

Possibili interazioni tra particelle α e la materia.

Interazione con gli elettroni delle sostanze colpite e trasferimento di dosi di energia.

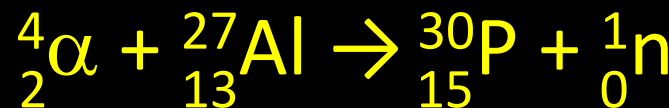
1) Un elettrone può essere allontanato dall'orbitale e si crea uno ione:



2) Un elettrone resta nell'atomo ma sale di orbitale, dando origine a un atomo eccitato (indicato con *) e poi ritorna nello stato iniziale cedendo l'energia (in nanosecondi) sotto forma di fotoni (raggi γ):



3) L'atomo emette un neutrone:



In questo modo furono scoperte la radioattività artificiale e il neutrone

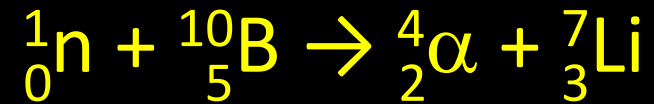
4) L'atomo emette un protone:



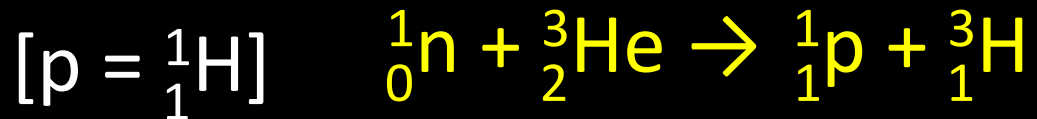
Possibili interazioni tra neutroni e la materia.

I neutroni possono arrivare a colpire i nuclei degli atomi.

1) L'interazione con il neutrone può portare all'espulsione di una particella α :



2) L'interazione con il neutrone può portare all'espulsione di un protone:



3) L'interazione con il neutrone può portare solo alla cessione parziale di energia:



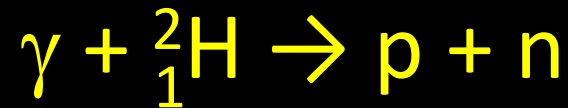
4) L'interazione con il neutrone può portare all'attivazione di un atomo (diventa radioattivo):



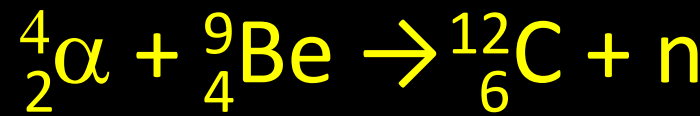
Possibili interazioni tra neutroni e la materia.

In che modo si può generare un flusso di neutroni?

1) Interazione di fotoni γ con i nuclei atomici:



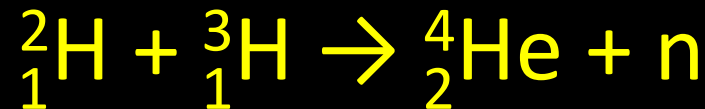
2) Interazione di particelle α con i nuclei atomici:



Sorgente di n per gli esperimenti di Fermi

Come emettitori di particelle α si utilizzano ${}^{226}\text{Ra}$, ${}^{241}\text{Am}$, ${}^{239}\text{Pu}$, ${}^{210}\text{Po}$, ${}^{242}\text{Cu}$, etc.

L'energia del futuro nelle centrali a fusione atomica verrà generata producendo neutroni:



Possibili interazioni tra neutroni e la materia.

I neutroni che verranno prodotti nelle centrali nucleari a fusione genereranno altri isotopi, alcuni dei quali saranno radioattivi.

Questo vuol dire che anche in questo caso non potremo parlare di energia “pulita”.

L'energia del futuro nelle centrali a fusione atomica verrà generata producendo neutroni:



Possibili interazioni tra fotoni γ e la materia.

I fotoni possono essere creati e distrutti liberamente.

1) **Effetto Fotoelettrico** - Il fotone trasferisce l'energia all'atomo che la trasforma in lavoro per liberare un elettrone.



2) **Effetto Compton** - Il fotone non è completamente assorbito ma comunque ionizza l'atomo e viene riemesso a frequenza (energia) minore.



3) **Materializzazione del fotone** - Il fotone si trasforma in elettrone e positrone. $E = m * c^2$



Varie unità di misura della radioattività:

Unità di misura

- Becquerel (**Bq**) *1 disintegrazione al secondo.*
- Curie (**Ci**) *37 GBq (attività di 1 g di ^{226}Ra); non più usato.*
- Coulomb/kg (**C/kg**) *Carica elettrica trasportata in 1 secondo dalla corrente di 1 Ampère/kg)*
- Röntgen (**R**) *$2,58 \cdot 10^{-4}$ C/kg; non più usato.*
- Gray (**Gy**) *Radiazione che deposita l'energia di 1 J/kg (dove $1\text{J} = 1\text{N} \cdot \text{m} = 1\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$). $1\text{Gy} = \text{m}^2/\text{s}^2$*
- Rad (**Rad**) *$100\text{erg/g} = 0,01\text{Gy}$; non più usato*
- Sievert (**Sv**) *Stessa unità di misura del Gy = 1J/kg .*
- Röntgen equivalent in man (**rem**) *$1\text{rem} = 10\text{mSv} = 0,01\text{Sv}$; non più usato.*
- Becquerel/m³ (**Bq/m³**)
- Becquerel/kg (o g) (**Bq/kg (o g)**)
- Sievert/h (**Sv/h**)

Significato

ATTIVITA'

Caratteristica specifica di ogni radionuclide.

IONIZZAZIONE

Quantità di radiazione che produce una determinata quantità di coppie ioni-elettroni.

DOSE ASSORBITA

Energia depositata in una data massa di materia.

DOSE EFFETTIVA

Energia depositata sulla base del tipo di radiazione.

DOSE EQUIVALENTE

Danno provocato nel tessuto.

CONCENTRAZIONE DI ATTIVITA'

ATTIVITA' SPECIFICA

TASSO DI DOSE

I **Bq** (o i Ci) indicano il numero di disintegrazioni di radionuclidi secondo (**ATTIVITA'**).

(indipendentemente dal tipo di radiazione, dall'energia che rilasciano e dal livello di penetrazione nelle sostanze. Una parte di queste disintegrazioni sono i ticchettii del Geiger; CPM).

I **Rt** indicano l'energia rilasciata dalla radiazione γ dai radionuclidi in unità di tempo (**IONIZZAZIONE**).

(Funzione del tipo di radiazione ionizzante e dell'attività).

I **Gy** indicano l'energia depositata in un kg di sostanza (**DOSE ASSORBITA**).

(Senza prendere in considerazione gli effetti che provoca).

I **Sv** indicano gli effetti sul corpo umano immerso in un campo di radiazioni, misurati con la stessa unità del Gy (**DOSE EFFETTIVA e D. QUIVALENTE**).

(Funzione dell'attività, del tipo di radiazione e del tipo di tessuto colpito).

E' molto difficile (spesso impossibile) passare da un'unità all'altra.

Es. i **Röntgen** misurano la carica elettrica generata da un fascio di fotoni (raggi γ o raggi X) in un certo volume di aria, a una certa T, a una certa P e a un certo grado di umidità.

I Rt non sono più utilizzati ma molti contatori geiger riportano ancora questa unità di misura.

I **Sievert** misurano il rischio di cancerogenesi (ossia il danno nei tessuti umani).

I Sv vengono utilizzati per misurare la Dose EFFICACE, la Dose EQUIVALENTE e la EQUIVALENTE di Dose AMBIENTALE, quindi andrebbe sempre definito a cosa si fa riferimento.

