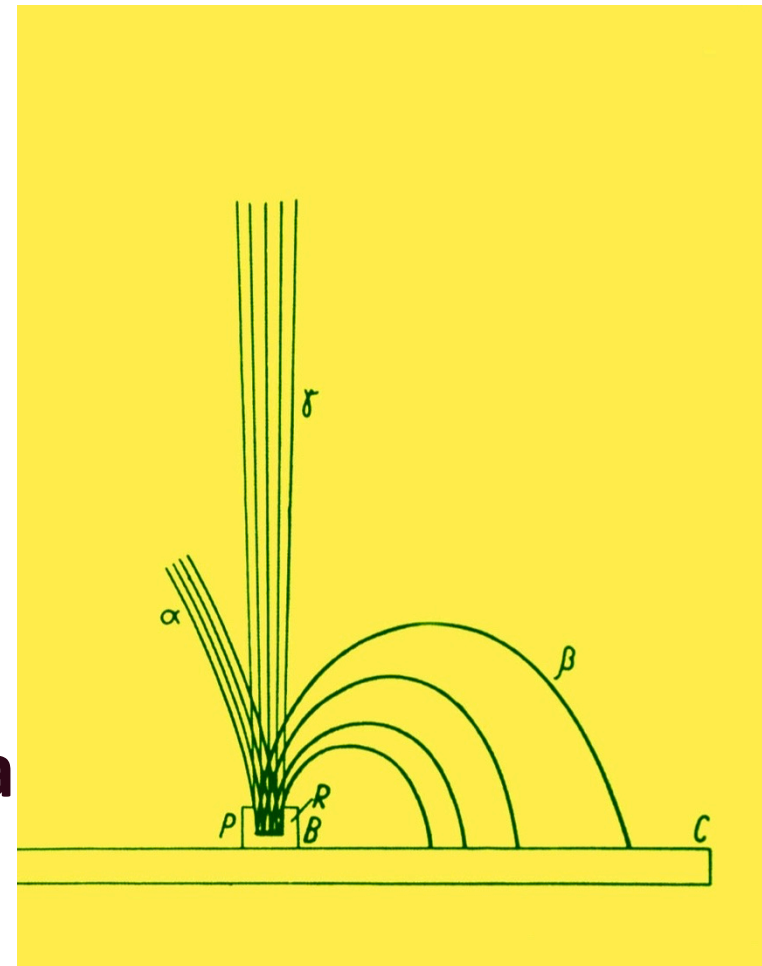


**un tema controverso:
la radioattività
aprile 2024**

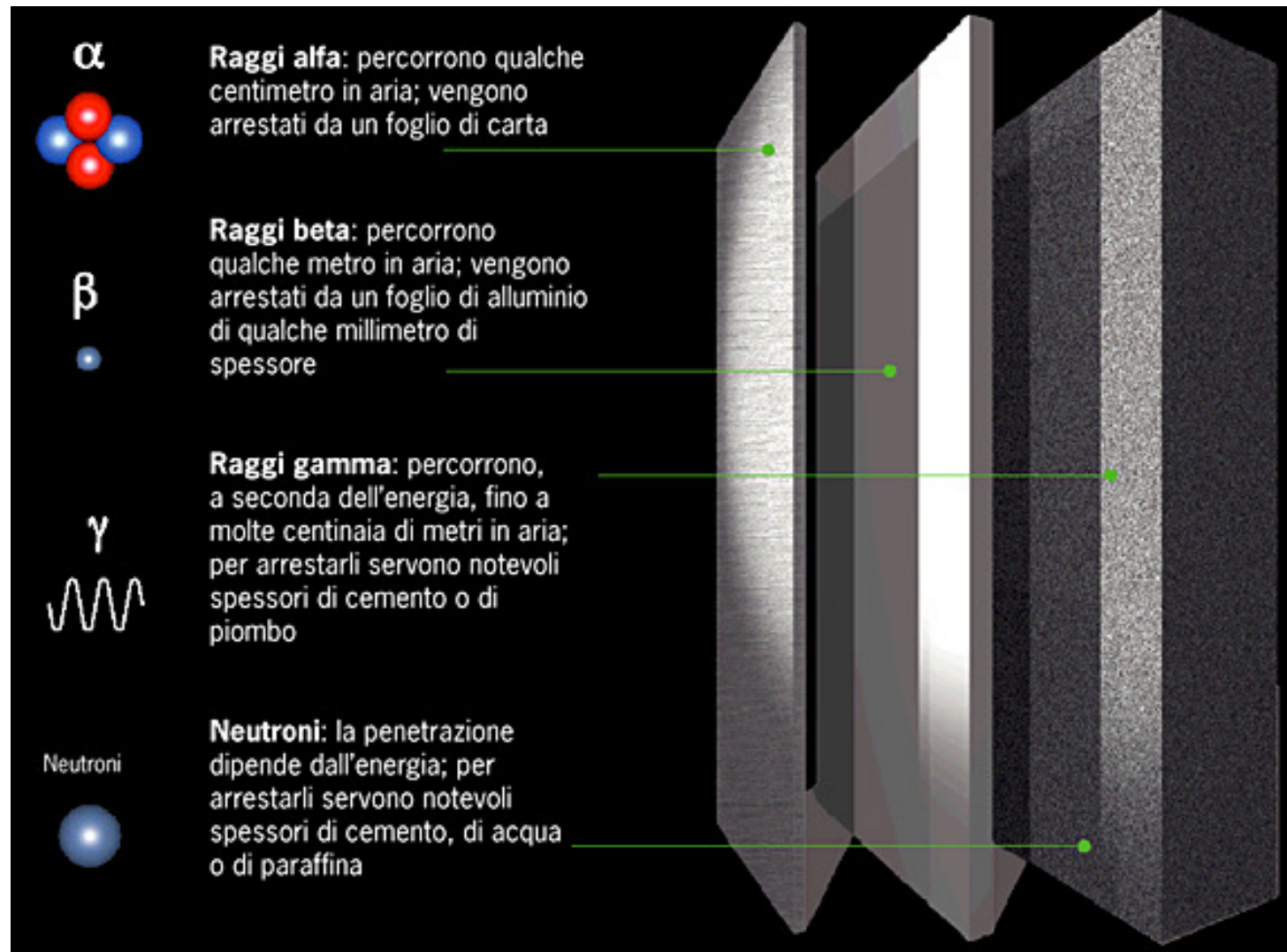
la radioattività

radiazioni spontanee della materia mille volte più energiche dei raggi-X emesse dai nuclei di alcuni elementi in modo casuale

- alfa: nuclei di elio, carica elettrica positiva
- beta: elettroni carica elettrica negativa
- beta inverso: positroni carica elettrica positiva
- gamma: radiazioni elettromagnetiche di altissima frequenza, neutre



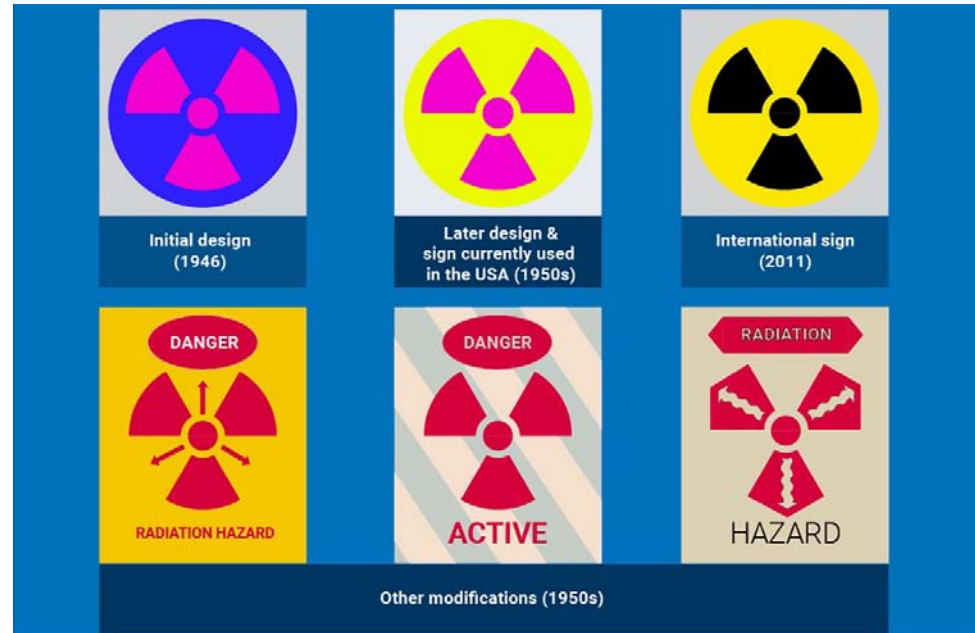
una caratteristica delle radiazioni è la capacità di penetrare la materia e in alcuni casi di alterarla, con effetti sia utili che dannosi



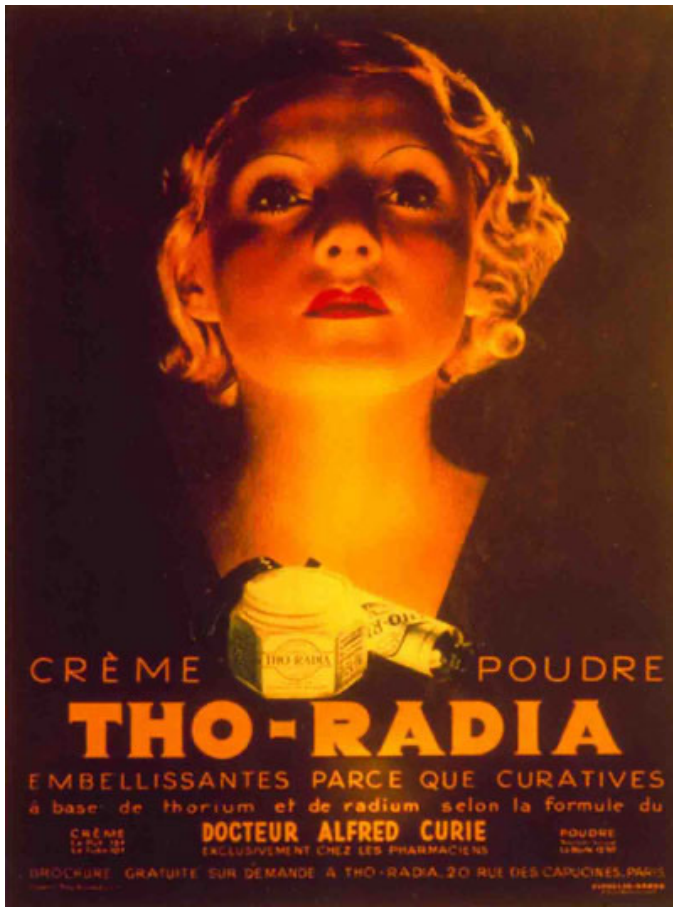
la radioattività viene diffusamente percepita come un nemico invisibile

- idee sbagliate e paure irrazionali
- percezione negativa di tutto ciò che è radioattivo
- idea che la radioattività sia un artefatto artificiale
- l'esposizione alla radioattività viene considerata assolutamente inaccettabile

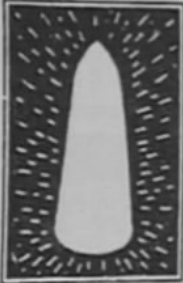
esistono atomi di molte sostanze che sono vitali per noi, e al contrario devono volteggiarne altri che apportano malattia e morte (Lucrezio vi, 1093)



fino agli anni '30 i prodotti radioattivi erano particolarmente popolari per una varietà di usi comuni, dai dentrificici alle acque minerali e per creme di bellezza



VITA RADIUM SUPPOSITORIES



OUR VITA RADIUM SUPPOSITORIES (HIGH STRENGTH) are one of the outstanding triumphs of Radium Science. These Suppositories are guaranteed to contain REAL RADIUM—in the exact amount for most beneficial effect. They are inserted per rectum, one each night, this being one of the several practical and successful ways of introducing Radium into the system.

After insertion, the Suppository quickly dissolves and the Radium is absorbed by the walls of the colon; then, within a few minutes, it enters the blood stream and traverses the entire body. Every tissue, every organ of the body is bombarded by its health-giving electric atoms. Thus the use of these Suppositories has an effect on the human body like recharging has on an electric battery.





i primi segnali dei rischi posti alla salute dai materiali radioattivi venne dall'industria degli orologi, ove il radium veniva utilizzato per rendere fosforescenti le lancette, con la morte di alcuni operai.

Maggiore attenzione negli impieghi terapeutici crebbe a partire dalla metà degli anni '20.

l'opinione pubblica mondiale venne sensibilizzata dalla vasta contaminazione radioattiva dopo il test Castel Bravo a Bikini (1 marzo 1954) e dai dati diffusi dai dentisti sulla radioattività dei denti dei bambini a seguito della contaminazione del latte attraverso la catena alimentare a seguito dei test nucleari atmosferici

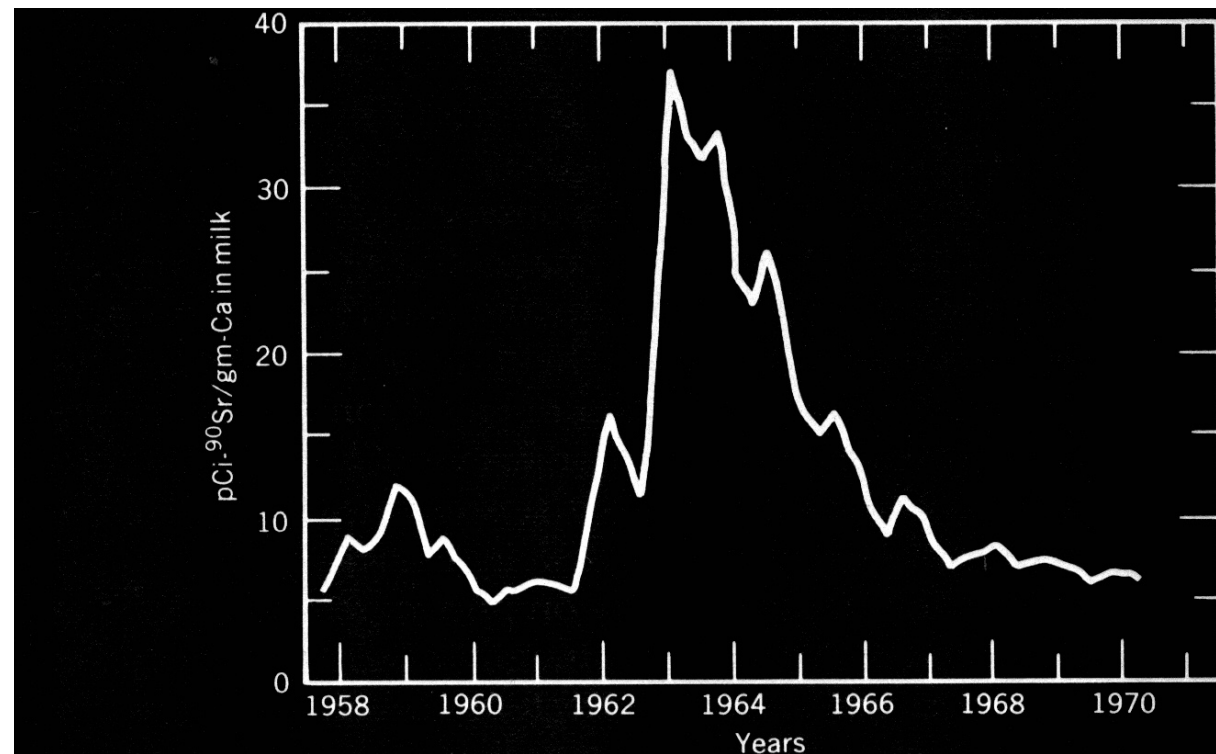


Figure 15.2 The ^{90}Sr concentration in milk in Great Britain after 1958. (After Bolt, 1976,

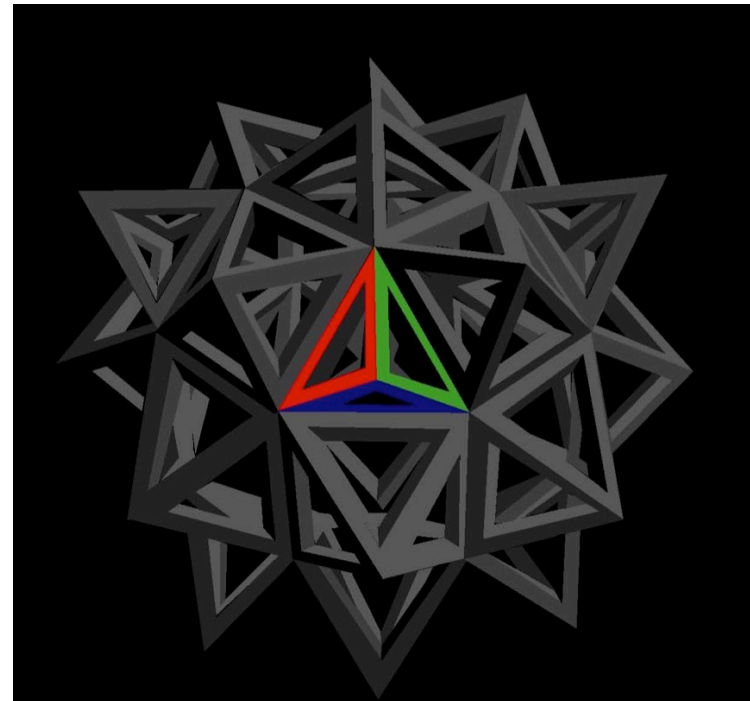
L'incidente di Chernobyl (26 aprile 1986) con la conseguente dispersione radioattiva su vaste zone ha esacerbato la diffidenza per la stessa energia nucleare, con ridimensionamento dei programmi a livello mondiale



una mostra sulla radioattività in Europa

The exhibition attempts to introduce its visitors into basic features of radioactivity, its role in nature and its manifold applications.

With respect to its limitations and implications, the exhibition also addresses the risks and hazards imposed by radioactivity



chiave narrativa

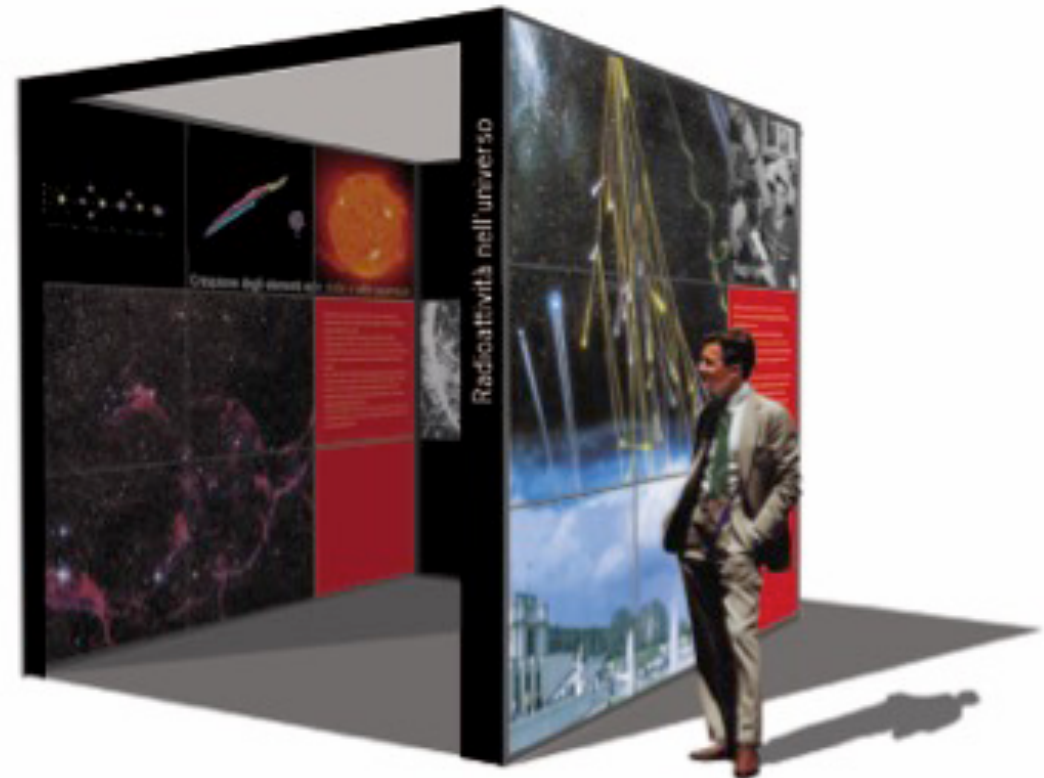
articolare la mostra in modo ternario, in analogia alle tre principali forme di radioattività naturali, mettendo in risalto tre aspetti essenziali della radioattività:

α) Radioactivity in the Universe

β) Radioactivity and Life

γ) Radioactivity at work

l'elemento base della scenografia:
un cubo di 3 metri di lato



titolo e logo

idea: se presentiamo la natura come una pietra preziosa, la radioattività ne è una sfaccettatura

Radioactivity – a facet of nature

Radioaktivität – Facette der Natur

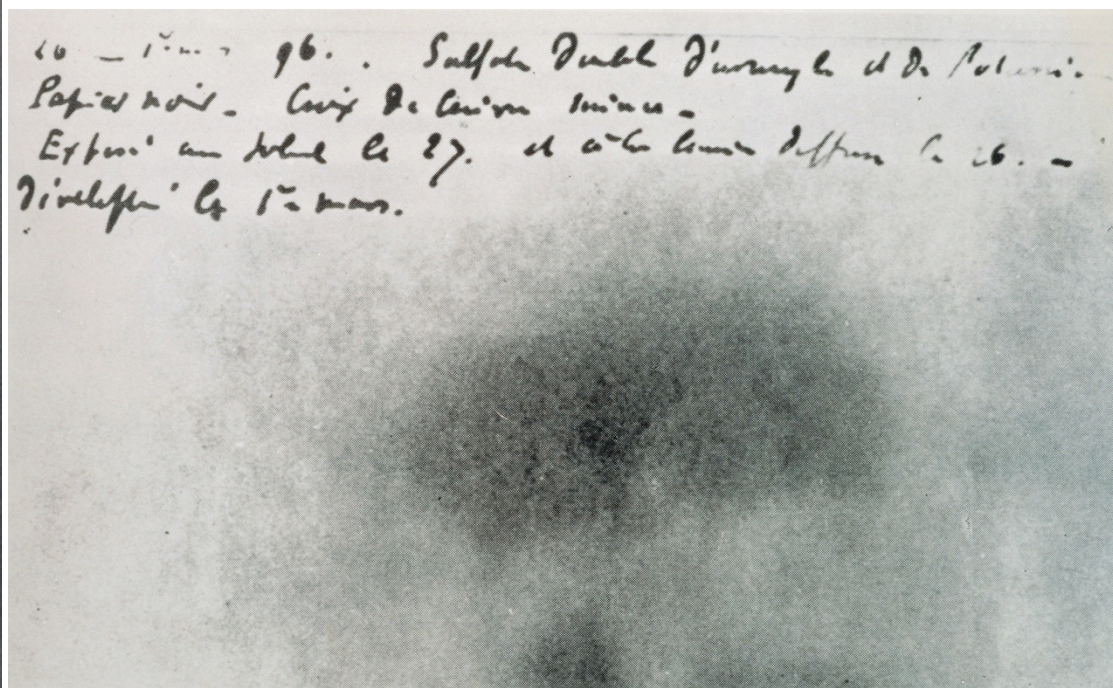
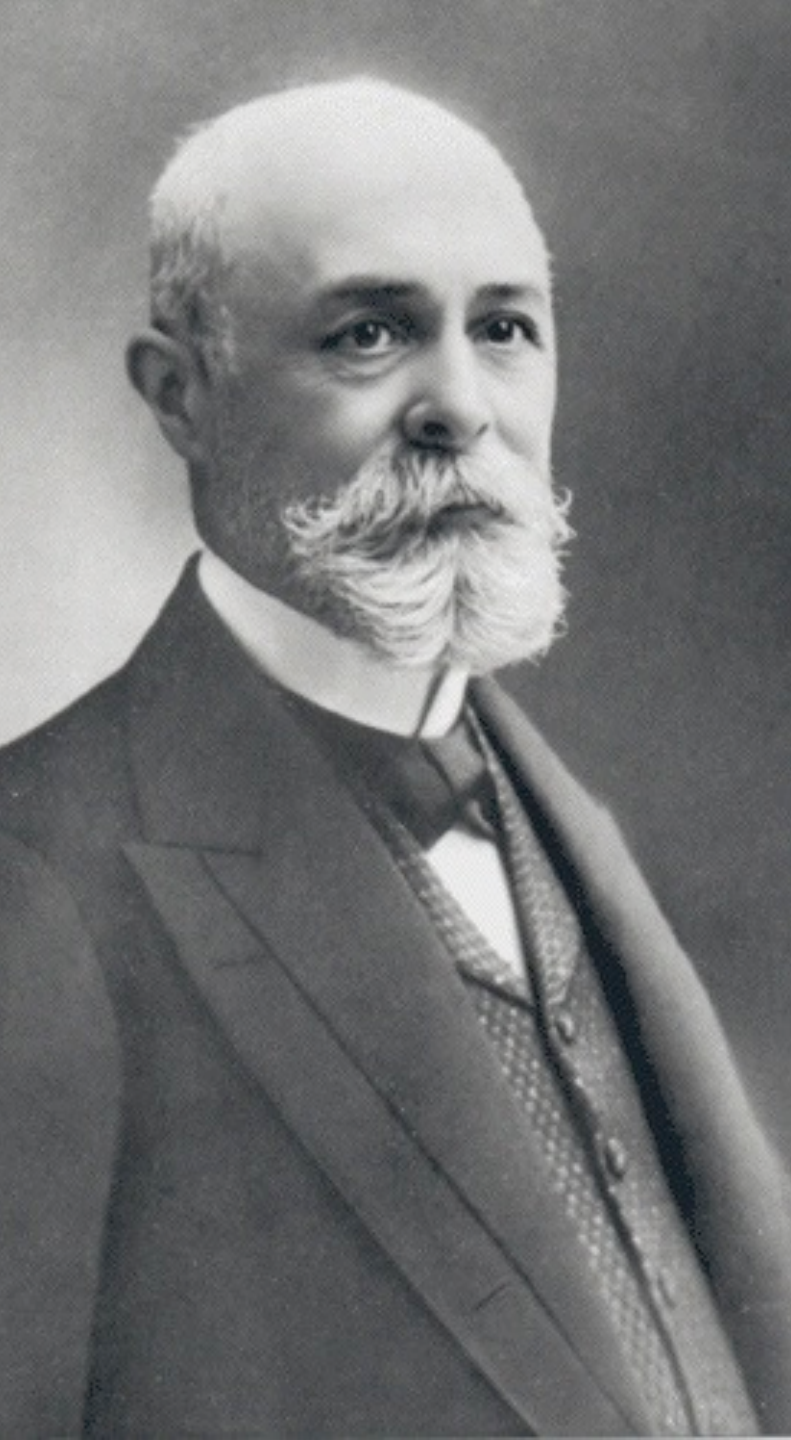
La radioactivité, une facette de la nature

Radioaktivitás: a természet része

Radioactividade sinais da natureza

La radioattività, una faccia della natura

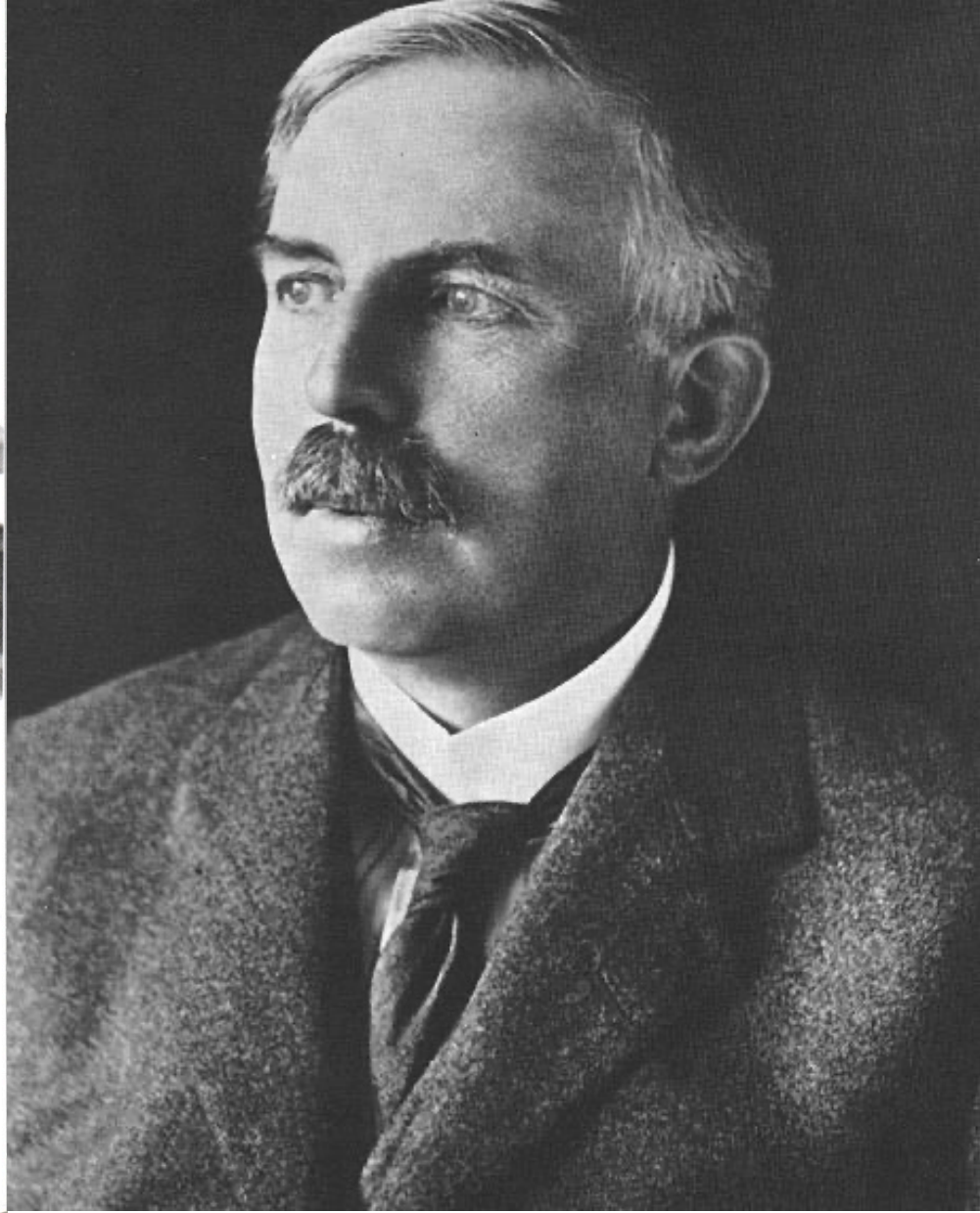




la radioattività non è percepibile dai sensi umani ed è stata scoperta (casualmente) da una lastra fotografica di Henri Becquerel, nel 1896.



