

Dalla Fisica delle Particelle all'Archeocheologia

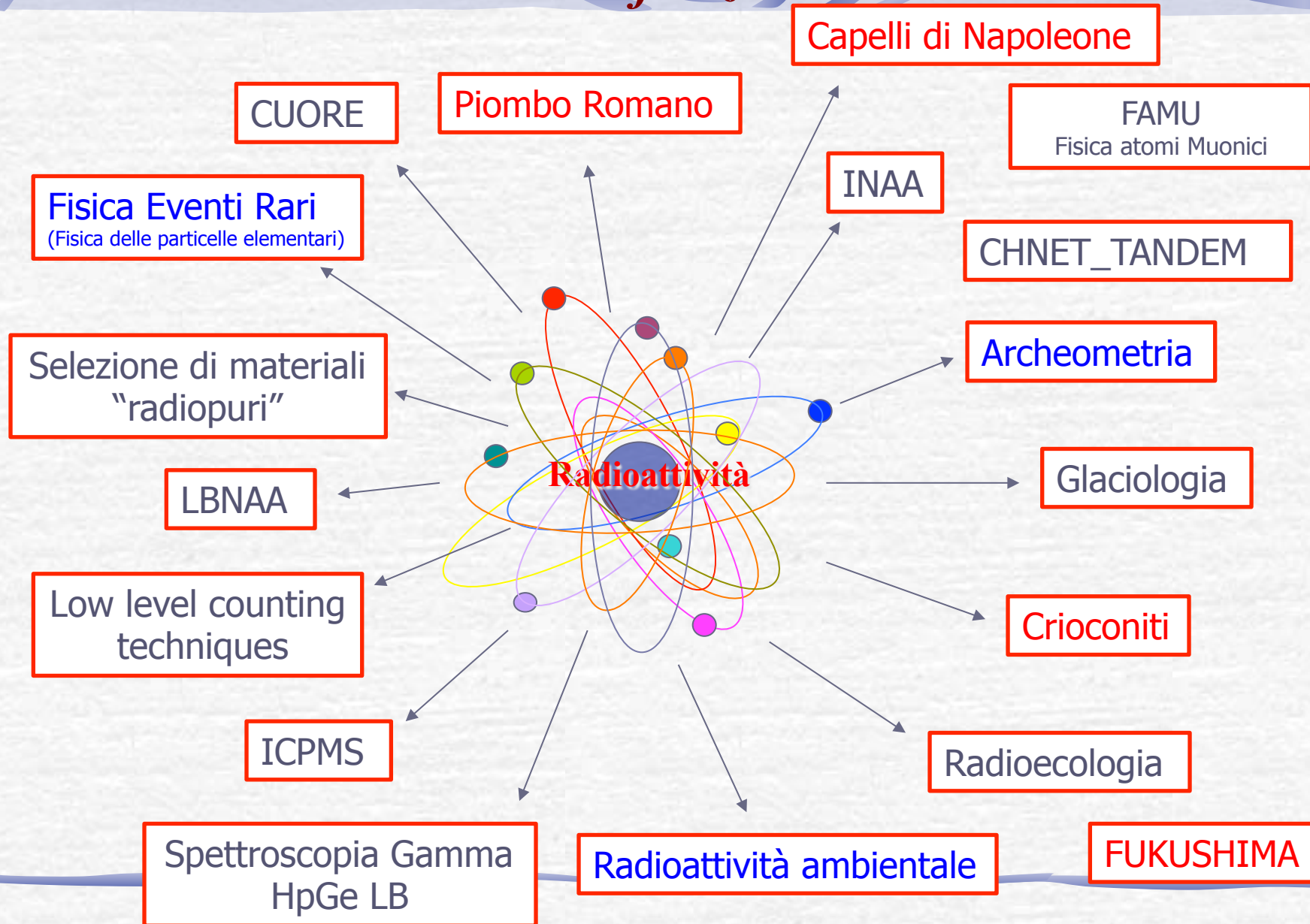
Massimiliano **CLEMENZA**

UNIMIB - Dipartimento di Fisica "G. Occhialini" e INFN sezione di Milano Bicocca

Dalla Fisica delle Particelle all'Archeocheologia

- Radioattività
- Stabilità nucleare, tavola dei nuclidi....
- Fisica degli Eventi Rari: CUORE e LNGS
- Piombo Romano
- Rapporti Isotopici

La radioattività: alcune definizioni



La radioattività: alcune definizioni

La radioattività non è stata inventata dall'uomo, ma è un *fenomeno naturale*, presente ovunque: nelle Stelle, sulla Terra e nei nostri stessi corpi.

La radioattività è il fenomeno per cui alcuni nuclei si trasformano in altri emettendo particelle.

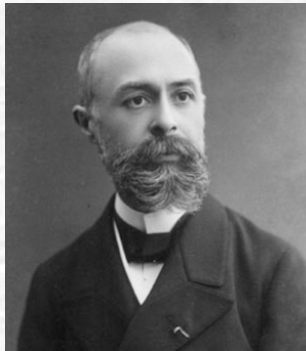
What is radioactivity?

Si definisce **Radioattività**, la proprietà di alcuni elementi presenti in natura come il Radio, l'Uranio o il Torio, (o isotopi come il ^{14}C) di **emettere spontaneamente particelle** e/o **radiazione elettromagnetica** in seguito a trasmutazioni dei loro nuclei dette decadimento radioattivo (reazioni nucleari);

Il processo può andare avanti più o meno rapidamente fino a che gli elementi prodotti, non raggiungono una condizione di “**stabilità nucleare**”



W. C. Roentgen



A. H. Becquerel



M. S. Skłodowska - Curie

Periodic Table of the Elements

1 IA New Original																		18 VIIIA
1 H Hydrogen 1.00794	2 He Helium 4.002602											3 B Boron 10.811	4 C Carbon 12.0107	5 N Nitrogen 14.0064	6 O Oxygen 15.9994	7 F Fluorine 18.9984032	8 Ne Neon 20.1797	
3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012182											13 Al Aluminum 26.9815386	14 Si Silicon 28.0855	15 P Phosphorus 30.973761	16 S Sulfur 32.064	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948	
11 Na Sodium 22.989770	12 Mg Magnesium 24.3050	3 IIIB	4 IVB	5 VB	6 VIB	7 VIIB	8 VIII	9 VIII	10 VIII	11 IB	12 IIB	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.64	33 As Arsenic 74.92160	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
19 K Potassium 39.0983	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.955910	22 Ti Titanium 47.867	23 V Vanadium 50.9415	24 Cr Chromium 51.9961	25 Mn Manganese 54.938043	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933200	28 Ni Nickel 58.6934	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.409	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.760	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.90447	54 Xe Xenon 131.29	
37 Rb Rubidium 85.4678	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.90585	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.90638	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.90550	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.8682	48 Cd Cadmium 112.411	81 Tl Thallium 204.3833	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98039	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)	
55 Cs Cesium 132.90545	56 Ba Barium 137.327	57 to 71 Lanthanide series	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.9479	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.217	78 Pt Platinum 195.078	79 Au Gold 196.96655	80 Hg Mercury 200.59	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (289)	117 Uus Ununseptium (289)	118 Uuo Ununoctium (289)	
87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89 to 103 Actinide series	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (269)	109 Mt Meitnerium (268)	110 Ds Darmstadtium (271)	111 Rg Roentgenium (272)	112 Uub Ununbium (285)	113 Uut Ununtrium (284)	114 Uuq Ununquadium (289)	115 Uup Ununpentium (288)	116 Uuh Ununhexium (289)	117 Uus Ununseptium (289)	118 Uuo Ununoctium (289)	

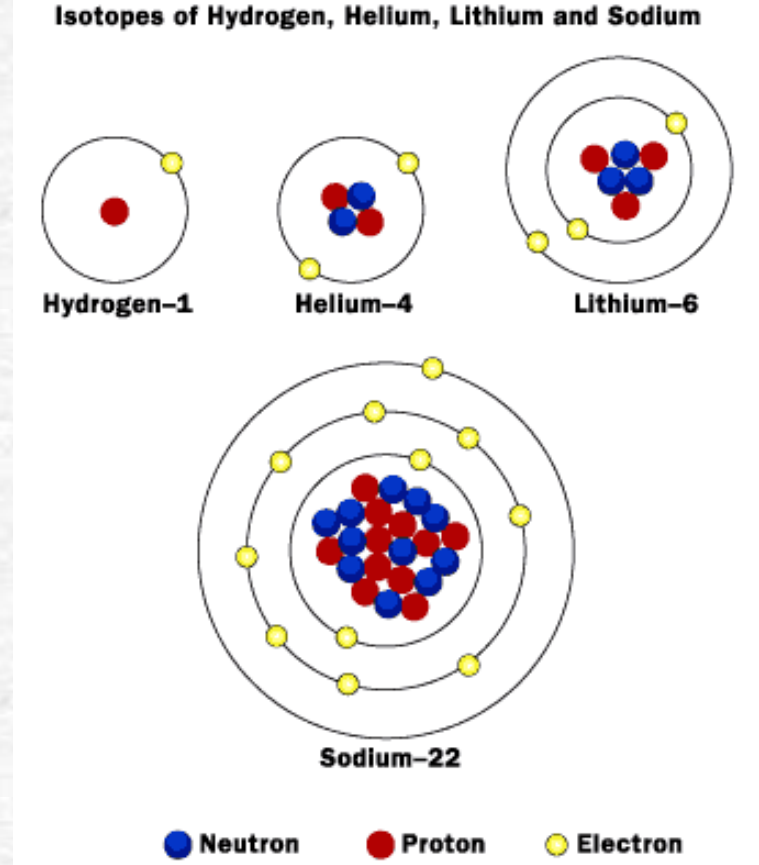
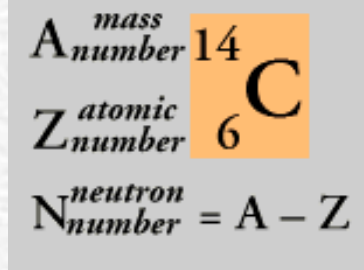
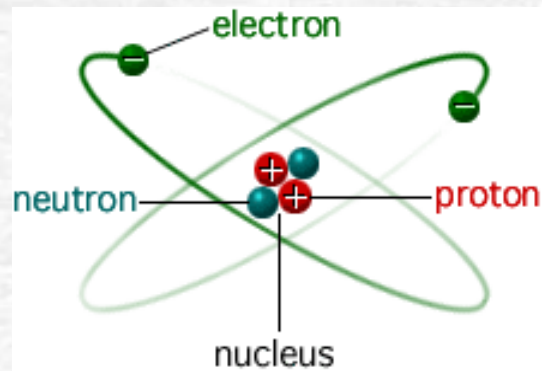
Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.

Design Copyright © 2017 Michael Davis www.davisperiodic.com

57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.90766	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.92534	66 Dy Dysprosium 162.500	67 Ho Holmium 164.93032	68 Er Erbium 167.259	69 Tm Thulium 168.93421	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.0381	91 Pa Protactinium 231.03688	92 U Uranium 238.02891	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Note: The subgroup numbers 1-18 were adopted in 1984 by the International Union of Pure and Applied Chemistry. The names of elements 113-118 are the Latin equivalents of those numbers.

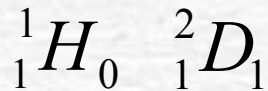
The model of the nucleus



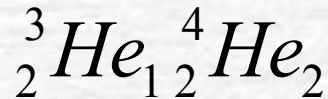
Nucleo con Z protoni (p) and N neutroni (n) with a total mass number A

$$A = Z + N$$

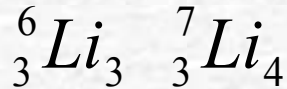
Hydrogen: 1 p, 0,1 n



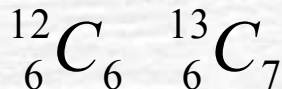
Helium: 2 p, 1,2 n



Lithium: 3 p, 3,4 n

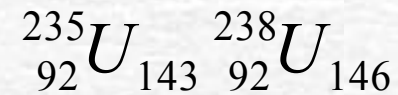
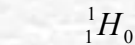


Carbon: 6 p, 6,7 n



...

Uranium: 92 p, 143,146 n



Atoms, Isotopes, Nuclides, Radionuclides

Periodic Table of the Elements

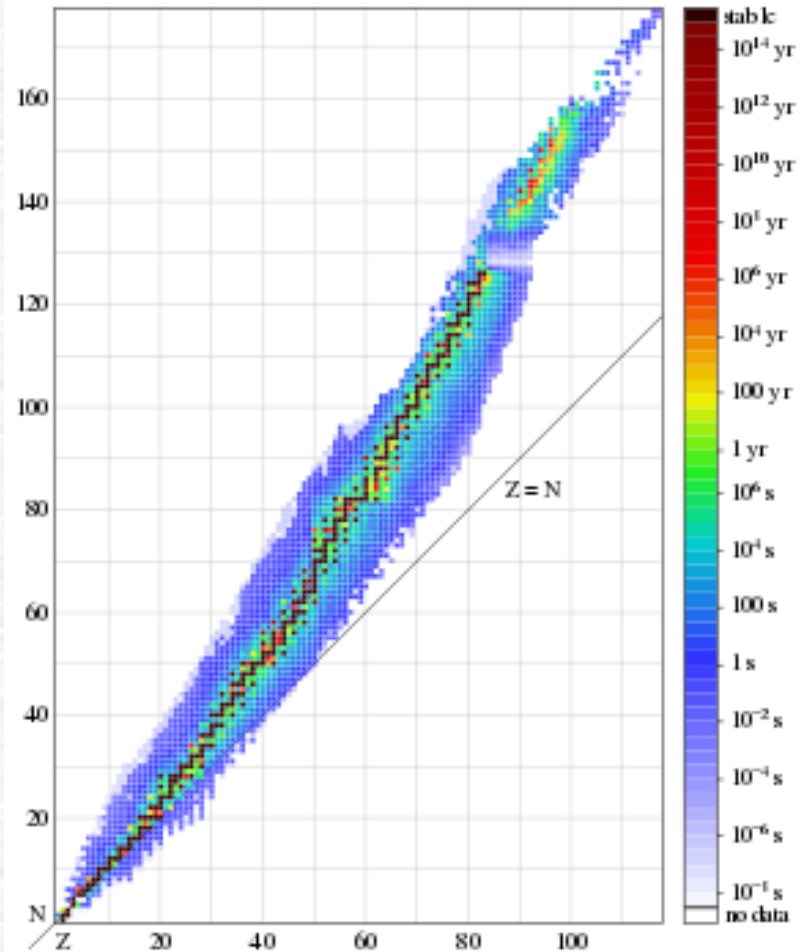
Legend:

- Alkali metals (Yellow)
- Alkaline earth metals (Orange)
- Transition metals (Red)
- Lanthanide series (Light Blue)
- Actinide series (Dark Blue)
- Poor metals (Light Green)
- Nonmetals (Green)
- Noble gases (Cyan)
- Solid (White)
- Liquid (Light Blue)
- Gas (Light Green)
- Synthetic (Dark Blue)

Atomic masses in parentheses are those of the most stable or common isotope.



Radio-Nuclides Table



- **Atomi:** H, Li, C, Na, Al... **Caratteristiche chimiche Z**
- **Isotopi:** ${}^A X_Z, {}^{A+1} X_Z, {}^{A+2} X_Z$ es. ${}^1 H, {}^2 H, \dots$ **Massa A**
A: n. di Massa (numero di nucleoni)
- **Nuclidi:** ${}^A X_Z, {}^{A+1} X_Z, {}^{Am} X_Z$ es. ${}^{99m} Tc, {}^{99} Tc,$
Z: Atomic number (number of protons/elettrons)
N: number of neutrons A-Z **"Caratteristiche Nucleari"**

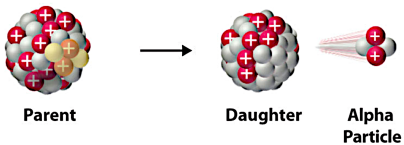
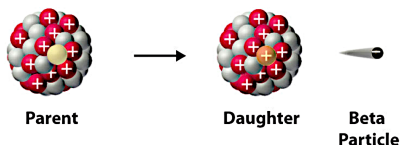
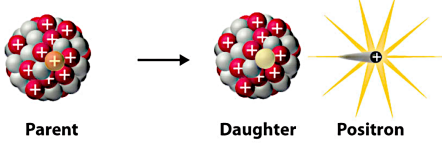
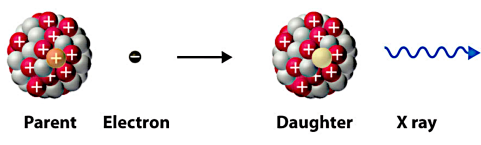
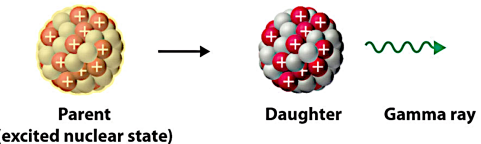
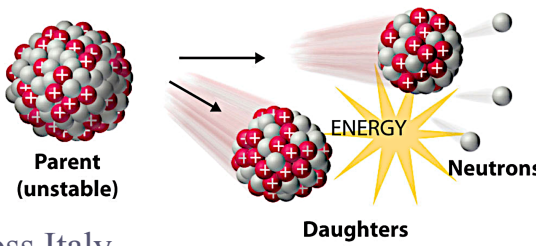
2 8 18 32 18 4	Pb 327.46 1749	Pb203 51.873 h 5/2- *	Pb204 1.4E17 y 0+	Pb205 1.53E+7 y 5/2-	Pb206 0+	Pb207 1/2-	Pb208 0+	Pb209 3.253 h 9/2+	Pb210 22.3 y 0+	Pb211 36.1 m 9/2+	Pb212 10.64 h 0+	Pb213 10.2 m (9/2+)	Pb214 26.8 m 0+
82	+2+4 207.2 $1.03 \times 10^{-8} \%$	EC	Art. 1.4	EC	24.1	22.1	52.4	β^-	$\beta^- \alpha$	β^-	β^-	8	β^-

What is radioactivity?

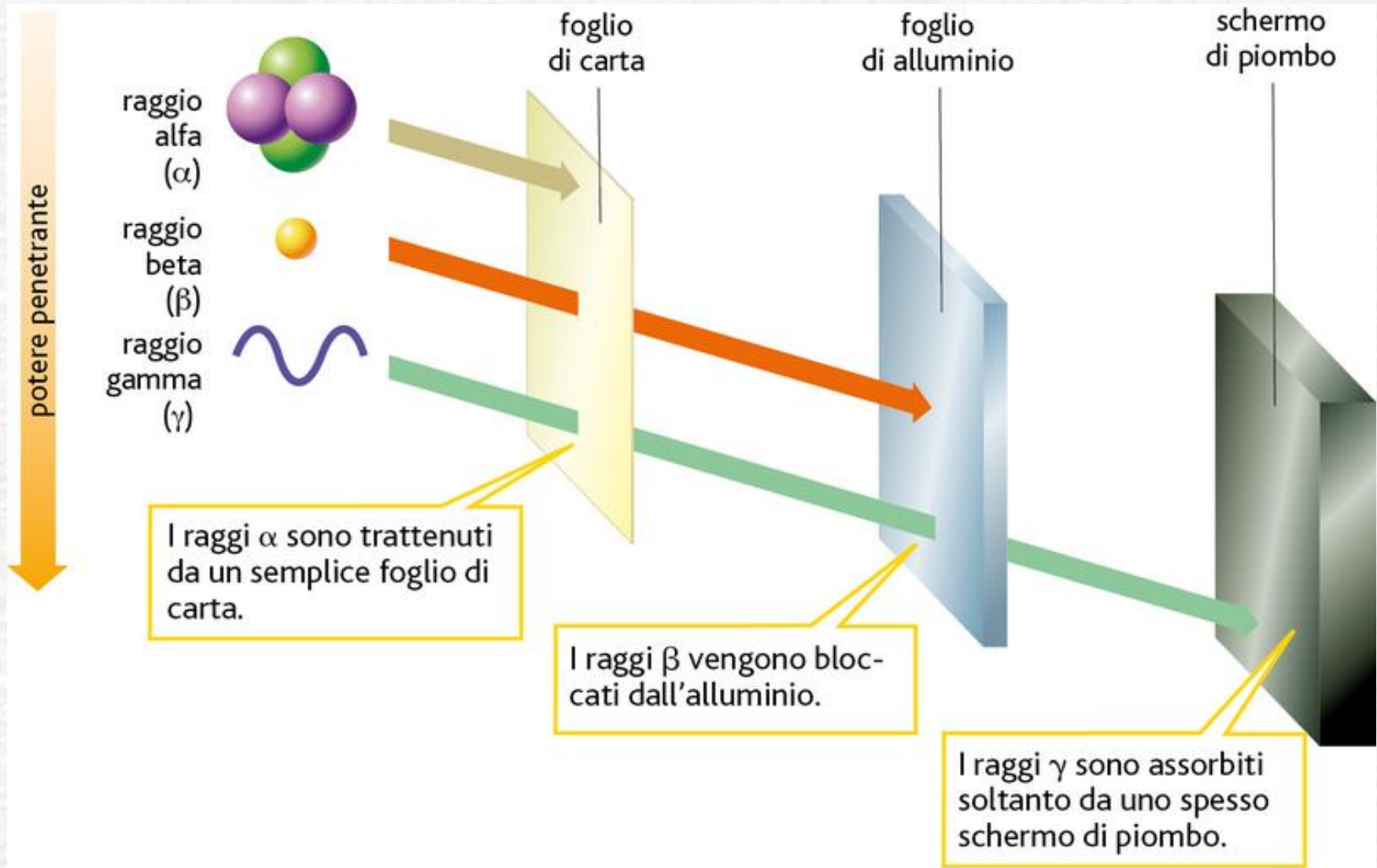
Si definisce **Radioattività**, la proprietà di alcuni elementi presenti in natura come il Radio, l'Uranio o il Torio, (o isotopi come il ^{14}C) di **emettere** spontaneamente **particelle energetiche** e/o **radiazione elettromagnetica** in seguito a trasmutazione dei loro nuclei o decadimento radioattivo (reazioni nucleari);

Il processo può andare avanti più o meno rapidamente fino a che gli elementi prodotti, non raggiungono una condizione di “**stabilità nucleare**”

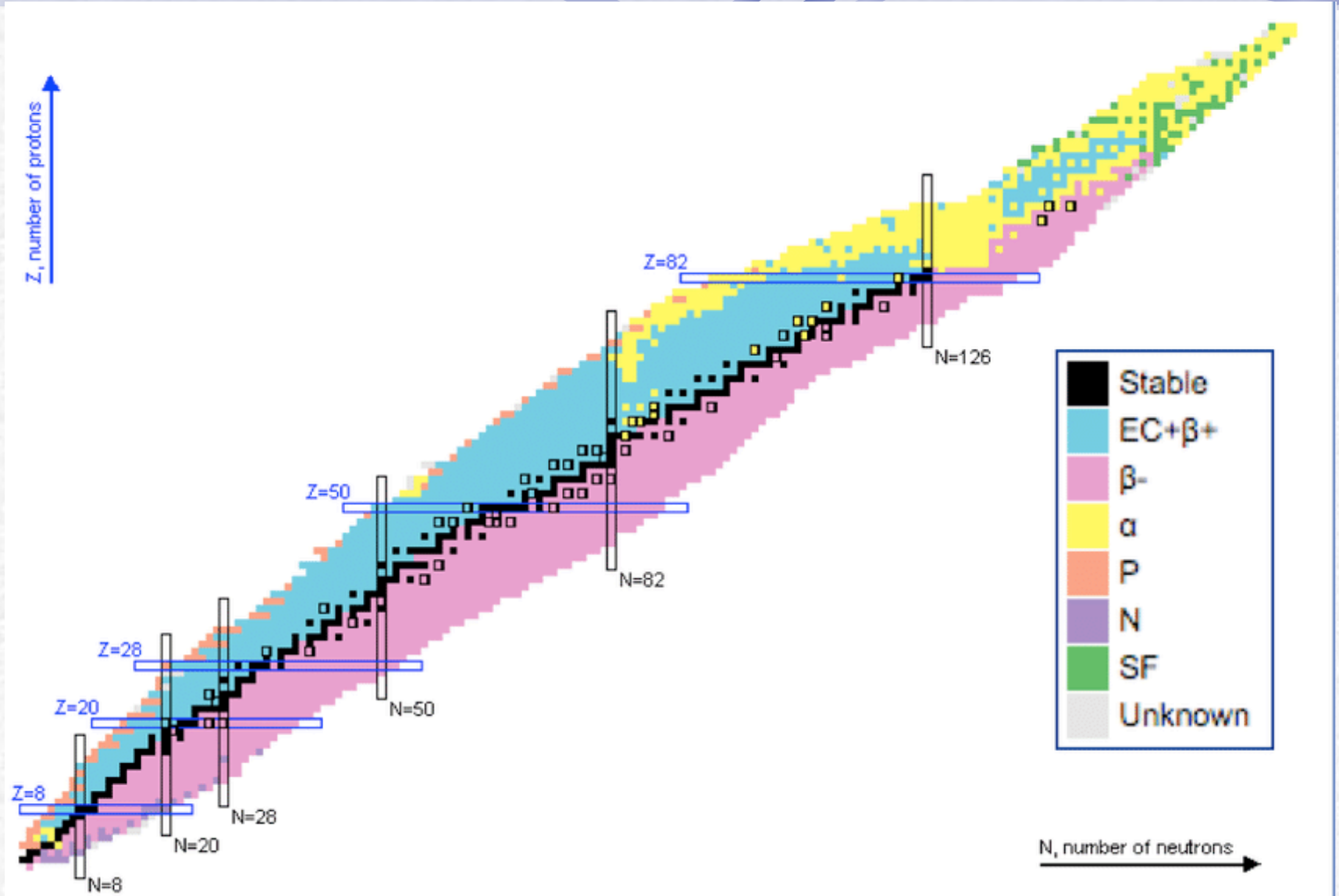
Decay modes

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^{A-4}_{Z-2}X' + \frac{4}{2}\alpha$	 <p>Parent → Daughter + Alpha Particle</p>
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z+1}X' + {}^0_{-1}\beta$	 <p>Parent → Daughter + Beta Particle</p>
Positron emission	${}^0_{+1}\beta$	${}^A_ZX \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + {}^0_{+1}\beta$	 <p>Parent → Daughter + Positron</p>
Electron capture	X rays	${}^A_ZX + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}^A_{Z-1}X' + \text{X ray}$	 <p>Parent + Electron → Daughter + X ray</p>
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}^A_ZX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}^A_ZX' + {}^0_0\gamma$	 <p>Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray</p>
Spontaneous fission	Neutrons	${}^{A+B+C}_Z X \longrightarrow {}^A_Z X' + {}^B_Y X' + C {}^1_0 n$	 <p>Parent (unstable) → Daughters + Neutrons + ENERGY</p>

