

Fisica Medica

Laboratorio di ● misura di radioattività g in matrici naturali

Roberto Cirio

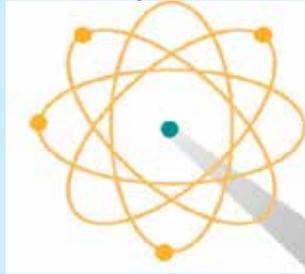
Università e INFN di Torino

Scuola di Fisica 2017

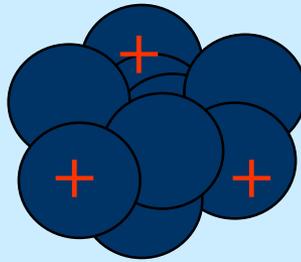
● **La radioattività**

- I decadimenti α , β , γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- Origine dei nuclei radioattivi
- La radiazione nell'ambiente
- Inquinamento radioattivo

Gli atomi hanno un nucleo composto di neutroni e protoni (nucleoni)



I nucleoni sono legati dalla forza nucleare forte



Gli isotopi sono nuclidi con uguale Z e diverso A (${}^A_Z X$)

(ad esempio, in natura il piombo e' una miscela di ${}^{206}_{82}\text{Pb}$, ${}^{207}_{82}\text{Pb}$, ${}^{208}_{82}\text{Pb}$)

Radioattività



Cos'è una **SOSTANZA RADIOATTIVA** ?

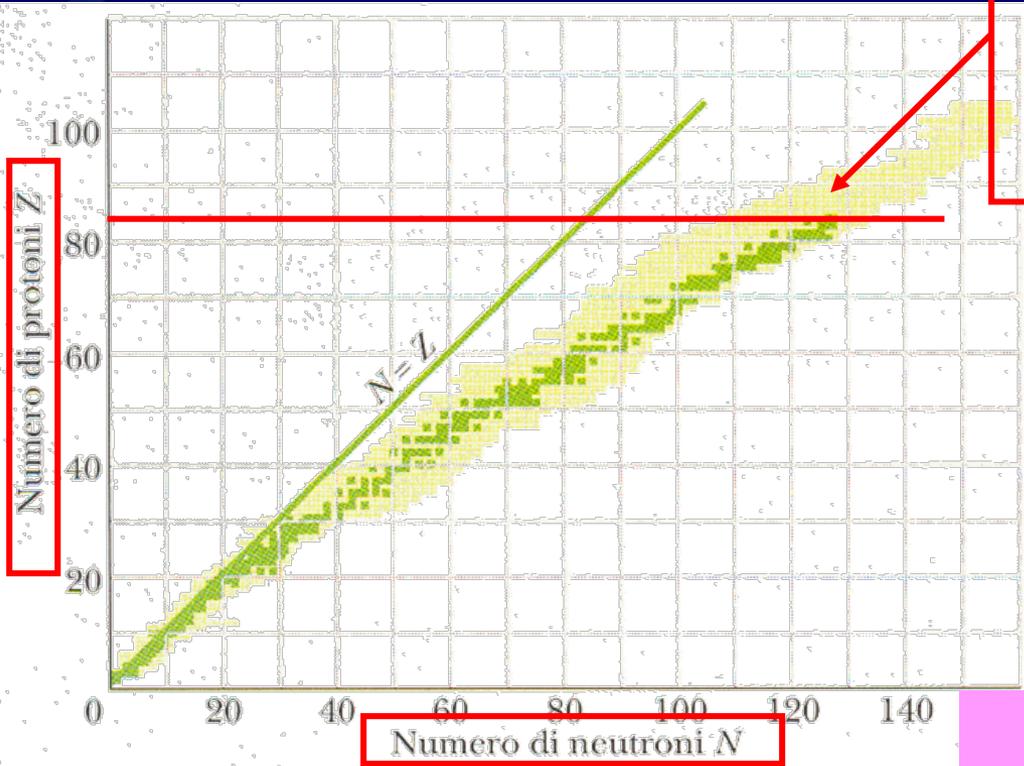
Una sostanza si definisce radioattiva se è costituita da atomi instabili che decadono emettendo radiazioni

Curva di stabilità

Per A elevati, la repulsione elettrica tende a prevalere



Per mantenere la stabilità il sistema reagisce arricchendo il nucleo di componenti neutre (neutroni)



Per $Z > 83$ non esistono atomi stabili: gli atomi decadono emettendo radiazioni

è Radioisotopi

Esempio: $^{12}_6\text{C}$ verso $^{14}_6\text{C}$

Radioisotopi

naturali (^{40}K , ^{14}C , ^{238}U)

artificiali (^{60}Co , ^{137}Cs)

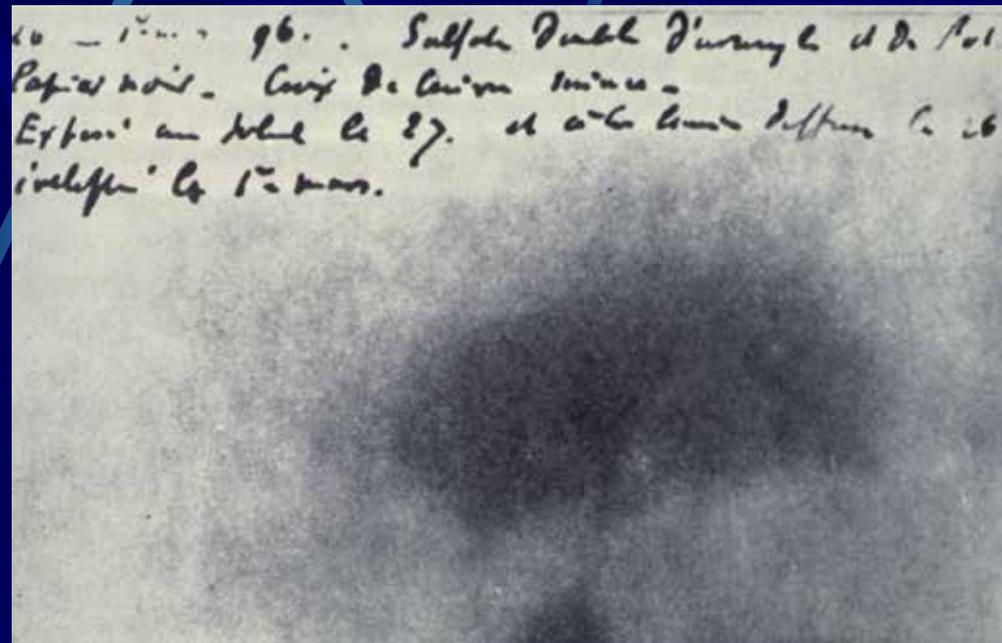
Numero atomico (Z)	Elemento	Simbolo	Numero di massa (A)	Massa atomica*	Abbondanza (%) o tipo di decadimento* (se radioattivo)	Tempo di dimezzamento (se radioattivo)
82	Piombo	Pb	204	203,973 044	β^- , 1,48	$1,4 \cdot 10^{17}$ anni
			206	205,974 46	24,1	stabile
			207	206,975 89	22,1	stabile
			208	207,976 64	52,3	stabile
			210	209,984 18	α, β^-, γ	22,3 anni
			211	210,988 74	β^-, γ	36,1 min
			212	211,991 88	β^-, γ	10,64 ore
			214	213,999 80	β^-, γ	26,8 min
83	Bismuto	Bi	209	208,980 39	100	stabile
			211	210,987 26	α, β^-, γ	2,15 min
			212	211,991 272	α	60,55 min
84	Polonio	Po	210	209,982 86	α, γ	138,38 giorni
			212	211,988 852	α	0,299 μ s
			214	213,995 19	α, γ	164 μ s
86	Radon	Rn	222	222,017 574	α, β	3,8235 giorni
87	Francio	Fr	223	223,019 734	α, β^-, γ	21,8 min
88	Radio	Ra	226	226,025 406	α, γ	$1,60 \cdot 10^3$ anni
			228	228,031 069	β^-	5,76 anni
89	Attinio	Ac	227	227,027 751	α, β^-, γ	21,773 anni
90	Torio	Th	228	228,028 73	α, γ	1,9131 anni
			231	231,036 297	α, β^-	25,52 ore
			232	232,038 054	100; α, γ	$1,41 \cdot 10^{10}$ anni
			234	234,043 596	β^-	24,10 giorni
			234	234,043 302	β^-	6,70 ore
			232	232,037 14	α, γ	72 anni
92	Uranio	U	233	233,039 629	α, γ	$1,592 \cdot 10^5$ anni
			235	235,043 925	0,72; α, γ	$7,038 \cdot 10^8$ anni
			236	236,045 563	α, γ	$2,342 \cdot 10^7$ anni
			238	238,050 786	99,275; α, γ	$4,468 \cdot 10^9$ anni
			239	239,054 291	β^-, γ	23,5 min
			239	239,052 932	β^-, γ	2,35 giorni
93	Nettunio	Np	239	239,052 932	β^-, γ	2,35 giorni
94	Plutonio	Pu	239	239,052 158	α, γ	$2,41 \cdot 10^4$ anni
95	Americio	Am	243	243,061 374	α, γ	$7,37 \cdot 10^3$ anni
96	Curio	Cm	245	245,065 487	α, γ	$8,5 \cdot 10^3$ anni
97	Berkelio	Bk	247	247,070 03	α, γ	$1,4 \cdot 10^3$ anni

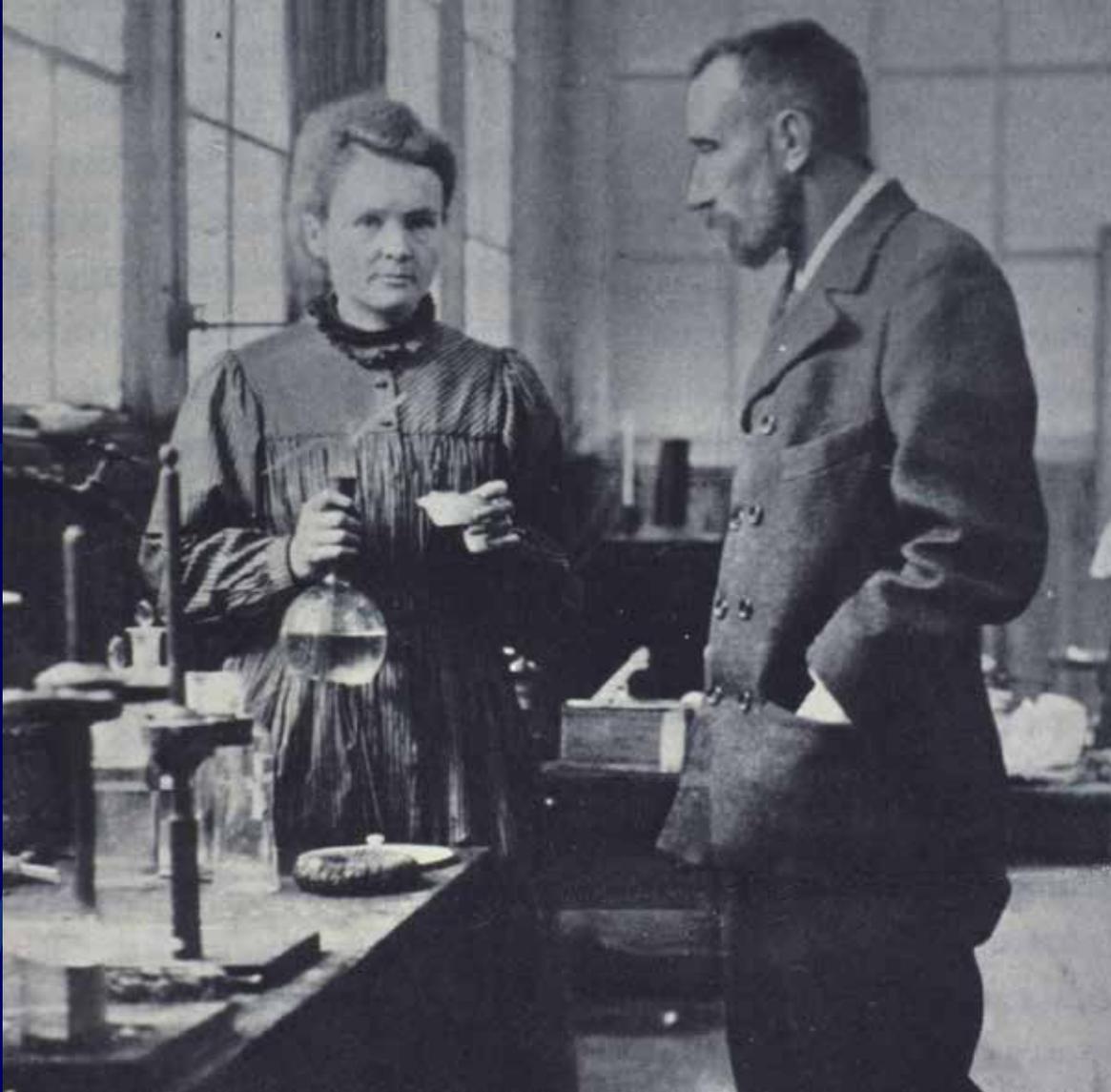


Henri Becquerel (1852-1908)

1896

**Scoperta della radioattività
naturale dell'uranio**





Marie Slodowska Curie

(1867 – 1934)

Pierre Curie

(1859 – 1906)

1898
Scoperta del
polonio e del
radio

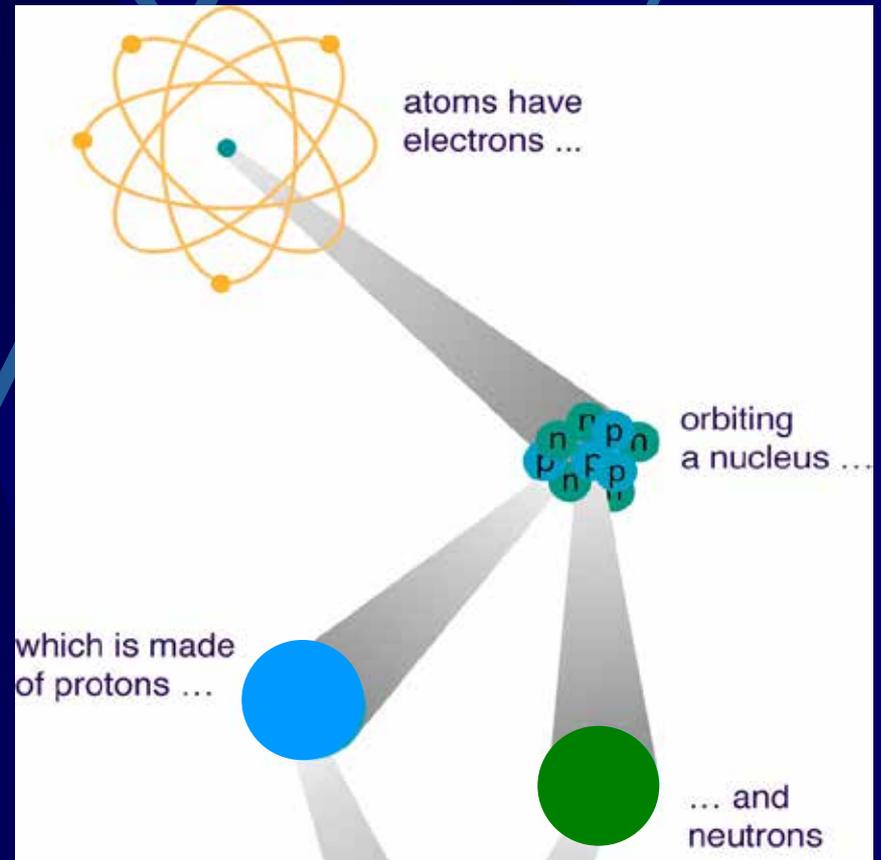


James Chadwick

(1891 – 1974)

1932

Scoperta del neutrone



Radioattività artificiale prodotta dai neutroni e il primo isotopo radioattivo dello iodio

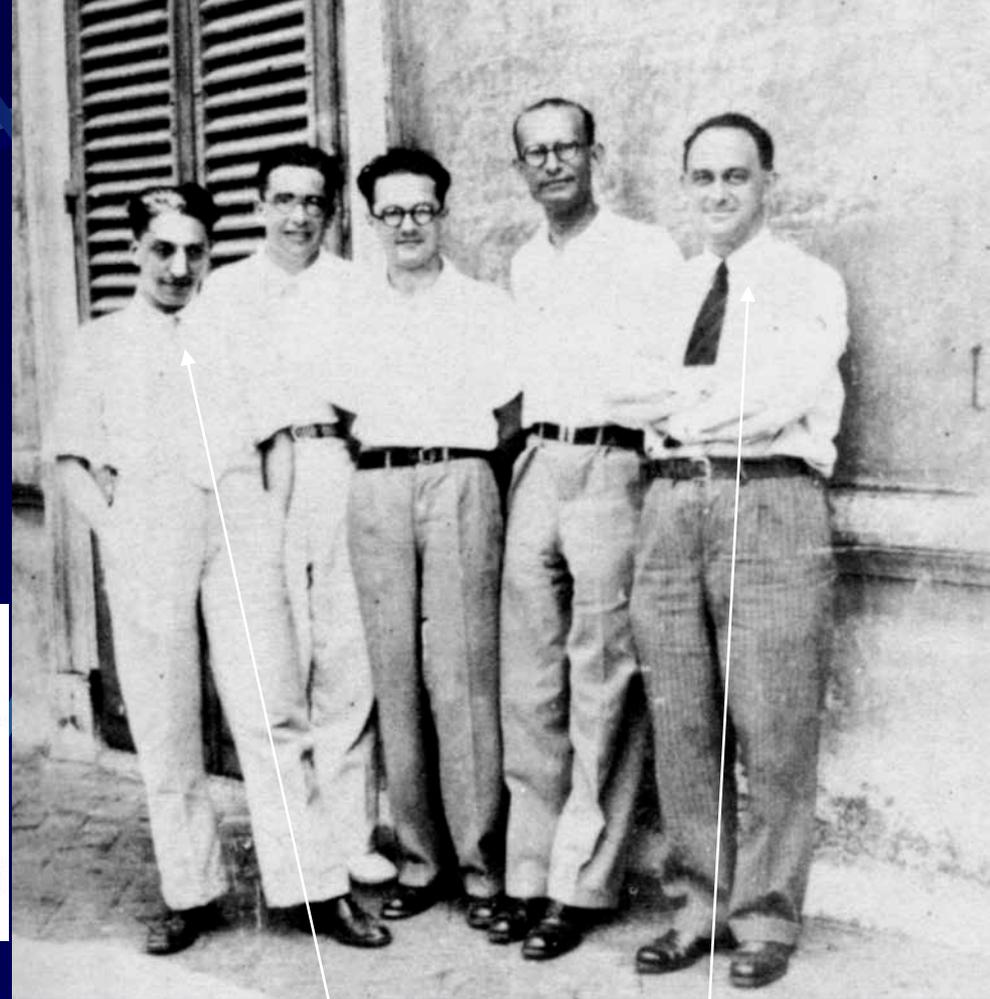
RADIOATTIVITÀ « BETA » PROVOCATA DA BOMBARDAMENTO DI NEUTRONI. — III.

E. AMALDI, O. D'AGOSTINO, E. FERMI, F. RASETTI, E. SEGRÈ
« Ric. Scientifica », 5 (1), 452-453 (1934).

Sono state proseguite ed estese le esperienze di cui alle Note precedenti
coi risultati che ricordiamo appresso.

Jodio. **Periodo 30 minuti.** L'attività segue chimicamente lo Jodio.

**Usato in
medicina**



O. D'Agostino E. Segrè

E. Amaldi F. Rasetti E. Fermi

I ragazzi di Via Panisperna - 1934

- La radioattività
- **I decadimenti α , β , γ**
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- Origine dei nuclei radioattivi
- La radiazione nell'ambiente
- Inquinamento radioattivo

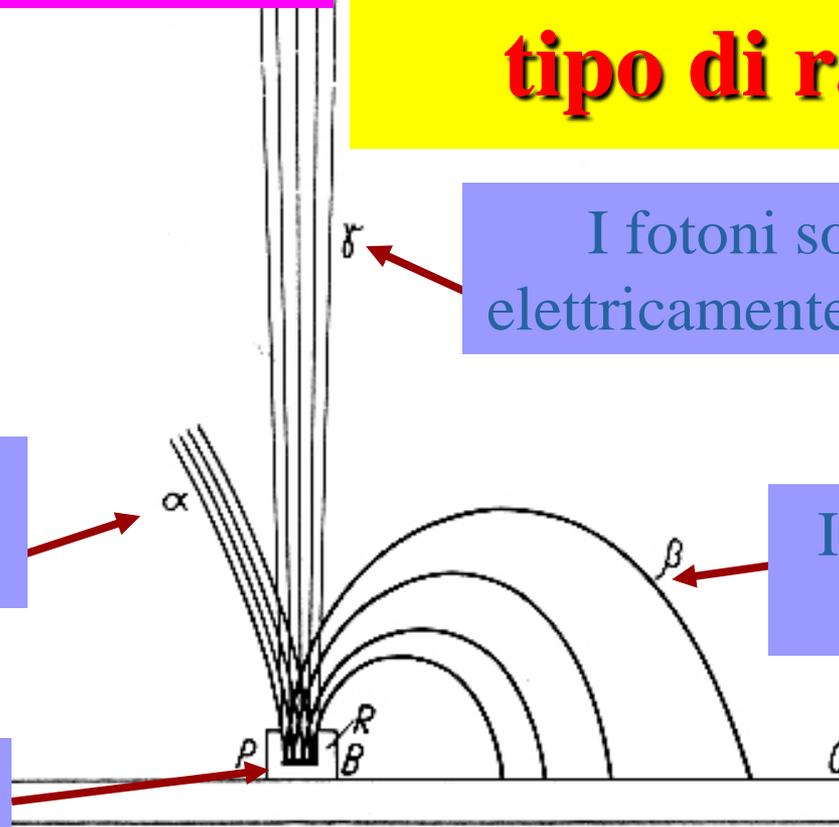
I
B perpendicolare al foglio ed entrante



Lo studio del nuovo tipo di radiazione

La a hanno carica
positiva

Sorgenti a, b, g



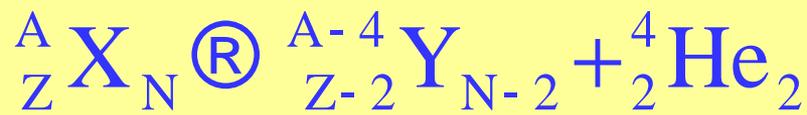
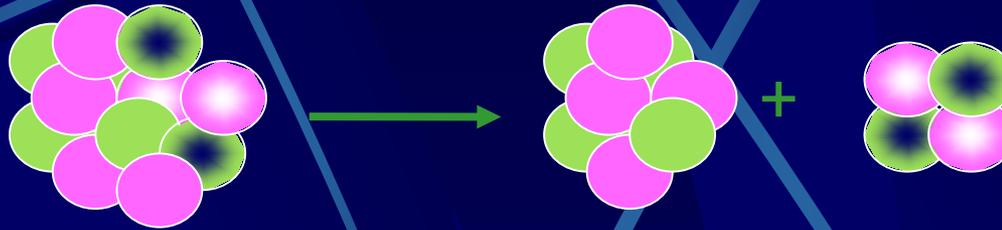
I fotoni sono
elettricamente neutri

I b hanno carica
negativa

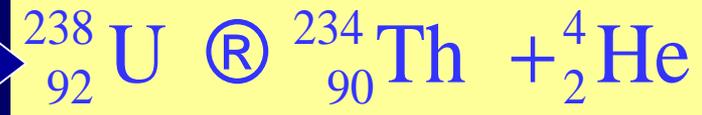
- I raggi a attraversano a malapena un foglio di carta
- I raggi b riescono ad attraversare qualche mm di alluminio
- I raggi g attraversano vari cm di piombo

Il decadimento α

Emissione di un nucleo di elio (He) da parte del nucleo genitore (X)



per esempio



Conservazione dell'energia

$$m_U c^2 = E_{\text{He}} + E_{\text{Th}} + m_{\text{He}} c^2 + m_{\text{Th}} c^2$$

e sapendo che: $E_{\text{He}} + E_{\text{Th}} > 0$

posso avere un decadimento α solo se vale la

$$W = (m_U - m_{\text{He}} - m_{\text{Th}}) c^2 > 0$$

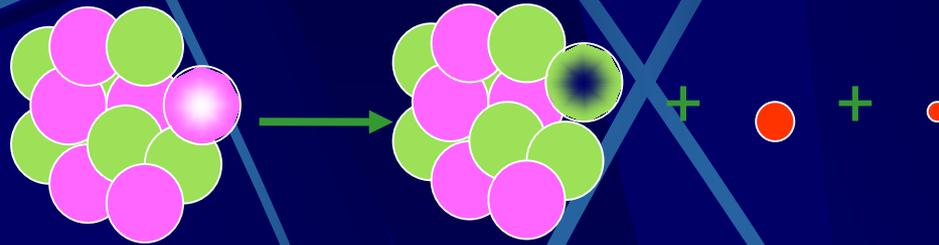
Conservazione della quantita' di moto

$$m_{\text{He}} v_{\text{He}} + m_{\text{Th}} v_{\text{Th}} = 0$$

Le velocita', e quindi le energie, del nucleo figlio e del nucleo di elio sono fissate dal valore di W e sono **monoenergetici**

Il decadimento β^-

Emissione di un e^- e un antineutrino da parte del nucleo genitore (X)

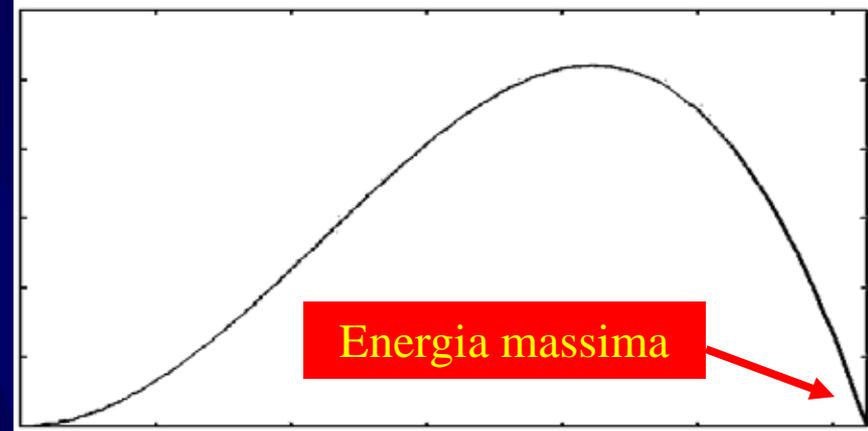


per esempio



Il neutrino (e la sua antiparticella antineutrino) sono stati introdotti da W. Pauli nel 1930 (e battezzati così in seguito da E. Fermi) per spiegare lo spettro energetico dell'elettrone emesso in questo tipo di decadimenti

Numero di elettroni

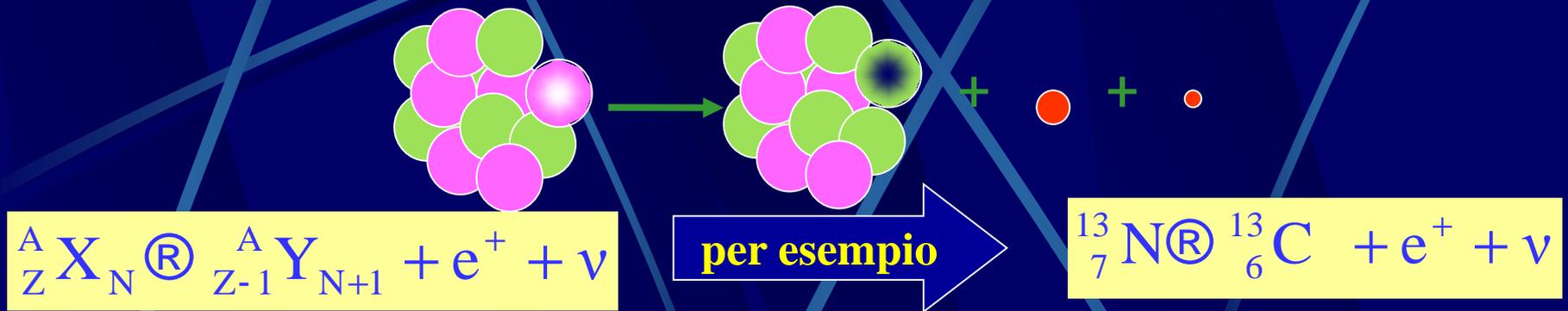


Quantità di moto elettrone

Applicando conservazione di energia e quantità di moto ottengo che le velocità (e quindi energie) dei prodotti di decadimento variano in un intervallo di valori è **spettro**

Il decadimento β^+

Emissione di un e^+ e un neutrino da parte del nucleo genitore (X)



Domanda cattiva

Il decadimento β^- equivale al decadimento di un neutrone in protone.

