

Dove è successo?

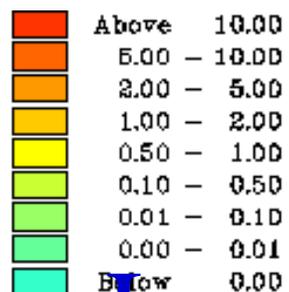


MOSCOW

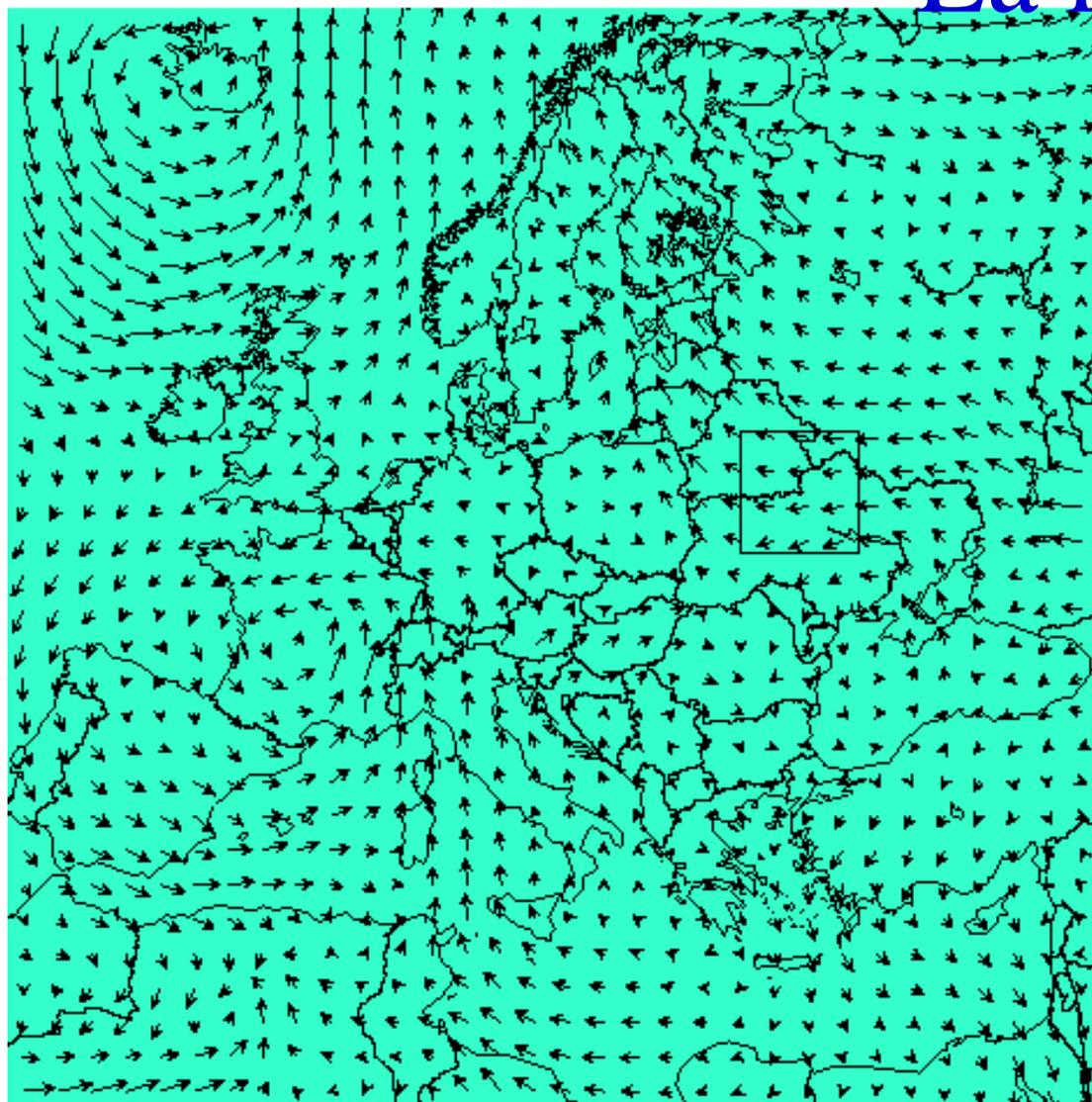
Time: 88042800 GMT

Units: Bq/m³

