

Il laboratorio STELLA

Dr. Matthias Laubenstein

PID-LNGS Programma INFN per Docenti

Laboratori Nazionali del Gran Sasso

17-21 ottobre 2022

Radioattività

Introduzione

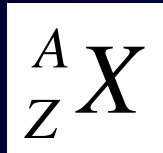
- **Radioattività**, anche chiamato **decadimento radioattivo**, è la trasmutazione spontanea di nucleoni all'interno di un nucleo, con emissione di particelle ed emissione di radiazione elettromagnetica di alta frequenza.
- Ci sono cinque modi possibili:
 1. emissione di particelle alfa (nuclei di elio)
 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

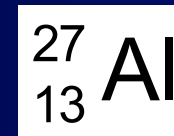
$$A = Z + N$$

- Notazione



- Esempio:

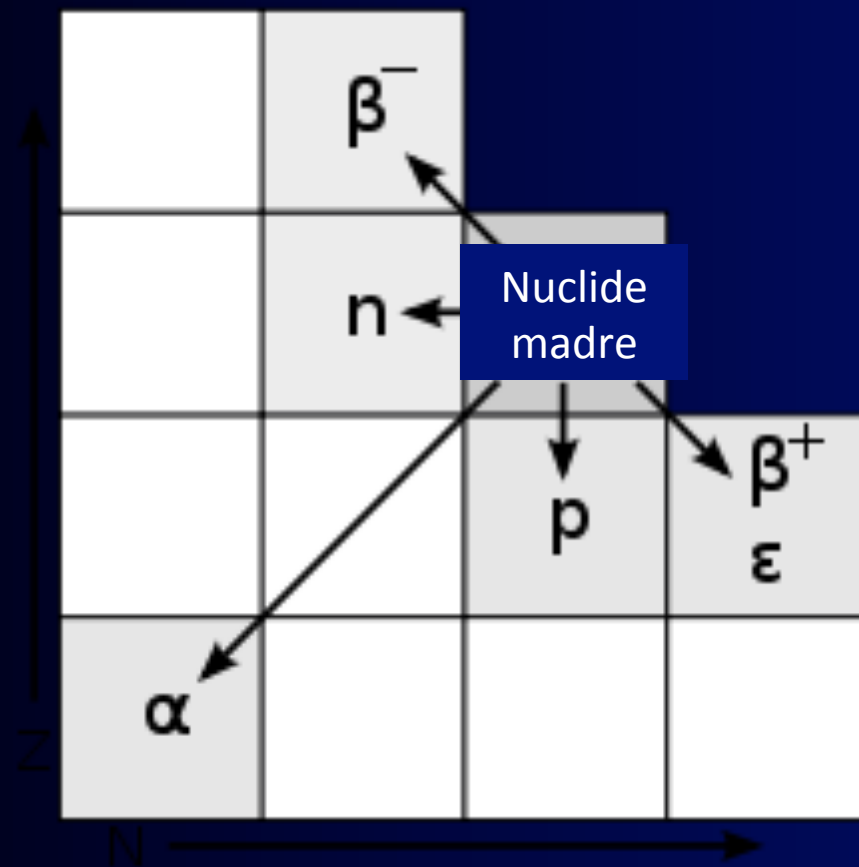
- » A è 27
- » Z è 13
- » contiene 13 protoni
- » contiene 14 = (27 – 13) neutroni



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



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

$$R = \left| \frac{\Delta N}{\Delta t} \right| = \lambda N$$

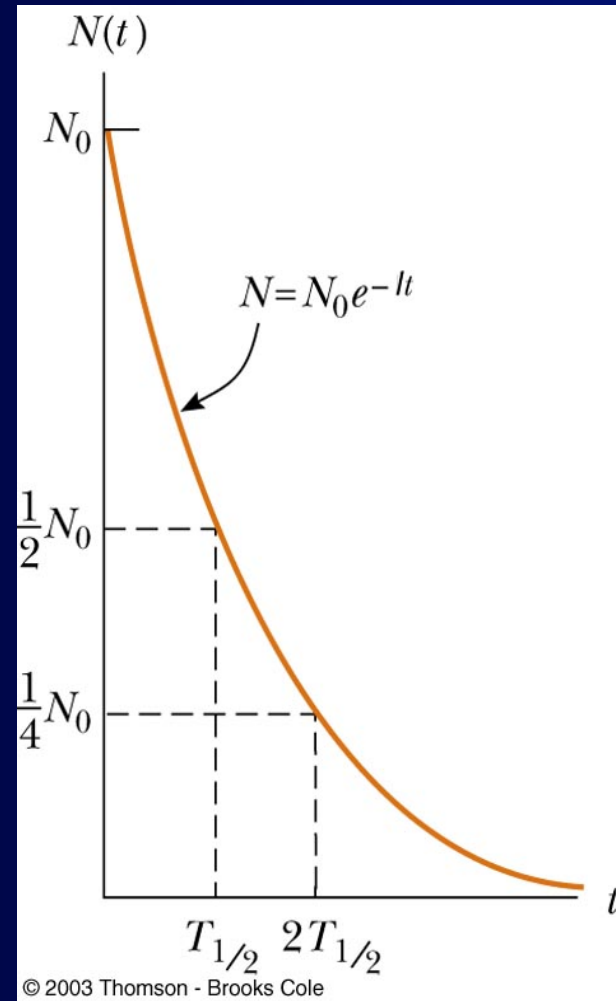
Curva di decadimento

- 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: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$

$$A_1(t) = N_o \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} \quad A_2(t) = \frac{N_o \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

Equilibrio transiente

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

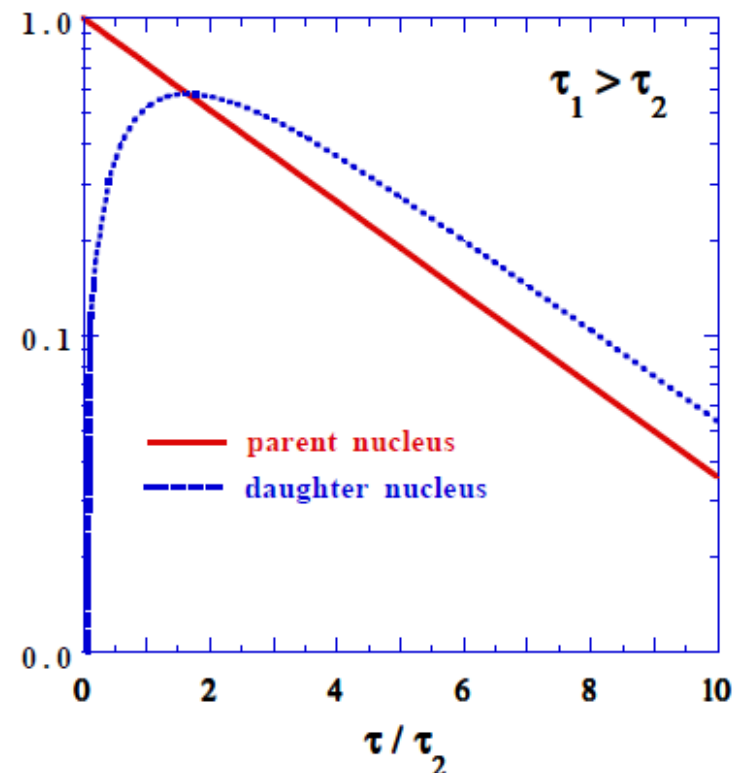
$$t^* = (\ln \lambda_2 / \lambda_1) / (\lambda_2 - \lambda_1)$$

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

Equilibrium secolare

$$\tau_2 \ll \tau_1$$

$$\lambda_2 N_2 = \lambda_1 N_1$$



Formule per catene di decadimento

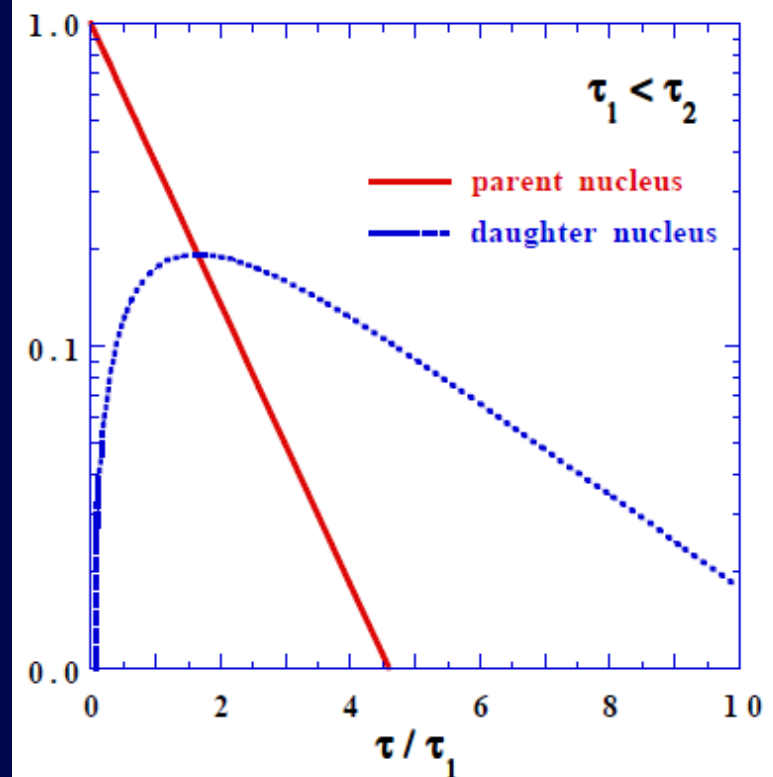
- Caso: $X_1 \rightarrow X_2 \rightarrow X_3$

$$A_1(t) = N_o \lambda_1 e^{-\lambda_1 t} \qquad A_2(t) = \frac{N_o \lambda_1 \lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

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 ($t_{1/2}=2.144 \cdot 10^6$ a, solo ^{209}Bi è rimasto)

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

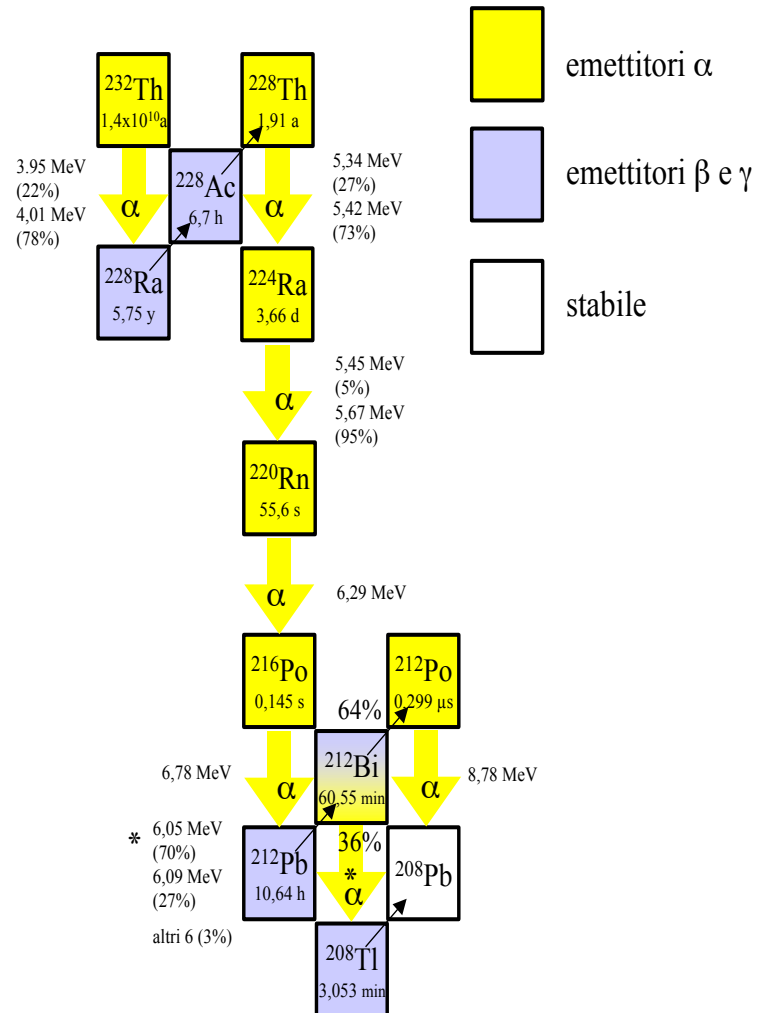
alimento	^{40}K [Bq/kg]	^{226}Ra [Bq/kg]
Banana	130	0.037
Noce di Brasile	200	37 - 260
Carota	125	0.022 - 0.074
Patate	125	0.037 - 0.093
Birra	14	---
Carne rossa	110	0.019
Fagiolo di Lima, crudo	170	0.074 - 0.185
Acqua potabile	---	0 - 0.006