Radioactive decays



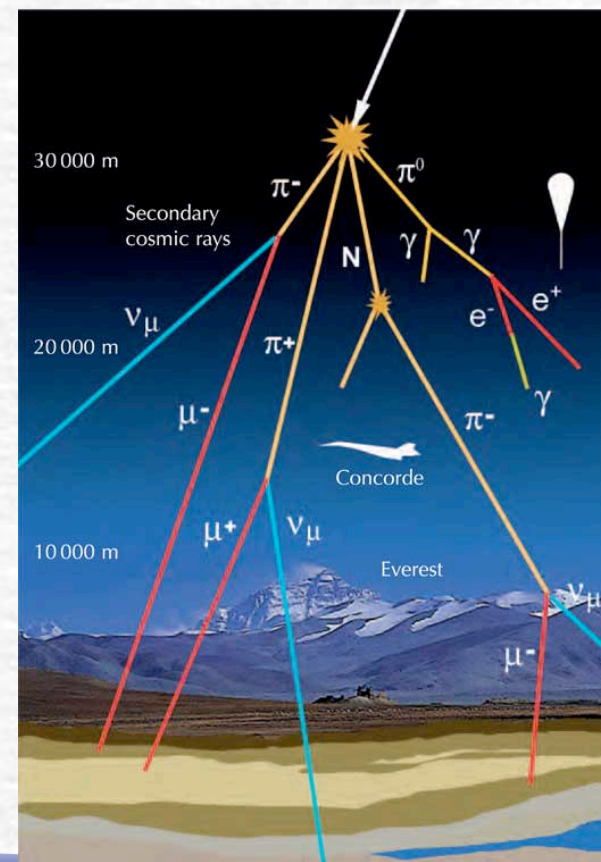
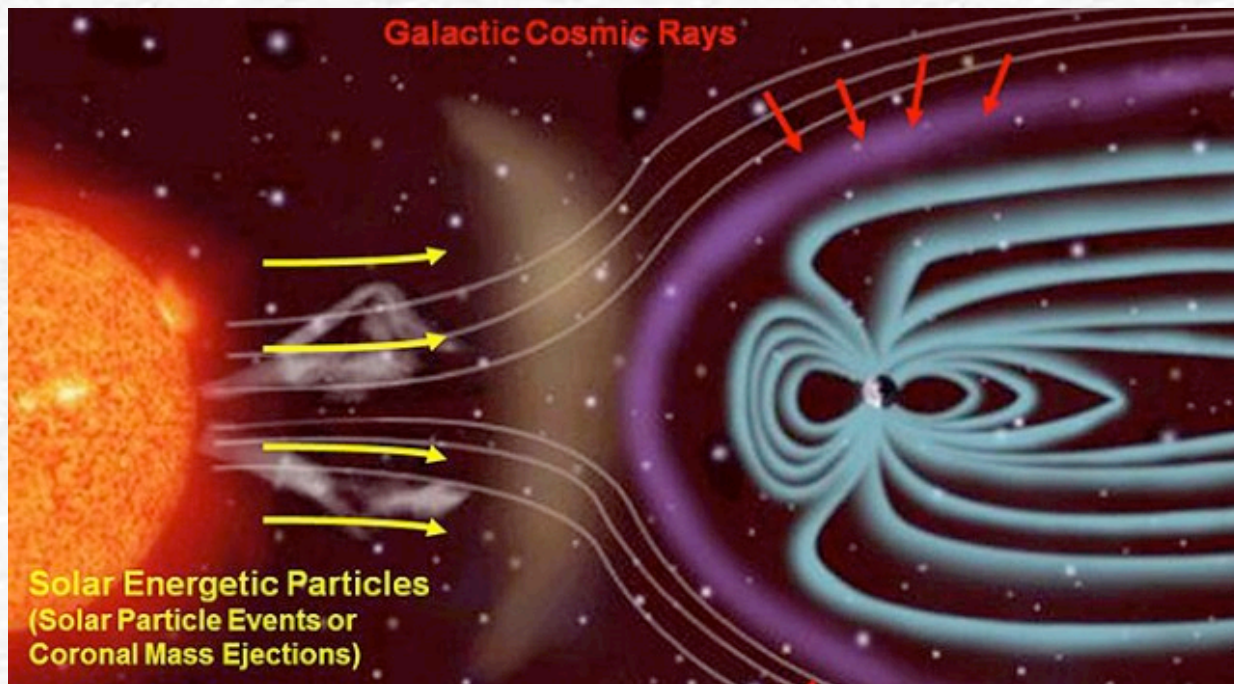
Valley of stability.



Cosa sono i Muoni?

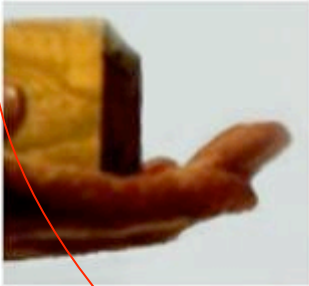
Il **muone** è un **leptone** ovvero una particella subatomica fondamentale (*un elettrone più grande!*)

È una particella che troviamo in natura!!!
All'interno dei raggi cosmici



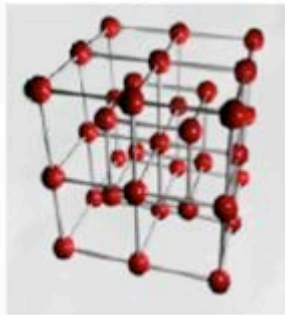
Nuclear scale

Matter



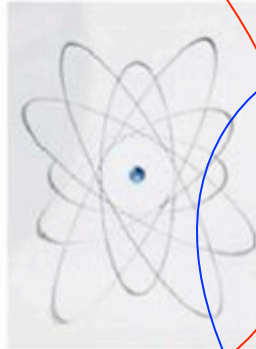
Macroscopic

Crystal



10^{-9} m

Atom



10^{-10} m

Atomic nucleus



10^{-14} m

Nucleon



10^{-15} m

Quark

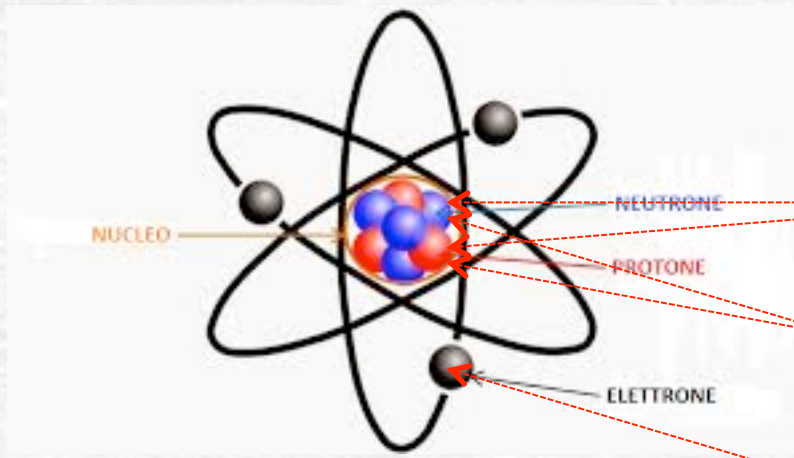


$< 10^{-18}$ m

Nuclear physics:
studies the properties of nuclei and
the interactions inside and between them

La materia

Tutta la materia ordinaria che osserviamo nel mondo macroscopico è costituita da **quark** e **leptoni**. Gli atomi sono composti da un **nucleo** ed uno o più **elettroni**, che sono i più leggeri tra i **leptoni** carichi. Il **nucleo** è costituito a sua volta da **protoni** e **neutroni** (detti anche **nucleoni**) che sono composti ciascuno da tre **quark**.



Standard Model of Elementary Particles

		three generations of matter (fermions)				
		I	II	III		
QUARKS	mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 125.09 \text{ GeV}/c^2$
	charge	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
	spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
		u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs
		$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
		$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		d down	s strange	b bottom	γ photon	
		$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$	
		-1	-1	-1	0	
		$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	mass	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 1.7 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	charge	0	0	0	± 1	
	spin	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	
		ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

I quark più leggeri sono up (u) e down (d), che combinati secondo lo schema:

uud formano il **protone**

mentre combinati secondo lo schema:

udd formano il **neutrone**

Il **muone** è un **leptone** ovvero una particella subatomica fondamentale (un elettrone più grande!)



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Esperimento "CUORE"

Cyrogenic **U**nderground **O**bservatory for **R**are **E**vents

Doppio decadimento beta senza emissione di neutrini

(vedi seminario Stefano Pozzi)

Fondo Radioattivo: Radiazioni ionizzanti non provenienti dal campione che possono essere rilevate dal detector, creando rumore

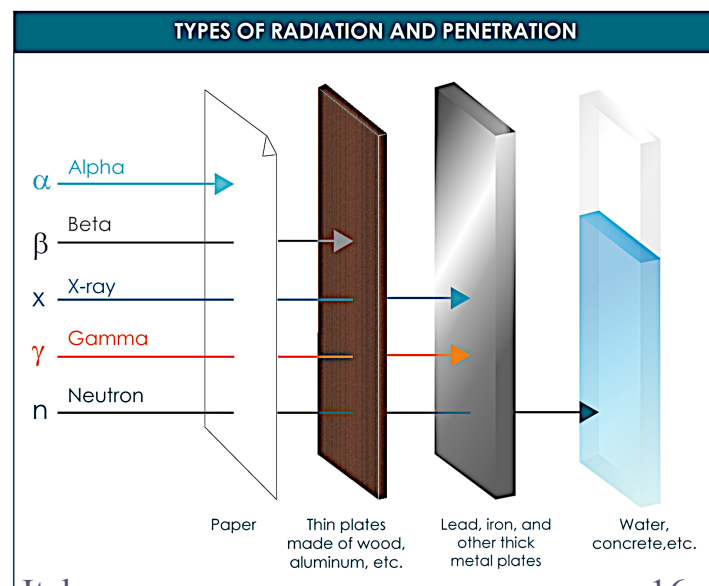
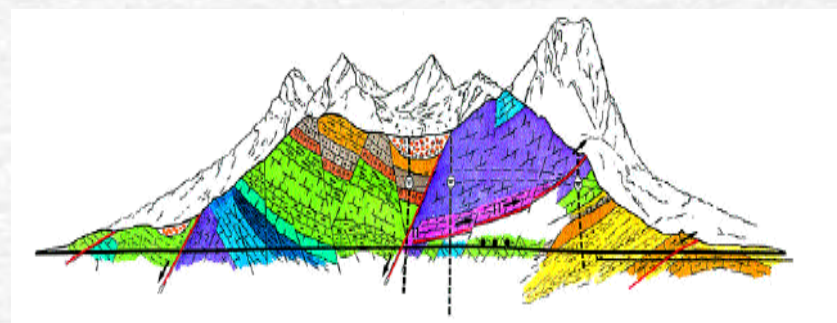
Il Fondo Radioattivo è originato da:

- **Raggi Cosmici**
- Radionuclidi primordiali



Necessario operare in condizioni di bassissimo fondo

- **Laboratori Sotterranei**
- **Schermature**
- Scelta di materiali radiopuri



Radioattività naturale

Radioattività un *fenomeno naturale*

Nella radioattività naturale si distinguono una componente di origine terrestre e una componente di origine extra-terrestre. La prima è dovuta ai radionuclidi cosiddetti primordiali presenti in varie quantità nei materiali inorganici della crosta terrestre (rocce, minerali) fin dalla sua formazione. La seconda è costituita da raggi cosmici. Quando ci si riferisce a queste sorgenti, si parla di fondo naturale di radiazioni.

Radioattività' naturale **terrestre**

Radioattività' naturale in **aria**

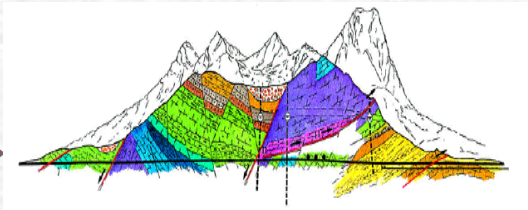
Radioattività' naturale nelle **acque**

Radioattività' naturale presente nel **corpo umano**

Raggi **cosmici**

Cosmic Rays: Laboratori Nazionali del Gran Sasso of INFN

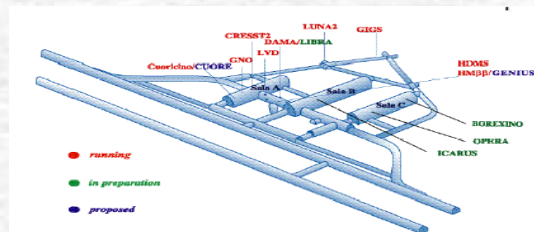
LNGS is the "largest" underground lab for astroparticle physics in the world



3 big experimental hall
(~ 100x20x18 m)



The INFN was established in the 1951 for researching in nuclear and astroparticles physics



1400 m of rock shield
(3500 m water equivalent)
cosmic ray reduced ~ 10^{-6}

This often means very big detector (few tons) with very strictly radio purity specification

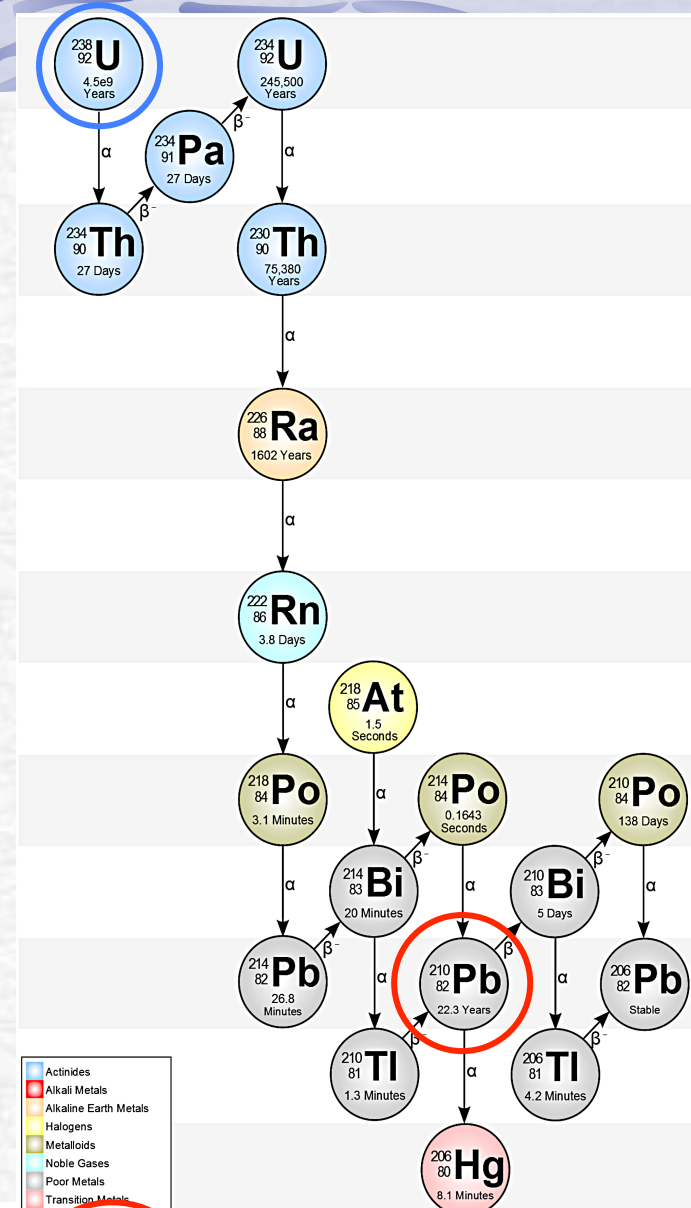
Experiments for the research of low energy rare events are carry out

Radioattività gamma: schermature di Piombo

Piombo materiale ideale:

- Alto $Z = 82$
- Alta densità = 11.98 g/cm^3
- Poco costoso = 2 euro/kg
- **Leggermente Radioattivo!!!**

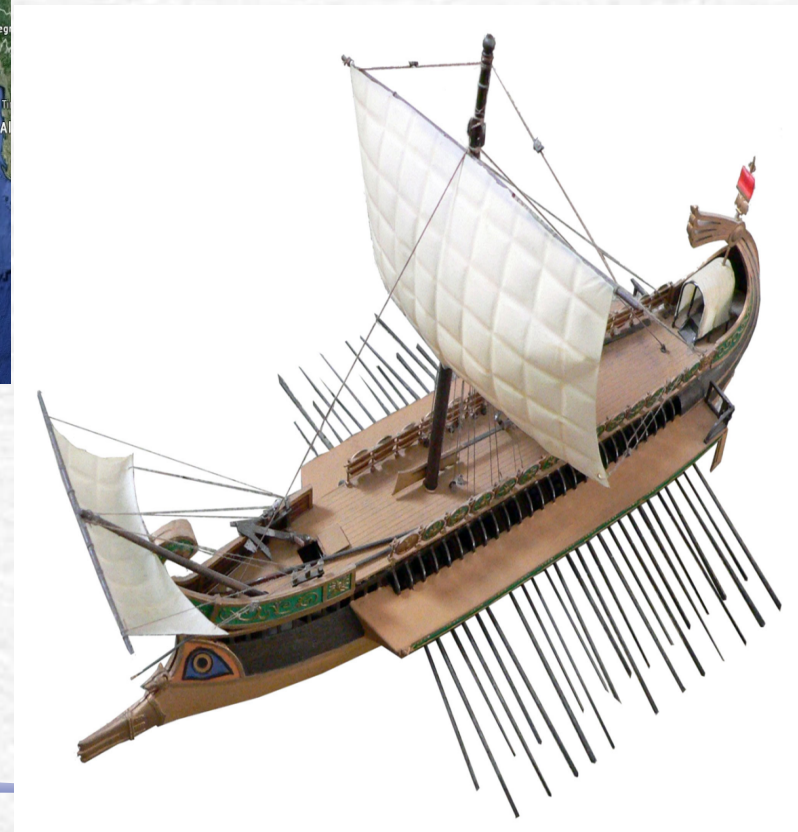
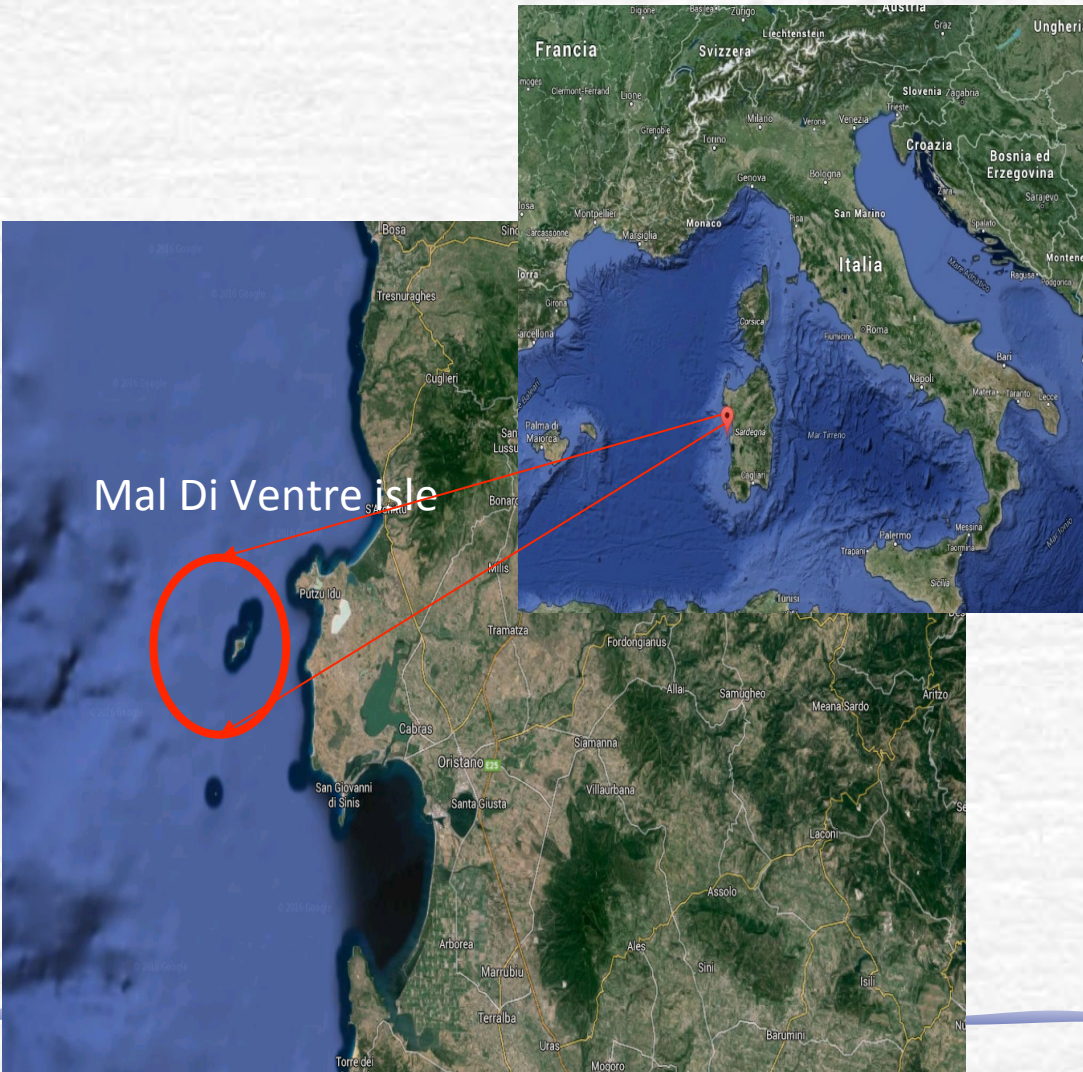
Minerali di Piombo, contaminazioni di ^{238}U che produce ^{210}Pb che ha $t_{1/2} = 22$ anni!



82	Pb	$^{327.464}_{1749}$	$^{203}_{51.873 \text{ l}}$	$^{204}_{1.4\text{E}17 \text{ y}}$	$^{205}_{1.53\text{E}+7}$	$^{206}_{0+}$	$^{207}_{1/2-}$	$^{208}_{0+}$	$^{209}_{3.253 \text{ h}}$	$^{210}_{22.3 \text{ y}}$	$^{211}_{36.1 \text{ m}}$	$^{212}_{10.64 \text{ h}}$	$^{213}_{10.2 \text{ m}}$	$^{214}_{26.8 \text{ m}}$
		+2+4	5/2-	0+	5/2-	0+	1/2-	0+	9/2+	0+	9/2+	0+	(9/2+)	0+
		207.2	*	*		24.1	22.1	52.4		β^-, α	β^-	β^-	β^-	β^-
		$1.03 \times 10^{-8} \%$	EC	EC										

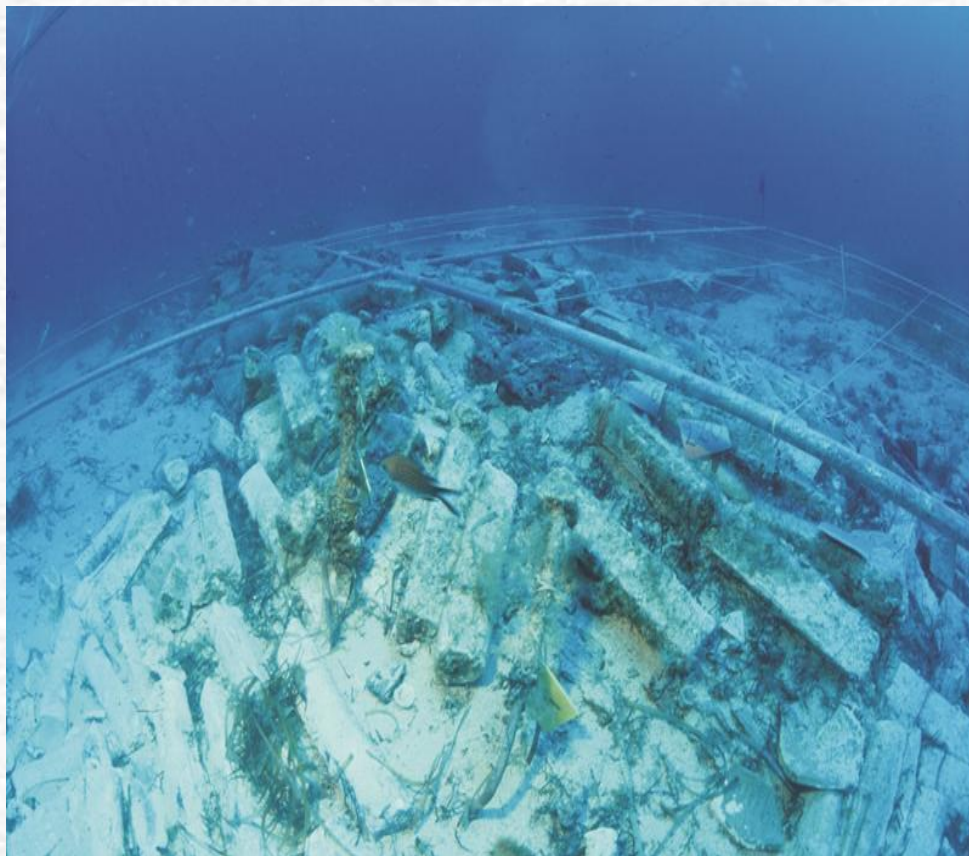
Scoperta e Recupero di PIOMBO ANTICO (duemila anni fa)

Nel 1988 ritrovamento di 2000 lingotti di Piombo Romano al largo della Sardegna
“*navis oneraria magna*” prof. **E. Fiorini**: “...andiamo a prenderlo....”