Maria e Pierre Curie



Ernest Rutherford

il decadimento radioattivo è un processo aleatorio

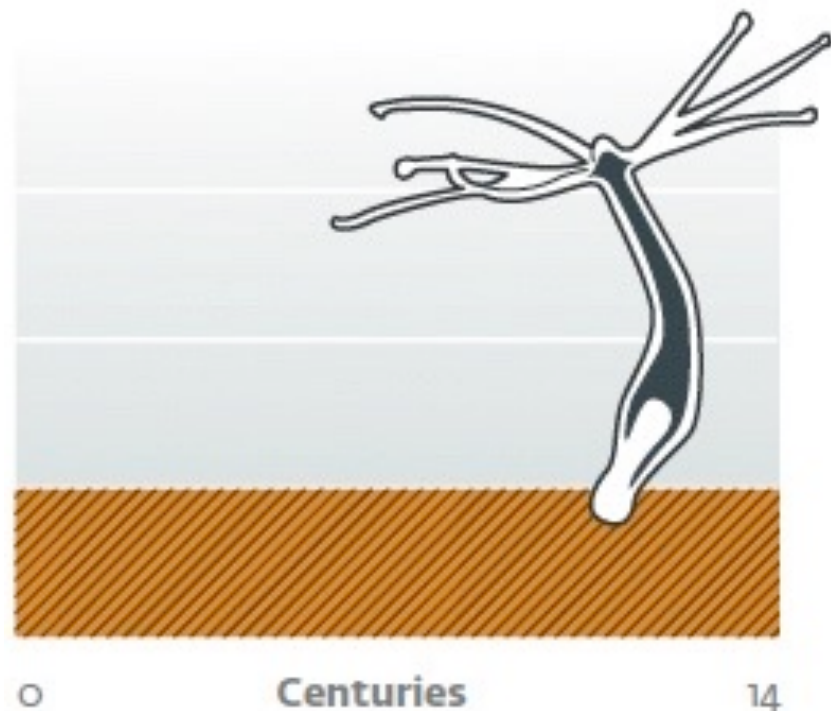
- ▷ **non è possibile prevedere quando un determinato nucleo decade**
- ▷ **la probabilità che un nucleo decada in un dato intervallo temporale è costante e non dipende dalla storia precedente**
- ▷ **si sa determinare la probabilità che un nucleo decada in un tempo determinato**
- ▷ **la radioattività non si può eliminare, accelerare o rallentare con nessun mezzo**

tutti gli esseri viventi (a parte l'ameba) invecchiano, per cui la probabilità di morire cresce nel tempo i nuclei radioattivi invece "muoiono giovani" come l'ameba

YELLOW BABOON



FRESHWATER POLYP



quale sarà la nostra
speranza di vita dopo
il coronavirus?

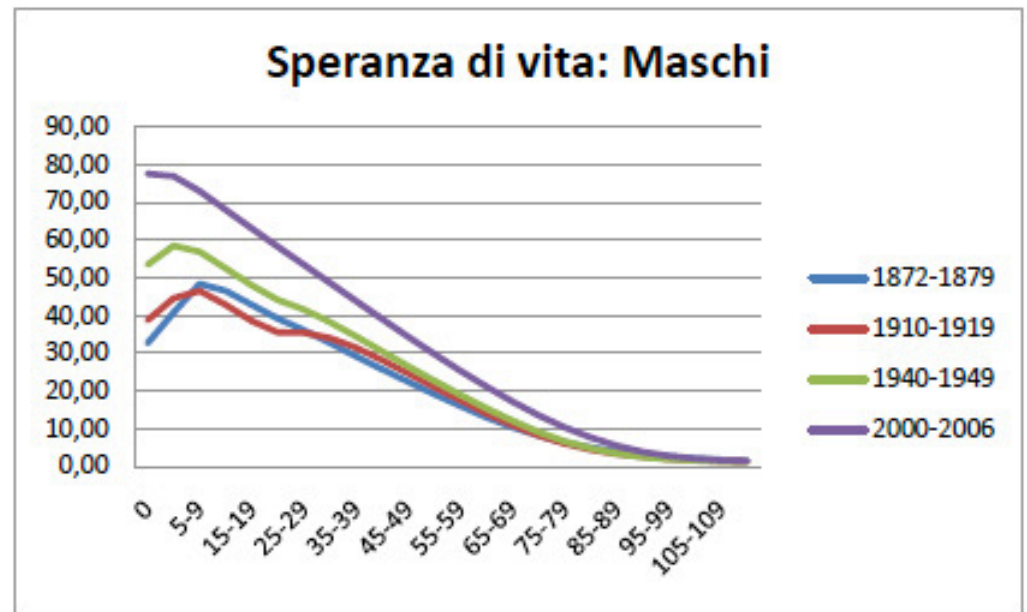
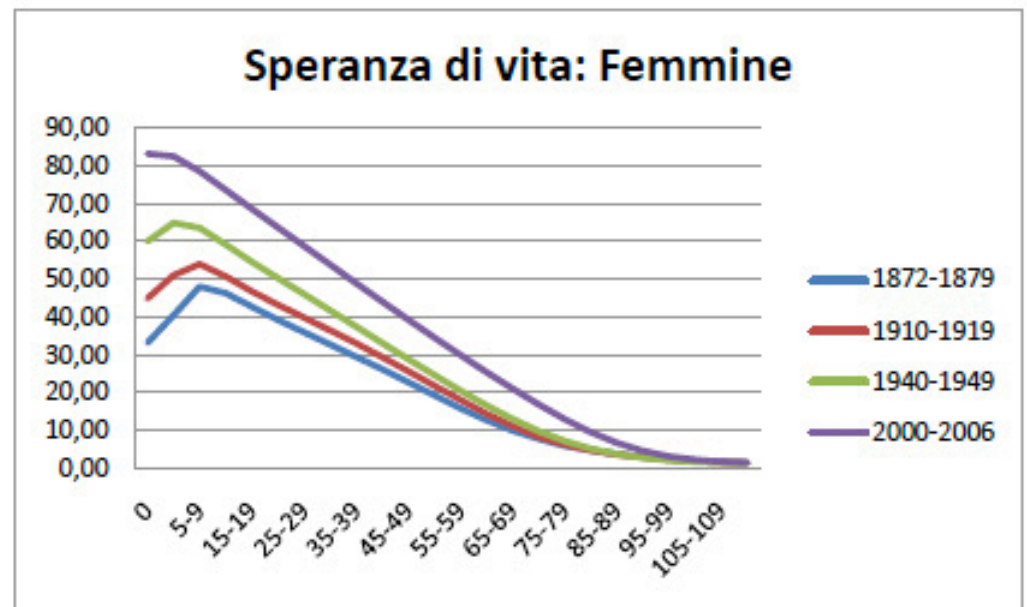


Figura 8



la probabilità di decadere è espressa dalla costante di decadimento λ

legge di decadimento per N_0 nuclei

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

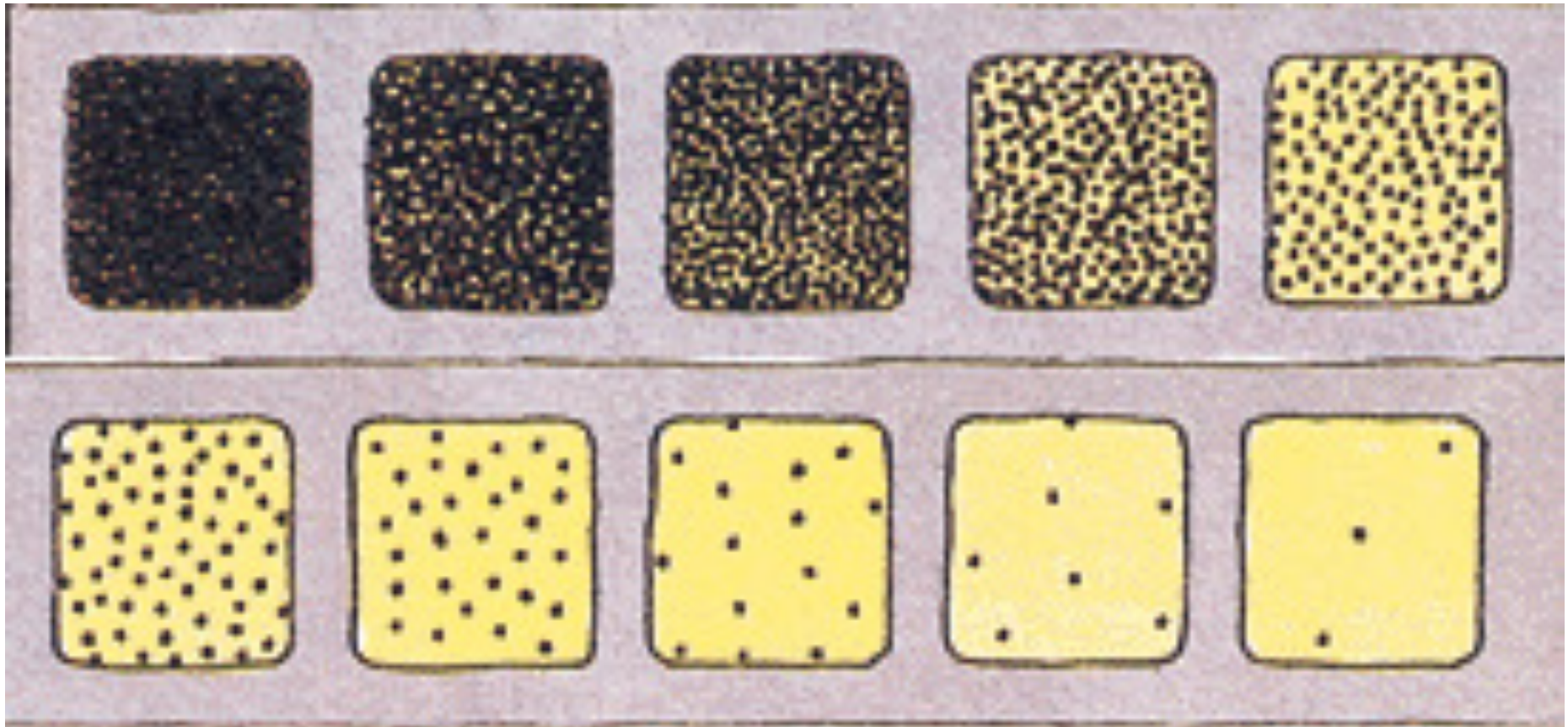
vita media

$$\langle T \rangle = 1/\lambda$$

al **tempo di dimezzamento** metà dei nuclei iniziali sono decaduti

$$N(T_{1/2}) = \frac{1}{2} N_0 \quad T_{1/2} = \ln 2/\lambda \approx 0,693/\lambda$$

dopo n tempi di dimezzamento
della quantità iniziale di nuclei radioattivi rimane
solo una frazione 2^{-n} ossia
 $1/2, 1/4, 1/8, 1/16, 1/32, 1/64, 1/128, 1/256, 1/512,$
 $1/1024, \dots$



i tempi di dimezzamento variano enormemente a seconda dei nuclidi

ISOTOPO	TEMPO DI DIMEZZAMENTO	RADIAZIONI EMESSE	ORIGINE
carbonio-14	5.730 anni	beta (156 keV)	esplosioni atomiche atmosferiche
stronzio-90	28 anni	beta (547 keV) gamma (2,3 MeV)	prodotto di fissione
iodio-131	8,05 giorni	beta (606 keV) gamma (364 MeV)	prodotto di fissione
cesio-137	30 anni	beta (514 keV) gamma (662 MeV)	prodotto di fissione
radon-222	3,82 giorni	alfa (5,59 MeV)	prodotto di decadimento
uranio-235	710 milioni di anni	alfa (4,4 MeV) gamma (185 KeV)	materiale fissile naturale
uranio-238	4,5 miliardi di anni	alfa (4,2 MeV)	isotopo naturale più frequente
plutonio-239	24.400 anni	alfa (5,16 MeV)	materiale fissile da U-238

unità di misura di radioattività ed energia

- **attività**

- ▷ **Bequerel Bq = 1 decadimento al secondo**

- ▷ **Curie Ci = radioattività di 1 g di radio-226**

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

- **energia dei processi microscopici**

- ▷ **elettronvolt eV**

1 eV equivale a $1,6 \times 10^{-19}$ joule

o a $3,822 \times 10^{-20}$ calorie

- **massa: in base alla relazione relativistica $E = m c^2$
si misura in eV/c^2**

$$m_{\text{elettrone}} = 0,510998928(11) \text{ MeV}/c^2$$

le energie dei processi radioattivi sono tipicamente milioni di volte quelle dei processi chimici

- ▷ **combustione di un atomo di carbone 4,2 eV**
- ▷ **esplosione di una molecola di TNT 11 eV**
- ▷ **raggi-X 5 keV**
- ▷ **radiazione alfa 5 MeV**

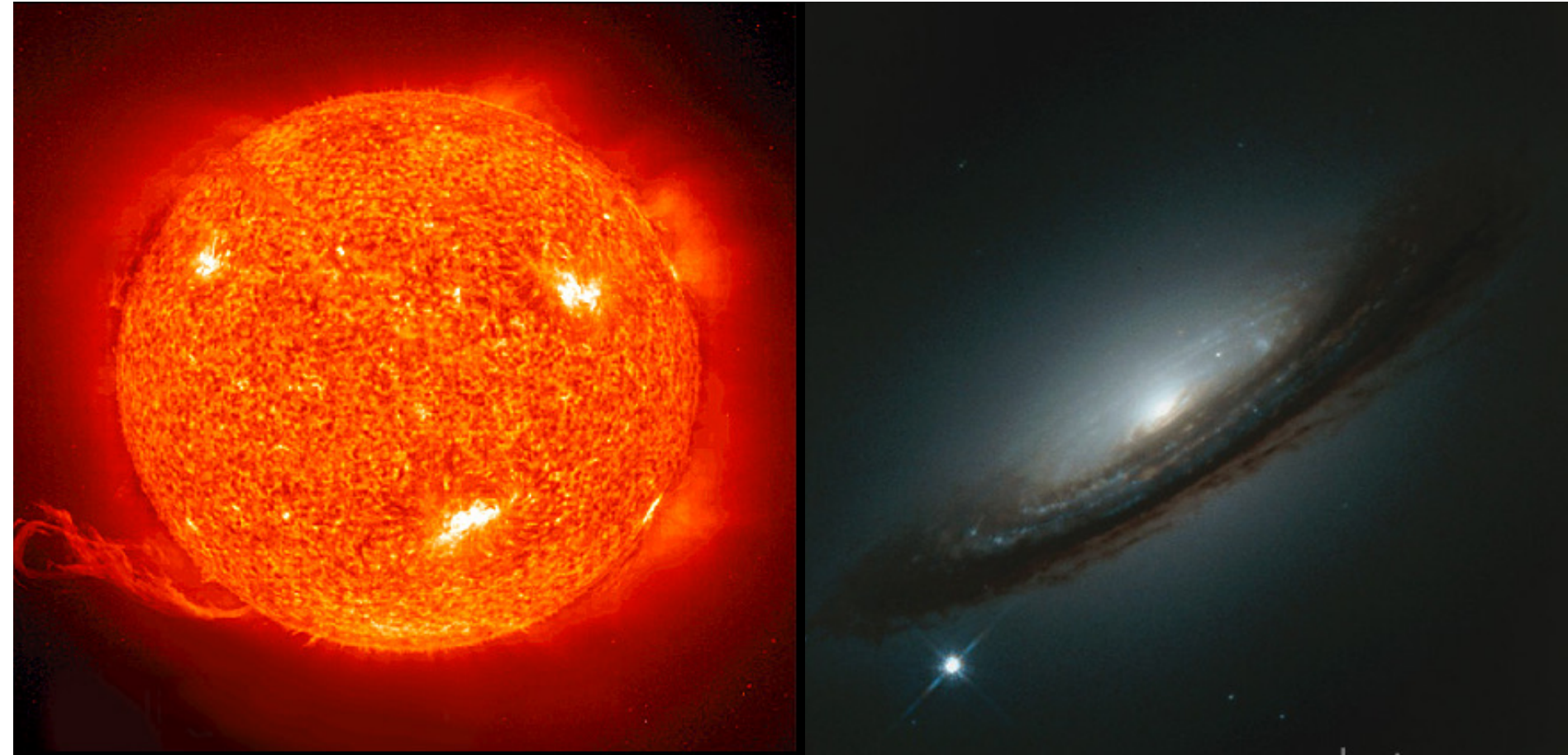
la radioattività è un fenomeno nucleare

- ▷ il nucleo è composto da N neutroni e Z protoni
- ▷ lo stesso elemento chimico può possedere nuclei differenti (*isotopi*), con numero fisso di protoni e diverso numero di neutroni
- ▷ gli isotopi hanno le stesse proprietà chimiche, ma differenti caratteristiche fisiche
- ▷ un nuclide è indicato dal simbolo chimico e dal numero totale di nucleoni $A=N+Z$

U 92	U 220 0,3 s	U 227 1,1 m	U 228 9,1 m	U 229 58 m	U 230 20,8 d	U 231 4,2 d	U 232 70,0 a	U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,248 a	U 235 0,704 a	U 236 2,342 · 10 ⁵ a	U 237 6,75 d	U 238 4,468 · 10 ⁹ a	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h	U 242 16,8 m
---------	----------------	----------------	----------------	---------------	-----------------	----------------	-----------------	------------------------------------	------------------	------------------	------------------------------------	-----------------	------------------------------------	-----------------	-----------------	-----------------

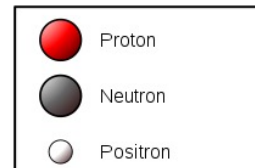
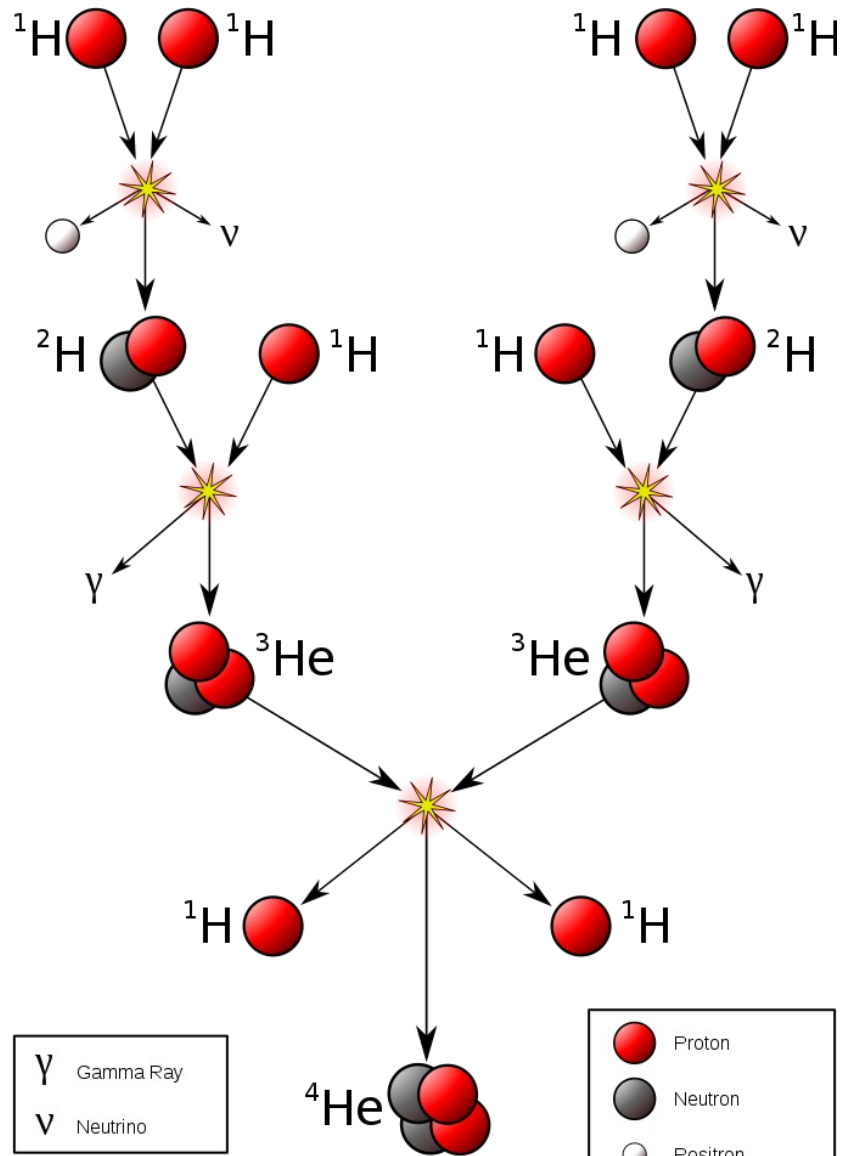
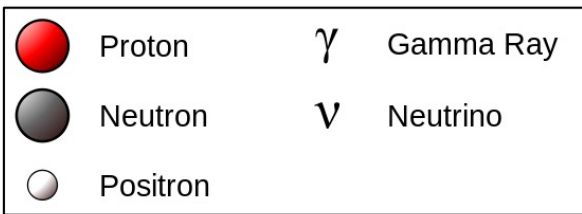
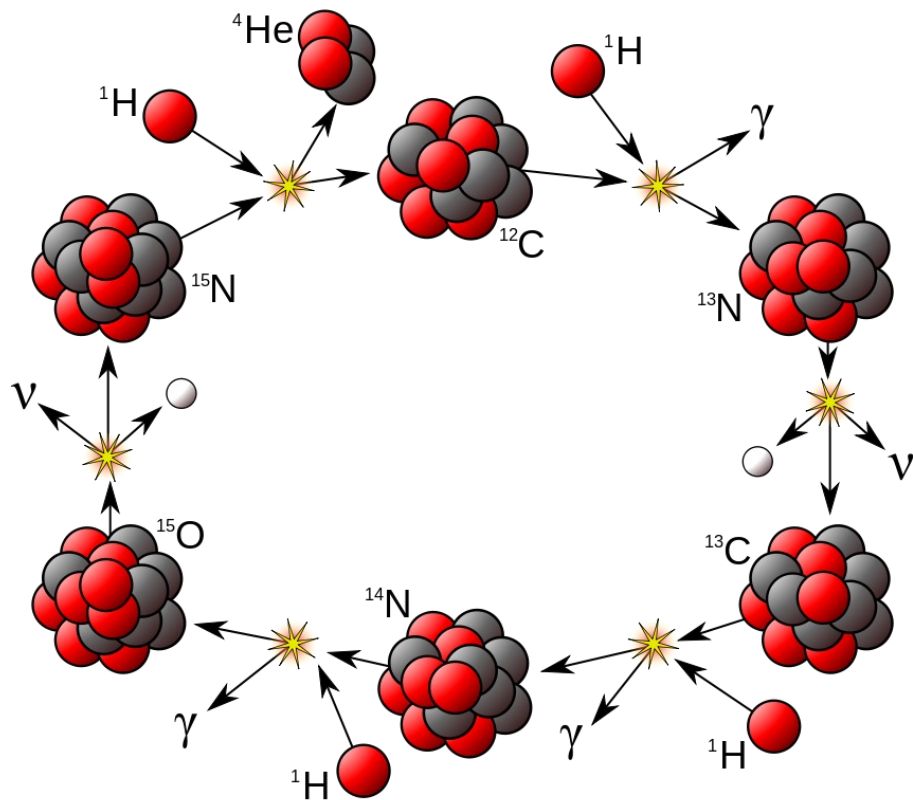
uranio: 92 protoni, fra 134 e 150 neutroni

origine degli elementi

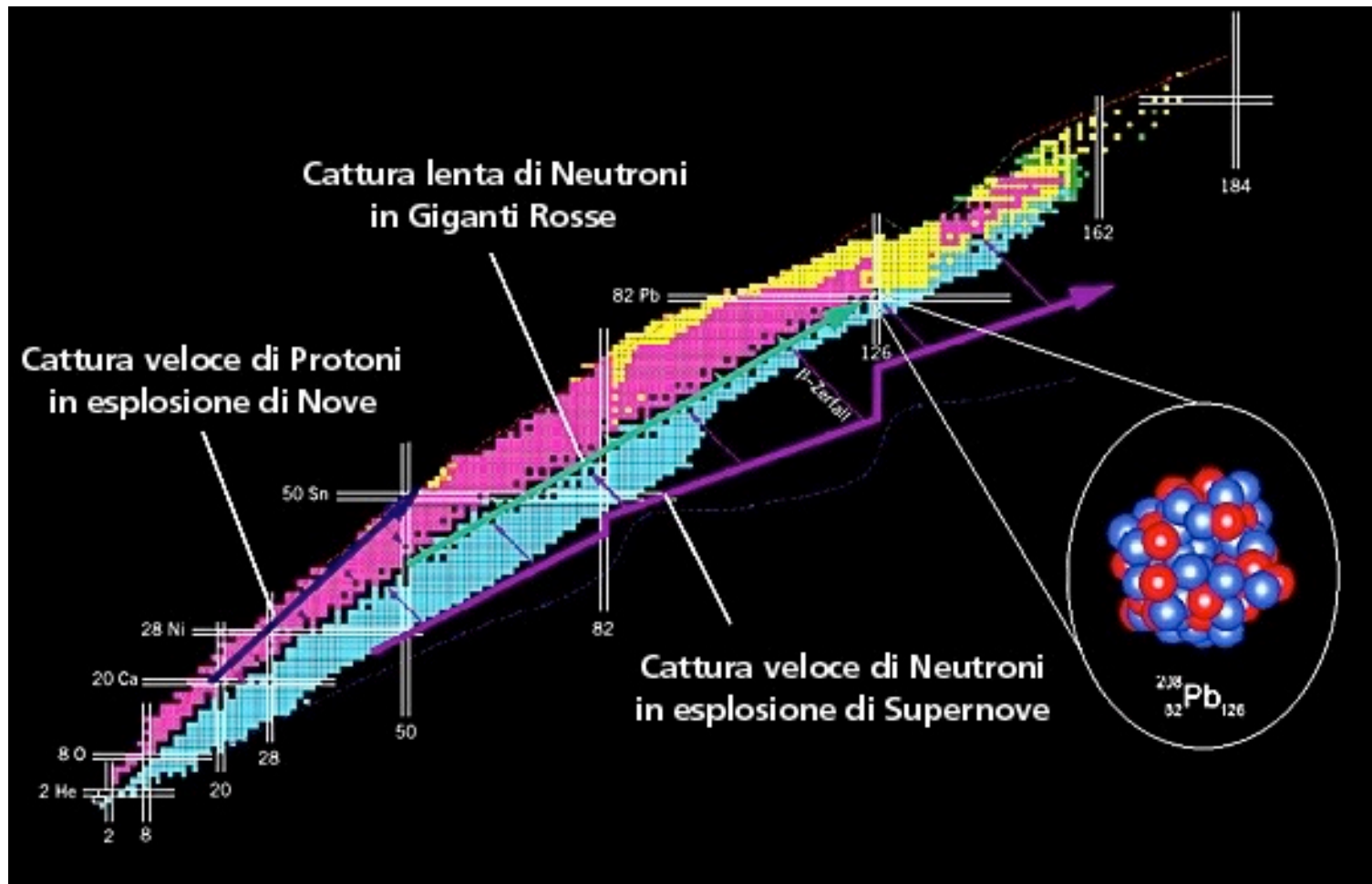


- dall'idrogeno al ferro creati nelle stelle
- dal ferro all'elemento 108 nelle supernove o nella fusione di stelle di neutroni

i nuclei degli atomi più pesanti sono via via “costruiti” nelle stelle a seguito di reazioni e decadimenti



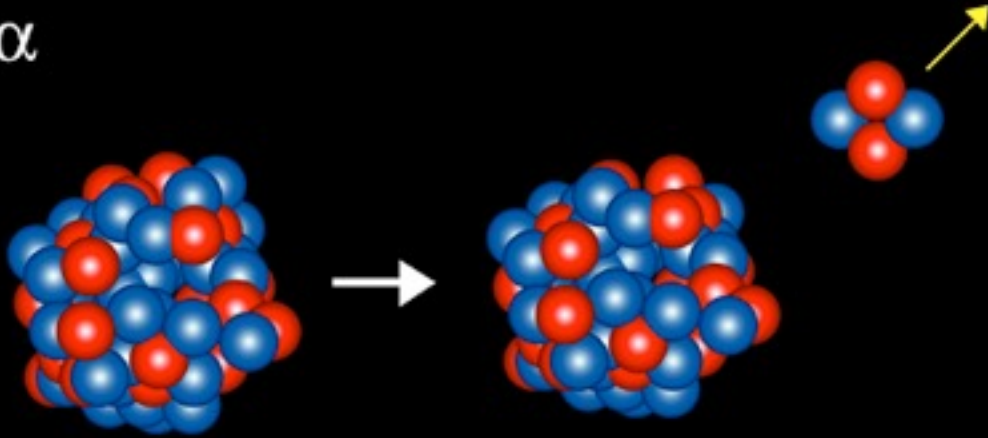
nella creazione degli elementi si possono generare sistemi con un eccesso di energia e la radioattività affina il lavoro portando a nuclidi più stabili