Categorie

- a. **Primordiale** – provenienti da prima dell'esistenza del sistema solare
- 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)

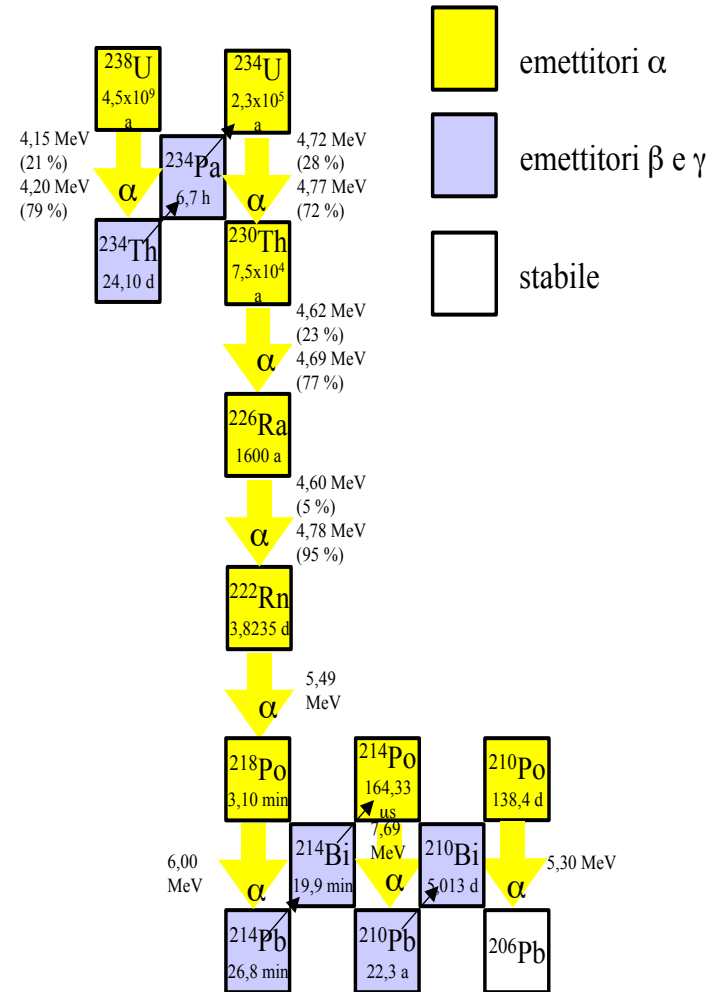
^{232}Th

- ^{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



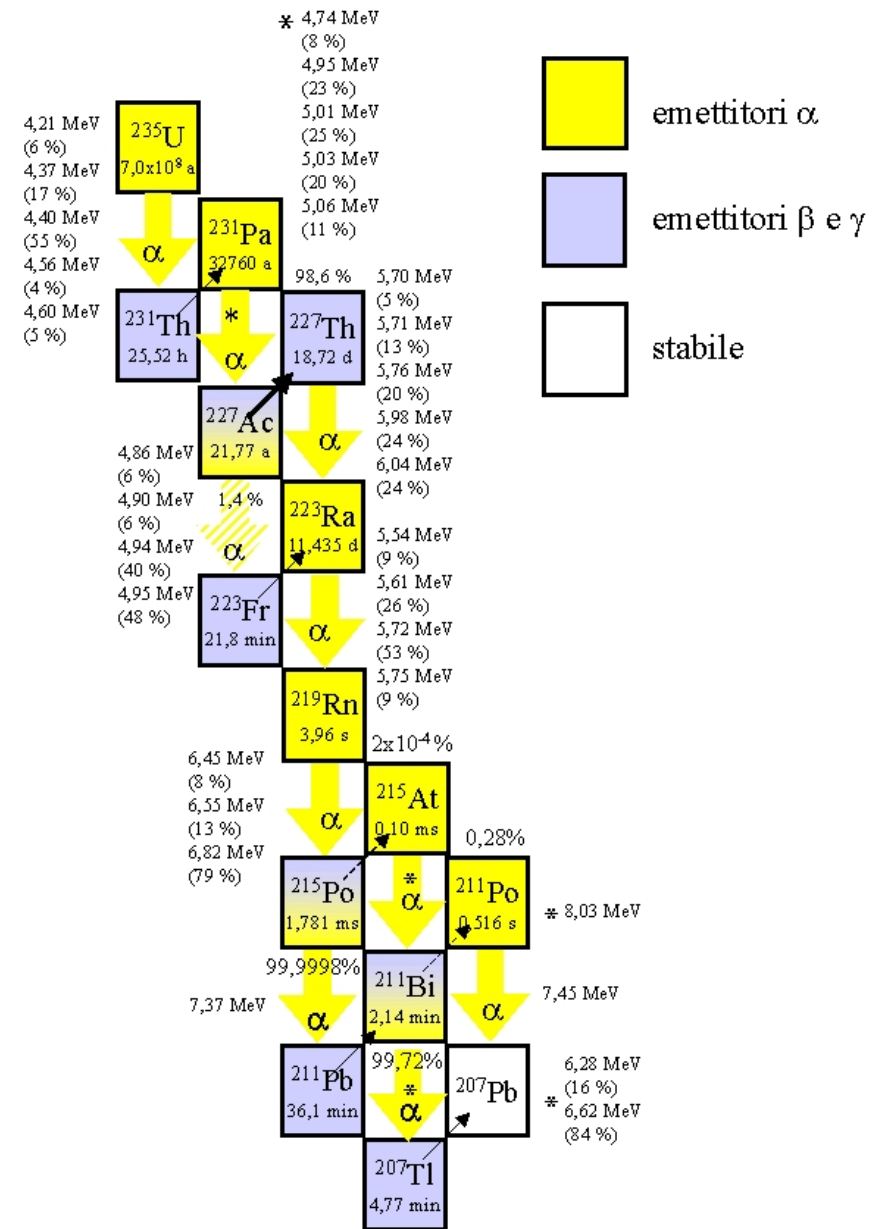
^{238}U

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



^{235}U

- ^{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 ($t_{1/2} = 2.144 \times 10^6 \text{ a}$).
- L'unico superstite in natura è il ^{209}Bi che a sua volta è radioattivo e decade tramite decadimento alfa ($t_{1/2} = 1.9 \times 10^{19} \text{ a}$).

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}	$\beta^- \beta^-$
^{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

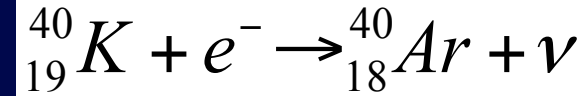
Potassio-40

Due possibilità di decadimento:

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



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

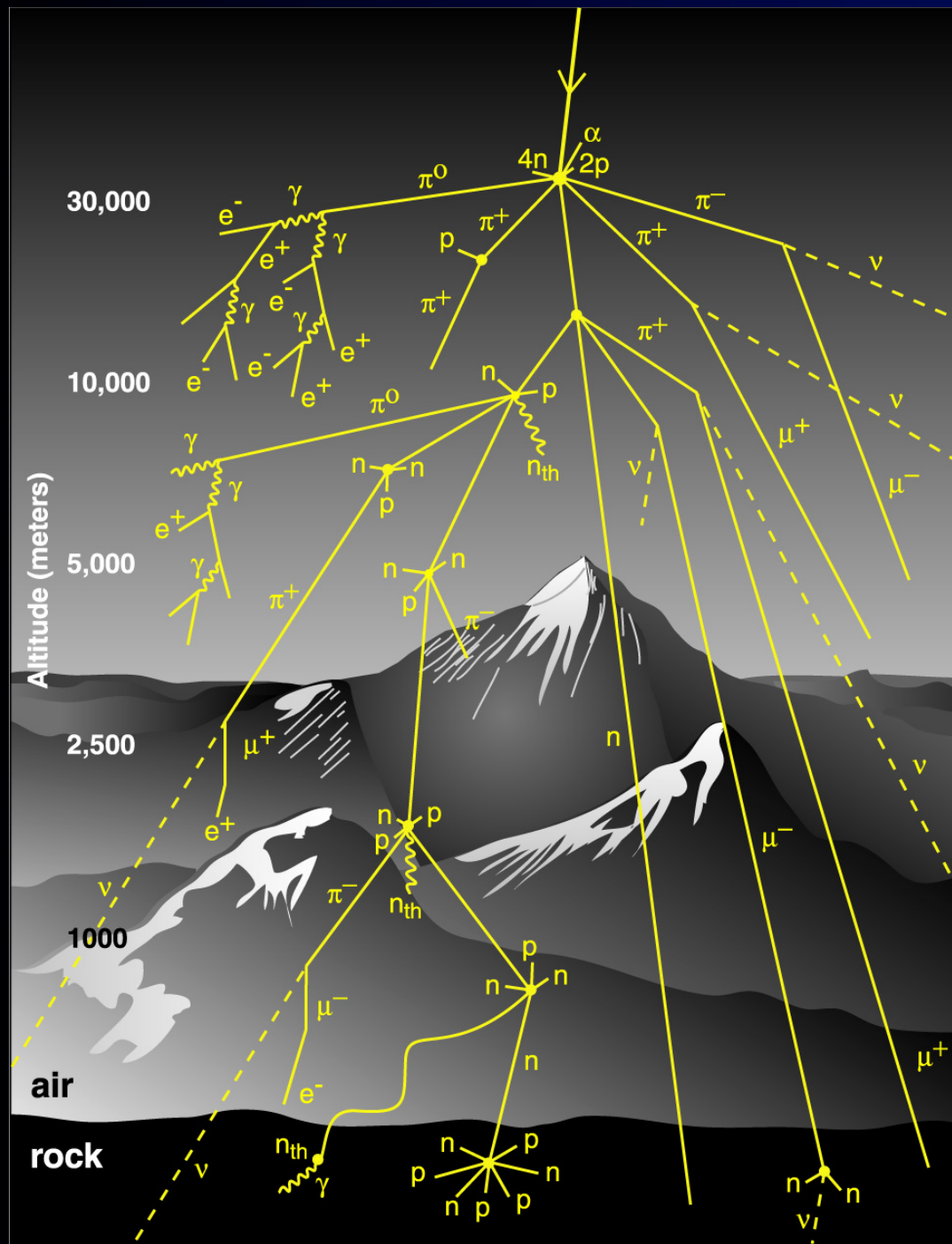


Con emissione gamma di
1.461 MeV

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

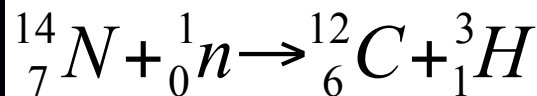
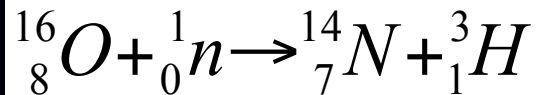
Concentrazione in acqua: ca. 10 Bq/g in acqua marina



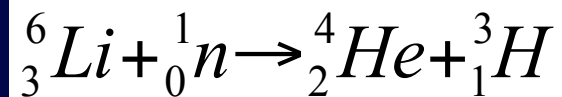
Sciame esteso di raggi cosmici (cascata)

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.



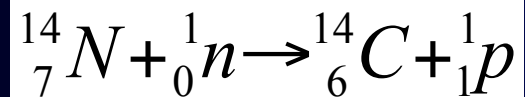
in aria



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.