10 m/s: →

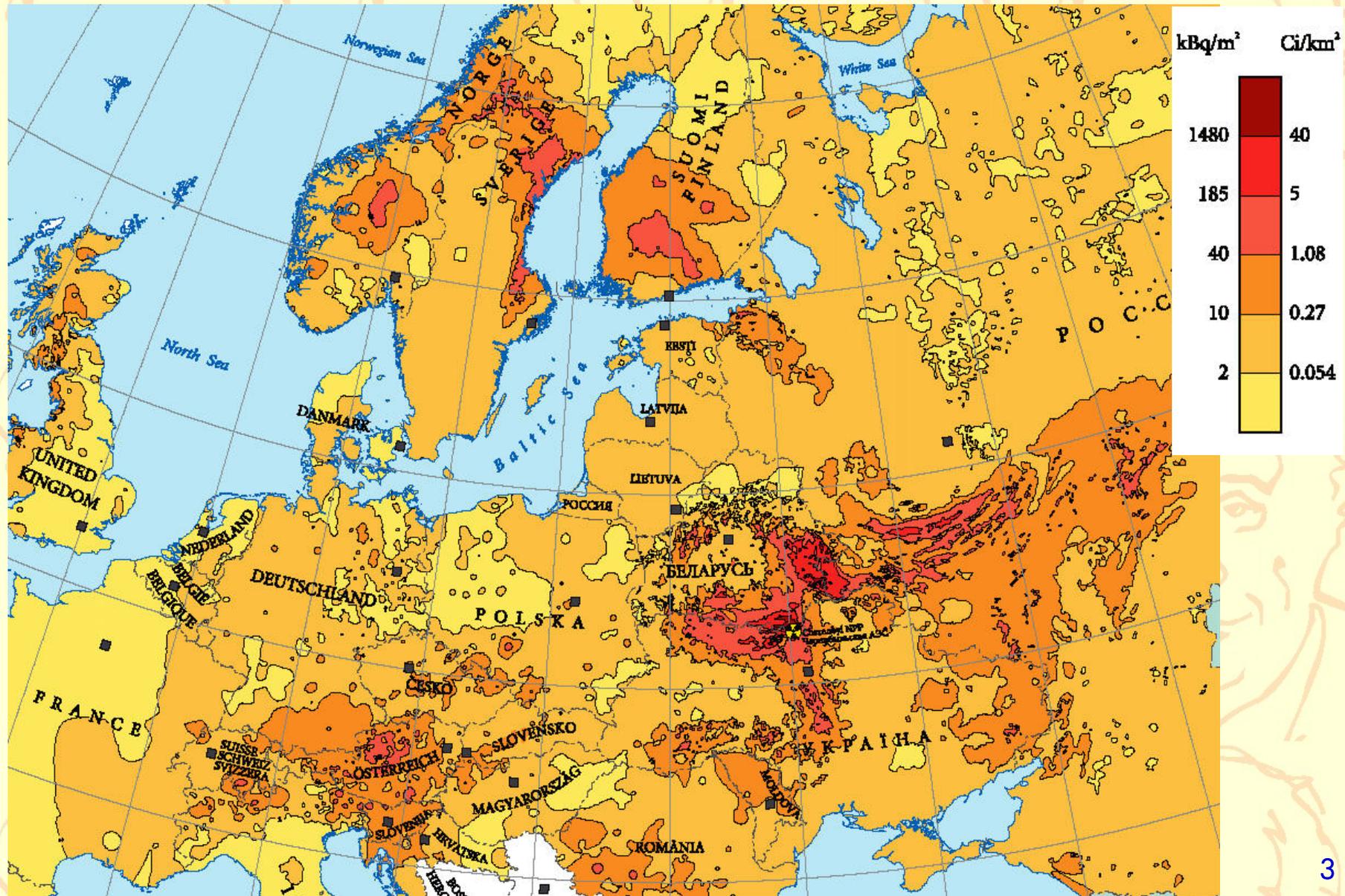


La nube radioattiva

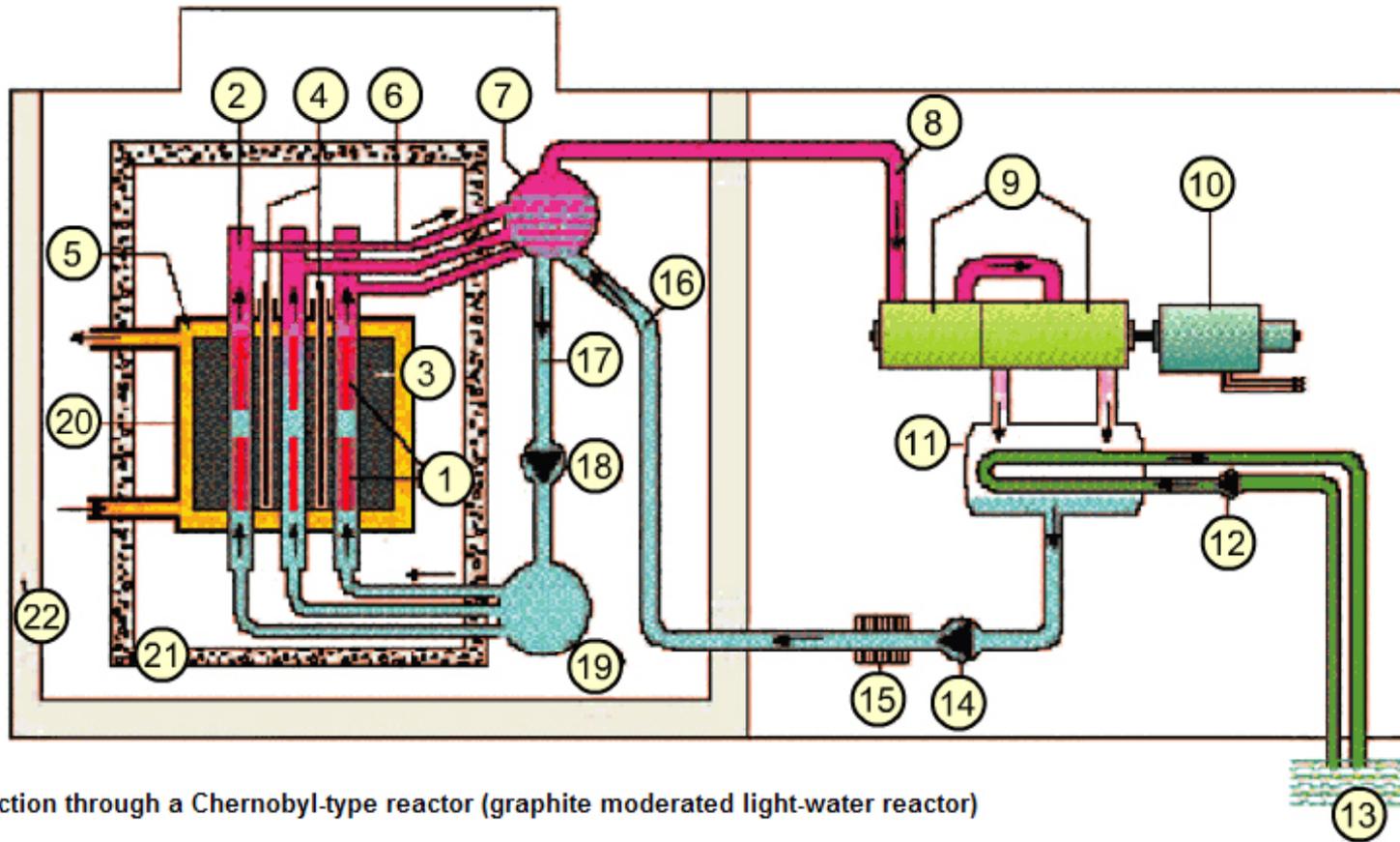


insicuro o sistema sovietico?

La nube di Cesio₁₃₇ rilascio al suolo



Il reattore RBMK 1000



Section through a Chernobyl-type reactor (graphite moderated light-water reactor)