- in un nucleo pesante si possono costituire raggruppamenti temporanei di nucleoni
- la struttura di due protoni e due neutroni (He-4) è particolarmente “stabile” e può subire repulsione elettrostatica dal “resto” del nucleo e venir emessa come particella alfa
- il processo è esotermico
- l’energia dell’alfa è data dalla differenza di massa
$$E_{\alpha} = (m_i - m_f - m_{\alpha}) c^2$$



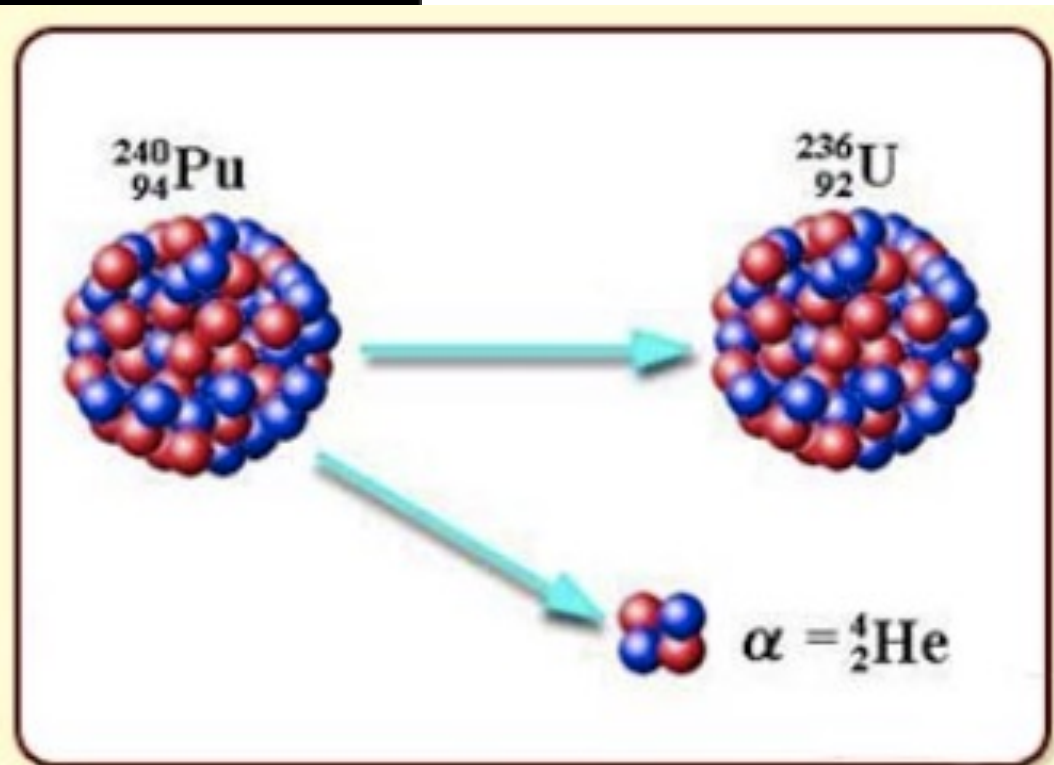
α



$$Z_f = Z_i - 2$$

$$A_f = A_i - 4$$

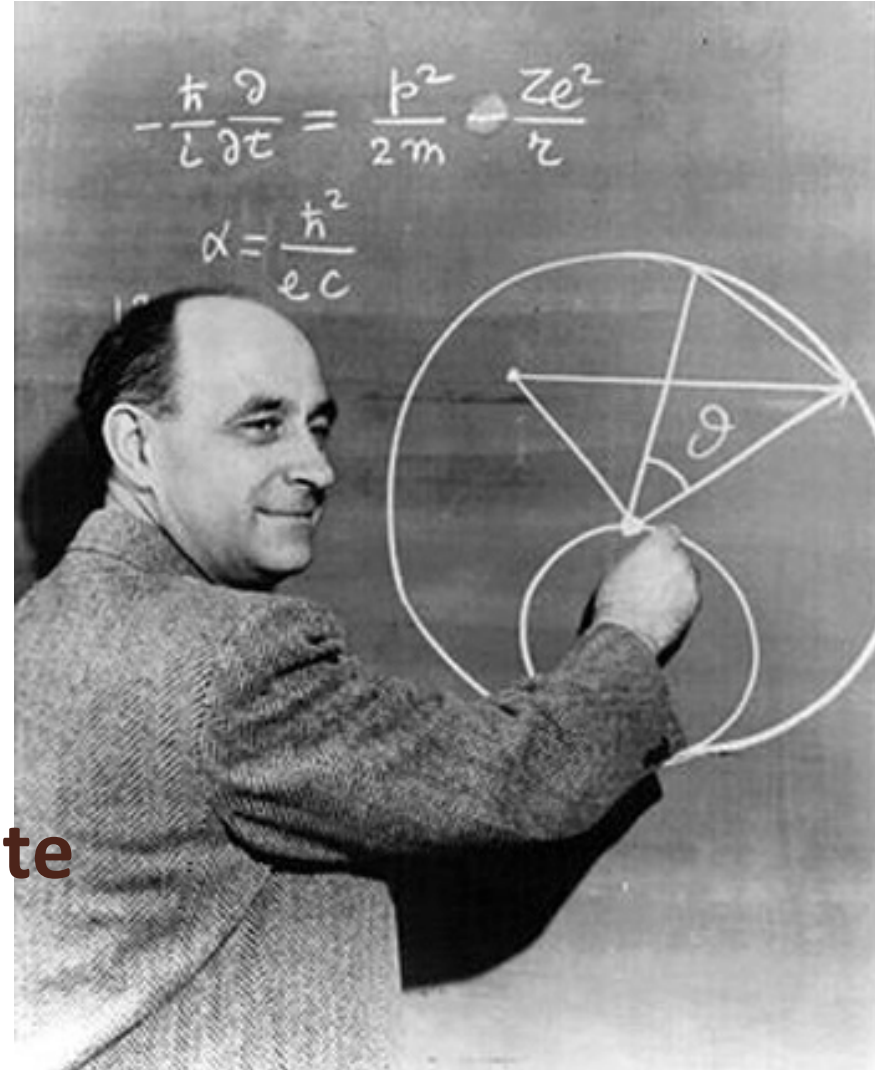
**il decadimento alfa
con l'espulsione di un
nucleo di elio genera
un nuclide che ha in
meno due protoni e
quattro unità di massa**



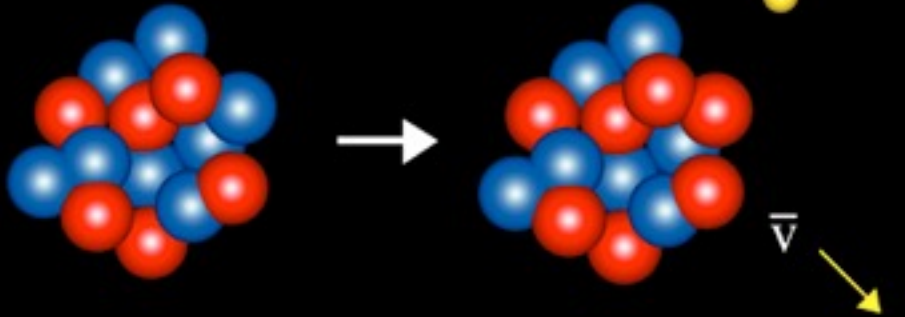
la teoria di Fermi del decadimento beta

un neutrone si trasforma in un protone e in un elettrone, emesso assieme a una nuova particella, neutra e di massa piccolissima, il *neutrino* ν
 $n \rightarrow p + e + \nu$

l'esistenza del neutrino, proposto nel 1932, verrà confermata sperimentalmente solo nel 1956



β

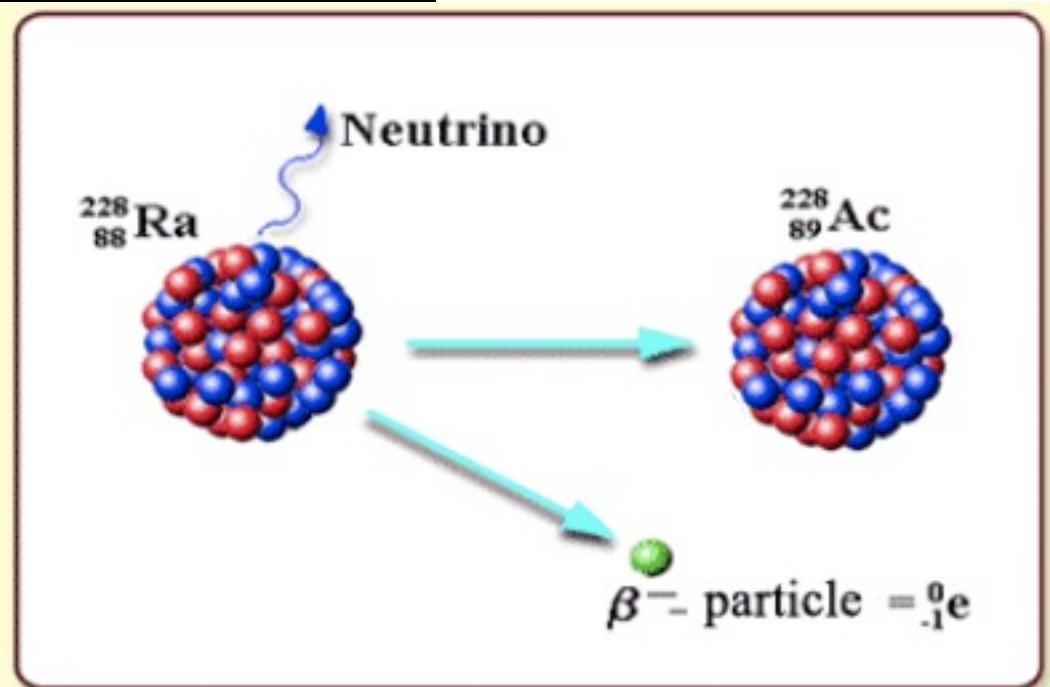


$$Z_f = Z_i + 1$$

$$A_f = A_i$$

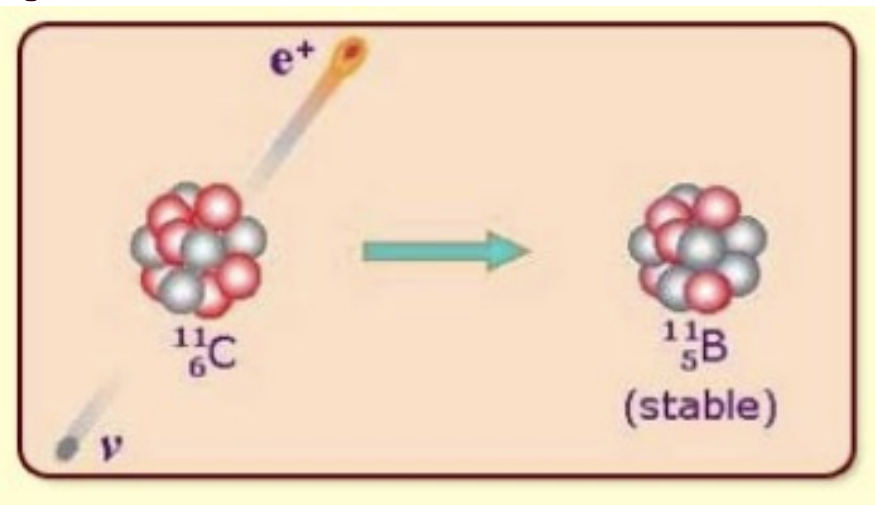
neutrone

\Rightarrow protone +
elettrone +
(anti)neutrino



beta inverso

protone \Rightarrow neutrone + positrone + neutrino



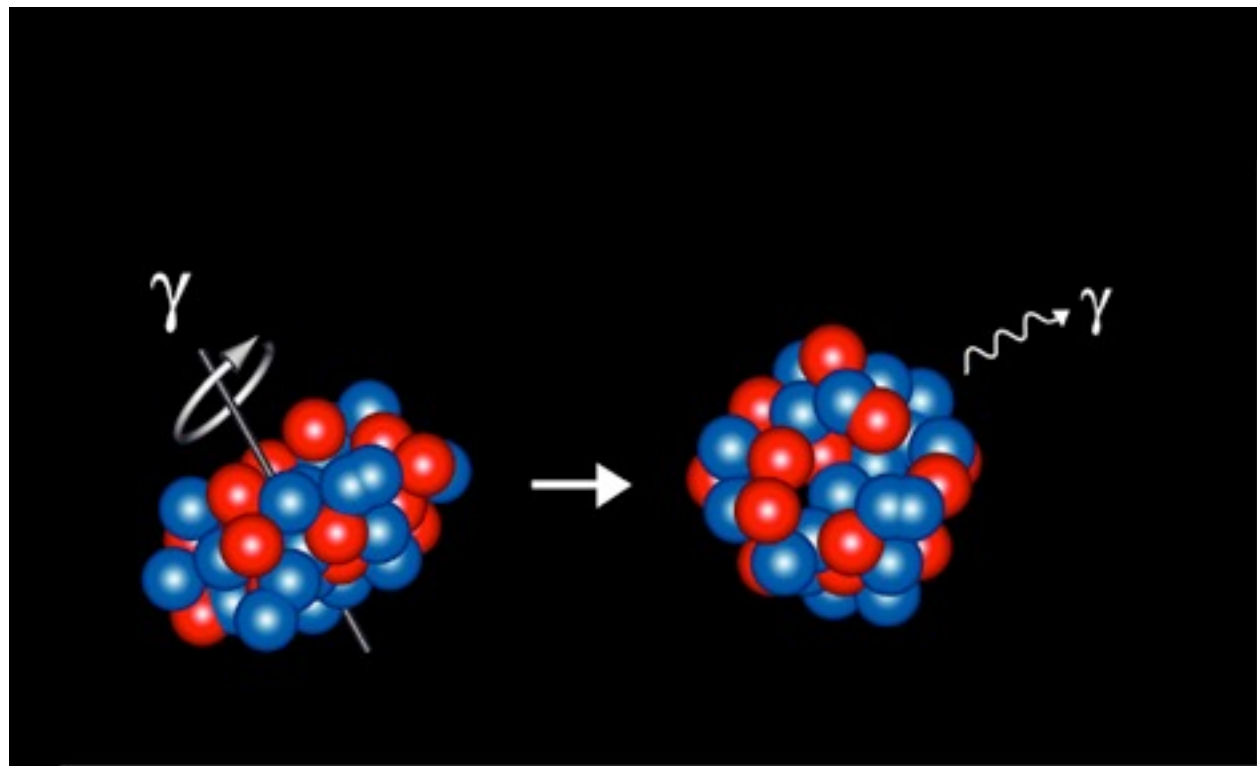
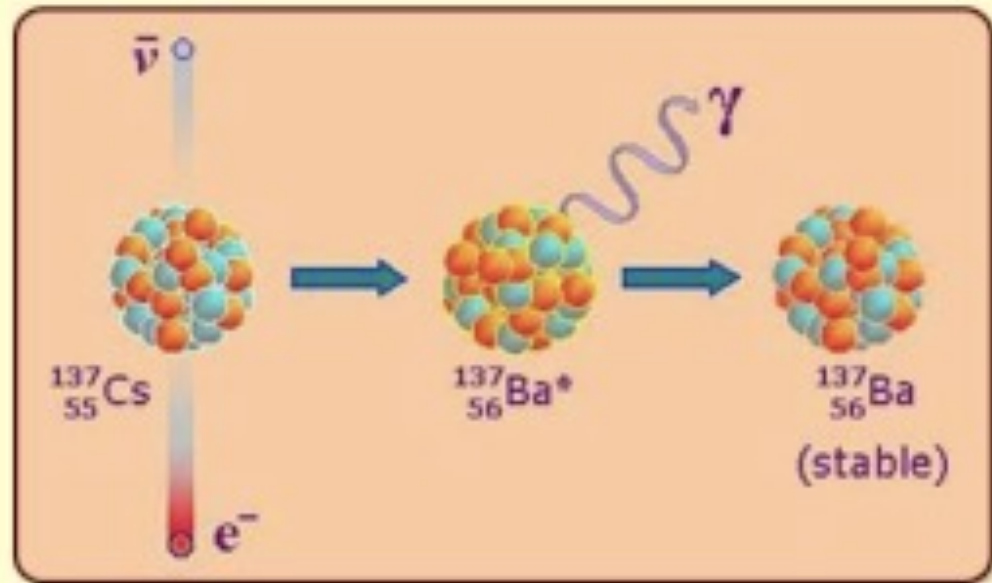
$$Z_f = Z_i - 1$$

$$A_f = A_i$$

poiché la massa del neutrone è maggiore di quella del protone, il decadimento del protone viola il principio di conservazione dell'energia.

Il processo avviene perché l'energia mancante viene fornita "collettivamente" dal resto del nucleo

**i nuclidi prodotti
da processi
radioattivi
possono trovarsi in
stati eccitati
(per esempio
rotazionali) e si
diseccitano
emettendo
fotoni
(raggi gamma)**



URANIUM 238 (U238) RADIOACTIVE DECAY

type of radiation	nuclide	half-life
α	uranium-238	4.47 billion years
β	thorium-234	24.1 days
β	protactinium-234m	1.17 minutes
α	uranium-234	245000 years
α	thorium-230	8000 years
α	radium-226	1600 years
α	radon-222	3.823 days
α	polonium-218	3.05 minutes
β	lead-214	26.8 minutes
β	bismuth-214	19.7 minutes
α	polonium-214	0.000164 seconds
β	lead-210	22.3 years
β	bismuth-210	5.01 days
α	polonium-210	138.4 days
	lead-206	stable

i processi alfa e beta trasformano un elemento in uno differente

l'elemento "figlio" può essere a sua volta radioattivo

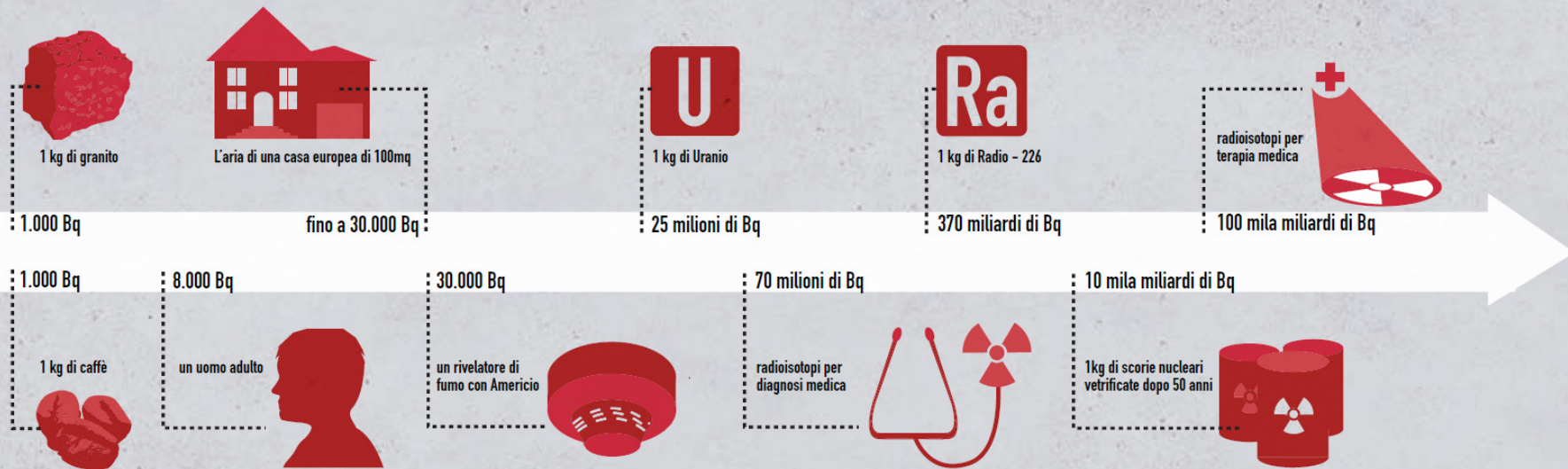
si generano così "famiglie" radioattive, fino al "pronipote" stabile

- Uranium series: $^{238}_{92}\text{U} \rightarrow ^{206}_{82}\text{Pb}$
- Actinium series : $^{235}_{92}\text{U} \rightarrow ^{207}_{82}\text{Pb}$
- Thorium series : $^{232}_{90}\text{Th} \rightarrow ^{208}_{82}\text{Pb}$
- Neptunium series : $^{241}_{94}\text{Pu} \rightarrow ^{209}_{82}\text{Pb}$

i pronipoti stabili delle principali catene radioattive sono isotopi del piombo

i nuclei radioattivi si trovano ovunque, inclusi gli esseri viventi

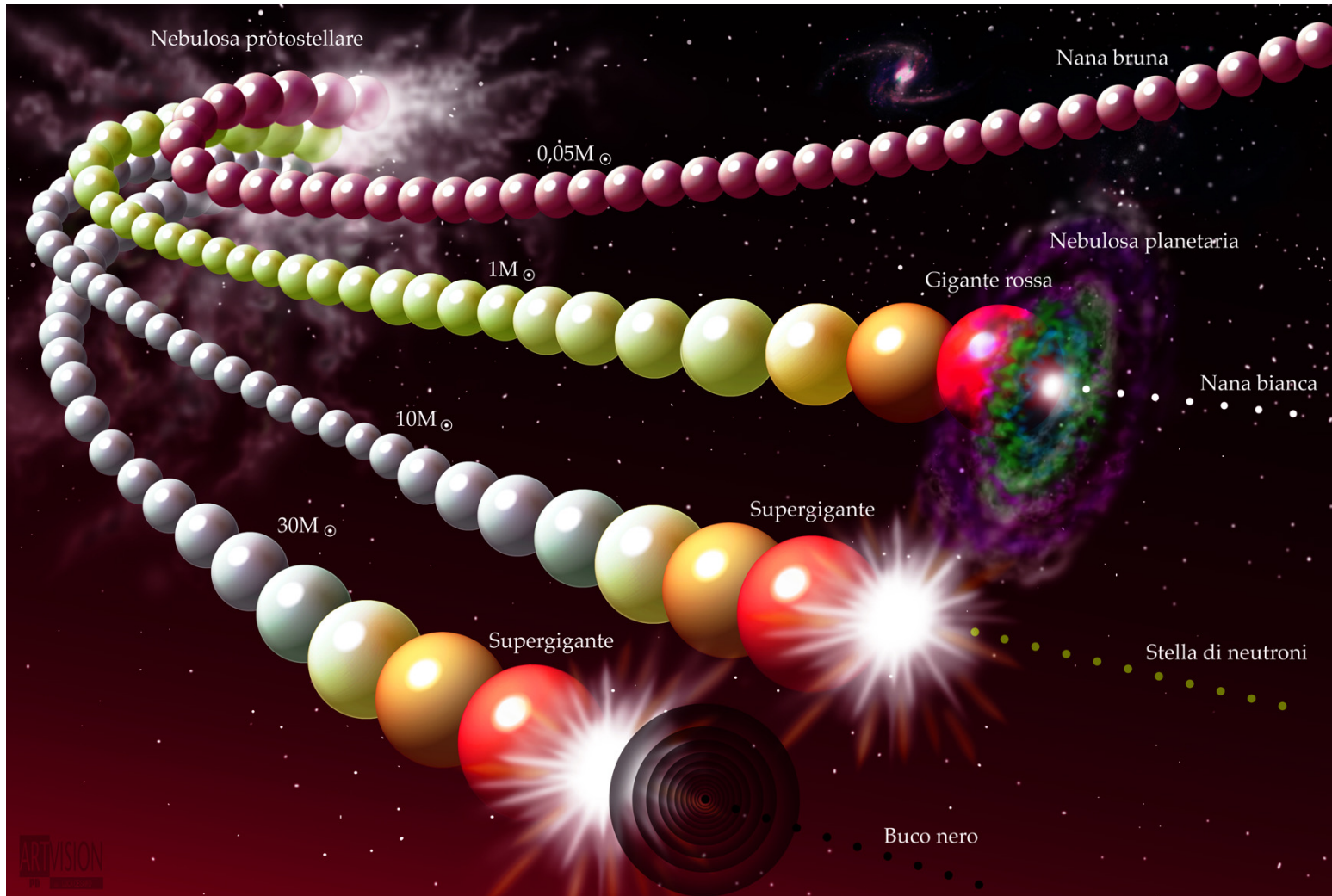
LA RADIOATTIVITÀ SULLA TERRA in becquerel

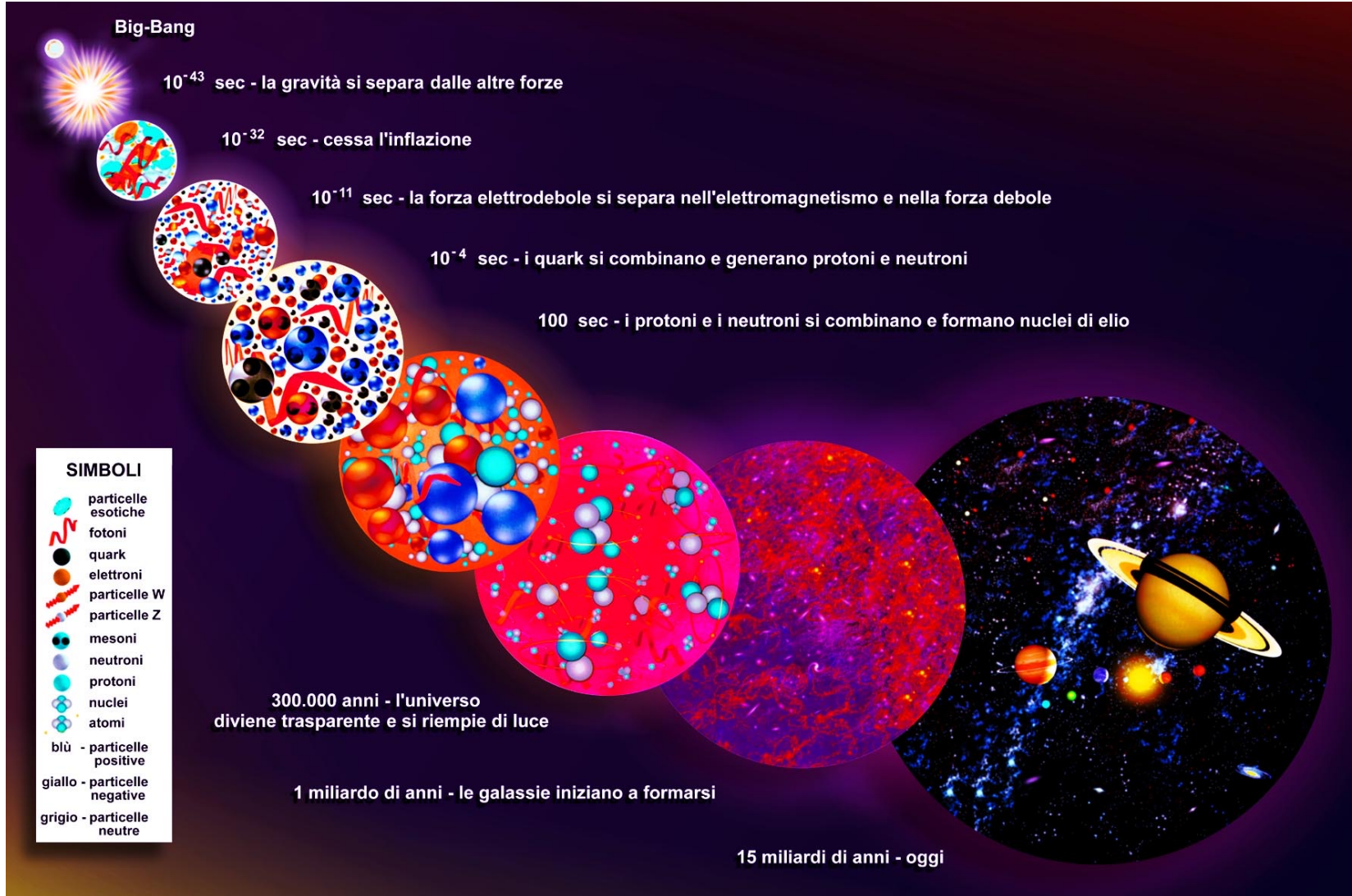


la radioattività è un “regolatore” dei processi naturali

- **la molteplicità dei nuclidi radioattivi rende la radioattività universalmente presente**
- **la varietà delle vite medie rallenta o accelera la successione di reazioni nelle stelle**
- **l'emissione o assorbimento di energia favorisce o ritarda l'evoluzione dei sistemi materiali, sulla terra e nel cosmo**

la radioattività, regolando la velocità delle reazioni nucleari nei vari stadi della vita delle stelle, controlla di fatto l'evoluzione delle stelle