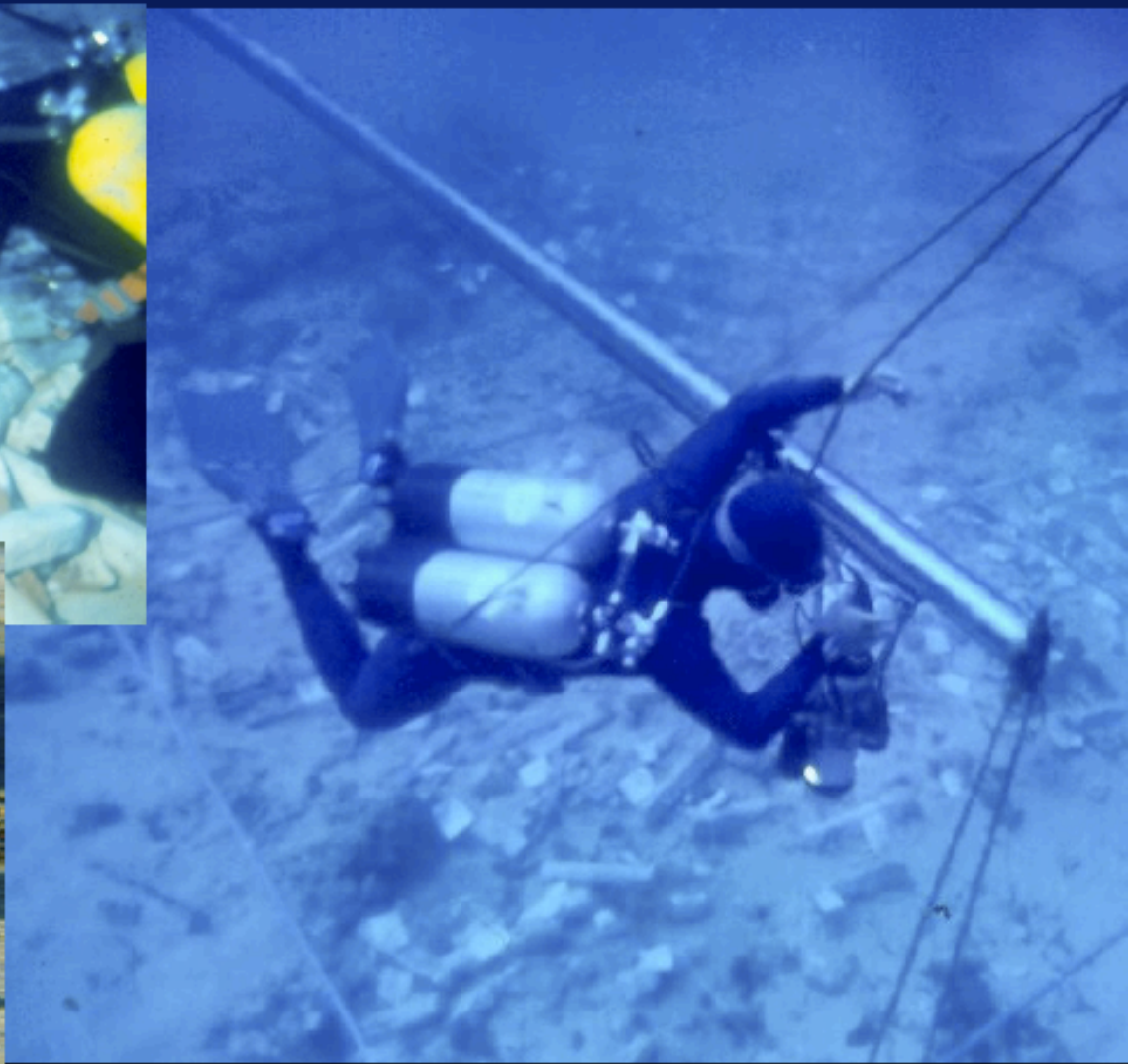


Scoperta e Recupero di PIOMBO ANTICO

- 2000 lingotti di Piombo Romano Antico (30 B.C)
- 1000 recuperati
- 33 Kg: peso singolo lingotto



1993: the excavation



The bolometric measurement

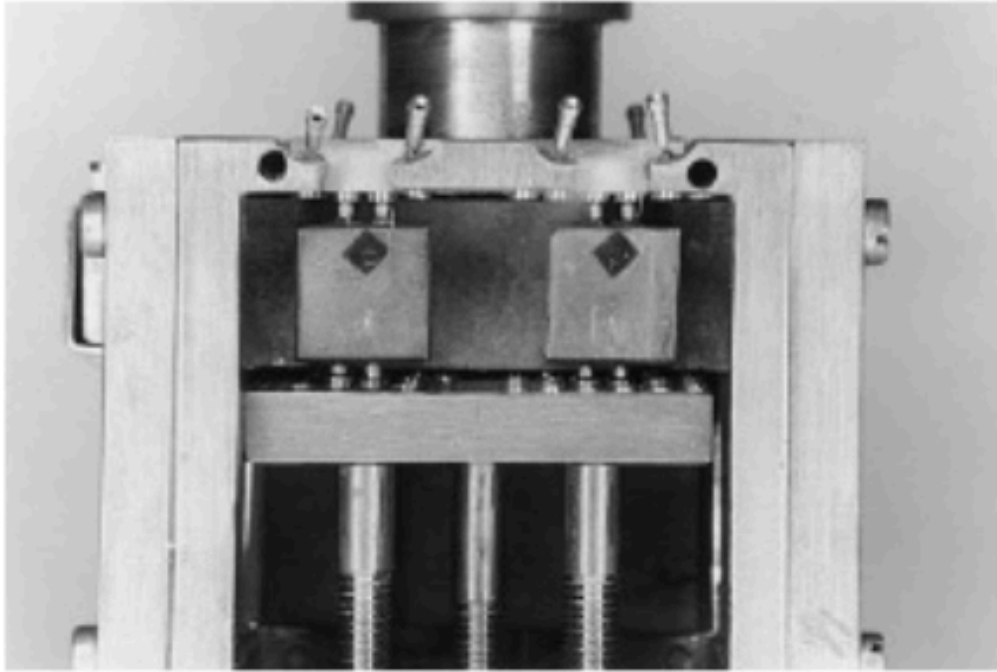
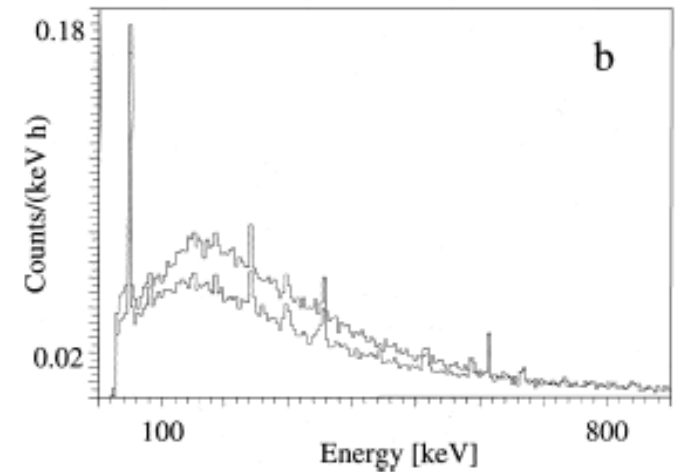
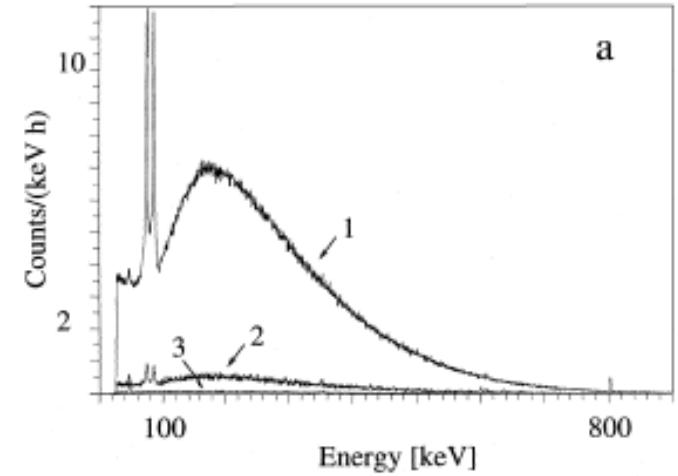


Fig. 4. The array of the four lead bolometers.

$A < 4 \text{ mBq/kg}$



Ancient Lead: ^{210}Pb

lead sample	weight [kg]	time [d]	specific activity [-Bq/kg]				
			^{226}Ra	^{228}Th	^{40}K	^{207}Bi	^{210}Pb
DowRun	144.6	101.7	<29	<22	440±140	98±24	$(2.7\pm 0.4)\times 10^7$
Boliden	144.3	75.0	<46	<31	460±170	<13	$(2.3\pm 0.4)\times 10^7$
roman	22.1	37.2	<45	<72	<270	<19	$<1.3\times 10^6$
bolometric measurement: Alesandrello et al.: NIMB142 (1998)163							$<4\times 10^3$



Da dove proveniva il carico di Piombo ?

Roman lead archaeological interest

Physics meets archaeology:

- when the ship sank?
- where the ship comes from?
- where the lead comes from?
- where the ship was going?



Ingots inscriptions:

- *socmcpontilienorummf*
- *soc-m-c-pontilienorum-m-f*
- *societas marci e cai pontilienorum marci filiorum*
- company of Marco and Caio Pontilieni son of Marco

- *lcarulifhispalimn*
- *l-caruli-l-f-hispali-m-n*
- *luci caruli luci fili hispali menenia tribu*
- Lucio Carulo Hispalio son of Lucio tribù Menenia

Piombo e Antichi Romani

Il Piombo trovava largo uso nell'antica Roma:



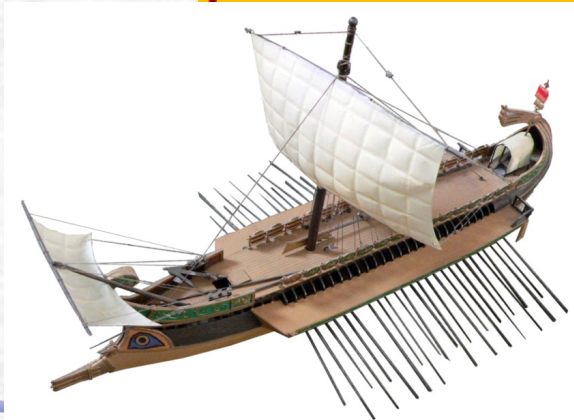
- Anfore
- Monete
- Tubature
- Utensili



- Armi



Piombo e Antichi Romani



Radioattività naturale: serie naturali

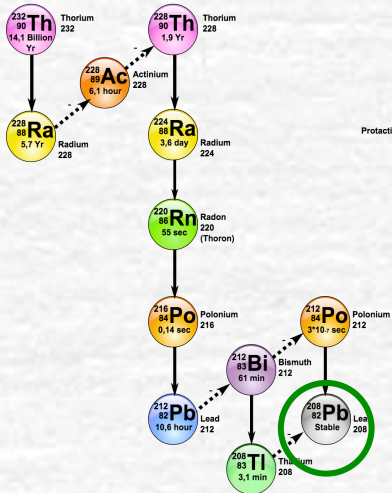
^{232}Th

^{237}Np

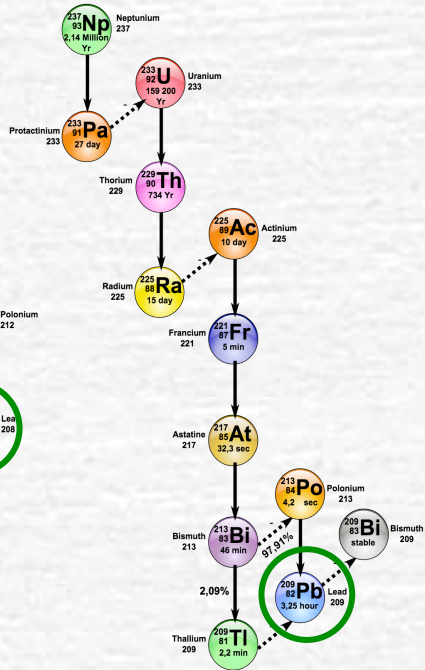
^{238}U

^{235}U

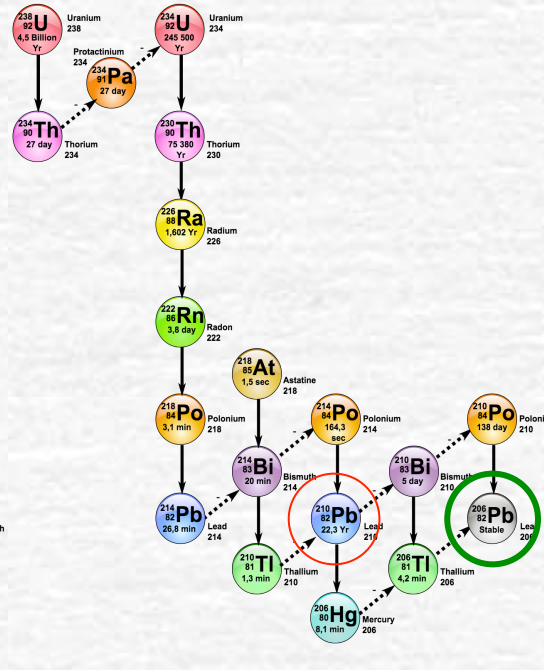
Thorium series



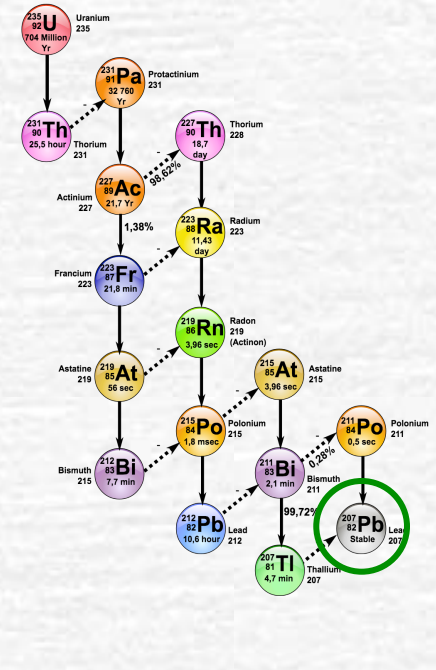
Neptunium series



Uranium series



Actinium series



Il Piombo

Piombo

^{204}Pb 1,4%
 ^{206}Pb 24,1%
 ^{207}Pb 22,1%
 ^{208}Pb 52,4%

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

$4,5 \times 10^9 \text{ y}$

$13,9 \times 10^9 \text{ y}$

$0,7 \times 10^9 \text{ y}$

^{206}Pb ^{207}Pb ^{208}Pb

Piombo radiogenico

Piombo della nostra era

Quindi, a seconda dell'età geologica della collocazione geografica, le rocce e i terreni contenenti Pb hanno distribuzioni isotopiche *caratteristiche*.

82	^{203}Pb	^{204}Pb	^{205}Pb	^{206}Pb	^{207}Pb	^{208}Pb	^{209}Pb	^{210}Pb	^{211}Pb	^{212}Pb	^{213}Pb	^{214}Pb
	51.873 h	1.4E17 y	1.53E+7 y	0+	1/2-	0+	3.253 h	22.3 y	36.1 m	10.64 h	10.2 m	26.8 m
	5/2- *	0+ *	5/2- *	0+	1/2- *	0+	9/2+	0+	9/2+	0+	(9/2+)	0+
	EC	1.4	EC	24.1	22.1	52.4	β^-	β, α	β^-	β^-	β^-	β^-

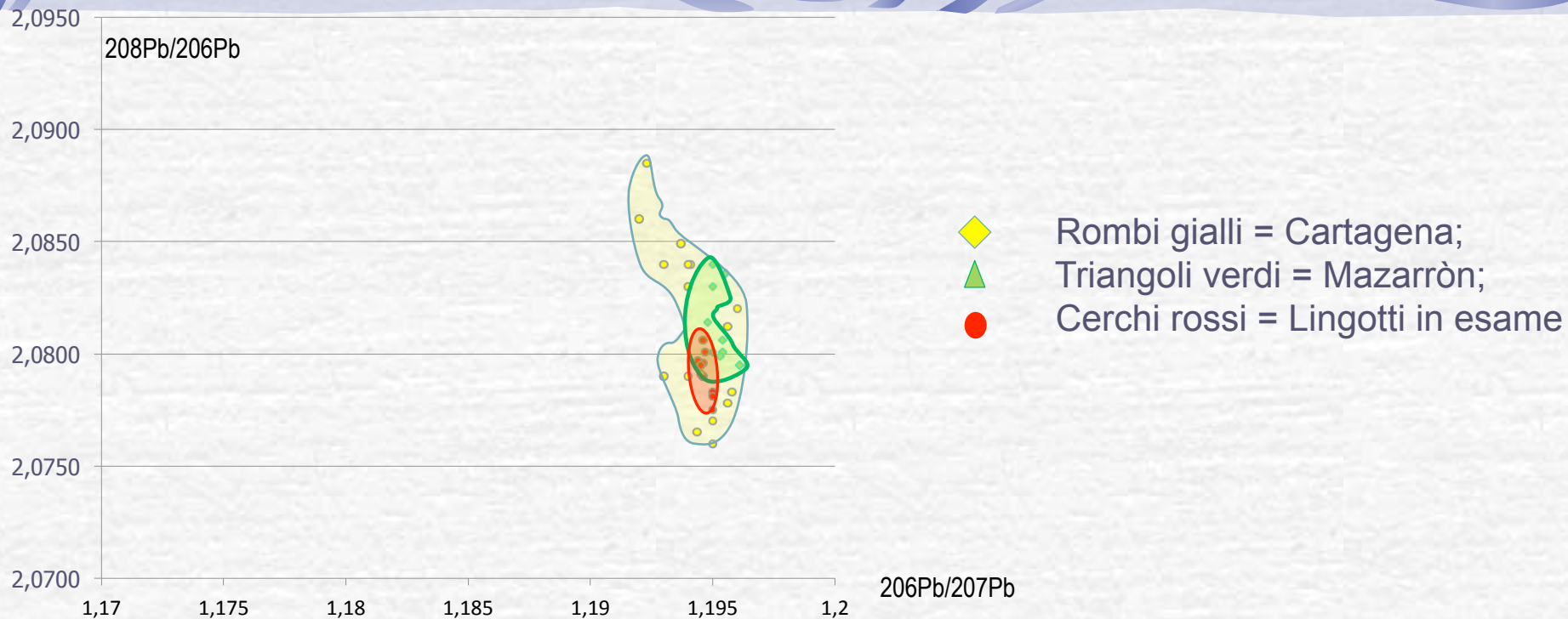
Art & Science Across Italy

Thermal Ionization Mass Spectrometry (TIMS)

- Discriminazione tra valori di rapporti isotopici $<0.1\%$
- Precisione interna della misura $>0.005\%$



Risultati



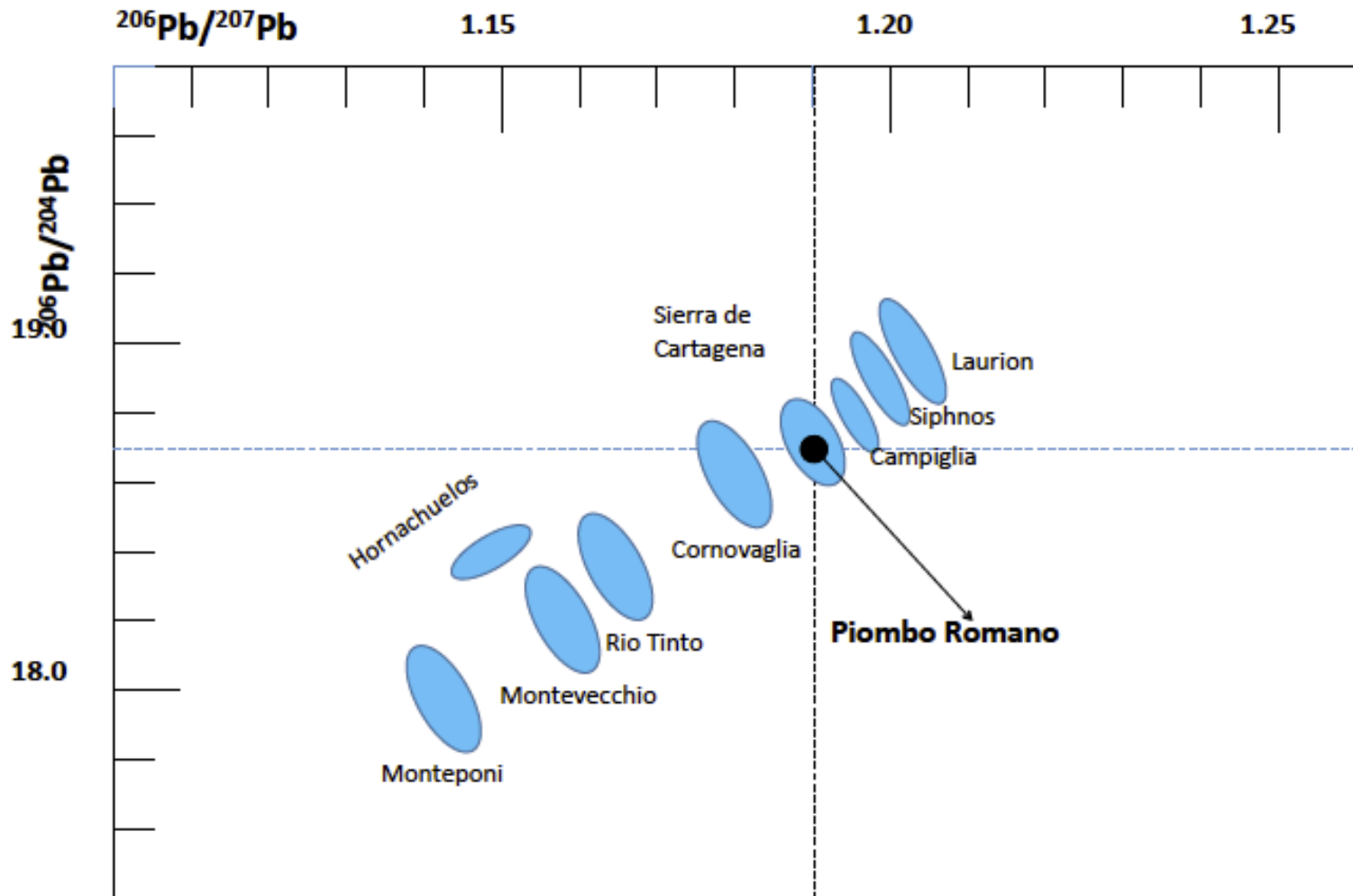
sito	samples	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	max min	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$\pm 2\sigma$	max min
Lingotti in esame	9	1,1947	$\pm 0,0002$	1,1950 1,1944	2,0792	$\pm 0,0010$	2,0806 2,0780
Cartagena	18	1,1942	$\pm 0,0012$	1,1958 1,1923	2,0813	$\pm 0,0040$	2,0885 2,0760
Mazarròn	12	1,1953	$\pm 0,0004$	1,1966 1,1948	2,0814	$\pm 0,0017$	2,0840 2,0795

Da dove proveniva il carico di Piombo ?

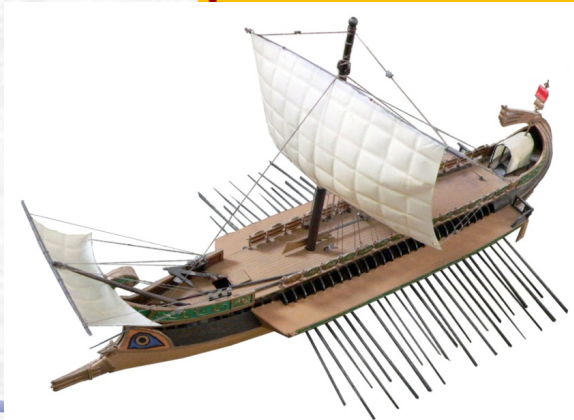
ICP MS analysis of ancient roman lead

The location of the mine in the Sierra de Cartagena tells us that:

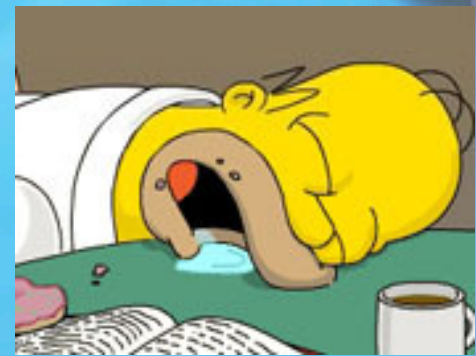
- the lead came from Spain
- time interval:
 - after 89 BC for historical reasons
 - before 50 BC mines were abandonment



Piombo e Antichi Romani



Grazie per l'attenzione



CUORE Collaboration Meeting LNGS 2017



UNESCO 2001 convention

Is it commercial?