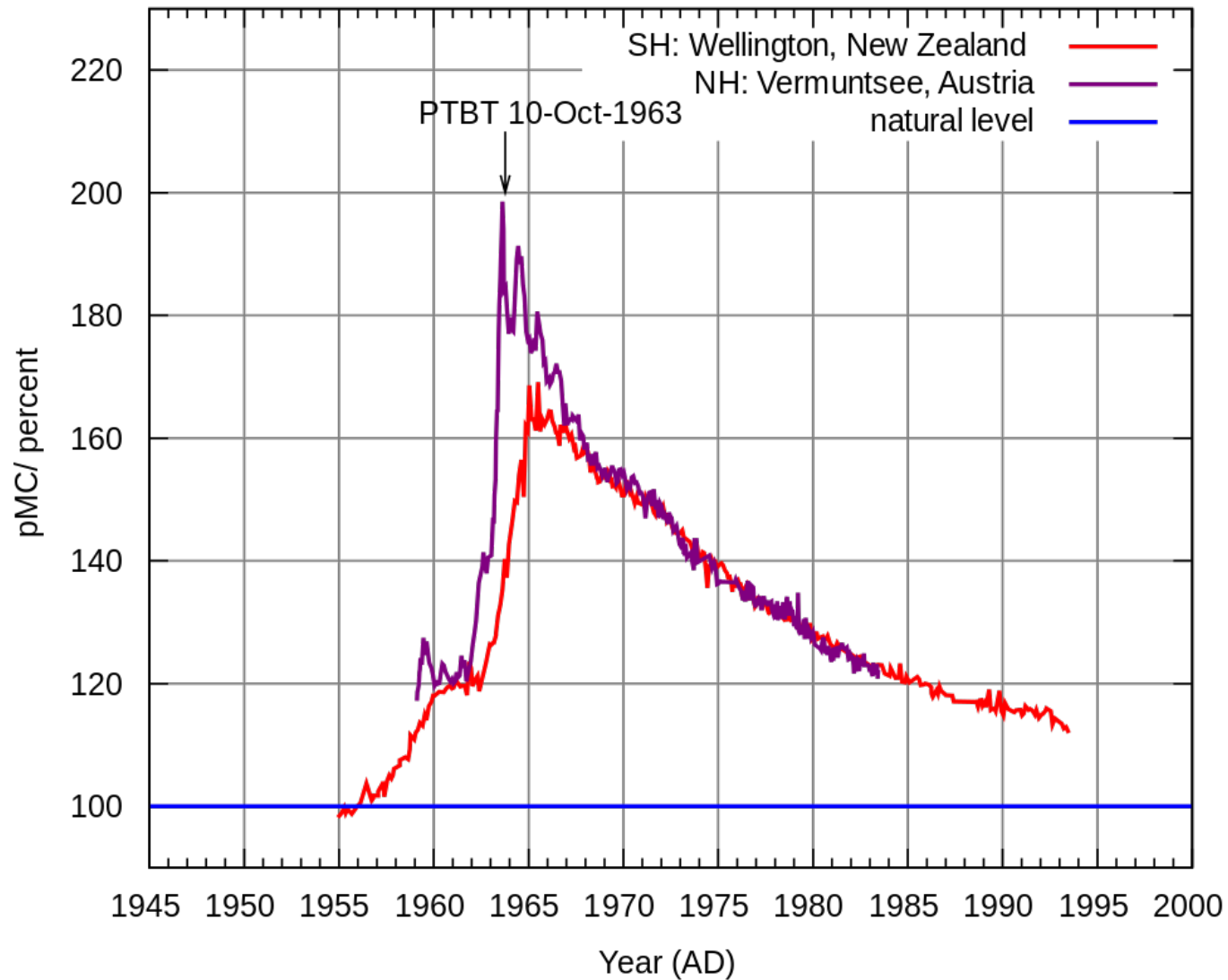
Radionuclidi antropogenici

- 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

Radiocarbonio



Applicazioni mediche

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

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.



Proprietà roccia circostante

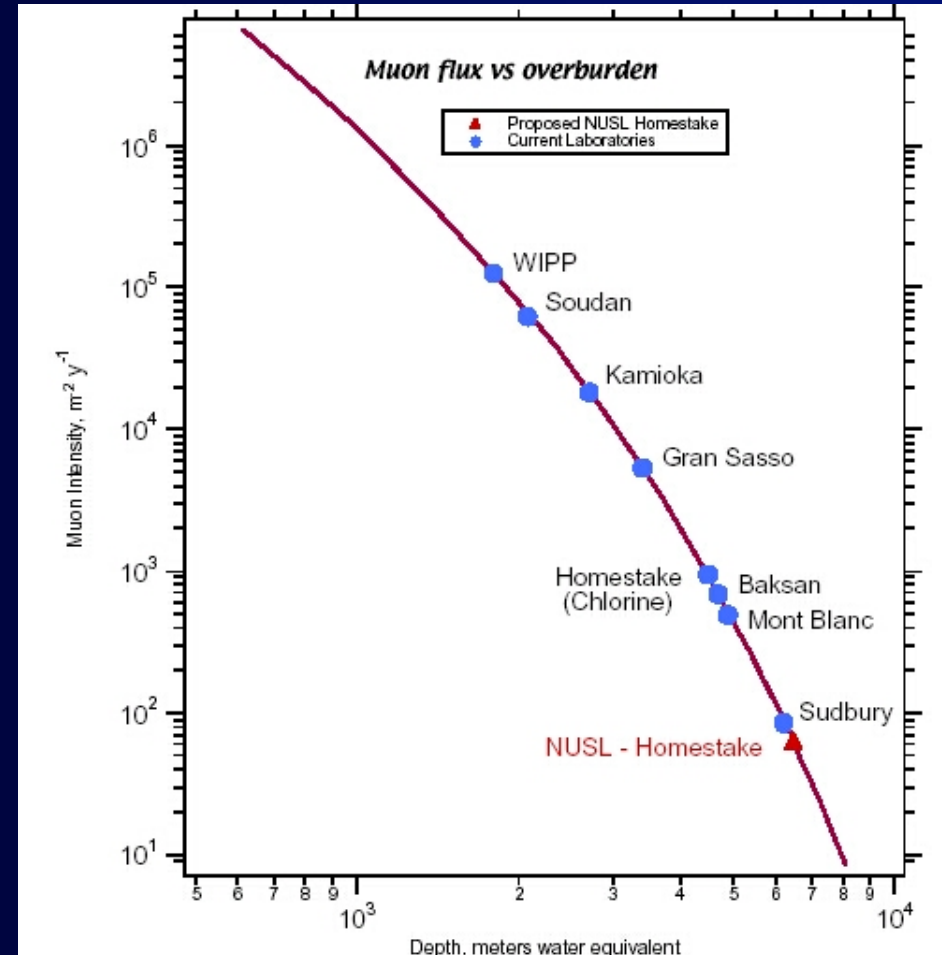
concentrazioni (in Bq kg⁻¹):

	Gran Sasso	M ^t 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

Muoni

Flusso muonico:

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



Neutroni

flusso neutronico:

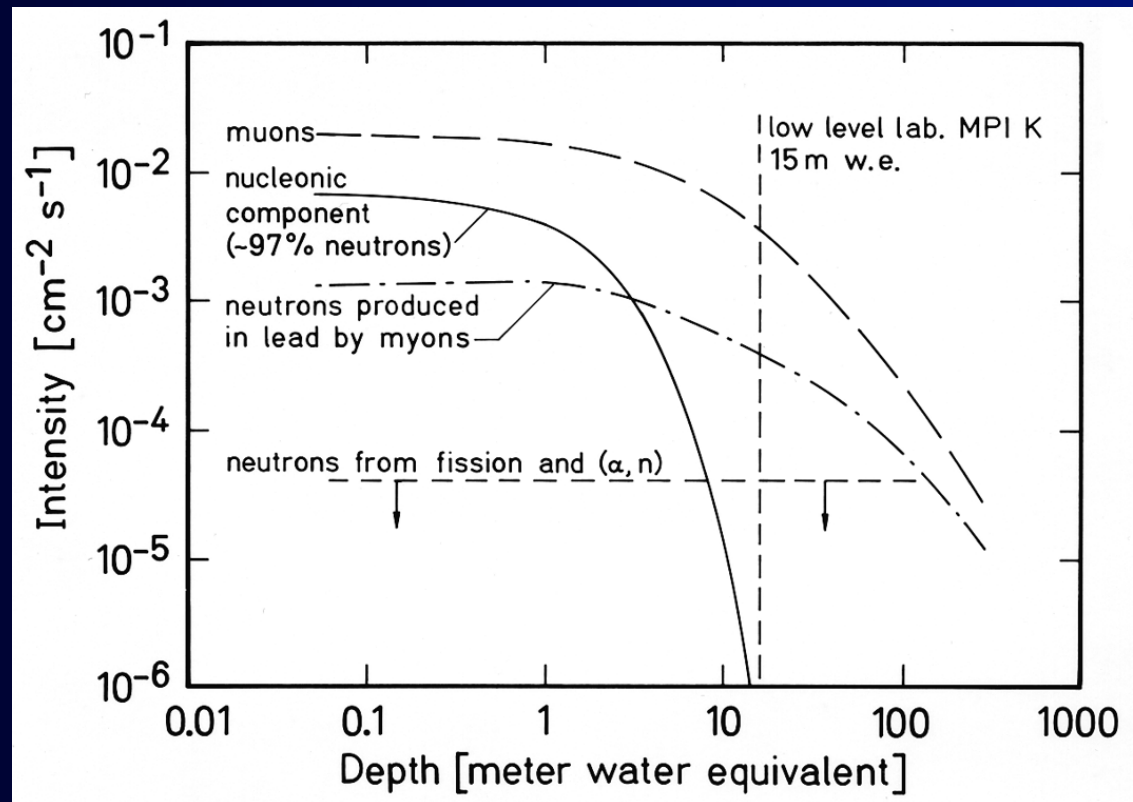
e.g. @ L.N.G.S.

fissione e (α, n)

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

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

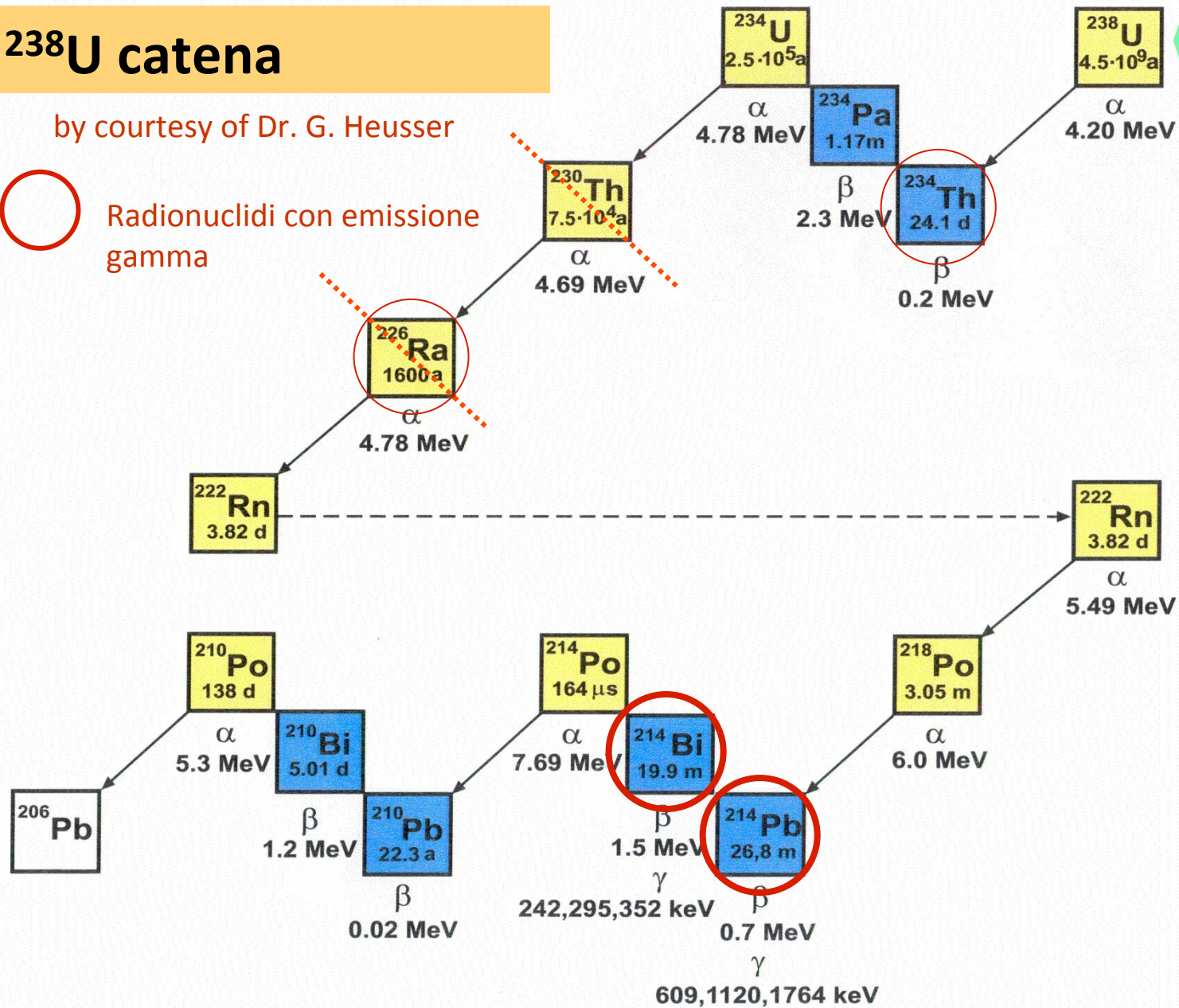
(10^3 riduzione)