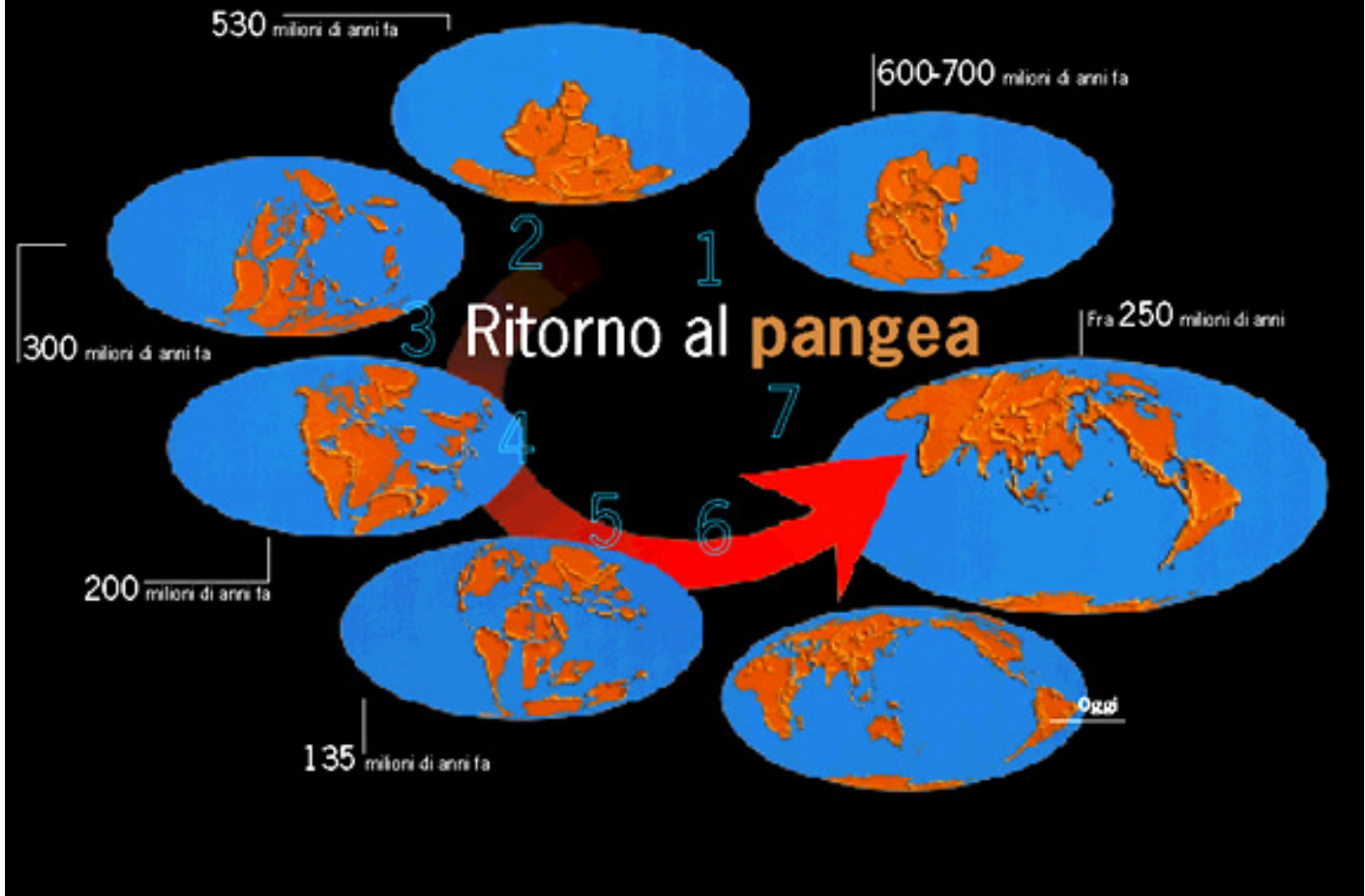


la radioattività entra a regolare i bilanci energetici nelle varie fasi cosmiche e in tal modo controlla l'evoluzione dell'universo



**la radioattività
contribuisce alla
termodinamica
terrestre con le
reazioni esotermiche**

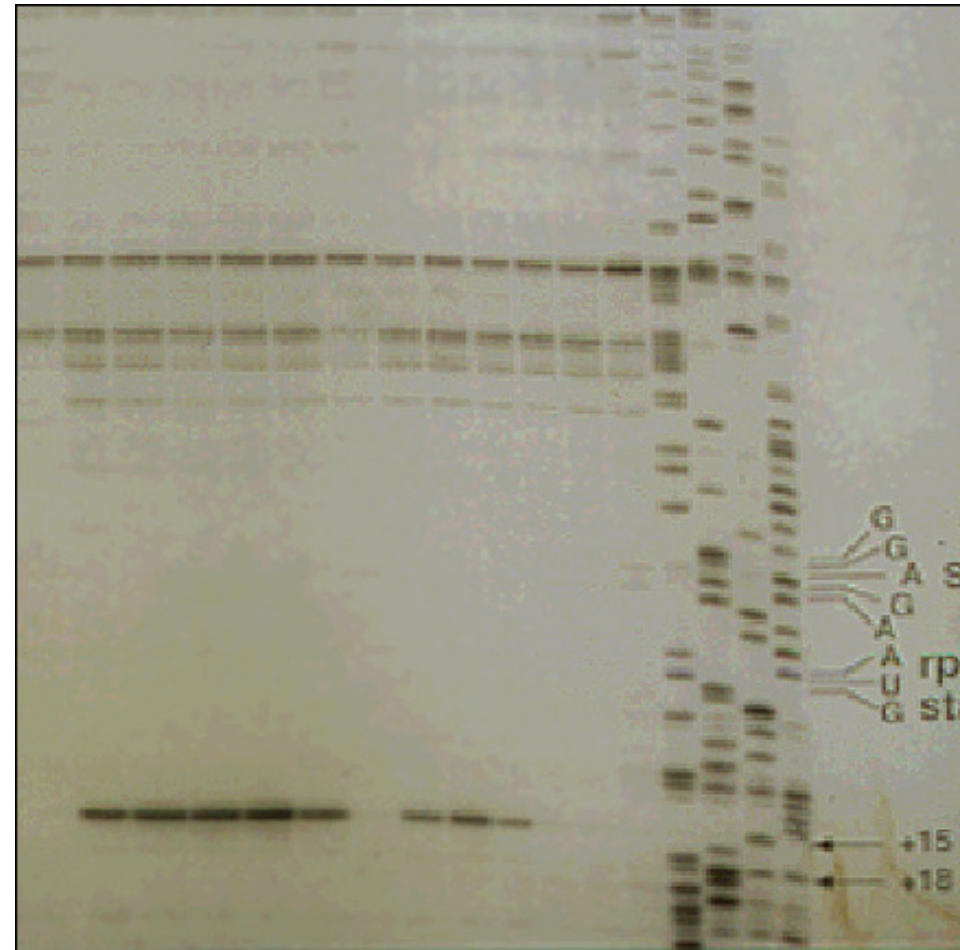




la radioattività controlla la dinamica della terra

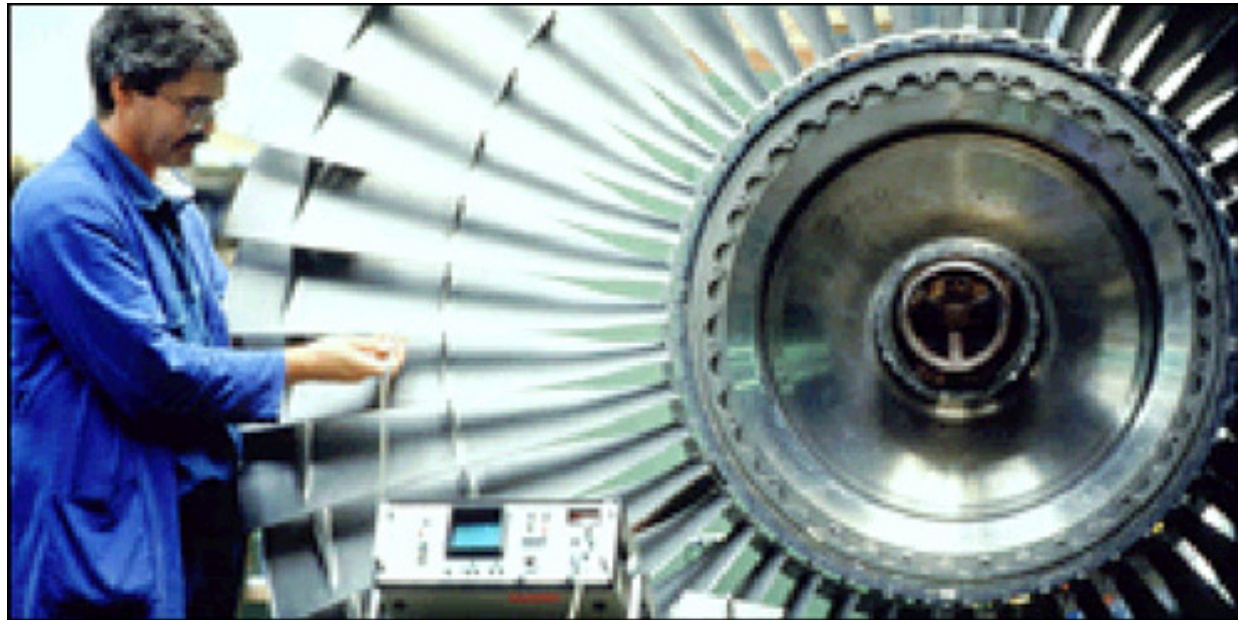
la radioattività è uno strumento essenziale per la ricerca

- ricerche sugli stati condensati
- chimica
- biologia
- geologia
- oceanologia
- scienze ambientali
- controlli ambientali
- climatologia
- ricerca spaziale



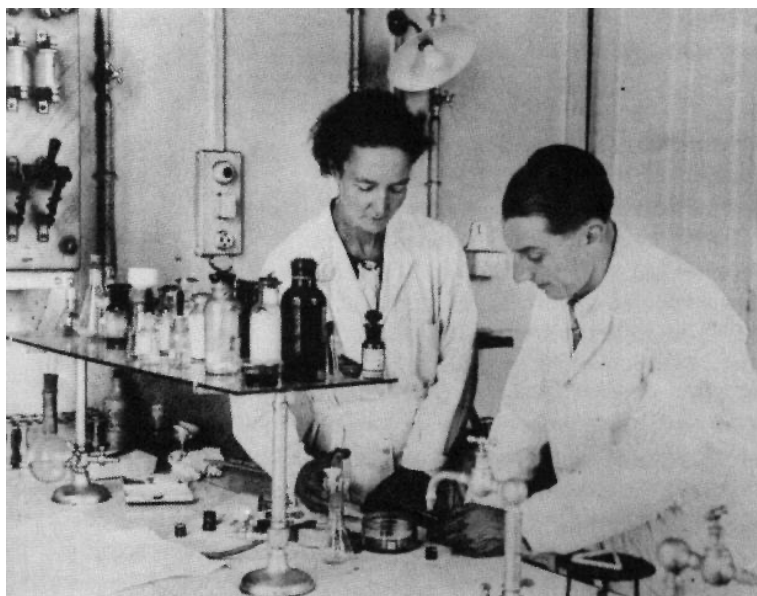
applicazioni della radioattività

- permette di “guardare dentro” le cose e gli esseri viventi
- è misurabile anche in minime quantità
- garantisce analisi non distruttive
- misura l’età di strutture antiche
- disinfetta
- fornisce energia
- produce modificazioni genetiche



per le applicazioni si producono sorgenti artificiali ad hoc

- le sorgenti naturali sono per lo più elementi pesanti
- le loro caratteristiche non sono modificabili
- bombardato con neutroni ogni elemento diventa radioattivo e si può scegliere
- meglio se i neutroni sono lenti ...



REGNO D'ITALIA

MINISTERO DELLE CORPORAZIONI

UFFICIO DELLA PROPRIETÀ INTELLETTUALE

Attestato di Privativa Industriale

№324458

Nel Registro degli attestati di privativa industriale di questo Ufficio è stata regolarmente inscritta la domanda depositata, coi documenti voluti dalla legge, all'Ufficio stesso
nel giorno ventisei del mese di ottobre 1934 alle ore 12,15
da Fermi Enrico,
Amaldi Edoardo,
D'Agostino Oscar, (a Roma
Pontecorvo Bruno,
Rasetti Franco,
Segrè Emilio
e Trabacchi Giulio Cesare
per ottenere una privativa industriale per il trovato designato col titolo:

Metodo per accrescere il rendimento dei procedimenti per la produzione di radioattività artificiali mediante il bombardamento con neutroni.

Il presente attestato non garantisce che il trovato abbia i caratteri voluti dalla legge perché la privativa sia valida ed efficace, e viene rilasciato senza esame preliminare del merito e della novità di esso

Roma, il -2 FEB 1935 Anno XIII

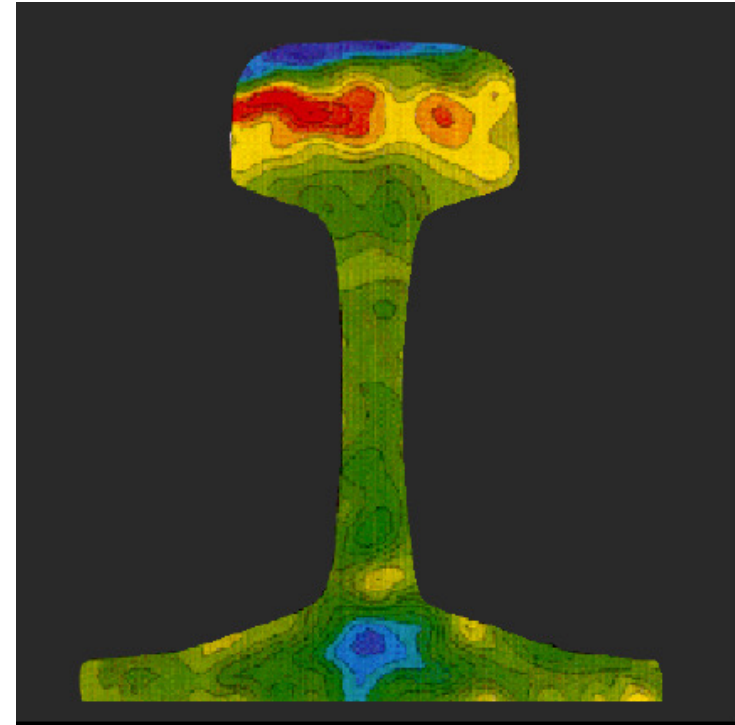
Il Direttore
F. Bissini

Nei riferimenti al presente attestato richiamare soltanto il sudindicato numero, adottando la dizione PRIVATIVA ITALIANA. **324458**

La Tipografia - Roma XII - Ord. 250 - (3.000)

radioattività applicata

- esami non-distruttivi e controlli di sicurezza
- raggi gamma per diagnosi e controlli di sicurezza
- conservazione delle derrate alimentari
- ottimizzazione della fertilità dei suoli e dell'irrigazione – controllo dei sedimenti
- sterilizzazione di presidi medici
- rivelatori antincendio
- controlli di qualità
- oggetti luminescenti
- selezione di piante ottimali
- indurimento delle protesi
- produzione di materiali speciali



controllo di insetti parassiti



**selezione di
cereali resistenti**

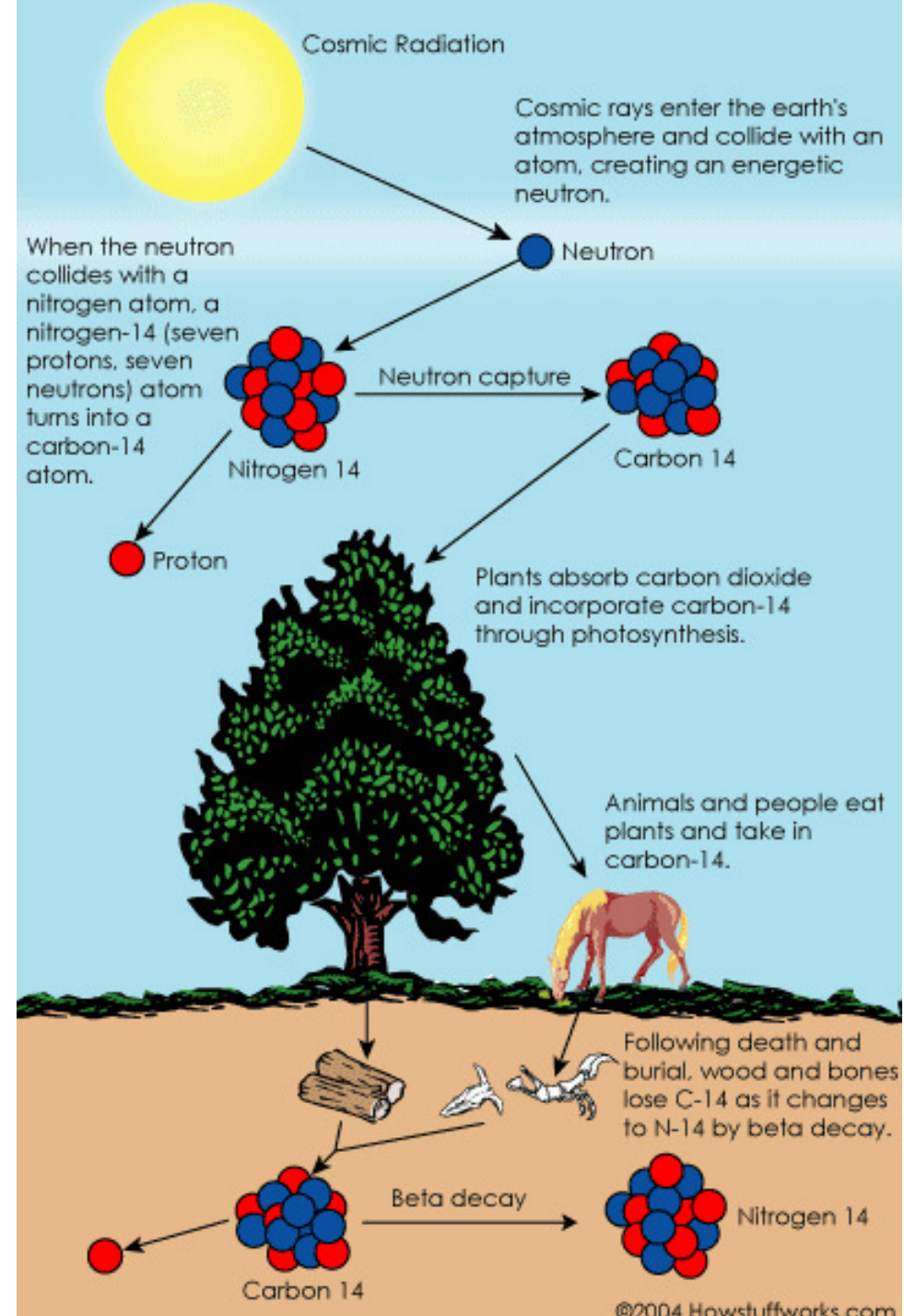
radioattività per l'arte e l'archeologia

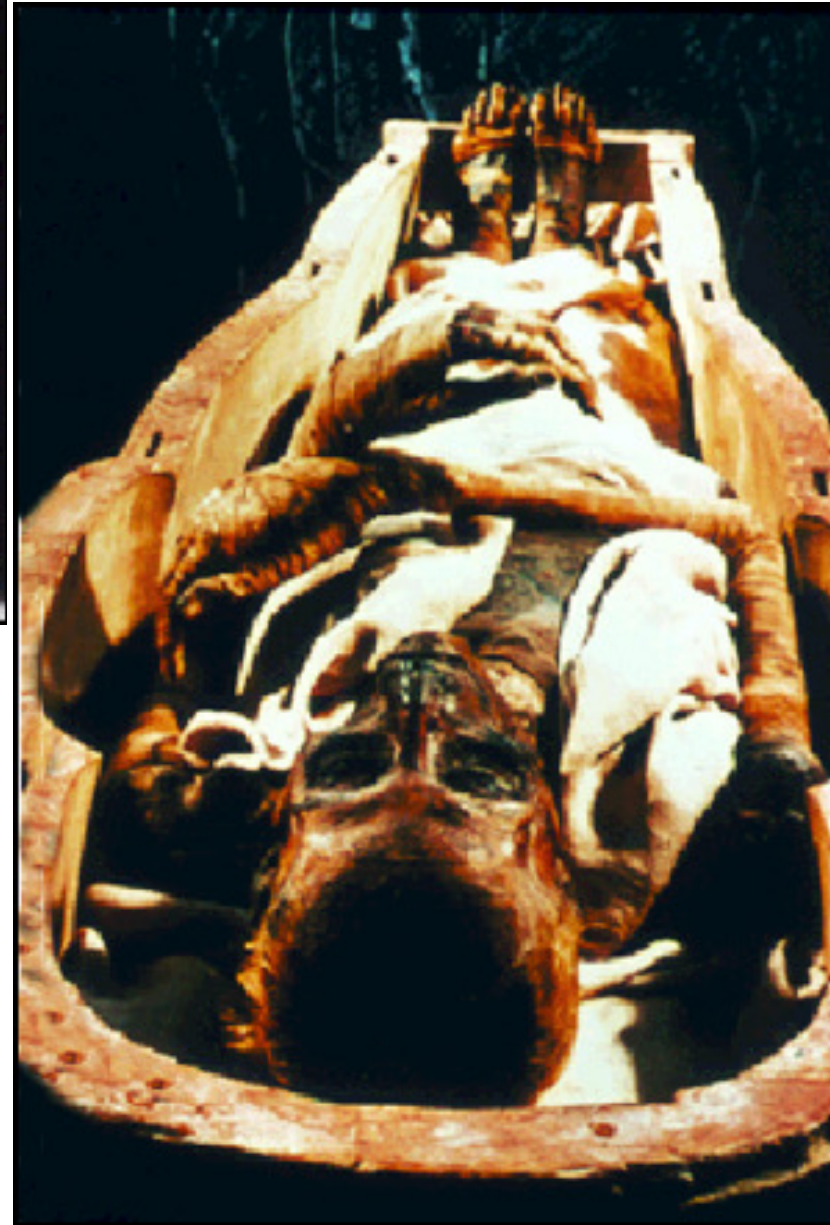
- datazione
- conservazione dei manufatti
- origine dei materiali
 - ▷ tavolozza di pittori
 - ▷ provenienza delle sculture
- analisi non distruttive
- studi strutturali
- esami di autenticità



datazione di materiali di origine biologica con carbonio-14

materiali di legno o ossa alla morte contengono il C-14 assorbito in vita; poi il C-14 decade in N-14 con $T_{1/2} = 5730$ a dalla quantità di N-14 si può stimare l'età del materiale. Dà indicazioni fino a circa 50.000 anni con errori dal 10% al 30%



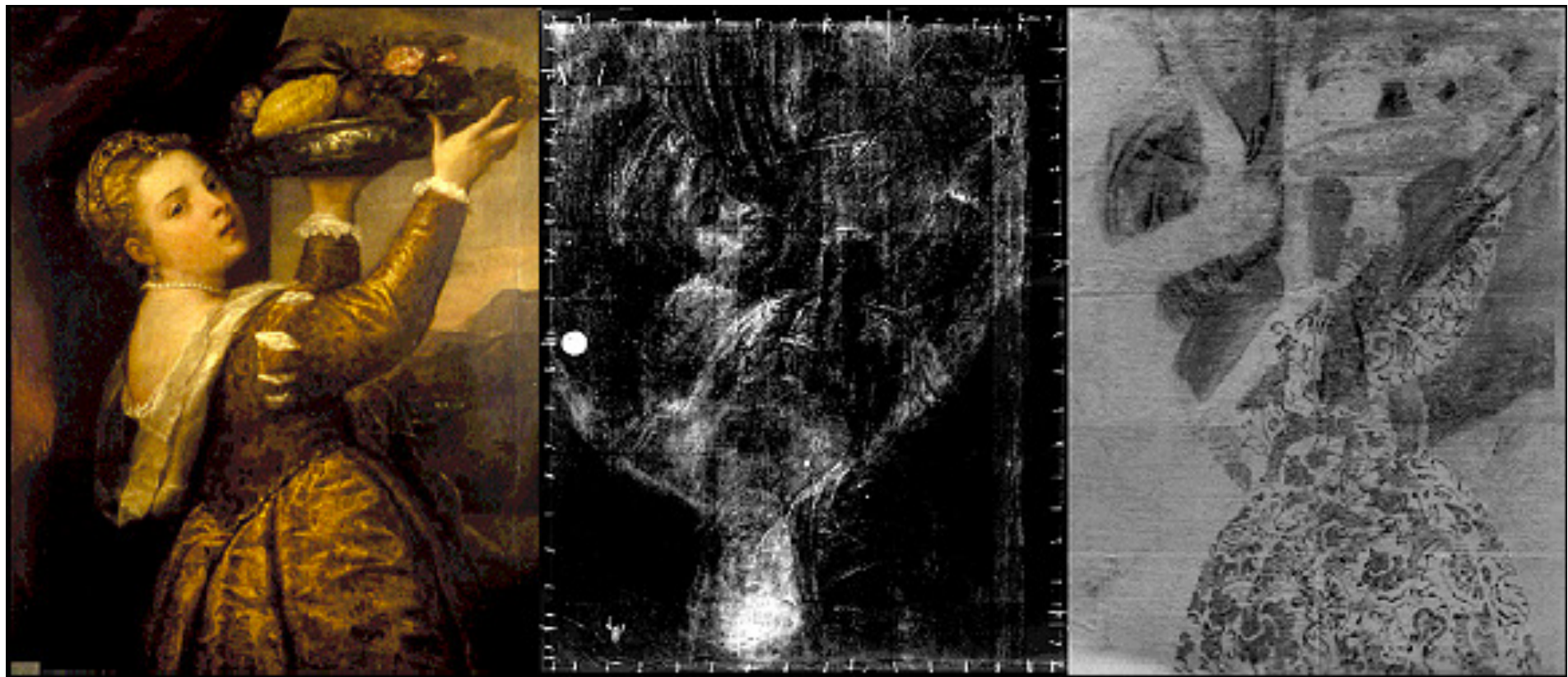


analisi per restauri

“pulizia” di mummie

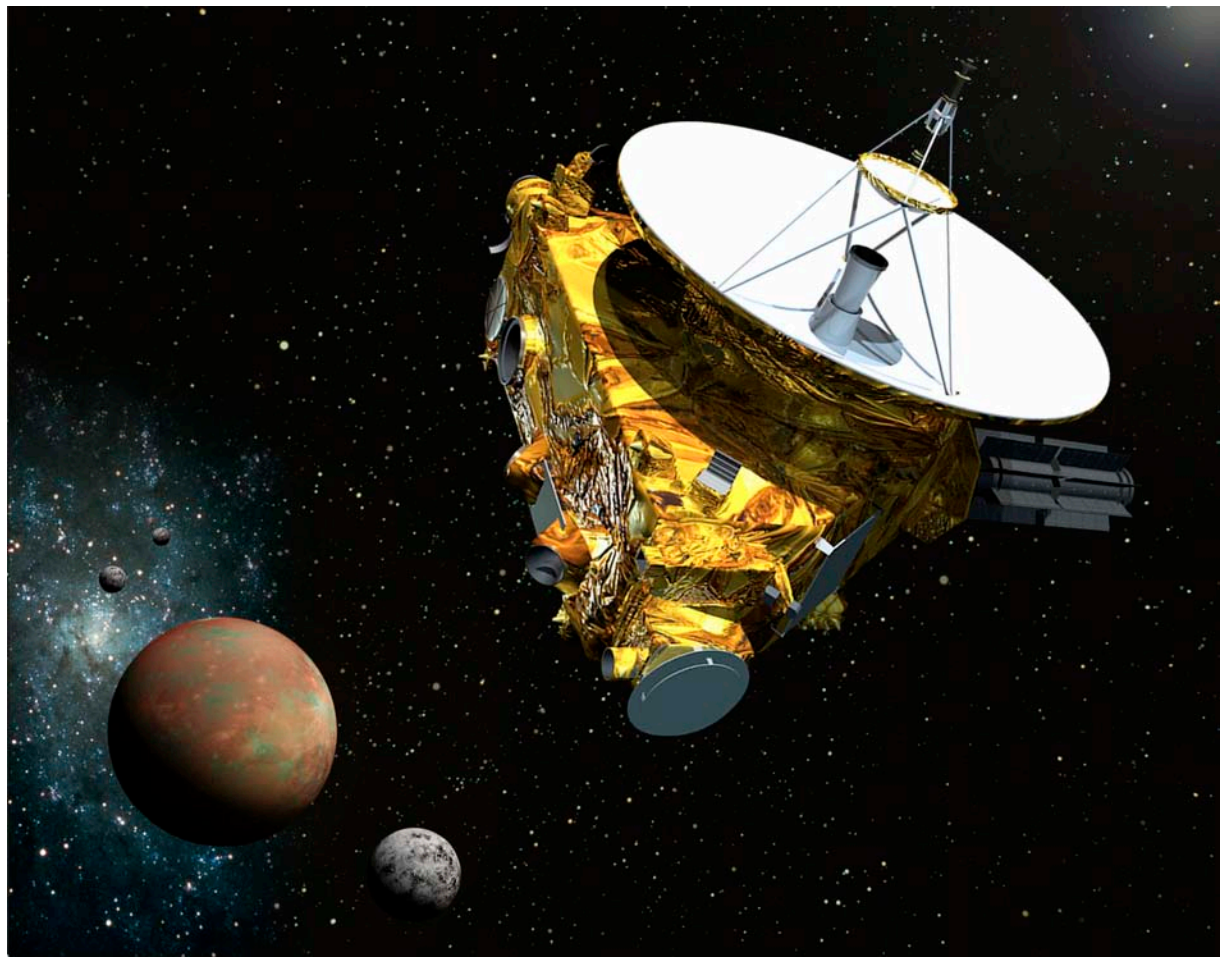


verifiche di autenticità



studio dei ripensamenti d'autore

**la radioattività dà
energia ai satelliti
per missioni
lontane**

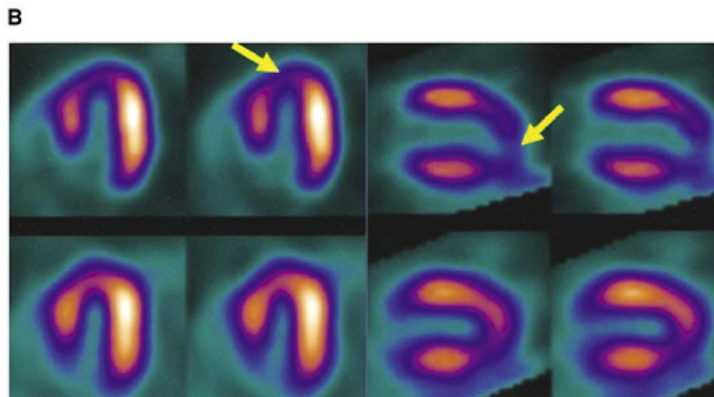
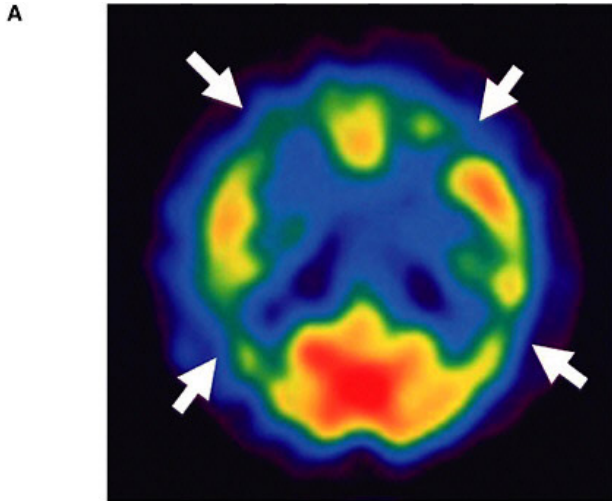


energia dal decadimento alfa del plutonio-238:

- **tempo di dimezzamento 87,7 anni**
- **energia alfa 5,593 MeV**
- **potenza termica 0,5 W per grammo**

radioattività per la salute

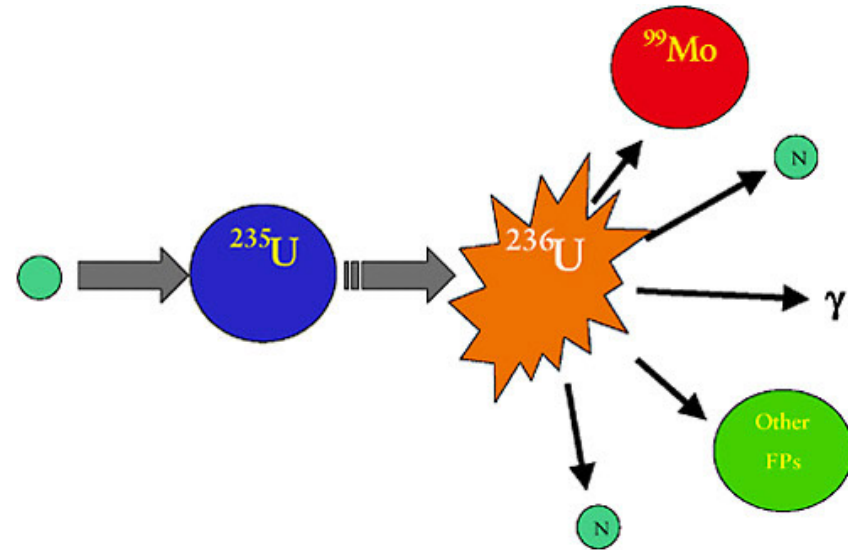
diagnosi



il tecnezio-99m

- è il principale marcatore in diagnostica medica: un 80% di tutte le analisi, per 20–25 milioni di procedure all'anno
- è uno stato eccitato del tecnezio-99 che decade gamma rivelabile con precisione per studiare il comportamento dei vari organi
- viene generato per decadimento radioattivo dal molibdeno-99 (vita media 2,7 giorni), prodotto di fissione dell'uranio.

