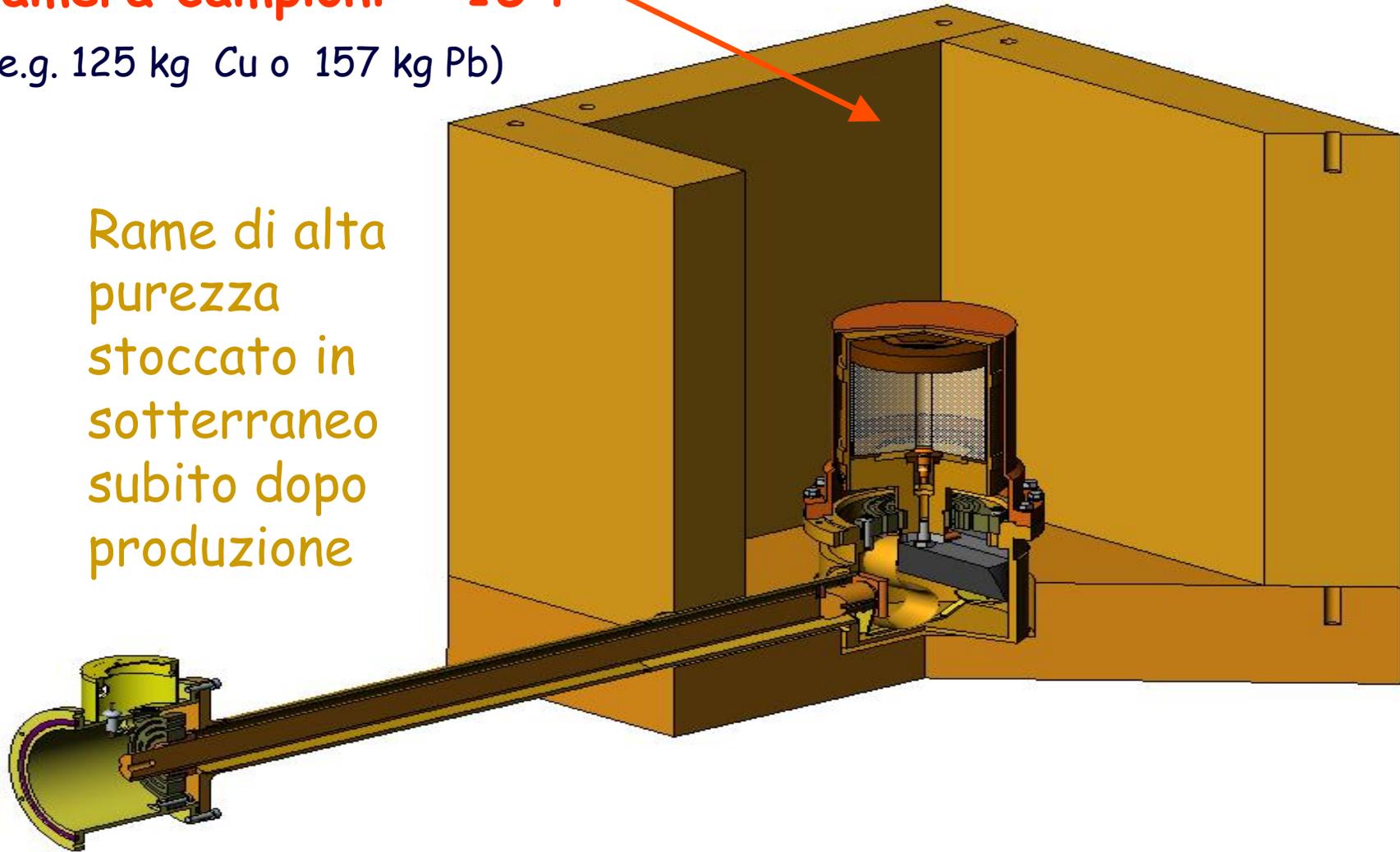


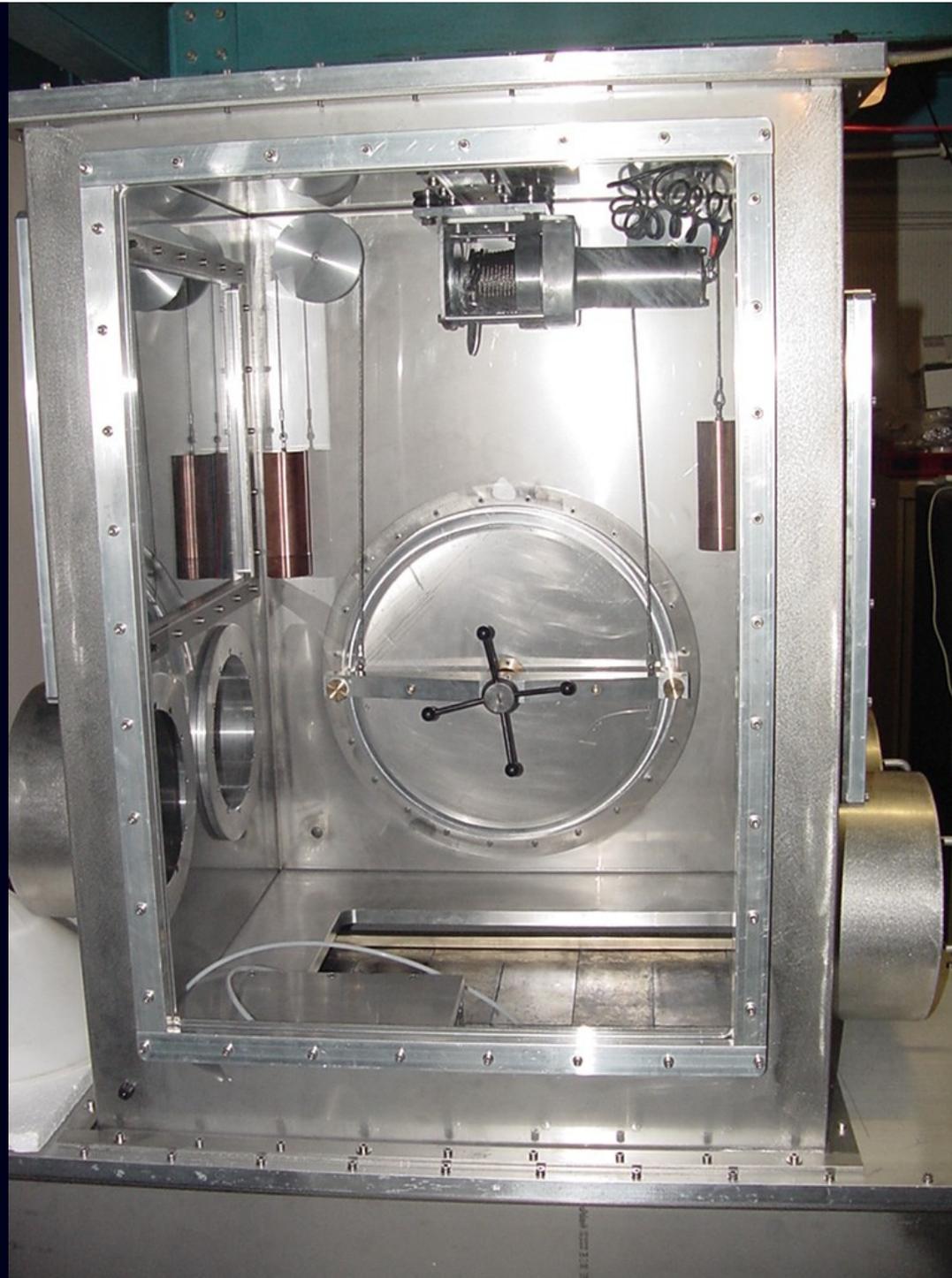
G. Heusser
B. Prokosch
H. Neder
M. Laubenstein