Non è possibile passare da Rt a Sv in modo diretto



Röntgen



No!



Sievert



Rem



Sì!



Sievert

Non è possibile sommare gli effetti delle radiazioni α con quelli delle radiazioni β o γ .



Quindi per passare da R_t a S_v bisognerebbe conoscere il tipo di sorgente radioattiva (il nuclide instabile) e il tipo di radiazione (α β γ).

I contatori geiger normali misurano solo il quantitativo di ionizzazione (in genere non misurano le radiazioni alfa), non la quantità di energia associata ad essa.

Facciamo qualche esempio: **Becquerel (Bq)**

1 Bq = 1 decadimento al secondo.

1 banana = ~15 **Bq**



1 kg carne = ~200 **Bq**



1 kg granito = ~1.000 **Bq**



1 kg legno = ~3.000 **Bq**

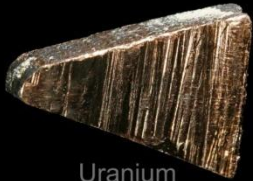


1 persona = ~9.000 **Bq**



1 kg U = ~12.000.000 **Bq**

U  92
238.03



Uranium

1 mg ^{210}Po = ~170.000.000.000 **Bq**



Nihei (2016) In: Nakanishi and Tanoi (Eds)
Agricultural Implications of the Fukushima
nuclear accident. Springer, 11-22

Prodotti di
agricoltura

Prodotti
forestali

Animali di
allevamento

Pescato

Tomoko M. Nakanishi · Keitaro Tanoi
Editors

Agricultural Implications of the Fukushima Nuclear Accident

The First Three Years



Springer Open

17 marzo-30 giugno
2011

N. Campioni	1496	430	387	321	2634
<10 Bq/kg	66	36	85	14	
10-100 Bq/kg	16	16	12	34	
100-500 Bq/kg	10	26	3	36	
>500 Bq/kg	8	23	0	16	
Max Bq/kg	82000	13000	510	14400	

1 luglio 2011-31 marzo
2012

N. Campioni	5186	653	5501	3236	14576
10-100 Bq/kg	79	56	90	24	
100-500 Bq/kg	17	30	9	41	
>500 Bq/kg	3	9	0	27	
Max Bq/kg	0	5	0	5	
Max Bq/kg	2400	28000	460	18700	

1 aprile 2012-31 marzo
2013

N. Campioni	9450	1180	6895	6895	24420
<10 Bq/kg	90	60	99	46	
10-100 Bq/kg	9	32	1	41	
100-500 Bq/kg	0	6	0	12	
>500 Bq/kg	0	2	0	2	
Max Bq/kg	1460	5600	146	1004	

1 aprile 2013-31 marzo
2014

N. Campioni	10378	1465	5476	8497	25816
<10 Bq/kg	85	69	99	72	
10-100 Bq/kg	14	25	1	25	
100-500 Bq/kg	1	4	0	3	
>500 Bq/kg	0	2	0	0	
Max Bq/kg	342	11870	83	1720	

Totale campioni analizzati

26510 3728 18259 18949 67446

Attività legata alla
presenza di ^{137}Cs

$$1 \text{ g } ^{137}\text{Cs} = 3,2 * 10^{12} \text{ Bq}$$

$$1 \text{ kg } ^{137}\text{Cs} = 3,2 * 10^{15} \text{ Bq}$$

2011

Region	Total number of inspection	Ratio (%)			
		~25 Bq/kg	25 Bq/kg ~ 100 Bq/kg	100 Bq/kg~ 500 Bq/kg	500 Bq/kg~
Area1	45	40.0	55.6	4.4	0.0
Area2	122	70.5	28.7	0.8	0.0
Area3	576	65.3	33.0	1.7	0.0
Area4	370	89.5	10.5	0.0	0.0
Area5	155	87.1	12.9	0.0	0.0
Area6	306	98.7	1.3	0.0	0.0
Area7	50	100.0	0.0	0.0	0.0
Total	1624	79.9	19.3	0.8	0.0

2012

Area1	204,315	99.6	0.4	0.0	0.0
Area2	519,593	99.7	0.3	0.0	0.0
Area3	1,299,453	99.0	1.0	0.0	0.0
Area4	3,328,643	99.9	0.1	0.0	0.0
Area5	1,520,043	99.8	0.2	0.0	0.0
Area6	3,153,887	100.0	0.0	0.0	0.0
Area7	305,592	100.0	0.0	0.0	0.0
Total	10,331,526	99.8	0.2	0.0007	0.0

2013

Area1	259,172	98.8	1.2	0.0	0.0
Area2	558,018	100.0	0.0	0.0	0.0
Area3	1,388,313	99.8	0.2	0.0	0.0
Area4	3,517,451	100.0	0.0	0.0	0.0
Area5	1,582,008	100.0	0.0	0.0	0.0
Area6	3,330,114	100.0	0.0	0.0	0.0
Area7	313,950	100.0	0.0	0.0	0.0
Total	10,949,026	99.9	0.1	0.0003	0.0