^{238}U catena

by courtesy of Dr. G. Heusser

○ Radionuclidi con emissione gamma

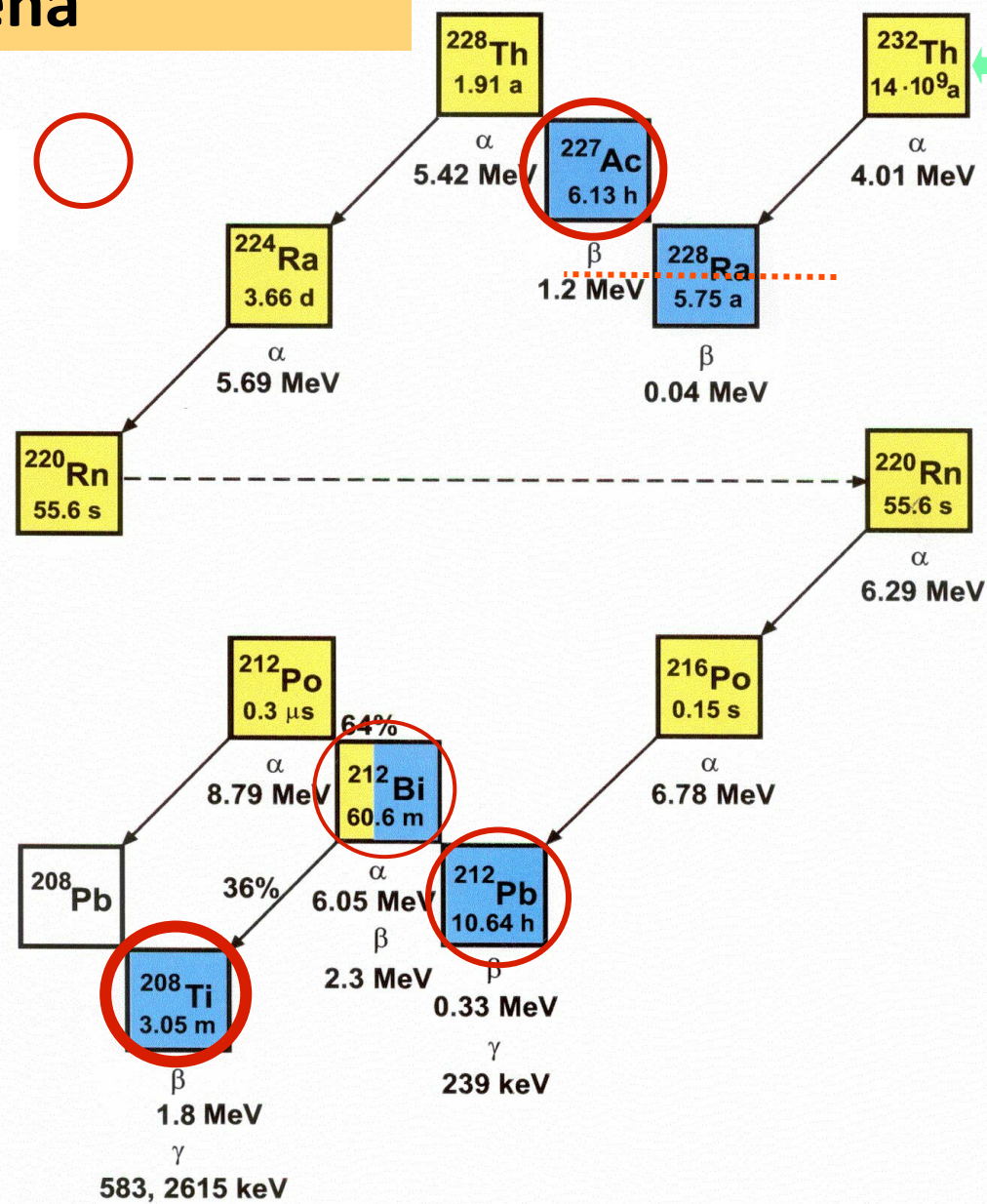


spettrometria di massa

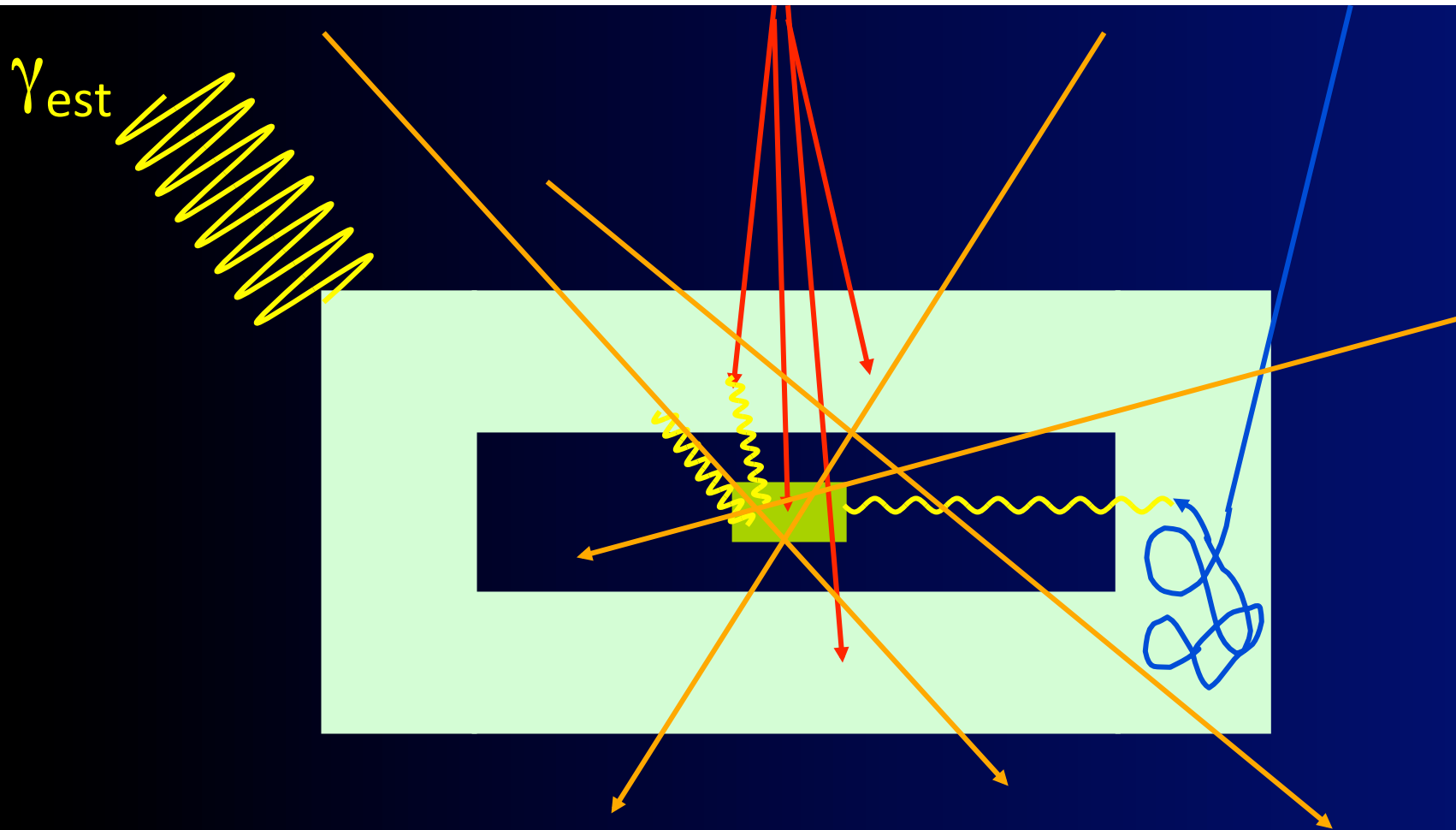
^{232}Th catena

by courtesy of Dr. G. Heusser

Radionuclidi con emissione gamma



spettrometria di massa

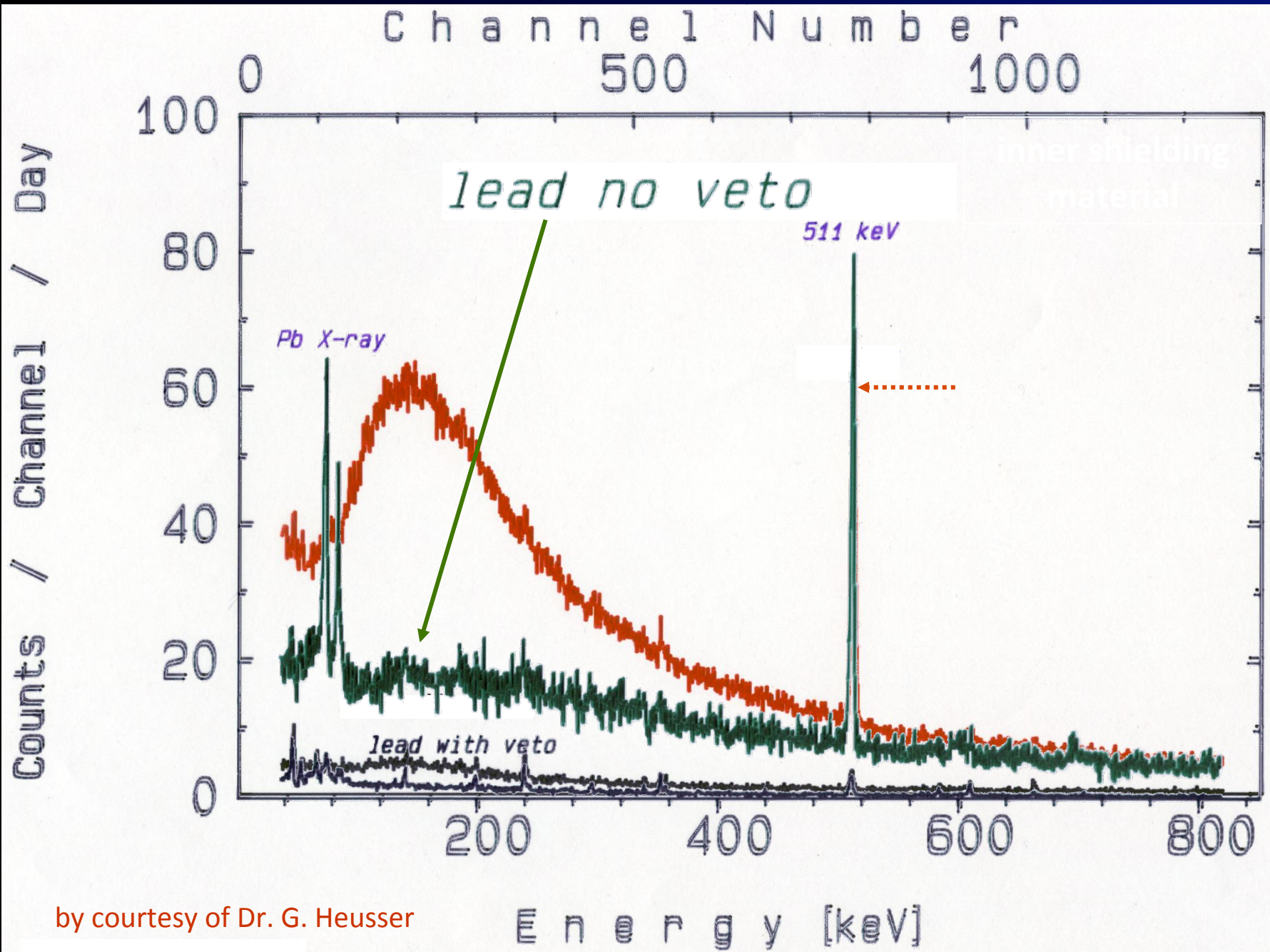


Muoni di alta energia non vengono fermati

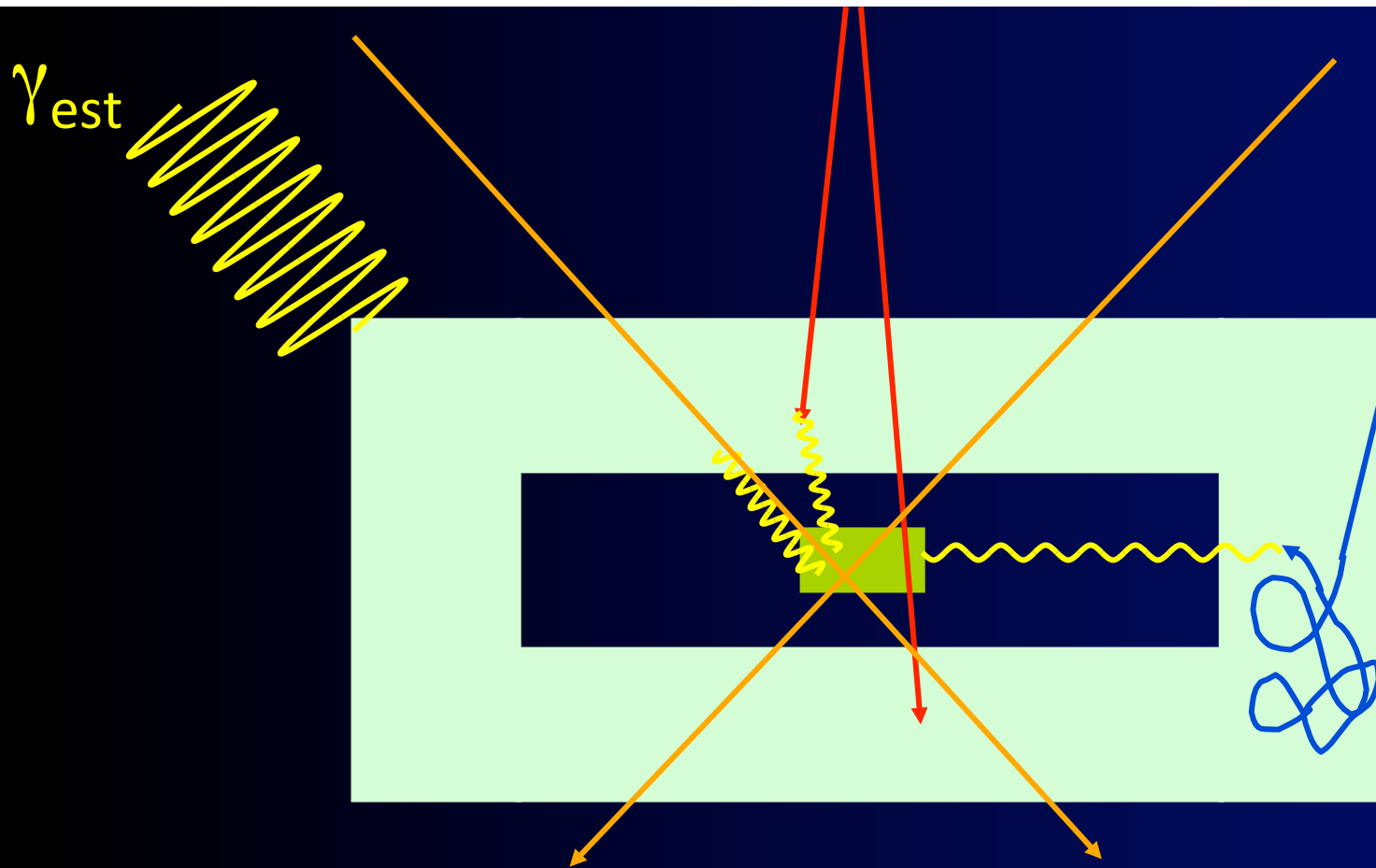
Sciame elettromagnetico sono solo parzialmente attenuati