E il β^+ ?

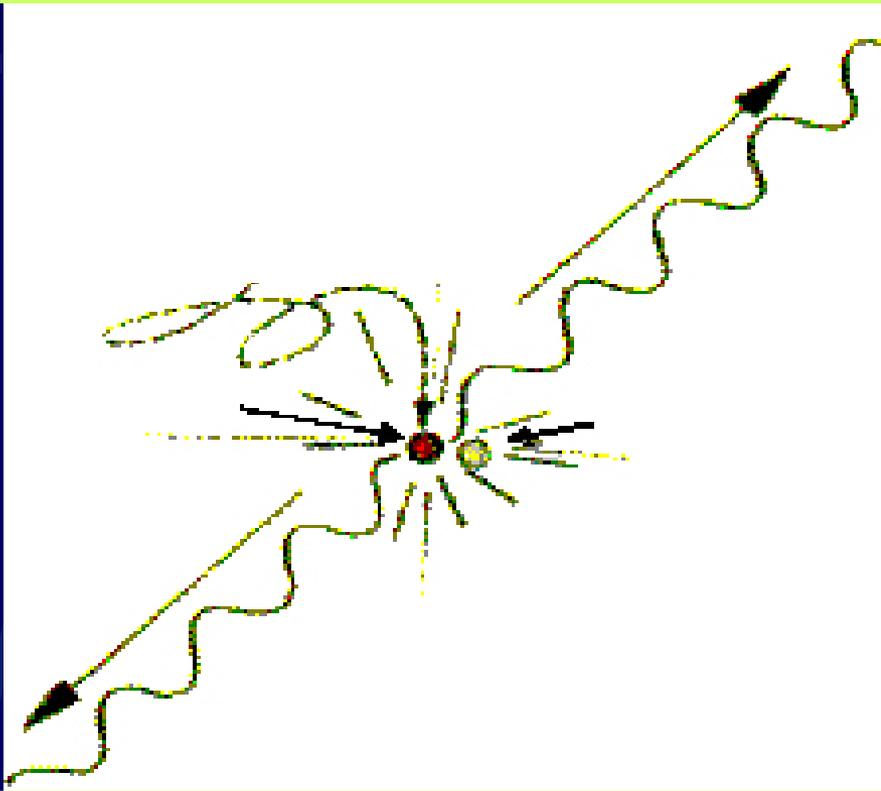
Ricordiamoci che $m_p < m_n$

Risposta

Il decadimento β^+ e' il decadimento di un protone in neutrone, con la differenza di massa ottenuta a spese dell'energia di legame del nucleo

L'annichilazione $e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$

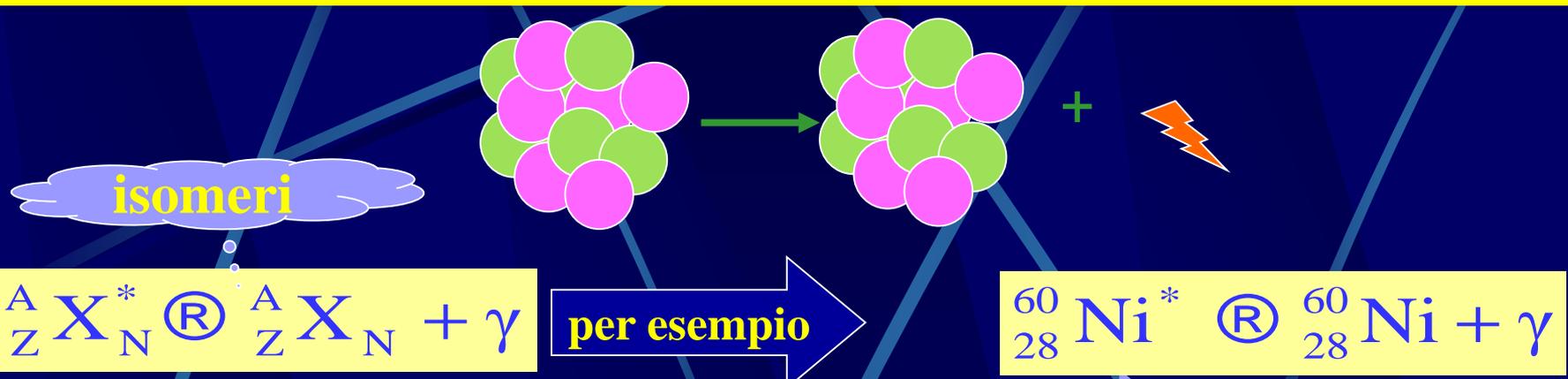
Con le energie tipiche dei decadimenti, il positrone percorre qualche mm in acqua (o materiale di caratteristiche analoghe), prima di **annichilarsi** con un elettrone e produrre due fotoni $E=(m_{e^-} + m_{e^+})c^2$



Se il positrone è quasi fermo (a riposo), i due fotoni sono emessi con un angolo di 180° (schiena a schiena)

Questa interazione è alla base della
Positron Emission Tomography (PET)

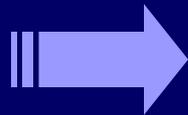
Il decadimento γ



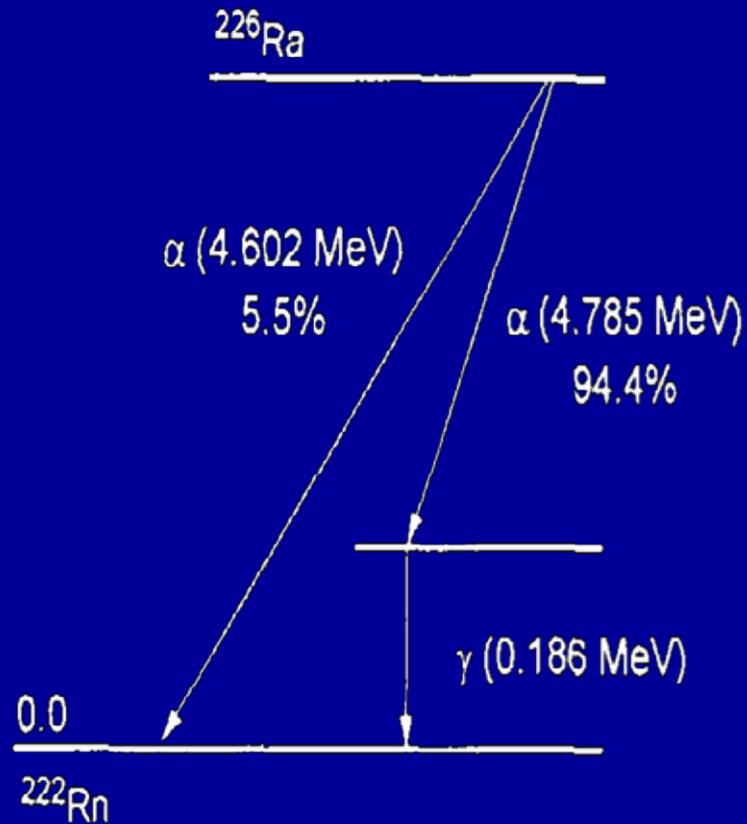
Come faccio ad ottenere un nucleo eccitato?

Normalmente da un atomo, dopo un decadimento α o β

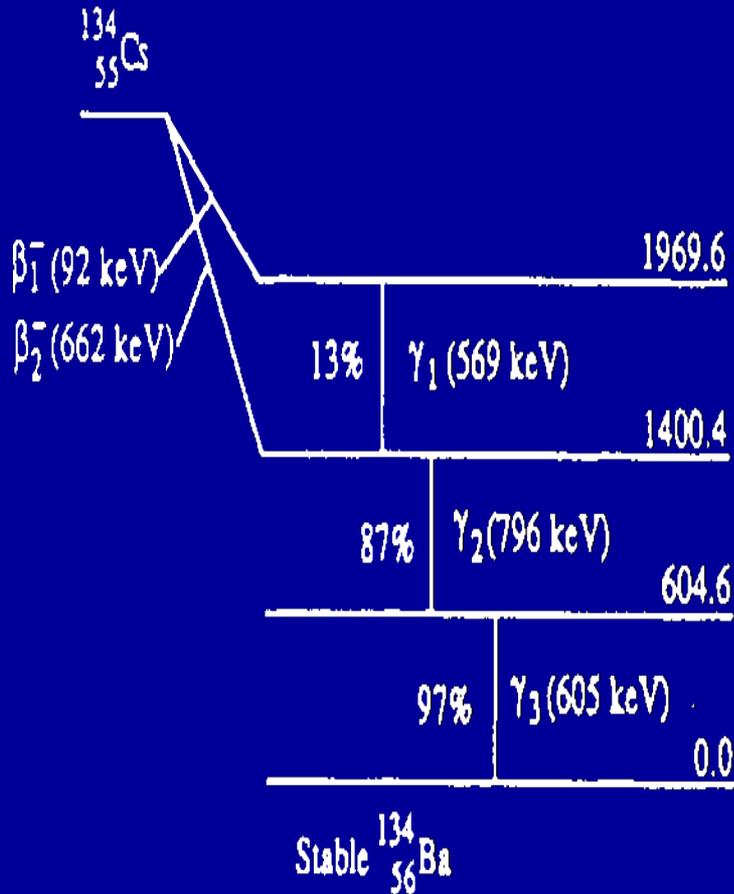
Neutrone lento



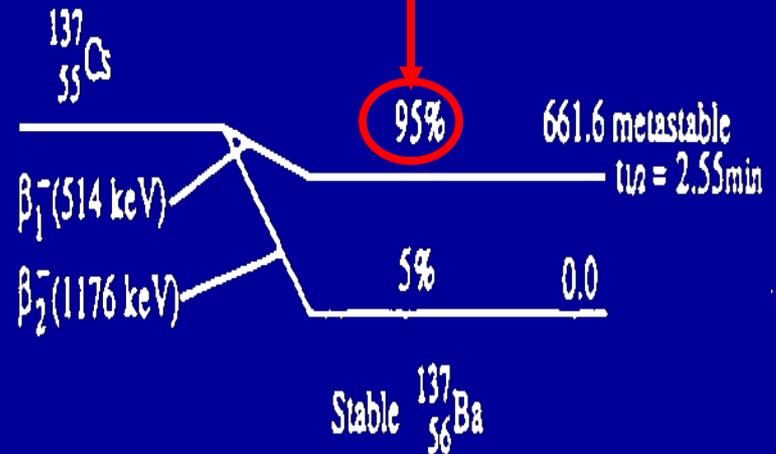
Schema di decadimento



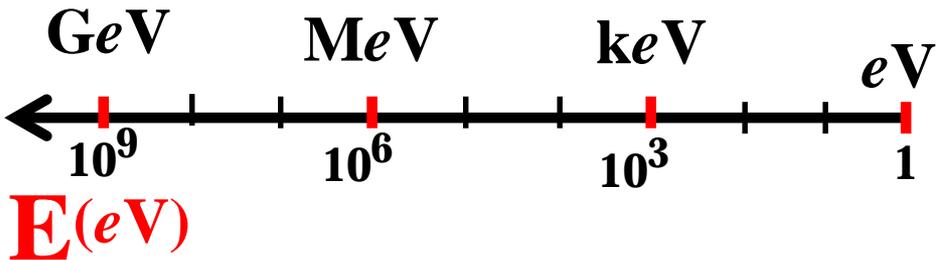
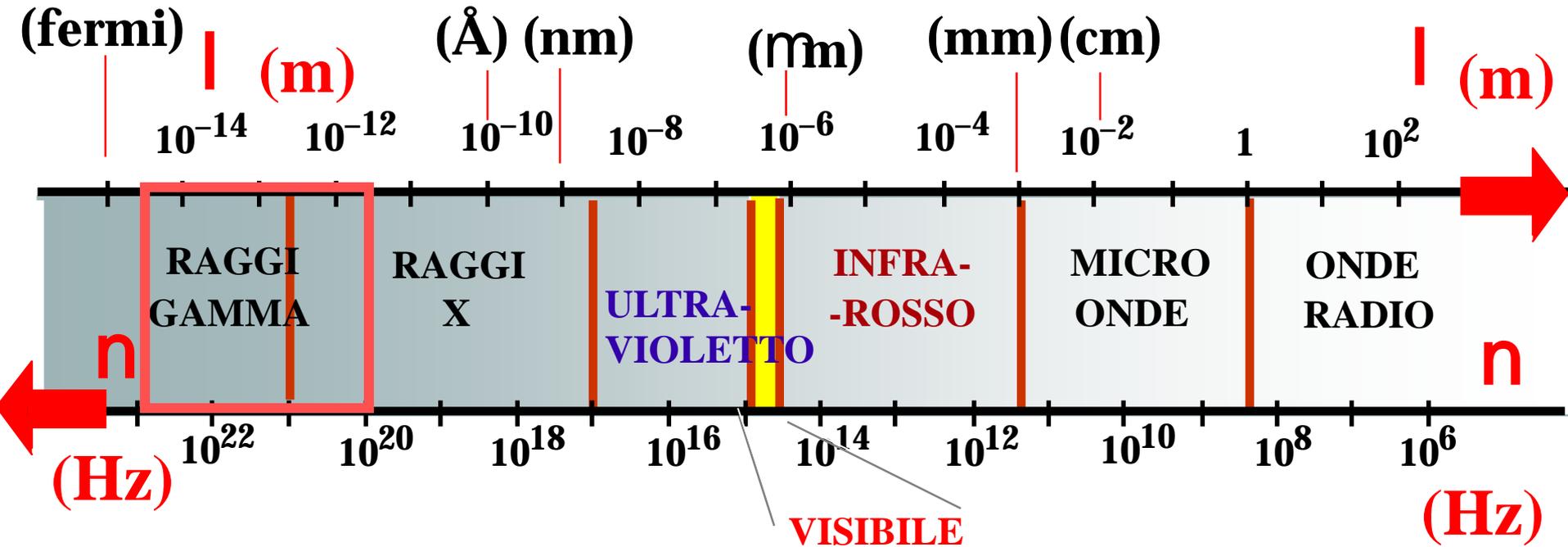
Cs¹³⁴ e Cs¹³⁷



**rapporto di decadimento o
branching ratio (B.R.)**



Spettro delle onde elettromagnetiche



$$| \lambda = c / \nu$$

$$E = h \nu$$

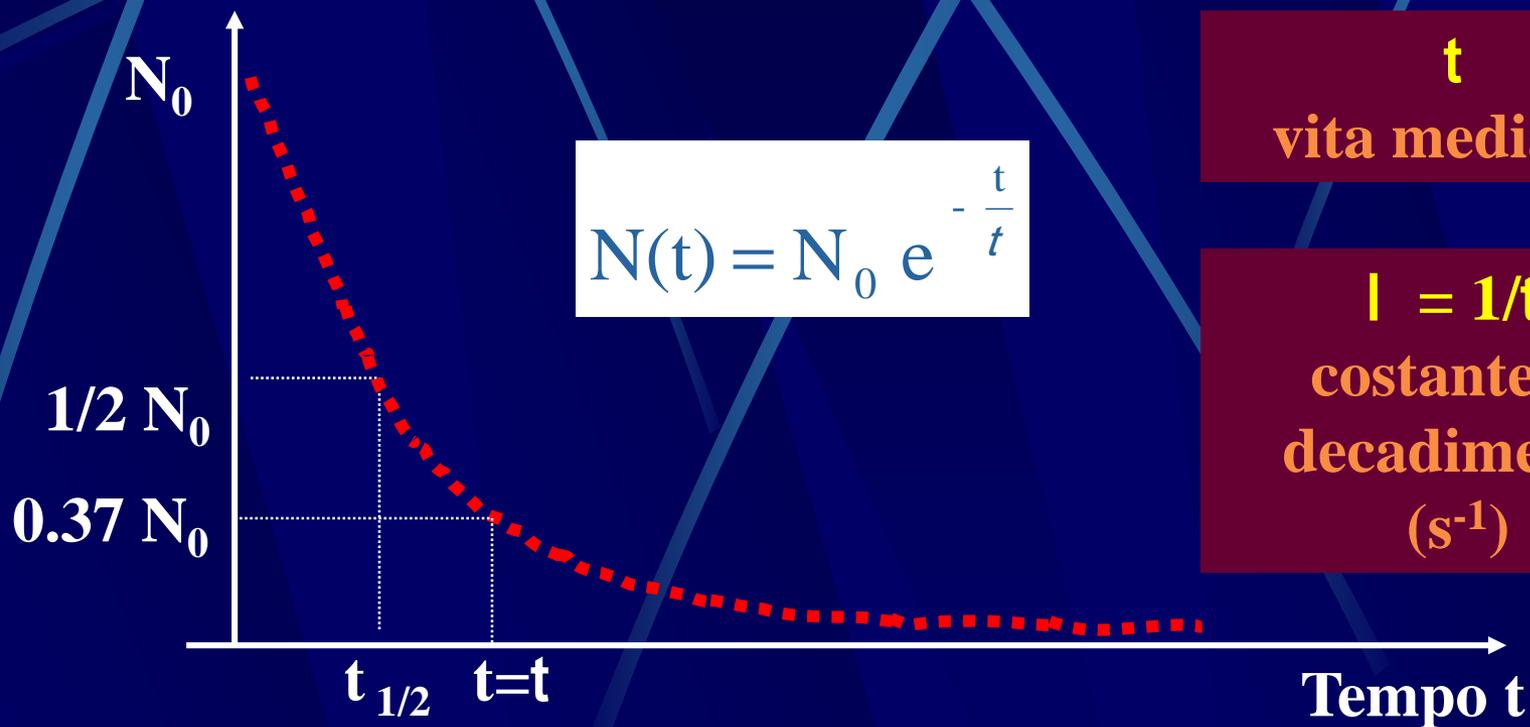
Nota bene: si tratta di FOTONI

- La radioattività
- I decadimenti α , β , γ
- **La legge del decadimento radioattivo**
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- Origine dei nuclei radioattivi
- La radiazione nell'ambiente
- Inquinamento radioattivo

Legge del DECADIMENTO RADIOATTIVO

N_0 : numero di nuclei all'istante iniziale t_0

$N(t)$: numero di nuclei non ancora decaduti al tempo t



$$1/e = 1/2.72 = 0.37$$

$$T_{1/2} = \tau \ln 2 = \tau 0.693$$

tempo di dimezzamento

DECADIMENTO RADIOATTIVO

ATTIVITA' A di una sorgente:

Numero di nuclei che decadono nell'unità di tempo

A si misura in bequerel (Bq) (S.I.) o curie (Ci)

1 disintegrazione /secondo = 1 Bq

1 Ci = $3.7 \cdot 10^{10}$ disintegrazioni /secondo

(e' l'attivita' di 1g di ^{226}Ra)

Esercizio

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \mu N$$

In un isotopo radioattivo, il numero di nuclei che decade nell'unita' di tempo e' proporzionale al numero di nuclei che contiene l'isotopo

$$-\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N(t)$$

integro in t

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

$$A = \frac{DN}{Dt} = \lambda N = \frac{N}{t} = N \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

Siano dati 1000 nuclei di un isotopo con $t_{1/2} = 10$ min

$$A = 1000 \frac{0.693}{10 \text{ min}} = 1.16 \text{ Bq}$$

Ma dopo 10 min (ovvero dopo un tempo $t = t_{1/2}$)

restano $1000/2 = 500$ nuclei e quindi

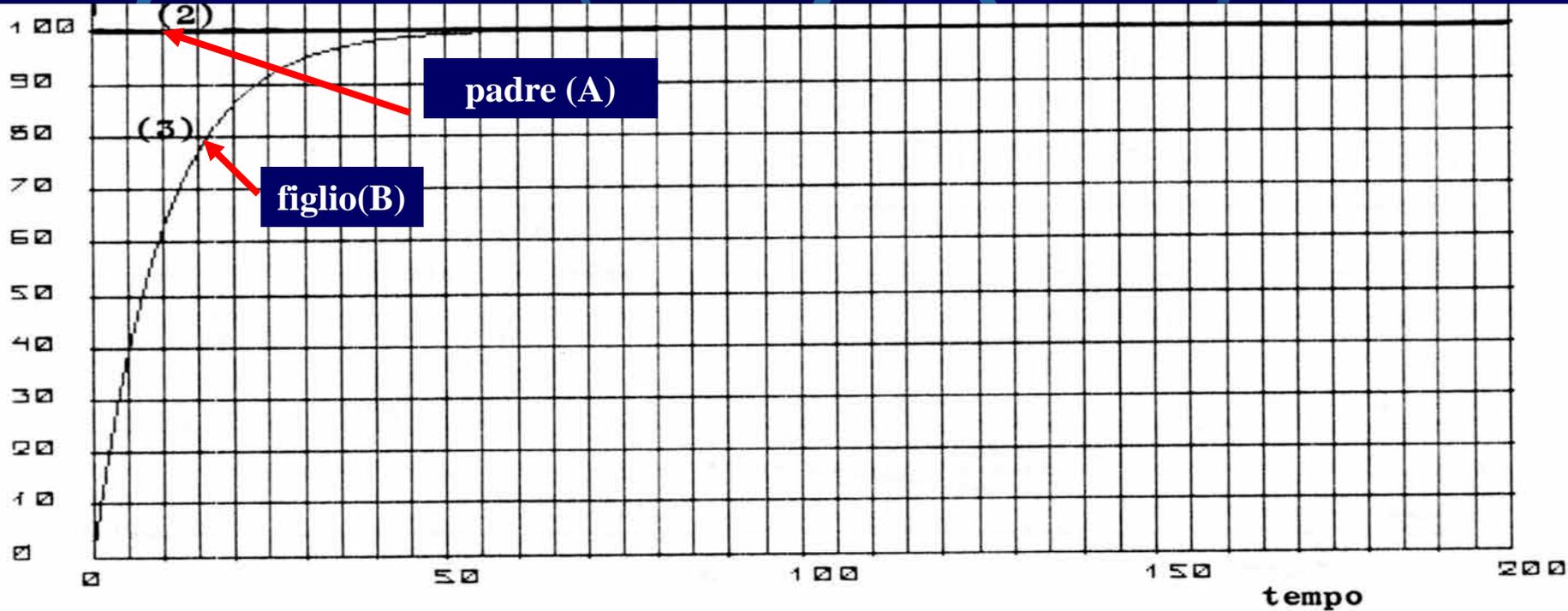
$$A = 500 \frac{0.693}{10 \text{ min}} = 0.58 \text{ Bq}$$

Equilibrio secolare

- Ho una reazione a catena in cui:
 - | A (padre) e' un nuclide radioattivo a lunghissima vita media
 - | B (figlio di A) e' radioattivo a breve vita media
 - | C (figlio di B) e' stabile
- $T_{1/2}$ padre / $T_{1/2}$ figlio $\gg 10^4$, l'attivit  di A non varia anche dopo molti $T_{1/2}$
- Se parto da un campione puro ($N_B=0$ a $t=0$), al tempo t avr :
$$A_B/A_A \approx 1$$
- Asintoticamente l'attivit  di B e' uguale all'attivit  di A
  **equilibrio secolare**

Equilibrio secolare

Dopo 6.6 t l'attività di B è il 99.9% del suo rateo di disintegrazione finale e di lì in poi $A(\text{figlio}) = A(\text{padre})$



- La radioattività
- I decadimenti α , β , γ
- La legge del decadimento radioattivo
- **L'assorbimento della radiazione nella materia**
- Origine dei nuclei radioattivi
- La radiazione nell'ambiente
- Inquinamento radioattivo

L'assorbimento della radiazione nella materia

RADIAZIONE ELETTROMAGNETICA (fotoni)

Legge dell'assorbimento esponenziale $I(x) = I_0 e^{-\mu x}$

RADIAZIONE CORPUSCOLARE (α, β)

Ionizzazione

Il RANGE e' la distanza media percorsa nella materia ed e' tanto maggiore all'aumentare dell'energia

Range di α di energia ~ 1 MeV in aria: 5.5 mm, in H₂O: 30 mm

Range di β di energia ~ 1 MeV in aria: 4 m, in H₂O: 5 mm

- La radioattività
- I decadimenti α , β , γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- **Origine dei nuclei radioattivi**
- La radiazione nell'ambiente
- Inquinamento radioattivo

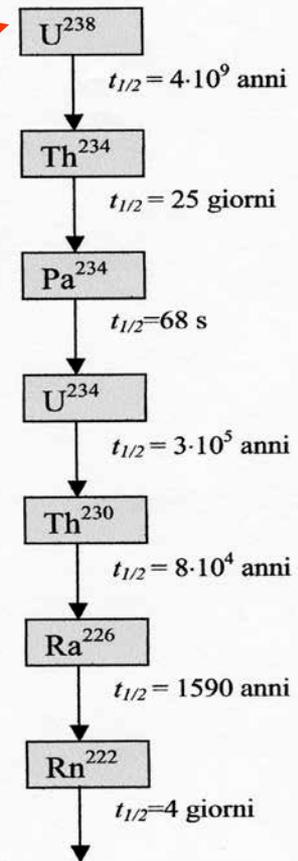
Origine dei nuclei radioattivi

- Primordiali: creati nella sintesi degli elementi costituenti della terra
- Cosmogenici: creati in elementi terrestri ed extra-terrestri dai raggi cosmici
- Artificiali: creati in reattori nucleari, generatori, bombe e acceleratori

Elementi primordiali

- Hanno vita media paragonabile alla vita della terra ($>4.5 \times 10^9$ anni)
- Sono in equilibrio secolare con un genitore appartenente ad una delle 3 famiglie radioattive:

- | ^{232}Th
- | ^{235}U
- | ^{238}U



Elementi cosmogenici

- I piu' importanti sono:
 - | ^3H
 - | ^{14}C
- Entrambi sono prodotti nella stratosfera dai raggi cosmici
- Sono importanti in geofisica

La radioattività artificiale

Si possono ottenere radionuclidi artificiali bombardando atomi con proiettili come particelle α , n , p ... (~2500 ad oggi).



La fissione dell'uranio



Enrico Fermi

Alla ricerca di elementi transuranici bombardando l'uranio con neutroni, si scoprì che il nucleo del U235 (0.7 %) si spezza in frammenti più leggeri e 2 o 3 neutroni, rilasciando una grande quantità di energia



- La radioattività
- I decadimenti α , β , γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- Origine dei nuclei radioattivi
- **La radiazione nell'ambiente**
- Inquinamento radioattivo

Che isotopi trovo nell'ambiente ?