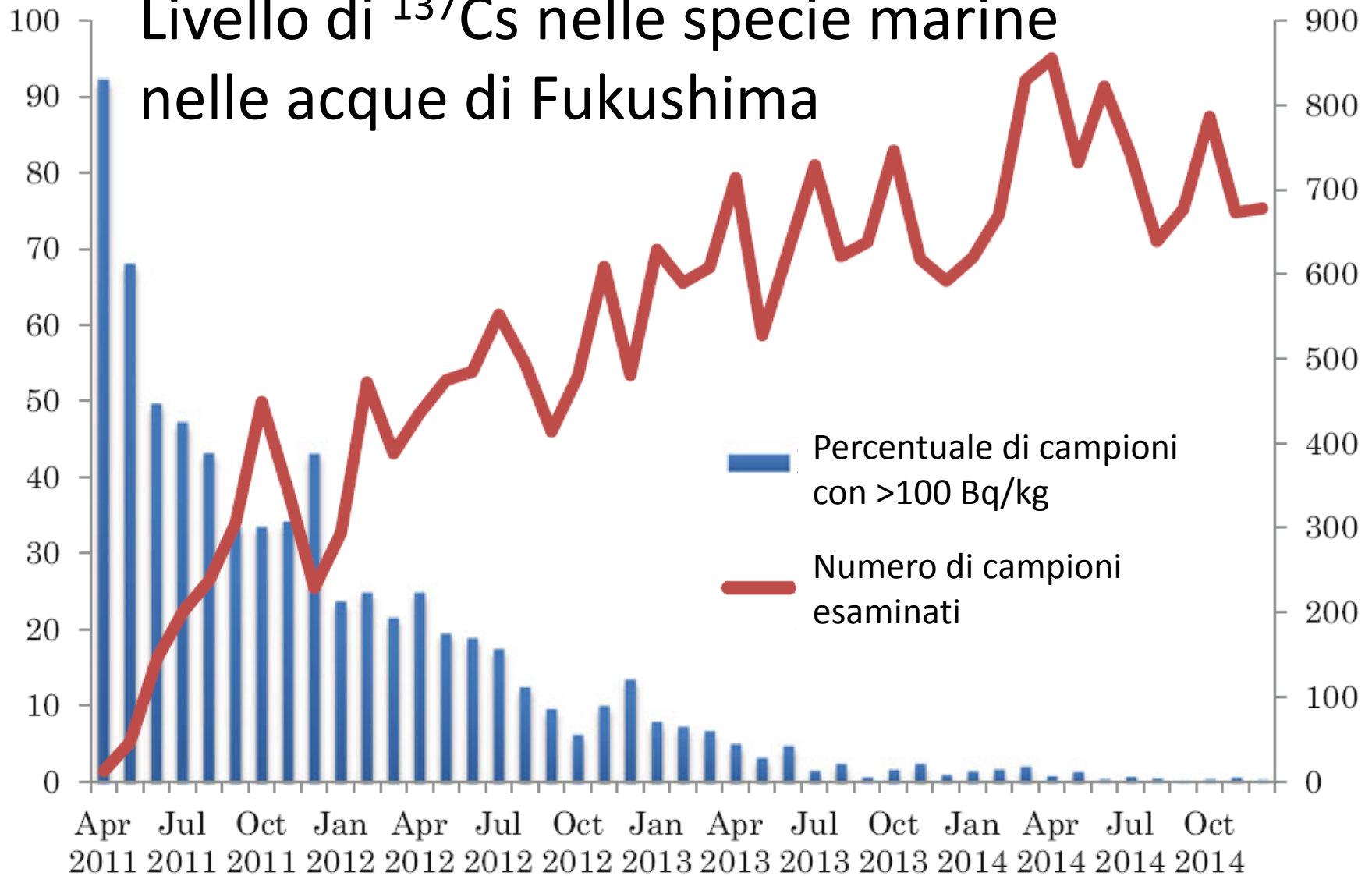
2014

Area1	301,322	99.9	0.1	0.0	0.0
Area2	565,800	100.0	0.0	0.0	0.0
Area3	1,440,598	99.9	0.1	0.0	0.0
Area4	3,575,402	100.0	0.0	0.0	0.0
Area5	1,548,140	100.0	0.0	0.0	0.0
Area6	3,251,179	100.0	0.0	0.0	0.0
Area7	306,383	100.0	0.0	0.0	0.0
Total	10,988,824	100.0	0.02	0.00002	0.00

Attività di ¹³⁷Cs nel riso nella zona di Fukushima



Livello di ^{137}Cs nelle specie marine nelle acque di Fukushima



Yagi, 2016. In: Nakanishi and Tanoi (Eds) Agricultural Implications of the Fukushima nuclear accident. Springer, 217-228

Dopo l'incidente di Fukushima nel 2011 si è arrivati a un'attività di ^{137}Cs $>8 \cdot 10^4 \text{ Bq/kg}$ nelle verdure coltivate nell'area (160 volte il limite massimo).



RADIOACTIVE MATERIAL
AM241 0.9 MICROCURIE
37KBQ MAXIMUM

This product is designed to detect products of combustion using ionisation technology. This product contains 0.9 microcurie of Americium 241, a radioactive material.

Attività specifica
 $^{241}\text{Am} = 1,27 \cdot 10^{11} \text{ Bq/g}$

$^{241}\text{Am} =$
 $1,27 \cdot 10^{14} \text{ Bq/kg}$

Esempi di cattiva informazione

il Fatto Quotidiano

(scritta da ignoranti, nel senso etimologico del termine)

Si parla di un aumento della radioattività, fino a 530 Sv/h invece dei 73 Sv/h di cinque anni fa, e di migliaia di feriti causati dall'esplosione.

M. Lustrino 27 febbraio 2017- Dip. Scienze della Terra, Sapienza Università di Roma

Fukushima, radiazioni record in uno dei reattori nucleari danneggiati nel 2011. "Letali anche dopo breve esposizione"



AMBIENTE & VELENI

Lo rende noto la Tokyo Electric Power, operatore della centrale giapponese, che parla di emissioni mai così alte dal disastro causato da un terremoto di magnitudo 9 e il successivo tsunami, che provocò oltre 15mila vittime accertate, circa 5mila dispersi e altrettanti feriti. Le sostanze tossiche sono fuoriuscite dal reattore numero due, attualmente in fase di smantellamento

di F. Q. | 3 febbraio 2017

Esempi di cattiva informazione

ENENEWS
ENERGY NEWS

www.eneews.com

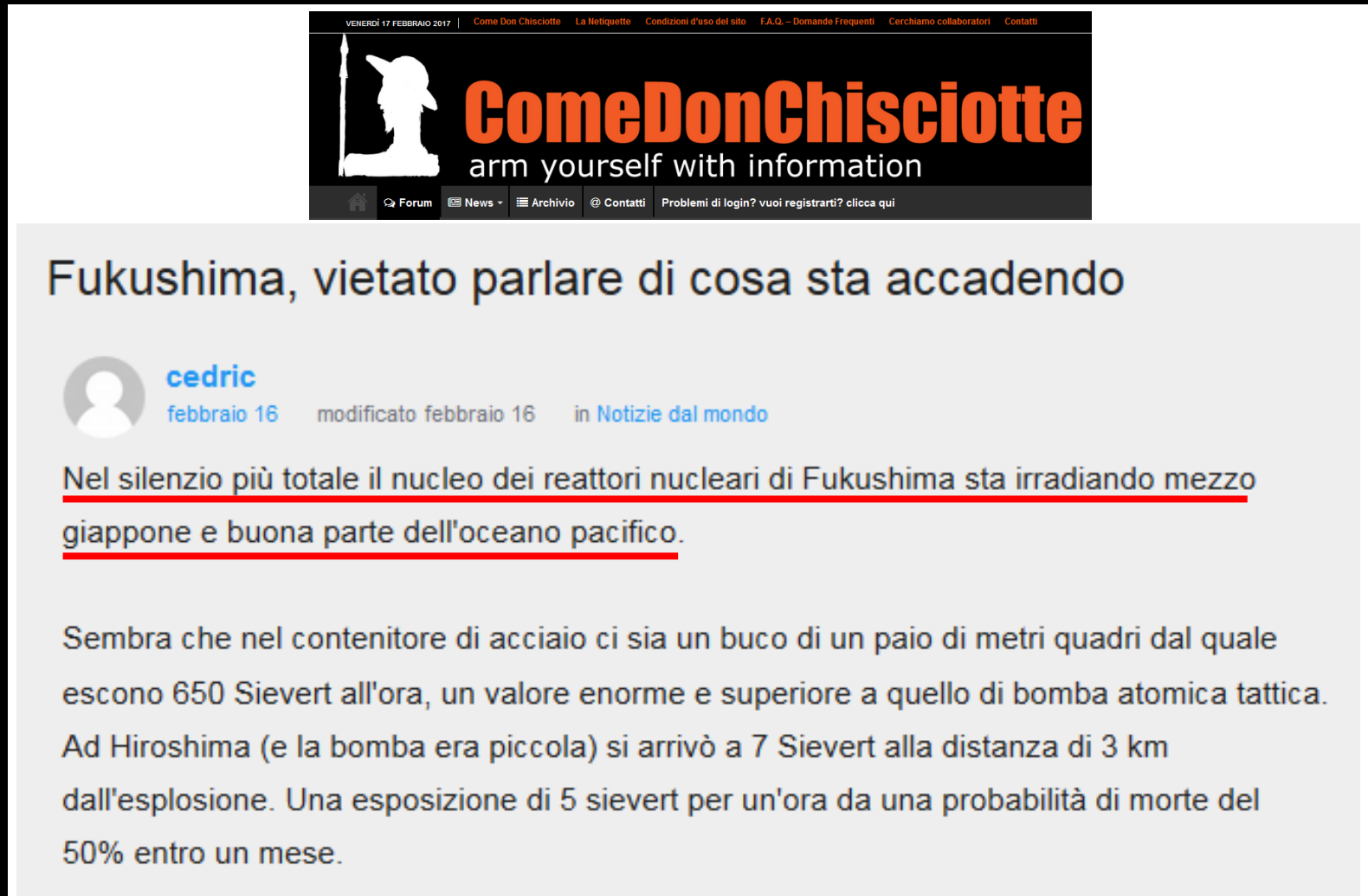
Addirittura sarebbe pericoloso recarsi in Giappone...