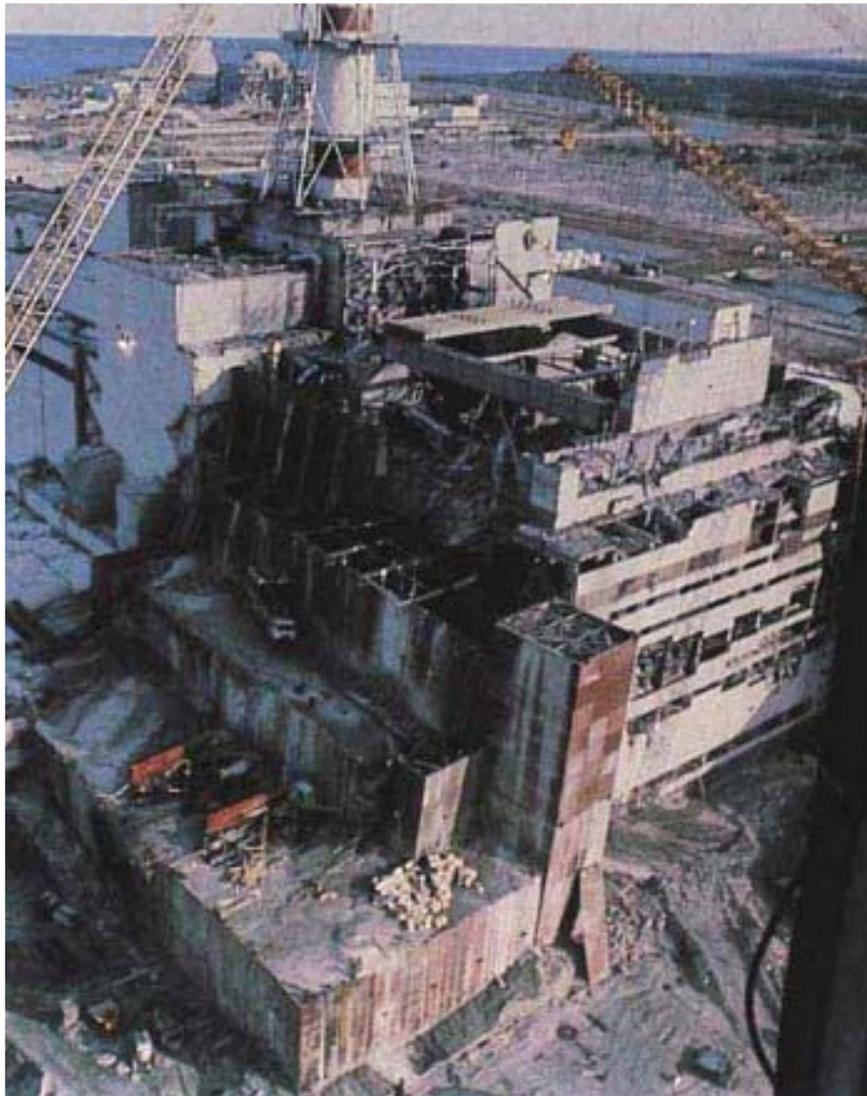
1 Uranium fuel rod	7 Steam separator	11 Condenser	17 Water circulation
2 Pressure tube	8 Steam to turbine	12 Coolant pump	18 Recirculation pump
3 Graphite moderator	9 Steam turbine (High-/low-pressure parts)	13 Reservoir of cooling water	19 Water channels
4 Control rods	10 Generator	14 Feedwater pump	20 Steel container
5 Protective gas		15 Steam drum	21 Concrete shield
6 Steam/water		16 Condensate	22 Reactor building