- Isotopi primordiali:

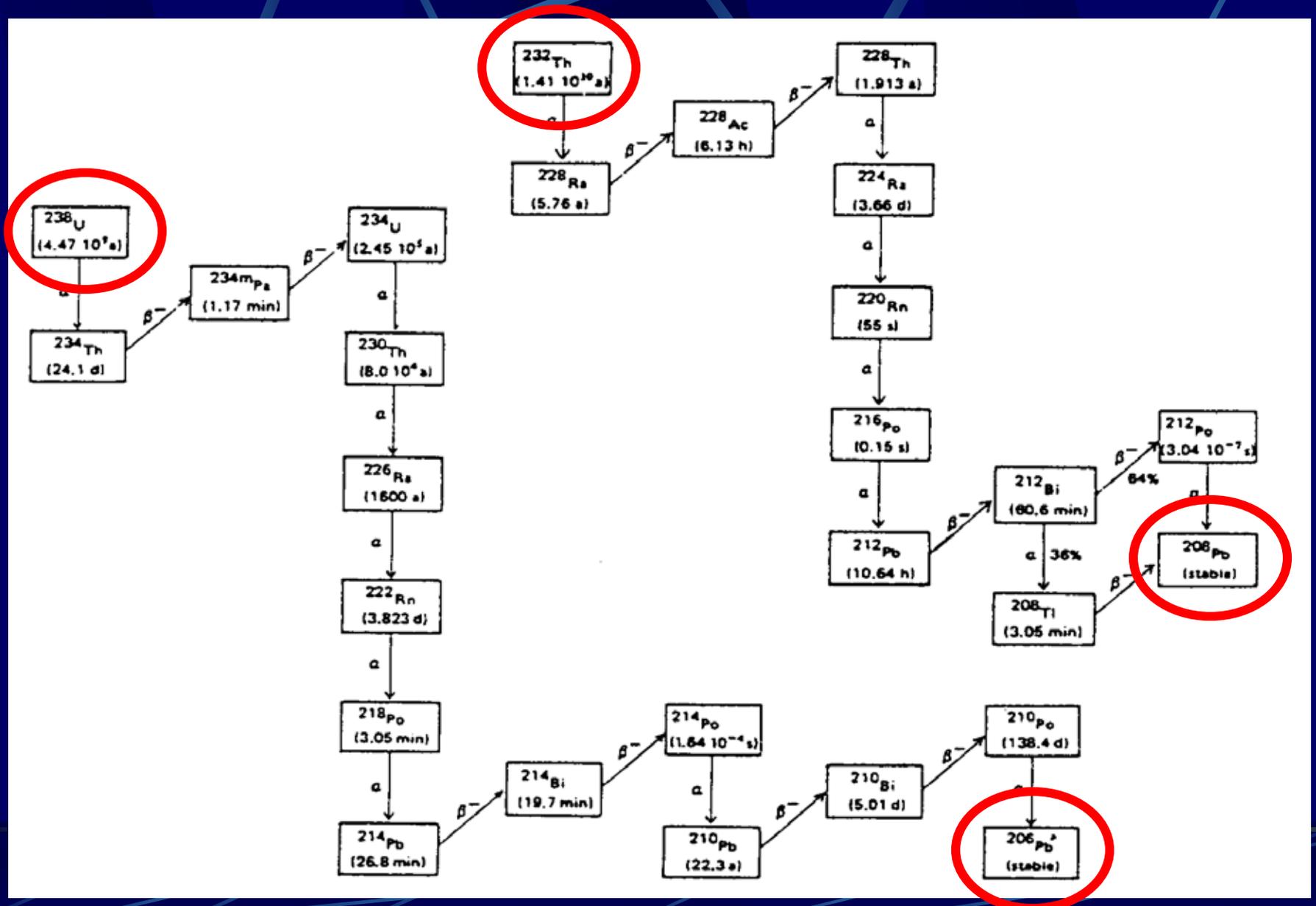
- | ^{232}Th

- | ^{235}U ; ma questo e' solo circa 0.7% â trascurabile

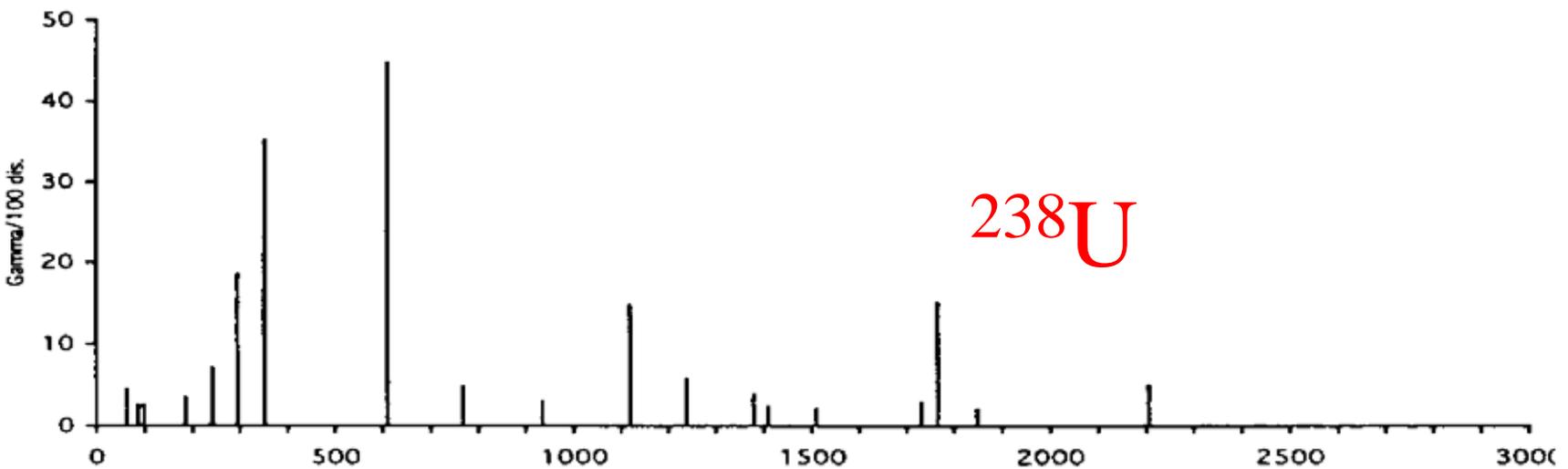
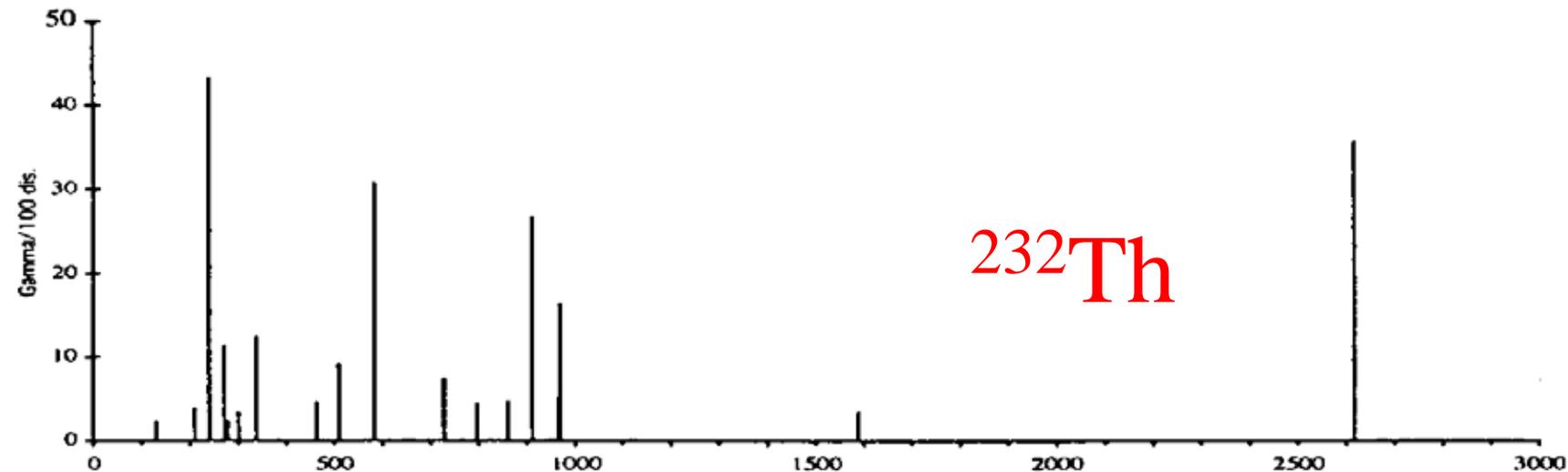
- | ^{238}U

- ^{40}K (0.0118 del K), pero' molto abbondante

Famiglie radioattive ^{232}Th e ^{238}U



Mi concentro solo sui decadimenti γ



Righe γ delle serie del ^{232}Th e ^{238}U

Nuclide	Energy	Intensity %, per decay of ^{238}U atom	Nuclide	Energy	Intensity %, per decay of ^{232}Th atom
^{238}U series			^{232}Th series		
Thorium-234	63.0	4.5	Actinium-228	129.1	2.2
	92.4	2.6		209.3	3.8
	92.8	2.6		270.2	11.2
Radium-226	186.2	3.5		463.0	4.5
Lead 214	242.0	7.1		794.7	4.3
	295.2	18.1		911.1	26.6
	351.9	35.1		964.6	5.1
Bismuth-214	609.3	44.6		969.1	16.2
	768.4	4.8		1588.0	3.3
	934.6	3.1	Radium-224	241.0	4.1
	1120.3	14.7	Lead-212	238.6	43.5
	1238.1	5.8		300.1	3.3
	1377.6	3.9	Bismuth-212	727	7.3
	1408.0	2.4	Thallium-208	278	2.3
	1509.2	2.1		583	30.7
	1729.6	2.9		860.4	4.6
	1764.5	15.1		2614.7	35.6
	1847.4	2.0			
	2204.2	5.0			

Righe g dei nuclidi primordiali

Nuclide	Abundance %	Half-life years	Decay mode	Energy MeV	Daughter nuclide
⁴⁰ K	0.0117	1.25×10^9	β^- EC	1.312 (89%) γ 1.456 (10.7%)	⁴⁰ Ca ⁴⁰ Ar
⁵⁰ V	0.250	$>6 \times 10^{15}$	EC β^-	γ 1.554 0.79	⁵⁰ Ti ⁵⁰ Cr
⁸⁷ Rb	27.83	4.9×10^{10}	β^-	0.27	⁸⁷ Sr
¹¹³ Cd	12.22	9×10^{15}	β^-		¹¹³ In
¹¹⁵ In	95.7	4.4×10^{14}	β^-	0.49	¹¹⁵ Sn
¹²³ Te	.0908	1.3×10^{13}	EC	0.79	¹²³ Sb
¹³⁸ La	0.009	1.1×10^{11}	EC β^-	γ 0.789 (34%) γ 1.44 (66%)	¹³⁸ Ba ¹³⁸ Ce
¹⁴⁴ Nd	23.8	2.1×10^{15}	α	1.83	¹⁴⁰ Ce
¹⁴⁷ Sm	15.0	1.1×10^{11}	α	2.23	¹⁴³ Nd
¹⁴⁸ Sm	11.3	7×10^{15}	α	1.96	¹⁴⁴ Nd
¹⁷⁴ Hf	162	2.0×10^{15}	α	2.50	¹⁷⁰ Yb
¹⁷⁶ Lu	02.59	3.7×10^{10}	β^-	0.57 γ 0.31 (93%)	¹⁷⁶ Hf
¹⁸⁷ Re	62.60	4.5×10^{10}	β^-	0.0026	¹⁸⁷ Os
¹⁸⁶ Os	1.58	2×10^{15}	α	2.75	¹⁸² W
¹⁹⁰ Pt	.001	7×10^{11}	α	3.18	¹⁸⁶ Os
¹³² Th	100	1.40×10^{10}	α	4.010	series
²³⁵ U	.720	7.0×10^8	α	4.401	series
²³⁸ U	99.27	4.47×10^9	α	4.196	series

Unita' di misura utili

Misura dell'attività

1 bequerel (Bq) = 1 decadimento al secondo

Unita' di misura utili

Per la misura della quantità di radiazione che attraversa un corpo si introduce la *dose = energia E (rilasciata dalla radiazione nel corpo di massa M) divisa per M*

$$D = \frac{E}{M} \quad \text{Unità di dose: 1 gray (Gy) = 1 joule/kg}$$

Dose equivalente (per danno biologico) = $Q \cdot D$

ove Q dipende dal tipo di radiazione

$Q = 1$ per fotoni, elettroni, muoni

$Q = 20$ per neutroni lenti

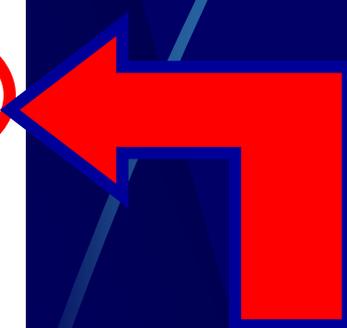
etc...

Per fotoni, elettroni $\rightarrow 1 \text{ Sv} = 1 \text{ Gy}$

Unità di *dose equivalente* = sievert (Sv)

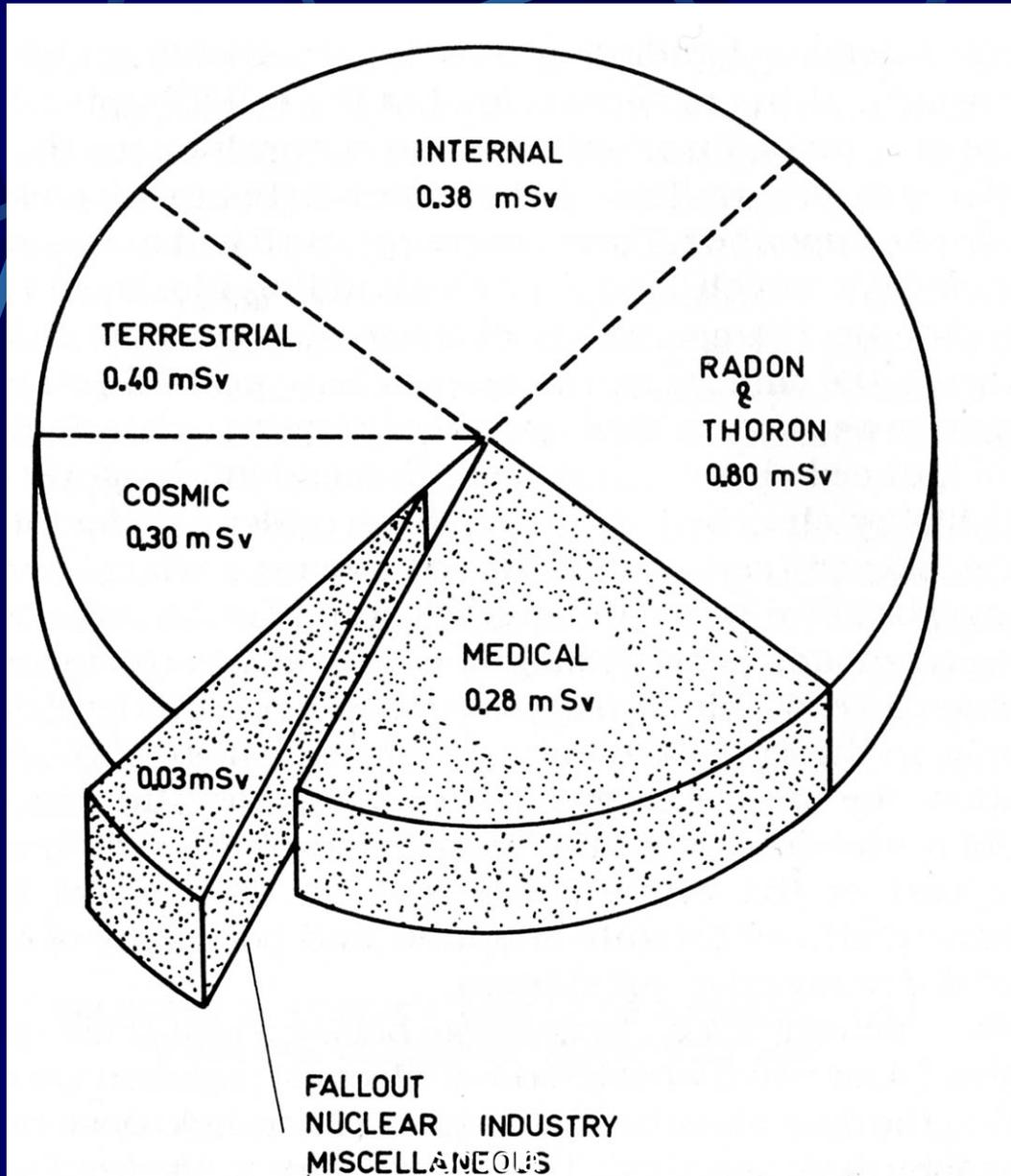
Radioattività dalle rocce

Type of rock	⁴⁰ K Bq/kg	²³⁸ U Bq/kg	²³² Th Bq/kg	Dose rate nGy/h
Igneous				
Acidic (granite)	990	59	81	140
Intermediate (diorite)	590	23	32	53
Mafic (basalt)	330	11	11	26
Ultrabasic (durite)	150	0.4	24	17
Sedimentary				
Limestone	90	27	7	24
Carbonate	Low	26	8	21
Sandstone	370	18	11	32
Shale	700	44	44	78
Upper crust	830	34	45	77
Soil	370	25	25	43



Rateo di dose in
aria, 1m sopra la
superficie

Dose totale annuale

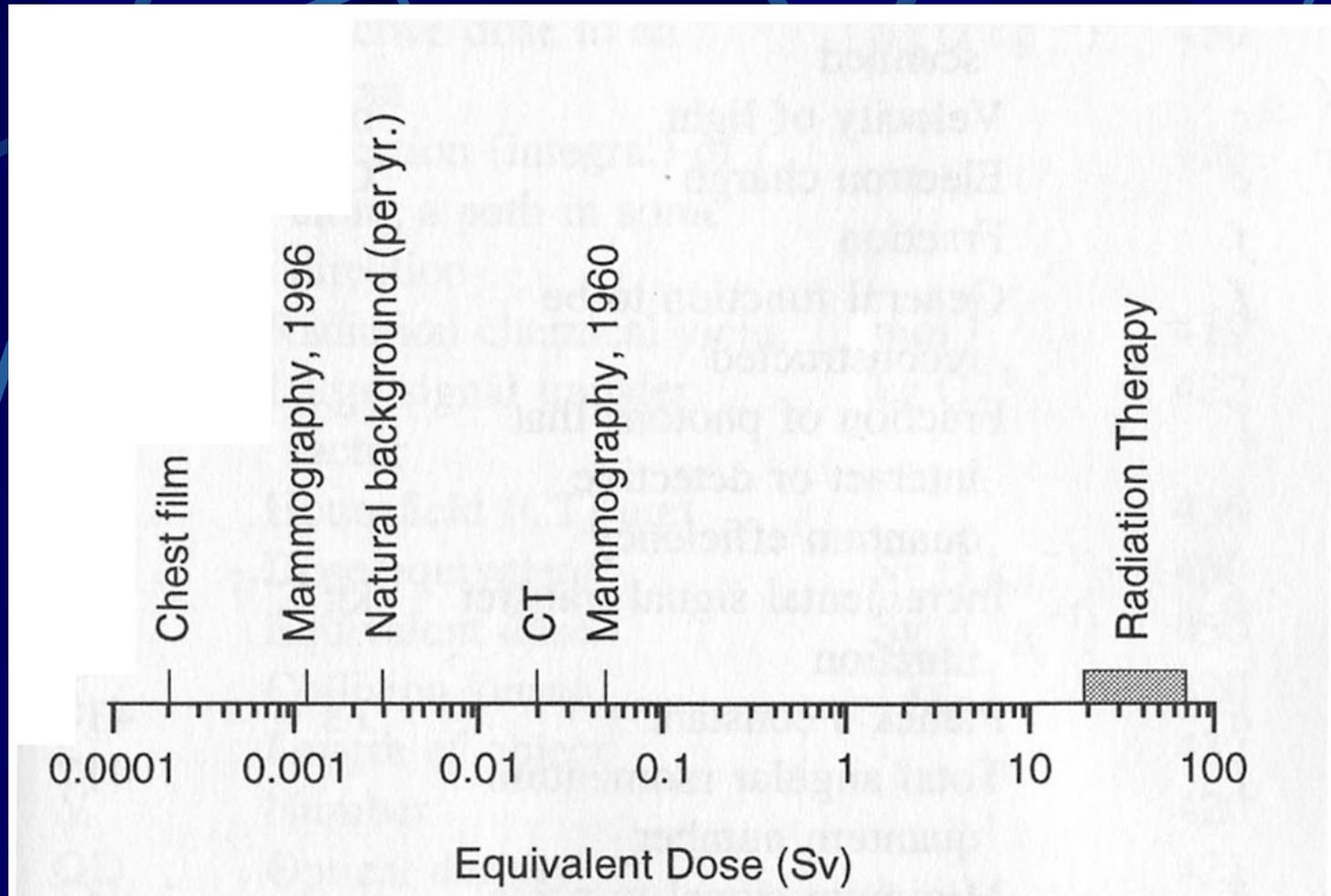


2.2 mSv

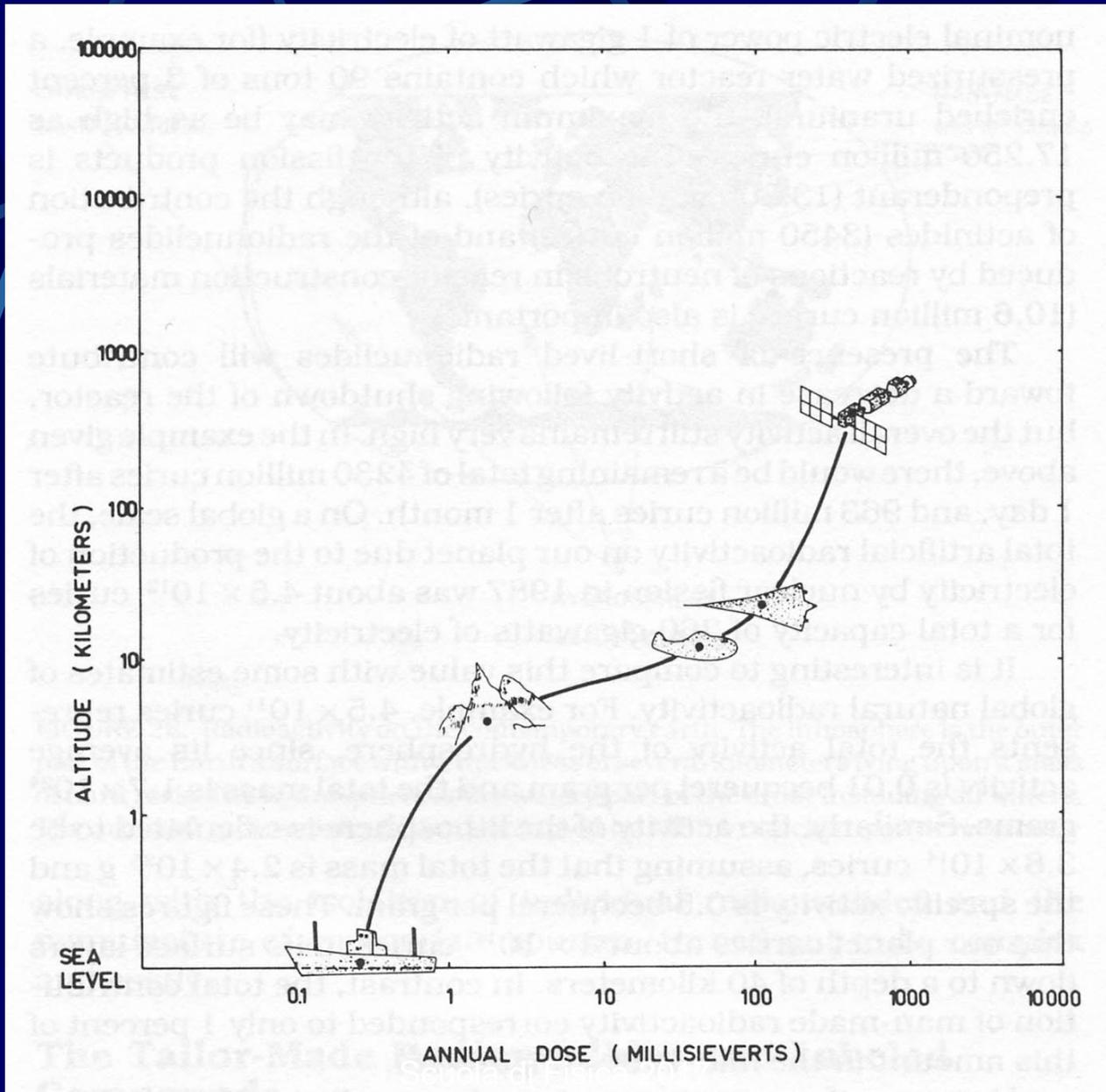
87% naturale

13% artificiale

Dose totale annuale



Dose totale annuelle



Variabilita' locali



Dose assorbita annualmente causata da radiazione naturale, espressa in mrem (10^{-5} Sv)

(1 mSv = 100 mrem)

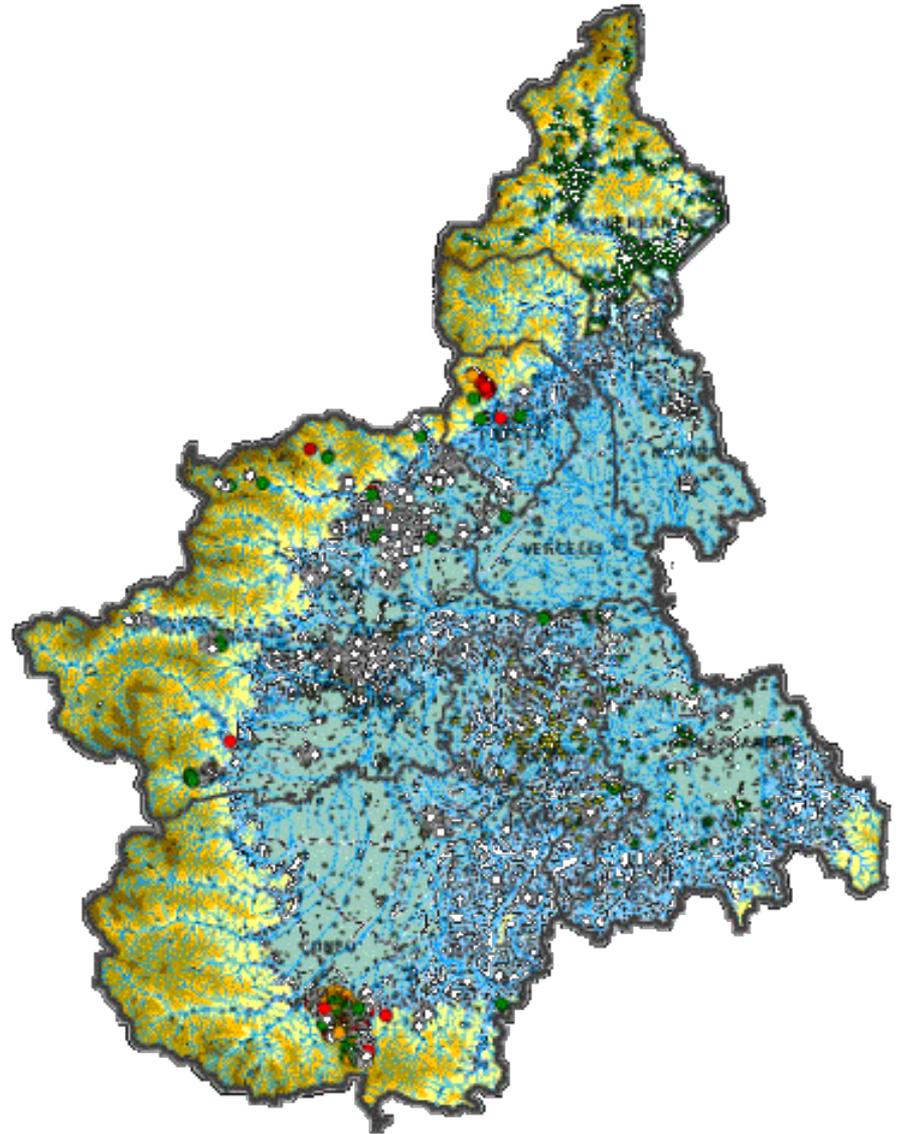
Radioattività naturale in Piemonte

- Principalmente dovuta al **Radon** derivato dall'uranio contenuto nel suolo e nei materiali da costruzione
- Il Rn-222 (dal'U-238) è gassoso e si accumula negli ambienti chiusi, miniere
- Viene inalato e nei successivi decadimenti vengono emesse a che sono **altamente ionizzanti** è cancerogene ad alte dosi

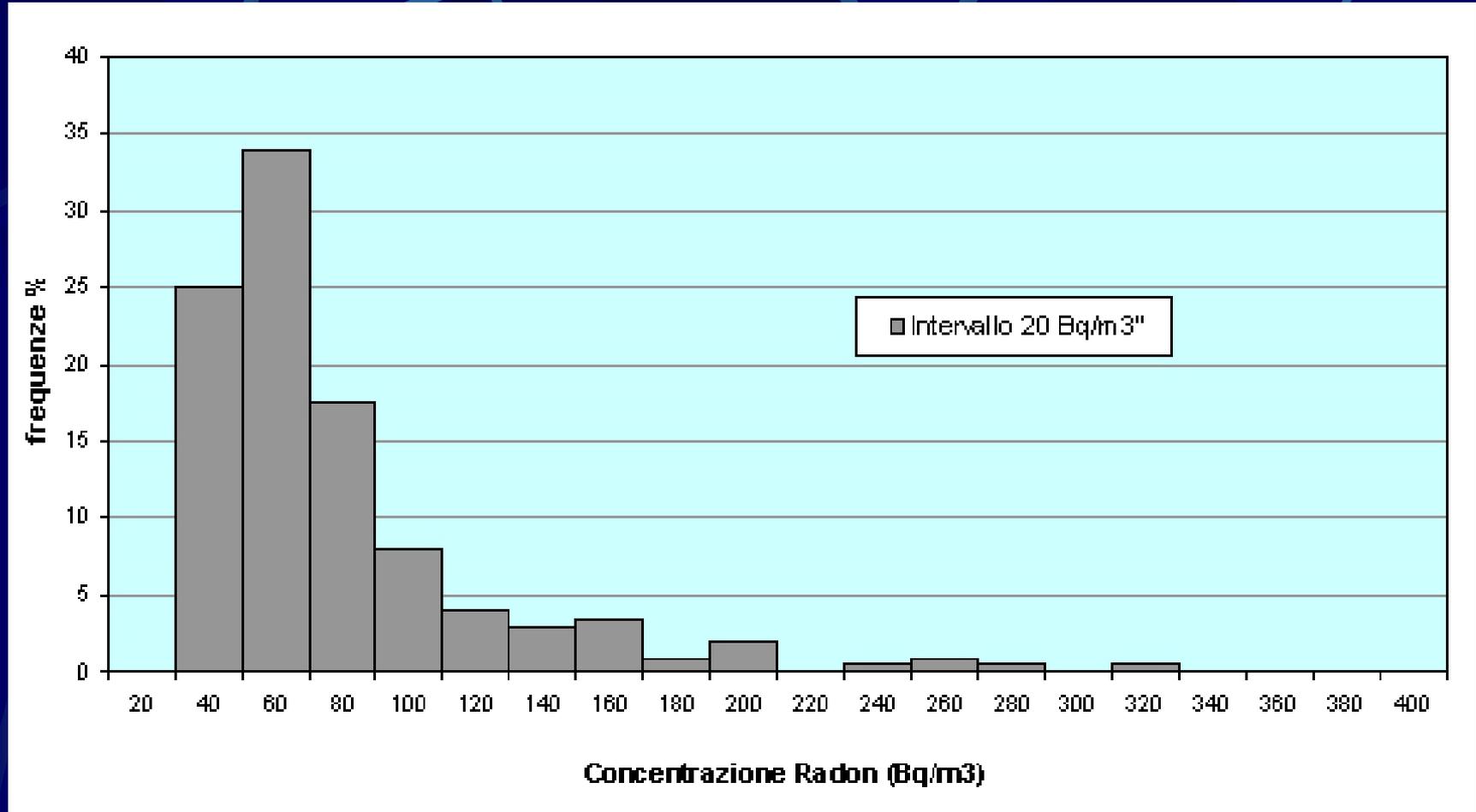
Il Radon in Piemonte (ARPA 2002)