Article 7
Underwater cultural heritage shall not be commercially exploited.

Rule 2 of the Annex

[...] Underwater cultural heritage shall not be traded, sold, bought or bartered as commercial goods.

This Rule cannot be interpreted as preventing:

- [...] (b) the deposition of underwater cultural heritage [...] provided such deposition does not prejudice the scientific or cultural interest or integrity of the recovered material [...]

Lead is melted

Funded by Italian Government. Italy: State Party

Article 18.1

Each State Party shall take measures providing for the seizure of underwater cultural heritage in its territory that has been recovered in a manner not in conformity with this Convention.

UNESCO Manual (Rule 2)

Commercial exploitation

[...] [...]. All archaeological activity can be governed by commercial principles, as long as the activities are authorized in conformity with the Convention, and as long as the finds that belong to the site are not part of the commercial equation.

Ingots as exchange coin

Is there an alternative?



0.004 Bq



J&M lead kept underground for 300 years

\$65
rescue value



CUORE – 4 tonnes
\$250,000 vs \$ 40,000,000

IT IS ESSENTIAL


2500 Bq

Modern Lead



High Purity Lead


20 Bq


\$130-450




Ultra Low Alpha


0.26 Bq



The agreement

COPIA D'ATTI
CAGLIARI 27 07 2008
2008


Ministero
per i Beni e le Attività Culturali
DIREZIONE GENERALE PER I BENI ARCHEOLOGICI
VIA S. MICHELE 22 - 00153 ROMA
Tel. 06/478021 - Fax 06/4780211
E-mail: archivio@beniculturali.it

Prot. N. 4298
Allegati

Allegato al Foglio del

OGGETTO CABRAS, ISOLA MAL DI VENTRE. RELITTO DI ENAVI CON STRADA ROMANA CON CARICO DI LINGOTTI DI PIOMBO ISCRITTI. RICHIESTA ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE.

Si trasmette in allegato, esprimendo per quanto di competenza il parere favorevole di questa Soprintendenza, la richiesta avanzata dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare per l'assegnazione, a fini di ricerca, di 150 lingotti di piombo provenienti dal carico del relitto di Mal di Ventre. Il ritardo nell'invio è dovuto alle note vicende dirigenziali della Soprintendenza archeologica della Sardegna e alle difficoltà, solo ora superate, di incontro diretto con il prof. Ettore Fiorini.

La richiesta fa seguito a forme di collaborazione già instaurate nel 1991, quando l'Istituto stabilì con il Ministero per i Beni Culturali un accordo di studio che consentì un lungo periodo di scavo e permise di utilizzare per le ricerche allora in corso sui neutrini, una parte dei lingotti recuperati, totalmente privi di contaminazioni radioattive. Furono inoltre effettuate dall'Istituto indagini fisiche e chimiche sui lingotti al fine di stabilirne la composizione e, attraverso lo studio degli isotopi, la provenienza.

Secondo gli accordi di ogni lingotto assegnato fu utilizzata la parte inferiore, conservando quella superiore iscritta. I cartigli già tagliati e quelli legati alle nuove assegnazioni potrebbero essere riconsegnati ed esposti, con o senza integrazione della forma, a documentare gli studi effettuati.

Tale forma di collaborazione, che ebbe allora grande risonanza internazionale, continua a costituire un esempio di interazione fra scienze esatte e scienze umanistiche poiché utilizza materiali che provengono dal passato per studiare, con i metodi più moderni, l'origine dell'universo.

Nuove forme di cooperazione potrebbero ora essere avviate con l'Istituto, disponibile ad effettuare, sulla base delle richieste di questo Ufficio, studi approfonditi sugli isotopi dei metalli di età preistorica, secondo forme che potranno essere meglio definite ove la richiesta venga accolta.

Si ricorda che lo scavo ha consentito il recupero di circa mille lingotti, una parte dei quali sono ora esposti nel Museo Archeologico Nazionale di Cagliari, una parte nel Museo Civico di Cabras, - dove al relitto è stata dedicata una sezione, - ed una parte consistente è depositata presso magazzini messi a disposizione dal Comune di Cabras.

Si allega copia del precedente Contratto di studio, stipulato in data 6 giugno 1991 e dell'approvazione dell'Ufficio Centrale in data 26 aprile 1991, prot. 4338/IVG, e si resta in attesa di riscontro.

Il Soprintendente
Dot. Fulvia Lo Schiavo

F. Schiavo

Si trasmette in allegato, esprimendo per quanto di competenza il parere favorevole di questa Soprintendenza, la richiesta avanzata dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare per l'assegnazione, a fini di ricerca, di 150 lingotti di piombo provenienti dal carico del relitto di Mal di Ventre. Il ritardo nell'invio è dovuto alle note vicende dirigenziali della Soprintendenza archeologica della Sardegna e alle difficoltà, solo ora superate, di incontro diretto con il prof. Ettore Fiorini.

La richiesta fa seguito a forme di collaborazione già instaurate nel 1991, quando l'Istituto stabilì con il Ministero per i Beni culturali un accordo di studio che consentì un lungo periodo di scavo e permise di utilizzare per le ricerche allora in corso sui neutrini, una parte dei lingotti recuperati, totalmente privi di contaminazioni radioattive. Furono inoltre effettuate dall'Istituto indagini fisiche e chimiche sui lingotti al fine di stabilirne la composizione e, attraverso lo studio degli isotopi, la provenienza.

Secondo gli accordi di ogni lingotto assegnato fu utilizzata la parte inferiore, conservando quella superiore iscritta. I cartigli già tagliati e quelli legati alle nuove assegnazioni potrebbero essere riconsegnati ed esposti, con o senza integrazione della forma, a documentare gli studi effettuati.

Tale forma di collaborazione, che ebbe allora grande risonanza internazionale, continua a costituire un esempio di interazione fra scienze esatte e scienze umanistiche poiché utilizza materiali che provengono dal passato per studiare, con i metodi più moderni l'origine dell'universo.

Nuove forme di cooperazione potrebbero ora essere avviate con l'Istituto, disponibile ad effettuare, sulla base delle richieste di questo Ufficio, studi approfonditi sugli isotopi dei metalli di età preistorica, secondo forme che potranno essere meglio definite ove la richiesta venga accolta.

Si ricorda che lo scavo ha consentito il recupero di circa mille lingotti, una parte dei quali sono ora esposti nel Museo Archeologico Nazionale di Cagliari, una parte nel Museo Civico di Cabras, - dove al relitto è stata dedicata una sezione - ed una parte consistente è depositata presso magazzini messi a disposizione dal Comune di Cabras.

Si allega copia del precedente contratto di studio, stipulato in data 6 giugno 1991 e dell'approvazione dell'Ufficio Centrale in data 26 aprile 1991, prot. 4338/IVG, e si resta in attesa di riscontro.

Lead shielding

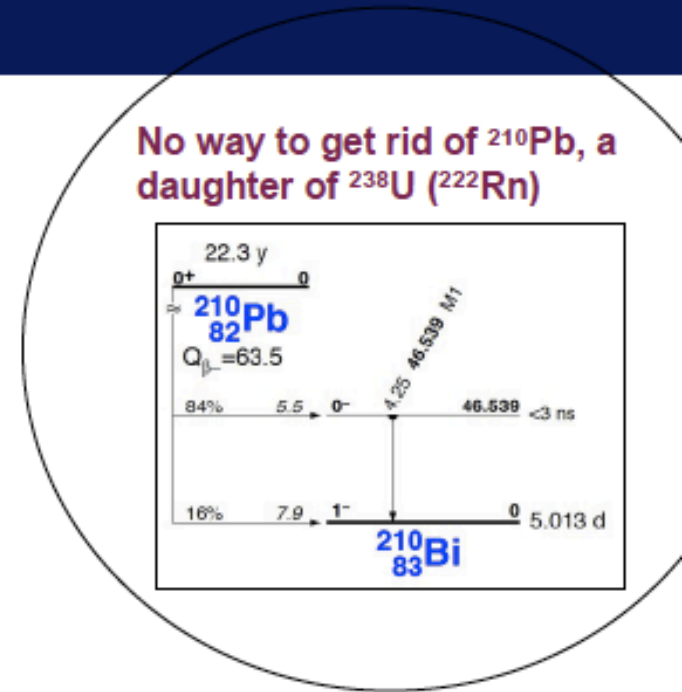
Effective shields ask for

- high density
- high Z materials

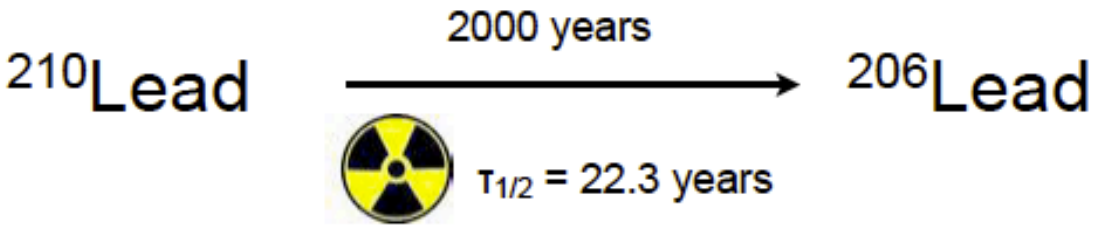


Lead is the best candidate:

- Highest Atomic Number of all stable elements
- Low Intrinsic Radioactivity
- Good mechanical properties at reasonable cost



Ancient roman lead



- Original ^{210}Pb completely disappeared (10^{-27})!
- Secular equilibrium with ^{238}U : $< 46 \mu\text{Bq/kg}$

CUORE cold Lead shield (Roman Lead)

- **Design: completed in 2013. FDR April 2013**
- **Roman lead:**
 - available thanks to an agreement with “Soprintendenza dei beni Archeologici”
 - 150 (1993) + 120 (2010) ingots granted to INFN. 250 available for CUORE.
 - Strict rules for preservation of ingot inscriptions
 - Debate on the advisability to exploit archaeological heritages for modern science. Still open question (UNESCO).
- **Casting: a troubled history**
 - Special requests for radio-purity
 - Original italian company (centrifugal casting) without certification of revenue authorities (DURC)
 - Recovery solution: german company (MTH) with different technology
 - Two step procedure:
 - 2012: agreement for a single ring test production (modern lead) with preliminary quotation
 - 2013: quotation for mold production and test ring production → OK
 - 2013 (end): final quotation for complete production → quadrupled
 - Serious financial and schedule problem:
 - reduce number of items → no TOP shield
- **Ingots preparation:**
 - Simplified solution (originally devised) not possible! → new saw needed (alternative solution: water cut)
 - Ingot cleaning needed: mechanical blasting not viable → cryo-blasting
 - Company (Dryce) selected and order released. Discussion on responsibilities. Company resignation
 - Cryo-blasting carried out by a different company.

Roman lead: 2010 2nd round



Roman lead: 2010 2nd round



Inscription cutting



Inscriptions have to be preserved

- needs to strictly follow the agreement
- horizontal cut of the top part
- 250 ingots were cut



Ingots surface cleaning



1

1. Chemical
2. Blasting
3. LN2
4. Cryo-blasting

2



3

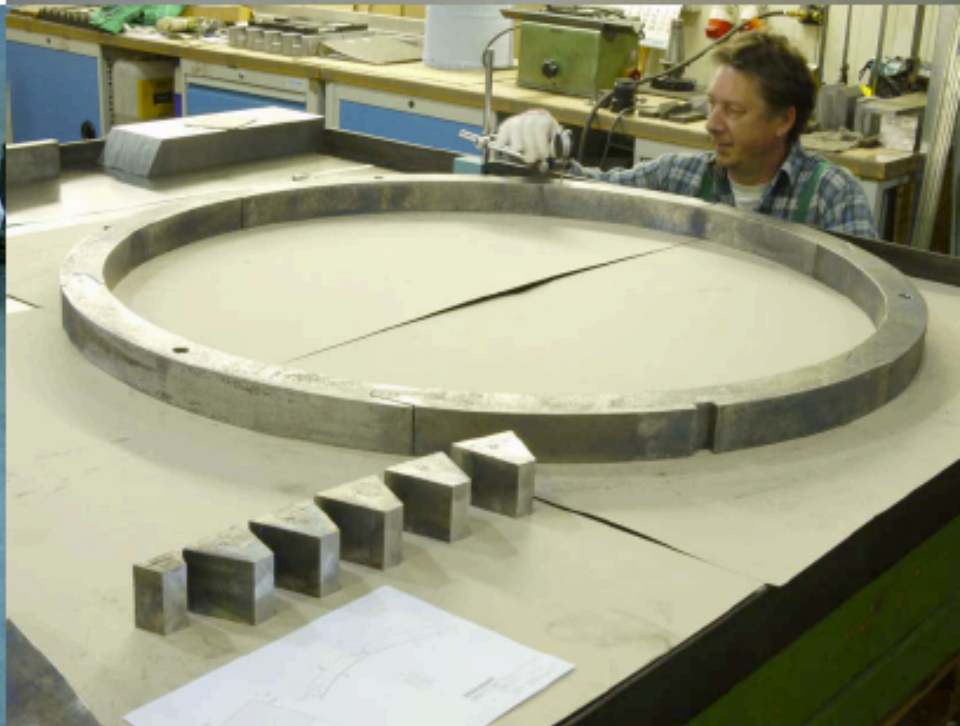


4



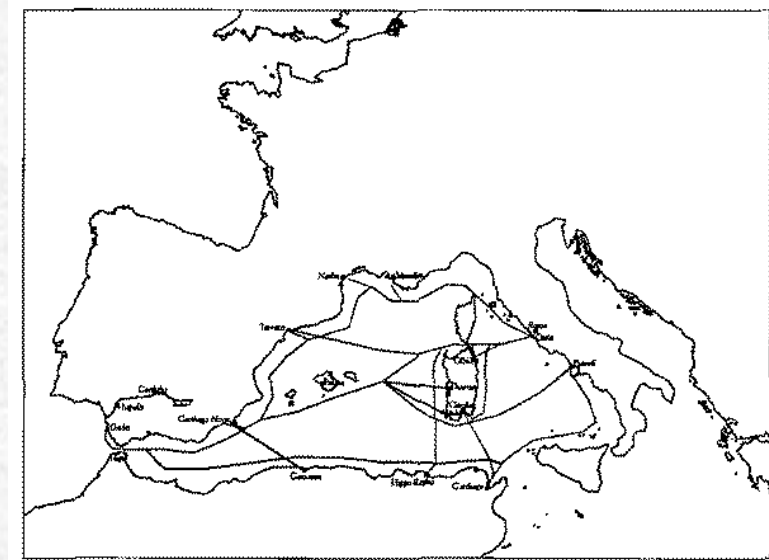
Ingots melting

- Melting @ MTH company in Germany under nitrogen atmosphere
- selected materials for mold and kettle
- strict supervision of the process
- test ring realized
 - roman Pb last step (melting) very close



Relitti di navi romane studiate contenenti lingotti di piombo

- LE SAINTES-MARIES-DE-LA-MER 1: *insabbiato, in pessime condizioni e molto sparpagliato*
- CABRERA 5: *42m ingresso del porto della piccola isola di Cabrera a sud di Mallorca*
- **MAL DI VENTRE: 30m presso la piccola isola di Mal di Ventre, Sardegna**
- SUD PERDUTO 2: *a ridosso delle Bocche di Bonifacio. Negli anni sono stati rinvenuti 10 relitti nei pressi delle isole: Lavezzi, Cavallo e Perduto)*
- COMACCHIO: *canale collettore di Valle Ponti*



Laboratorio Nazionale del Gran Sasso

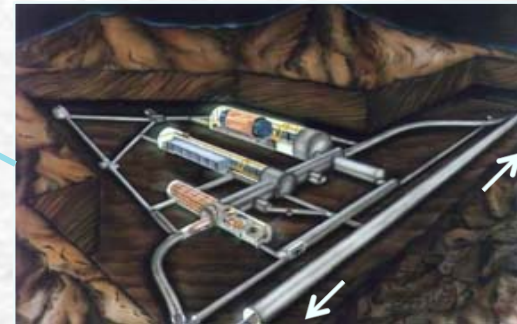
Il più grande laboratorio sotterraneo al mondo, ospita circa 16 esperimenti

Italia



Gran Sasso

LNGS underground facility



Teramo

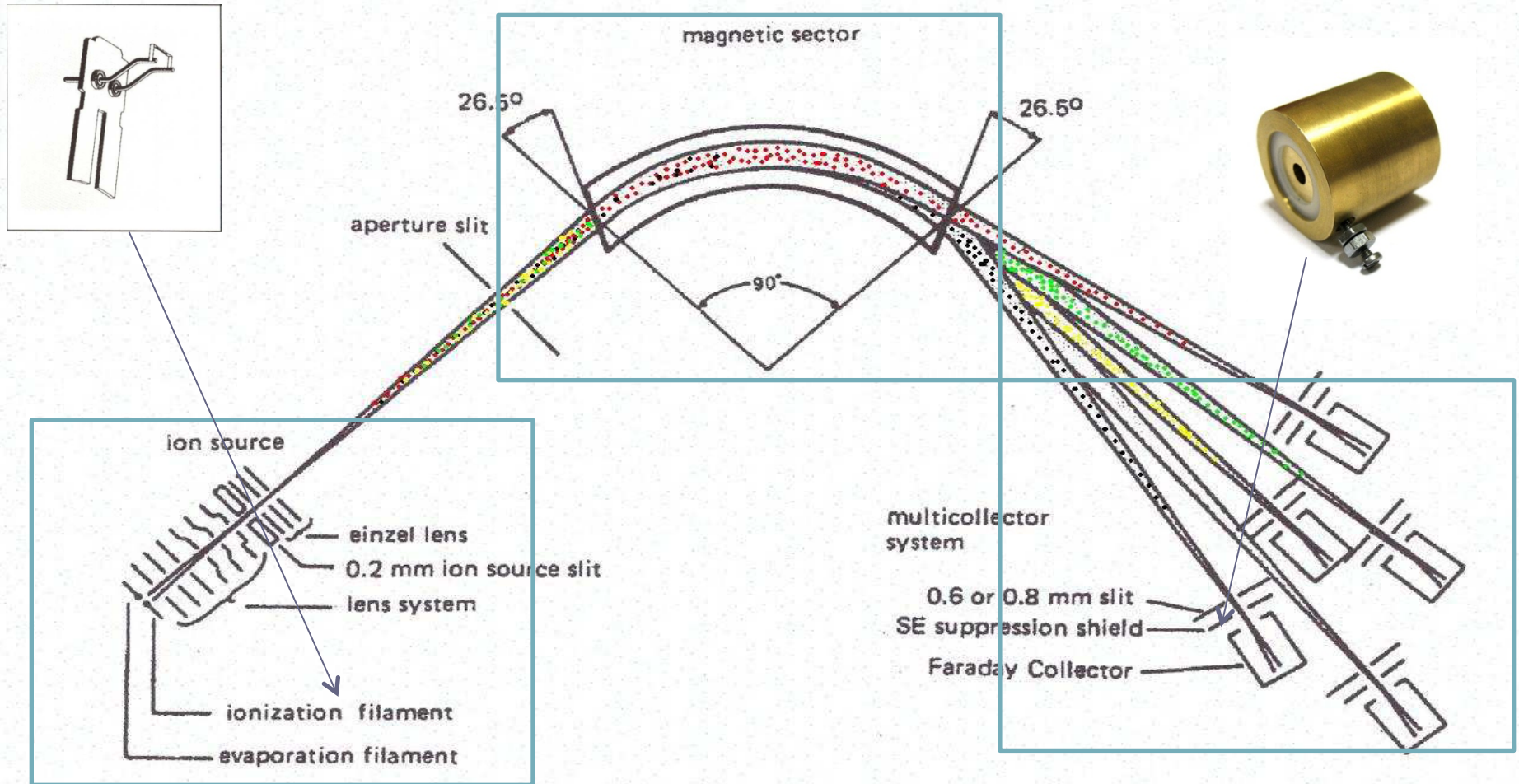
Roma

1400 m di roccia :
-riduzione del flusso dei raggi cosmici 10^6
-riduzione del flusso di neutroni 10^4

Un ambiente ideale per esperimenti di fisica a bassissimo fondo.

TIMS

(Thermal Ionization Mass Spectrometer)



Importanza della misura dei rapporti isotopici

✓ ***Cosmocronologia***



***Misura in: meteoriti
(condriti e fase troilitica)***

✓ ***Geocronologia***



Eta' della terra e delle rocce

✓ ***Archeometria***



***Provenienza e autenticita'
in archeologia
e storia dell'arte***

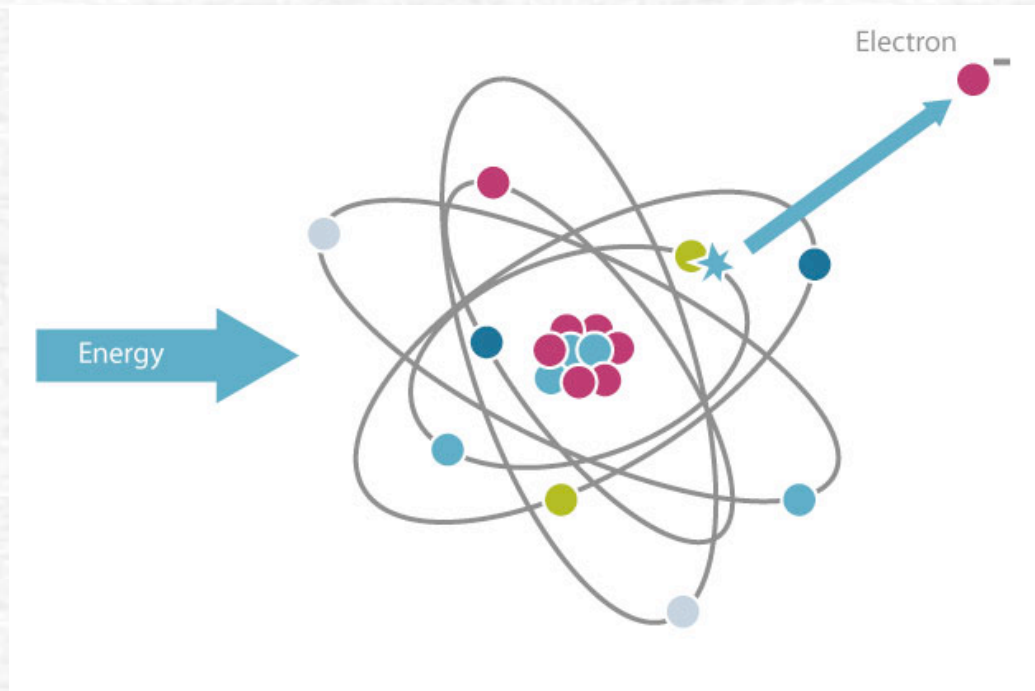
✓ ***Food Chemistry***



***Provenienza e autenticita'
prodotti alimentari***

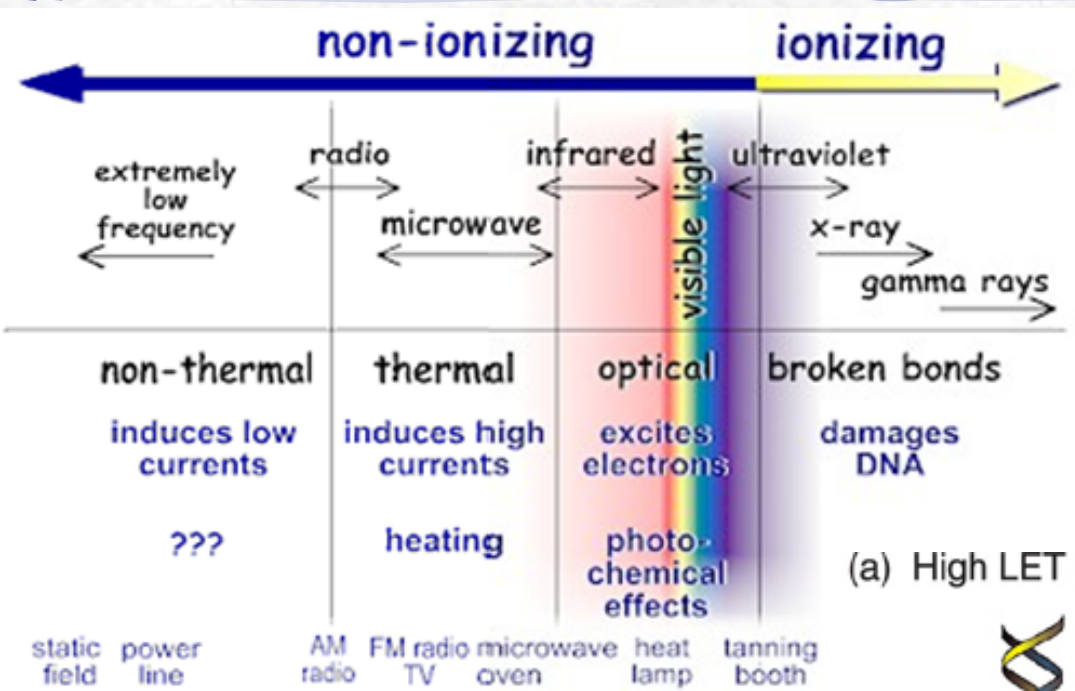
La radioattività: alcune definizioni

Radioattività: emissione di radiazione ionizzante derivante dal decadimento radioattivo di nuclei instabili