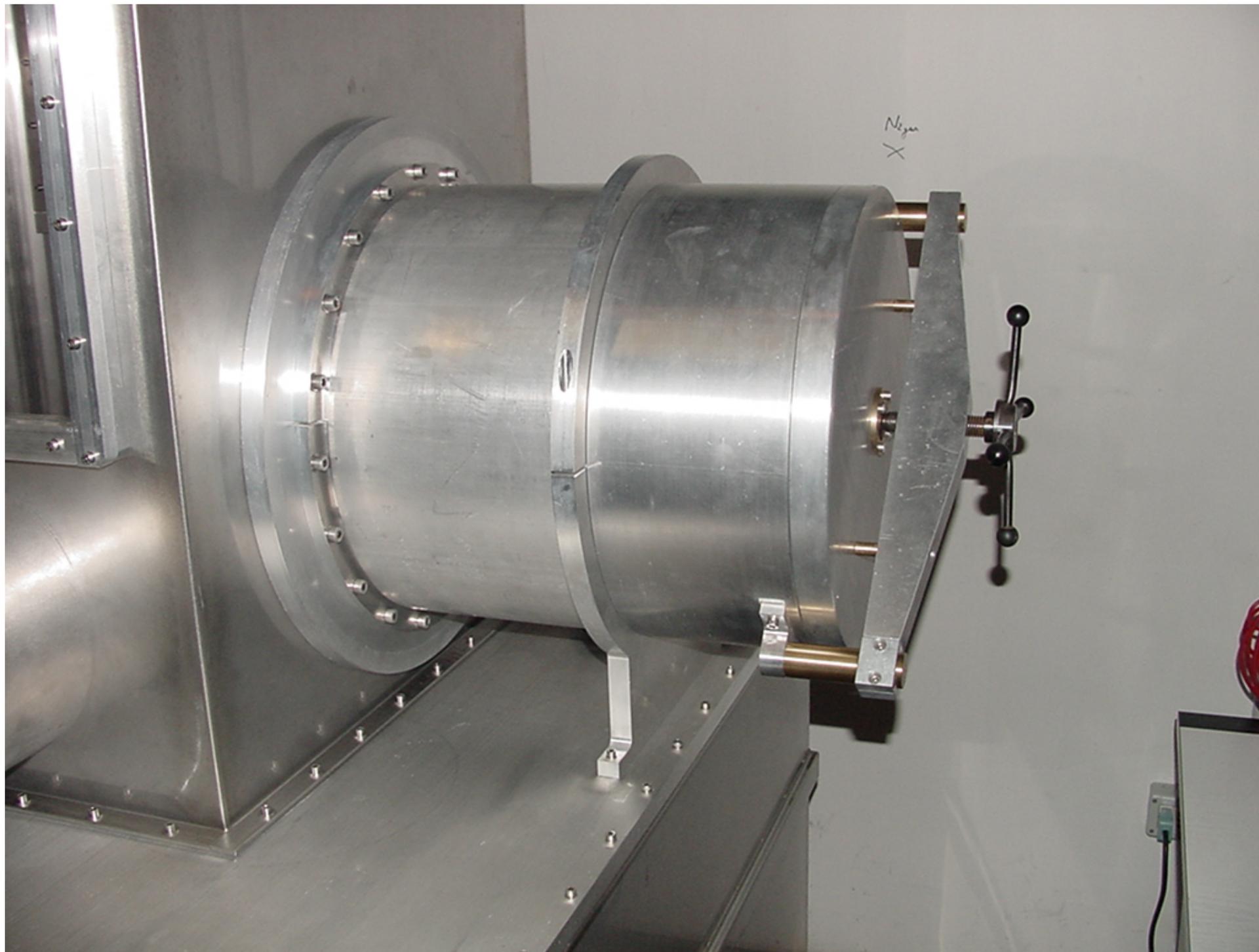
**Volume effettivo della
camera campioni ~ 15 l**

(e.g. 125 kg Cu o 157 kg Pb)