"Unimaginable": Record high radiation levels at Fukushima plant — "Gaping hole" found under containment vessel — Officials now admit: "It's highly possible melted fuel leaked through" — Concern over radioactive gas leaks (PICS & VIDEO) »

ALERT: Collapse imminent at Fukushima — TV: Officials find large section under reactor is "unstable... about to collapse" — "Bad, bad news... Time to reconsider that trip to the east coast of Japan" (VIDEOS)

BY ENENEWS, ON FEBRUARY 3RD, 2017

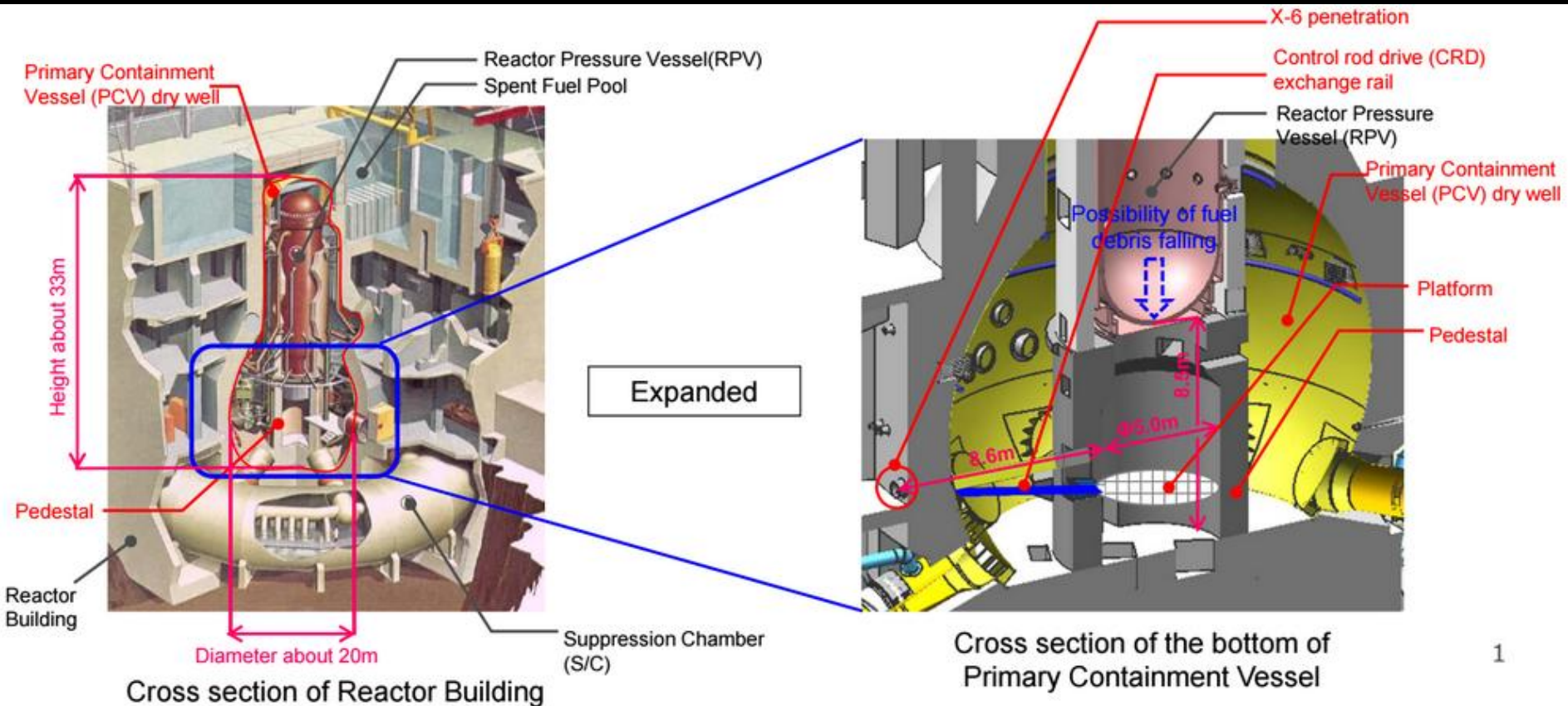
Esempi di cattiva informazione



The screenshot shows a forum post on the website 'ComeDonChisciotte'. The website header includes the date 'VENERDI 17 FEBBRAIO 2017' and navigation links for 'Come Don Chisciotte', 'La Netiquette', 'Condizioni d'uso del sito', 'F.A.Q. - Domande Frequenti', 'Cerchiamo collaboratori', and 'Contatti'. The main header features a silhouette of Don Quixote and the text 'ComeDonChisciotte arm yourself with information'. Below the header is a navigation bar with links for 'Forum', 'News', 'Archivio', 'Contatti', and a login prompt. The post itself is titled 'Fukushima, vietato parlare di cosa sta accadendo' and is by user 'cedric' from 'febbraio 16' in the 'Notizie dal mondo' category. The main text of the post is underlined in red and reads: 'Nel silenzio più totale il nucleo dei reattori nucleari di Fukushima sta irradiando mezzo Giappone e buona parte dell'oceano pacifico.' The post continues with a paragraph of text: 'Sembra che nel contenitore di acciaio ci sia un buco di un paio di metri quadri dal quale escono 650 Sievert all'ora, un valore enorme e superiore a quello di bomba atomica tattica. Ad Hiroshima (e la bomba era piccola) si arrivò a 7 Sievert alla distanza di 3 km dall'esplosione. Una esposizione di 5 sievert per un'ora da una probabilità di morte del 50% entro un mese.'

...In realtà la Tokio Electric Power Company Holdings (TEPCO) ha rilasciato un annuncio stampa il 2 feb 2017 nel quale spiega come stanno andando le operazioni di bonifica.

Si sono avvicinate al nocciolo e hanno misurato maggiore radioattività.





100.000.000.000.000.000.000.000.000.000 Bq

10^{26} Bq

I **Bq** di una sostanza non sono esattamente le radiazioni che vengono emesse o i *cpm* (*counts per minute*) registrati dai contatori Geiger.

Una parte (anche grande) delle radiazioni di una sostanza non arriva in superficie (es. le radiazioni alfa vengono subito bloccate).

Un cubo di U di 1 kg di massa emette gli stessi Bq di 1 kg di U in polvere disteso su una superficie di 10 m².

Nel secondo caso le radiazioni emesse sono superiori, così come la dose assorbita in Gy o Sv.

I *cpm* sono funzione della grandezza e della geometria della sonda del contatore.

* The first four columns represent four of the 14 nuclides in the uranium decay series, the next two represent two of 10 in the thorium series. (For total activity in any coal, assume these are in serial equilibrium, hence multiply U-238 by 14 and Th-232 by 10, then add K-40.)

Table 2: NORM radionuclide activity in coal (Bq/kg)

**WORLD NUCLEAR
ASSOCIATION**

Anche il carbone è radioattivo.