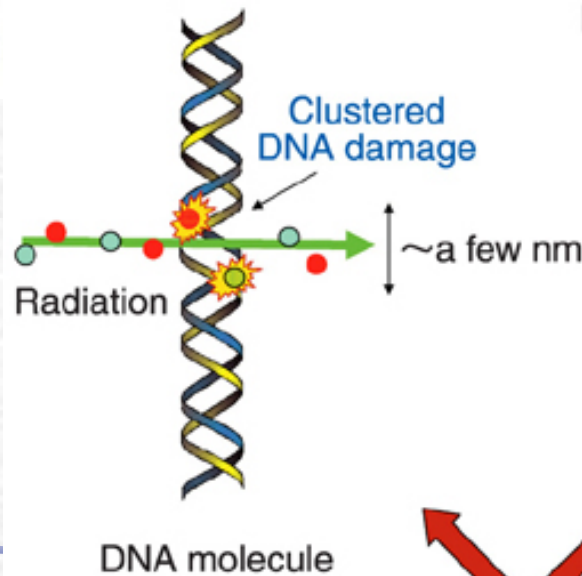


Radiazione ionizzante: radiazione che possiede energia sufficiente a ionizzare gli atomi della materia colpita

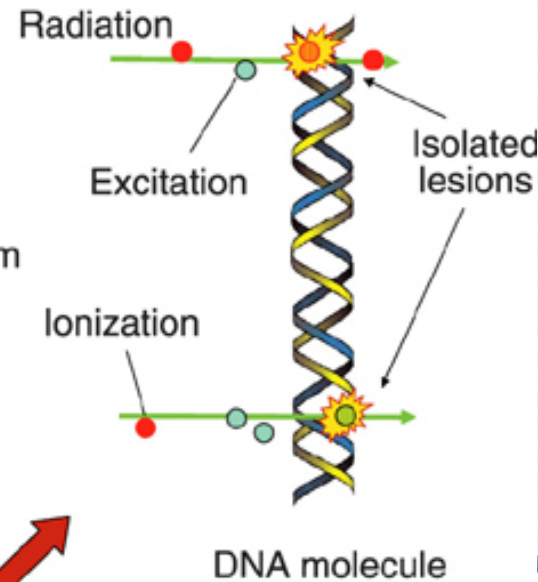
Ionizing Radiations



(a) High LET radiation

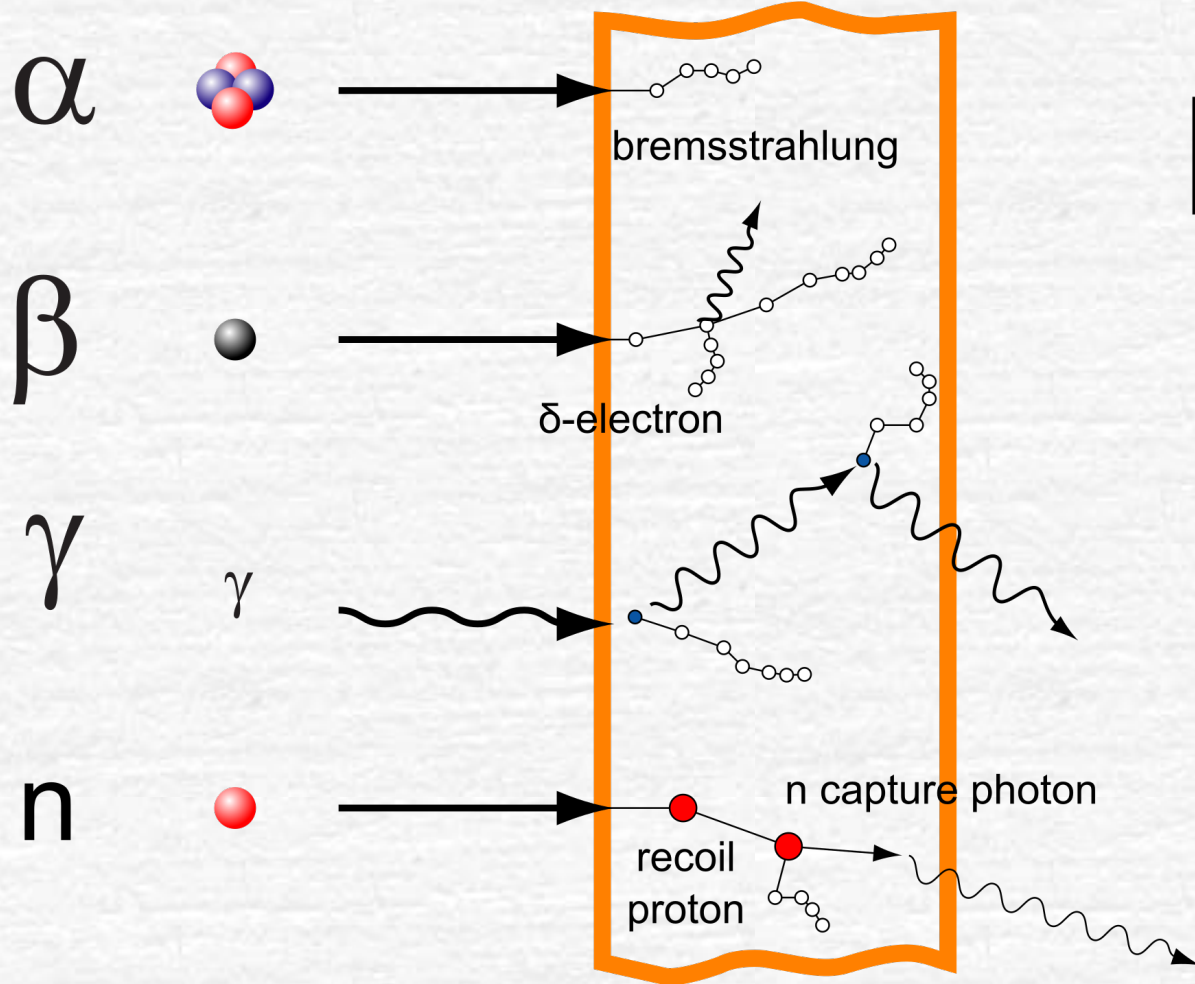


(b) Low LET radiation



Each case creates 2 lesions per 8 ionizations & excitations

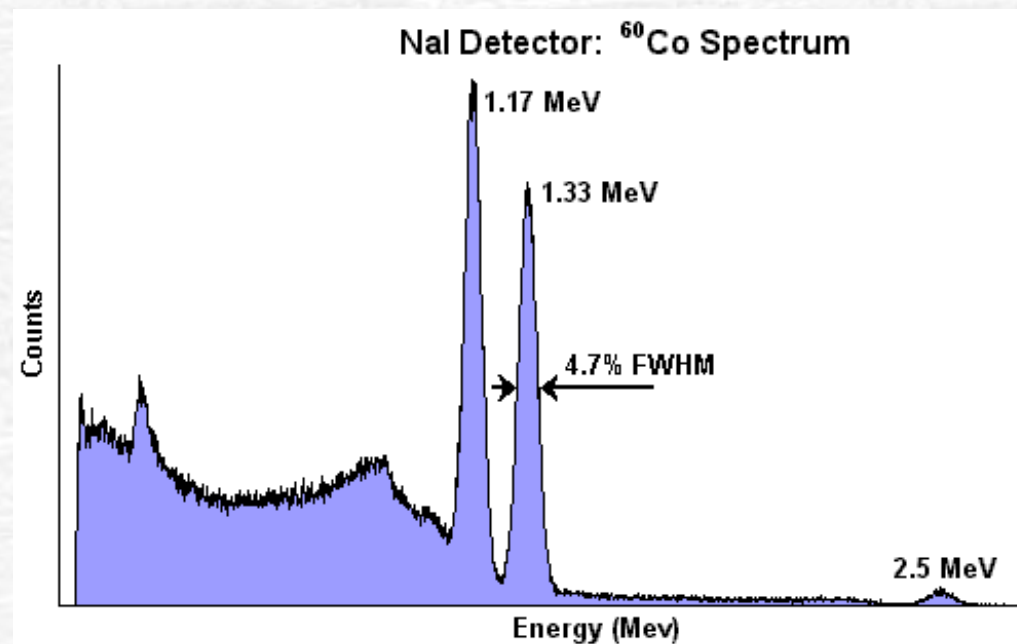
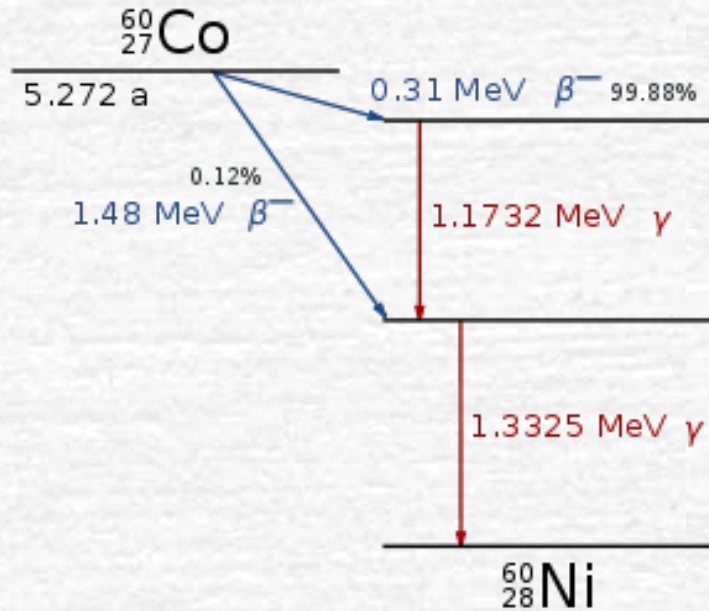
Interaction of ionizing radiation with matter



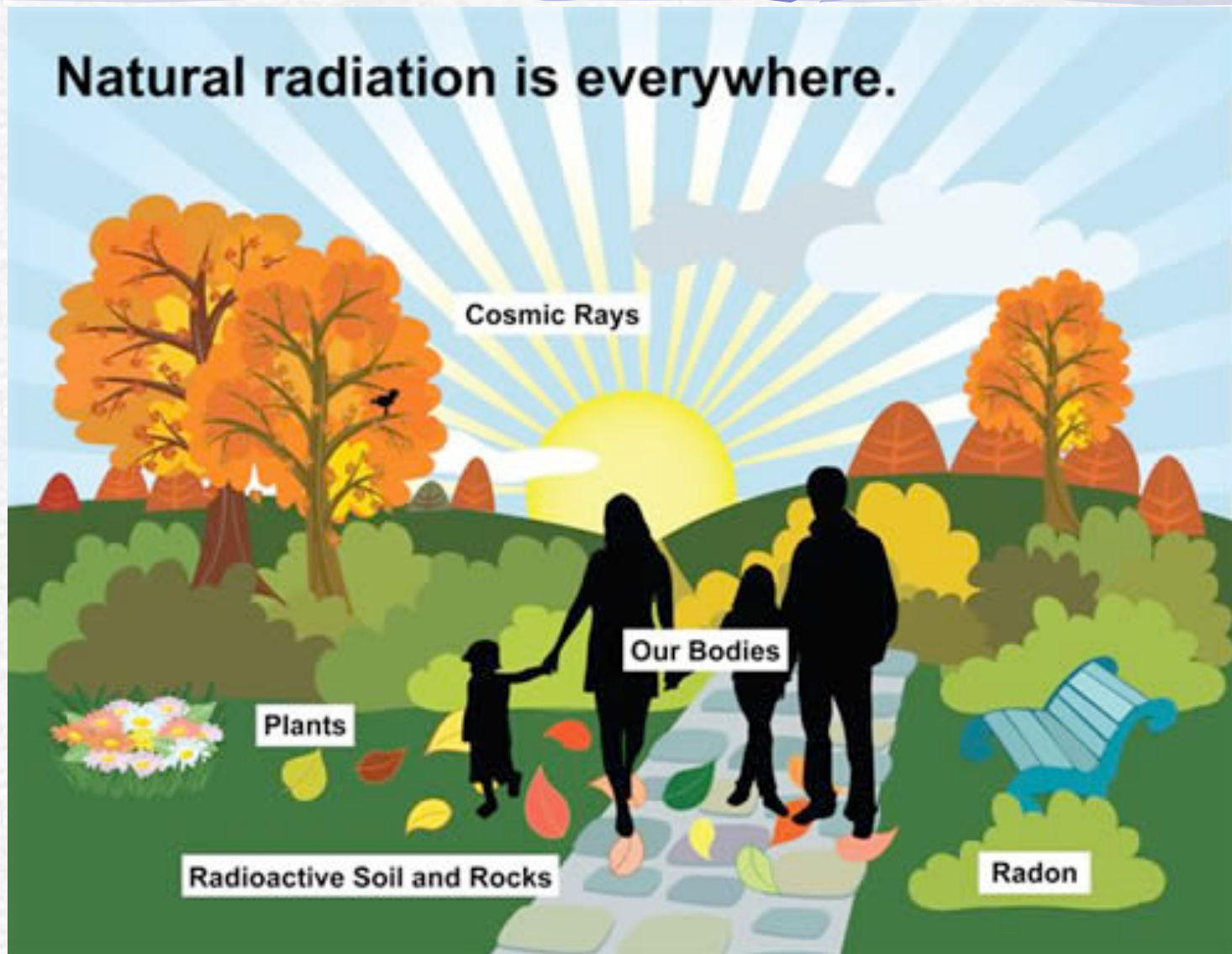
charged particles interact strongly and ionize directly

neutral particles interact less, ionize indirectly and penetrate farther

Gamma decay scheme and energy spectrum



Radioattività naturale



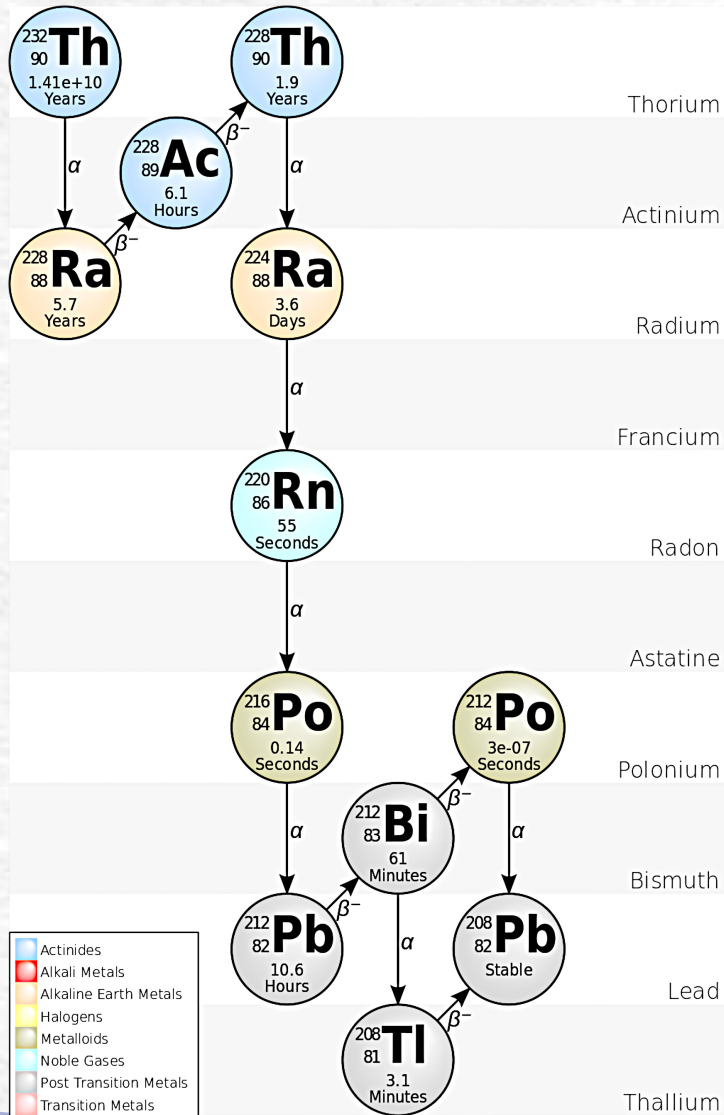
Radioattività naturale terrestre

I principali radionuclidi primordiali sono il ^{40}K , il ^{87}Rb e gli elementi delle sue serie radioattive dell' ^{238}U del ^{235}U e del ^{232}Th .

La concentrazione dei radionuclidi naturali nel suolo e nelle rocce varia fortemente da luogo a luogo in dipendenza della conformazione geologica delle diverse aree. In generale le rocce ignee e i graniti contengono ^{238}U in concentrazioni più elevate delle rocce sedimentarie come il calcare e il gesso. Alcune rocce sedimentarie di origine marina possono però contenere ^{238}U in concentrazione elevata.

Tipici valori di concentrazioni di attività nel suolo sono compresi tra 100 e 700 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ per il ^{40}K , tra 10 e 50 $\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}$ per i radionuclidi delle serie radioattive dell' ^{238}U e del ^{232}Th .