RADON NELLE ABITAZIONI

○	0 - 100	Bq/m ³
●	100 - 200	Bq/m ³
●	200 - 400	Bq/m ³
●	> 400	Bq/m ³

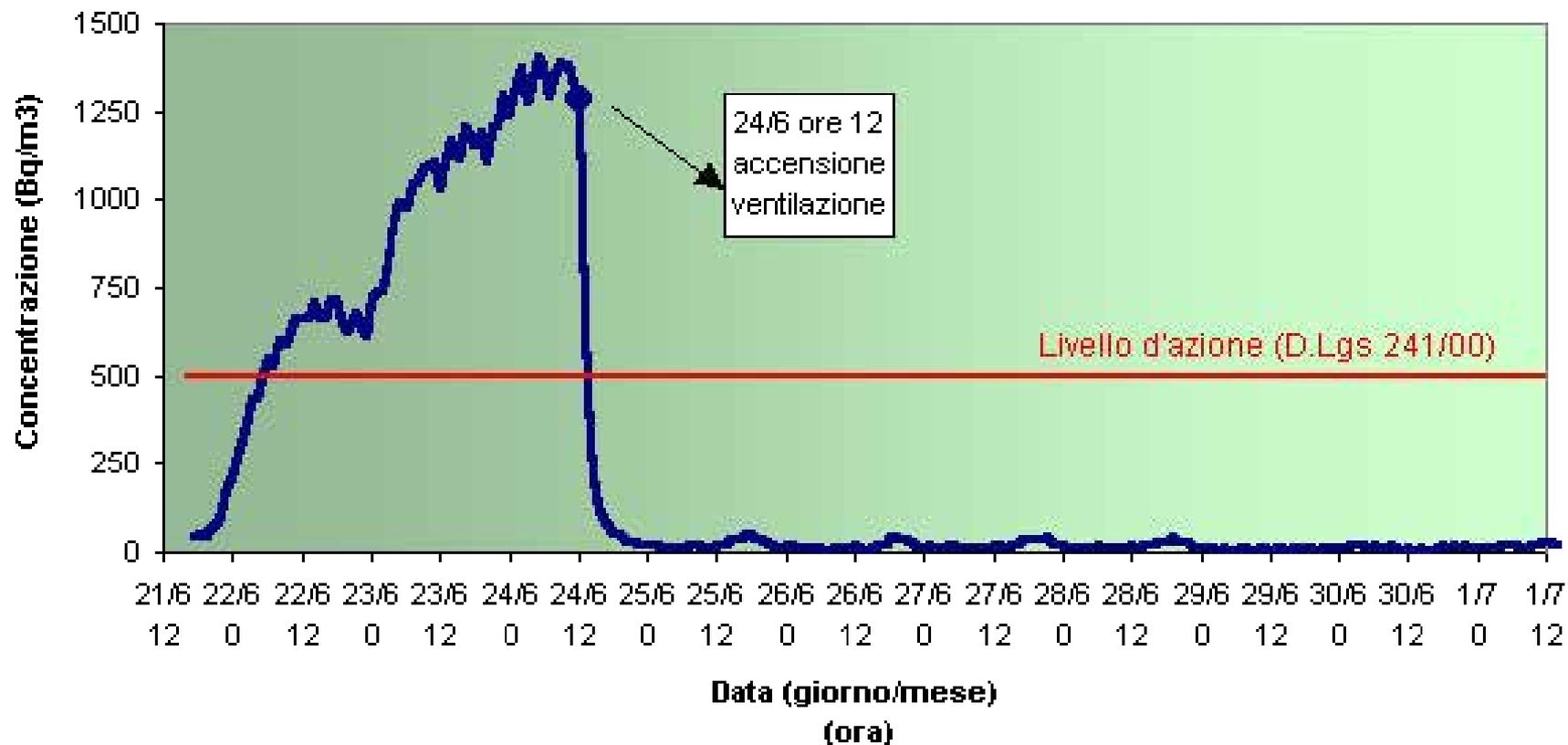


Il Radon in Piemonte (2002)



Rimedio al Radon

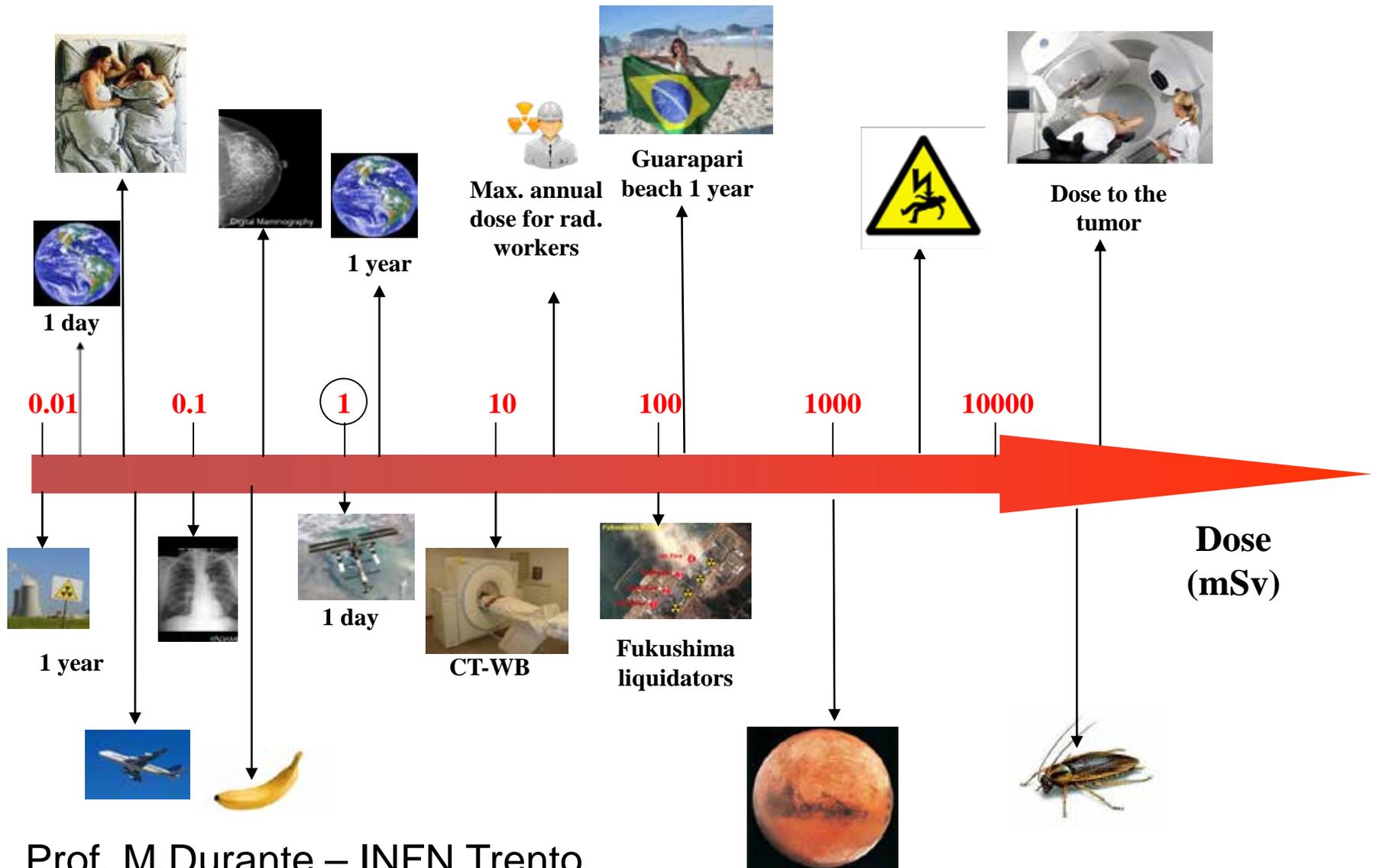
Azione di rimedio: ricambio d'aria + pressurizzazione



Radioattività artificiale

- Deriva principalmente da radionuclidi dispersi in atmosfera dai test nucleari degli anni '50-'60 e dall'incidente di Chernobyl ('86)
- In parte e' decaduta, la contaminazione e' presente principalmente in suoli e sedimenti
- Negli alimenti si misurano occasionalmente tracce di Cs^{137} nel latte e nella carne
- Dosi trascurabili rispetto a quelle mediche

Dose: quanta ?



- La radioattività
- I decadimenti α , β , γ
- La legge del decadimento radioattivo
- L'assorbimento della radiazione nella materia
- Origine dei nuclei radioattivi
- La radiazione nell'ambiente
- **Inquinamento radioattivo**

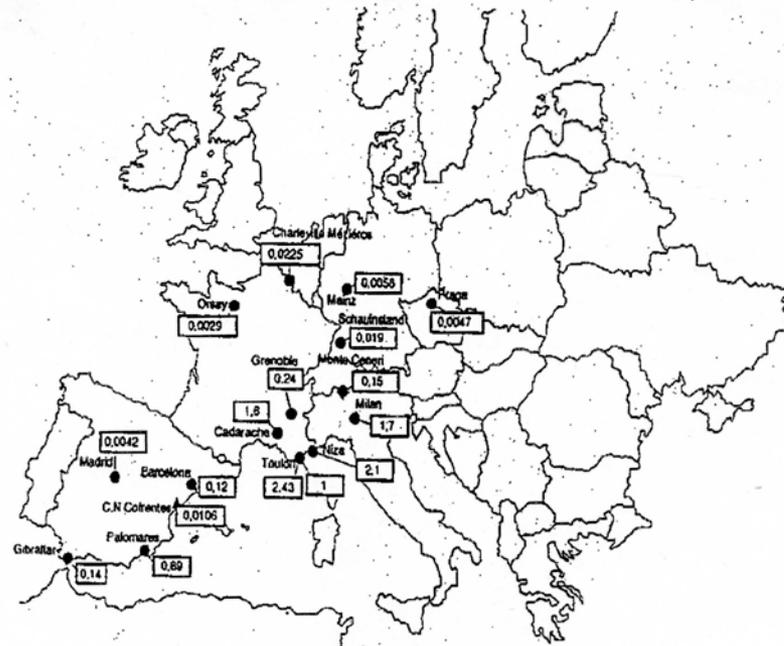
Problemi e incidenti

Attualmente derivano soprattutto dalla cattiva gestione, negligenza (anche criminale) degli operatori piuttosto che da deficienze tecniche.

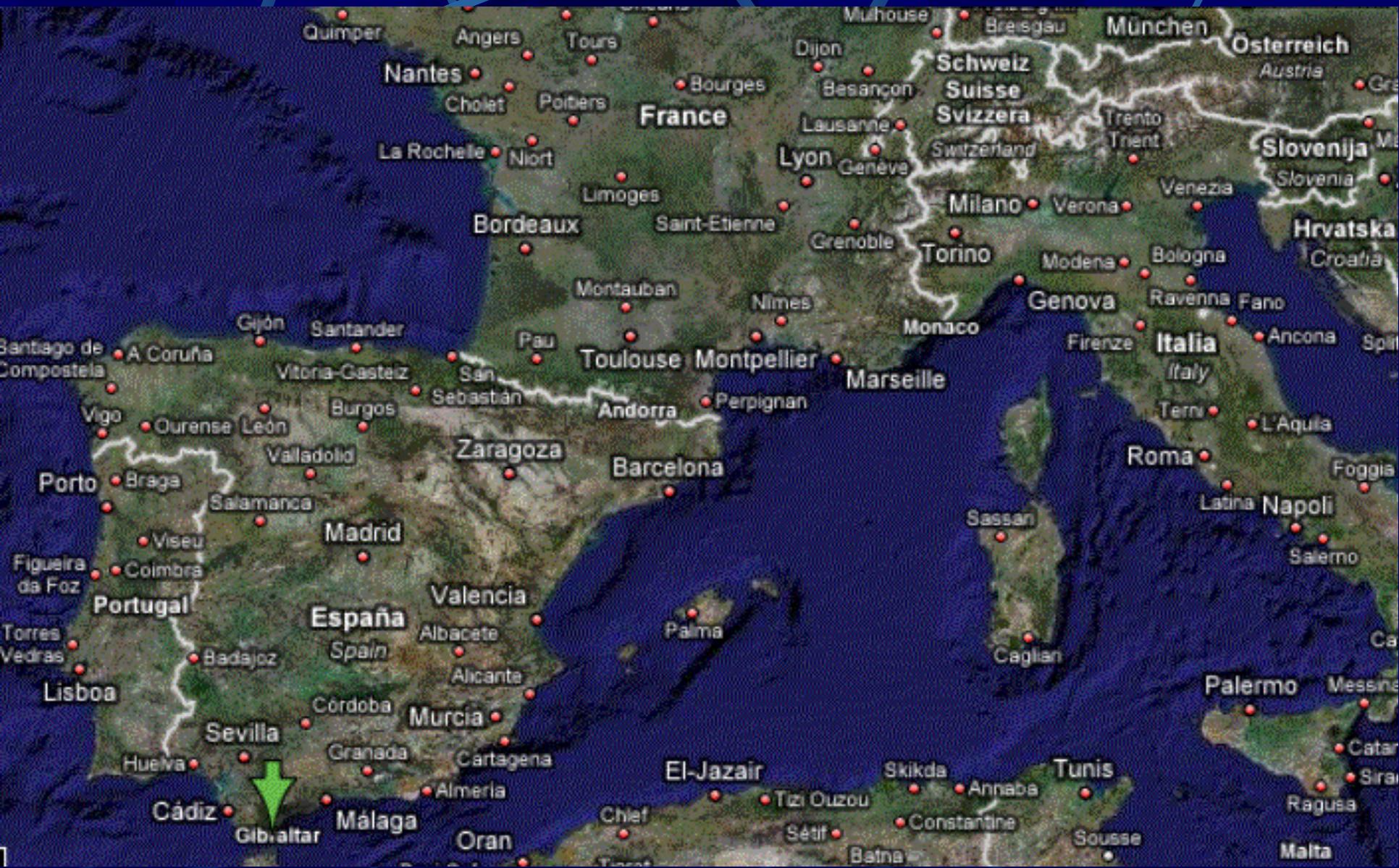
Algeciras (Spagna)
30 maggio 1998

- Fusione accidentale sorgente di ^{137}Cs di attività ignota (alcuni MBq)
- Motivi: sistema di controllo a portale dell'ingresso marittimo fuori servizio dal 25.5

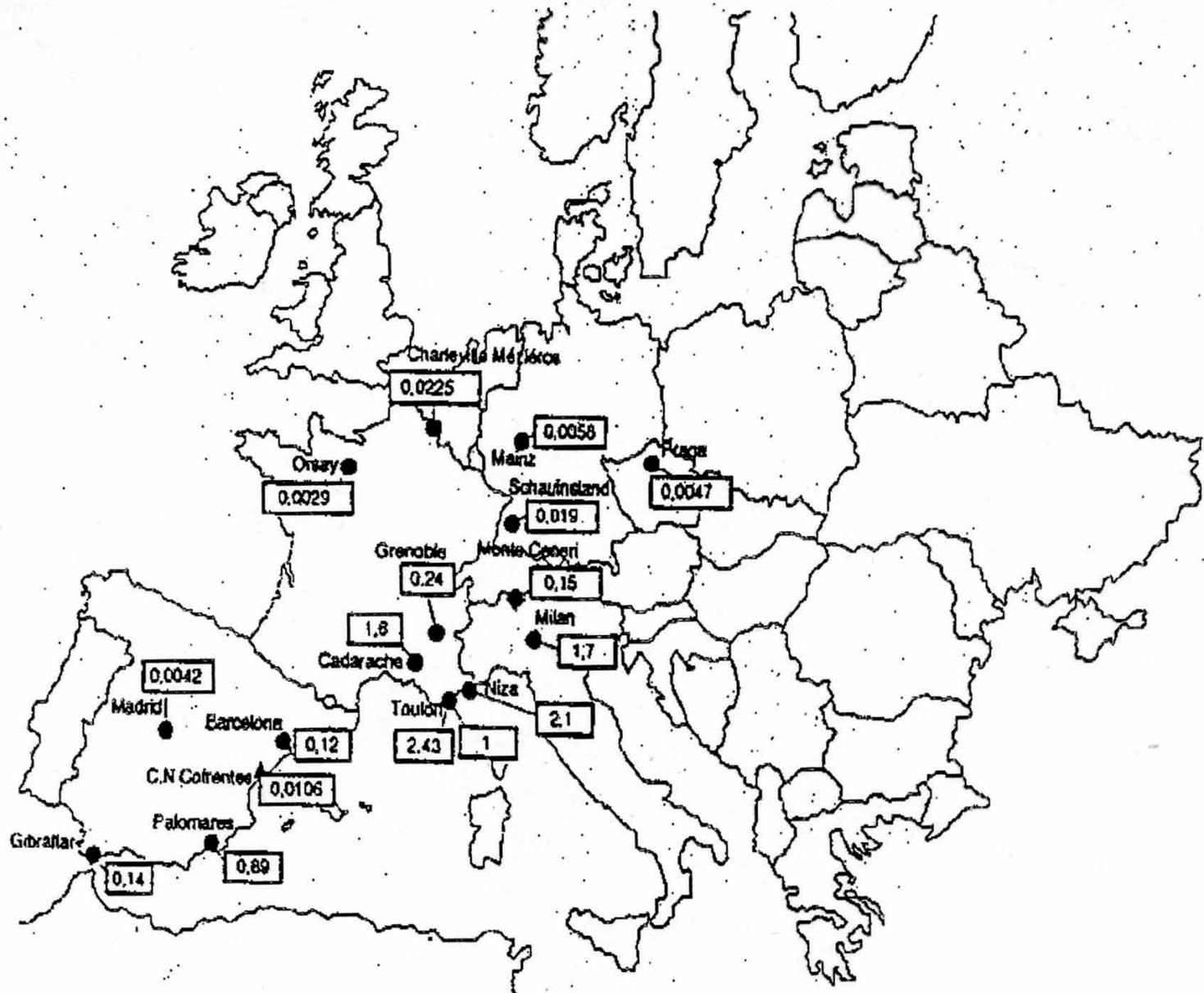
Valori di concentrazione ^{137}Cs in aria (mBq/cm^3)



Dov'e' Algeciras ?

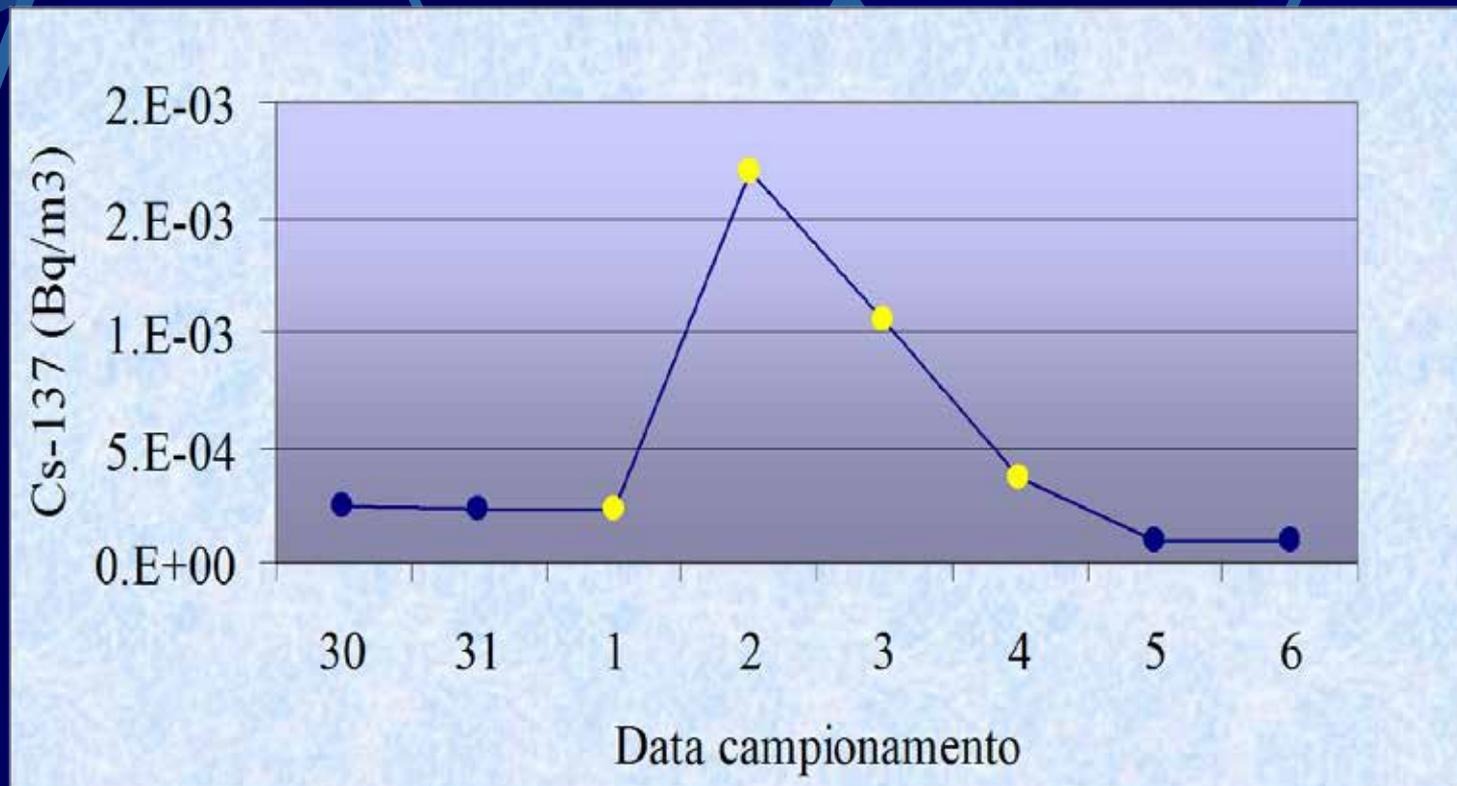


Valori di concentrazione ^{137}Cs in aria (mBq/cm^3)



L'incidente di Algeciras (fusione accidentale di una sorgente in Spagna)

Cs-137 nell'atmosfera a Torino: 30 maggio - 4 giugno 1998



M.Magnoni – ARPA Piemonte

And then there was ... Cernobil ...

(nessun problema ...sono fatti loro)



forse sono anche fatti nostri !

la Repubblica
 450
 Agenzie al vostro servizio
 Avvio 11 Numero 101 - L. 1000
 30 aprile 1986

In Urss il più grave disastro nucleare della storia, frenetiche consultazioni fra scienziati

Europa, allarme atomico

La centrale di Chernobyl brucia ancora: Mosca chiede aiuto

Fuga in massa da Kiev. I morti sono centinaia?

La paura dal cielo

La nube si muove...