Il molibdeno viene raccolto in opportuni contenitori (“mucche”) da cui si “munge” il tecnezio



tomografia a emissione di positroni (PET)

La PET è un metodo di indagine funzionale e non invasivo usato in neuroscienze, cardiologia e oncologia.

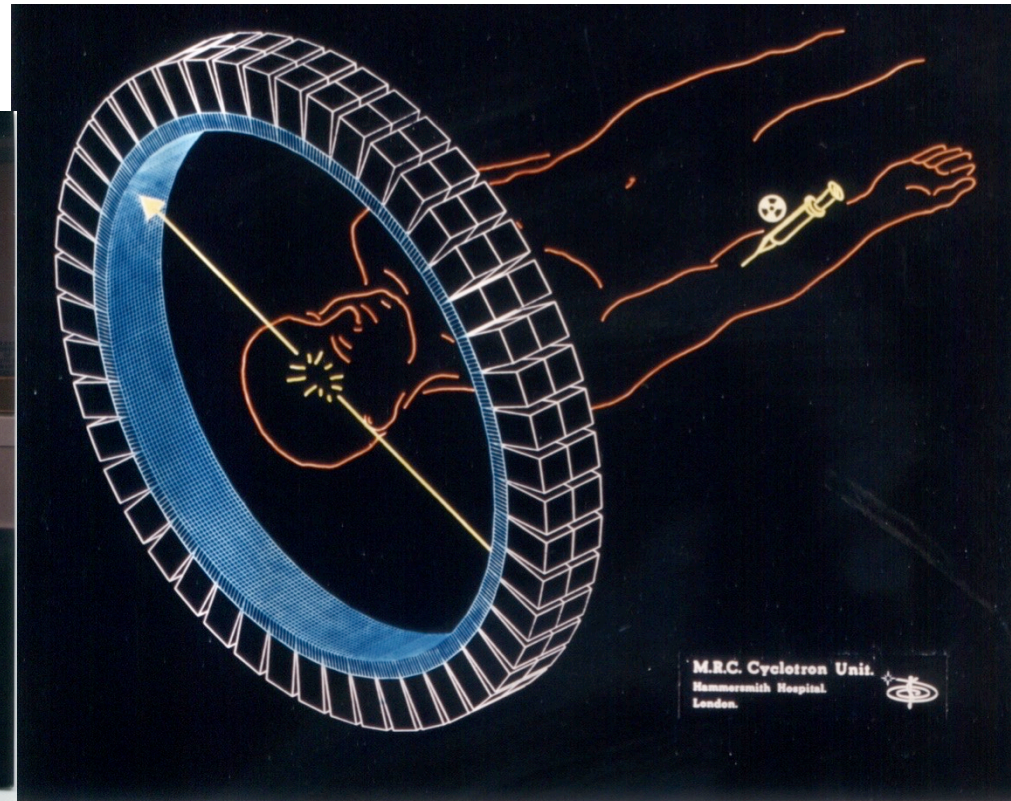
La PET permette di misurare funzioni metaboliche e reazioni biochimiche basiche in vivo senza perturbare il sistema biologico.

Un radiofarmaco con un isotopo beta-inverso viene somministrato al paziente per endovena o per inalazione; il positrone generato dal radionuclide percorsi pochi millimetri interagisce con un elettrone di un atomo vicino in un processo di annichilazione, emettendo in opposte direzioni due fotoni da 511 keV.

La PET permette di derminare la distribuzione spaziale del radiofarmaco nel corpo o nell'organo in esame.

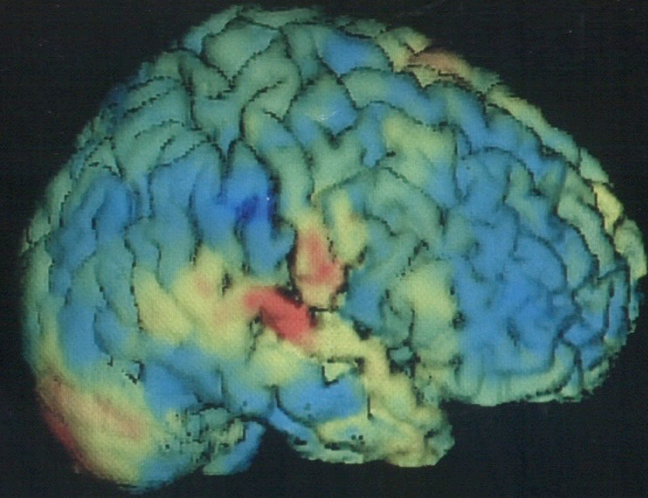
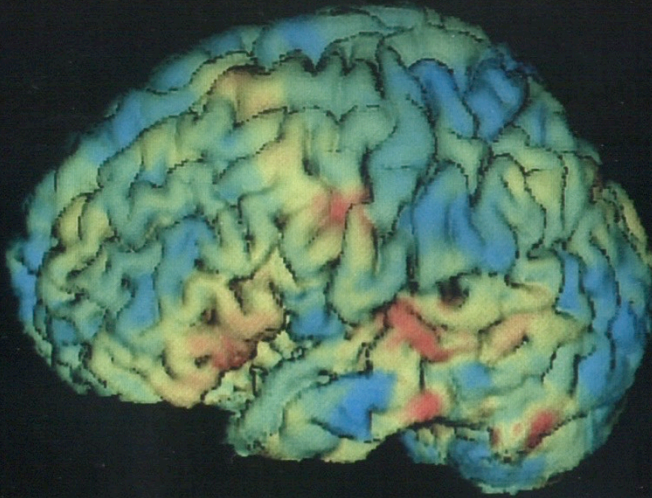
Il tomografo PET

Il tomografo PET comprende un insieme di rivelatori disposti in anelli, che registrano in coincidenza le coppie di fotoni di annichilazione. Si ricostruisce la distribuzione nel corpo del radiofarmaco assorbito

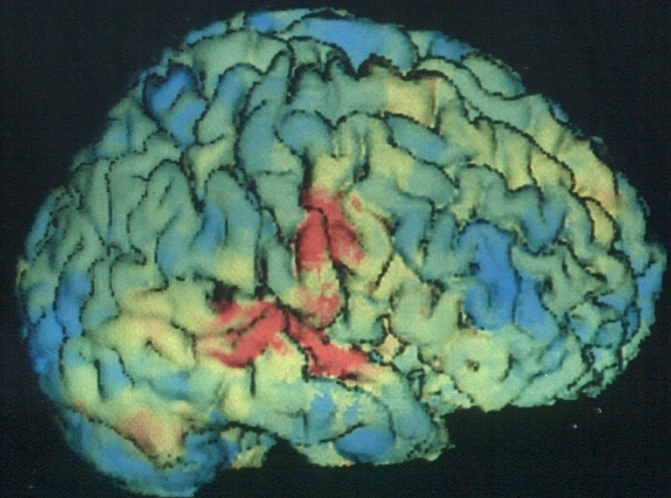
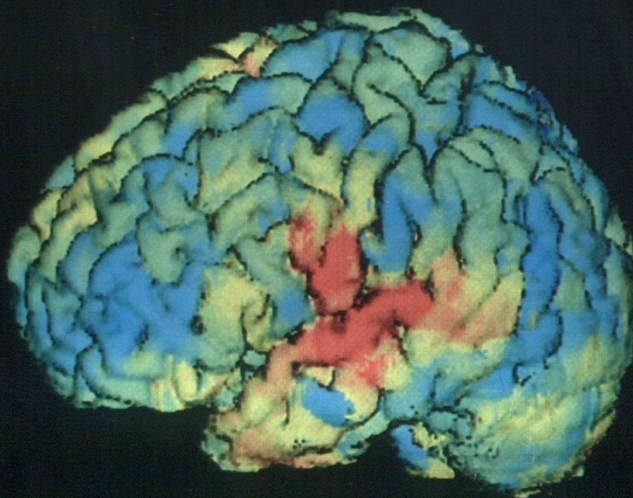


left

right



verb generation



word repetition

sostanze radioattive, in particolare il radium e il radon, vennero immediatamente impiegate per terapie mediche, in particolare per interventi localizzati, per molte malattie, inclusi tumori. Il radon gassoso veniva fatto inspirare per malattie polmonari. Aghi con radium venivano infilati negli organi malati.

INSTITUT DU RADIUM. Paris 17^{me} arr. le 14 1914
LABORATOIRE CENTRAL
1, rue Pasteur-Curie, Paris (5^e)
CERTIFICAT. N.° 3650

DOSAGE DE RADIUM PAR LE RAYONNEMENT Y.

NATURE ET PROVENANCE DE L'APPAREIL.
Appareil à sel de Radium solide - 1 Cct de 10 aiguilles de Achetins.
Boguesse 10 L. - de Achetins - Poids 5,1719 g
apparté par le "Radium Belge" le 17^{me} Arr. 1914
et rendu à " " le 17^{me} " "

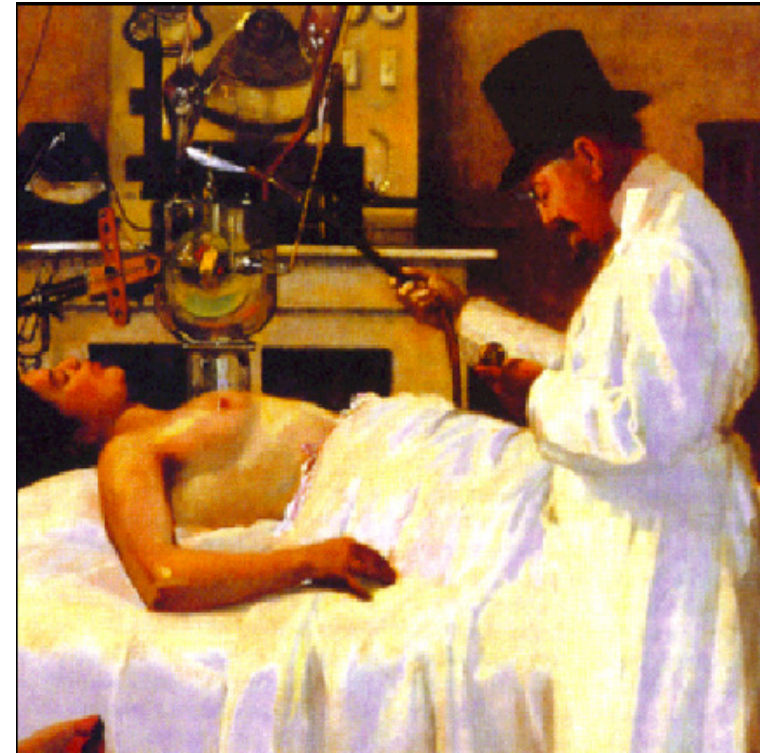
CONDITIONS DE MESURES.
Le rayonnement Y de l'appareil est mesuré au rayonnement T de l'Etalon du Laboratoire.
Si l'appareil n'a pas atteint son rayonnement limite, celui-ci est déduit des mesures par le calcul.
L'appareil qui fait l'objet de ce Certificat a atteint son rayonnement limite.

RÉSULTAT DES MESURES.
Le rayonnement Y limité émis à l'extérieur de l'appareil est équivalent à celui de
6,63 Milligrammes de radium élément.

QUANTITÉ DE RADIUM CONTENUE DANS L'APPAREIL.
Cette quantité est évaluée en tenant compte de l'absorption du rayonnement Y par la paroi
de l'appareil, conformément à l'épaisseur de celle-ci et à son coefficient d'absorption.
L'épaisseur indiquée par le "Radium Belge" est 0,57
La correction qui en résulte est évaluée à
0,7 du rayonnement Y qui émane de la substance.
La quantité de radium contenue dans l'appareil est donc :

MILLIGRAMMES DE RADIUM ÉLÉMENT : 6,64
soixante-six milligrammes, soixante-quatre centièmes,
MILLIGRAMMES de Bromure de Radium hydraté $RaBr_2 \cdot 2H_2O$: 14,57
quatorze milligrammes, cinquante-sept centièmes,
à la condition que la matière employée ne contienne pas d'autres substances radioactives
que le radium et ses dérivés.
La précision des mesures est suffisante pour que l'erreur ne puisse atteindre 1/2 %
Ce Certificat est unique et doit accompagner l'appareil pour lequel il a été délivré.

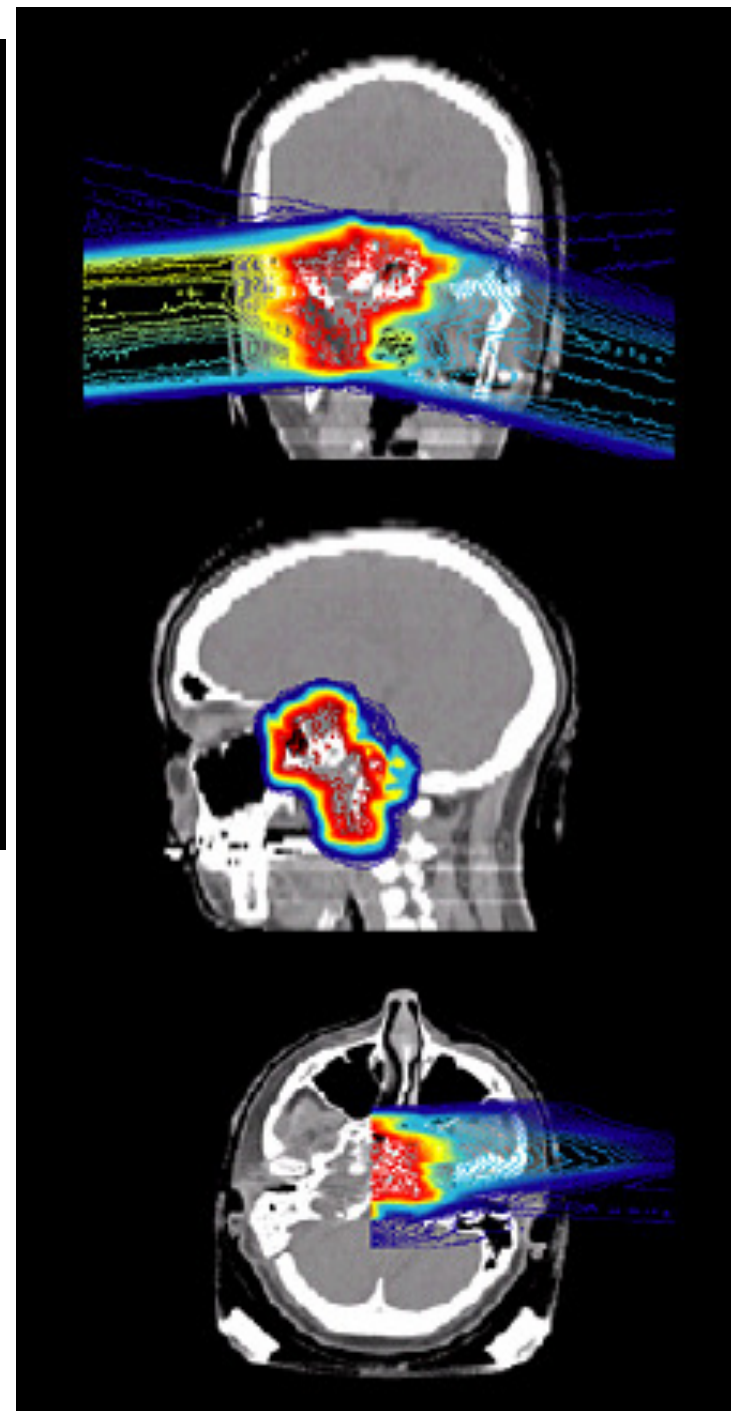
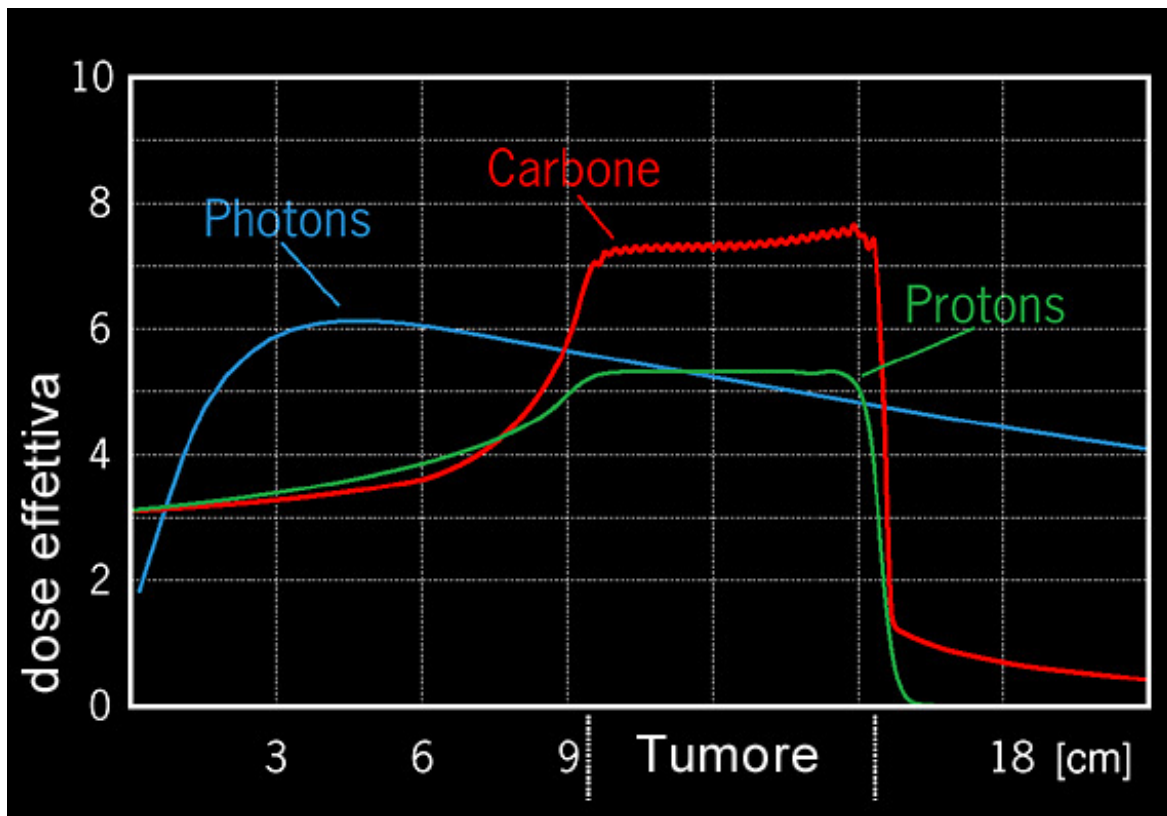
Le Directeur du Laboratoire.
M. Curie



terapia tumorale con raggi gamma:

- sorgenti intense (cobalto-60 o cesio-137)
- generati da fasci di elettroni eccelerati





nella terapia tumorale con fasci di particelle si ottimizza la distribuzione spaziale in modo da colpire la sola zona malata

effetti biologici delle radiazioni

gli atomi e le molecole colpiti alterano le proprietà chimiche delle singole molecole biologiche

a seconda della molteplicità dei danni

⇒ si possono danneggiare intere cellule

⇒ che possono produrre effetti sui tessuti

⇒ che possono produrre effetti sugli organi

fino a coinvolgere tutto l'essere vivente in un processo di gravità crescente

The Revenge of the

RADIOACTIVE LADY



a Novel

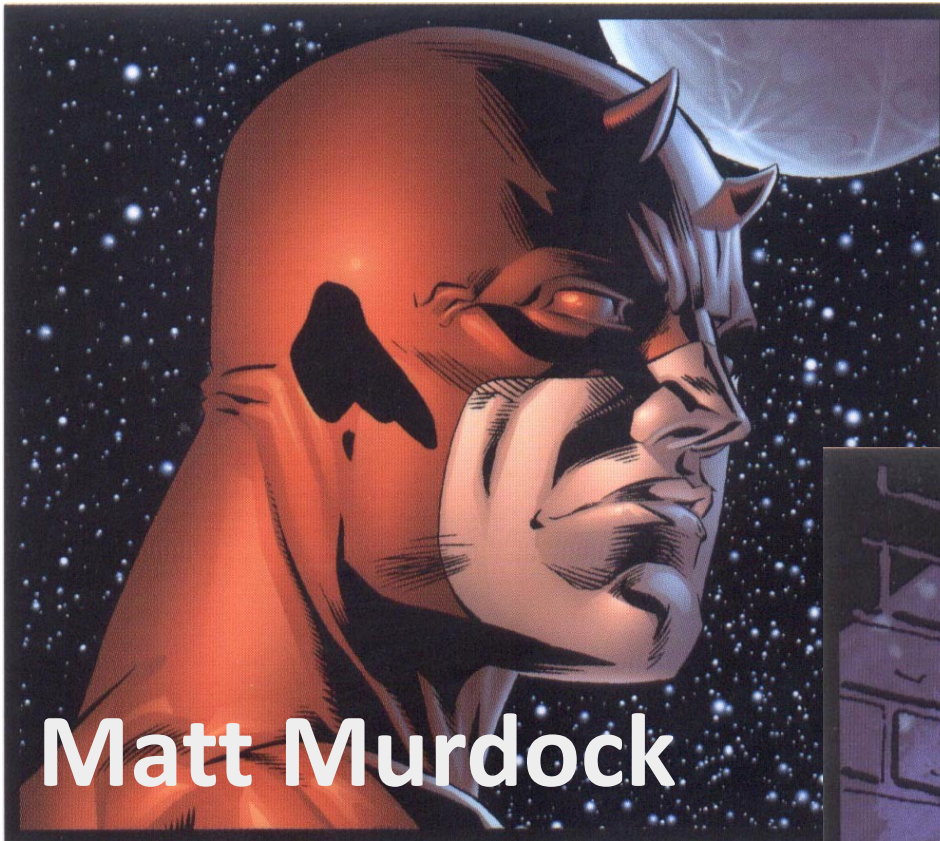
ELIZABETH STUCKEY-FRENCH

AUTHOR OF MERMAIDS ON THE MOON

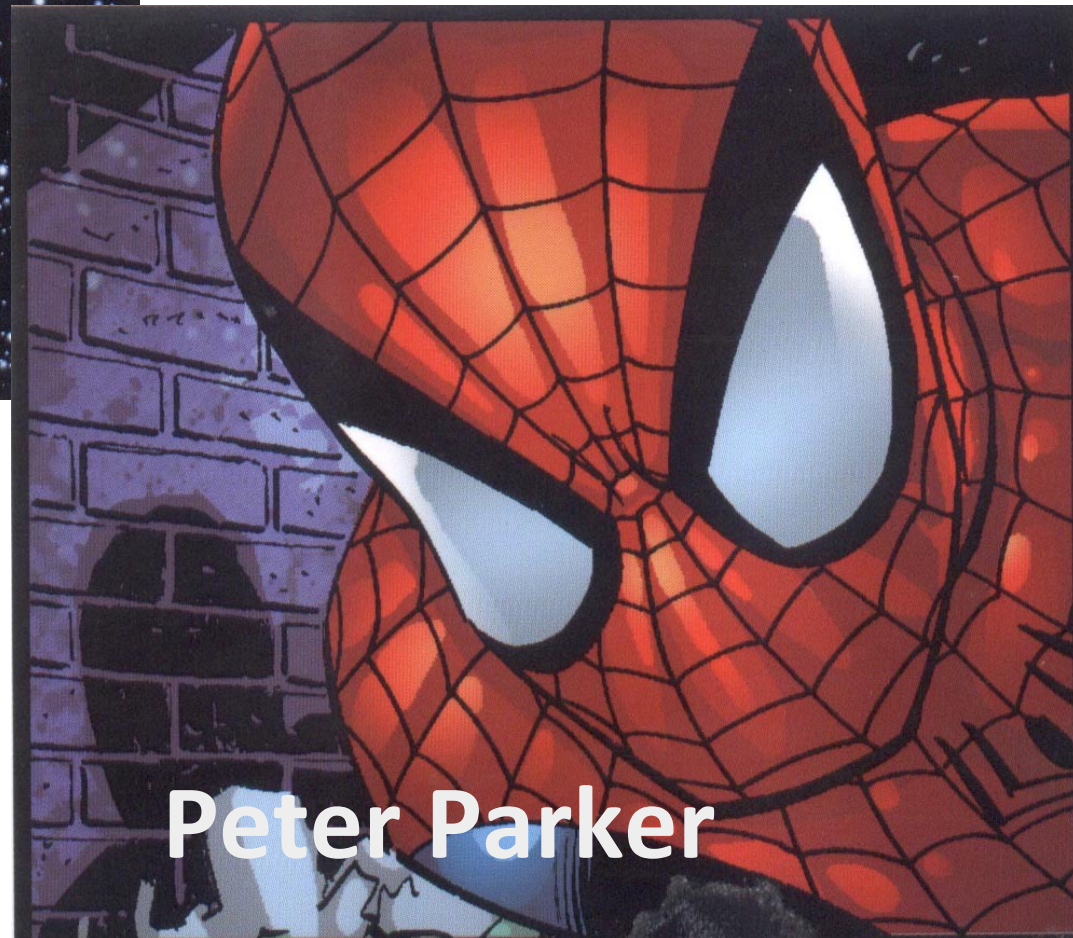


**effetti
sorprendenti ...**

**la radioattività genera
supereroi ...**



Matt Murdock



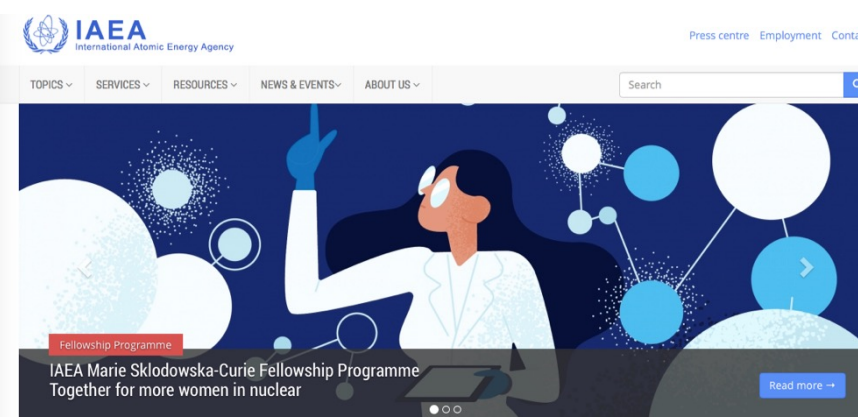
Peter Parker

**gli effetti
biologici
delle
radiazioni
dipendono
da molti
fattori**



principali organizzazioni internazionali attente agli effetti delle radiazioni

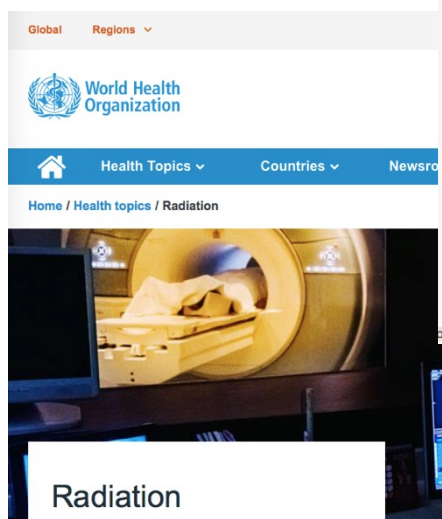
- UNSCEAR, United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation
- WHO, World Health Organization
- IAEA, International Atomic Energy Agency
- ICRP, International Commission on Radiological Protection



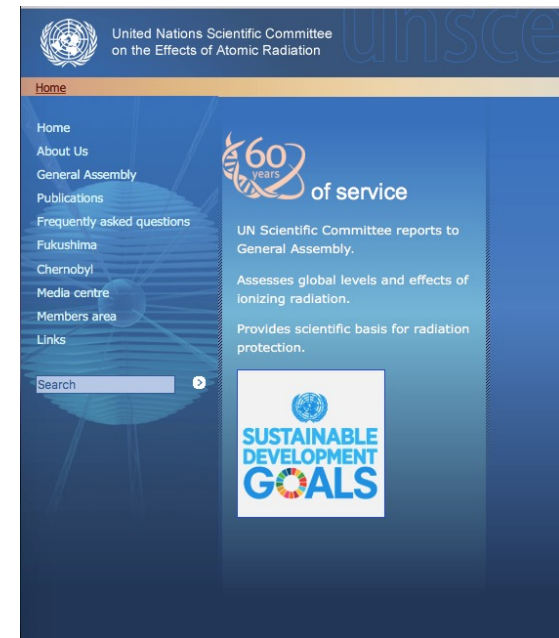
The screenshot shows the IAEA website with a navigation bar including 'TOPICS', 'SERVICES', 'RESOURCES', 'NEWS & EVENTS', and 'ABOUT US'. A search bar is present. The main banner features an illustration of a woman in a lab coat pointing upwards, surrounded by glowing particles and circles. Below the banner is a 'Fellowship Programme' section with the text 'IAEA Marie Skłodowska-Curie Fellowship Programme Together for more women in nuclear' and a 'Read more' button.