Rame di alta
purezza
stoccato in
sotterraneo
subito dopo
produzione







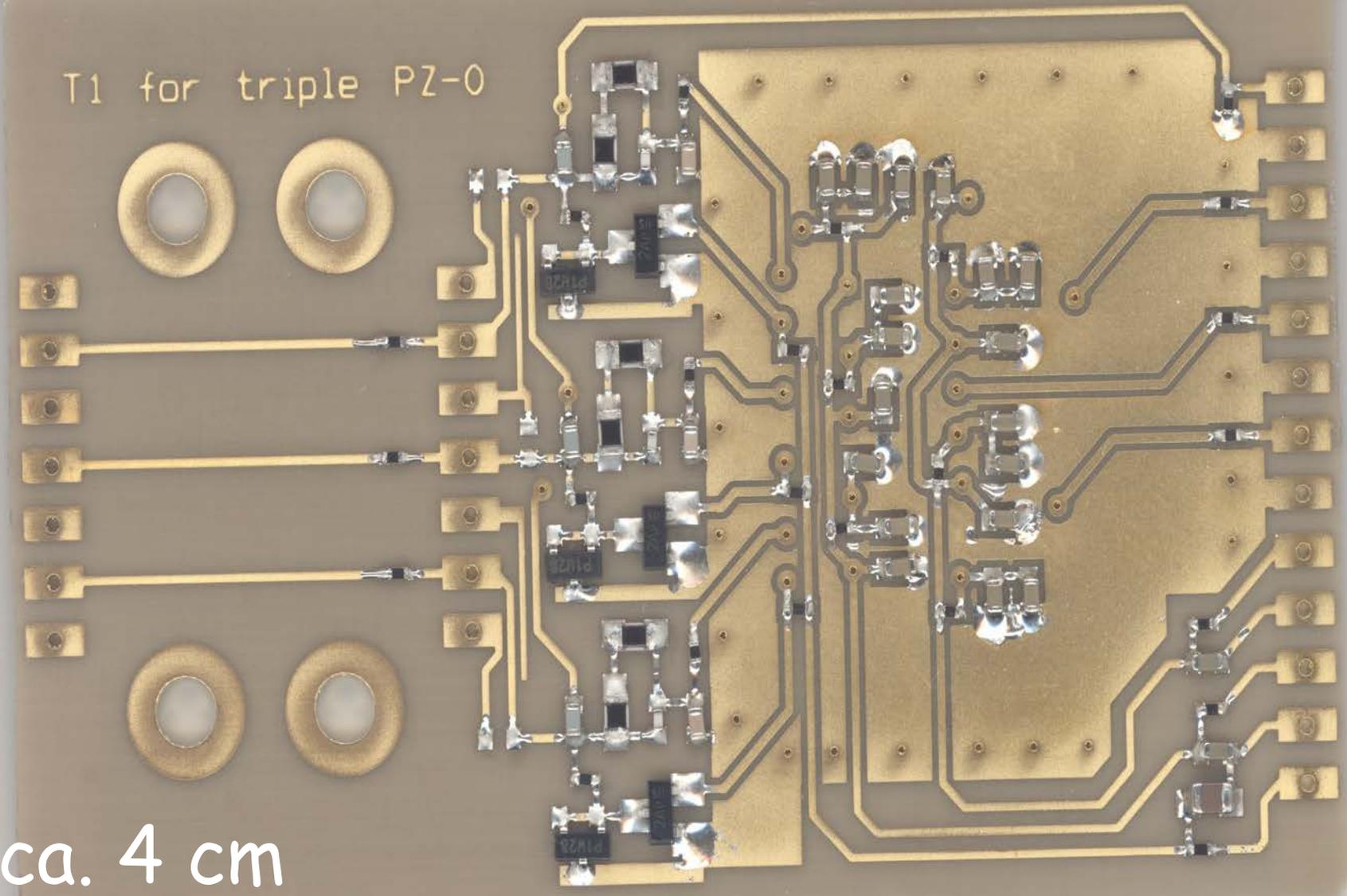
GeDSG



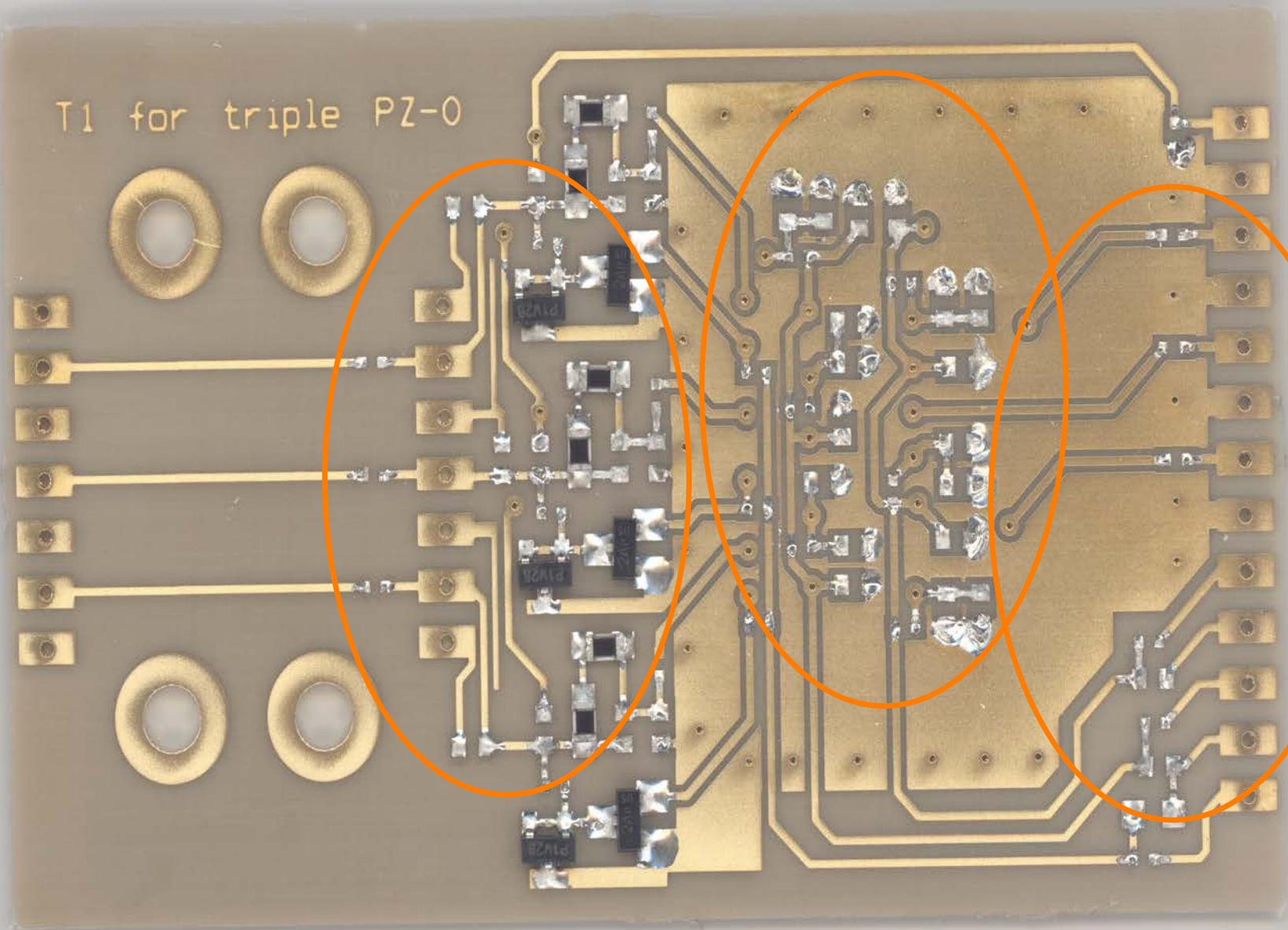