L'inferno dei megawatt

La catastrofe di 30 anni fa

E state sabbato anche il "dono proterito" tra Tokyo e Osaka

Gli estremisti giapponesi in azione alla vigilia del vertice dei Sette

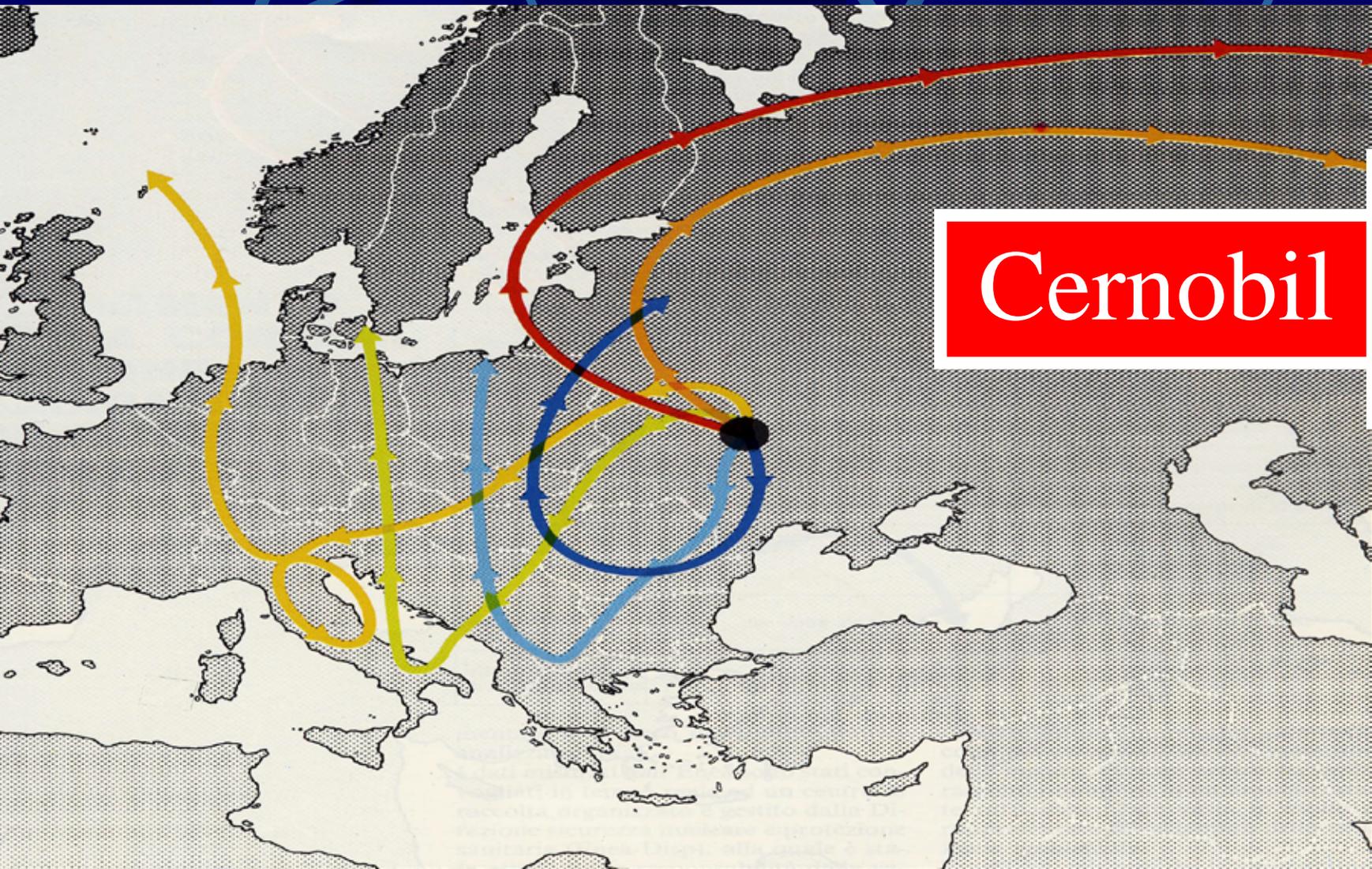
Me sul terrorismo la Uee si è divisa

Giorgio Candeforo

Televerifica Berlusconi protesta ma cederà "Rete 4"



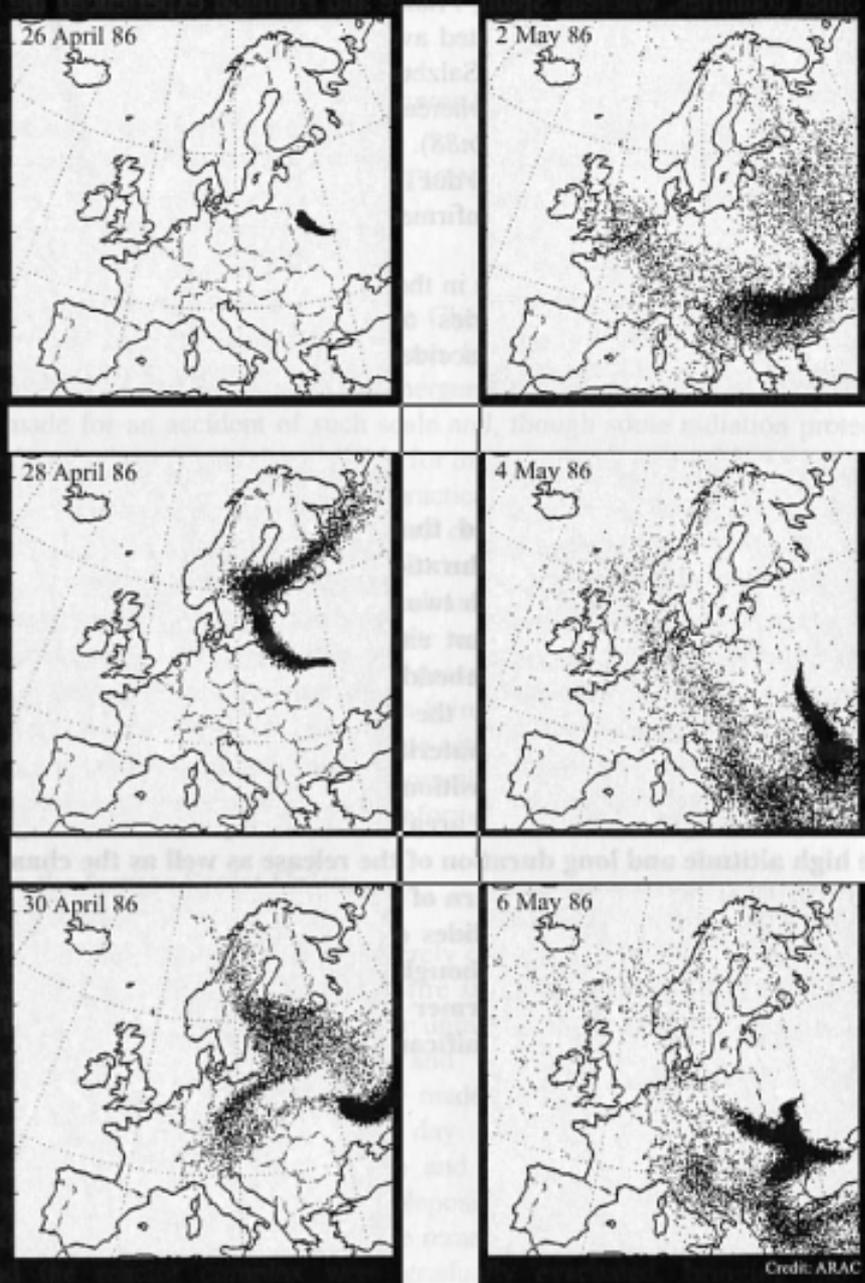
Cernobil (1)



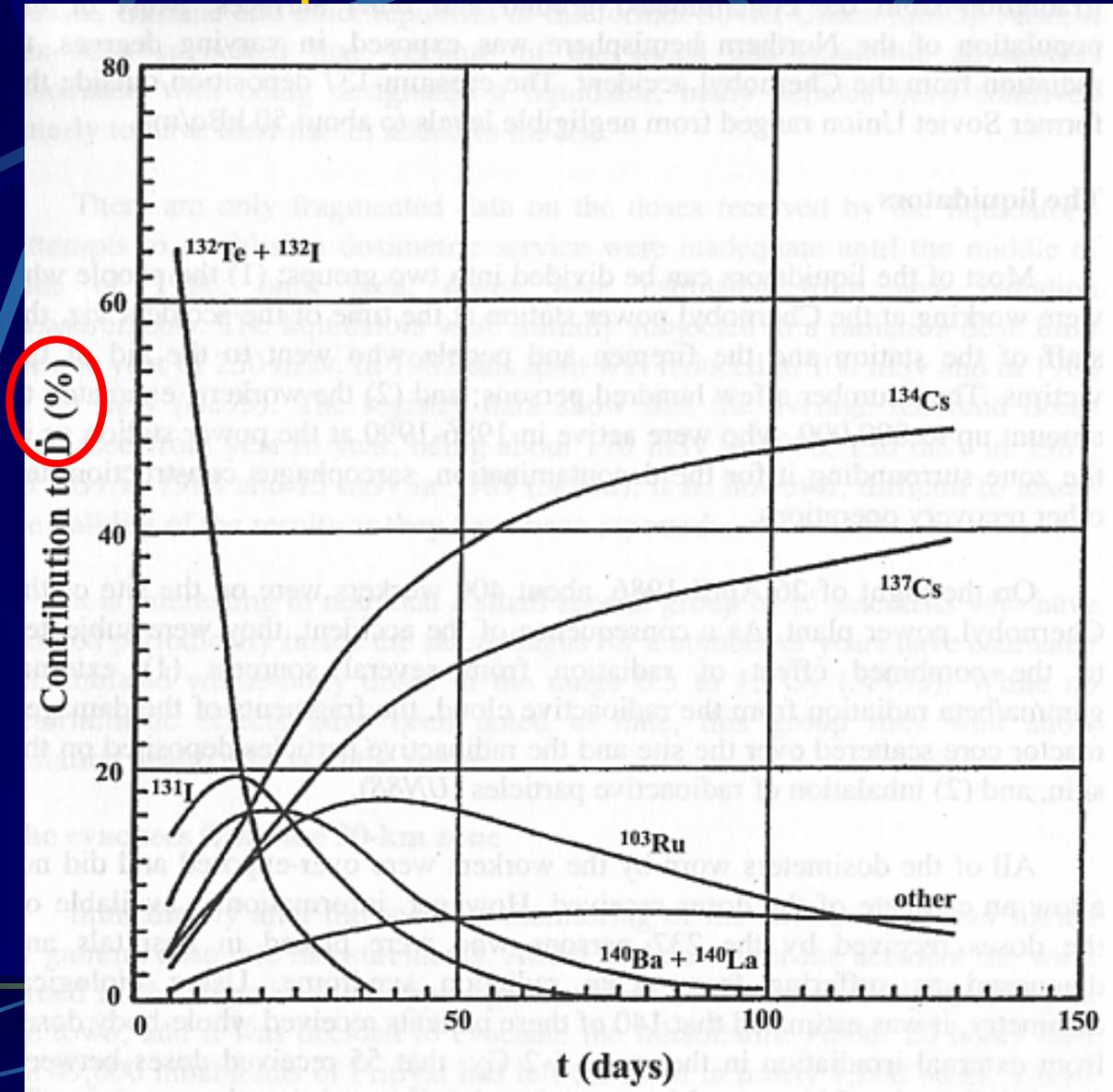
Cernobil

26/4
5/5
1986

Cernobil (2)



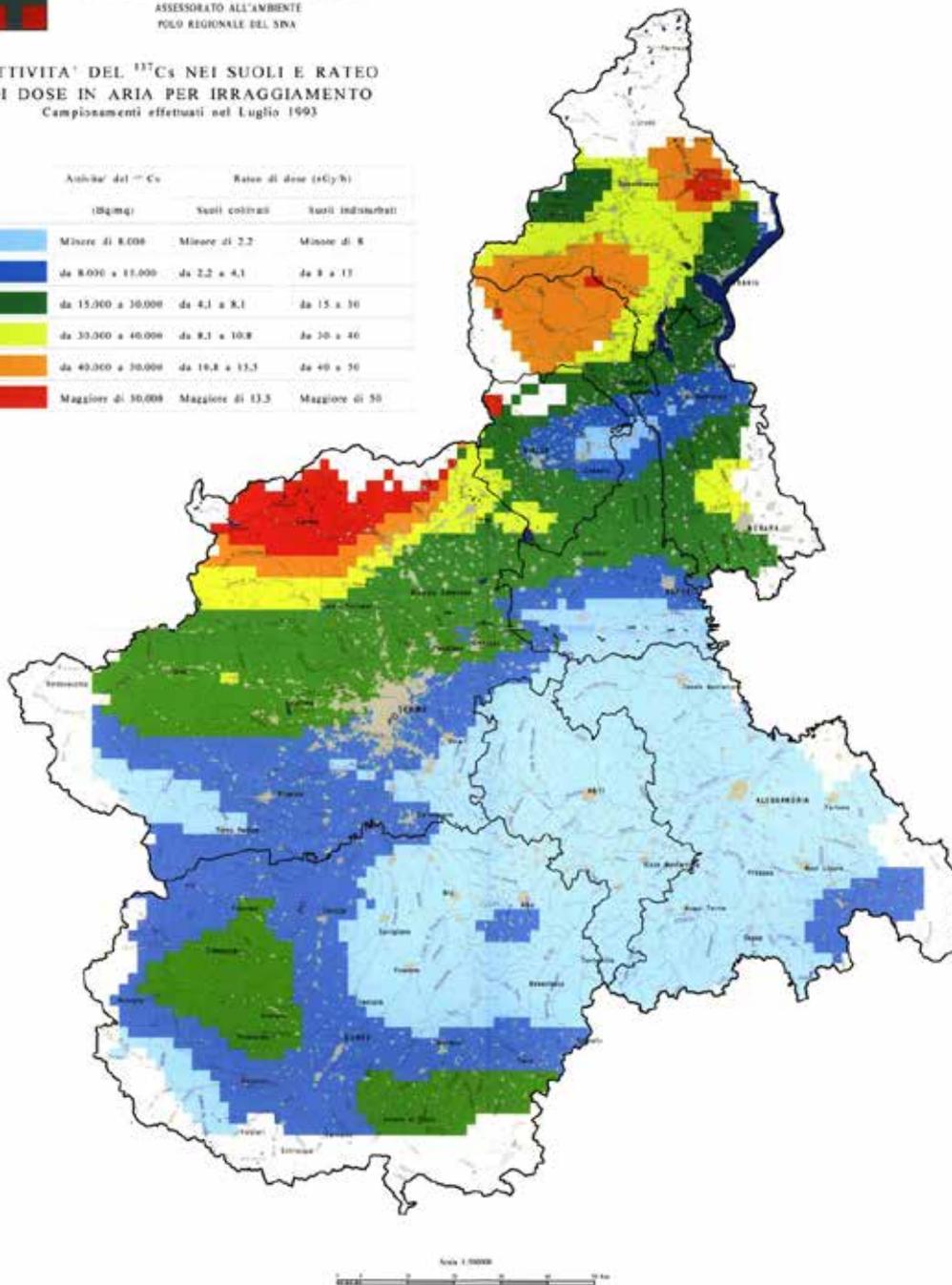
Cosa troviamo nell'aria dopo l'esplosione di Cernobil





ATTIVITA' DEL ¹³⁷Cs NEI SUOLI E RATEDI DOSE IN ARIA PER IRRAGGIAMENTO
Campionamenti effettuati nel Luglio 1993

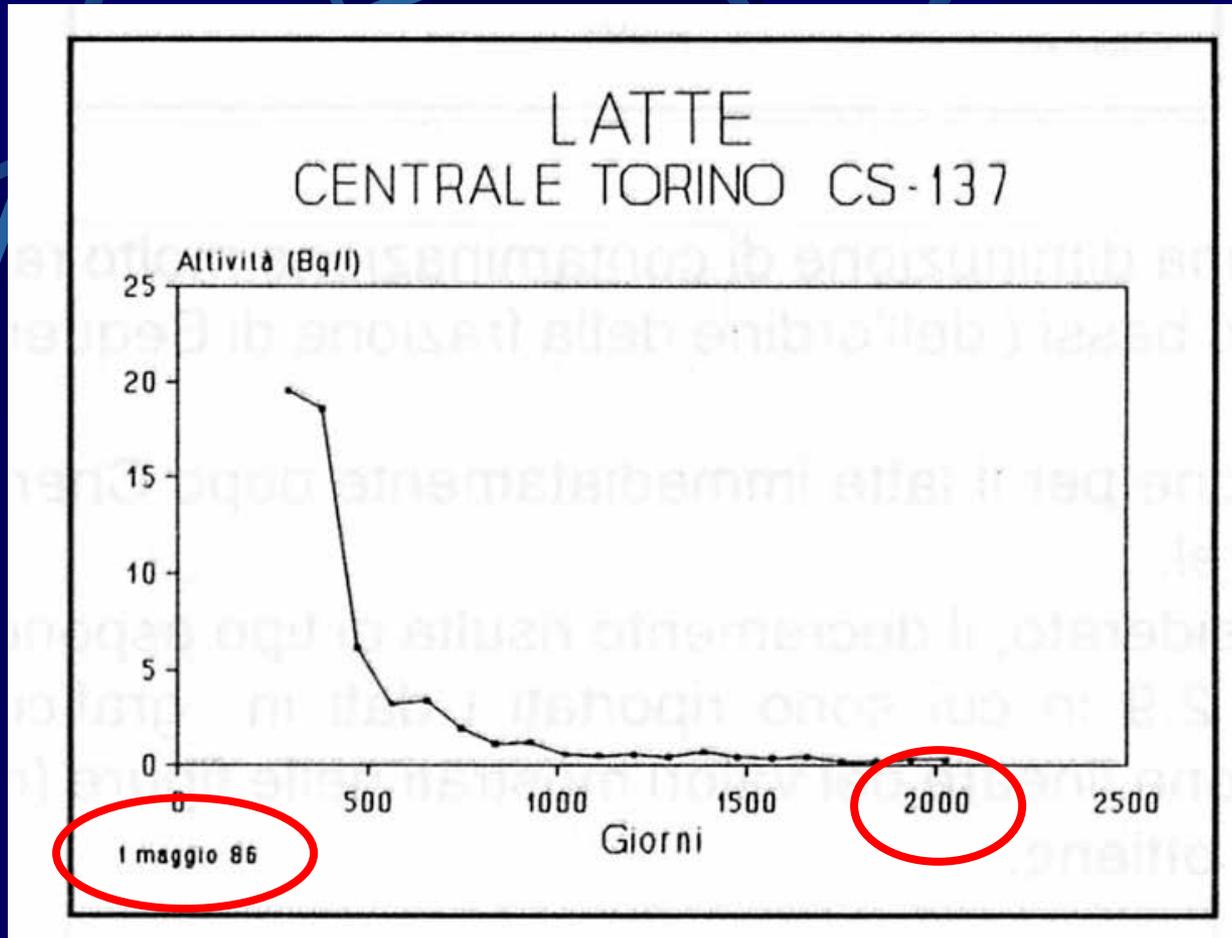
	Aktivita' del ¹³⁷ Cs	Rate di dose (H/y/h)	
	(Bq/mq)	Suoli coltivati	Suoli industriali
	Minore di 8.000	Minore di 2,2	Minore di 8
	da 8.000 a 11.000	da 2,2 a 4,1	da 8 a 13
	da 15.000 a 30.000	da 4,1 a 8,1	da 15 a 30
	da 33.000 a 40.000	da 8,1 a 10,8	da 30 a 40
	da 45.000 a 50.000	da 10,8 a 13,5	da 40 a 50
	Maggiore di 50.000	Maggiore di 13,5	Maggiore di 50



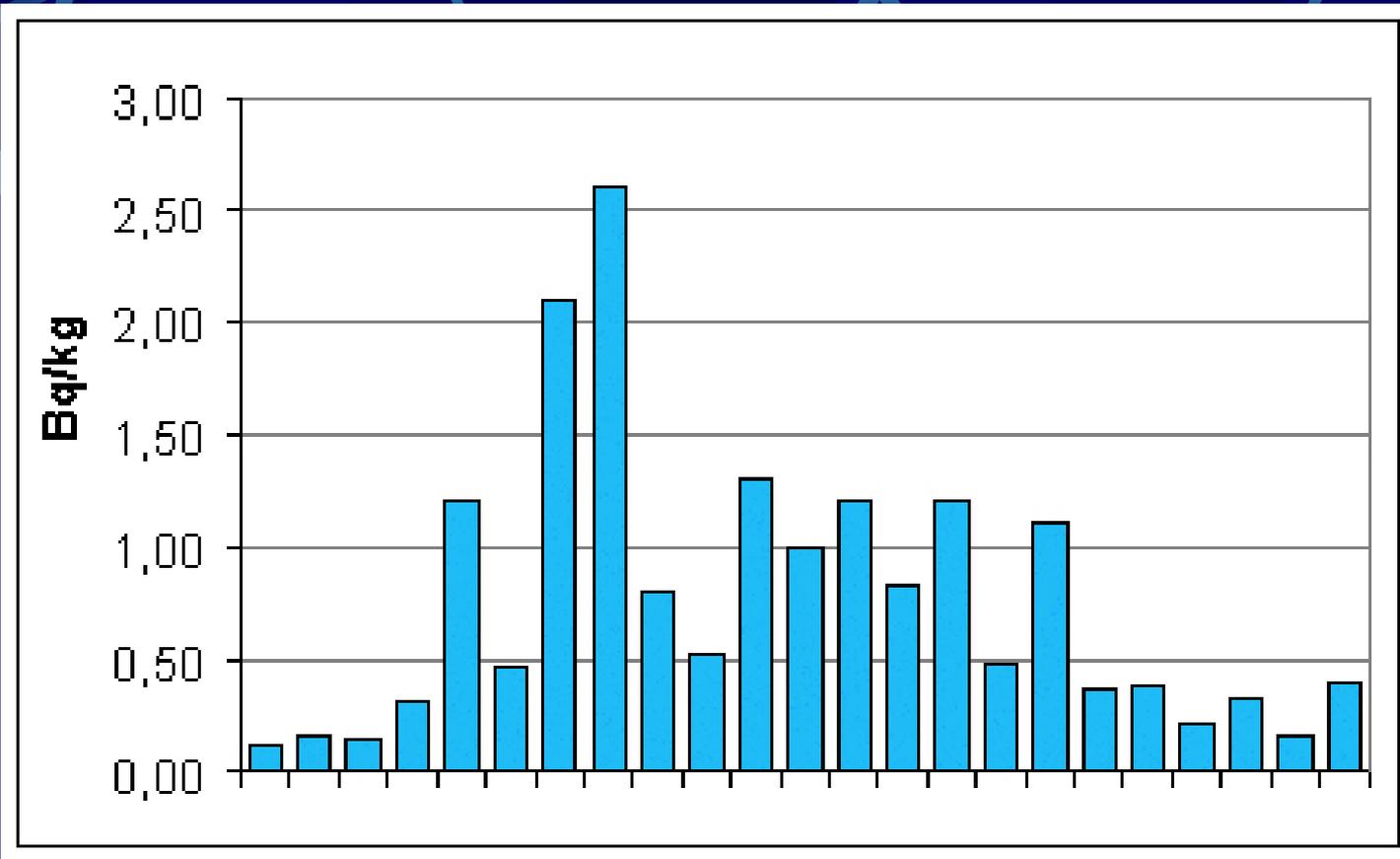
Il Cs-137 nei
suoli del
Piemonte

M.Magnoni –
ARPA Piemonte

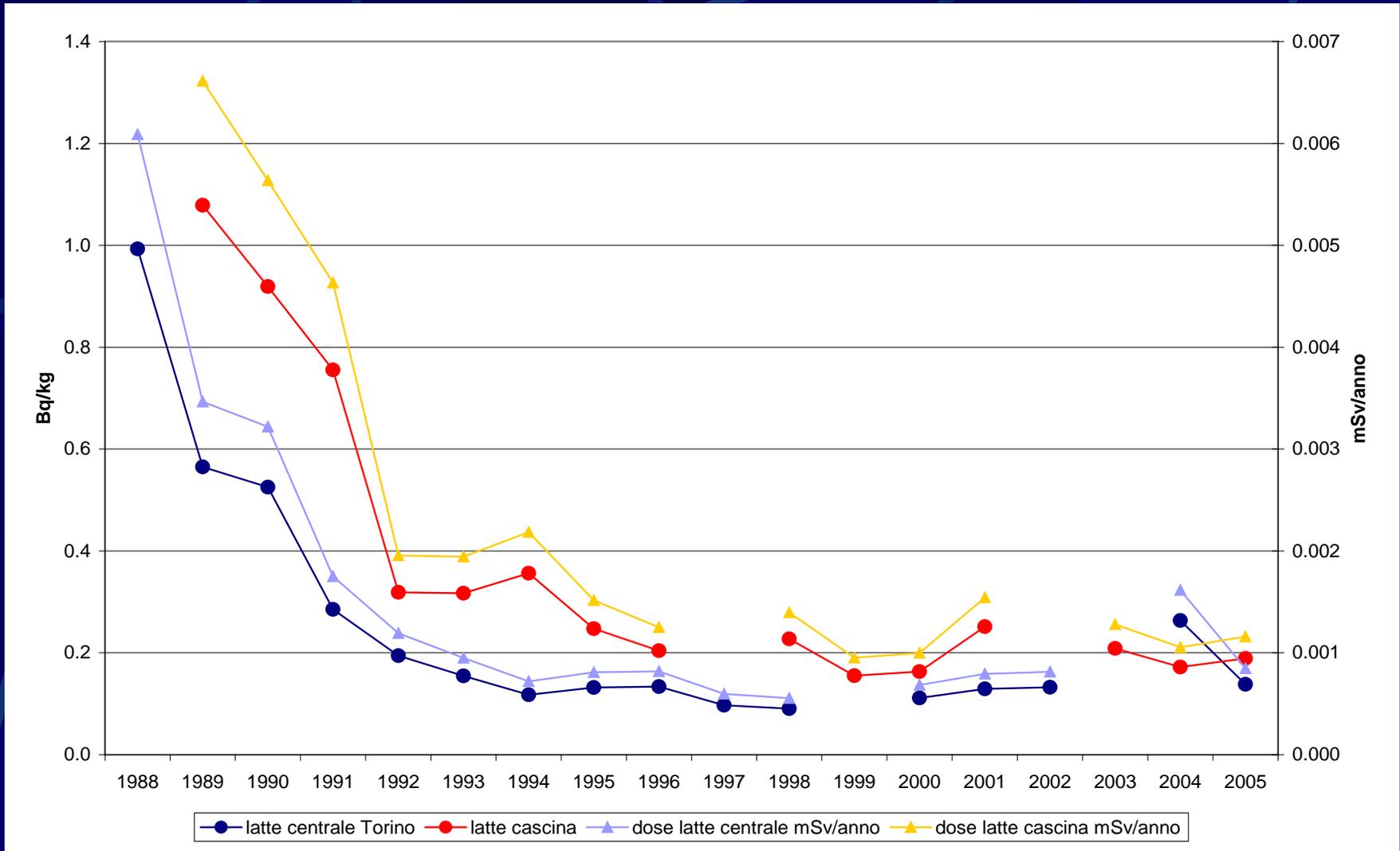
Il Cesio nel latte piemontese (1986)



Il Cesio nel latte piemontese (2002)

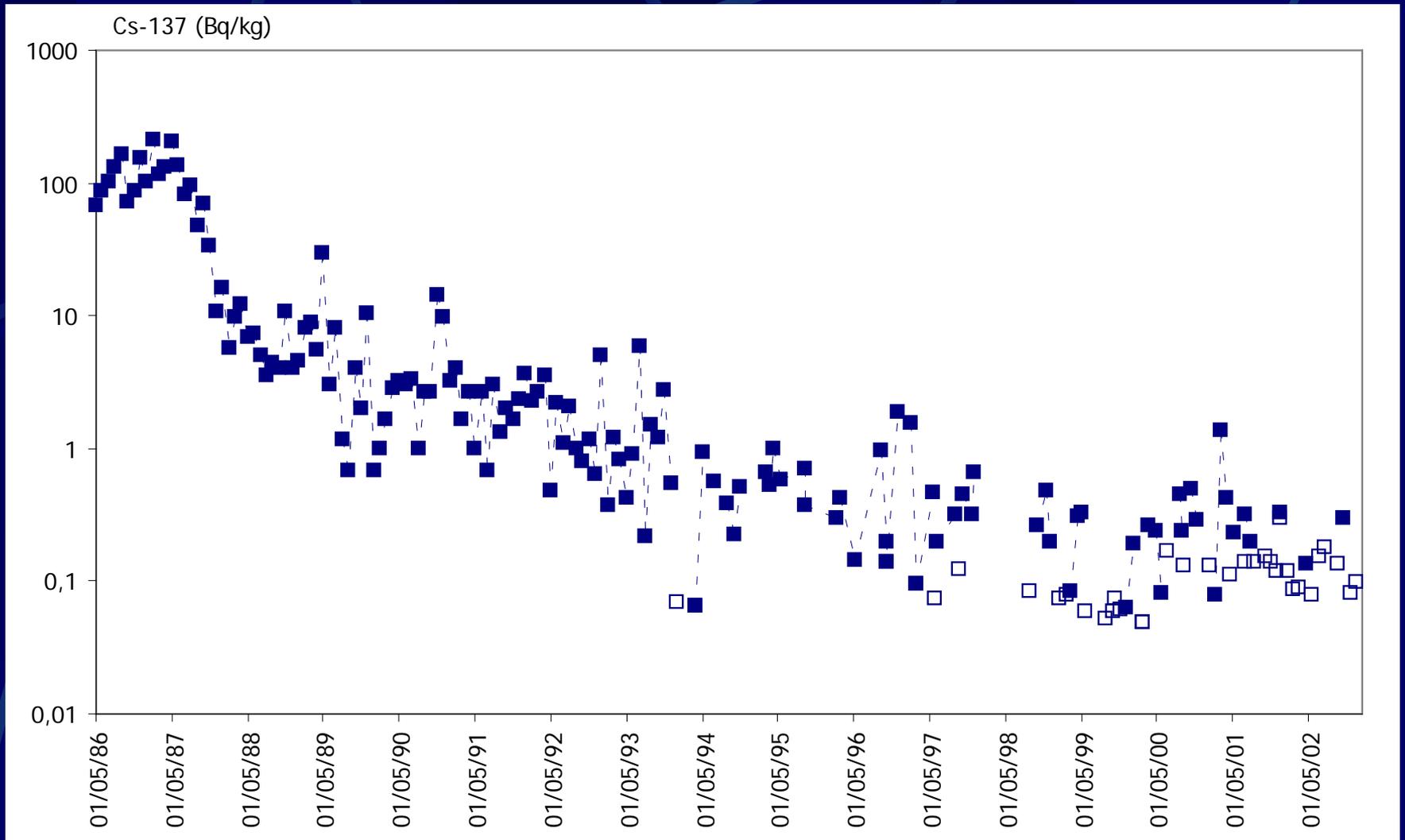


Il Cs-137 nel latte in Piemonte



M.Magnoni – ARPA Piemonte

Il Cs-137 nella carne bovina in Lombardia



M.Magnoni – ARPA Piemonte

Giappone, marzo 2011



Report sulla Centrale di Fukushima della IAEA

24 marzo 2011



	Severe condition
	Concern
	No immediate concern

Unit	1	2	3	4
Power (MWe /MWth)	460/1380	784/2381	784/2381	784/2381
Type of Reactor	BWR-3	BWR-4	BWR-4	BWR-4
Status at time of EQ	In service – auto shutdown	In service – auto shutdown	In service – auto shutdown	Outage
Core and fuel integrity	Damaged	Damaged	Damaged	No fuel in the Reactor
RPV & RCS integrity	<u>RPV temperature decreasing (243°C)</u>	<u>RPV temperature stable (about 102°C)</u>	<u>RPV temperature decreasing (about 185°C)</u>	Not applicable due to outage plant status
Containment integrity	No information	Damage suspected	No information	
AC Power	Power to instrumentation	AC power available – power to instrumentation	Not available (MCR lighting is on but no equipment or instruments)	
Building	Severe damage	Slight damage	Severe damage	Severe damage
Water level of RPV	Around half of Fuel is shown uncovered (Stable)	Around half of Fuel is uncovered (Stable)	Around half of Fuel is uncovered (Stable)	Not applicable due to outage plant status
Pressure of RPV	<u>Slowly increasing</u>	Unreliable Readings	Stable	
CV Pressure Drywell	<u>Slowly increasing</u>	Stable	Stable	
Water injection to RPV	<u>Seawater injection slightly decreased</u>	Seawater	Seawater	
Water injection to CV	No information	No information	No information	
Spent Fuel Pool Status	No spraying reported	<u>Water added through cooling line</u>	Periodic spraying	Periodic spraying

Unit	5	6
Power	784/2381	1100/3293
Type of Reactor	BWR-4	BWR-5
Status at the EQ occurred	Outage	Outage
Core and Fuel	<p>Cold Shutdown Being maintained using off-site electrical power and existing plant equipment.</p>	<p>Cold Shutdown Being maintained using off-site electrical power and existing plant equipment.</p>
RPV & RCS integrity		
Containment int.		
AC Power		
Building		
Water level of RPV		
Pressure of RPV		
Containment Pressure		
Water injection to RPV		
Water injection to CV		
Spent Fuel Pool Status		

- EQ: EarthQuake
- RPV: Reactor Pressure Vessel
- RCS: Reaction Control System
- CV: Containment Vessel

- A vessel from the Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) collected **water samples** at several points **30 kilometres from the coastline** and found **measurable concentrations of iodine-131 and cesium-137**. The **iodine concentrations were at or above Japanese regulatory limits**, and the **cesium levels were well below** those limits.
- Japanese authorities today reported that **three workers** at the Fukushima Daiichi nuclear power plant were exposed to elevated levels of radiation. The three were working in the turbine building of reactor Unit 3 and have received a **radiation dose in the range of 170-180 millisieverts**.
- **Two** of the **workers** have been hospitalized for treatment of **severely contaminated feet**, which may have suffered radiation burns. The workers had been working for about three hours in contact with contaminated water.