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

Fondo secondario indotto da interazioni particelle ad alta energia - schermatura



by courtesy of Dr. G. Heusser

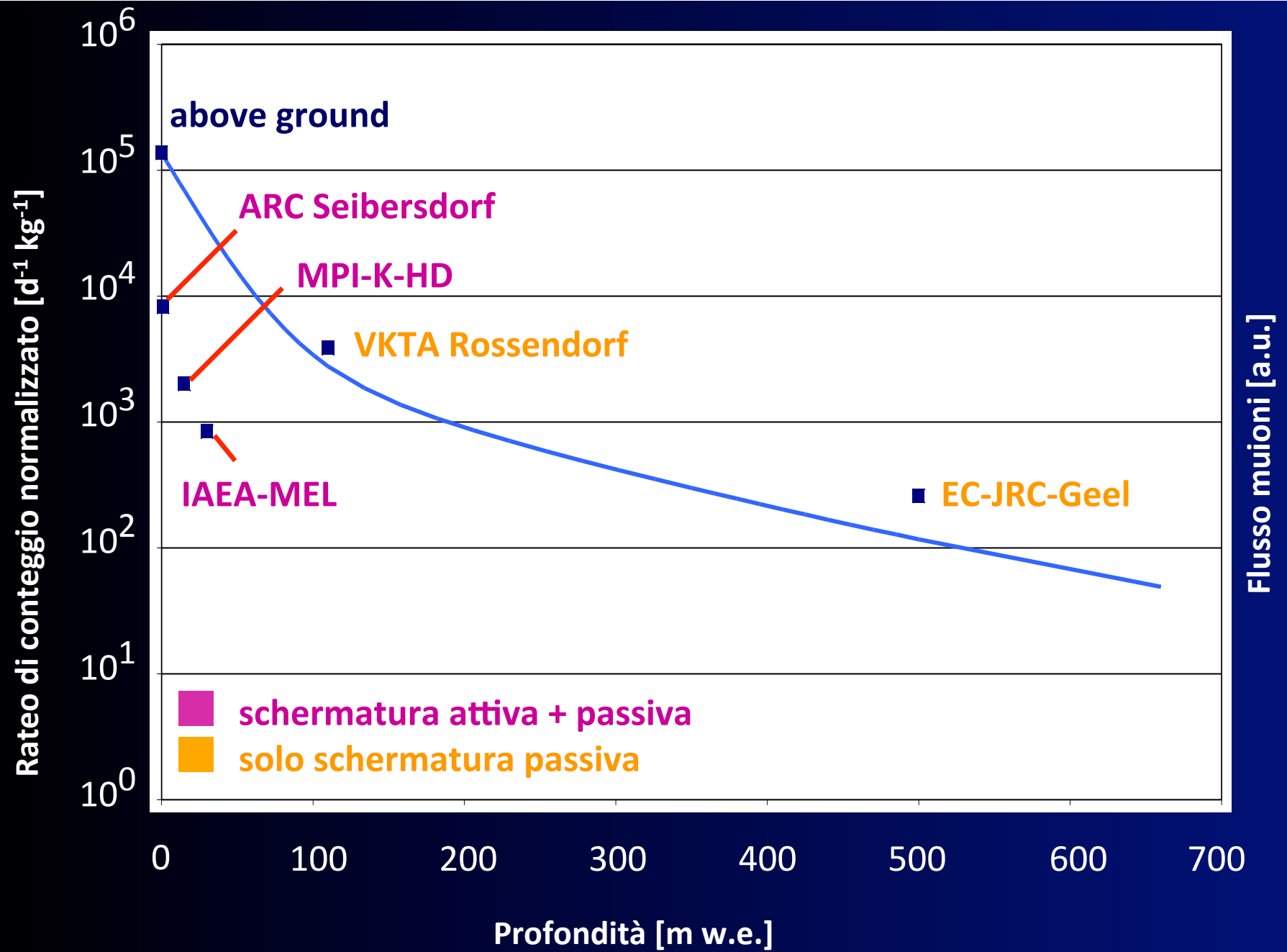


Muoni di alta energia ridotti da strato di copertura e/o schermo attivo

Sciami elettromagnetici sono attenuati

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

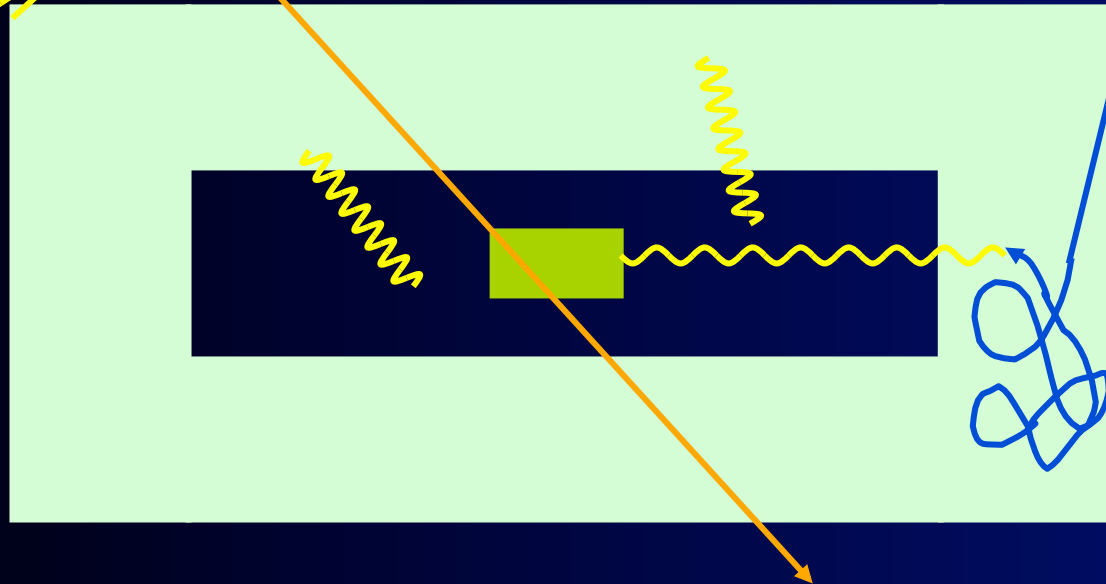
Fondo secondario indotto da interazioni particelle ad alta energia - schermatura