ca. 6 cm

T1 for triple PZ-0

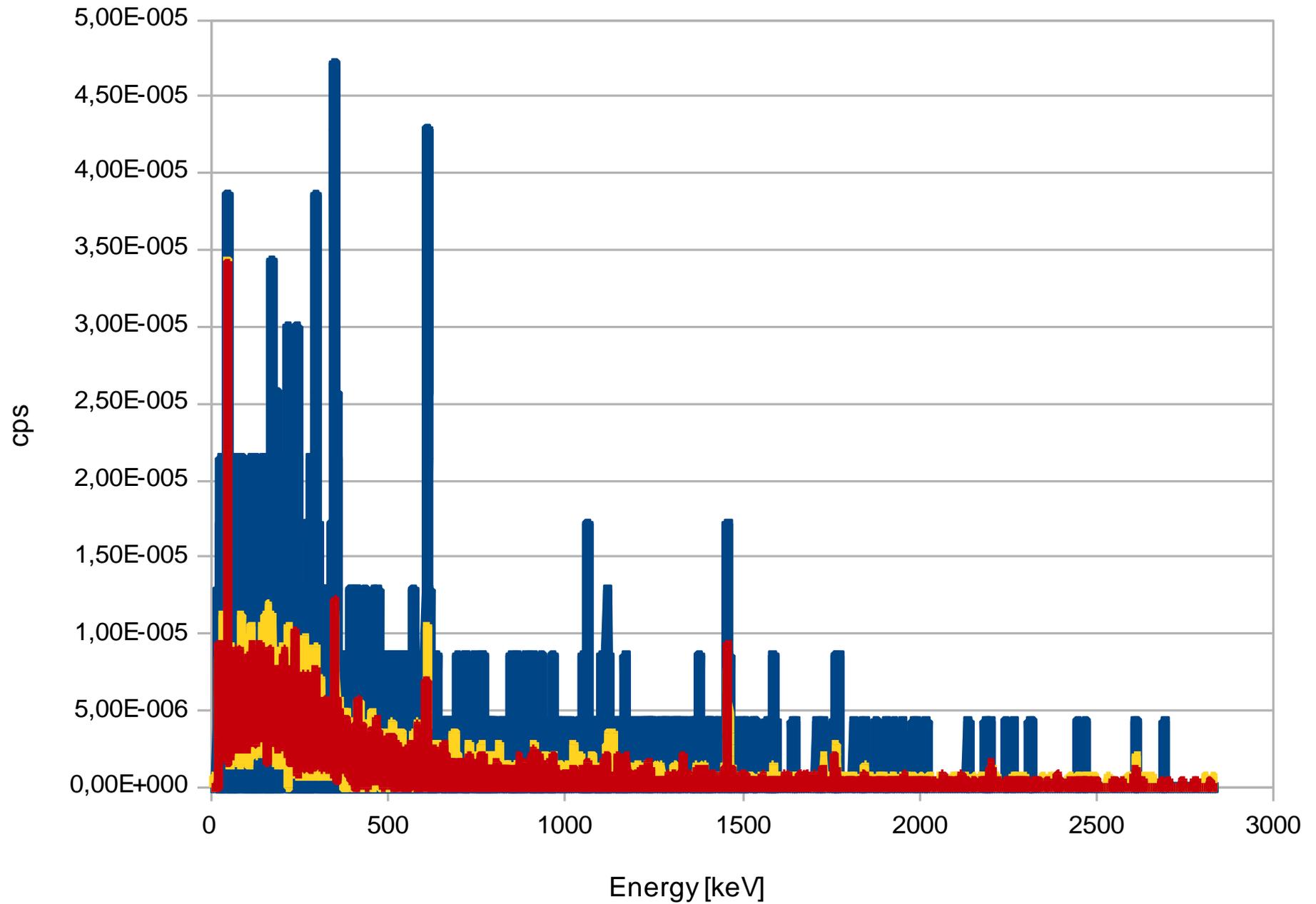
ca. 4 cm



T1 for triple PZ-0



PCB 1 - with and without components & bg





Carancas