Tabella 2 Risultati analisi in spettrometria gamma nel particolato atmosferico nella giornata del 23 marzo 2011

Concentrazione Bq/m ³	Punto di campionamento Ivrea	Punto di campionamento Vercelli
1131	<4,91E-04	<2,07E-03
Cs137	<5,16E-04	<2,59E-03

LEGENDA

In tabella 1 sono riportati i dati del rateo di dose gamma, espressi nell'unità di misura nSv/h (nanoSievert/ora). Il rateo di dose gamma è una misura dell'energia complessivamente rilasciata alla materia dagli elementi radioattivi.

In tabella 2 sono riportati i risultati relativi ad alcuni tra i più tipici radionuclidi (elementi radioattivi) che si producono nei reattori nucleari. L'unità di misura è il Bq/m³ (Becquerel al metro cubo) e indica la quantità di tali elementi radioattivi presenti in atmosfera. I risultati riportati in tabella 2, preceduti dal segno <, rappresentano la sensibilità della misura, **cioè indicano l'assenza di tali radionuclidi.**

La misura dell'Uranio (1)

- $T_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4.5 \cdot 10^9$ anni
- $T_{1/2}(^{235}\text{U}) = 7.0 \cdot 10^8$ anni

^{235}U

$E_g(\text{keV})$	Branching ratio(%)
143.8	11
185.7	57

^{238}U

$E_g(\text{keV})$	Branching ratio(%)
49.6	0.07

quindi con il 238 ho problemi a causa della debolezza della riga

La misura dell'Uranio (2)

Sfrutto il ^{234}Th , in equilibrio secolare con ^{238}U dopo ~ 150 giorni ($T_{1/2}=24$ giorni)

^{234}Th

$E_g(\text{keV})$	Branching ratio(%)
63.3	3.8
92.4	2.7

§ notare le energie molto basse

§ se devo fare la misura in matrice ad alta densita' rispetto all'acqua (che e' la densita' del Marinelli di calibrazione) posso usare

$^{234}\text{Pa}^m$

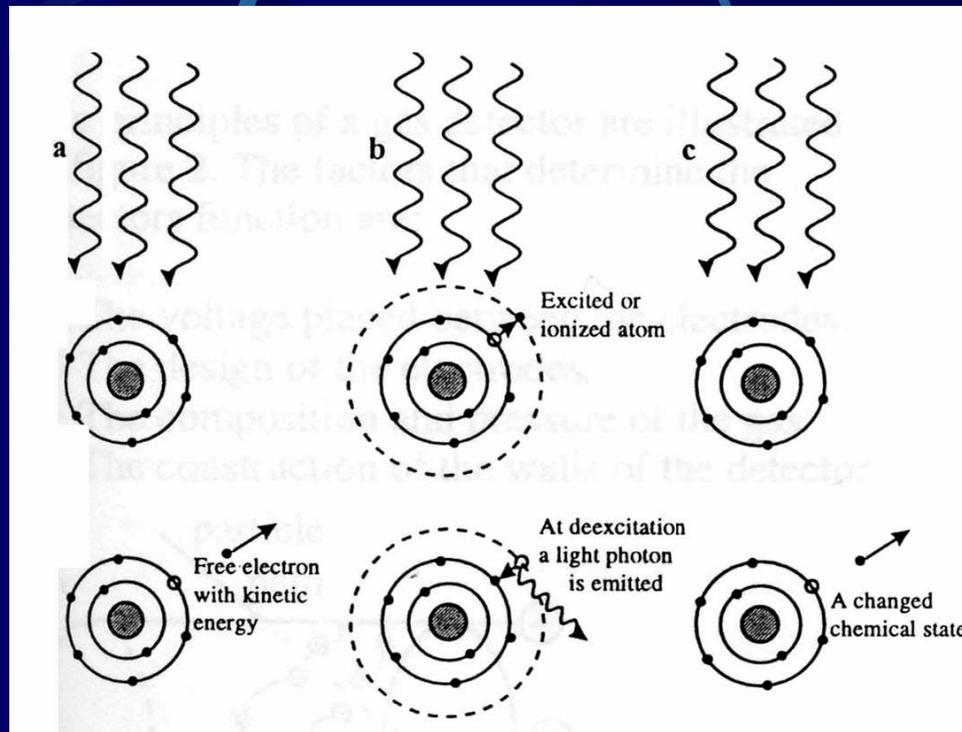
$E_g(\text{keV})$	B.R.
766	0.21
1001	0.59

● **I rivelatori di radiazione γ**

- I rivelatori al Germanio iperpuro
- La catena elettronica
- L'analisi dati di un rivelatore al Germanio iperpuro
- I rivelatori di radiazione α

Strumentazione e tecniche per la misura della radioattività

Processi che avvengono nell'interazione radiazione ionizzante con la materia:



- a.** produzione di **elettroni liberi** e **ioni**, che possono essere fatti migrare lungo un campo elettrico e raccolti
- b.** per ionizzazione o eccitazione si produce una **lacuna** che viene riempita da un elettrone con **rilascio un fotone** di energia pari a quella di legame che puo' essere nel visibile
- c.** una **ionizzazione permanente** induce un **cambiamento dello stato chimico** della sostanza che puo' essere misurato chimicamente

Metodi di rivelazione

Conteggi di

Elettroni e ioni con rivelatori a gas
Elettroni e lacune con semiconduttori

Fotoni (luce visibile) con scintillatori +
fotomoltiplicatori

Specie chimiche alterate in materiali liquidi
o solidi

Interazione g- rivelatore

- Un fotone che incide su un rivelatore puo' interagire in 3 modi:

1. effetto fotoelettrico
2. effetto Compton
3. produzione di coppie



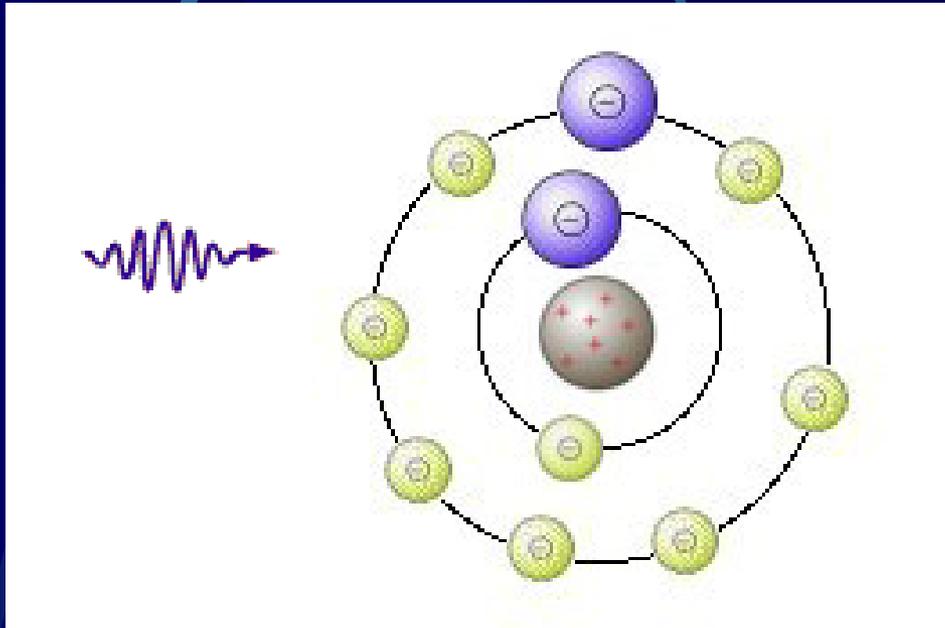
■ Il rivelatore *vede* solo i **prodotti** elettricamente carichi di queste interazioniâ elettroni

■ Gli elettroni **ionizzano**, creando coppie e/lacuna



Effetto fotoelettrico

- Il fotone interagisce con un elettrone delle orbite piu' interne la cui energia di legame E_b e' inferiore di quella del fotone $h\nu$. Il fotone e' assorbito e viene emesso un elettrone.

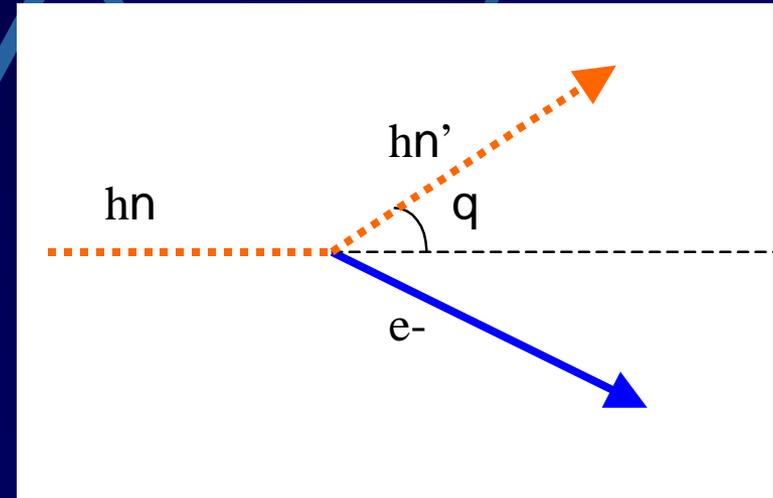
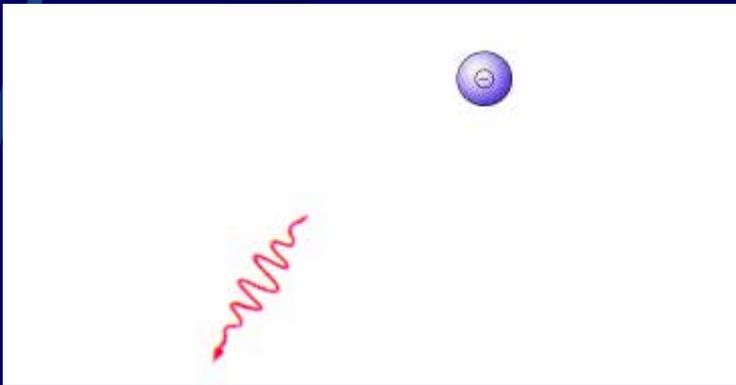
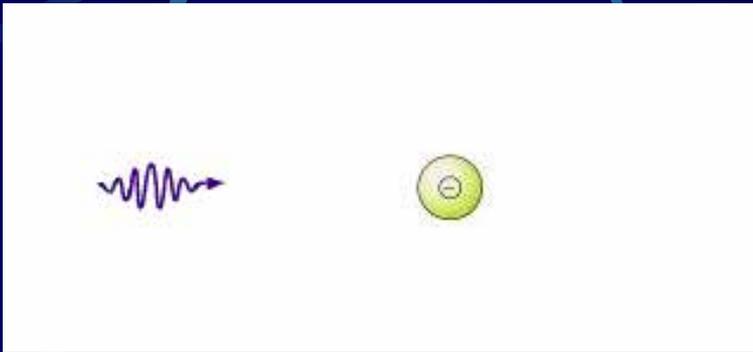


$$E_{pe} = h\nu - E_b$$



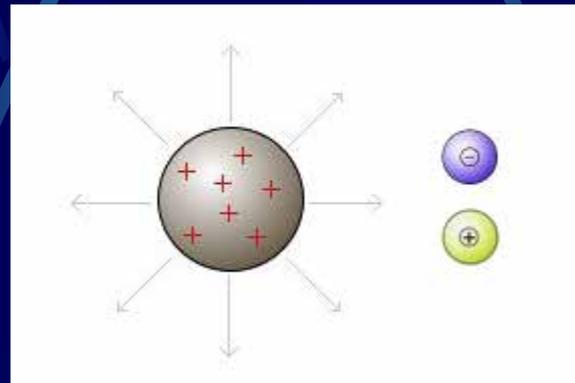
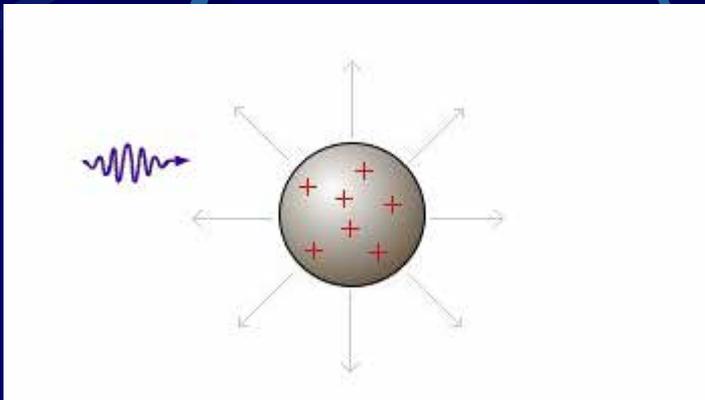
Effetto Compton

- Il fotone urta elasticamente un elettrone la cui energia di legame E_b è molto inferiore all'energia del fotone hn trasferendogli parte della sua energia.



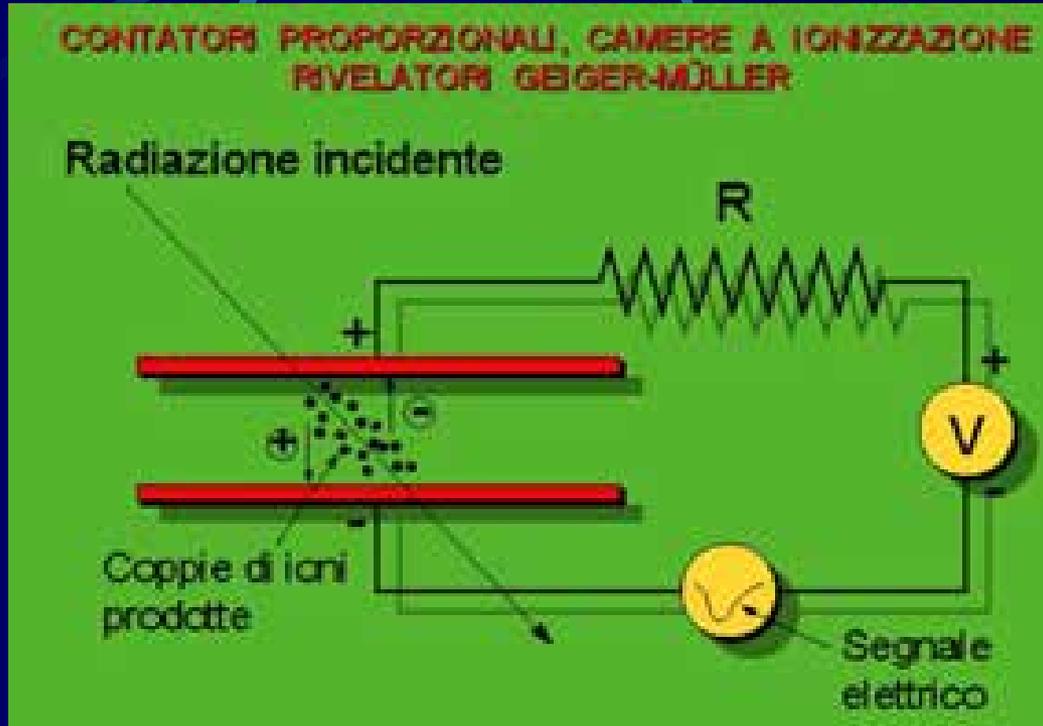
Produzione di coppie

- Il fotone di energia $h\nu > 2m_e$ (1.022 MeV) passa nelle vicinanze di un nucleo e si converte in una coppia e^+e^- .



Rivelatori a gas (ad esempio, camera a ionizzazione)

Fattori che determinano il funzionamento:



Ø tensione tra gli elettrodi

Ø geometria degli elettrodi

Ø composizione e pressione
del gas

Rivelatori a semiconduttore (1)

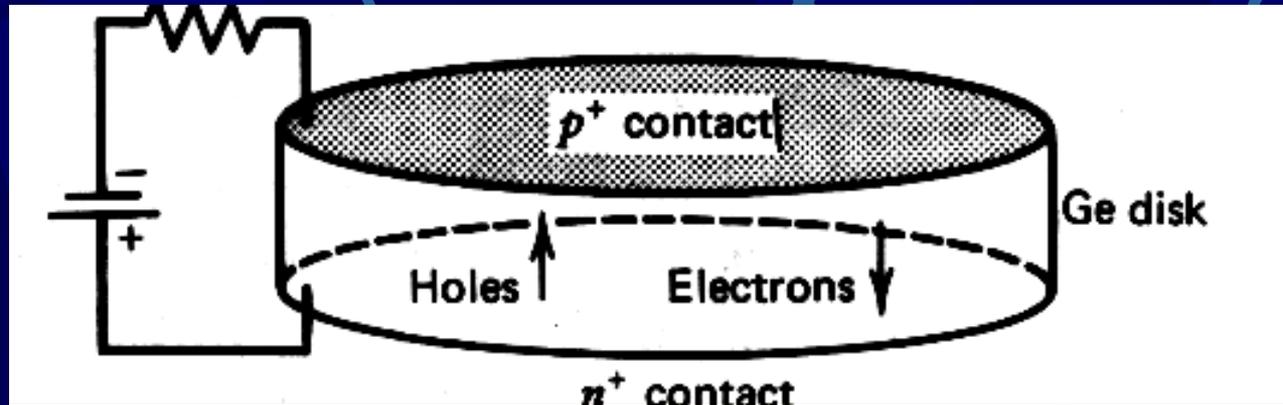
- Funzionano come una camera a ionizzazione a stato solido: la radiazione ionizzante interagisce con il volume sensibile del rivelatore e produce elettroni di ionizzazione e lacune → segnale elettrico
- Energia di ionizzazione media: **3.5 eV** < energia di ionizzazione del gas 35 eV → a parità di energia rilasciata avrò più cariche rilasciate → migliore precisione

Rivelatori a semiconduttore (2)

- Si e Ge hanno 4 elettroni di valenza. Nel cristallo gli atomi sono disposti su un reticolo e uniti da legami di **covalenza**
- L'assorbimento dell'energia della radiazione provoca la rottura dei legami con la creazione di **coppie elettrone - lacuna**
- Elettroni e lacune si muovono liberamente nel cristallo
- Connettendo il semiconduttore in un **circuito** si misurerà una corrente ai suoi capi

- I rivelatori di radiazione γ
- **I rivelatori al Germanio iperpuro**
- La catena elettronica
- L'analisi dati di un rivelatore al Germanio iperpuro
- I rivelatori di radiazione α

Rivelatore al Germanio Configurazione planare



- Geometria planare
- Ogni faccia ha un contatto
- Contatti ottenuti con drogaggio p^+ (n^+), con procedure di diffusione o impiantazione ionica

Rivelatore al Germanio

Geometria coassiale

- Gli elettrodi sono la superficie esterna e l'asse del cilindro

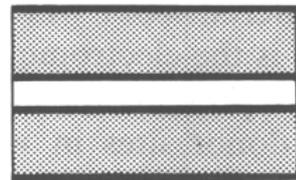


- Ottengo volumi sensibili di 1000 cm^3
- Posso anche avere una geometria a pozzo (*well*), che permette di inserire la sorgente dentro il rivelatore

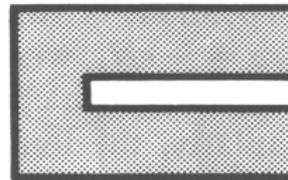
â 4p



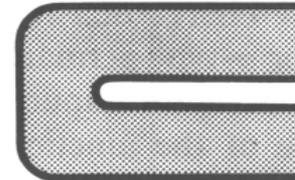
Rivelatore al Germanio Geometria coassiale



True coaxial

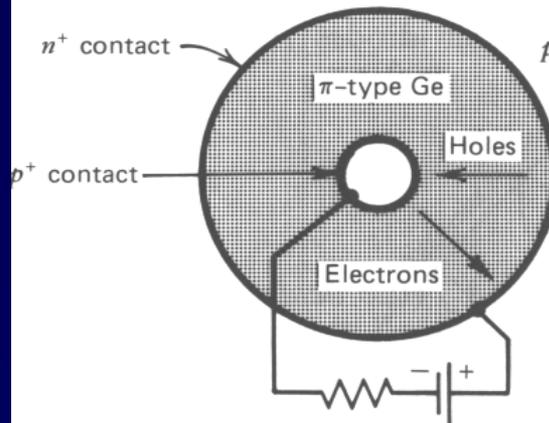


Closed-ended coaxial

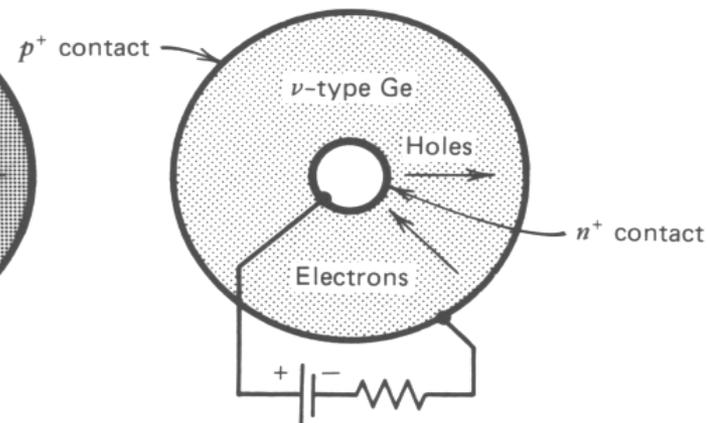


Closed-ended coaxial
(bulletized)

— represents electrical contact surface



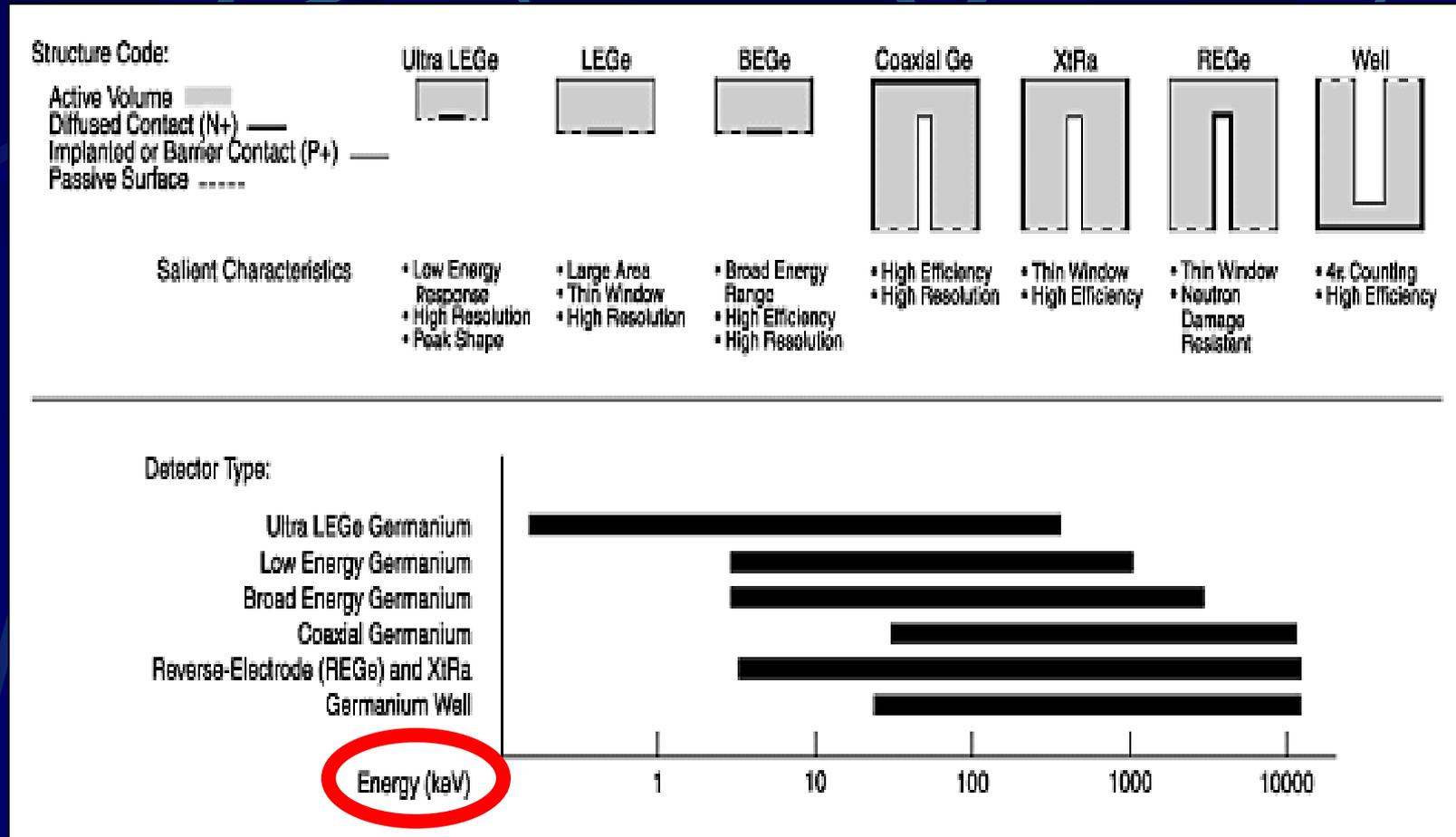
p-type coaxial



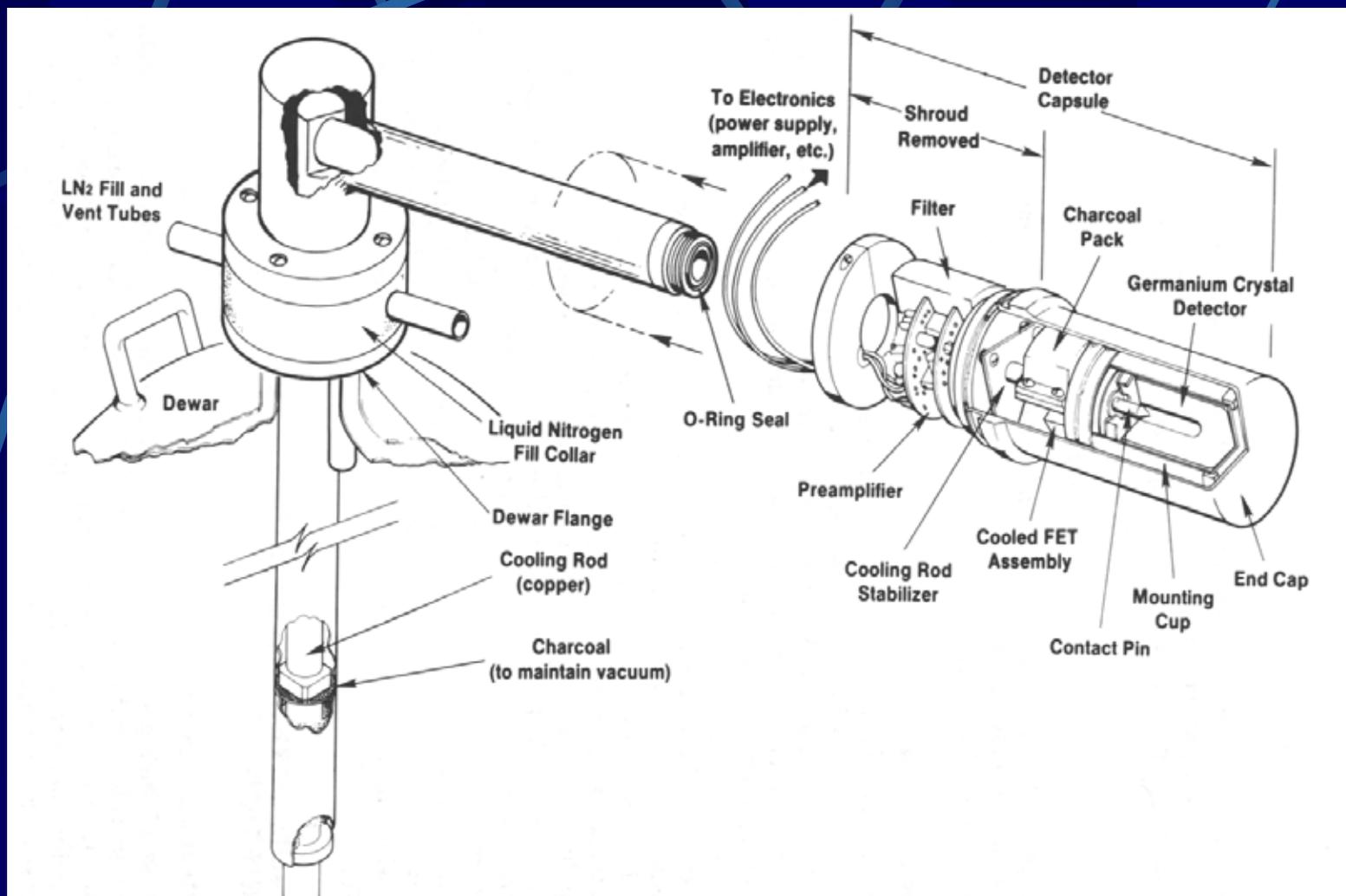
n-type coaxial



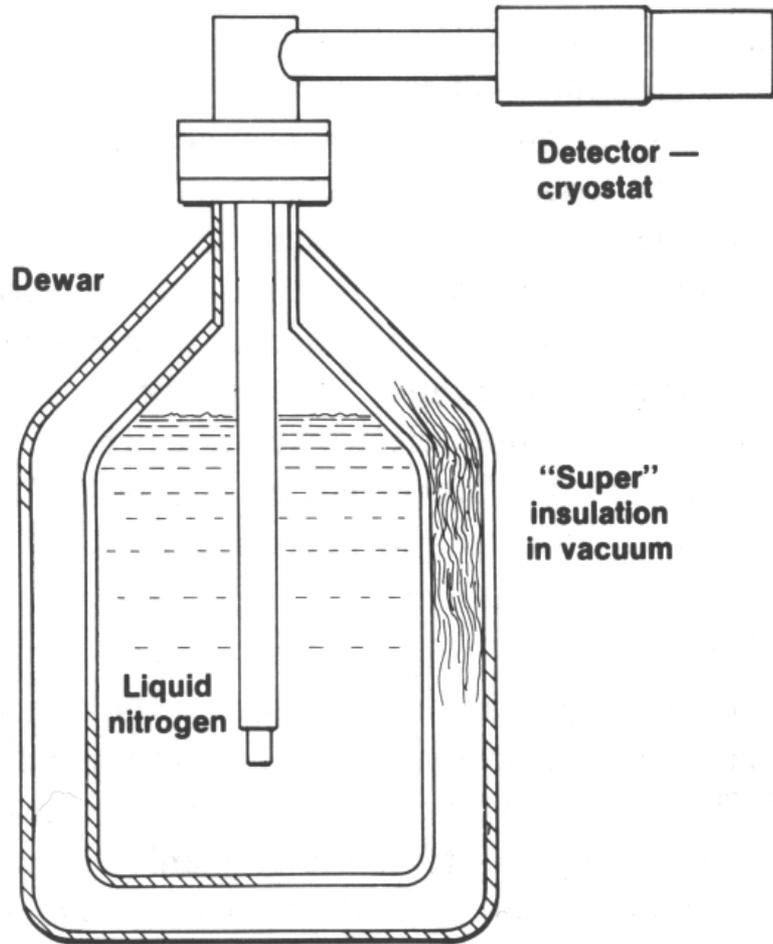
Geometria coassiale: confronto tra vari rivelatori HPGe