Il gas radon diventa importante

γ_{est}

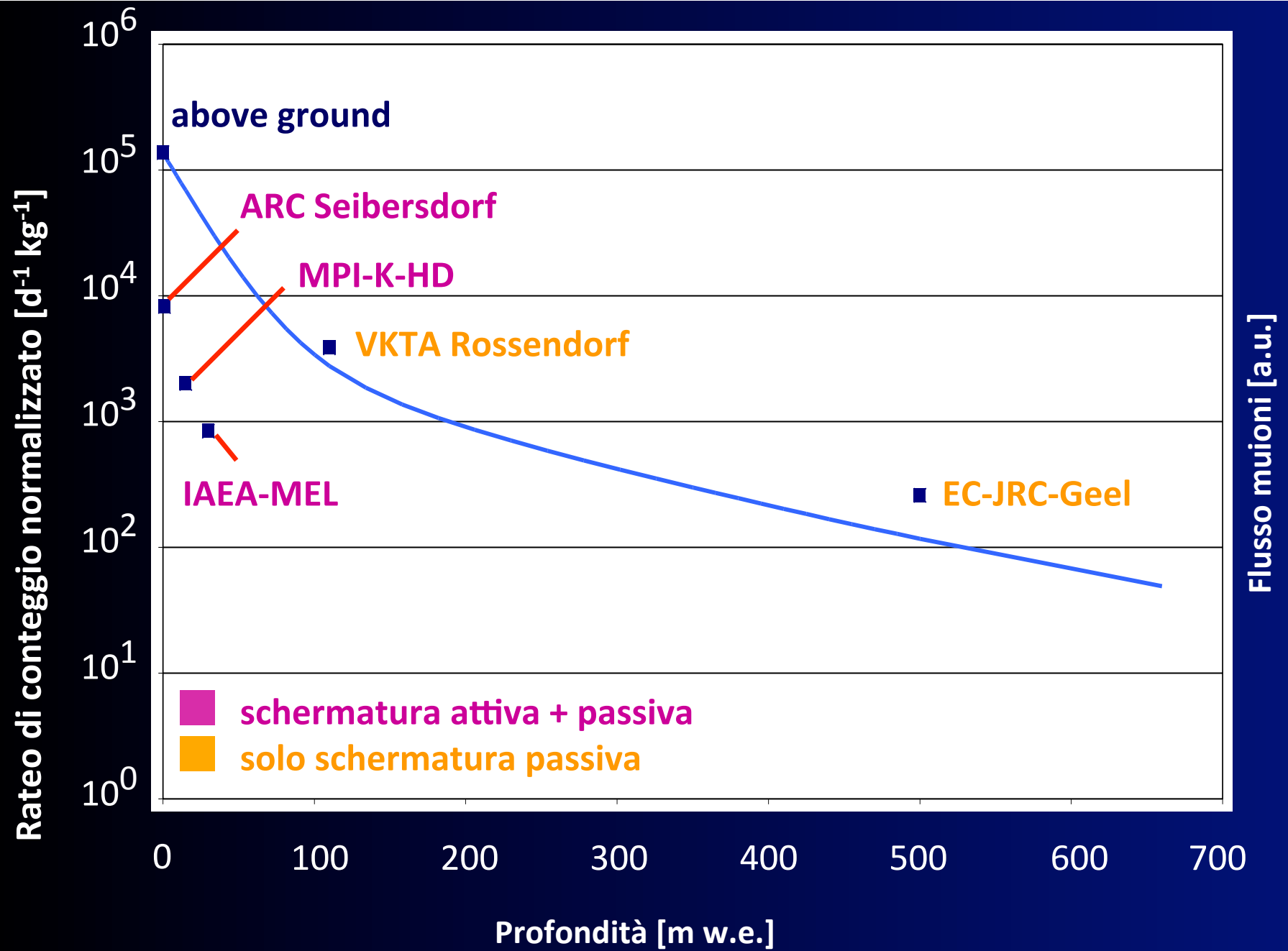
Rn

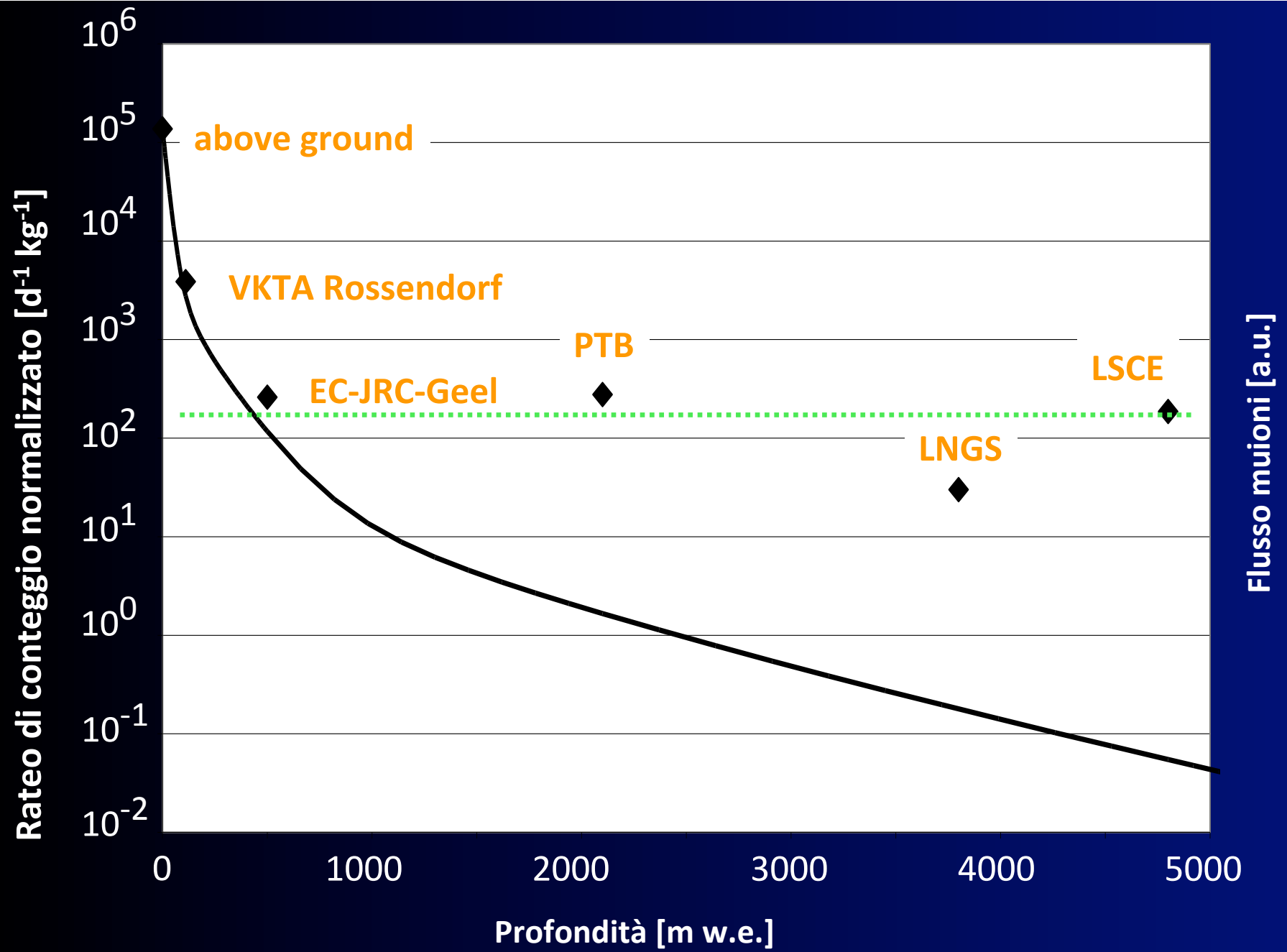


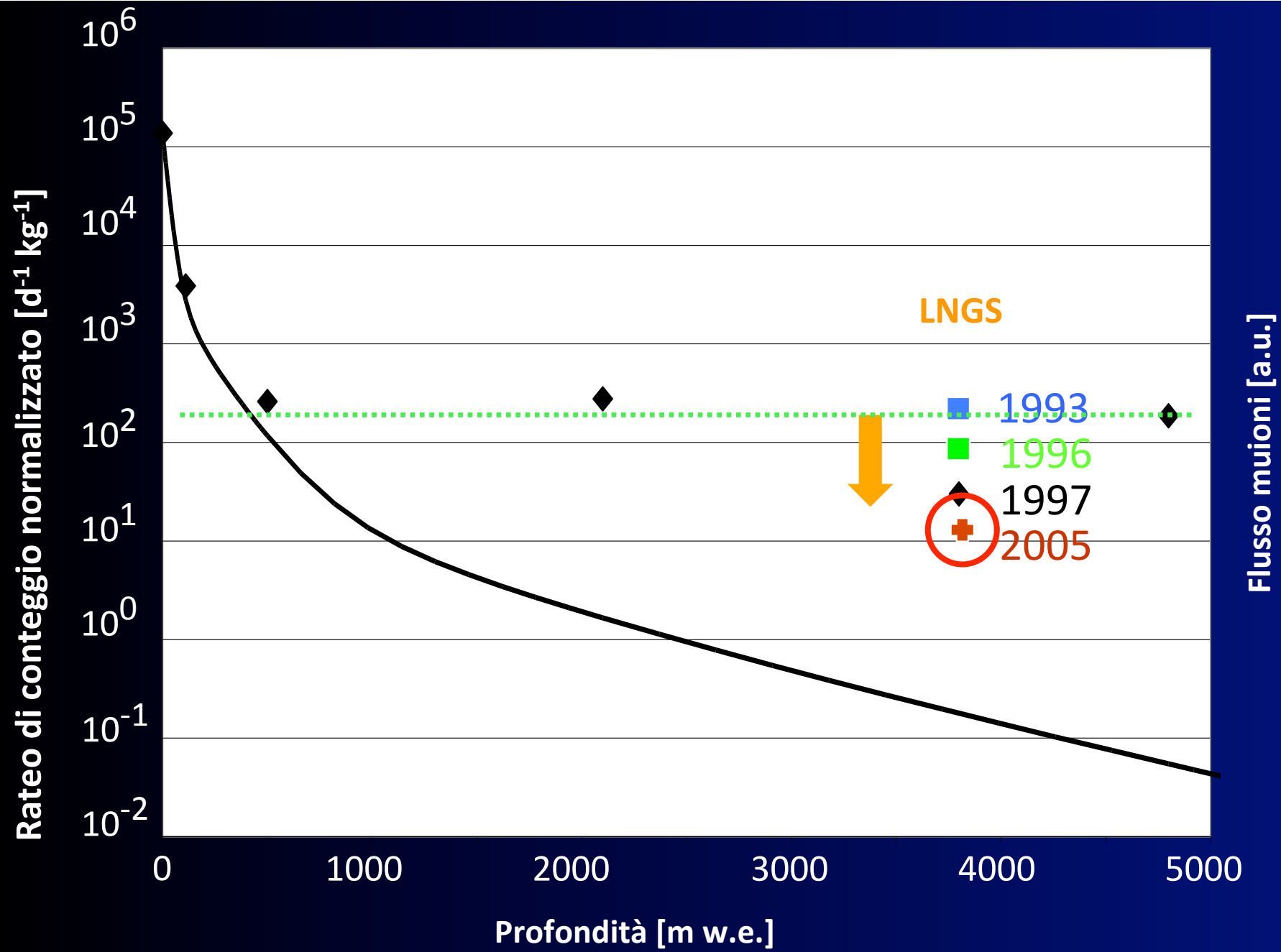
Muoni di alta energia non sono ulteriormente ridotti andando
Sempre più in profondità (fattore $>10^{-6}$ di riduzione @ LSCE & LNGS)

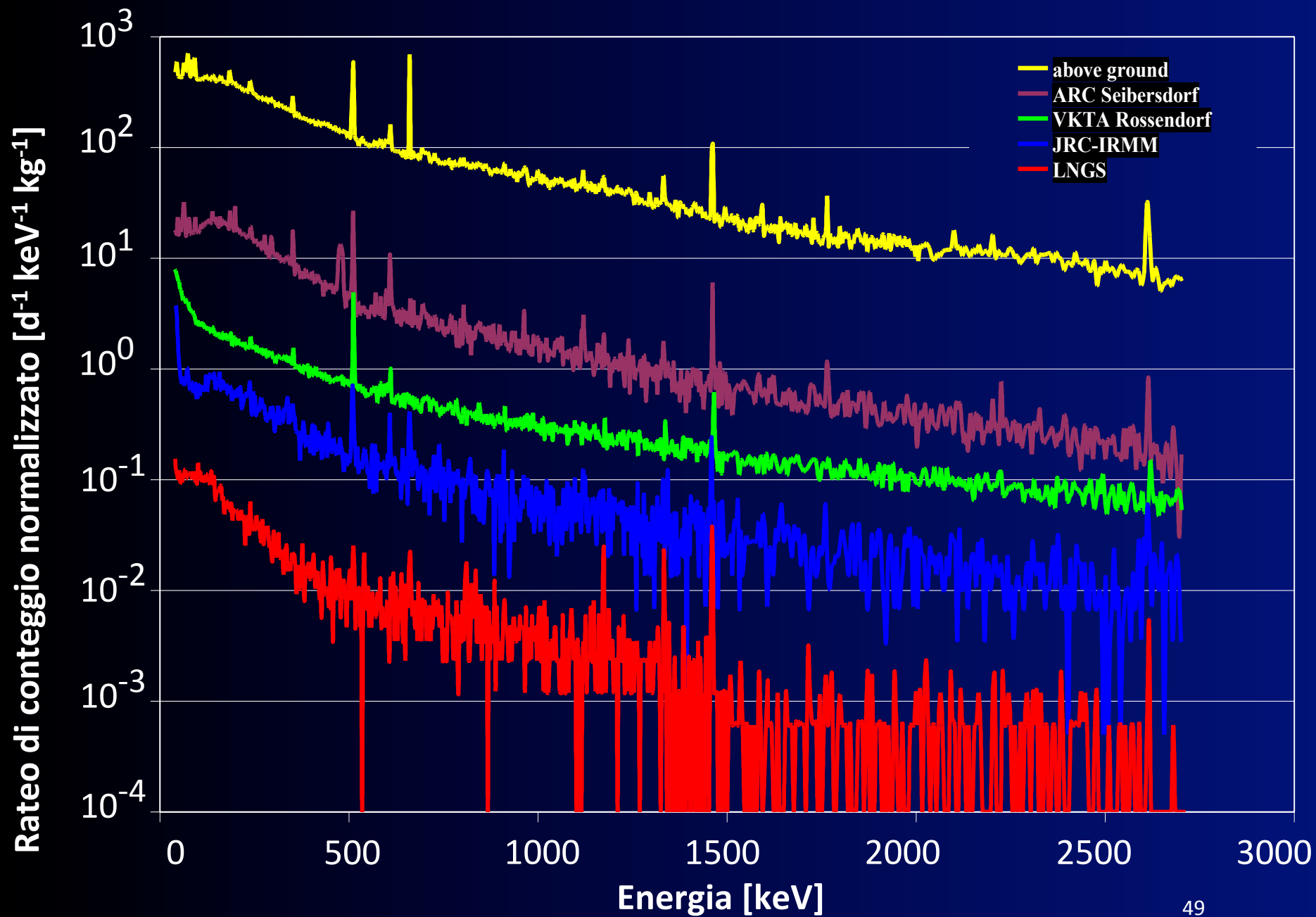
Praticamente solo neutroni indotti da radioattività naturale
((α ,n) & fission), (fattore 10^{-3} di riduzione @ LNGS)