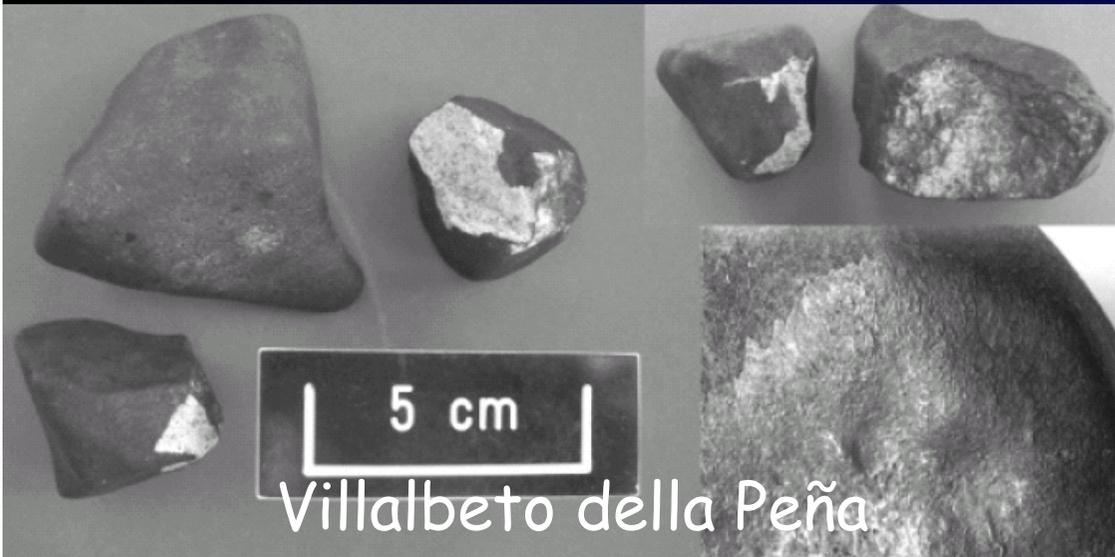
Maribo

3.12g



Puerto Lapíce

MPS 44, Nr 2, 159-174 (2009)



Villalbeto della Peña

MPS 40, Nr 6, 795-804 (2005)