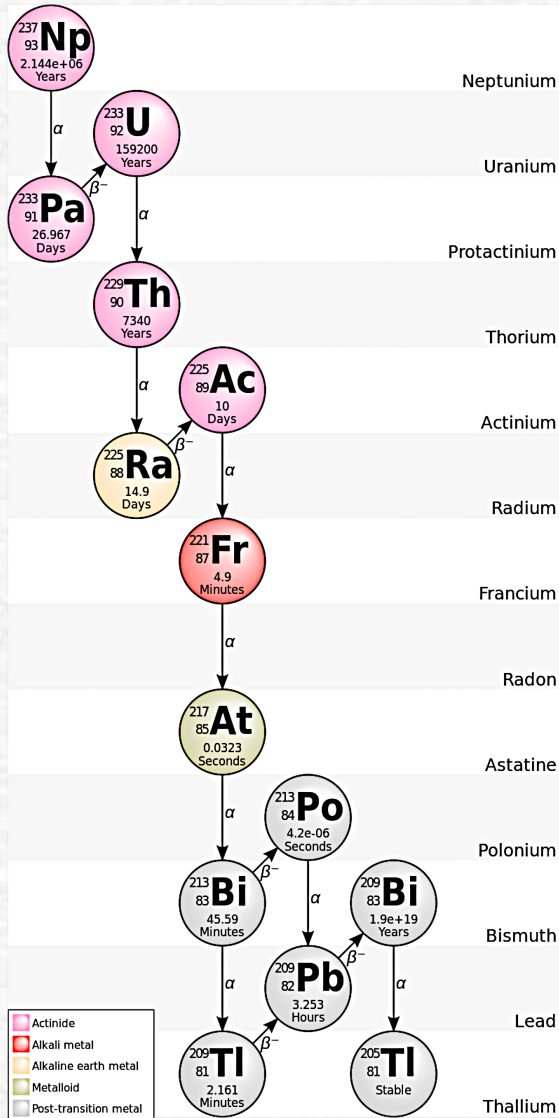
Radioattività naturale



^{232}Th serie del Torio: $4n$

$$t_{1/2} = 1.4 \cdot 10^{10} \text{ a}$$

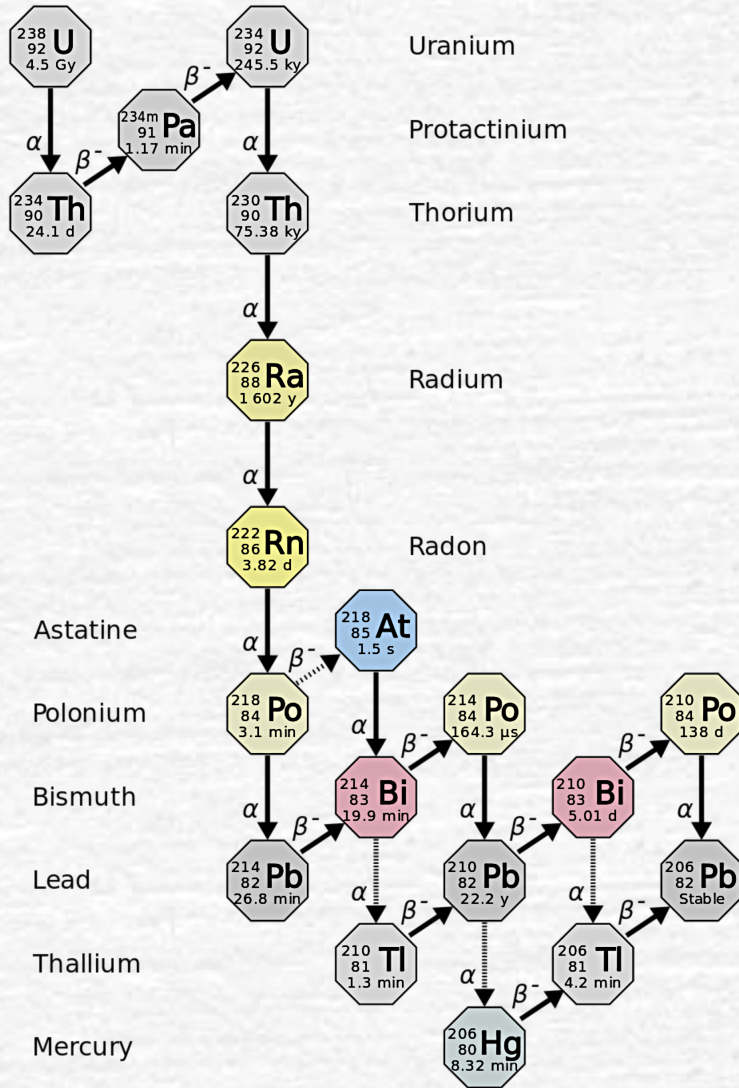
Radioattività naturale



^{237}Np serie del Nettunio : $4n+1$

$$t_{1/2} = 2.14 \cdot 10^6 \text{ a}$$

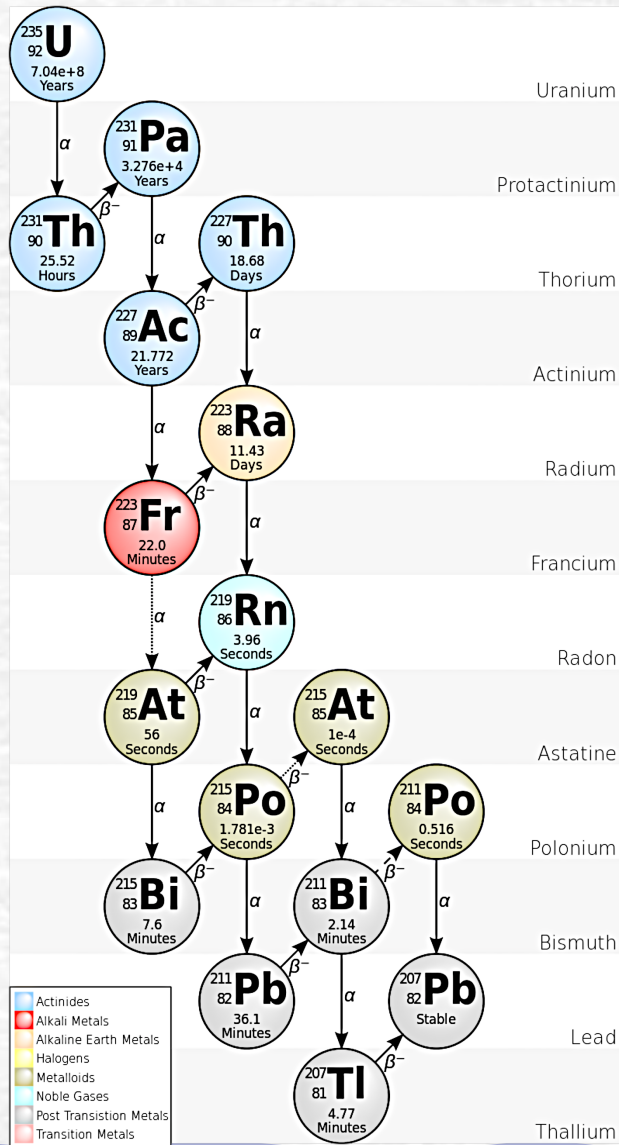
Radioattività naturale



^{238}U serie dell'attinio: $4n+2$

$$t_{1/2} = 4.47 \cdot 10^9 \text{ a}$$

Radioattività naturale



^{235}U serie dell'attinio: $4n+3$

$$t_{1/2} = 7.04 \cdot 10^8 \text{ a}$$

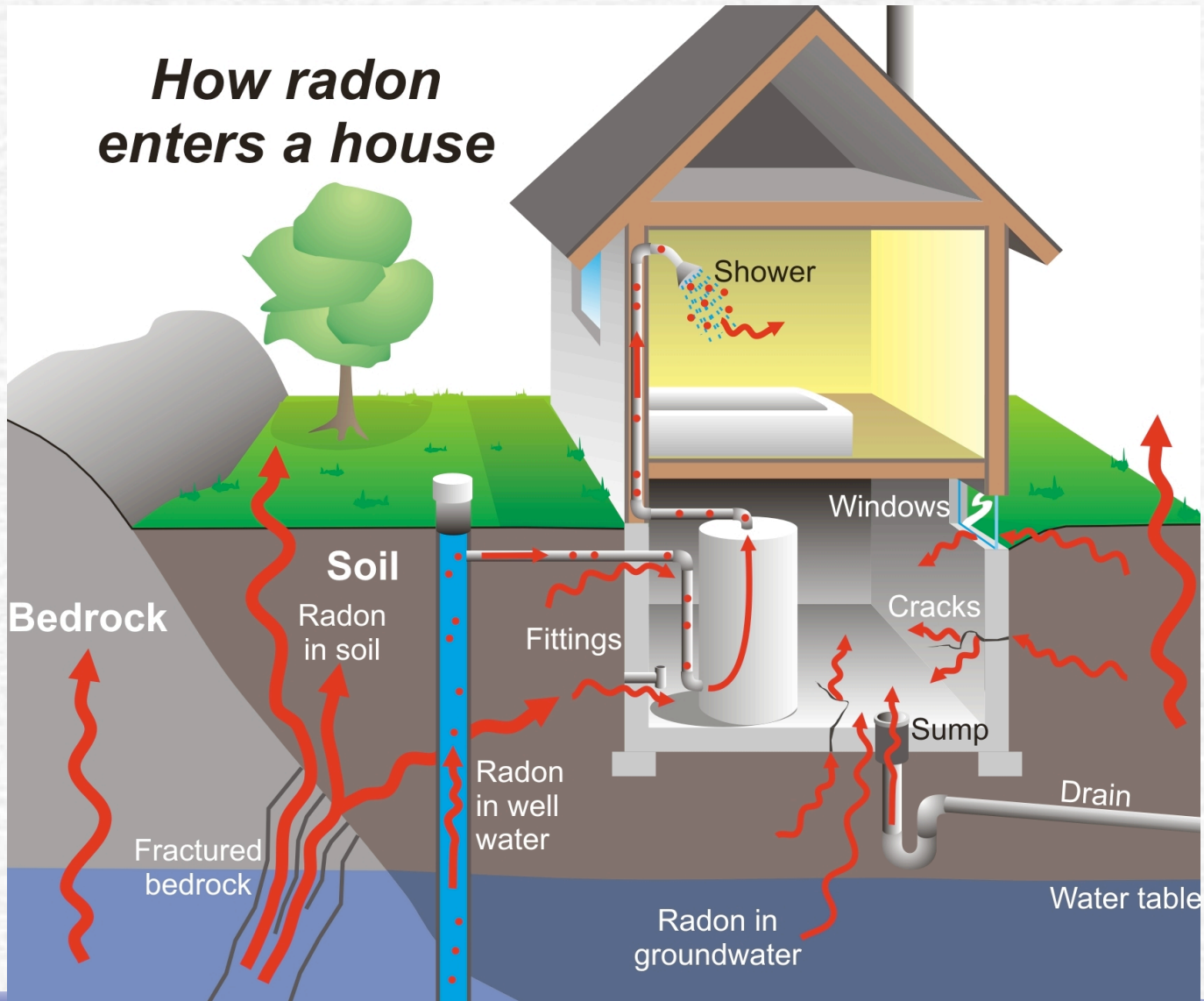
Radioattività naturale

Radon

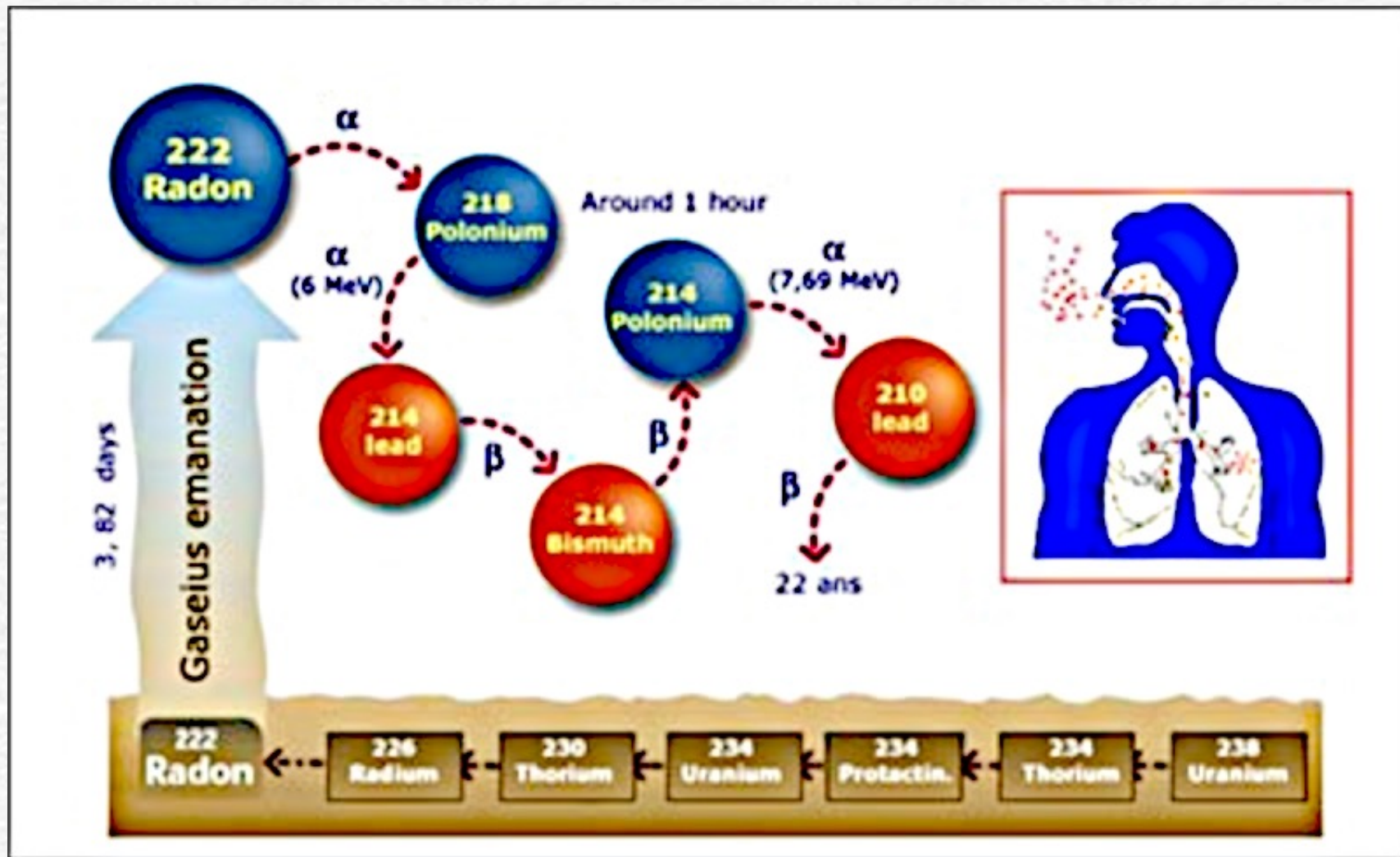
Il radon può essere *emanato* dalle rocce, dai suoli e da materiali da costruzione di origine naturale (come alcuni tufi, pozzolane, lave, graniti, scisti, etc.) o artificiale (ad es. fosfogessi) o, in percentuale molto minore, dalle acque; infatti è solubile in acqua fredda (e quindi viene trasportato nelle acque profonde), ma poichè la sua solubilità decresce rapidamente con l'aumentare della temperatura, può essere rilasciato quando l'acqua si riscalda. Il radon emanato viene rapidamente disperso all'aperto, dove lo si trova in concentrazioni generalmente basse; quando invece è presente al chiuso (diffuso dal suolo o dai materiali da costruzione), a causa del diminuito ricambio di aria esso tende a concentrarsi. E' proprio la ridotta ventilazione negli edifici, a seguito dei programmi di conservazione energetica iniziati negli anni '70, che ha risvegliato l'attenzione degli addetti ai lavori al problema del radon negli ambienti chiusi. Esso, infatti, è ritenuto cancerogeno per l'uomo, come riconosciuto ormai da diversi anni dall'Organizzazione Mondiale della Sanità.

Radon (^{222}Rn , ^{220}Rn)

How radon enters a house



Radioattività naturale



Radioattività naturale

Radon nelle case

I livelli di concentrazione nell'aria sono fortemente variabili a seconda delle condizioni ambientali.

Sulla base degli esiti di una recente campagna nazionale, promossa e coordinata dall'ANPA e dall'Istituto Superiore di Sanità, il valore medio della concentrazione del radon in aria nelle abitazioni italiane è risultato di 77 Bq m^{-3} .

Le percentuali di case con concentrazioni superiori a 200 Bq m^{-3} e a 400 Bq m^{-3} sono risultate rispettivamente pari il 5% e l'1%.

Radioattività naturale

Radioattività naturale nelle acque

Anche le acque contengono una certa quantità di radioattività, dovuta sia alle piogge che trasportano le sostanze radioattive dell'aria, sia alle acque di drenaggio che convogliano nei bacini idrici sostanze radioattive presenti nelle rocce e nel suolo. Significativamente radioattive sono le acque calde solfuree negli impianti termali, per produrre elettricità e per riscaldare gli edifici.



**RADIUM
EMANATION WATER**
Drives Out Uric Acid

Suffering from too much uric acid and diseases caused by faulty elimination—**Rheumatism, Gout, Periodical Headaches, Neuralgia, Constipation, Neurasthenia, Auto-Intoxication and Lack of Bodily Vigor**—quickly relieved in a natural way without drugs or chemicals by our new discovery

**THE WAY TO MAKE
RADIUM WATER
IN YOUR OWN HOME**

with our Rayode. A little device containing Radium enough to supply 2,700 Mache Units of Radio-activity, in two quarts of water every twenty-four hours, for less than 10c a day. The Rayode will last a lifetime.

SEND FOR FREE LITERATURE

Tells how you can buy or rent a Rayode to make Radium Water in your own home, with your own ordinary drinking water. Address:

THE COLORADO RADIUM PRODUCTS COMPANY
635 First National Bank Building Denver, Colo.

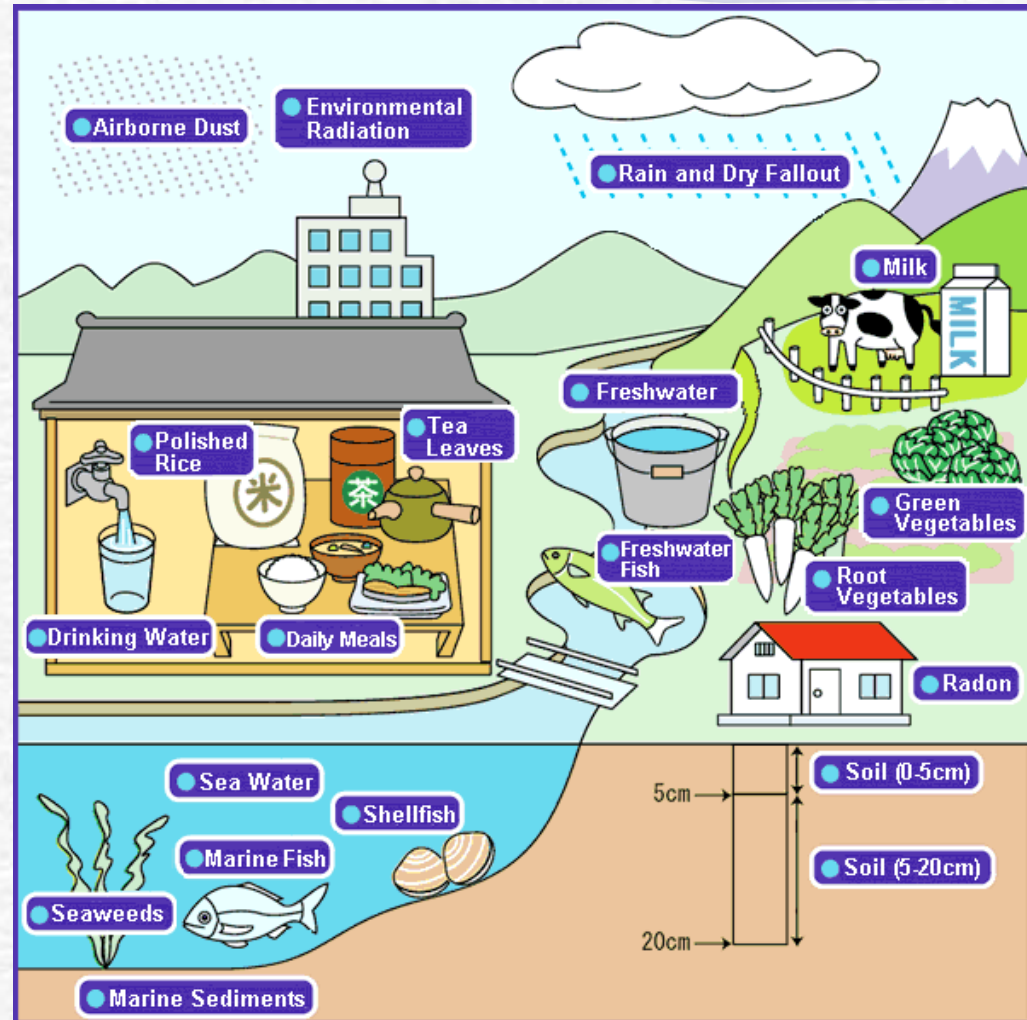
Radioattività naturale

Radioattività naturale presente nel corpo umano

L'organismo delle persone adulte deve ritenersi in equilibrio, tramite la dieta e gli scambi respiratori, con l'ambiente in cui sono presenti numerosi radionuclidi naturali quali:

- ^3H , ^7Be , ^{14}C , originati dall'interazione della radiazione cosmica con l'atmosfera terrestre;
- ^{40}K , ^{87}Rb , ^{138}La , presenti primordialmente nella litosfera;
- ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th (capostipiti delle famiglie radioattive naturali) e loro prodotti di decadimento.

Tutti questi nuclidi radioattivi (ed altri non citati data la loro minor importanza) vengono introdotti nell'organismo degli individui in quantità variabile in relazione al luogo di residenza abituale ed alle particolarità della dieta alimentare da essi seguita.



Radioattività naturale

Radiazione cosmica

I raggi cosmici provengono, per la maggior parte, dal profondo spazio interstellare e sono costituiti principalmente da particelle cariche positivamente (protoni, alfa, nuclei pesanti), che quando giungono in prossimità della terra, risentono dell'azione derivante dal campo magnetico terrestre. C'è anche una componente solare che trae origine dalle esplosioni nucleari sul sole e consiste essenzialmente di protoni. L'interazione di queste particelle di alta energia (raggi cosmici primari) con l'atmosfera terrestre comporta l'emissione di numerosi prodotti secondari, quali ad esempio mesoni (particelle di massa compresa tra l'elettrone ed il protone), elettroni, fotoni, protoni e neutroni che a loro volta possono creare altre particelle secondarie. Per la maggior parte i raggi cosmici primari vengono assorbiti nello strato più alto dell'atmosfera e sulla terra i raggi cosmici secondari sono principalmente costituiti da mesoni, elettroni, fotoni, neutroni e protoni.

Ai poli il contributo di dose dovuto ai raggi cosmici è maggiore rispetto alle zone equatoriali, in quanto il campo magnetico della terra devia la radiazione. Il livello di dose aumenta con l'altitudine, con il ridursi dello spessore d'aria che fa da schermo.

A 10 km d'altitudine, ad esempio, l'esposizione alla radiazione cosmica è mediamente 150 volte più elevata di quella al livello del mare. L'esposizione alla radiazione cosmica è di notevole interesse per gli equipaggi degli aerei sui voli intercontinentali.

L'interazione della radiazione cosmica con la materia produce un gran numero di radionuclidi detti cosmogenici. Di questi soltanto il ^{14}C , ^3H , ^{22}Na e ^{24}Na contribuiscono in qualche modo a dosi misurabili: di questi le dosi più elevate le forniscono il ^{14}C e il ^3H che vengono introdotti nel corpo umano attraverso la catena alimentare.

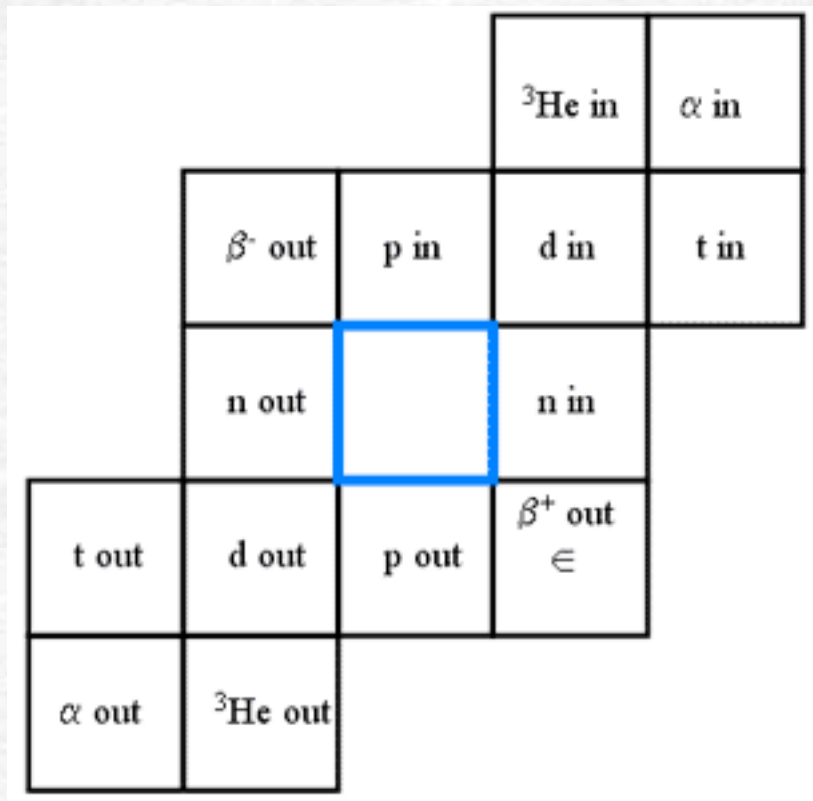
Radioattività nel corpo Umano

Nelle persone adulte di sesso maschile non residenti in regioni del globo con anomalie geologiche significative (regioni a radioattività naturale molto elevata) l'attività corporea media dei principali radionuclidi naturali può essere stimata in:

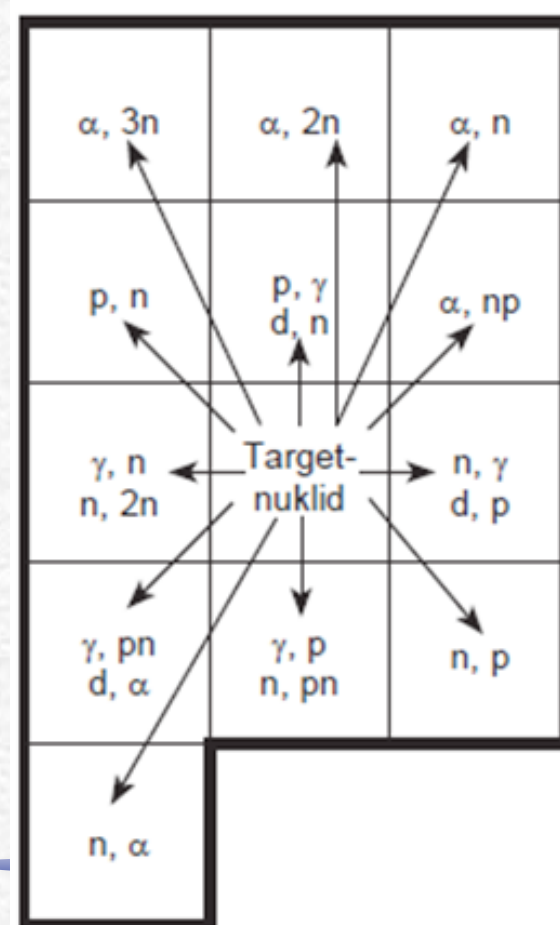
- ^3H : 0.11 ÷ 0.48 Bq/cm³ di sangue;
- ^{14}C : alcune centinaia ÷ alcune migliaia di Bq (nel 1951 erano presenti nell'organismo delle suddette persone circa 3000 Bq di C-14; tale valore è attualmente cambiato per l'introduzione sia di C-14 generato nelle esplosioni nucleari, sia di CO₂ senza C-14 dovuto alla combustione dei combustibili fossili);
- ^{40}K : circa 4500 Bq;
- ^{87}Rb : circa 1000 Bq;
- **U-nat** : circa 90 mg (l'attività specifica di 1 g di U-nat di recente estrazione è pari a 12.2 kBq di U-238, 12.2kBq di U-234 e 0.57 kBq di U-235);
- ^{226}Ra (radionuclide appartenente alla famiglia del 238U): da alcuni Bq a qualche decina di Bq accumulati essenzialmente nelle ossa;
- ^7Be , ^{138}La , ^{232}Th ed altri radionuclidi delle famiglie naturali: tracce

Radioattività naturale e artificiale: decadimenti e altre reazioni nucleari

decadimenti

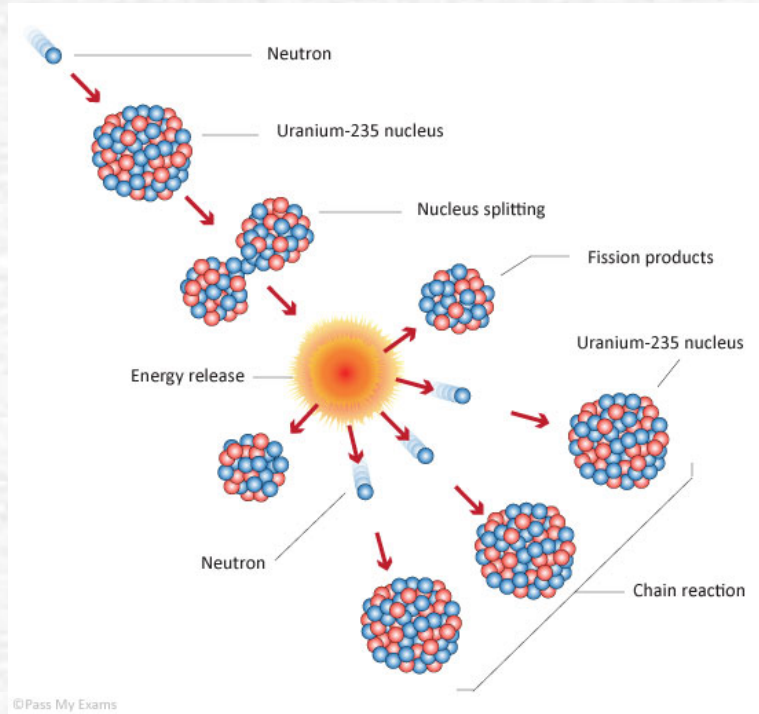


reazioni nucleari

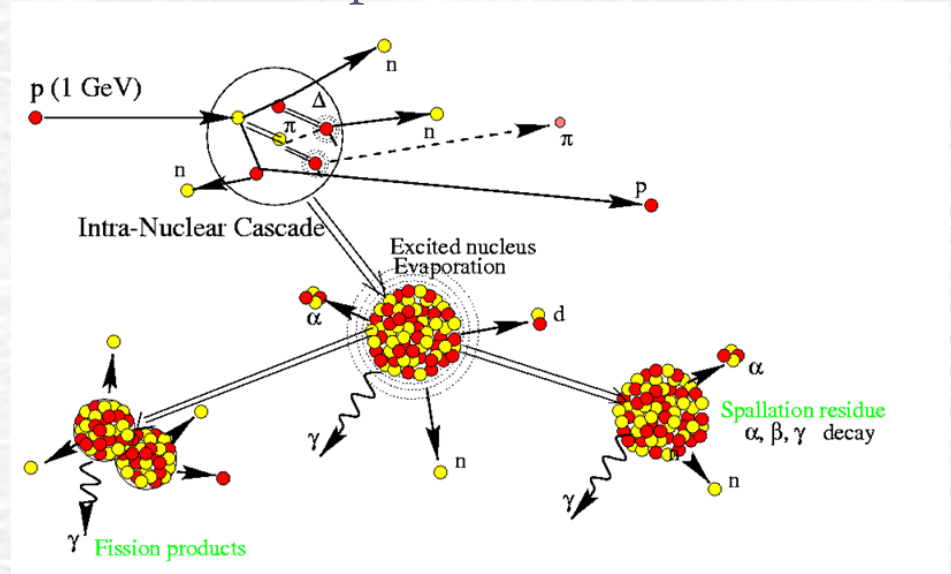


Nuclear Reactions:

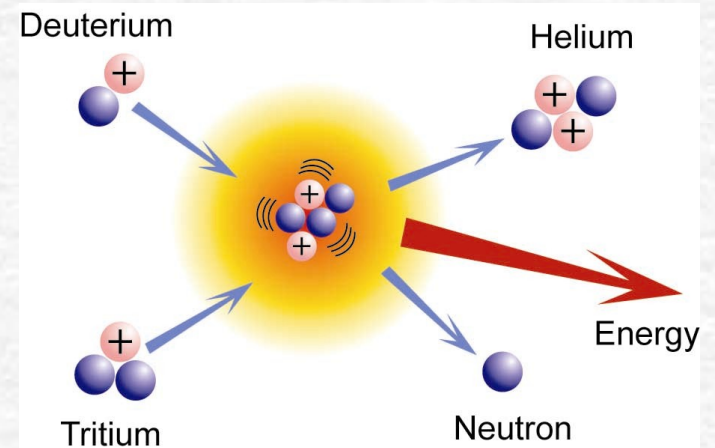
Nuclear Fission Reaction



Ex: Spallation reaction

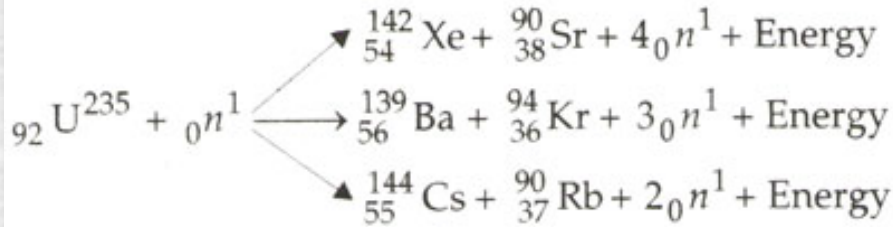
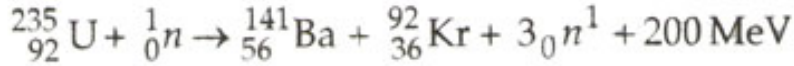