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









Rivelatori al germanio

schermatura:

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

5 cm rame elettrolitico, privo di ossigeno

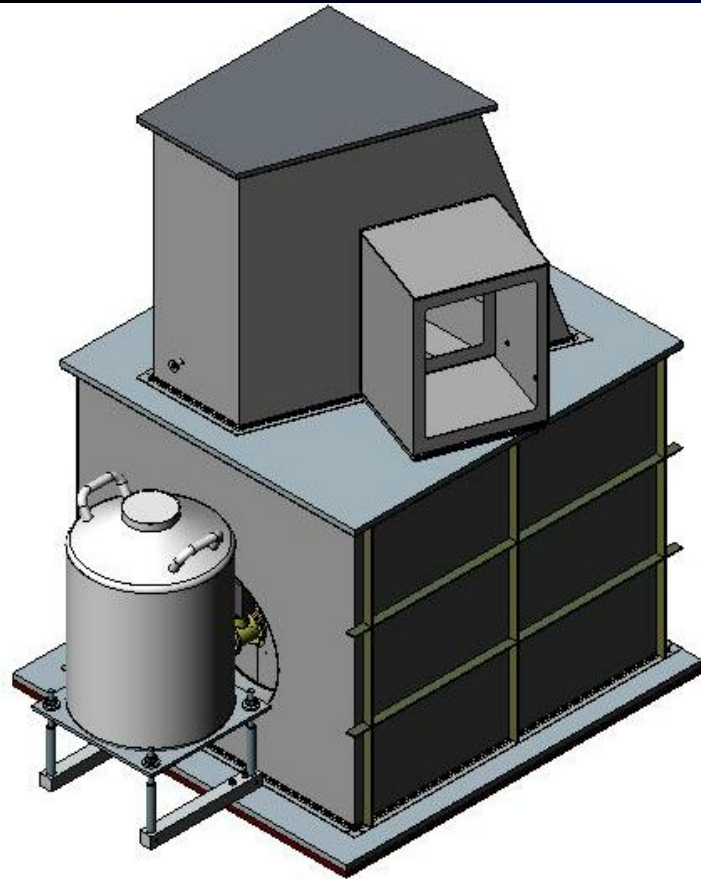
5 cm acrilico (sul fondo)

riduzione Rn:

1 cm box acrilico con flussaggio continuo N_2

selezione materiali:

alta “radio-purezza”, (quasi) nessuna attivazione

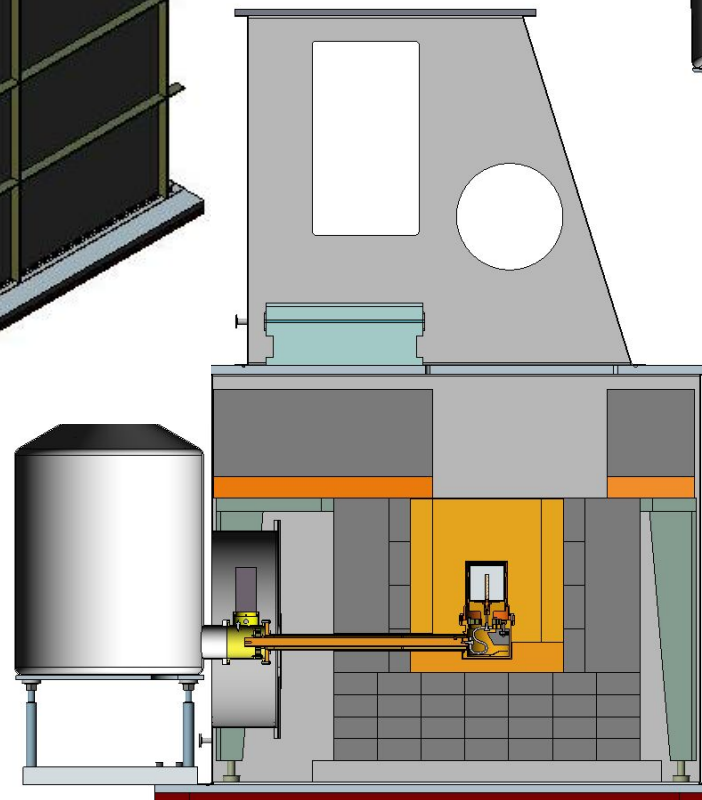
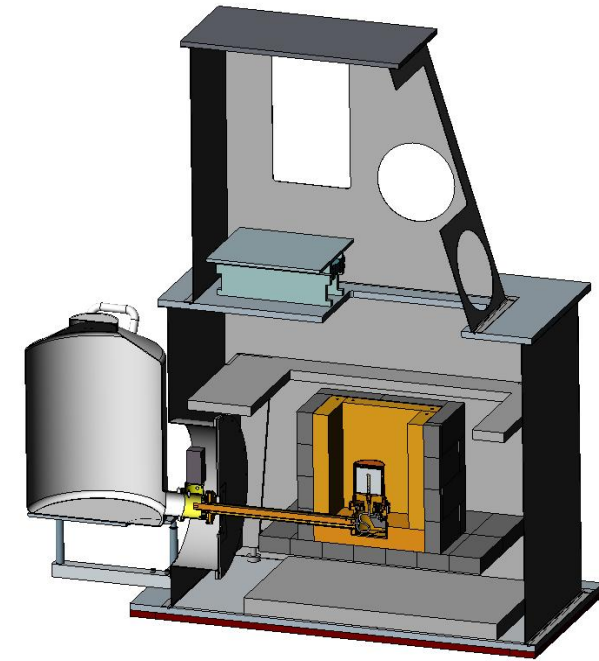


GeMPI

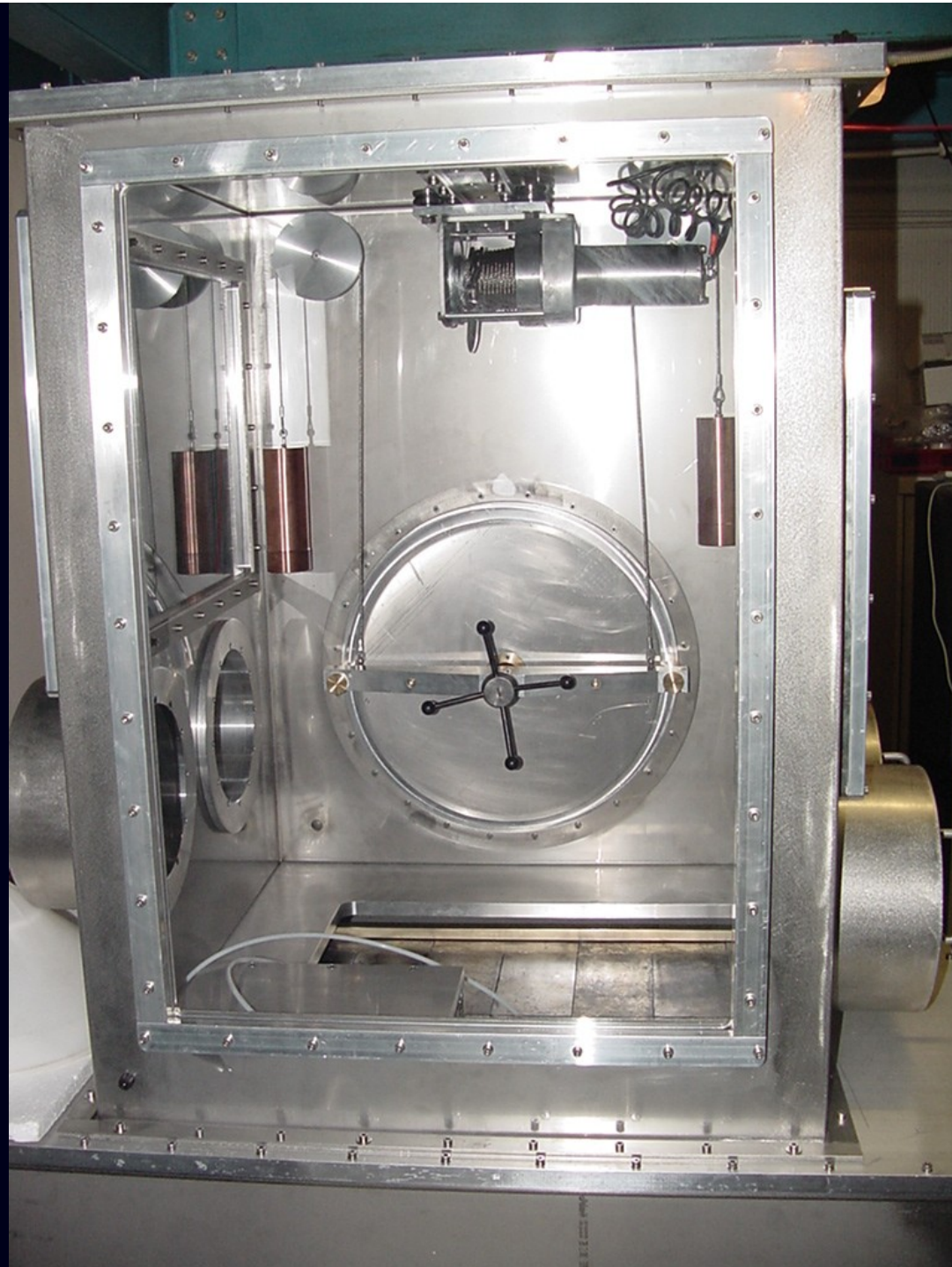
Operato al

LNGS

(3800 m w.e.)