Almahata Sitta

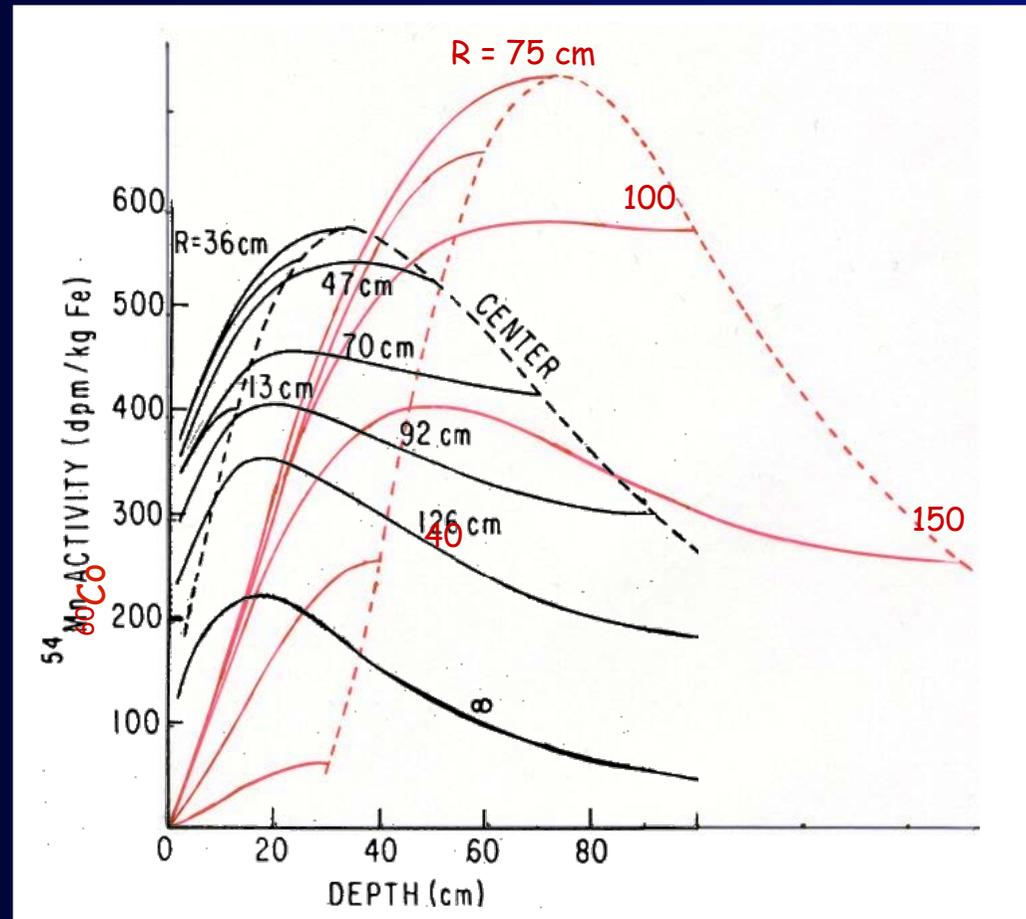
in meteoriti

^{26}Al (7.16×10^5 a) β^+

^{22}Na (2.602 a) β^+

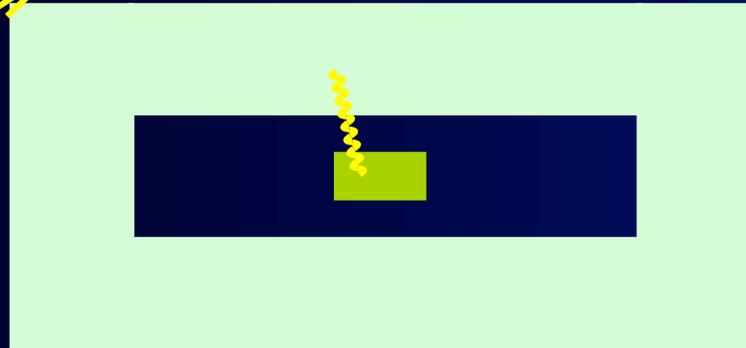
^{60}Co (5.27 a)

^{54}Mn (312.15 d)



γ_{ext}

Futuro



Altri possibili miglioramenti:

- Schermatura contro neutroni
- Selezione materiali più puri (processo iterativo)
- Schermatura attiva
- Stoccaggio materiali di costruzione in sotterraneo
- Analisi forma impulso per distinguere segnale da fondo
- Collaborazione stretta con i produttori