Country	U-238	Ra-226	Pb-210	Po-210	Th-232	Ra-228	K-40
Australia	8.5-47	19-24	20-33	16-28	11-69	11-64	23-140
Brazil	72	72	72		62	62	
China	Typical 10-25, up to 5600			Typical 10-25, up to 29,000			
Germany		10-145, av 32			10-63, av 21		10-700, av 225
(lignite)		0-58			0-58		4-220
Greece (lignite)	117-390	44-206	59-205			9-41	
Hungary	20-480					12-97	30-384
Poland	Up to 159, av 18					Up to 123, av 11	Up to 785
Romania	Up to 415, av 80	Up to 557, av 126	Up to 510, av 210	Up to 580, av 262	Up to 170, av 62		
UK	7-19	8-22			7-19		55-314
USA	6-73	8.9-59	12-78	3-52	4-21		

<http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>

Table 3: NORM radionuclide activity in Coal Ash and slag (Bq/kg)

	Uranium series, Ra-226	Thorium series	K-40
Hungary	200-2000	20-300	300-800
USA	100-600	30-300	100-1200
Germany ash	6-166	3-120	125-742
Germany slag	68-245	76-170	337-1240
Australia (U av 0.9 ppm, Th av 2.6 ppm)	Total: 2630		
Australia: NSW	Total: 3200		

<http://www.world-nuclear.org/information-library/safety-and-security/radiation-and-health/naturally-occurring-radioactive-materials-norm.aspx>

Con un contenuto di 1 ppm di U (1 g di U in 1 Ton di C) l'U potrebbe generare maggiore energia di quella che si ricava dalla combustione del carbone stesso...

L'U (e il Th) si concentrano molto nelle ceneri (che in teoria dovrebbero essere bloccate dai filtri delle centrali a carbone).

...lo si dovrebbe però separare dal C e bruciare in un reattore nucleare.

Alcune ceneri di carbone della Cina (Bacini di Bangmai e Mengwand, Yunnan) contengono fino a 4000 ppm (0,4%) di U, e vengono utilizzate come sorgenti di U.

Le centrali a carbone esistenti nel mondo, oltre a produrre enormi emissioni di CO₂, rilasciano sostanze radioattive nell'ambiente in misura superiore rispetto a quelle rilasciate da tutte le centrali nucleari attualmente esistenti.

Solo negli USA vengono rilasciate in aria circa 800 tonnellate di U dalle centrali a carbone.

L'isotopo instabile viene definito **isotopo radioattivo** o radioisotopo o radionuclide o nuclide radioattivo.

L'isotopo radioattivo si trasforma in un altro elemento detto **isotopo radiogenico**.

Gli isotopi radioattivi decadono con tassi continui ma in modo stocastico (a caso)

Tempo di dimezzamento
o emivita



Riproduzione sperimentale del decadimento stocastico dei nuclidi instabili



Facciamo partire l'esperimento ($T = 0$).
Parte la sveglia radioattiva



Alcuni (non tutti insieme) “nuclidi”
radioattivi cominciano a trasformarsi in
nuclidi radiogenici. Non sappiamo quale
di questi e quando si trasformerà



Quello che sappiamo è che dopo un certo tempo avremo una certa percentuale di “radionuclidi” (isotopi padri) trasformati in isotopi figli (isotopi radiogenici)



Isotopo	T di dimezzamento	Radiazione emessa
^{218}Rn	<i>1,9 millisecondi</i>	<i>alfa</i>
^{222}Rn	<i>3,82 giorni</i>	<i>alfa</i>
^{131}I	<i>8,02 giorni</i>	<i>beta</i>
^{210}Po	<i>138,4 giorni</i>	<i>alfa e gamma</i>
^{134}Cs	<i>2,06 anni</i>	<i>beta e gamma</i>
^{14}C	<i>5.730 anni</i>	<i>beta</i>
^{235}U	<i>703,8 milioni di anni</i>	<i>beta</i>
^{40}K	<i>1,25 miliardi di anni</i>	<i>beta e gamma</i>
^{238}U	<i>4,47 miliardi di anni</i>	<i>alfa</i>
^{232}Th	<i>14,1 miliardi di anni</i>	<i>alfa e gamma</i>
^{87}Rb	<i>49,6 miliardi di anni</i>	<i>beta</i>

Isotopo T di dimezzamento Attività specifica

^{218}Rn 1,9 millisecondi $9,6 \cdot 10^{22}$ Bq/g

^{222}Rn 3,82 giorni $5,7 \cdot 10^{15}$

^{131}I 8,02 giorni $4,6 \cdot 10^{15}$

^{210}Po 138,4 giorni $1,7 \cdot 10^{14}$

^{134}Cs 2,06 anni $4,8 \cdot 10^{13}$

0,1 Bq/g

^{14}C 5.730 anni $1,6 \cdot 10^{11}$

^{235}U 703,8 milioni di anni $8,0 \cdot 10^4$

^{40}K 1,25 miliardi di anni $2,6 \cdot 10^5$

^{238}U 4,47 miliardi di anni $1,2 \cdot 10^4$

^{232}Th 14,1 miliardi di anni $4,0 \cdot 10^3$

^{87}Rb 49,6 miliardi di anni $3,1 \cdot 10^3$



A partire dalla formazione della Terra (~4,56 Ga) quale di questi isotopi è diminuito in quantitativi maggiori?