Latest news

12 March 2020
IAEA and FAO Help Zanzibar Grow More Rice



The screenshot shows the WHO website with a navigation bar including 'Global' and 'Regions'. The main banner features the WHO logo and the text 'World Health Organization'. Below the banner is a 'Health Topics' section with a 'Radiation' link. A 'Radiation' section is visible at the bottom of the page, featuring an image of a person in a lab coat looking at a computer monitor.



The screenshot shows the UNSCEAR website with a navigation bar including 'Home', 'About Us', 'General Assembly', 'Publications', 'Frequently asked questions', 'Fukushima', 'Chernobyl', 'Media centre', 'Members area', and 'Links'. A search bar is present. The main banner features the UNSCEAR logo and the text 'United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation'. Below the banner is a '60 years of service' section with the text 'UN Scientific Committee reports to General Assembly. Assesses global levels and effects of ionizing radiation. Provides scientific basis for radiation protection.' A 'Sustainable Development Goals' logo is visible at the bottom right.

gli effetti biologici dipendono in modo primario dalla dose assorbita

- **dose**: energia rilasciata dalla radiazione per unità di massa dell'organo ricevente; si misura in Grey

$$1 \text{ Gy} = 1 \text{ J/kg}$$

l'energia è data dall'attività per l'energia della specifica radiazione

- **dose equivalente**: tiene conto degli effetti biologici specifici e si misura in Sievert

$$\text{Sv} = w \text{ Gy}$$

w fattore peso tiene conto dell'efficacia biologica della radiazione e la sensibilità del tessuto esposto

il fattore peso w dipende dal modo in cui le radiazione depositano l'energia

$w = 1$ per fotoni, elettroni e positroni

$w = 2$ per protoni

$w = 5$ per alfa

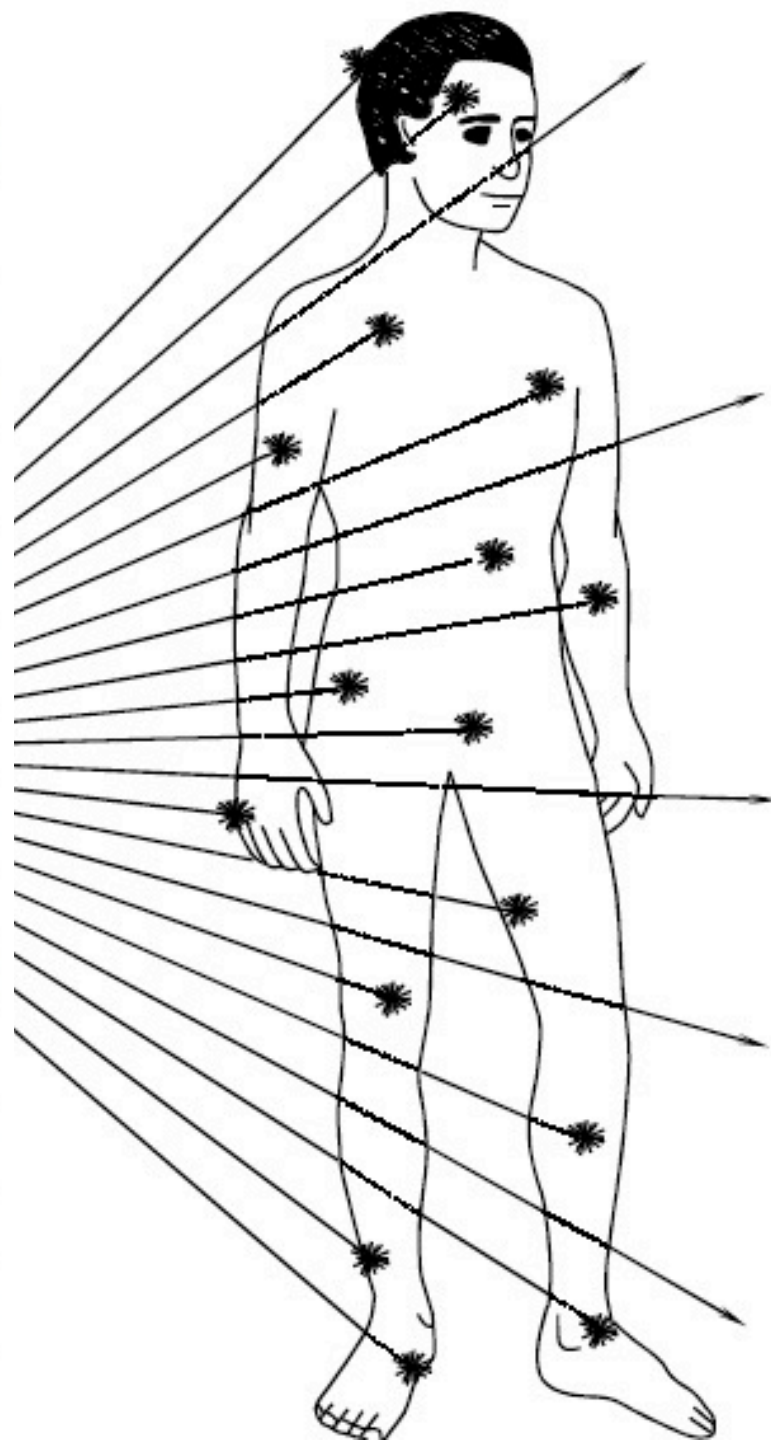
$5 \leq w \leq 20$ per neutroni a seconda dell'energia

**i vari organi risentono in vario modo delle radiazioni
poco la pelle, più gli organi interni fino alle gonadi
con w fra 0,01 e 0,20**

Equivalency Weighting Factors^[1]

Radiation type and energy range	Factor
electrons, positrons, muons, or photons (gamma, X-ray)	1
neutrons <10 keV	5
neutrons 10–100 keV	10
neutrons 100 keV – 2 MeV	20
neutrons 2 MeV – 20 MeV	10
neutrons >20 MeV	5
protons other than recoil protons and energy >2 MeV	2
alpha particles, fission fragments, nonrelativistic heavy nuclei	20

Tissue type	Factor
bone surface, skin	0.01
bladder, breast, liver, esophagus, thyroid, other	0.05
bone marrow, colon, lung, stomach	0.12
gonads	0.20

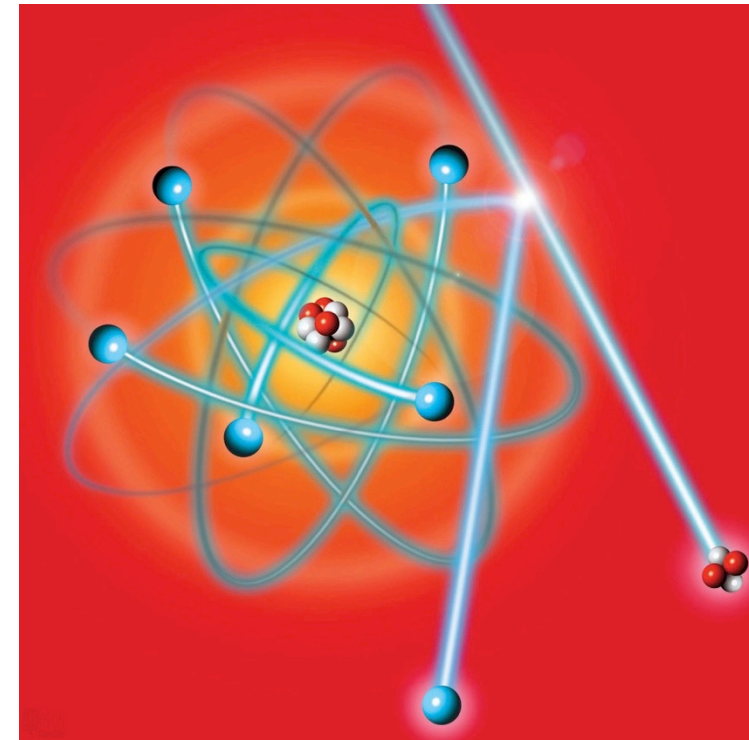


azioni fisiche delle radiazioni

le radiazioni interagiscono in vario modo con le cellule degli organi che colpiscono; possono:

- liberare elettroni atomici (ionizzazione)
- reagire con i nuclei e trasformarli
- venir assorbite dalle molecole e modificarle
- cedere energia

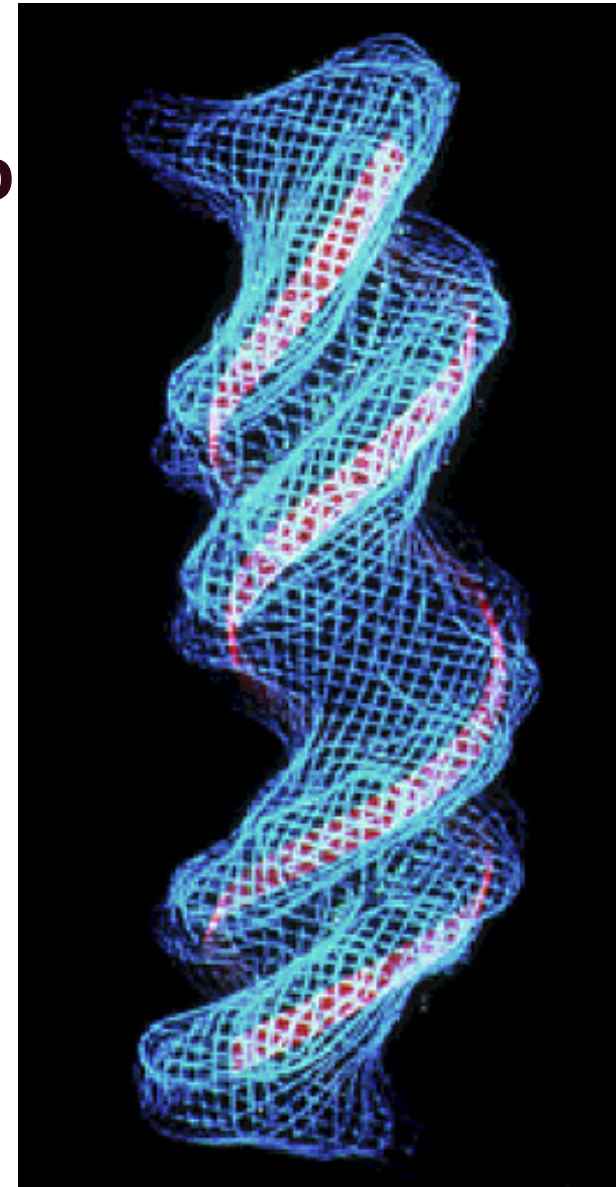
**una particella alfa ionizza
un atomo di carbonio**



azione diretta delle radiazioni: danni al DNA

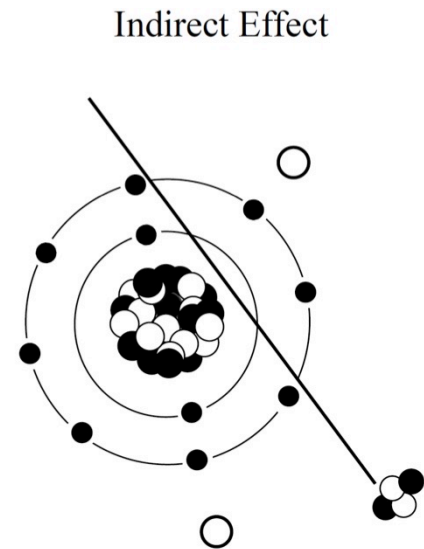
- la rottura del DNA in un punto viene riparata nel giro di un giorno**
- rotture doppie sono difficilmente riparabili e possono creare patologie**

**secondo l'Académie des Sciences
3000 particelle ionizzanti su una
cellula producono nel DNA
1000 lesioni semplici e 40 doppie**



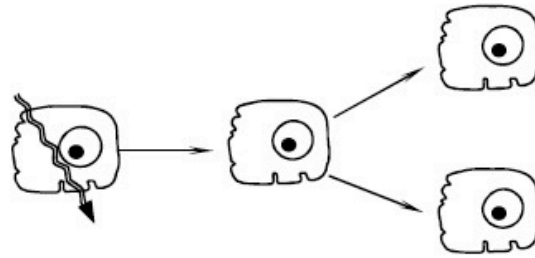
azione indiretta: alterazione della cellula

- un attacco diretto al DNA è molto raro date le piccole dimensioni
- la probabilità di interazione con l'acqua presente nella cellula è molto più alta
 - ▷ la radiazione può rompere il legame molecolare dell'acqua producendo idrogeno e idrossile (HO)
 - ▷ questi frammenti possono combinarsi in sostanze tossiche, come il perossido d'idrogeno H_2O_2

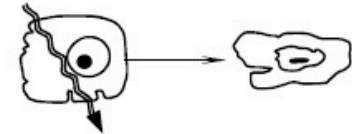


le cellule colpite possono:

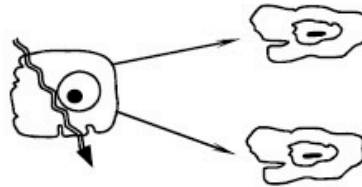
- riparare il danno e suddividersi regolarmente
- morire
- generare cellule che non sopravvivono
- generare cellule difformi



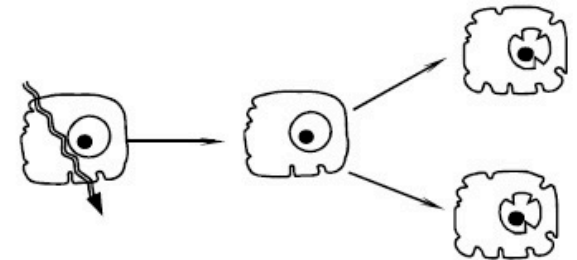
NORMAL REPAIR OF DAMAGE



CELL DIES FROM DAMAGE



DAUGHTER CELLS DIE



NO REPAIR OR NON-IDENTICAL REPAIR BEFORE REPRODUCTION

danni deterministici da radiazioni

- **per manifestarsi necessitano di una quantità minima di dose**
 - ▷ **in genere ci sono valori di soglia della dose al disotto dei quali non si ha alcun effetto**
- **gli effetti sono tanto più gravi quanto maggiore è la dose**
- **è possibile stabilire un limite di sicurezza, in termini di esposizione all'agente nocivo, che garantisca la popolazione dall'insorgenza del danno**

danni deterministici da radiazioni

- effetti patologici iniziano a partire da dosi equivalenti di 150 mSv in una sola esposizione su tutto il corpo**
- sopra i 500 mSv in una sola esposizione su tutto il corpo si supera il 50% di probabilità di decesso**
- una dose di 7000 mSv porta a morte immediata**

Dose addizionale dovuta a 30 ore di volo ad una altitudine di 10000 metri

0,1 mSv/a

ca. 7000 mSv

Dose letale per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Dose limite di esposizione alle radiazioni artificiali non terapeutiche consentita ai cittadini europei

1 mSv/a

ca. 4000 mSv

Grave malattia (letale al 50%) per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Esposizione media alle radiazioni in Europa per diagnosi e trattamenti medici

1,1 mSv/a

ca. 1000 mSv

Primi segni di una leggera malattia per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Esposizione naturale media in Europa

2,4 mSv/a

ca. 250 mSv

Primi effetti clinici rilevabili per un singolo irraggiamento su tutto il corpo

Dose naturale addizionale per abitanti in case fatte di calcestruzzo o granito

3 mSv/a

200 mSv/a

Massima esposizione naturale sulla terra

20 mSv/a

Valore limite di esposizione consentita in Europa per motivi professionali

sintomi per alte dosi di radiazione

Sintomi	150 mSv	500 mSv	600 mSv	1000 mSv
Nausea e vomito				
Frequenza	comune	100%	100%	100%
Inizio	qualche ora	qualche ora	qualche ora	mezzora
Durata	≤ 1 giorno	1 – 2 giorni	≤ 2 giorni	≤ 1 giorno
Periodo di latenza	2 settimane	2 – 3 settimane	≤ 2 settimane	1 settimana
Fase finale				
Durata	1 mese	1 mese	≤1 mese	1 settimana
Letalità	~0%	~50%	~90%	~100%

**alte dosi
concentrate su
organi specifici
possono
produrre
necrosi locali**



danni stocastici da radiazioni

- non sono certi ma solo possibili o probabili; riguardano solo alcuni individui della popolazione esposta, ovvero hanno una certa “probabilità” di comparsa nel singolo individuo**
- per manifestarsi non necessitano di una dose minima e possono comparire anche per esposizioni bassissime**
- una dose più elevata non dà un danno più grave ma aumenta la probabilità della patologia indotta**
- non è possibile stabilire un limite di sicurezza, in termini di esposizione all’agente nocivo, che garantisca dall’insorgenza del danno, in quanto anche per bassissime dosi in una popolazione sufficientemente numerosa ci sarà un certo numero di casi di malattia**

il modello lineare

per stimare le probabilità e morbilità dei danni stocastici occorre un modello degli effetti a bassissima dose

in sede UNSCEAR si è optato per il modello lineare:

- non esiste una soglia**
- il danno cresce linearmente con la dose**
- l'esposizione a basse dosi di radiazione su lunghi periodi comporta un coefficiente di morte per cancro di 0,04 per 1 Sv**
 - ▷ su 100 persone che ricevono a basse dosi una dose totale di 1 Sievert 4 muoiono per cancro**

validazione dei modelli stocastici

- verifiche epidemiologiche su tempi lunghi e popolazioni omogenee sono delicate**
- le patologie indotte dalle radiazioni sono le stesse di quelle indotte altrimenti e non c'è modo di distinguerle e attribuirle alle varie cause**
- il numero di patologie da radiazioni previsto da modelli stocastici è una piccola frazione del numero totale di patologie**
 - ⇒ diventa difficile validarli**

Tableau 4.2 : Estimations centrales du comité pour le nombres de morts par cancer pour 100 000 personnes exposées à 100 mSv de rayons X, gamma ou bêta. (Les nombres entre parenthèses indiquent les bornes entre lesquelles la « vraie » valeur est située à 95 % de confiance⁴⁰.)

	<i>Tous les cancers solides</i>		<i>Leucémies</i>	
	<i>Hommes</i>	<i>Femmes</i>	<i>Hommes</i>	<i>Femmes</i>
Excédent de mortalité provenant d'une irradiation de 100 mSv	410 (200-830)	610 (300-1200)	70 (20-220)	50 (10-190)
Nombre de morts sans irradiation	22 100	17 500	710	530

Health effects after Chernobyl

WHO/IAEA/UNDP report

◆ deterministic effects

50 emergency workers died of acute radiation syndrome and nine children died of thyroid cancer

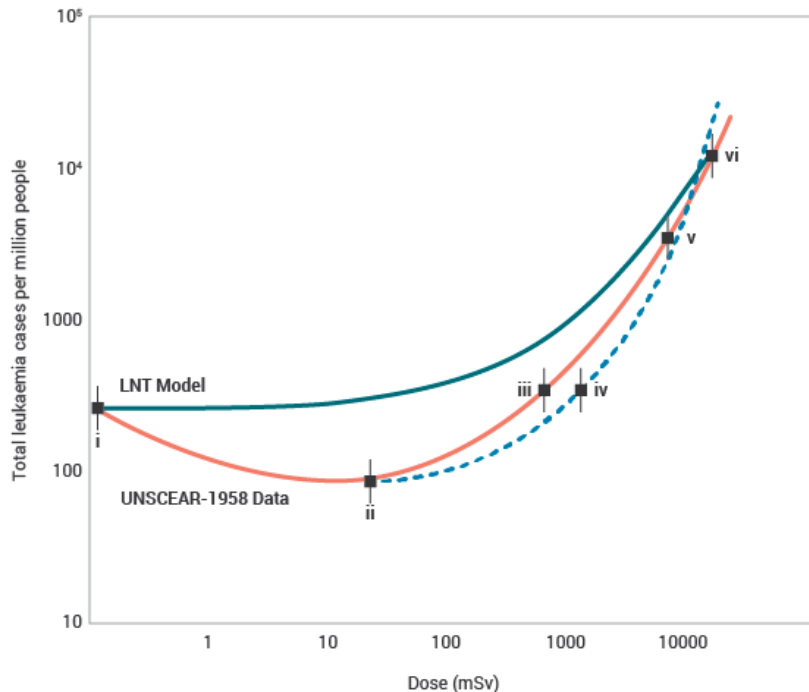
◆ stochastic effects

an estimated total of 3940 deaths from radiation-induced cancer and leukemia among
~ 200 000 emergency workers,
~ 116 000 evacuees and
~ 270 000 residents of the most contaminated areas

verifica del modello lineare sui dati di Hiroshima

la International Commission on Radiological Protection ha riesaminato i dati di incidenza di patologie da parte dei sopravvissuti a Hiroshima, in relazione alla dose ricevuta (distanza dall'epicentro dell'esplosione) e confrontato i dati con le previsioni del modello lineare

UNSCEAR Data on Leukaemia Incidence 1950-57 after Exposure at Hiroshima in 1945



- i) A control group of 32,963 people over 3 km from the hypocenter; 273 people per million developed leukaemia.**
- ii) 32,692 people between 2 and 3 km of the hypocenter, with estimated average exposure of about 20 mSv; 92 people per million developed leukaemia.**
- iii) and iv) 20,113 people between 1.5 and 2 km of the hypocenter, where average doses “were greater than” 500mSv; 398 people per million developed leukaemia.**
- v) 8810 people between 1 and 1.5 km of the hypocenter, with estimated average exposure of about 5000 mSv; 3746 people per million developed leukaemia.**
- vi) 1241 survivors less than 1 km from the hypocenter, where over 50,000 were killed; 12,087 people per million developed leukaemia.**

limiti del modello lineare

The findings have failed to support the so-called linear no- threshold (LNT) hypothesis.

Increasing evidence suggests that there may be a **threshold between 100 and 700 mSv** below which no harmful effects of radiation occur without effective cellular repair.

At low levels of exposure, the body's natural mechanisms do repair radiation and other damage to cells soon after it occurs, and some adaptive response is stimulated which protects cells and tissues, as with exposure to other external agents at low levels.

The International Commission on Radiological Protection recommends that the LNT model should be assumed for the purpose of optimising radiation protection practices, but that it should not be used for estimating the health effects of exposures to small radiation doses received by large numbers of people over long periods of time.

sorgenti radioattive di rilevanza antropica

- **sorgenti naturali**
 - ▷ **radiazione interna**
 - ▷ **raggi cosmici**
 - ▷ **radiazione terrestre**
- **sorgenti artificiali**
 - ▷ **diagnostica e terapia medica**
 - ▷ **esposizione occupazionale**
 - ▷ **ciclo del combustibile nucleare**
 - ▷ **test nucleari atmosferici**
 - ▷ **incidenti nucleari e test bellici**

dose annuale di radiazione interna

il corpo umano contiene sostanze radioattive

- potassio-40
- carbonio-14

attività di una persona di 70 kg

3850 Bq di potassio

4140 Bq del carbonio

per una dose annuale

di 177 microsievert

nel bacio ci si scambia (anche) radioattività



contributo alla radiazione interna del fumo

- ▷ una sigaretta contiene 1,5 Bq di polonio-210 e piombo-210
- ▷ il polonio-210 decade alfa, $T_{1/2} = 138$ d, $E = 5,406$ MeV
- ▷ dose annua nei bronchi fumando un pacchetto al giorno:
30 mSv/anno



contributo della televisione

- radiazione beta
 - ▷ un'ora di televisione con tubo catodico $\approx 10 \mu\text{Sv}$
 - ▷ in un anno $\approx 4 \text{mSv}$
- apparecchi LED o plasma presentano esposizioni inferiori



Radon-222: coi suoi radionuclidi figli principale sorgente di radioattività terrestre

- **è un gas nobile**
 - ▷ **proviene dal decadimento del radio-226**
 - ▷ **decade alfa in polonio-218**
 - ▷ **tempo di dimezzamento 3,82 giorni**

**emana dal terreno e dai materiali di costruzione in
quantità dipendente da**

- ▷ **concentrazione di uranio**
- ▷ **grado di fratturazione delle rocce**
- ▷ **natura e composizione del suolo**

esposizione al radon

il radon è un gas facilmente assorbito dai polmoni
i radioisotopi della sua famiglia decadono sia alfa
che beta

Dosi dovute al radon e ai suoi figli 2 mSv/anno

Typical room concentrations of short-lived radionuclei from the ^{222}Rn decay are

Nuclide	Concentration [Bq/m^3]	E_α [MeV]
^{222}Rn	120	5.5
^{218}Po	93	13.7
^{214}Po	90	7.7
^{214}Bi	76	7.7
^{214}Pb	90	7.7

Potassio-40 per importanza la seconda sorgente della radioattività naturale

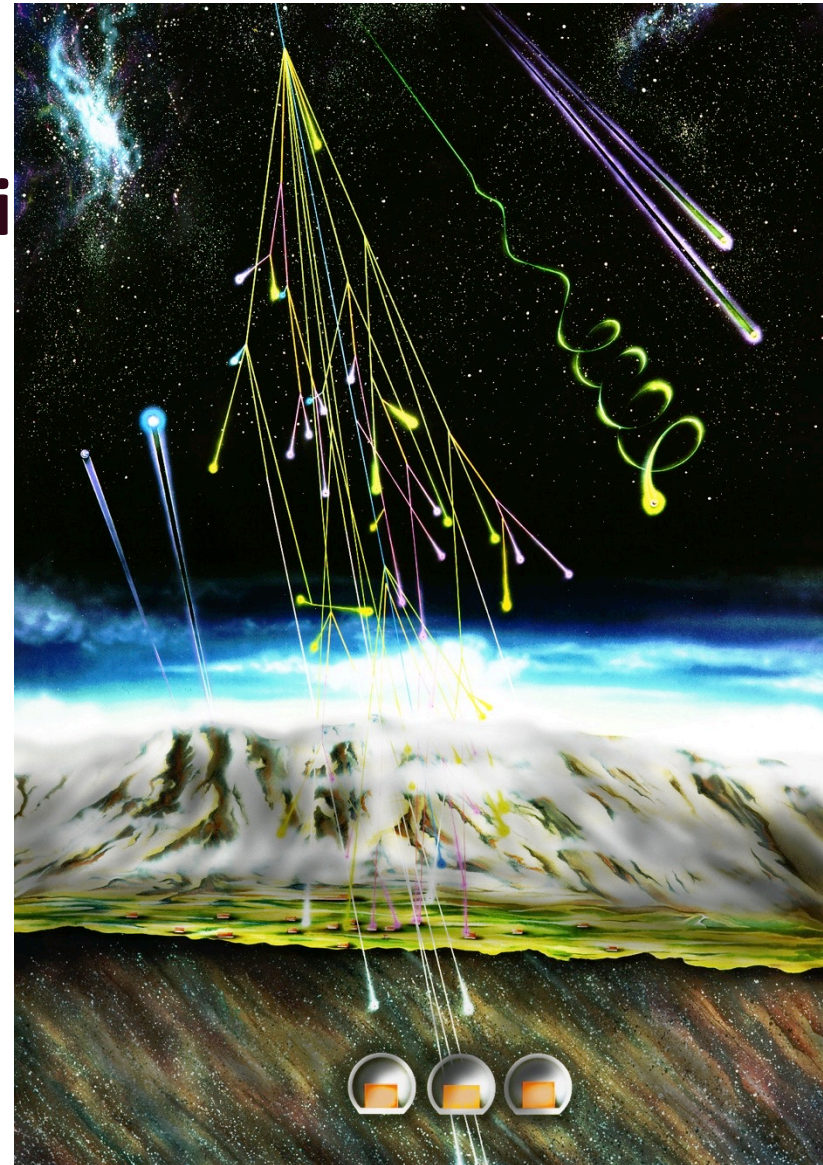
- decade beta in calcio-40 (89,28 %)
tempo di dimezzamento 1,28 miliardi di anni**
- decade beta inverso in argon-40 (10,22 %)
tempo di dimezzamento 11,9 miliardi di anni
produce esposizione interna e esterna**
- si trova nei muscoli e nelle ossa (2,94 mg)**
- frequente in pietre e cemento**

dose interna 0,38 mSv/anno

dose esterna 0,88 mSv/anno

i raggi cosmici generano nuclidi radioattivi

- da varie sorgenti cosmiche giungono sulla terra elettroni, protoni, fotoni, ioni ...
- interagendo con i gas atmosferici producono nuovi nuclidi radioattivi leggeri, che decadono beta e gamma, come il C-14