Rivelatore al Germanio e criostato



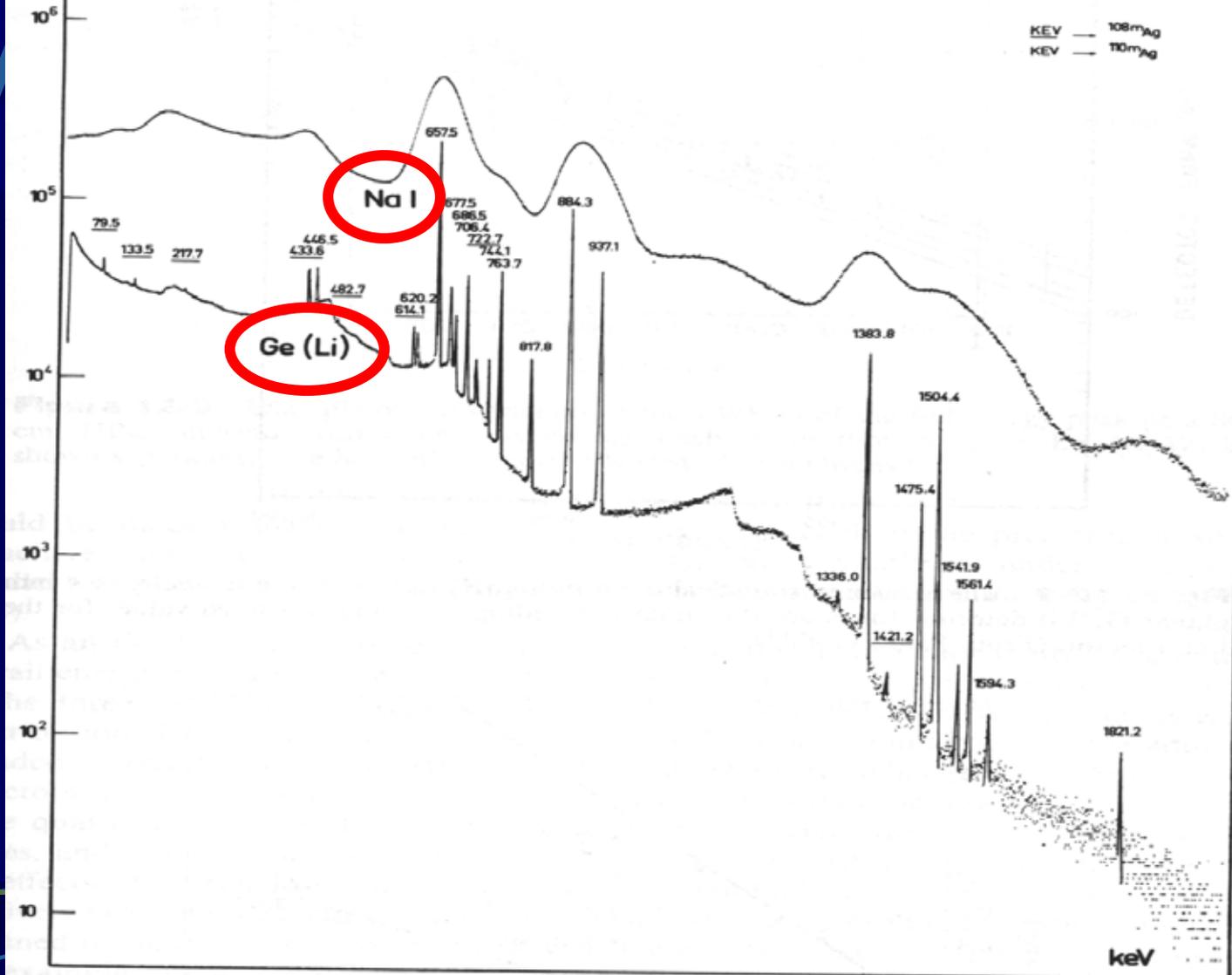
Rivelatore al Germanio, Dewar e azoto (liquido)



- T bassa (77 K)
â bassa corrente di fuga
- Criostato
â impurita', stabilita' termica
- Raffreddo il rivelatore con Azoto liquido

Risoluzione in energia

E' la caratteristica fondamentale dei HPGe





Rivelatori di gal Germanio

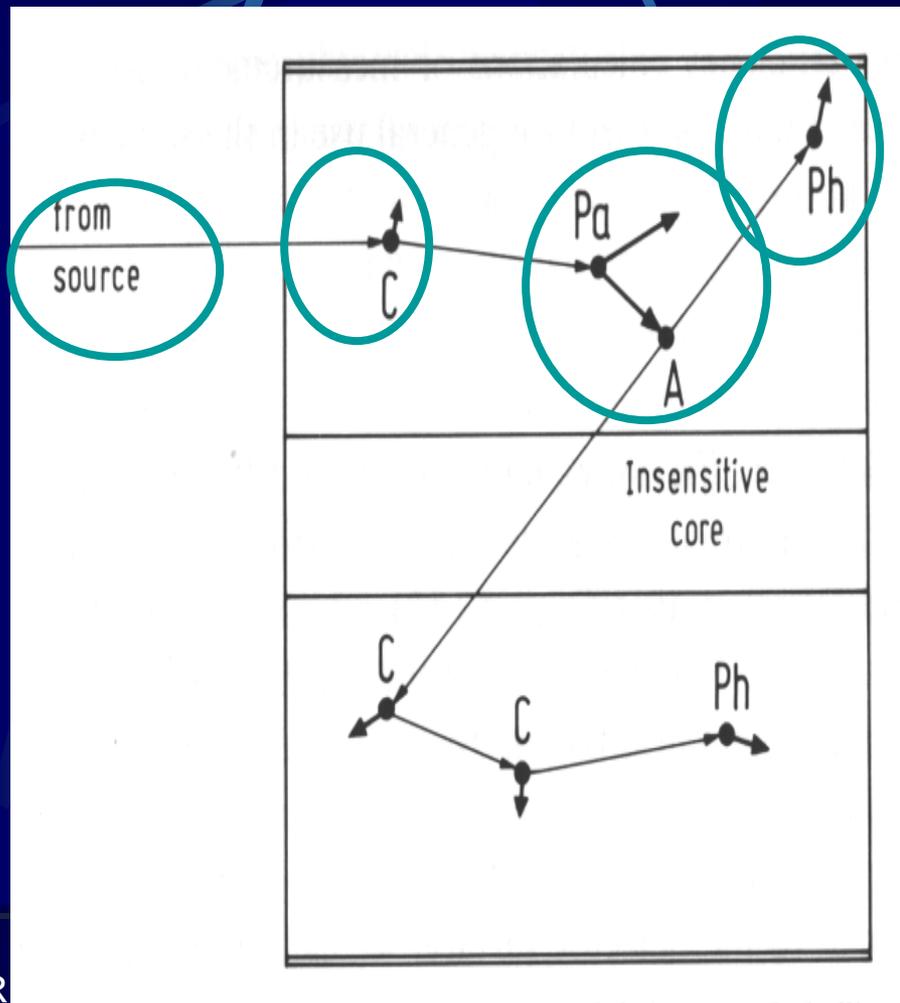
Meccanismi di rivelazione dei g

Interazione γ -HPGe

- Un fotone che incide su un rivelatore puo' interagire in 3 modi:
 1. effetto fotoelettrico
 2. effetto Compton
 3. produzione di coppie
- Il rivelatore *vede* solo i **prodotti** elettricamente carichi di queste interazioniâ elettroni
- Gli elettroni **ionizzano**, creando coppie e/lacuna

Interazione g-HPGe (fotopicco 1)

Un esempio di possibile interazione



g incidente

effetto Compton ($e^- + g$)

produzione di coppie ($e^- + g + g$)

fotoelettrico (e^-)

ecc. ecc.

Interazione γ -HPGe (fotopicco 2)

... che equivale alla reazione

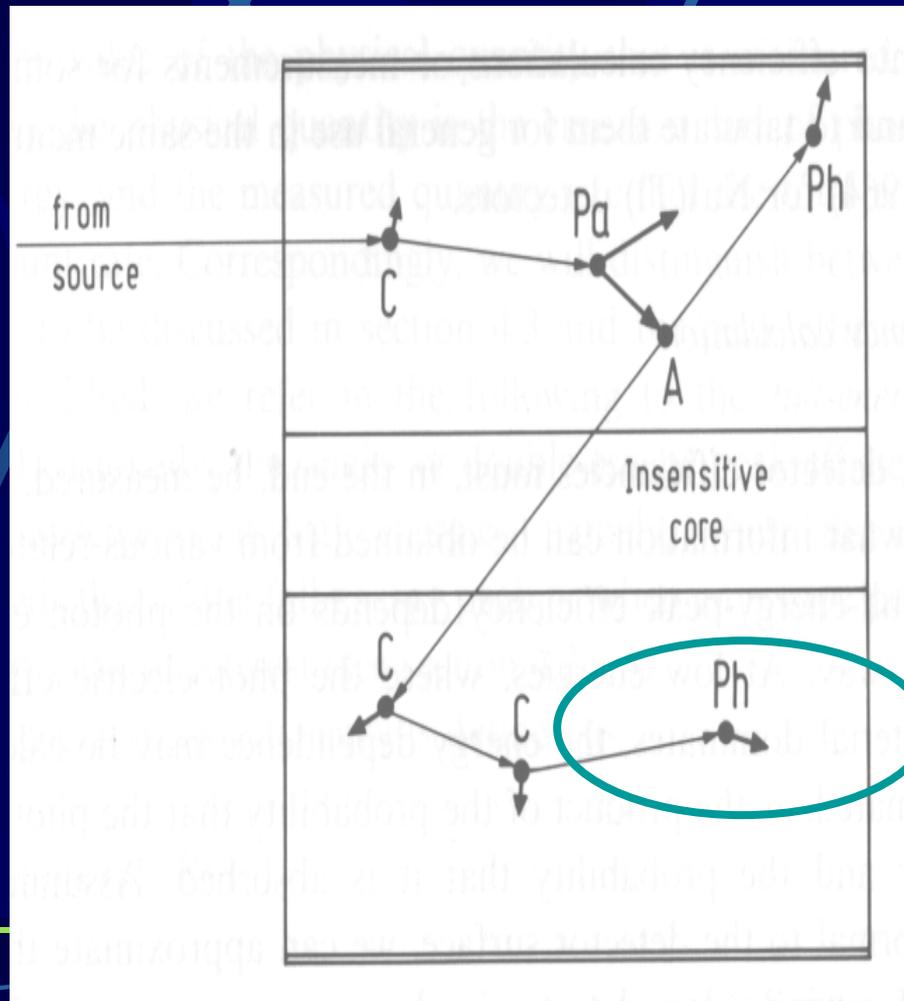


ossia ad un SINGOLO effetto fotoelettrico perche' e' un evento **TUTTO CONTENUTO** all'interno del rivelatore

â nessun γ uscente

Interazione γ -HPGe (Compton 1)

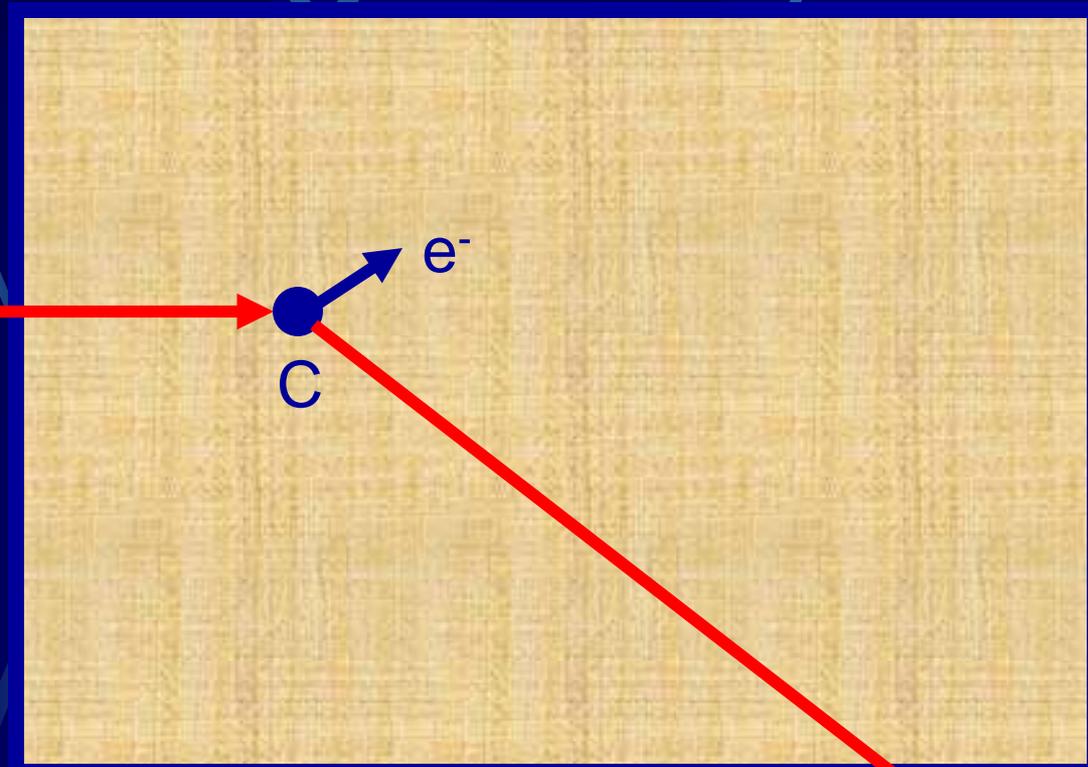
Un esempio di possibile interazione



se questo γ fosse uscito dal rivelatore senza fare fotoelettrico ...

Interazione γ -HPGe (Compton 2)

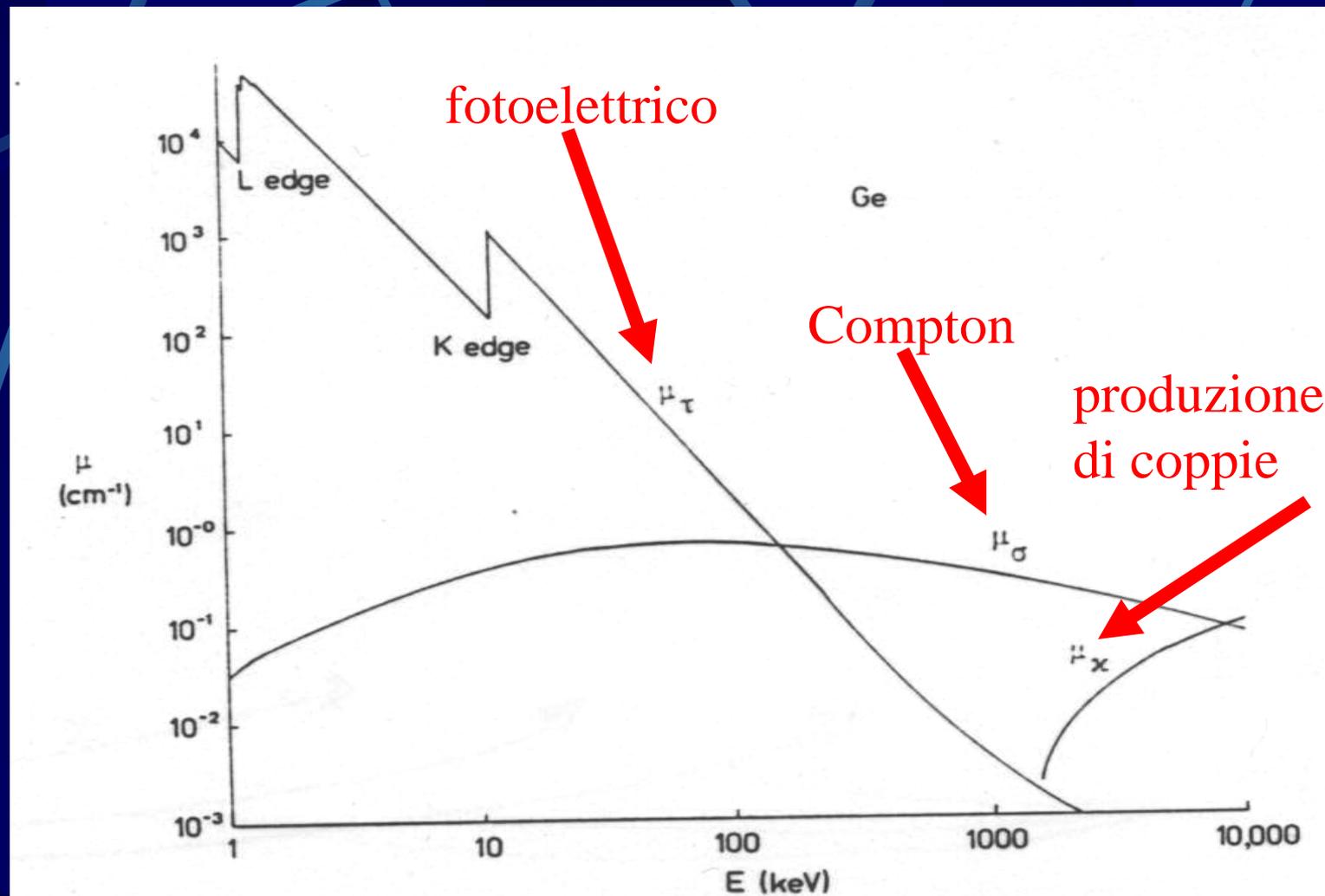
...sarebbe stato equivalente
alla reazione...



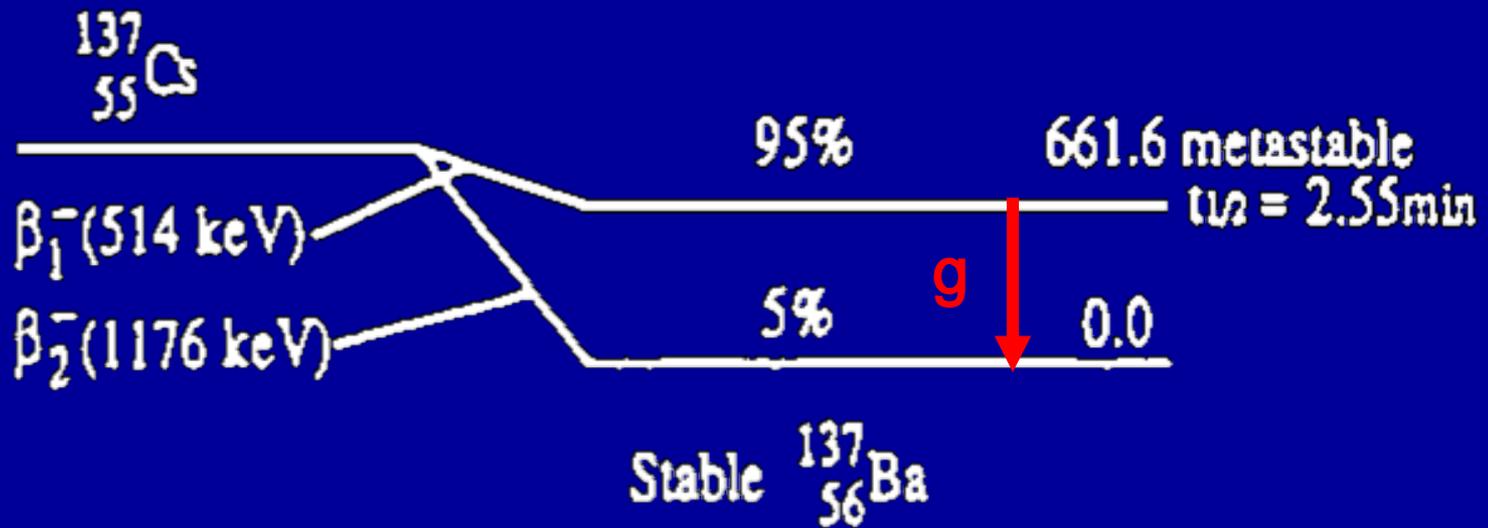
...ossia ad un **SINGOLO** effetto Compton con il gusciente, perché è un evento **NON**
CONTENUTO all'interno del rivelatore $\hat{=}$ almeno 1 gusciente

Sezioni d'urto g-Ge

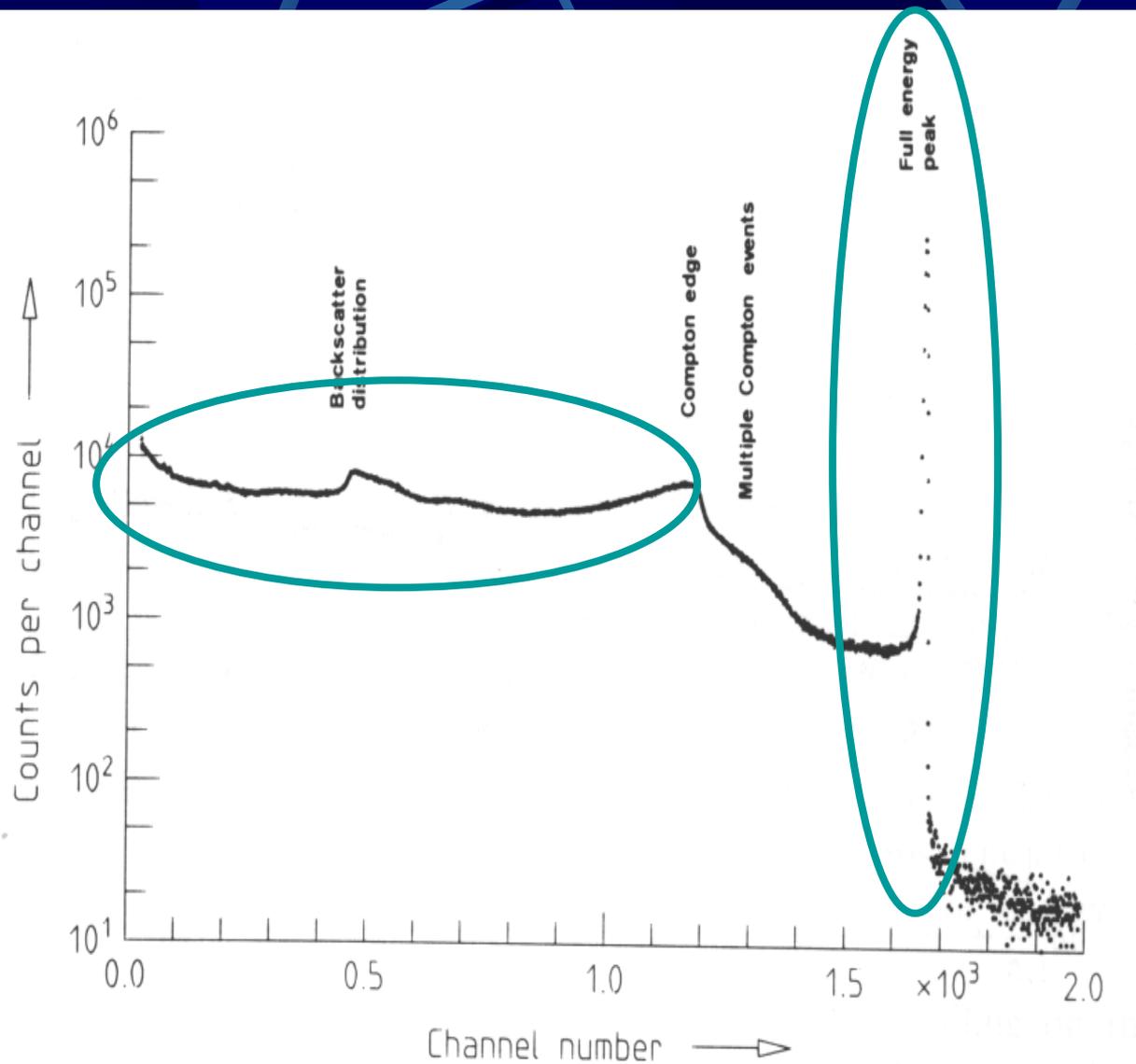
(probabilità di interazione del fotone in funzione della sua energia in un materiale)