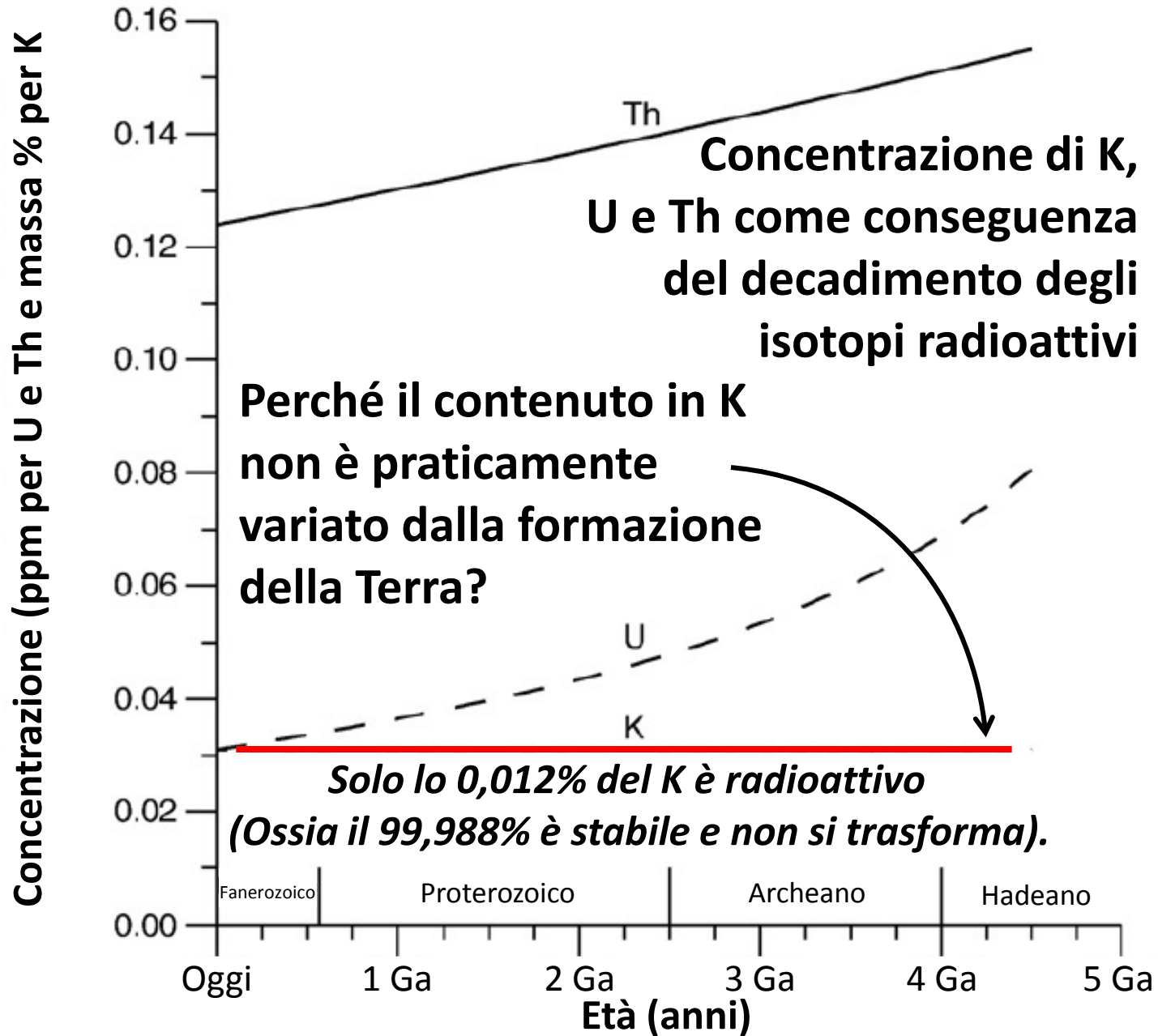
^{235}U 703,8 milioni di anni

^{40}K 1,25 miliardi di anni

^{238}U 4,47 miliardi di anni

^{232}Th 14,1 miliardi di anni

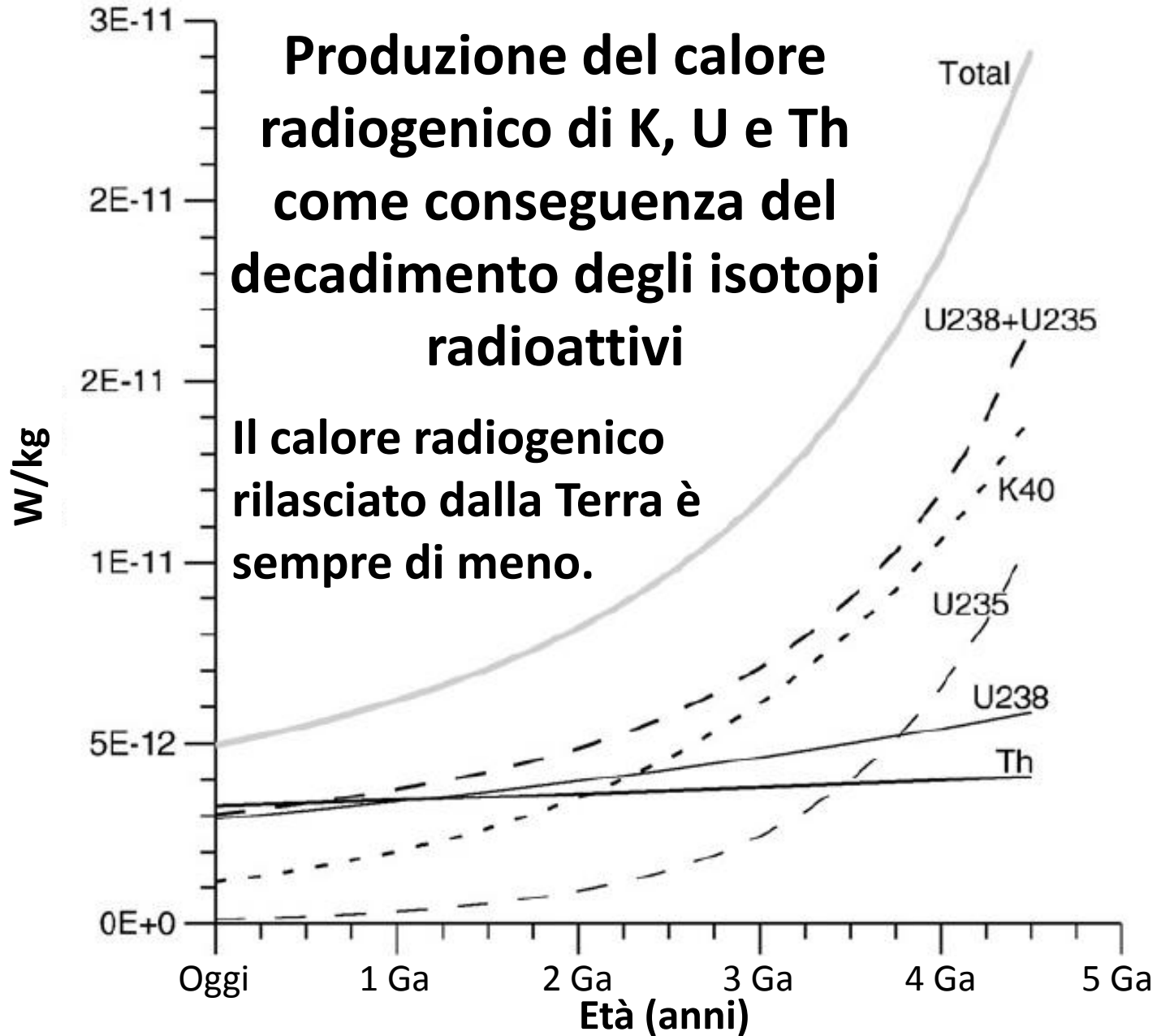
Da: Vilà et al., 2010 (Tectonophysics)



Da: Vilà et al., 2010 (Tectonophysics)

Produzione del calore radiogenico di K, U e Th come conseguenza del decadimento degli isotopi radioattivi

Il calore radiogenico rilasciato dalla Terra è sempre di meno.



Le scorie nucleari con tempo di dimezzamento molto lunghi sono pericolose.



In realtà non è così. Isotopi con $T_{1/2}$ elevato (centinaia di migliaia o milioni di anni) sono caratterizzati anche da tassi di decadimento radioattivo (attività) relativamente bassi.

Composizione degli isotopi radioattivi rilasciati dalla nube di Chernobyl

Isotopo	Frazione (%)	T di ½
$^{133}\text{Xenon}$	55,1	5 giorni
$^{131}\text{Iodio}$	14,9	8 giorni
$^{132}\text{Tellurio}$	9,7	3 giorni
$^{133}\text{Iodio}$	7,7	21 ore
$^{239}\text{Nettunio}$	3,4	2 giorni
$^{140}\text{Bario}$	2,0	13 giorni
$^{103}\text{Rutenio}$	1,4	40 giorni
$^{89}\text{Stronzio}$	0,9	52 giorni
$^{137}\text{Cesio}$	0,7	30 anni
$^{95}\text{Zirconio}$	0,7	65 giorni
$^{141}\text{Cerio}$	0,7	33 giorni
$^{90}\text{Stronzio}$	0,07	28 anni

Quasi tutti gli isotopi rilasciati hanno cessato di emettere radiazioni nel giro di pochi giorni o mesi (10 volte il tempo di dimezzamento).

Solo il ^{137}Cs resterà ancora per qualche centinaio di anni ancora.