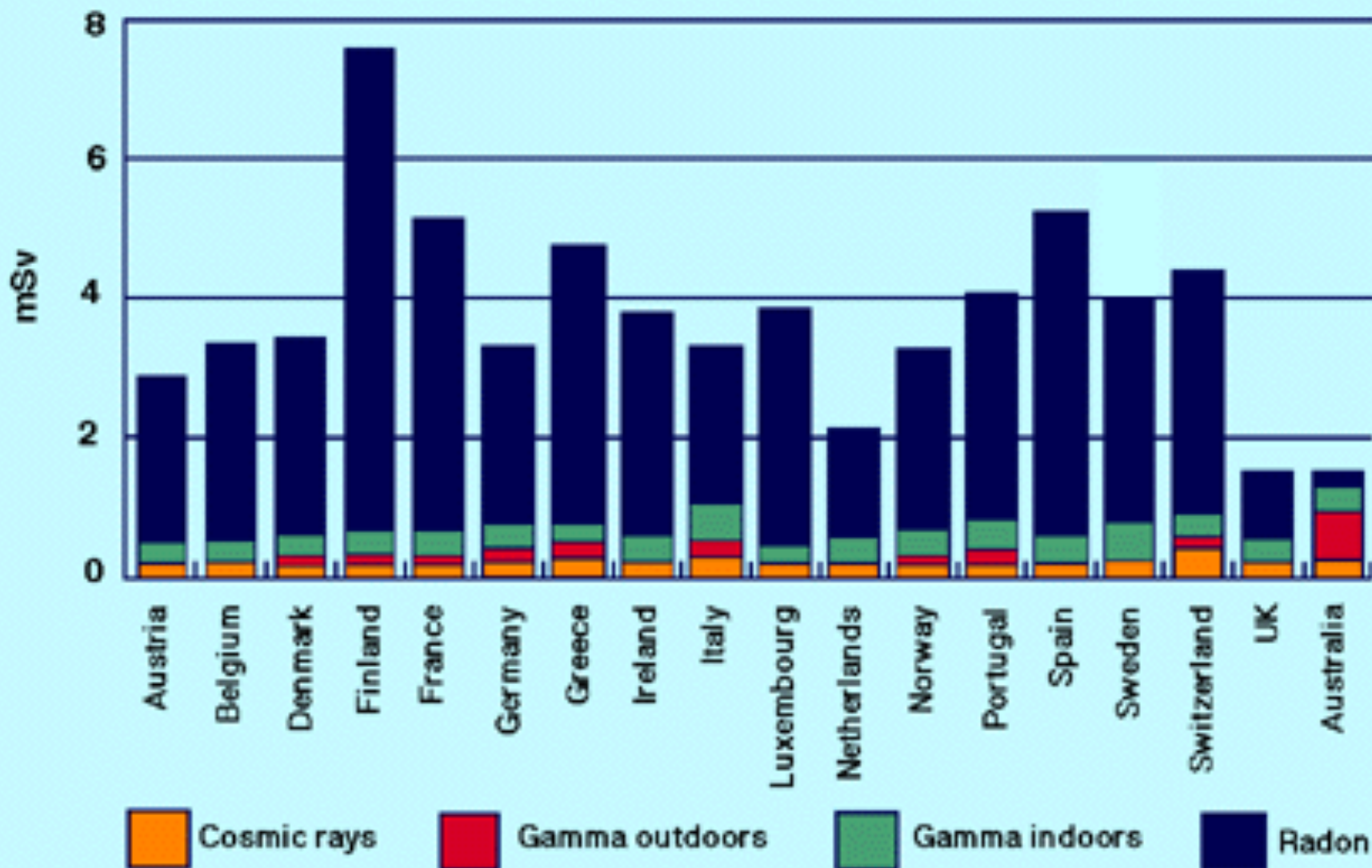
dosi dovute ai raggi cosmici

- **elettroni, protoni, neutroni, particelle ...**
- **le dosi dipendono dall'altezza sul mare**
 - ▷ **al suolo 0,274 mSv/anno**
 - ▷ **un volo transcontinentale a quota 10.000 m
0,06 mSv**
 - ▷ **viaggio terra–luna 3 mSv**
 - ▷ **viaggio terra–marte 350 mSv**
 - ▷ **500 giorni su Marte 350 mSv**

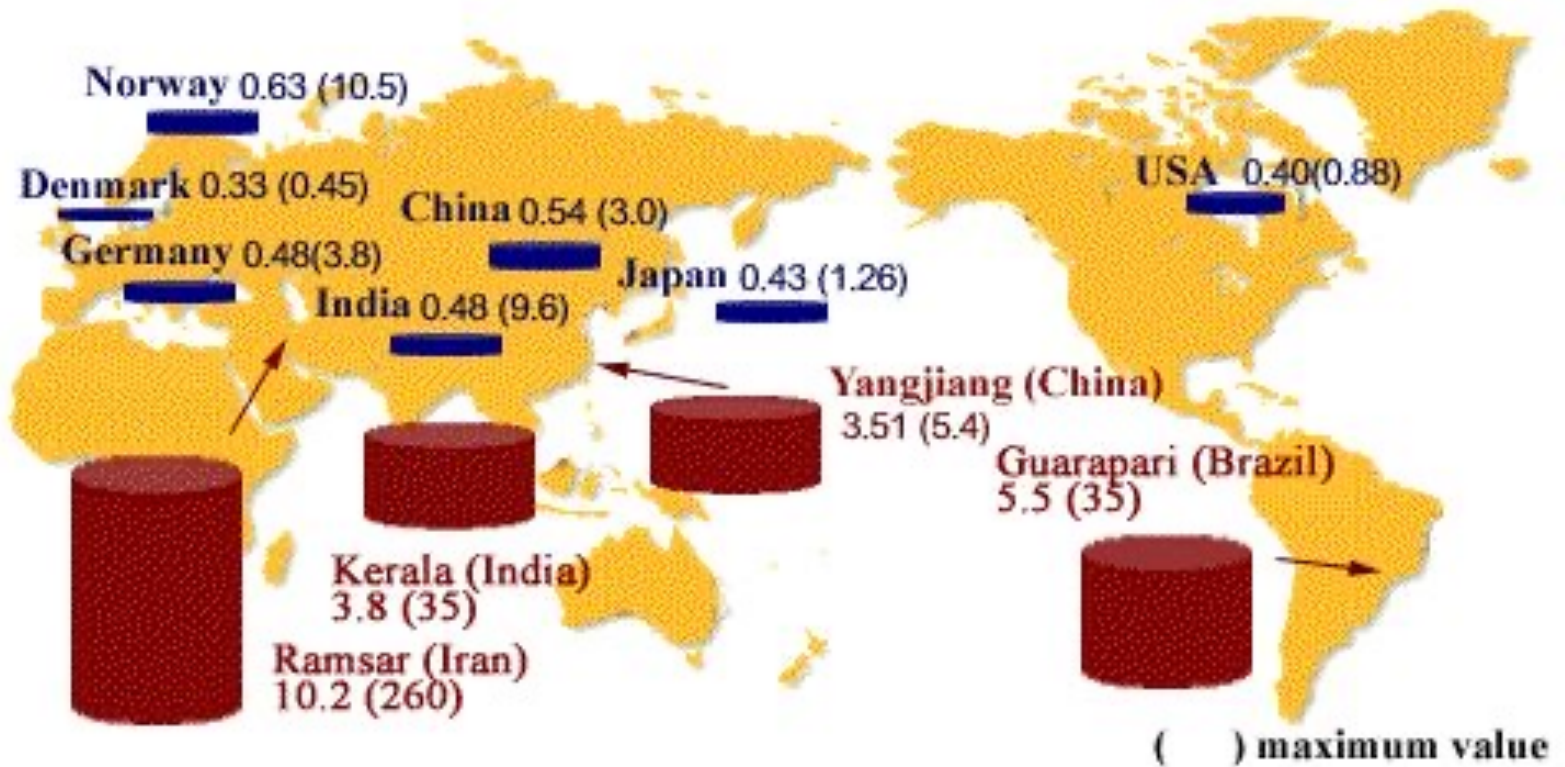
dati UNSCEAR 2008 (mSv)

Sorgenti naturali	dose media annuale	intervallo di variabilità individuale	commenti
Inalazione di radon nelle abitazioni	1,26	0,2 – 10	in alcuni edifici può essere molto maggiore
Terrestre esterna	0,48	0,3 – 1	in alcune zone può essere molto maggiore
Ingestione	0,29	0,2 – 1	
Radiazione cosmica	0,39	0,3 – 1	cresce con l'altitudine
Totale sorgenti naturali	2,4	1 – 13	gruppi consistenti di popolazione ricevono fra 10 e 20 mSv

AVERAGE ANNUAL DOSES FROM NATURAL RADIATION SOURCES



aree con alta radioattività naturale



**Ramsar in Iran, Guarapari in Brasile,
Karunagappalli in India, Yangjiang in Cina,
Arkaroola in South Australia**

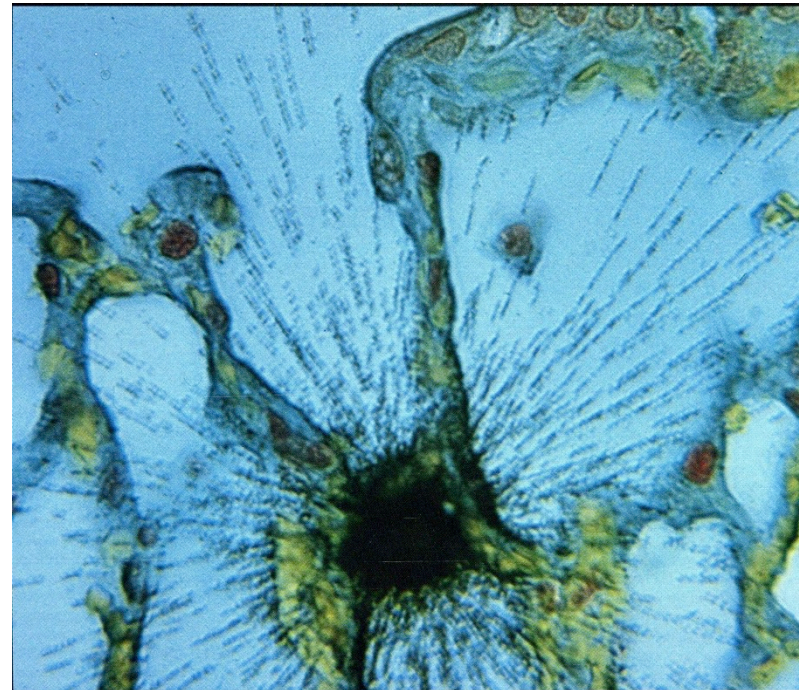


anche nelle zone con alta radioattività naturale non si evidenziano differenze di morbilità



radiazioni di origine artificiale di rilevanza antropica

- diagnostica e terapia medica
- applicazioni industriali
- ciclo del combustibile nucleare
- test nucleari atmosferici
- azioni belliche
- incidenti nucleari



dosi diagnostiche

una singola tomografia comporta una dose superiore a quella naturale annuale

Tipo di esame	Dose effettiva (mSv)
Radiografia agli arti	0.01
Radiografia ai denti	0.01
Radiografia al torace	0.02/film
Radiografia del cranio	0.07
Tac alla testa	2
Tac al torace	8
Esame delle ossa con ^{99m}Tc	4
Studio dinamico del cuore con ^{99m}Tc	6

incidente radioattivo a Goiânia (Brasile) 1987 – 1988

Due recuperanti trovano in un centro di radioterapia abbandonato una capsula sorgente di 15,8 g di cesio-137, un'attività di 50,875 TBq; ignorandone sia la natura che la pericolosità bucano la finestra protettiva, permettendo la fuoriuscita della polvere.

L'oggetto passa di mano in mano e la polvere luminosa bluastra viene anche usata come decorazione del viso e dei vestiti, e fu anche ingerita e inspirata, fino all'apparire dei chiari sintomi di intossicazione radioattiva.

112000 persone controllate:

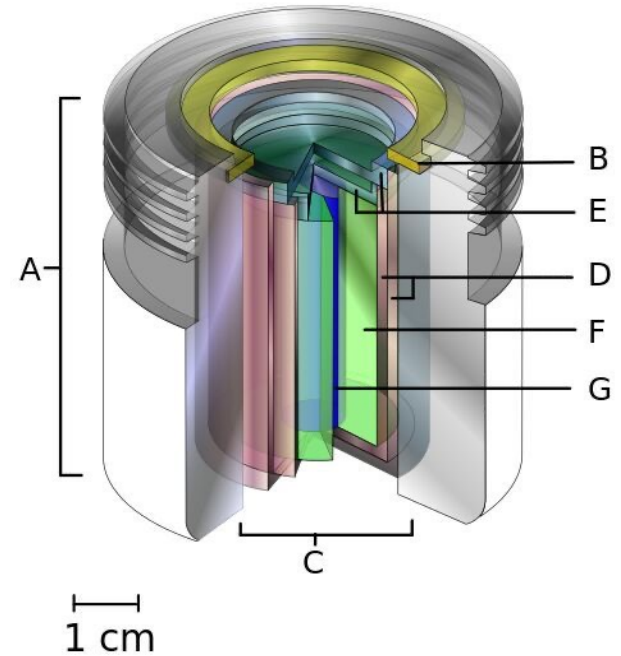
249 contaminate,

28 con gravi ustioni,

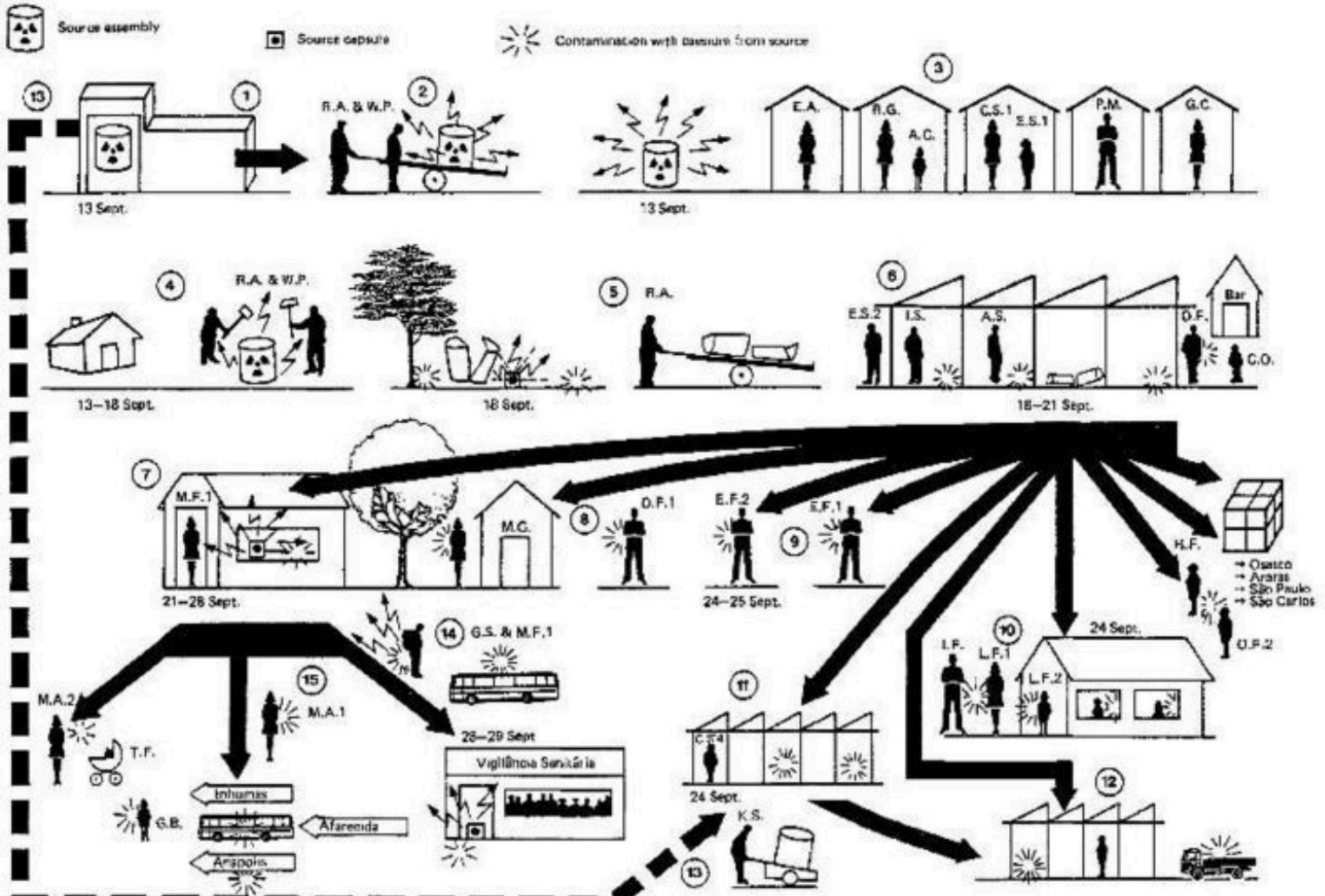
5 morti.

85 edifici contaminati e

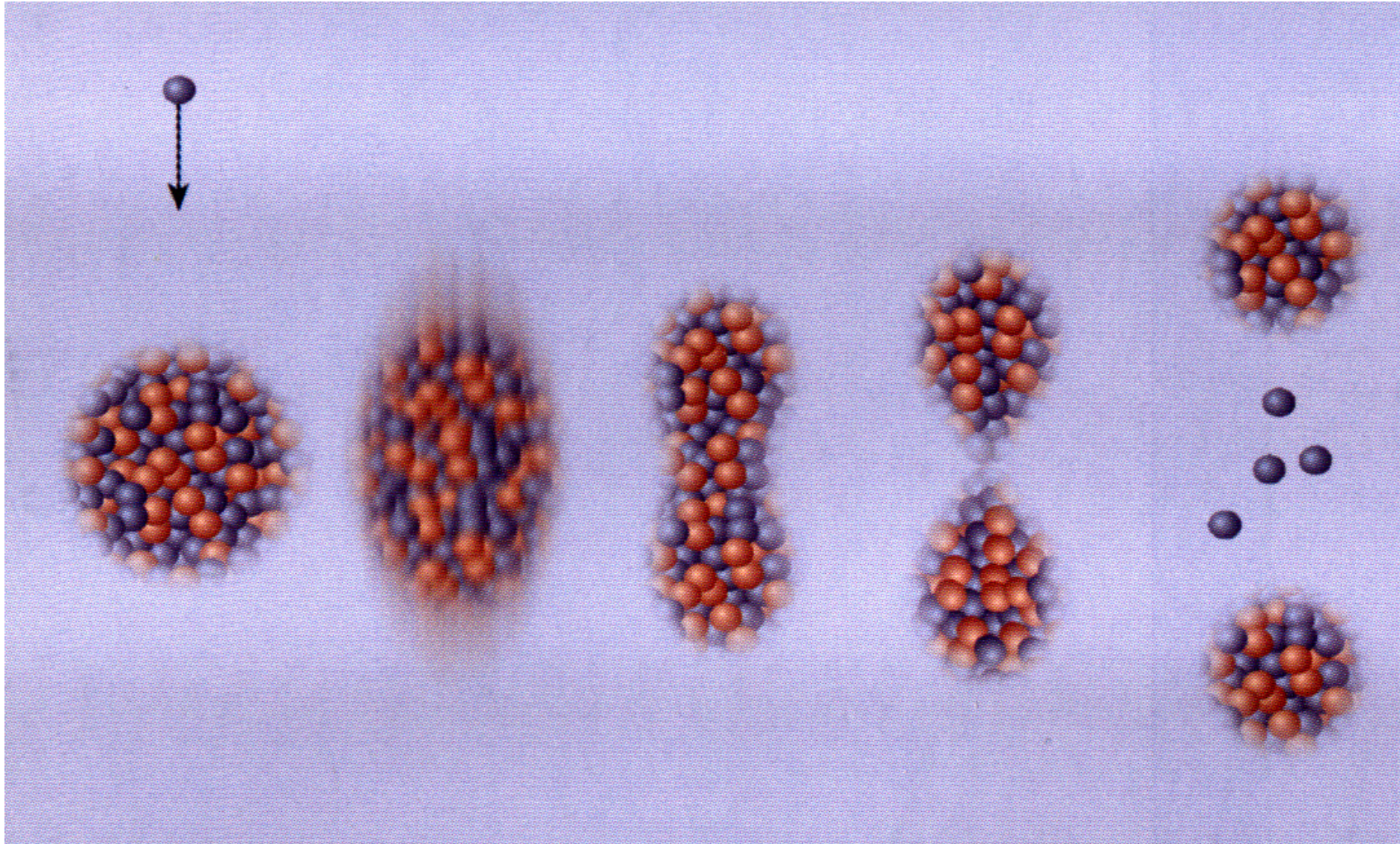
3500 m³ di rifiuti radioattivi



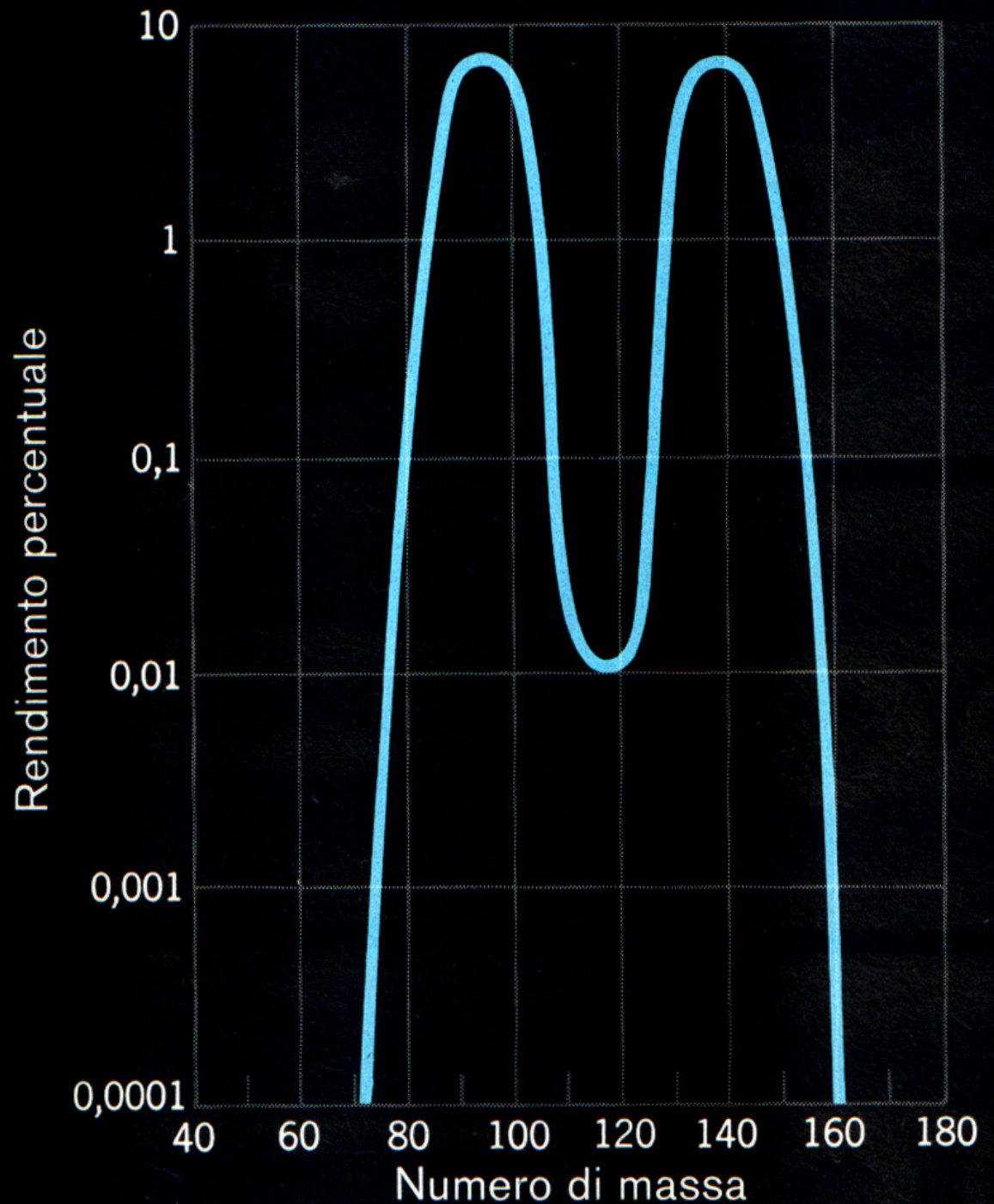
incidente radioattivo a Goiânia (Brasile) 1987 – 1988



la fissione nucleare sorgente di nuclidi radioattivi



**nei processi di
fissione sono
generati
molti nuclidi
radioattivi di
massa fra 70 e
160**



principali isotopi radioattivi dalla fissione di rilevanza antropica

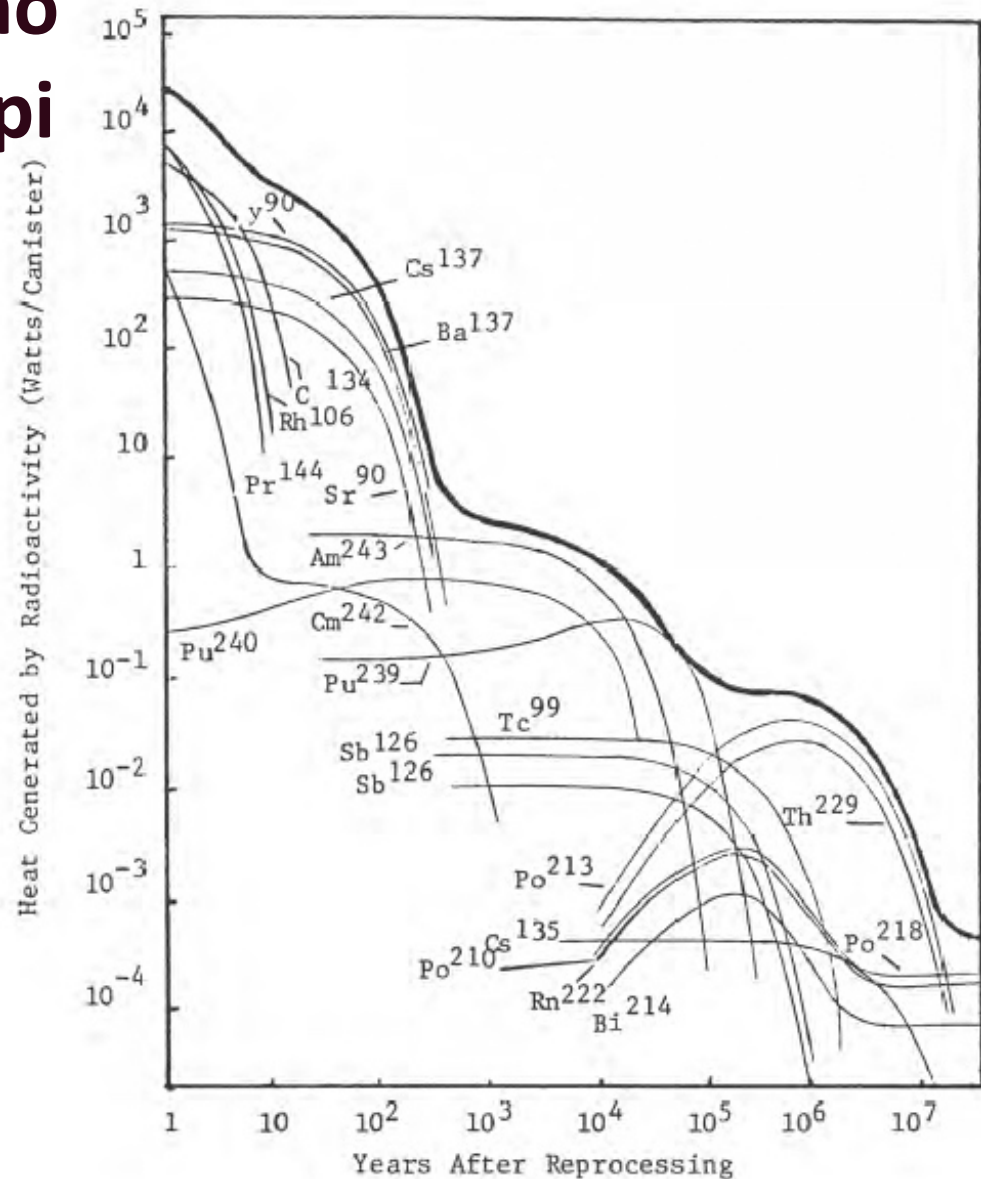
- **di breve durata**
 - ▷ **iodio-131 (tempo di dimezzamento 8,1 giorni)**
**viene assorbito dalla tiroide e si concentra
nel latte**
- **di lunga durata**
 - ▷ **cesio-137 (tempo di dimezzamento 30 anni)**
non ha particolari effetti biologici
 - ▷ **stronzio-90 (tempo di dimezzamento 28 anni)**
**simile chimicamente al calcio viene
assorbito nelle ossa**

i radionuclidi generati negli impianti a fissione hanno una gran varietà di tempi di dimezzamento

Table 3.2. Radionuclides in NTS fallout for which deposition densities (Bq m^{-2}) were explicitly calculated on a county-by-county basis.

Radionuclide	Half-Life	Used in External Dose Calculations	Used in Internal Dose Calculations
^{89}Sr	52 days		x
^{90}Sr ($^{90}\text{Y}^*$)	28.5 years (64 hours)		x
^{91}Sr	0.4 days	x	x
$^{91\text{m}}\text{Y}$	49.7 minutes	x	
^{91}Y	59 days	x	
^{93}Y	0.4 days	x	
^{95}Zr ($^{95}\text{Nb}^*$)	64 days (35 days)	x	
^{97}Zr ($^{97}\text{Nb}^*$)	0.7 days (72 minutes)	x	x
$^{97\text{m}}\text{Nb}$	53 seconds	x	
^{99}Mo	2.8 days	x	x
$^{99\text{m}}\text{Tc}$	6.0 hours	x	
^{99}Tc	213,700 years		
^{103}Ru ($^{103\text{m}}\text{Rh}^*$)	39 days (56 minutes)	x	x
^{105}Ru ($^{105\text{m}}\text{Rh}^*$)	0.2 days (45 seconds)	x	x
^{105}Rh	1.5 days	x	x
^{106}Ru ($^{106}\text{Rh}^*$)	368 days (30 seconds)	x	x
^{131}I (from NCI 1997)	8 days	x	x
$^{132}\text{Te}^*$	3.3 days	x	x
^{132}I	2.3 hours	x	
^{133}I	0.9 days	x	x
^{136}Cs	13 days		x
^{137}Cs ($^{137\text{m}}\text{Ba}$)	30 years	x	x
^{140}Ba ($^{140}\text{La}^*$)	13 days (1.7 days)	x	x
^{140}La	1.7 days	x	
^{141}Ce	32.5 days	x	
^{143}Ce	1.4 days	x	x
^{143}Pr	14 days		
^{144}Ce ($^{144}\text{Pr}^*$)	284 days	x	x
^{147}Nd	11 days	x	x
^{147}Pm	2.6 years		
^{239}Np	2.36 days	x	
$^{239+240}\text{Pu}$	24,131 years / 6,569 years		x
^{241}Pu	14.4 years		x
^{241}Am	430 years	x	

*Calculations for the progeny (in parentheses) are based on data for the precursor nuclide.



radiazioni da esplosioni nucleari

Un'esplosione nucleare produce immediatamente un'enorme numero di neutroni e di raggi X e gamma. Ulteriori raggi gamma, beta e alfa sono prodotti nella palla di fuoco ed emessi dai prodotti di fissione.