Schema di decadimento del Cs^{137}



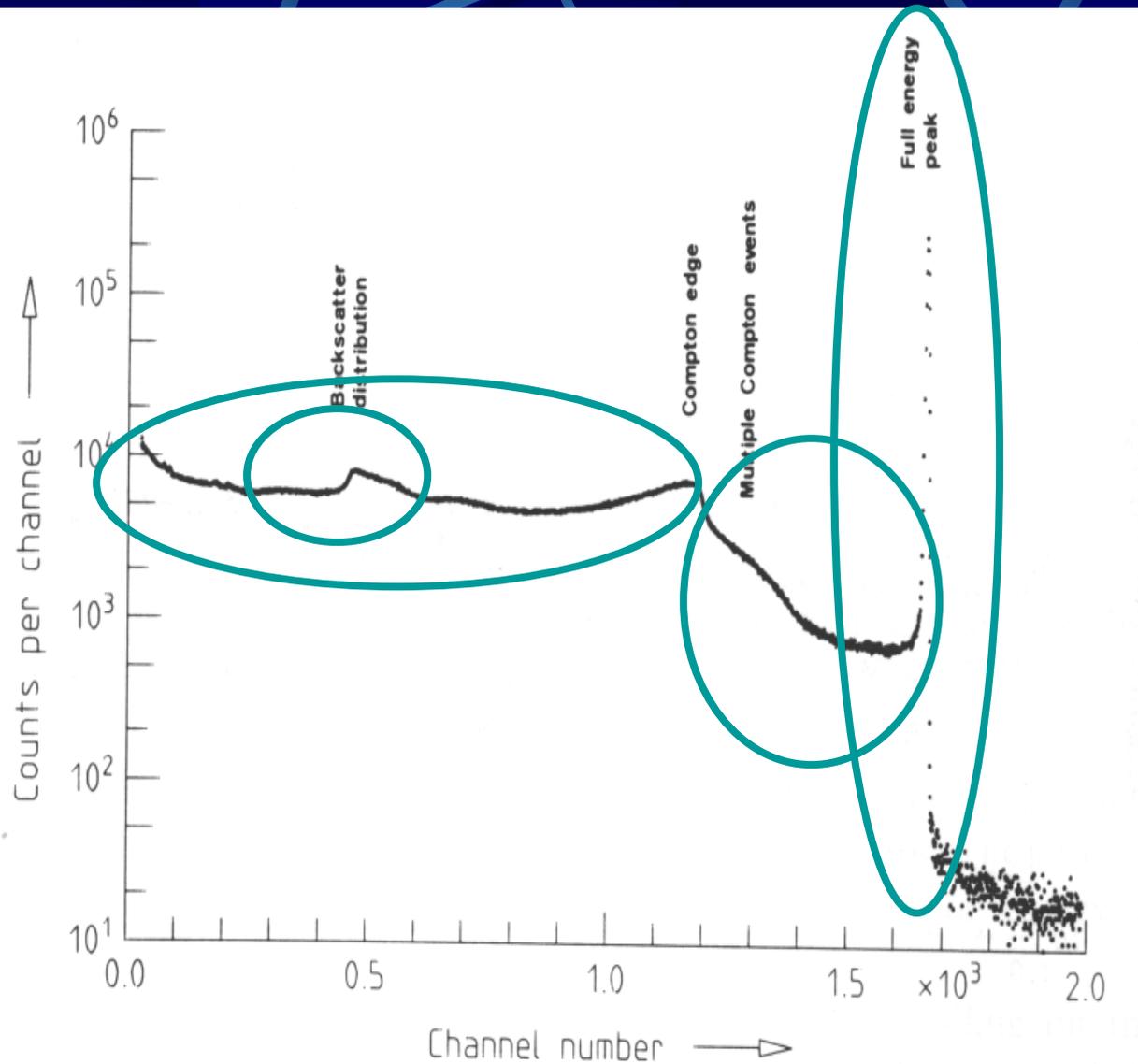
Spettro multicanale di ^{137}Cs



§1 solo fotonico (662keV)

§Spalla Compton (continuo), nel rivelatore e nello schermo

Spettro multicanale di ^{137}Cs

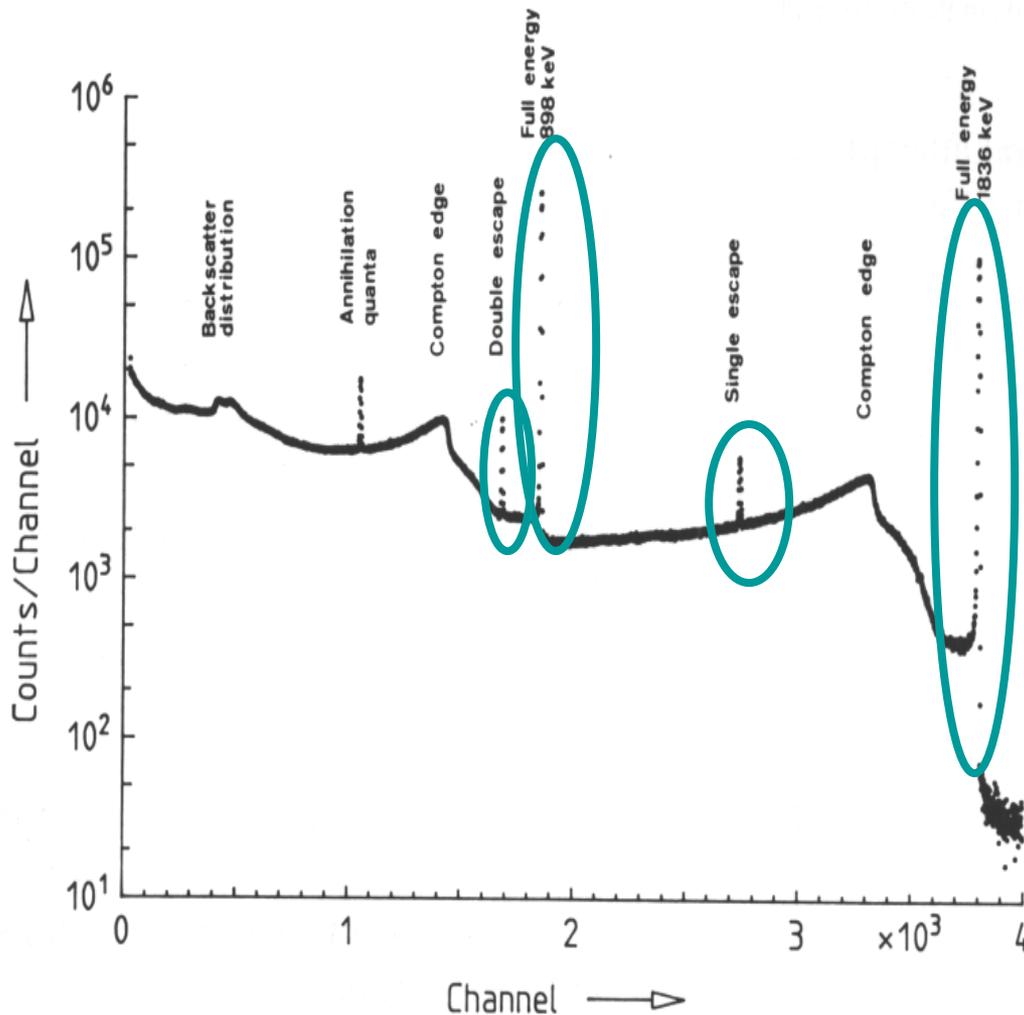


§1 solo fotonico (662keV)

§Compton multipli
all'interno del rivelatore
§Spalla Compton
(continuo), nel
rivelatore e nello
schermo

§Picco di
backscattering,
nello schermo

Spettro multicanale di ^{88}Y



§2 fotonici (898 e 1836 keV)

§picco di fuga semplice o *single escape* (1 g della produzione di coppie scappa)

$$\hat{a} E_{SE} = E_{PE} - 511 \text{ keV}$$

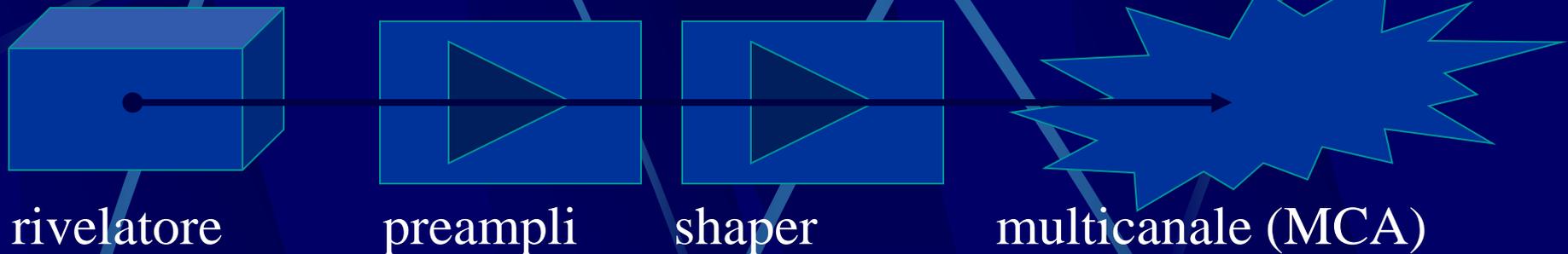
§ picco di fuga doppio o *double escape* (2 g della produzione di coppie scappano)

$$\hat{a} E_{DE} = E_{PE} - 1022 \text{ keV}$$

- I rivelatori di radiazione γ
- I rivelatori al Germanio iperpuro
- **La catena elettronica**
- L'analisi dati di un rivelatore al Germanio iperpuro
- I rivelatori di radiazione α

Catena elettronica

Devo registrare il segnale creato nel rivelatore



Scopo della catena elettronica e':

§ amplificare il segnale uscente dal rivelatore

§ non aggiungere rumore o introdurre distorsioni

§ memorizzarlo su computer per l'analisi successiva

- I rivelatori di radiazione γ
- I rivelatori al Germanio iperpuro
- La catena elettronica
- **L'analisi dati di un rivelatore al Germanio iperpuro**
- I rivelatori di radiazione α

Analisi dati HPGe: generalita'

Scopo:

misurare l'attivita' e
riconoscere il nuclide
in un campione

Mezzo:

spettro di multicanale
(MultiChannel Analyser, MCA)+
correzioni opportune +
identificazione nuclide e misura
attivita'

Analisi dati HPGe: significato di uno spettro MCA



Caratteristiche EG&G GMX

- n-type HPGe
- tensione di lavoro: -4800 V
- area attiva nominale: 120 cm²
- efficienza relativa al fotonico: 25%
- risoluzione a 5.9 keV (Fe⁵⁵): 740 eV
- risoluzione a 1.33 MeV (Co⁶⁰): 1.95 keV
- rapporto fotonico-Compton 47:1
- finestra d'ingresso in Berillio
- range utile di energia 3keV-10MeV
- volume di circa 120 cc



La misura dell'attività con un HPGe

Calcolo dell'attività'

$$A = \frac{R}{P} = \frac{N}{PT\varepsilon} \bullet C$$

R: rateo di emissione per una riga

P: branching ratio per la riga

N: # di eventi nel fotopicco

e: efficienza all'energia della riga

C: correzioni varie

(autoassorbimento, geometria,...)

T: live time



Calibrazioni di un HPGe

Procedure di calibrazione

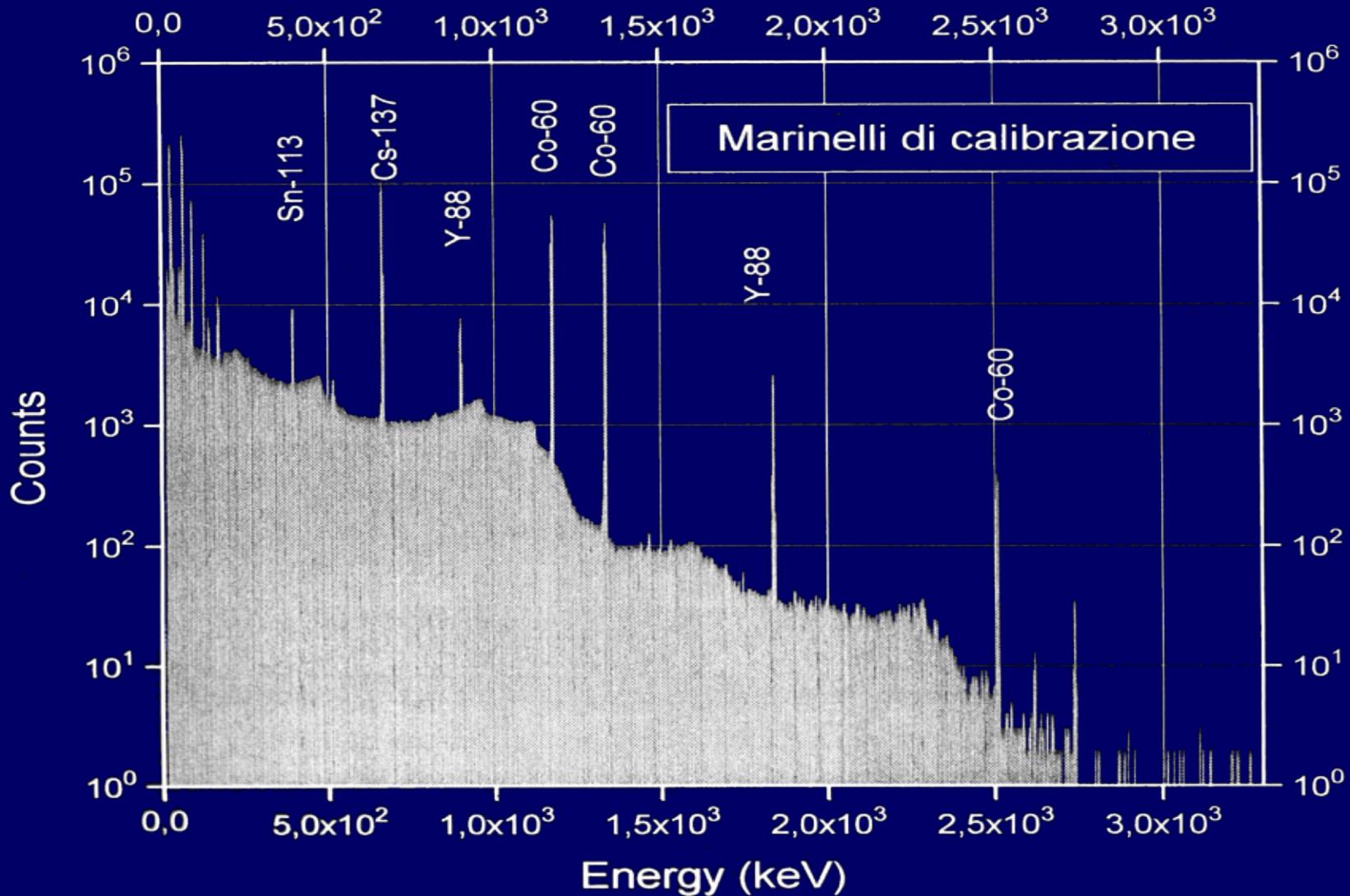
- Voglio/devo calibrare il rivelatore in:
 - | Energia $\hat{=}$ corrispondenza tra segnale raccolto ed energia del fotone incidente
 - | Efficienza $\hat{=}$ quanti conteggi ottengo con una sorgente di una certa attivita' analizzata per un certo tempo

Sorgente di calibrazione

TABLE 12-1 Gamma Rays Used as Energy Calibration Standards^a

Source	Energy (keV)	Source	Energy (keV)
²⁴¹ Am	59.536 ± 0.001	¹⁹² Ir	468.060 ± 0.010
¹⁰⁹ Cd	88.034 ± 0.010	Annihilation	511.003 ± 0.002
¹⁸² Ta	100.106 ± 0.001	²⁰⁷ Bi	569.690 ± 0.030
⁵⁷ Co	122.046 ± 0.020	²⁰⁸ Tl	583.139 ± 0.023
¹⁴⁴ Ce	133.503 ± 0.020	¹⁹² Ir	604.378 ± 0.020
⁵⁷ Co	136.465 ± 0.020	¹⁹² Ir	612.430 ± 0.020
¹⁴¹ Ce	145.442 ± 0.010	¹³⁷ Cs	661.615 ± 0.030
¹⁸² Ta	152.435 ± 0.004	⁵⁴ Mn	834.840 ± 0.050
¹³⁹ Ce	165.852 ± 0.010	⁸⁸ Y	898.023 ± 0.065
¹⁸² Ta	179.393 ± 0.003	²⁰⁷ Bi	1063.655 ± 0.040
¹⁸² Ta	222.110 ± 0.003	⁶⁰ Co	1173.231 ± 0.030
²¹² Pb	238.624 ± 0.008	²² Na	1274.550 ± 0.040
²⁰³ Hg	279.179 ± 0.010	⁶⁰ Co	1332.508 ± 0.015
¹⁹² Ir	295.938 ± 0.010	¹⁴⁰ La	1596.200 ± 0.040
¹⁹² Ir	308.440 ± 0.010	¹²⁴ Sb	1691.022 ± 0.040
¹⁹² Ir	316.490 ± 0.010	⁸⁸ Y	1836.127 ± 0.050
¹³¹ I	364.491 ± 0.015	²⁰⁸ Tl	2614.708 ± 0.050
¹⁹⁸ Au	411.792 ± 0.008	²⁴ Na	2754.142 ± 0.060

Spettro di calibrazione





Analisi di spettri MCA

Analisi dello spettro

Decido i nuclidi che voglio misurare nel campione e analizzo lo spettro di MCA, nel quale mi devo aspettare di trovare:

- | i fotopicchi dei nuclidi che cerco
- | i fotopicchi del fondo
- | picco a 511 keV dovuto a creazione di coppie
- | Picchi di fuga (semplice o doppio)

Spettro del fondo (1)

E (keV)	Origin of photons	Count rate (10^{-3} s^{-1})	
		a	b
32.2	Ba x	650	
36.4	Ba x	160	
46.5	^{210}Pb (Ra)		20
63.3	^{234}Th		13
72.8/75.0	Pb x	888	26
85/87	Pb x	345	13
92.5	^{234}Th	190	19
129.1	^{228}Ac (Th)	65	
185.7	^{235}U		8
186.2	^{226}Ra	160	
209.3	^{228}Ac (Th)	105	
238.6	^{212}Pb (Th)	1122	10
241.0	^{224}Ra (Th)	100	
241.9	^{214}Pb (Ra)	155	3
270.2	^{228}Ac (Th)	110	
277.4	^{208}Tl (Th)	48	
295.2	^{214}Pb (Ra)	392	5
300.1	^{212}Pb (Th)	85	
327.6	^{228}Ac (Th)	71	
332.4	^{228}Ac (Th)	10	
338.3	^{228}Ac (Th)	250	
351.9	^{214}Pb (Ra)	702	10
409.5	^{228}Ac (Th)	44	
438.8	^{40}K Escape	17	
452.8	^{212}Bi (Th)	15	
463.0	^{228}Ac (Th)	90	
510.8	^{208}Tl (Th)	151	
511.0	Annihilation	111	56
562.3	^{228}Ac (Th)	17	
583.1	^{208}Tl (Th)	530	4
609.3	^{214}Bi (Ra)	678	10
661.7	^{137}Cs	14	
665.5	^{214}Bi (Ra)	20	
727.2	^{212}Bi (Th)	116	
755.2	^{228}Ac (Th)	13	
763.1	^{208}Tl (Th)	8	
768.4	^{214}Bi (Ra)	63	
772.2	^{228}Ac (Th)	19	
785.9	^{214}Pb (Ra)	32	
794.7	^{228}Ac (Th)	71	
806.2	^{214}Bi (Ra)	14	

con schermo di Pb

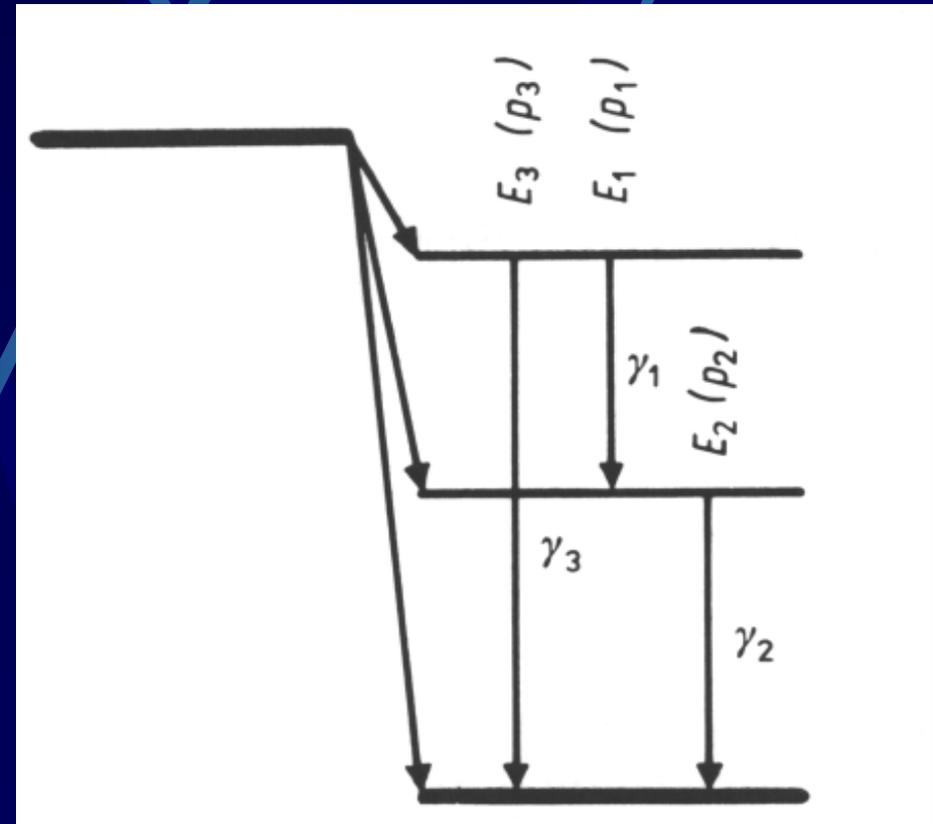
senza schermo di Pb

Spettro del fondo (2)

<i>E</i> (keV)	Origin of photons	Count rate (10^{-3} s^{-1})	
		a	b
835.5	²²⁸ Ac (Th)	23	
840.0	²²⁸ Ac (Th)	19	
860.4	²⁰⁸ Tl (Th)	67	
904.5	²²⁸ Ac (Th)	10	
911.1	²²⁸ Ac (Th)	389	6
934.1	²¹⁴ Bi (Ra)	40	
949.8	⁴⁰ K Escape	25	
964.6	²²⁸ Ac (Th)	67	
969.1	²²⁸ Ac (Th)	223	3
1001.0	²³⁴ Pa (U)	10	1
1120.3	²¹⁴ Bi (Ra)	179	5
1155.2	²¹⁴ Bi (Ra)	18	
1173.2	⁶⁰ Co		4
1238.1	²¹⁴ Bi (Ra)	66	3
1281.0	²¹⁴ Bi (Ra)	15	
1332.5	⁶⁰ Co		3
1377.7	²¹⁴ Bi (Ra)	45	2
1385.3	²¹⁴ Bi (Ra)	11	
1401.5	²¹⁴ Bi (Ra)	14	
1408.0	²¹⁴ Bi (Ra)	27	
1460.8	⁴⁰ K	2183	91
1495.8	²²⁸ Ac (Th)	10	
1509.3	²¹⁴ Bi (Ra)	22	
1583.2	²¹⁴ Bi (Ra)	13	
1588.0	²²⁸ Ac (Th)	30	1
1592.7	²⁰⁸ Tl Escape	46	4
1620.6	²¹² Bi (Th)	19	
1630.4	²²⁸ Ac (Th)	20	1
1661.3	²¹⁴ Bi (Ra)	11	
1729.6	²¹⁴ Bi (Ra)	30	2
1764.5	²¹⁴ Bi (Ra)	156	10
1847.4	²¹⁴ Bi (Ra)	21	1
2103.7	²⁰⁸ Tl Escape	54	5
2118.6	²¹⁴ Bi (Ra)	12	1
2204.2	²¹⁴ Bi (Ra)	45	3
2293.4	²¹⁴ Bi (Ra)	4	
2447.9	²¹⁴ Bi (Ra)	13	1
2614.7	²⁰⁸ Tl (Th)	352	30

I picchi somma

- Sono ottenuti quando 2 g incidono sul rivelatore insieme ($Dt \sim t$)
- Posso ottenere:
 - | fotopicco+fotopicco
 - | fotopicco+Compton
 - | Compton+Compton
- Un caso tipico lo ottengo con una sorgente (tipo ^{60}Co) che per ogni decadimento produce 2 g



Picco di fuga singolo e doppio

- Se il g incidente ha energia sufficiente per fare una Creazione di Coppie, puo' succedere che 1 o 2 dei g di annichilazione del e^+ esca dal rivelatore senza interagire.
- Ottengo:
 - | Picco di fuga singolo: $E_{\text{fotopicco}} - 0.511 \text{ MeV}$
 - | Picco di fuga doppio: $E_{\text{fotopicco}} - 1.022 \text{ MeV}$

La schermatura

- Schermo il rivelatore da fonti esterne di rumore (pareti, mobili, aria, raggi cosmici,...)
- Per attenuare i g posso usare Pb, che con 5cm mi attenua:

Energia	0.5 MeV	1.0	1.5	3
Attenuazione	9500	56	19	11

- Metto lo schermo lontano dal rivelatore per ridurre la probabilita' che un g faccia Compton sullo schermo e finisca sul rivelatore
- Schermo gli X-Pb (12 e 80 keV) con Cd
- Schermo gli X-Cd con Cu
- Posso anche avere ^{210}Pb , ^{210}Bi , ^{60}Co , ^{137}Cs





Un'analisi in laboratorio

Scelta del campione da analizzare

- Deve poter essere messo in un Marinelli
- Omogeneo
- Sospetto che contenga qualcosa
- Lo confronto con un campione di *controllo*
- Lo raccolgo senza perturbarlo troppo
- Non dimentico l'equilibrio secolare



Preparazione della misura

- Decido quale elemento voglio misurare
- Guardo che sia rivelabile
- Controllo i suoi parenti
- Calibro il rivelatore
- Decido la durata della misura
- Non dimentico il fondo

La misura

- Preparo il Marinelli
- Metto il campione in misura
- Controllo il tempo morto
- Decido quanto dovrà stare in misura il campione
- Aspetto.....preparando la libreria dei nuclidi

L'analisi

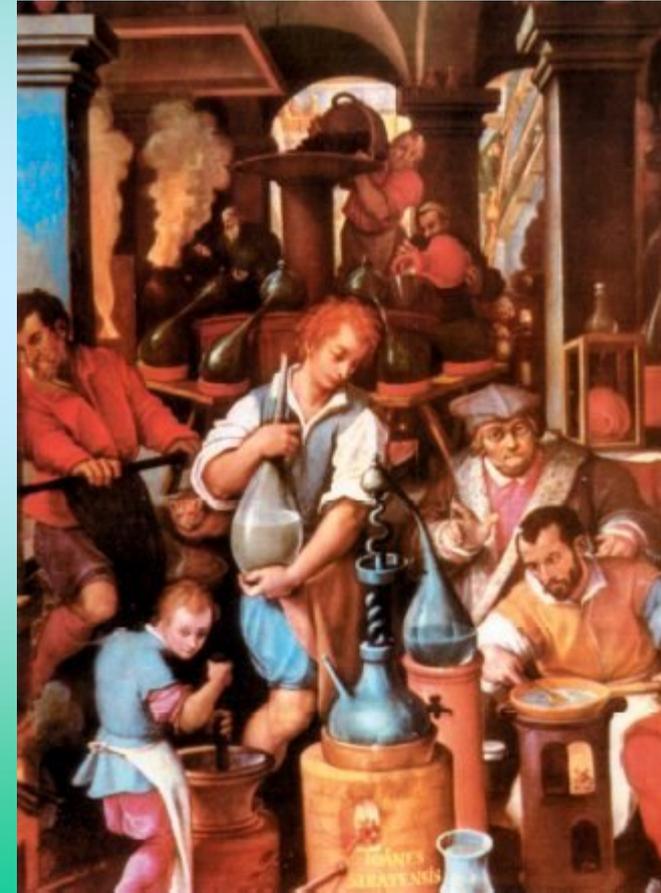
- Controllo bene lo spettro:
 - | Fotopicco
 - | Escape peak
 - | X-rays
 - | Fondo
- Misuro l'attività'
- Go to 1

Cosa abbiamo misurato negli anni passati ?

- Terra (Verbania, Caluso, Torre Pellice, Lanzo, Roero, Ceresole, Cavoretto)
- Sabbia zirconifera
- Filtri aria 86
- Cemento
- Olio esausto
- Licheni
- Foglie (Robinia 86, incognite 96)
- Fieno
- Caffè (Lavazza, Sarajevo)
- Vino (Dolcetto 87, Vercelli 96, Pecetto 97)
- Succo di frutta (Nipiol, Tropical)
- Latte
- Acqua (Po prima e dopo Molinette, Viverone, Sangone prima e dopo S.Luigi, rubinetto, Finlandia, Saluggia)
- Acqua minerale (Sangemini, Boario)
- Miele (88, 96)
- Farina
- Pesce (sardine, merluzzo)
- Camice di un radiologo

Riassumendo

Posso misurare la radioattività in matrici ambientali con un rivelatore al Germanio



... e ora smanettiamo ...