Composizione degli isotopi radioattivi rilasciati dalla nube di Chernobyl

Isotopo	Frazione (%)	T di ½	Attività specifica
<i>¹³³Xenon</i>	<i>55,1</i>	<i>5 giorni</i>	<i>7,3*10¹⁵ Bq/g</i>
<i>¹³¹Iodio</i>	<i>14,9</i>	<i>8 giorni</i>	<i>2,5*10¹⁵</i>
<i>¹³²Tellurio</i>	<i>9,7</i>	<i>3 giorni</i>	<i>1,2*10¹⁶</i>
<i>¹³³Iodio</i>	<i>7,7</i>	<i>21 ore</i>	<i>4,1*10¹⁶</i>
<i>²³⁹Nettunio</i>	<i>3,4</i>	<i>2 giorni</i>	<i>1,0*10¹⁶</i>
<i>¹⁴⁰Bario</i>	<i>2,0</i>	<i>13 giorni</i>	<i>2,6*10¹⁵</i>
<i>¹⁰³Rutenio</i>	<i>1,4</i>	<i>40 giorni</i>	<i>1,2*10¹⁵</i>
<i>⁸⁹Stronzio</i>	<i>0,9</i>	<i>52 giorni</i>	<i>1,0*10¹⁵</i>
<i>¹³⁷Cesio</i>	<i>0,7</i>	<i>30 anni</i>	<i>3,2*10¹²</i>
<i>⁹⁵Zirconio</i>	<i>0,7</i>	<i>65 giorni</i>	<i>7,8*10¹⁴</i>
<i>¹⁴¹Cerio</i>	<i>0,7</i>	<i>33 giorni</i>	<i>1,0*10¹⁵</i>
<i>⁹⁰Stronzio</i>	<i>0,07</i>	<i>28 anni</i>	<i>5,2*10¹²</i>

Isotopo	T di dimezzamento	Attività specifica
^{218}Rn	<i>1,9 millisecondi</i>	$9,6 \cdot 10^{22} \text{ Bq/g}$
^{222}Rn	<i>3,82 giorni</i>	$5,7 \cdot 10^{15}$
^{131}I	<i>8,02 giorni</i>	$4,6 \cdot 10^{15}$
^{210}Po	<i>138,4 giorni</i>	$1,7 \cdot 10^{14}$

Quale di questi isotopi è il più pericoloso?

^{238}U	<i>4,47 miliardi di anni</i>	$1,2 \cdot 10^4$
^{232}Th	<i>14,1 miliardi di anni</i>	$4,0 \cdot 10^3$
^{87}Rb	<i>49,6 miliardi di anni</i>	$3,1 \cdot 10^3$

Radon

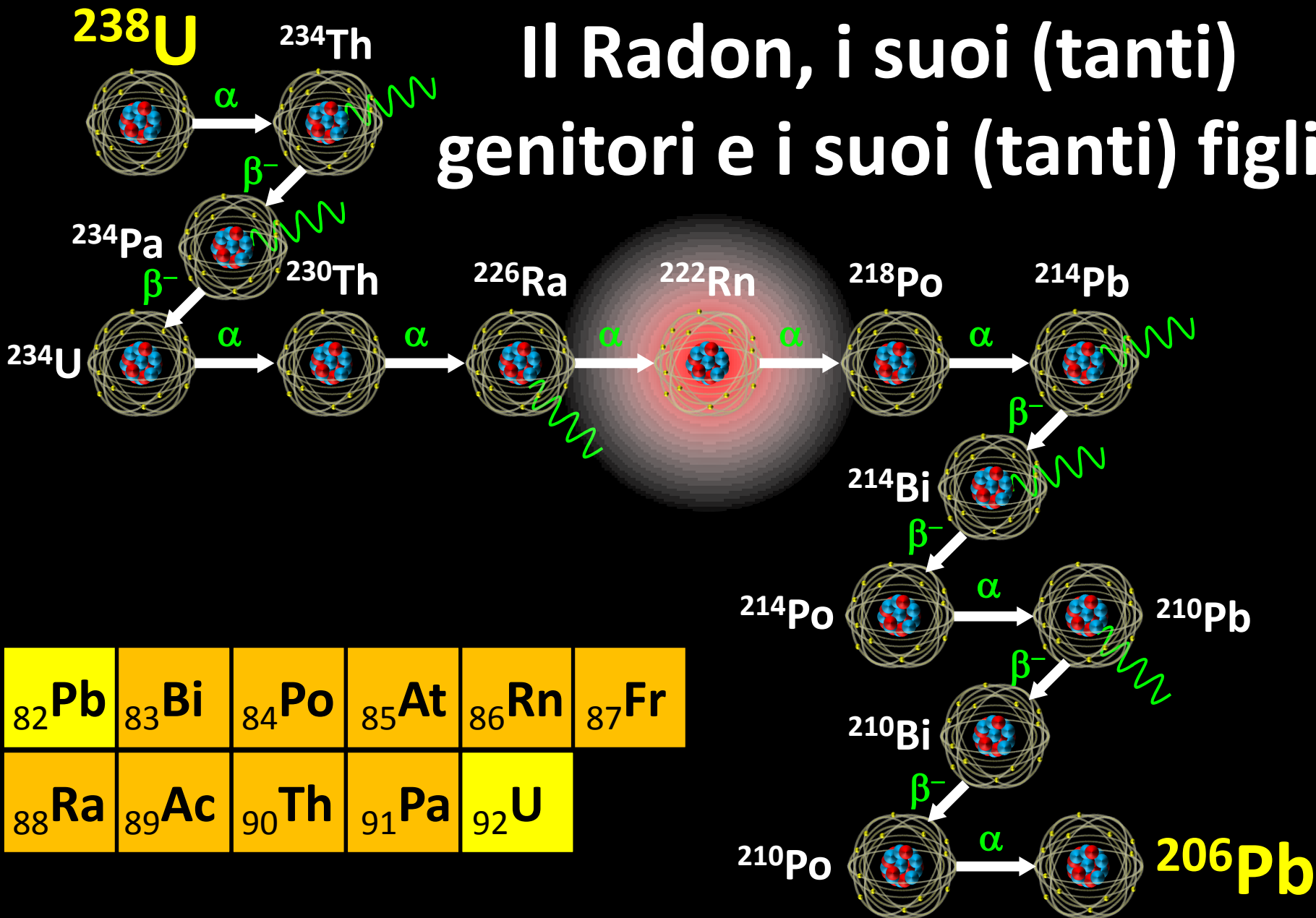
Il Radon (Rn) è un gas nobile.

Alcuni nuclidi (es. ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th), durante il loro decadimento, producono isotopi del Rn (^{219}Rn , ^{220}Rn , ^{222}Rn) fortemente radioattivi.

A loro volta, durante il decadimento, questi isotopi del Rn producono altri isotopi fortemente radioattivi (^{218}Po , ^{214}Po , ^{210}Po).

Classificato come agente estremamente pericoloso e sicuramente carcinogeno.

Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli

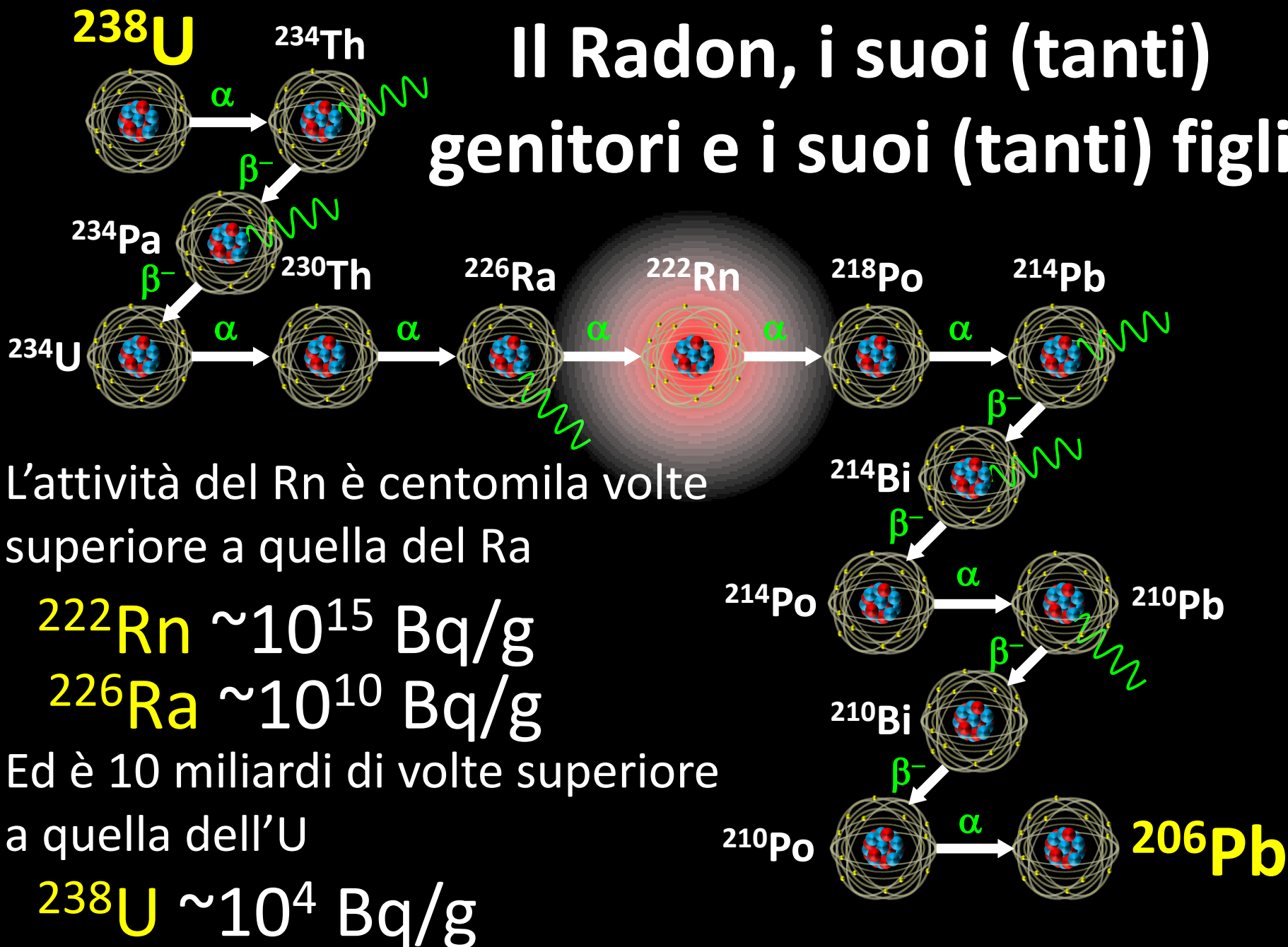


In pratica più U c'è e più Rn viene prodotto.

Ricordate i sanpietrini del Vaticano?



Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



L'attività del Rn è centomila volte superiore a quella del Ra

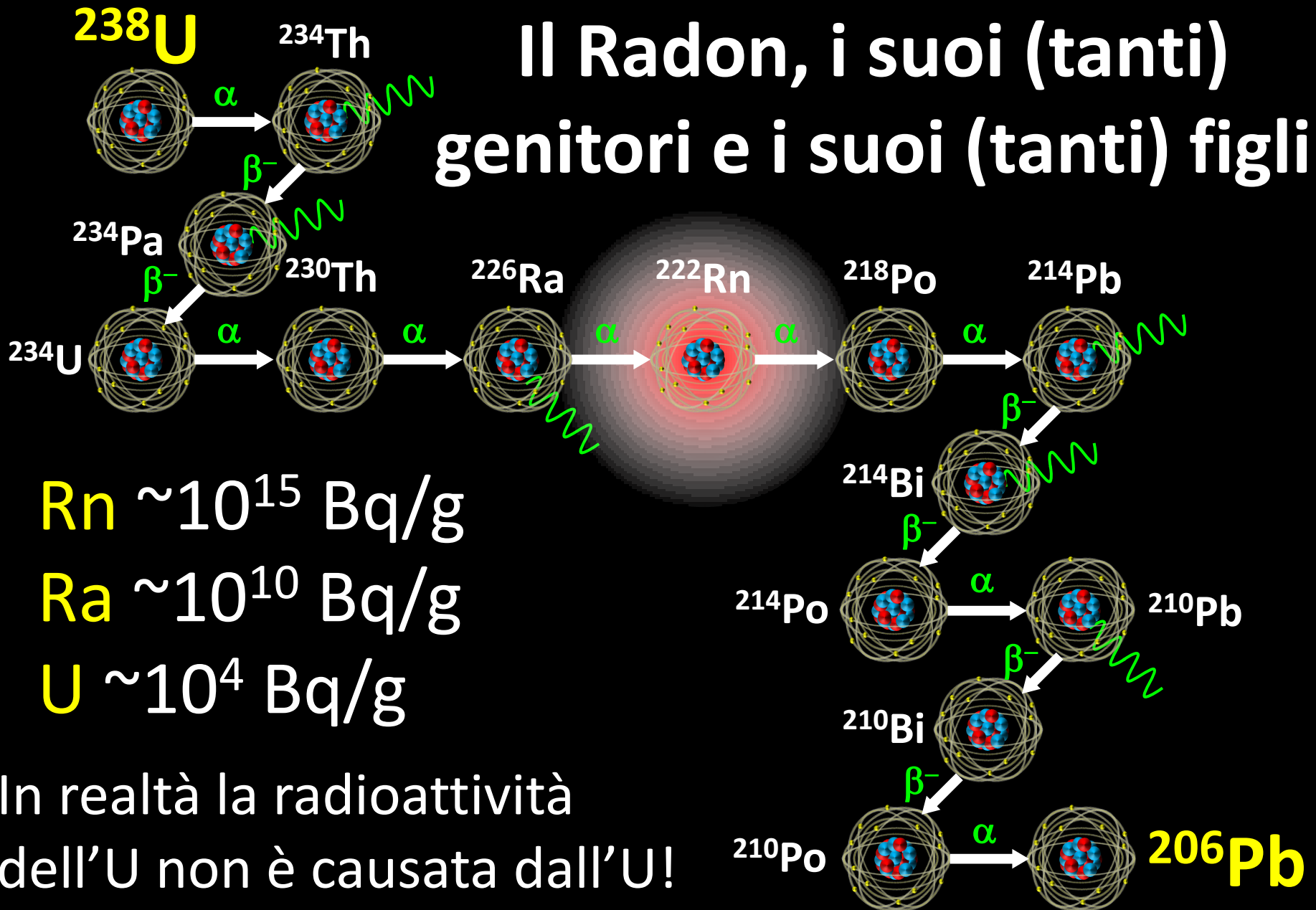
$$^{222}\text{Rn} \sim 10^{15} \text{ Bq/g}$$

$$^{226}\text{Ra} \sim 10^{10} \text{ Bq/g}$$

Ed è 10 miliardi di volte superiore a quella dell'U

$$^{238}\text{U} \sim 10^4 \text{ Bq/g}$$

Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



Rn $\sim 10^{15}$ Bq/g

Ra $\sim 10^{10}$ Bq/g

U $\sim 10^4$ Bq/g

In realtà la radioattività dell'U non è causata dall'U!

Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



Durante ogni singolo passaggio si genera energia sotto varie forme.

Ad eccezione del primo e ultimo termine, tutti gli altri isotopi sono **radiogenici** (derivano dal decadimento di un radionuclide instabile) e **radioattivi** (decadono in un altro nuclide).

Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



Tutti gli isotopi, ad eccezione di ^{206}Pb (isotopo stabile) sono caratterizzati da diversi tempi di dimezzamento, variabili da frazioni di millisecondi a miliardi di anni.

Il Radon, i suoi (tanti) genitori e i suoi (tanti) figli



Non tutti questi isotopi sono attivi allo stesso modo.

Es. il Radio (scoperto dai coniugi Curie, insieme al Po) è 7 milioni di volte più attivo dell'U.