Nuclear Fusion Reaction

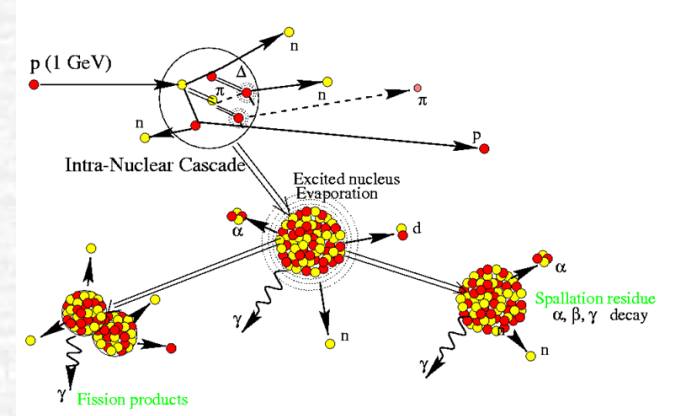


Nuclear Reactions

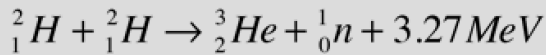
Nuclear Fission Reactions



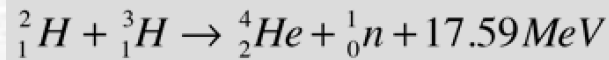
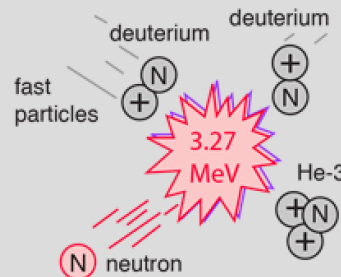
Ex: Spallation reaction



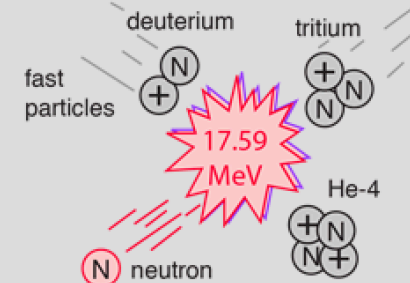
Nuclear Fusion Reactions



Deuterium-deuterium



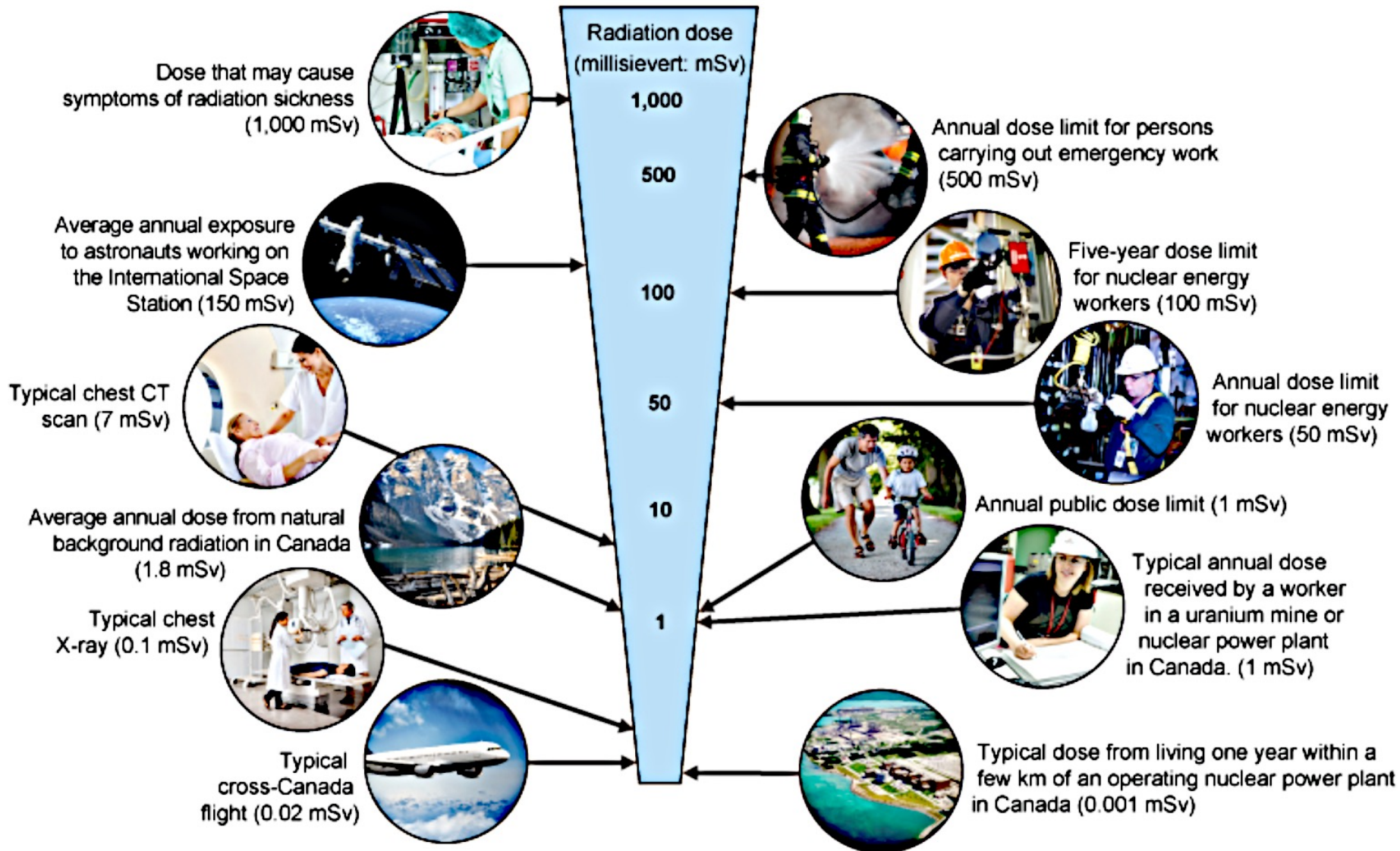
Deuterium-tritium
Fusion



Radioattività: Dose

<i>Quantity</i>	<i>Definition</i>	<i>SI unit</i>	<i>Old unit</i>	<i>Conversion</i>
Exposure X	$X = \frac{\Delta Q}{\Delta m_{\text{air}}}$	$2.58 \times \frac{10^{-4} \text{C}}{\text{kg air}}$	$1 \text{ R} = \frac{1 \text{ esu}}{\text{cm}^3 \text{ air}_{\text{STP}}}$	$1 \text{ R} = 2.58 \times \frac{10^{-4} \text{C}}{\text{kg air}}$
Dose D	$D = \frac{\Delta E_{\text{ab}}}{\Delta m}$	$1 \text{ Gy} = 1 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$	$1 \text{ rad} = 100 \frac{\text{erg}}{\text{g}}$	$1 \text{ Gy} = 100 \text{ rad}$
Equivalent dose H	$H = DW_{\text{R}}$	1 Sv	1 rem	$1 \text{ Sv} = 100 \text{ rem}$
Activity \mathcal{A}	$\mathcal{A} = \lambda N$	$1 \text{ Bq} = 1 \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ s}^{-1}$	$1 \text{ Bq} = \frac{1 \text{ Ci}}{3.7 \times 10^{10}}$

Radiation dose examples



Sensitivity to irradiation for various sorts of beings



Goat 2 400 mSv



Pig 2 500 mSv



Dog 2 600 mSv



Human being
3 000 - 5 000 mSv



Ape 5 4000 mSv



Mouse 5 600 mSv



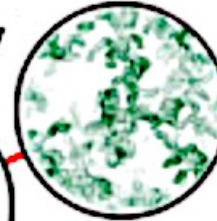
Rabbit 7 000 mSv



Rat
8 000 mSv



Trout
15 000 mSv



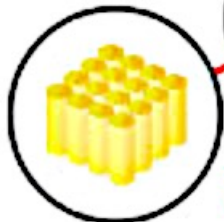
Bacteria 40 000 mSv



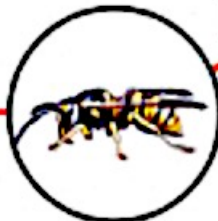
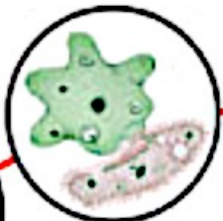
Bat 150 000 mSv



Snail 200 000 mSv



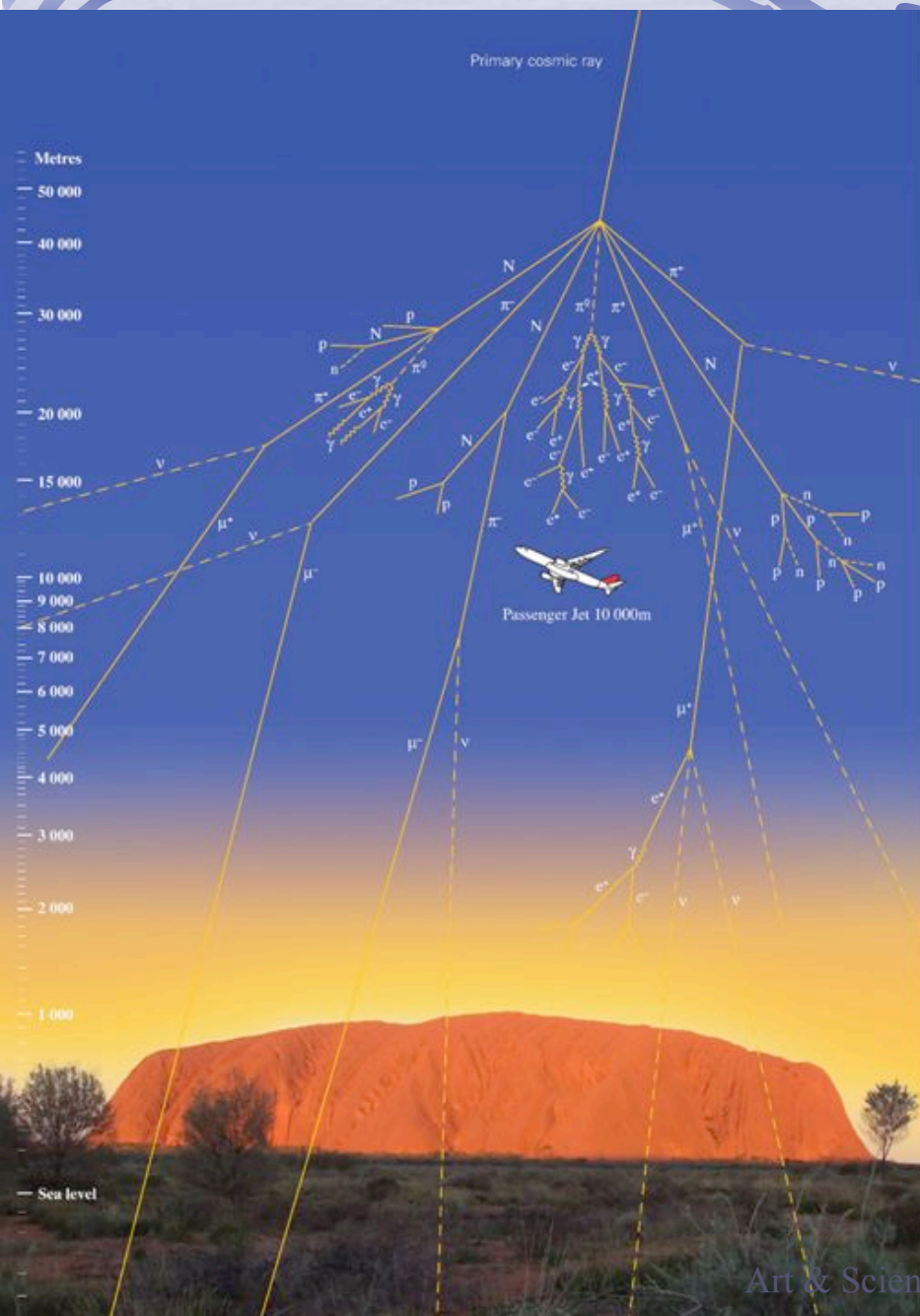
Virus of tobacco mosaic 2 000 000 mSv



Ameba, Insect 1 000 000 mSv

Dose equivalent that
a half of exposed
individuals survives

Radioattività naturale



Cosmogenic radionuclides

radioisotope half-life (years)

'cosmogenic'

^{10}Be 1.51×10^6

^{14}C 5,730

^{26}Al 7.3×10^5

^{36}Cl 3.01×10^5

^{129}I 15.9×10^6

'primordial'

^{235}U 7.04×10^8

^{238}U 2.342×10^7

'anthropogenic'

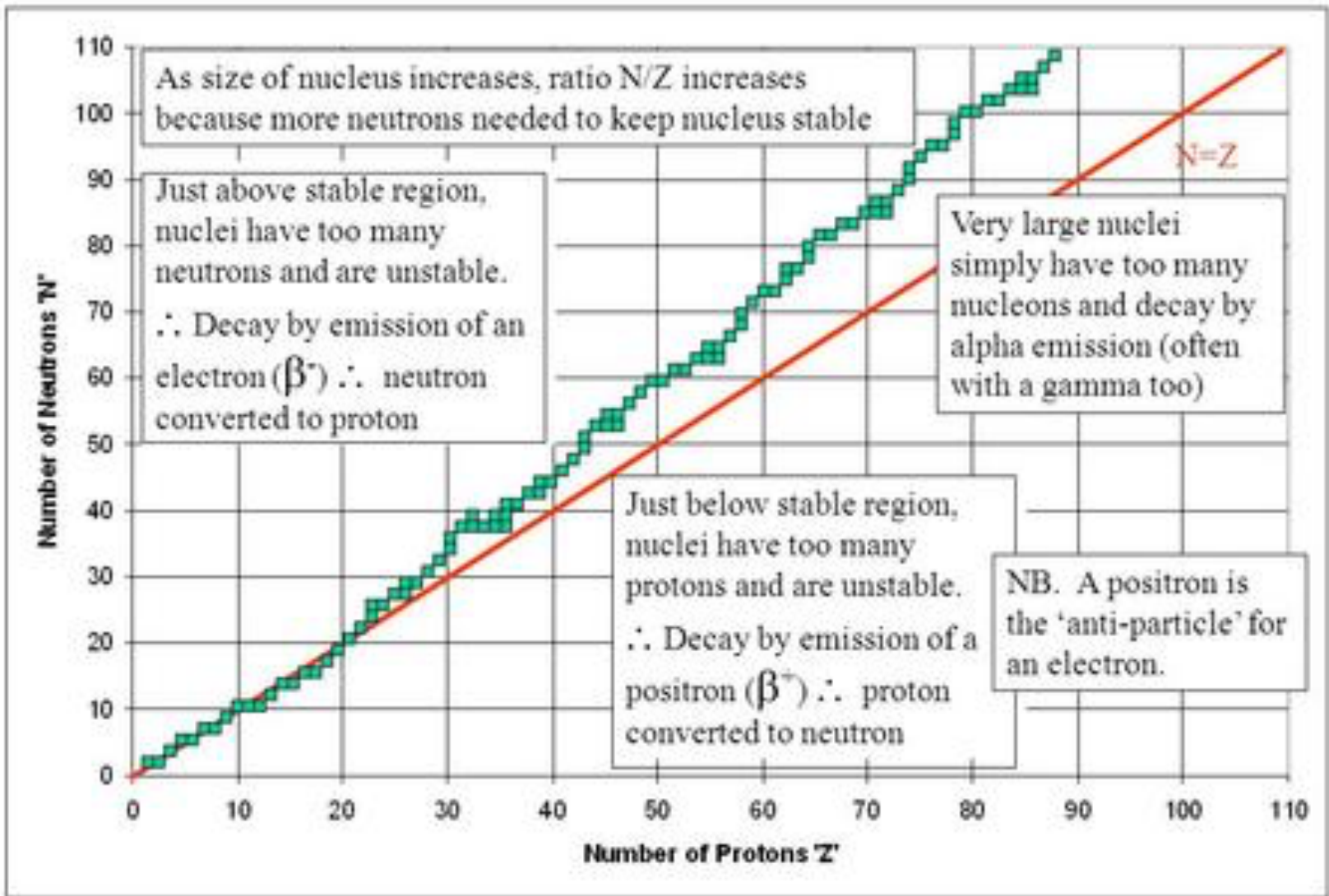
^{239}Pu 2.410×10^4

^{240}Pu 6.56×10^3

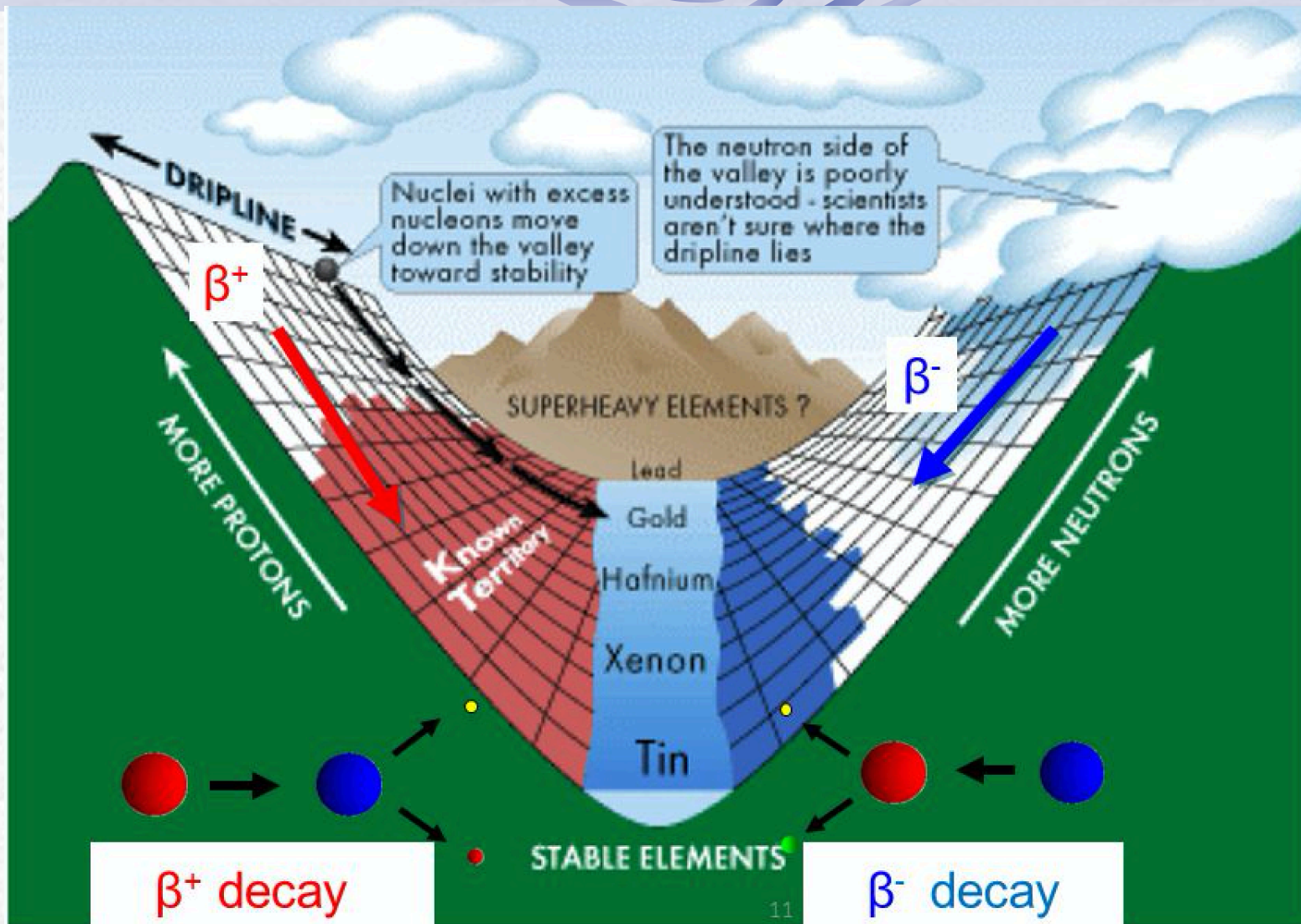
^{242}Pu 3.75×10^5

Valley of stability.

The Chart of Nuclei



Valley of stability.



Protone si trasforma in neutrone

Neutrone si trasforma in protone

Leptons

Electric Charge

Tau  -1 0  Tau Neutrino

Muon  -1 0  Muon Neutrino

Electron  -1 0  Electron Neutrino

Strong

Gluons (8) 

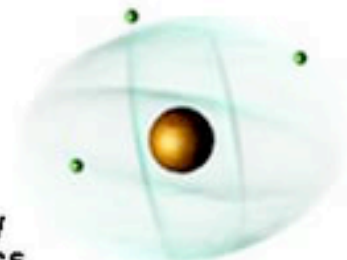
Quarks 
Mesons 
Baryons 

Nuclei 

Electromagnetic

Photon 


Atoms
Light
Chemistry
Electronics



Quarks

Electric Charge

Bottom  -1/3 2/3  Top

Strange  -1/3 2/3  Charm

Down  -1/3 2/3  Up

each quark: R , B , G 3 colours

Gravitational

Graviton ? 

Solar system
Galaxies
Black holes



Weak

Bosons
(W,Z)

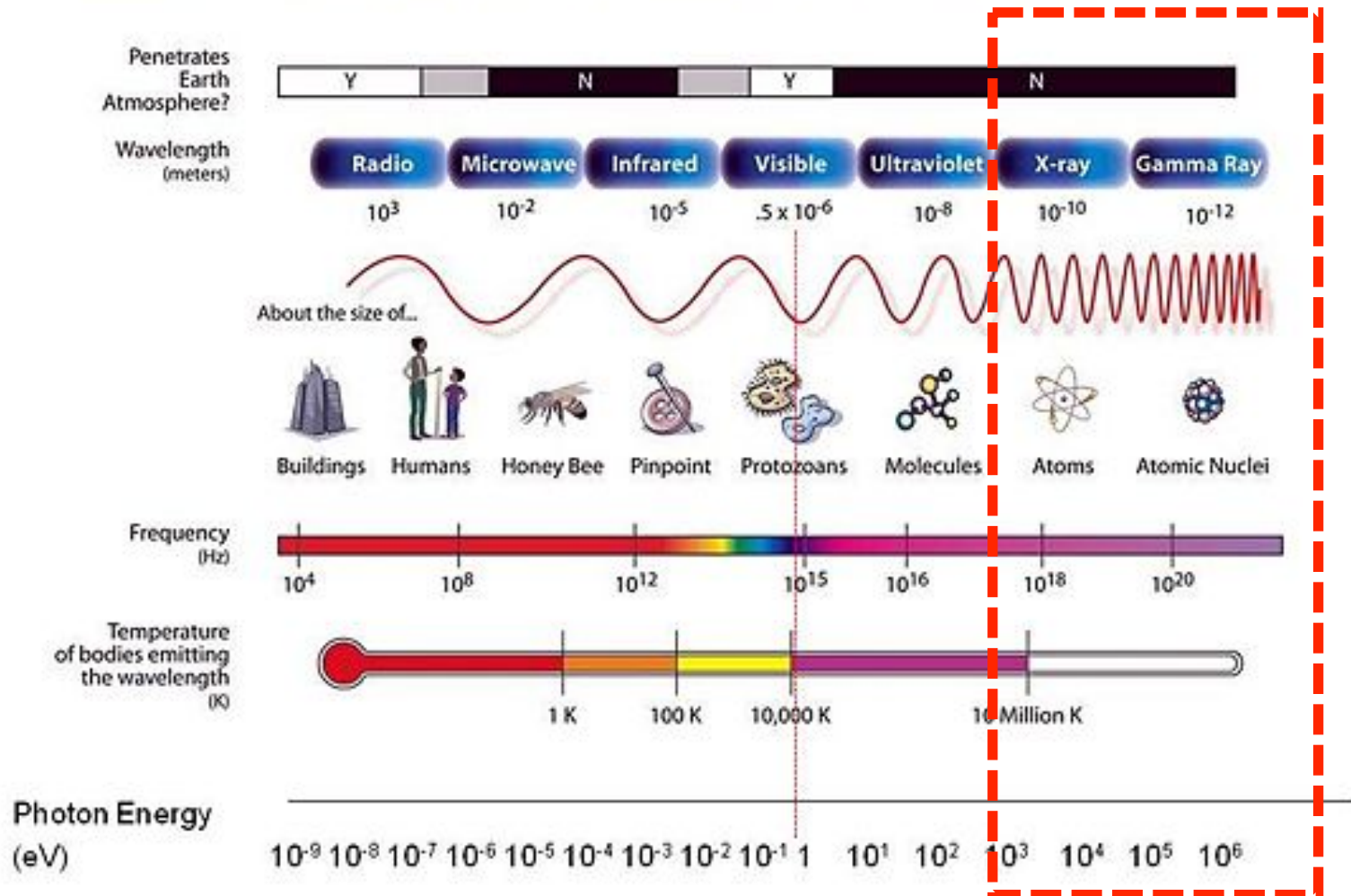


Neutron decay
Beta radioactivity
Neutrino interactions
Burning of the sun



What is radioactivity?

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ N}\cdot\text{m} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ W}\cdot\text{s}$$

Radiazioni Ionizzanti!