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



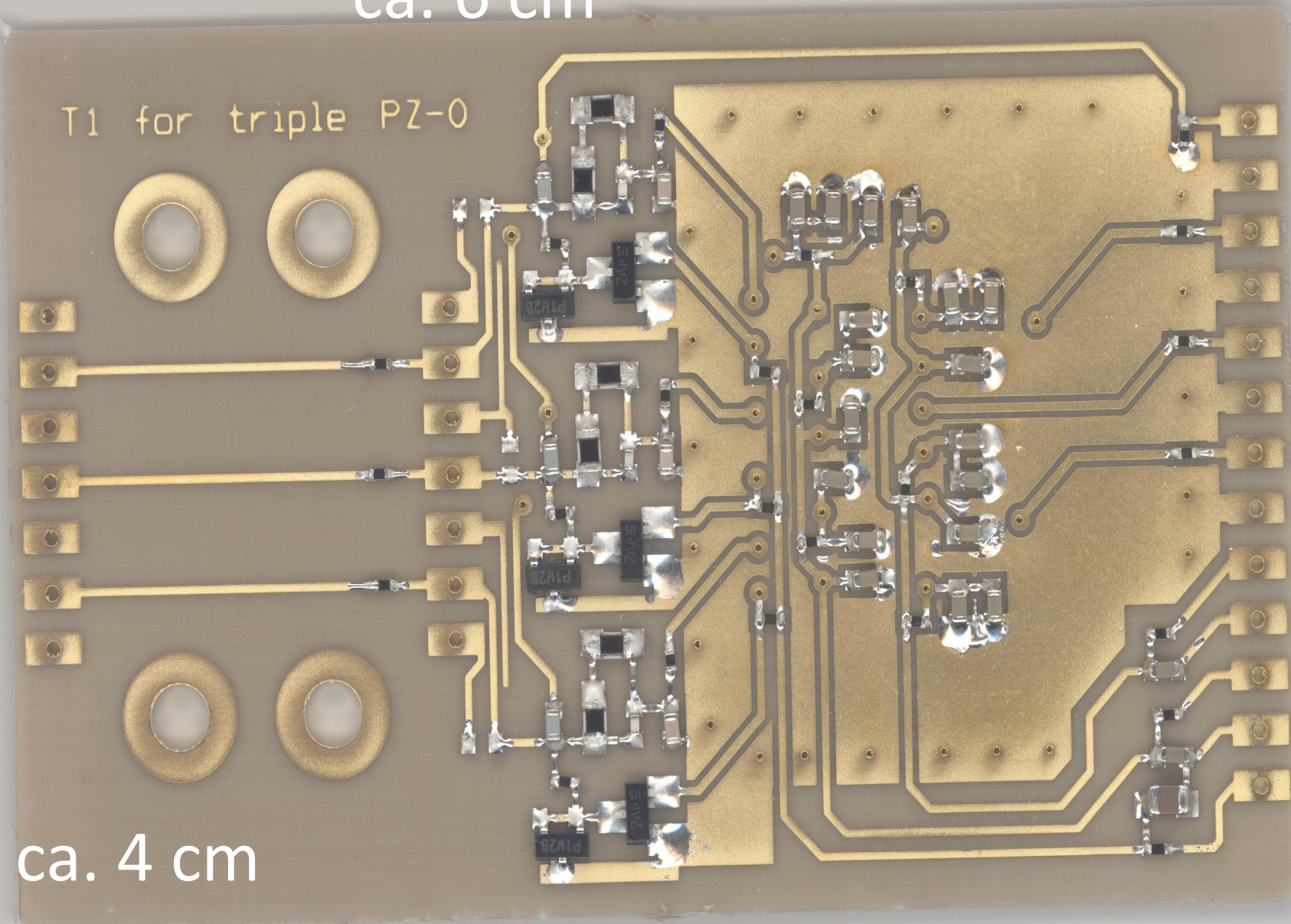
GeDSG



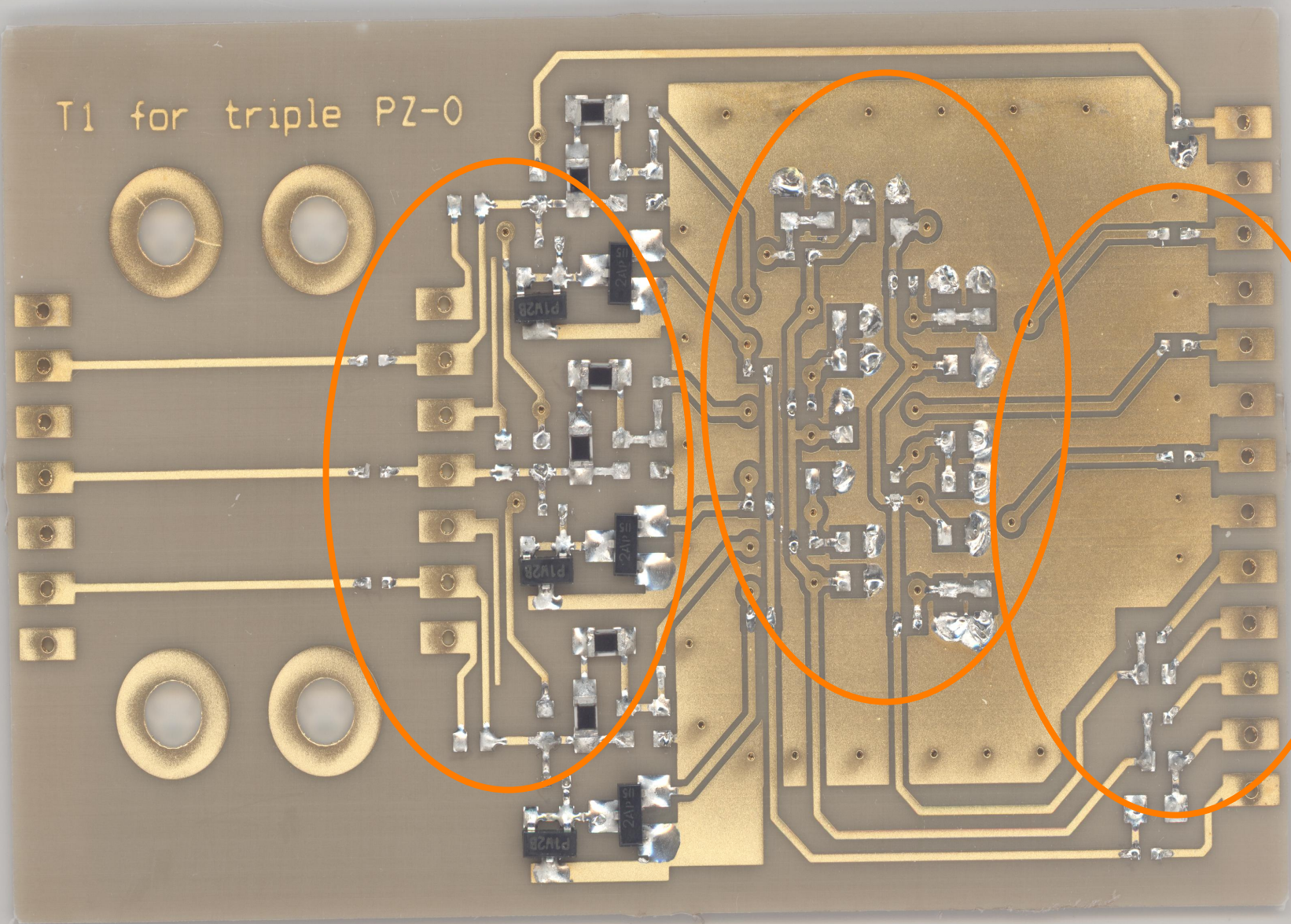
ca. 6 cm

T1 for triple PZ-0

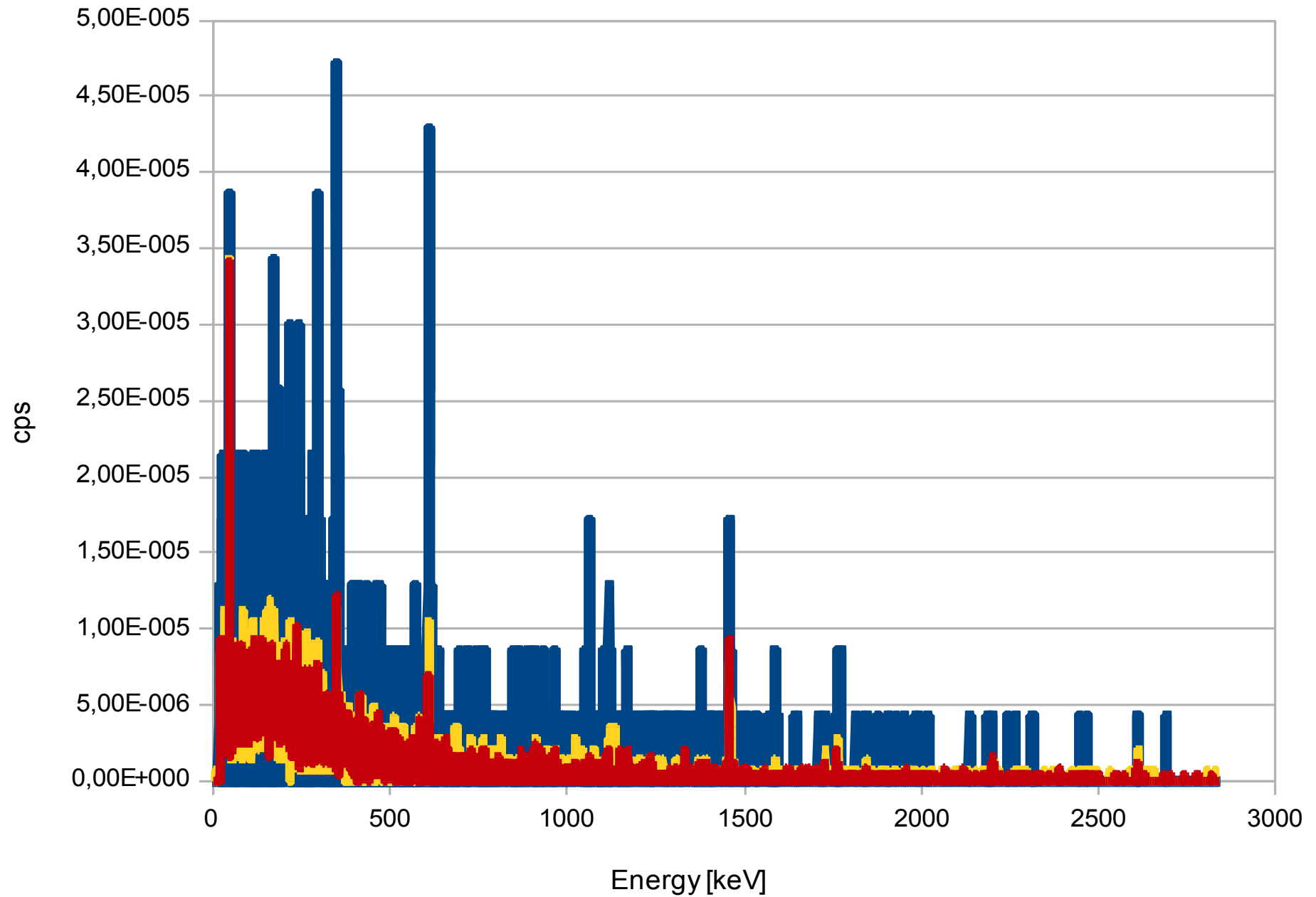
ca. 4 cm



T1 for triple PZ-0



PCB 1 - with and without components & bg





Carancas



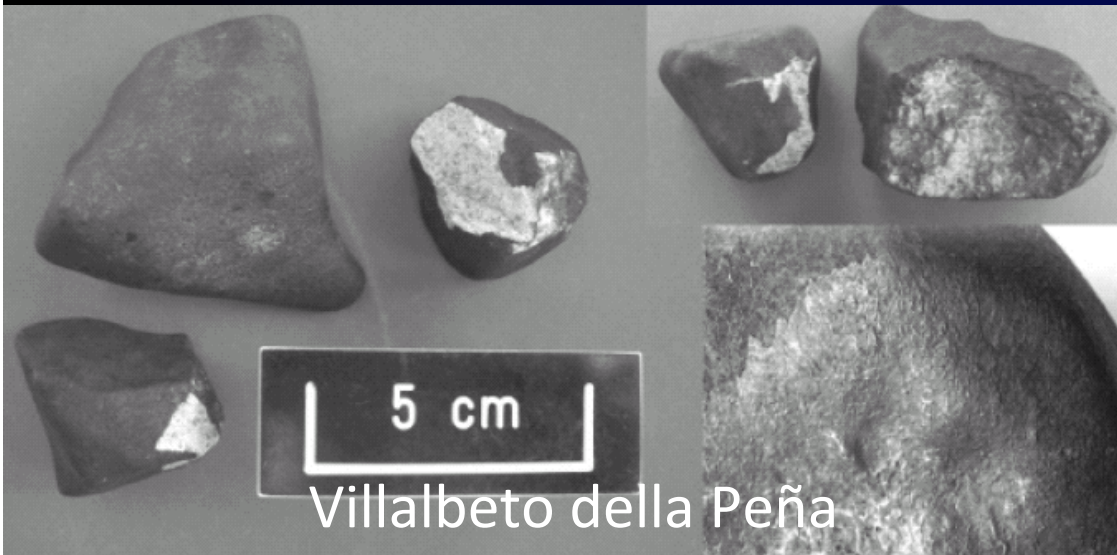
Maribo - C

3.12g



Puerto Lapíce

MPS 44, Nr 2, 159–174 (2009)



Villabeto 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)