Mentre le radiazioni alfa e beta sono assorbite in pochi metri, i neutroni e i raggi gamma percorrono lunghe distanze e producono effetti di varia gravità negli organismi viventi.



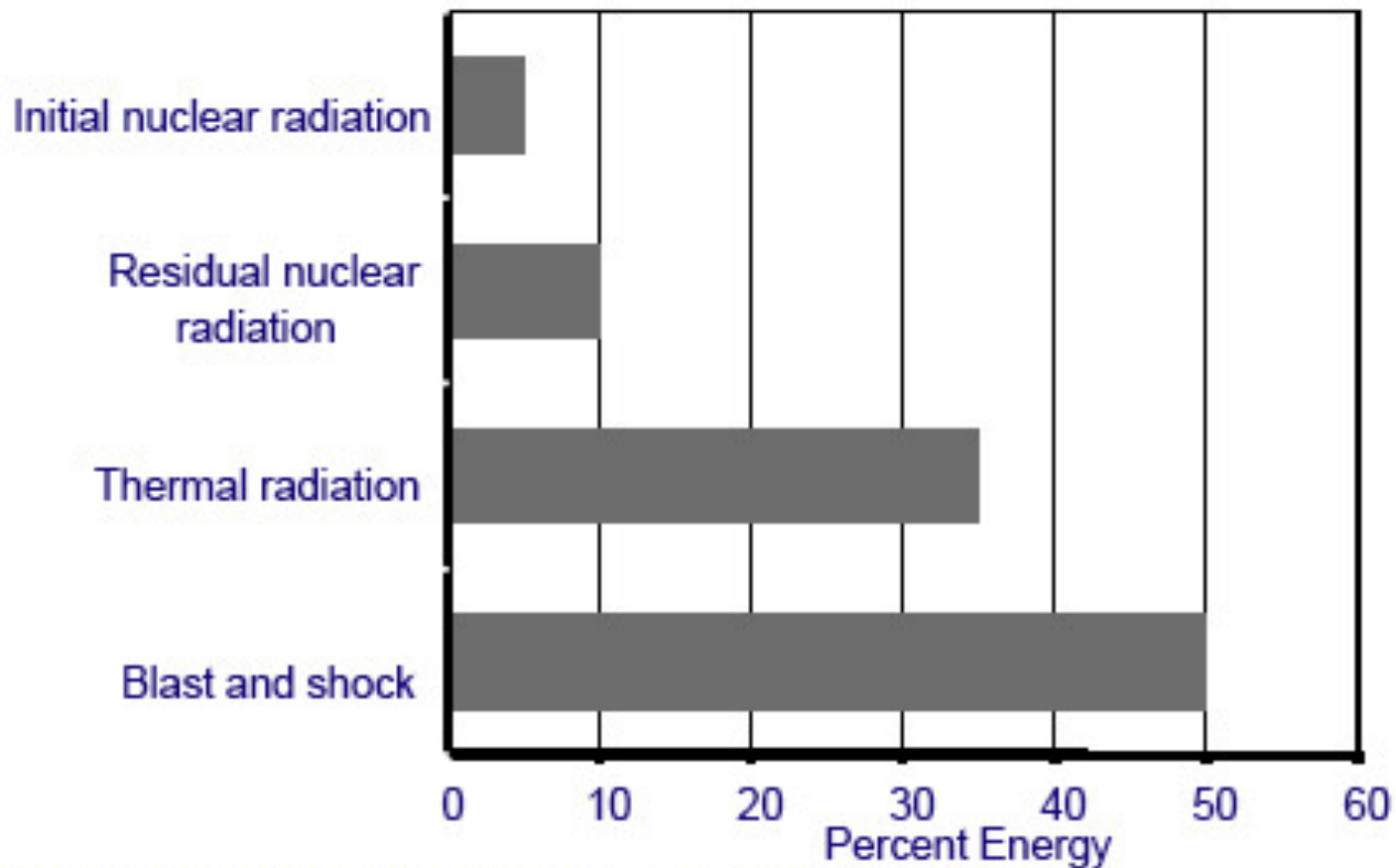


Figure 1. Distribution of Energy of an Air Burst below 100,000 ft

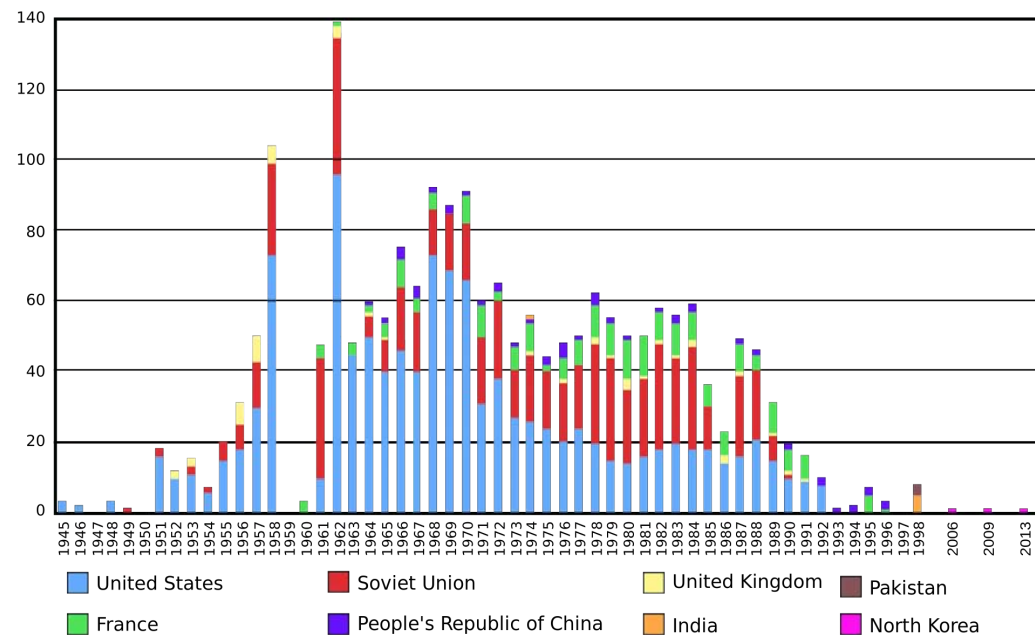
la radiazione nucleare iniziale costituisce solo il 5% dell'energia prodotta dall'esplosione, ma può causare fino al 20% delle vittime totali



la ricaduta radioattiva

i materiali solidi polverizzati della bomba e del suolo, divenuti radioattivi all'interno del "fungo", alla fine della fase turbolenta iniziano a cadere sotto l'effetto della gravità e costituiscono la ricaduta radioattiva (*fallout*).
Dal 1945 al 1971 vi sono stati test atmosferici per un'energia totale di 500 Mton

Worldwide nuclear testing, 1945 - 2013



isotopi radioattivi specifici da test nucleari

▷ carbonio-14

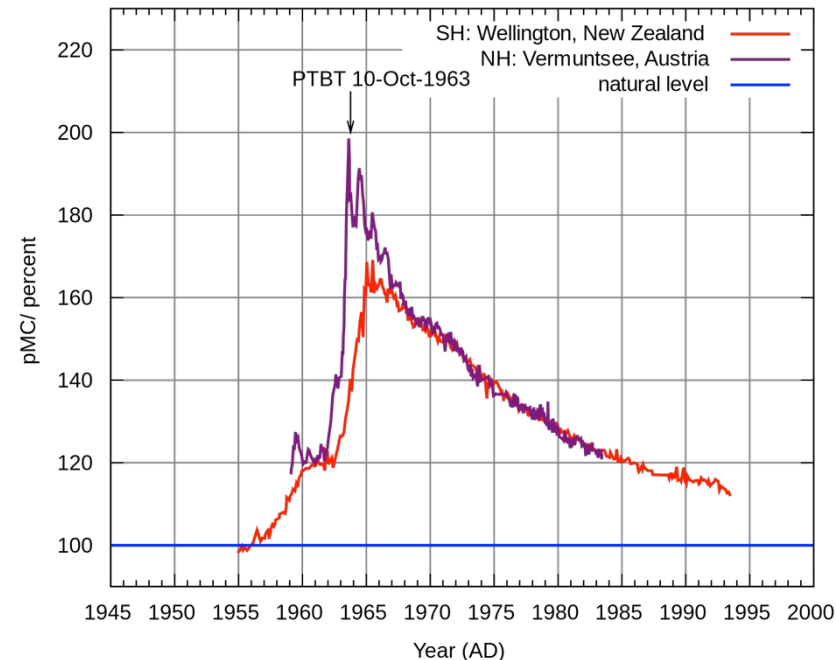
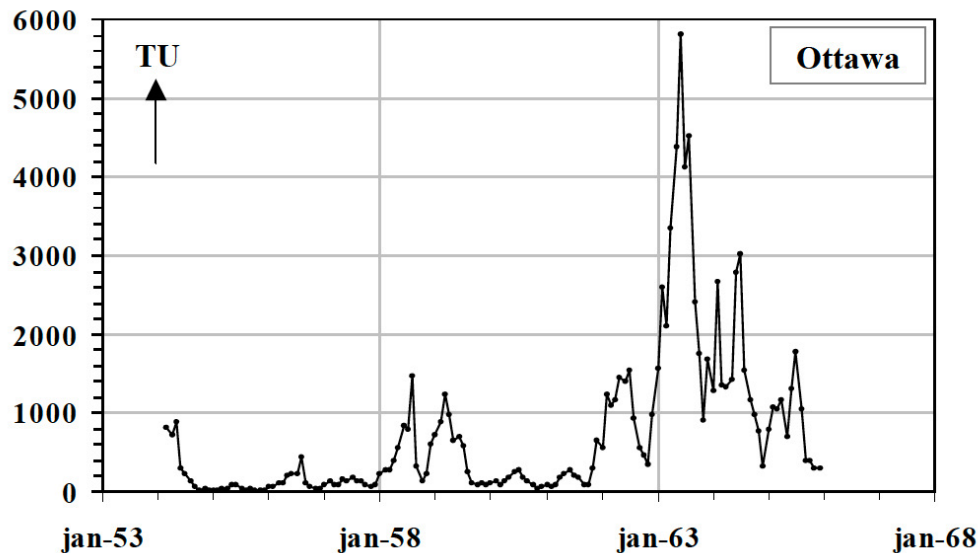
tempo di dimezzamento 5730(40) anni

fra atmosfera e mare circa 11×10^{18} Bq

▷ trizio decade beta in elio-3

tempo di dimezzamento $12,32 \pm 0.02$ anni

energia massima 0,018590 MeV



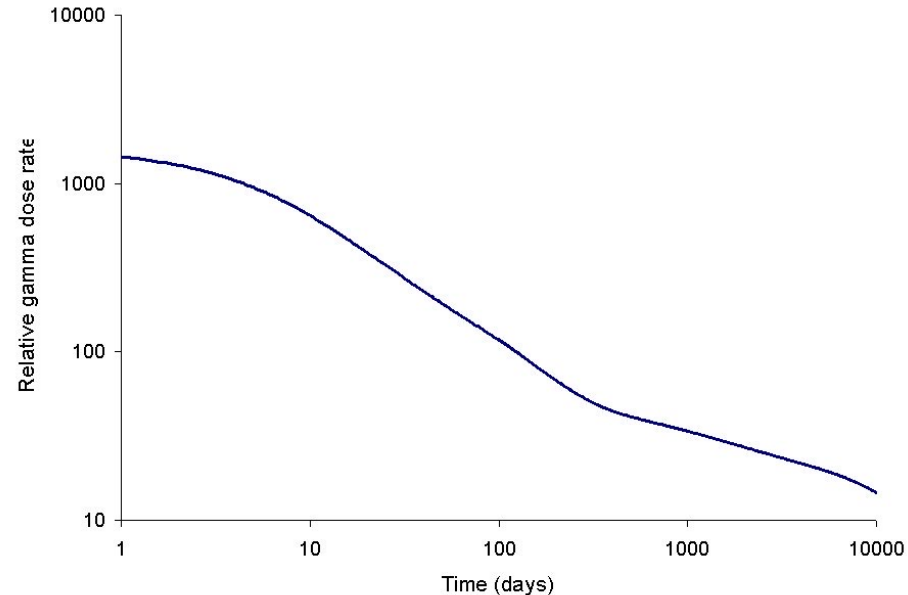
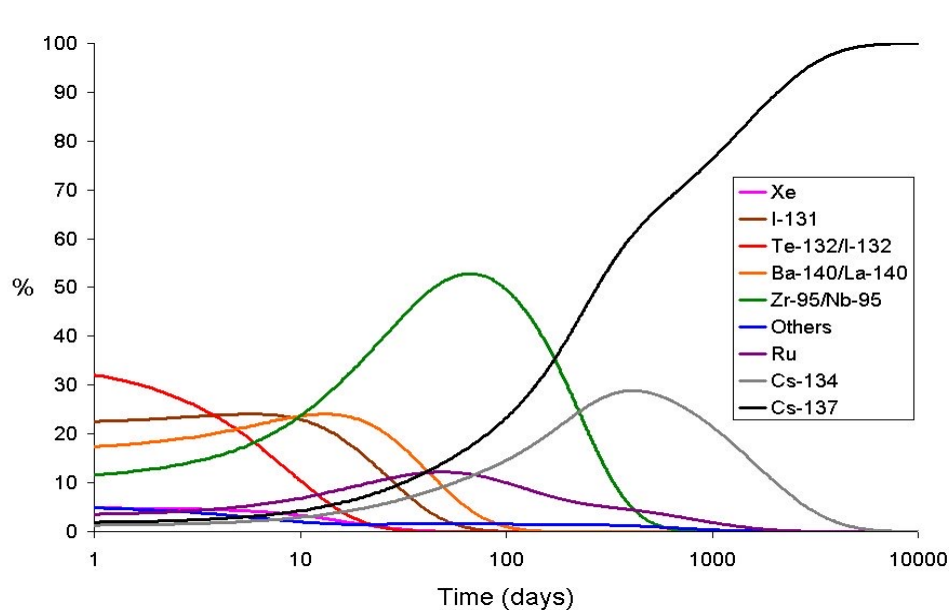


disastri nucleari

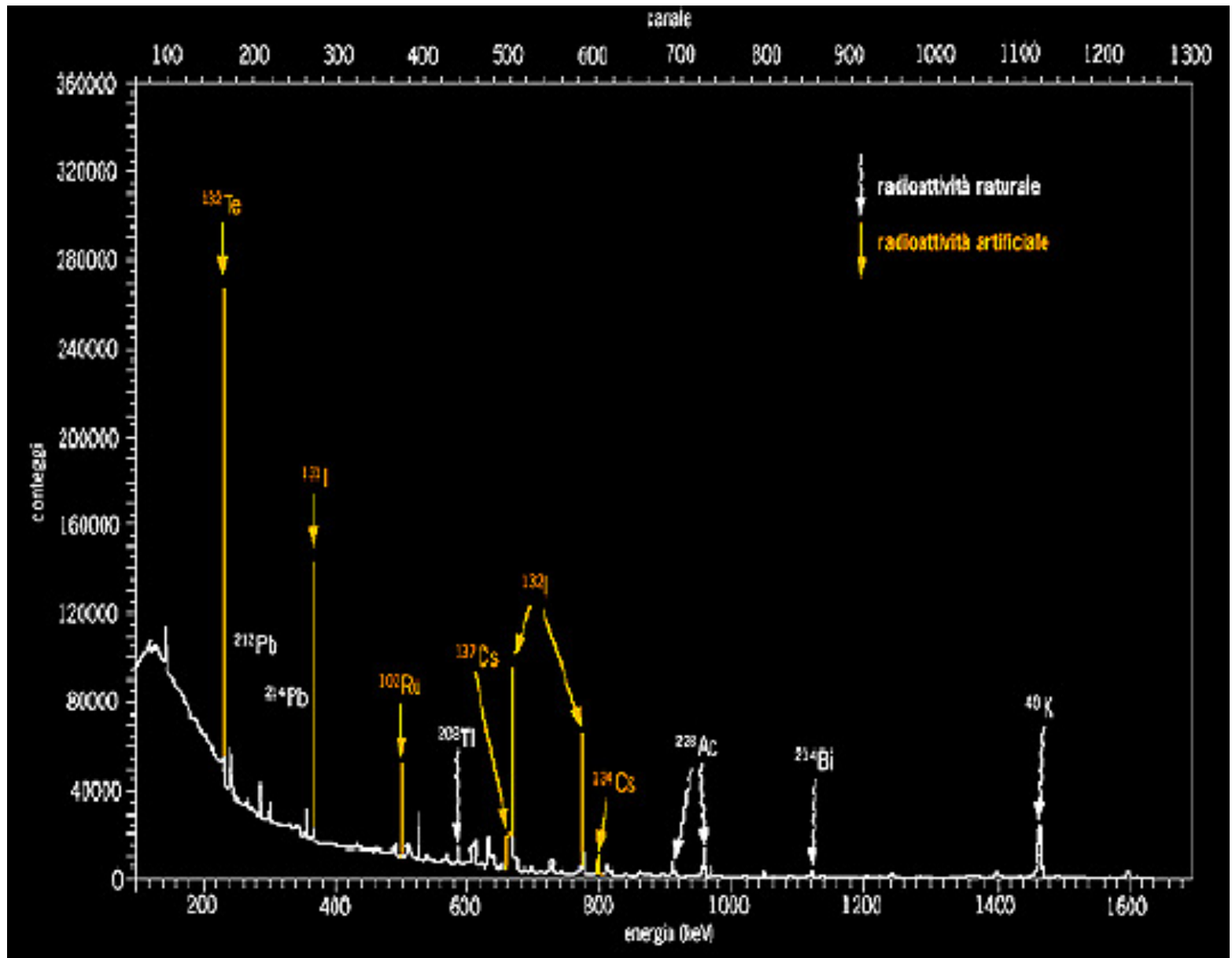
isotopi radioattivi specifici da disastri di impianti nucleari

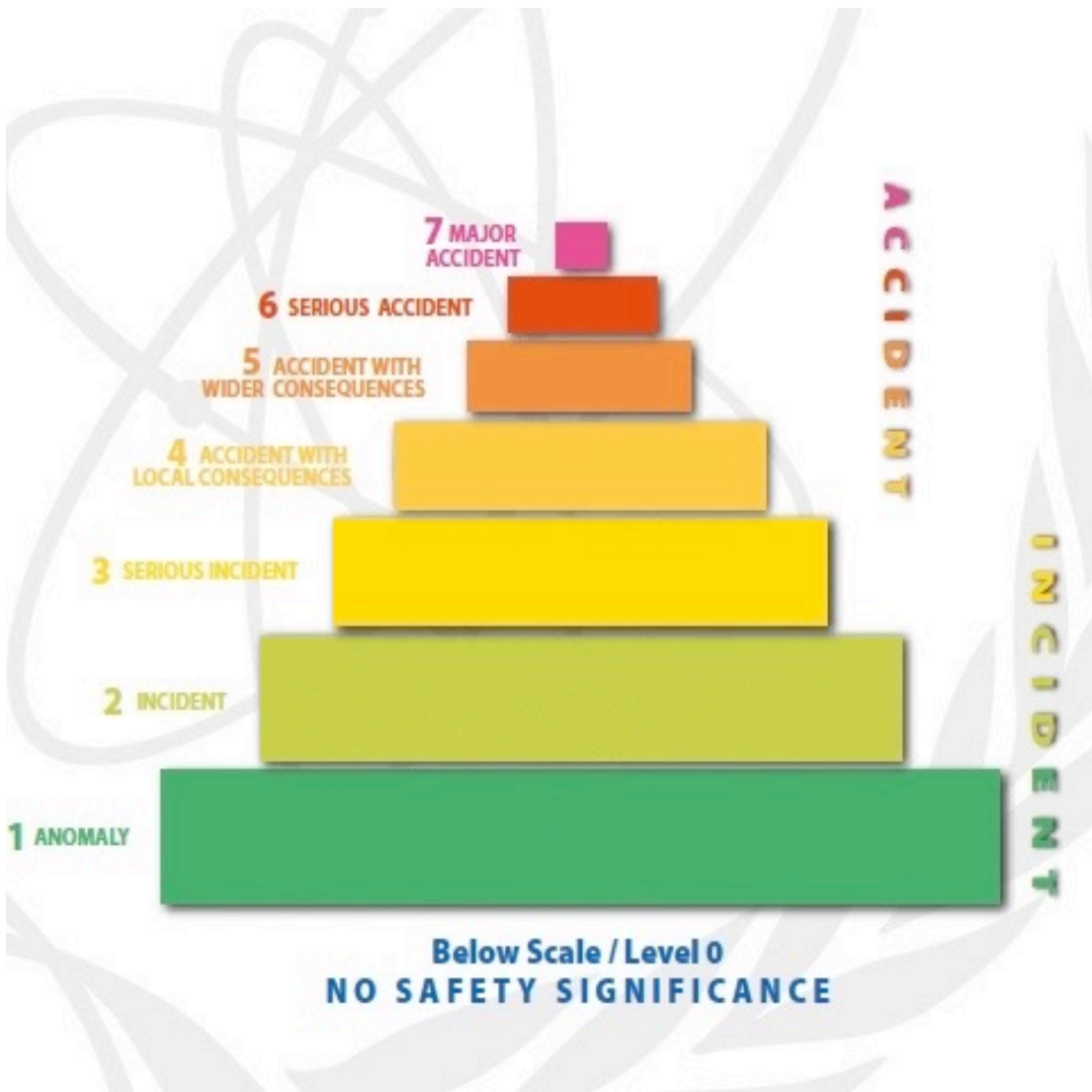
oltre a iodio-131, cesio-137, stronzio-90

- ▷ xeno-135 tempo di dimezzamento 9,14 ore
- ▷ cesio-134 tempo di dimezzamento 2,0652 anni
- ▷ krypton-85 tempo di dimezzamento 10,76 anni



isotopi radioattivi da Chernobyl misurati 20 anni dopo nel parco del Lambro





INES

THE INTERNATIONAL NUCLEAR AND RADIOLOGICAL EVENT SCALE

GENERAL DESCRIPTION OF INES LEVELS

INES Level	People and Environment	Radiological Barriers and Control	Defence-In-Depth
Major Accident Level 7	<ul style="list-style-type: none"> Major release of radioactive material with widespread health and environmental effects requiring implementation of planned and extended countermeasures. 		
Serious Accident Level 6	<ul style="list-style-type: none"> Significant release of radioactive material likely to require implementation of planned countermeasures. 		
Accident with Wider Consequences Level 5	<ul style="list-style-type: none"> Limited release of radioactive material likely to require implementation of some planned countermeasures. Several deaths from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Severe damage to reactor core. Release of large quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. This could arise from a major criticality accident or fire. 	
Accident with Local Consequences Level 4	<ul style="list-style-type: none"> Minor release of radioactive material unlikely to result in implementation of planned countermeasures other than local food controls. At least one death from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Fuel melt or damage to fuel resulting in more than 0.1% release of core inventory. Release of significant quantities of radioactive material within an installation with a high probability of significant public exposure. 	
Serious Incident Level 3	<ul style="list-style-type: none"> Exposure in excess of ten times the statutory annual limit for workers. Non-lethal deterministic health effect (e.g. burns) from radiation. 	<ul style="list-style-type: none"> Exposure rates of more than 1 Sv/h in an operating area. Severe contamination in an area not expected by design, with a low probability of significant public exposure. 	<ul style="list-style-type: none"> Near accident at a nuclear power plant with no safety provisions remaining. Lost or stolen highly radioactive sealed source. Misdelivered highly radioactive sealed source without adequate procedures in place to handle it.
Incident Level 2	<ul style="list-style-type: none"> Exposure of a member of the public in excess of 10 mSv. Exposure of a worker in excess of the statutory annual limits. 	<ul style="list-style-type: none"> Radiation levels in an operating area of more than 50 mSv/h. Significant contamination within the facility into an area not expected by design. 	<ul style="list-style-type: none"> Significant failures in safety provisions but with no actual consequences. Found highly radioactive sealed orphan source, device or transport package with safety provisions intact. Inadequate packaging of a highly radioactive sealed source.
Anomaly Level 1			<ul style="list-style-type: none"> Overexposure of a member of the public in excess of statutory annual limits. Minor problems with safety components with significant defence-in-depth remaining. Low activity lost or stolen radioactive source, device or transport package.

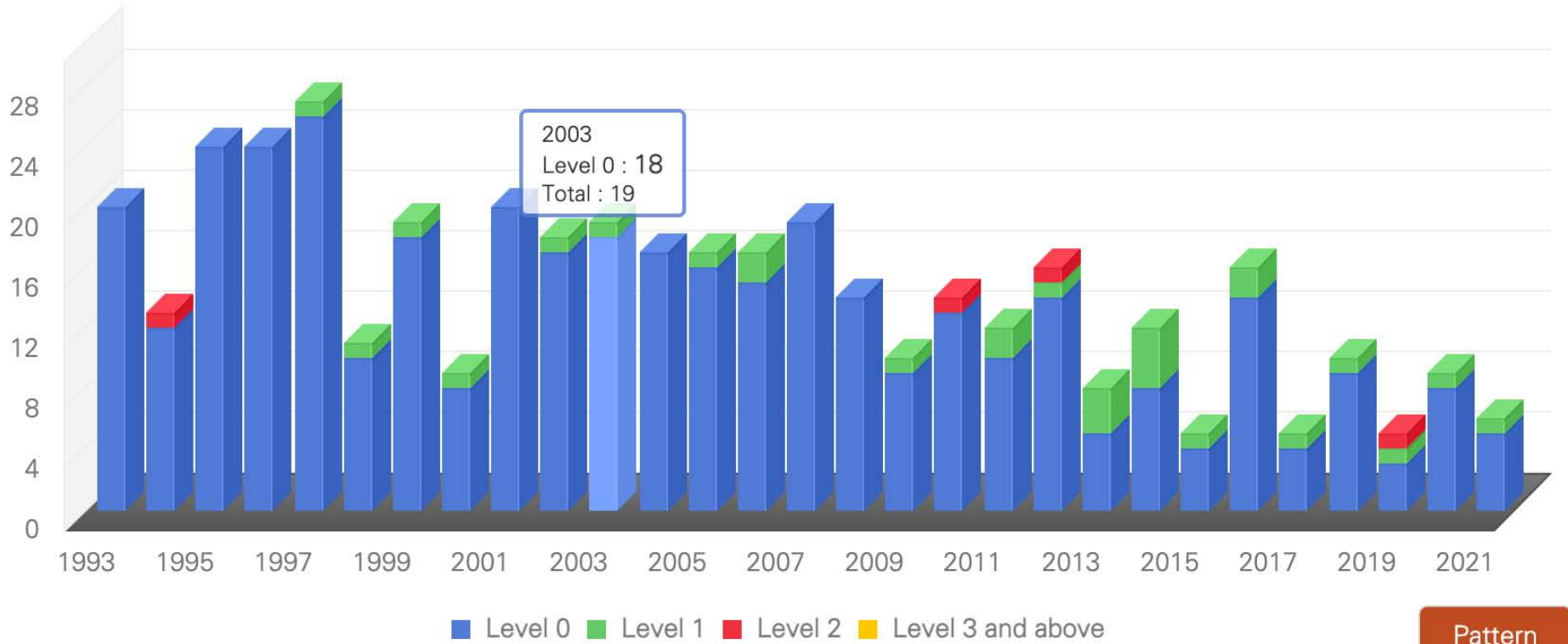
NO SAFETY SIGNIFICANCE (Below Scale/Level 0)

la scala INES misura con una scala da 1 a 7 la gravità degli eventi coinvolgenti emissioni radioattive

EXAMPLES OF EVENTS AT NUCLEAR FACILITIES

	People and Environment	Radiological Barriers and Control	Defence-in-Depth
7	<i>Chernobyl, 1986</i> — Widespread health and environmental effects. External release of a significant fraction of reactor core inventory.		
6	<i>Kyshtym, Russia, 1957</i> — Significant release of radioactive material to the environment from explosion of a high activity waste tank.		
5	<i>Windscale Pile, UK, 1957</i> — Release of radioactive material to the environment following a fire in a reactor core.	<i>Three Mile Island, USA, 1979</i> — Severe damage to the reactor core.	
4	<i>Tokaimura, Japan, 1999</i> — Fatal overexposures of workers following a criticality event at a nuclear facility.	<i>Saint Laurent des Eaux, France, 1980</i> — Melting of one channel of fuel in the reactor with no release outside the site.	
3	<i>No example available</i>	<i>Sellafield, UK, 2005</i> — Release of large quantity of radioactive material, contained within the installation.	<i>Vandellós, Spain, 1989</i> — Near accident caused by fire resulting in loss of safety systems at the nuclear power station.
2	<i>Atucha, Argentina, 2005</i> — Overexposure of a worker at a power reactor exceeding the annual limit.	<i>Cadarache, France, 1993</i> — Spread of contamination to an area not expected by design.	<i>Forsmark, Sweden, 2006</i> — Degraded safety functions for common cause failure in the emergency power supply system at nuclear power plant.
1			Breach of operating limits at a nuclear facility.

Events by Year



eventi registrati da INES dal 1993 al 2021

www-news.iaea.org/EventList.aspx



pascolini@pd.infn.it
<http://perlascienza.eu>

X @apascolini