Radioattività

Radionuclidi Fossili e catene di decadimento

Raggi cosmici e Radionuclidi cosmogenici

Radioattività
Naturale

Radionuclidi Antropogenici

Radioattività
Artificiale

Code for Using the Part of the Nuclides

Chemical Element

H - Symbol

1.00794 - Atomic Weight (Carbon-12 Scale)

Hydrogen - Element Name

σ_{th} 333, 150 - Thermal Neutron Absorption Cross-Section in Barns Followed by Resonance Integral in Barns

Stable - Even Z, Even N Nuclides Have Spin and Parity 0⁺

Pd108 - Symbol, Mass Number

26.46 - Atom Percent Abundance

σ_{γ} 1(19+8), (2+24E1) - on Capture Cross-Sections in barns (Isomeric + Ground State), resonance integrals leading to ground state

107.903895 - Atomic Mass (Carbon-12 Scale)

Fission Product, Slow Neutron Fission of U235, U233 or Pu239

Artificially Radioactive

S38 - Symbol, Mass Number

2.84 h - Half-Life

β^- 99... - Decay with Energy of Radiation in MeV, keV for Gammas

1941.9... - Decay with Energy of Radiation in MeV, keV for Gammas

E 2.94 - Beta Disintegration Energy in MeV

Naturally Occurring or Otherwise Available but Radioactive

La138 - Symbol, Mass Number

5+ - Spin and Parity

0.090 - Atom Percent Abundance

1.05E11a - Half-Life

σ_{α} 25 - Decay in Order of Prominence with Isotopes in MeV for Alpha and Gammas

σ_{γ} 1435.8, 788.7 - on Capture Cross-Section, resonance integral

σ_{γ} -57.4E2 - on Capture Cross-Section, resonance integral

E 1.04 137.90711 - Beta Disintegration Energy Followed by Isotopic Mass

Member of Naturally Radioactive Decay Chain

Po218 - Symbol, Mass Number

RdA 3.10 m - Historical Symbol, Half-Life

α 5.0024 - Modes of Decay and Energy in MeV for Alpha and Beta, keV for Gammas

β^- w - Indicates Decay Mode Intensity (See Symbol List)

218.008965 - Isotopic Mass

Two Isomeric States One Stable

11/2- - Spin and Parity of Ground State, 1/2⁺

13.60 d - Symbol, Mass Number

7.68 - Half-Life

IT 156.0 - Atom Percent Abundance

σ_{γ} 158.0 - Decay with Energy of Radiation

σ_{γ} 1.1 - Thermal Neutron Capture Cross-Section in Barns, Followed by Resonance Integral in Barns

119.902995 - Fission Product, Slow Neutron Fission of U235, U233 or Pu239

119.902995 - Stable Ground State

Two Isomeric States Both Radioactive

2+ - Spin and Parity of Ground State

5+ - Symbol, Mass Number

10.47 m - Half-Life

5.271 a - Half-Life

IT 58.6 - Atom Percent Abundance

β^- 318 - Modes of Decay and Energy in Order of Intensity, Indicates (Where Shown) Range of Energies Included

σ_{γ} 1332.5 - Thermal Neutron Capture Cross-Section in Barns, Followed by Resonance Integral in Barns

σ_{γ} 1332.5 - Fission Product, Slow Neutron Fission of U235, U233 or Pu239

σ_{γ} 1173.2 - Stable Ground State

σ_{γ} 6E1 - Decay with Energy of Radiation

σ_{γ} 2.0.4 - Decay with Energy of Radiation

E 2.824 - Beta Disintegration Energy in MeV

Radioactive g.s. Isomer

Displacement Caused by Nuclear Bombardment Reactions

	$\alpha, 3n$	$\alpha, 2n$ $^3\text{He}, n$	α, n	
	p, n	p, γ d, n $^3\text{He}, np$	α, np t, n $^3\text{He}, p$	
	p, pn γ, n $n, 2n$	Original Nucleus n, n	d, p n, γ t, np	t, p
p, α	n, t γ, np n, nd	n, d γ, p n, np	n, p n, γ $t, ^3\text{He}$	
	n, α n, n ^3He	$n, ^3\text{He}$ n, pd		

Relative Locations of the Products of Various Nuclear Process

		^3He in	α in
	β^- out	p in	d in
	n out	Original Nucleus	n in
t out	d out	p out	β^+ out e^+
α out	^3He out		

Symbols

Radiation and Decay

- α alpha particle
- β^- negative electron (beta decay)
- β^+ positron
- γ gamma ray
- n neutron
- p proton
- d deuteron
- t triton
- ϵ electron capture
- IT isomeric transition
- D delayed radiation (see page 6)
- SF spontaneous fission
- E disintegration energy
- e^- conversion electron
- $\beta^-\beta^-$ double beta decay
- C14 particle emission (C14 nuclei)
- Ne particle emission (neon nuclei)

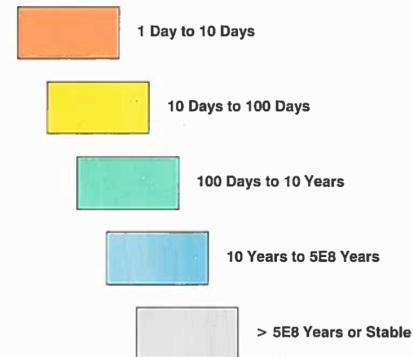
Time

- μ s microseconds (1.0E-6s)
- ms milliseconds (1.0E-3s)
- s seconds
- m minutes
- h hours
- d days
- a years

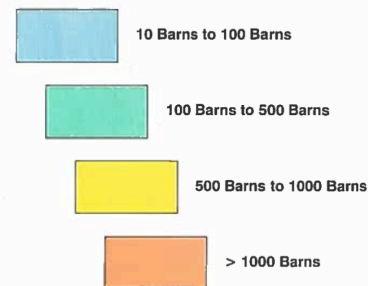
Other Symbols

- w absolute abundance less than 1%
- wv absolute abundance less than 1.0E-3%
- wvw absolute abundance less than 1.0E-6%
- E indicates exponential format, e.g., 1.06E11a is 1.06×10^{11} years
- \leftrightarrow indicates assignment to metastable (m) and ground (g) states inconclusive
- \updownarrow indicates assignment of m_2 and m_1 states inconclusive
- χ unspecified number of particles of a given type emitted, e.g., χp
- \blacktriangle nuclide formed as a product in fission of U235, U233 or Pu239
- \blacksquare shielded nuclide with independent fission yield greater than 2.5E-6%

Colors Used for Half Lives (Appear in Upper Half of Nuclide Block)



Colors Used for Neutron Absorption Properties (Appear in Lower Half of Nuclide Block)

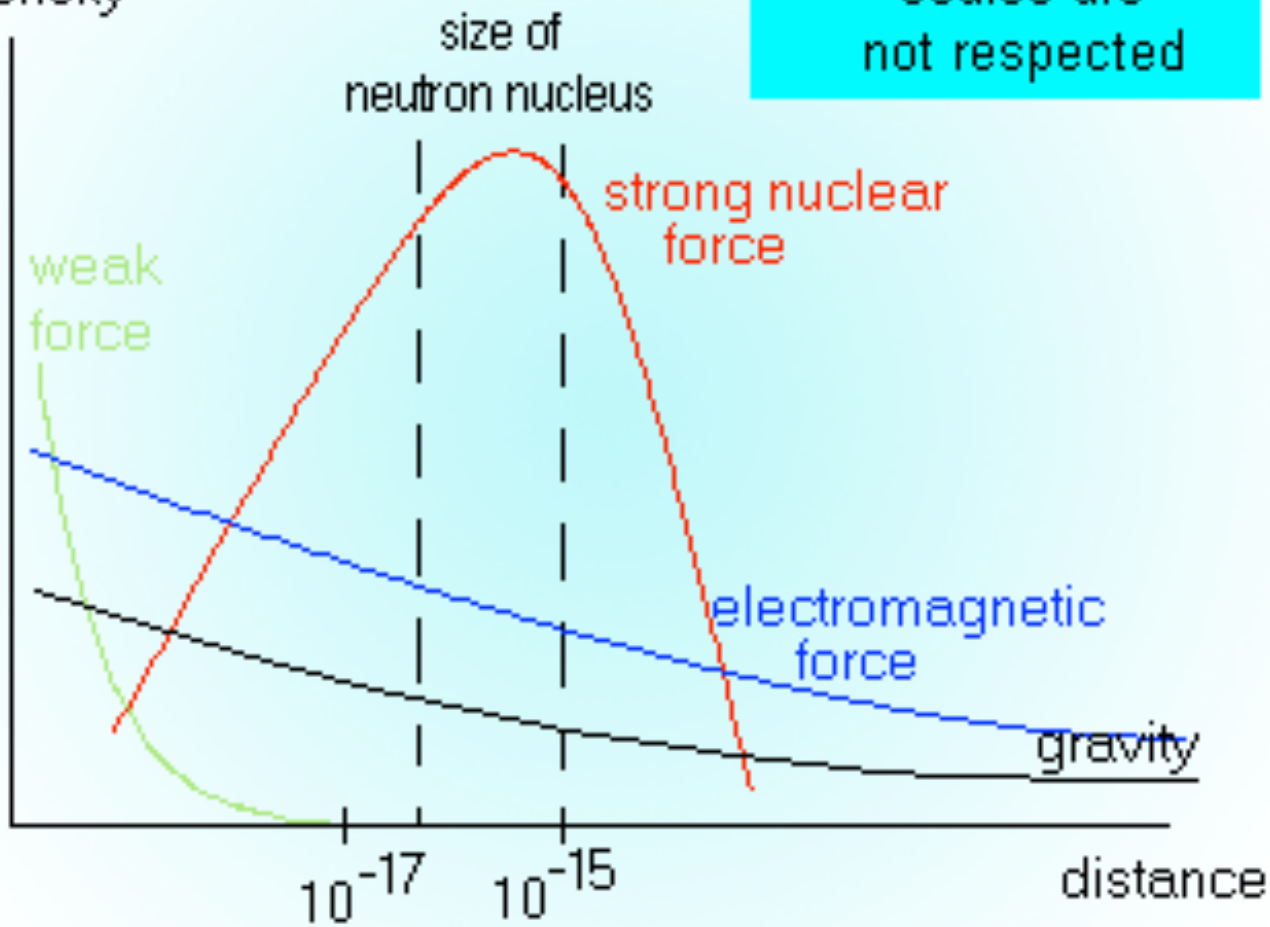




By Cush - Own work, Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=73606545>

intensity

scales are
not respected



Nuclear transformations?

Radioactivity occurs because some nuclei are unstable and spontaneously decay.

Important aspects of radioactivity:

- Elements transform into other different elements.
- The energy released in radioactive decay comes from mass which is converted to energy.
- Radioactivity is a quantum phenomenon and the Radioactive decay is a statistical process.
- Radioactivity “tends” to reach “nuclear stability”

Nuclear Stability?

What is the nuclear stability? Nuclear stability means that nucleus is stable meaning that it does not spontaneously emit any kind of radioactivity (radiation).

On the other hand, if the nucleus is unstable (not stable), it has the tendency of emitting some kind of radiation, i.e., it is radioactive.

Therefore the radioactivity is associated with *unstable nucleus*:

Stable nucleus – non-radioactive

Unstable nucleus – radioactive

Keep in mind that **less stable means more radioactive**

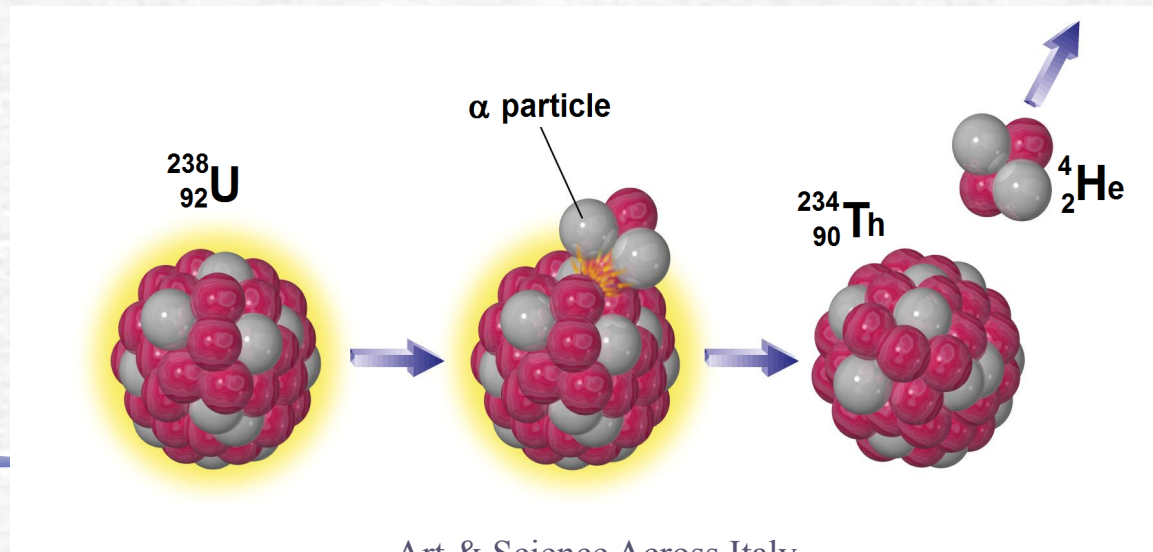
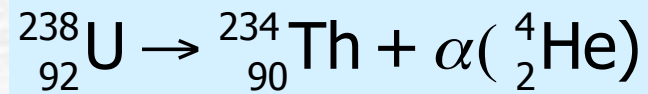
and

more stable means less radioactive

Alpha decay.

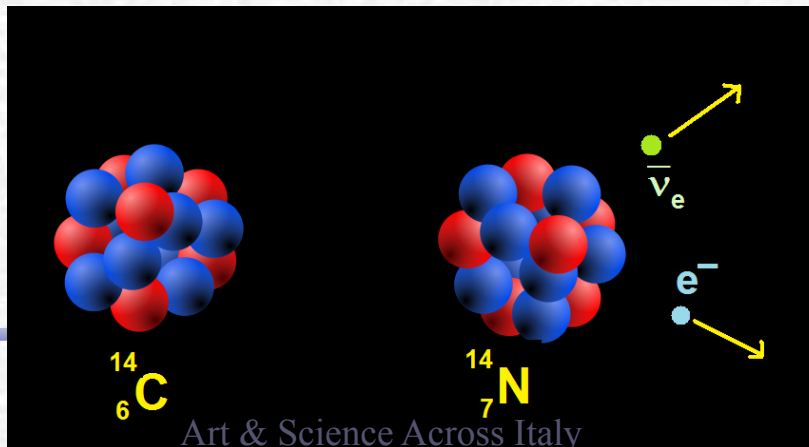
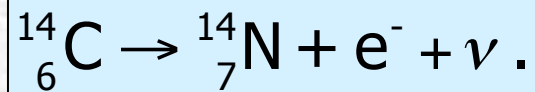
- Occurs when the nucleus is “*too large*”
- An alpha particle is emitted, reducing the “*size*” of the nucleus.
- The daughter nucleus has an atomic number 2 less and an atomic mass 4 less than the parent nucleus.

Example:



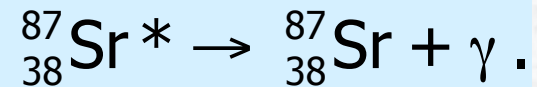
Beta decay.

- Occurs because the nucleus has **too many neutrons** relative to protons.
- A neutron changes into a proton and emits an electron (and antineutrino)
- The daughter nucleus has an atomic number 1 more and the atomic mass is the same as the parent nucleus.
- Example:



Gamma decay.

- Occurs when a nucleus has excess energy.
- A gamma ray is emitted from the nucleus.
- The parent and daughter nuclides are the same.
- Example:



The * in the reaction denotes an excited nuclear state.

Electron capture.

- Occurs because a nucleus has too many protons relative to neutrons.
- A proton captures an electron, emits a neutrino and changes into a neutron.
- The daughter nucleus has an atomic number 1 less and an atomic mass the same as the parent nucleus.

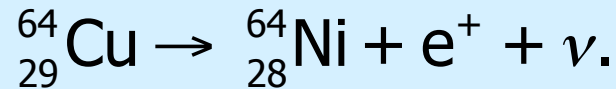
• Example:



Positron emission: β^+ decay

- As with electron capture, this occurs because a nucleus has too many protons relative to neutrons.
- A proton emits a positron and neutrino and changes into a neutron
- The daughter nucleus has an atomic number 1 less and an atomic mass the same as the parent nucleus.

• Example:



Kinetic of radioactivity

The *activity* of a radioactive sample is the rate at which atoms decay.

If $N(t)$ is the number of atoms present at a time t , then the activity A is

$$A = - \frac{dN}{dt} .$$

dN/dt is negative, so the activity is a positive quantity.

The SI unit of activity is the becquerel:

$$1 \text{ becquerel} = 1 \text{ Bq} = 1 \text{ dis/s}$$

Another unit of activity is the curie (Ci) defined by

$$1 \text{ curie} = 1 \text{ Ci} = 3.70 \times 10^{10} \text{ events/s} = 37 \text{ GBq}.$$

Half-Life

Experimental measurements show that the activities of radioactive samples fall off exponentially with time.

Empirically:

$$A = -A_0 e^{-\lambda t}.$$

λ is called the “decay constant” of the decaying nuclide. Each radioactive nuclide has a different decay constant.

Half-Life

The *half-life*, $T_{1/2}$, is the time it takes for the activity to drop by $1/2$. We can find a relationship between λ and $T_{1/2}$:

The diagram shows the equation $\frac{A_0}{2} = -A_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$ in a light blue box. A red arrow points from the text 'activity after $t_{1/2}$ ' to the $\frac{A_0}{2}$ term. Another red arrow points from the text 'original activity' to the A_0 term in the exponent.

$$\frac{A_0}{2} = -A_0 e^{-\lambda t_{1/2}}$$

activity after $t_{1/2}$ original activity

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{1/2}}$$

$$e^{+\lambda t_{1/2}} = 2$$

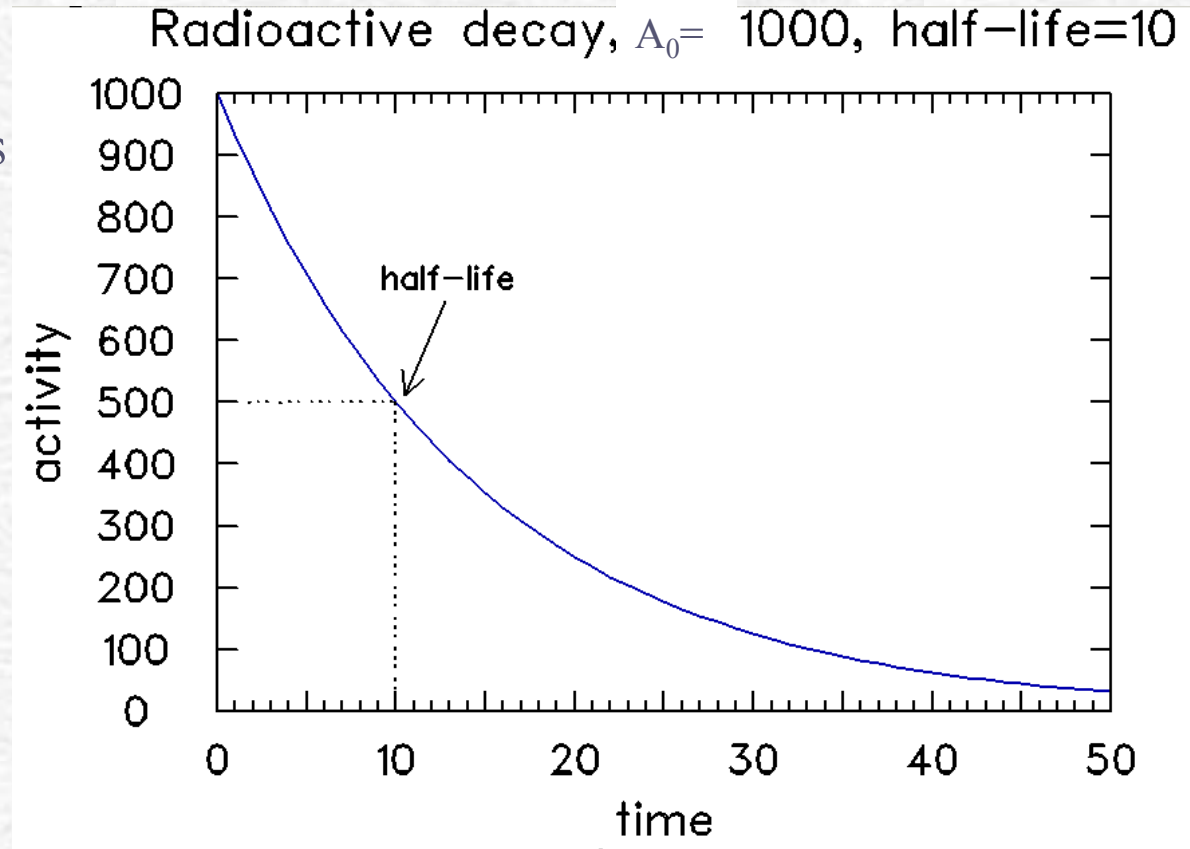
$$\lambda t_{1/2} = \ln(2)$$

$$\lambda = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} = \frac{0.693}{t_{1/2}}$$

Plot of the activity of a radionuclide.

The initial activity was chosen to be 1000 for this plot.

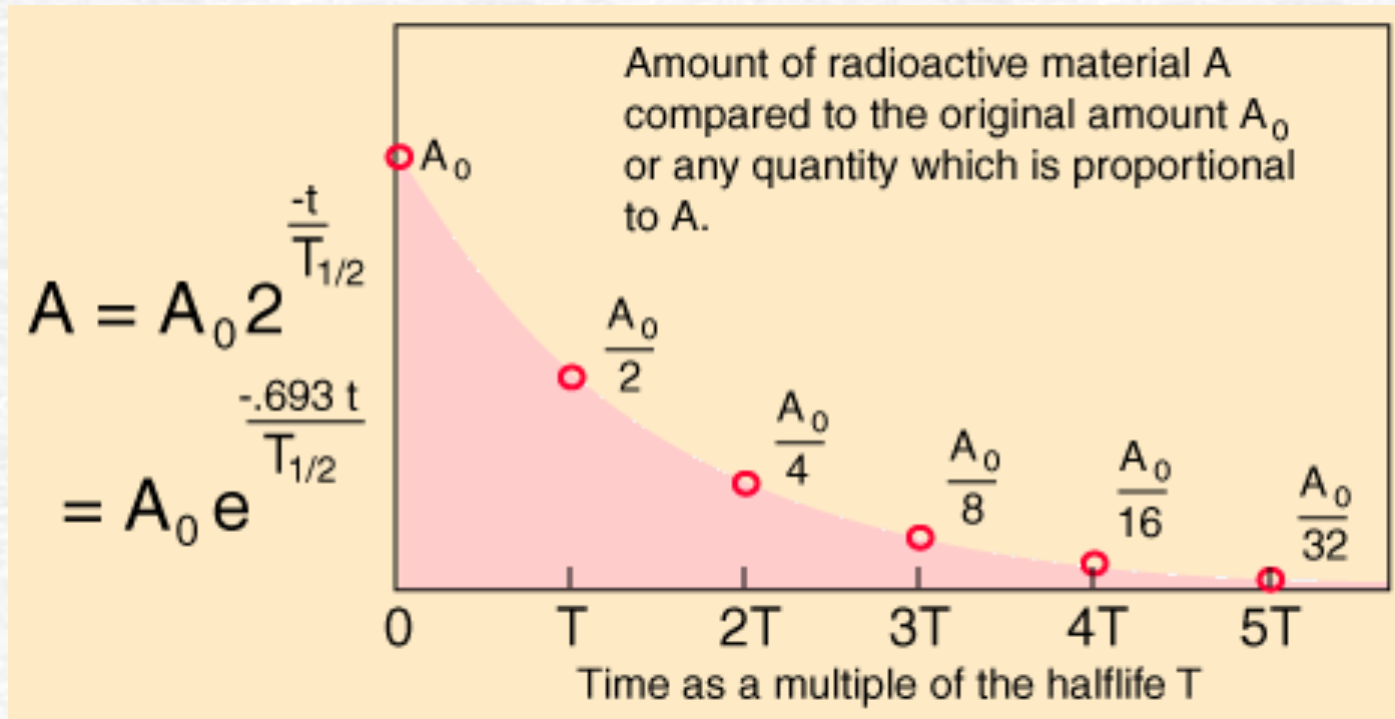
The half-life is 10
(in whatever time units we are using).



All decay curves look like this; only the numbers on the axes will differ, depending on the radionuclide (which determines the half-life) and the amount of radioactive material (which determines the initial activity).

Plot of the activity of a radionuclide.

Hyperphysics is a good place to go for supplementary material. [Here](#)'s their plot of radioactive decay



Remember, **empirically**...

$$A = -A_0 e^{-\lambda t}.$$

Let's fix this!

The empirical activity law can be derived if we assume that λ is the probability per unit time for the decay of a nucleus.

Then:

λdt is the probability that the nucleus will undergo decay in a time dt .

If a sample contains N undecayed nuclei, then the number dN that will decay in the time dt is just N times the probability of decay,

$$dN = -N \lambda dt.$$

This equation can be integrated to give

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

which you should recognize as looking like the activity law with N's instead of A's.

The activity A of a sample of N radioactive nuclei is just

$$A = \lambda N$$

What's the difference between

$$A = -A_0 e^{-\lambda t} \quad \text{and} \quad N = -N_0 e^{-\lambda t}$$

Other than the fact that one talks about rates and the other about numbers?

$$A = -A_0 e^{-\lambda t}$$

is empirical, and you should always be suspicious of empirical equations, which may or may not have any physical meaning.

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

was derived under the assumption that λ is the decay probability per unit time, and is part of a testable theory. Big difference!

Important! The equation for activity A in terms the number of nuclei present

$$A = \lambda N$$

involves λ , which is a probability.