reactor bolshoy moshchnosti kanalny

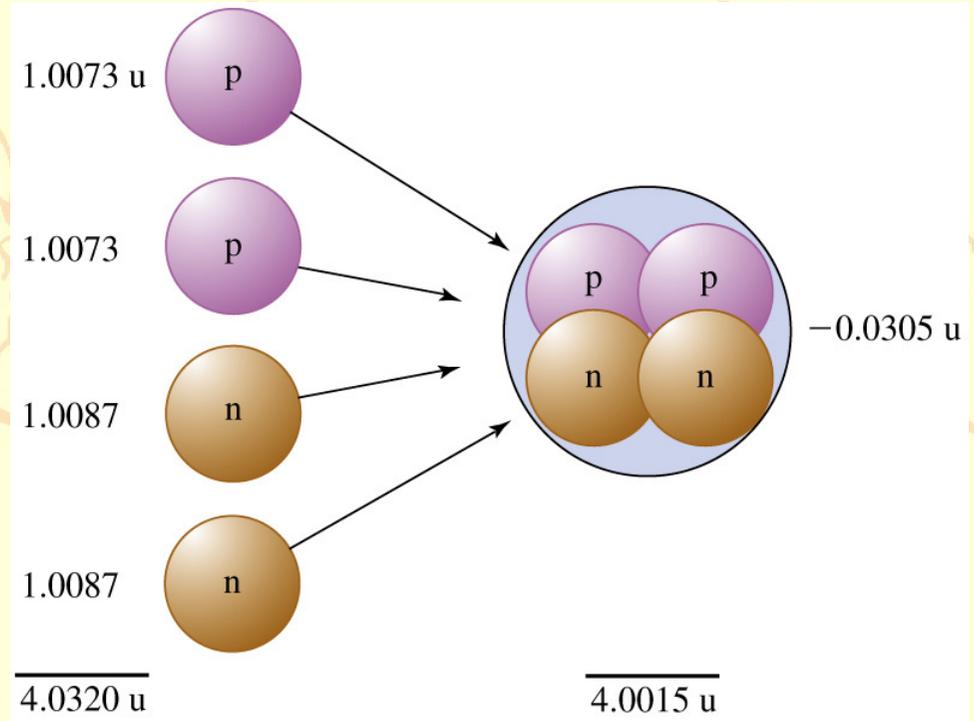
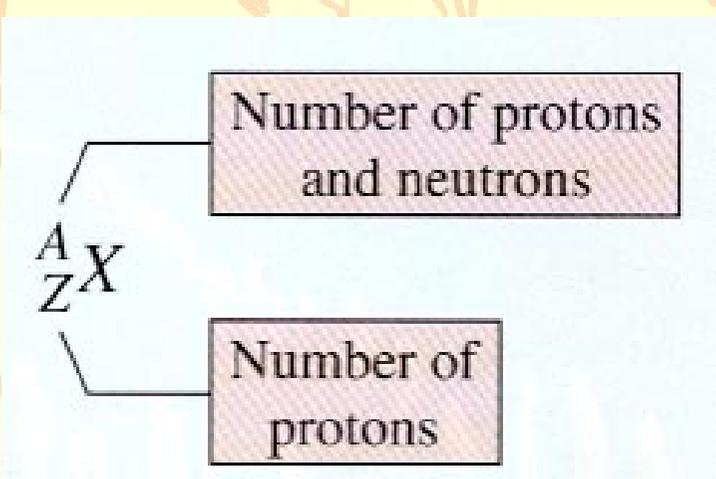
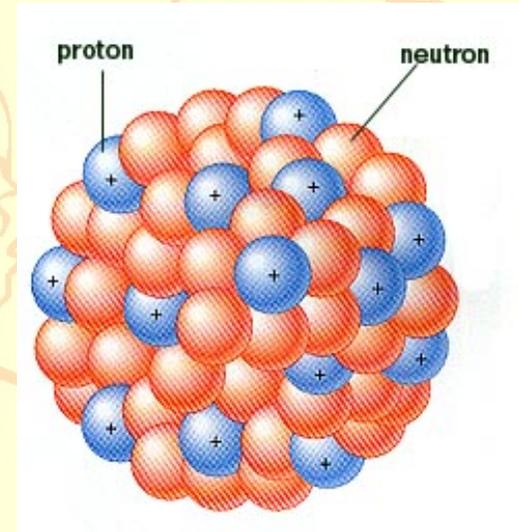
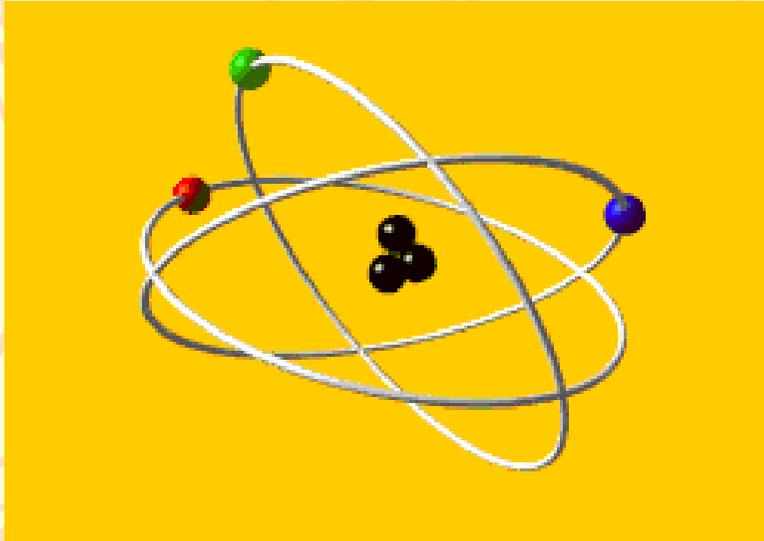
L'impianto dei 4 reattori



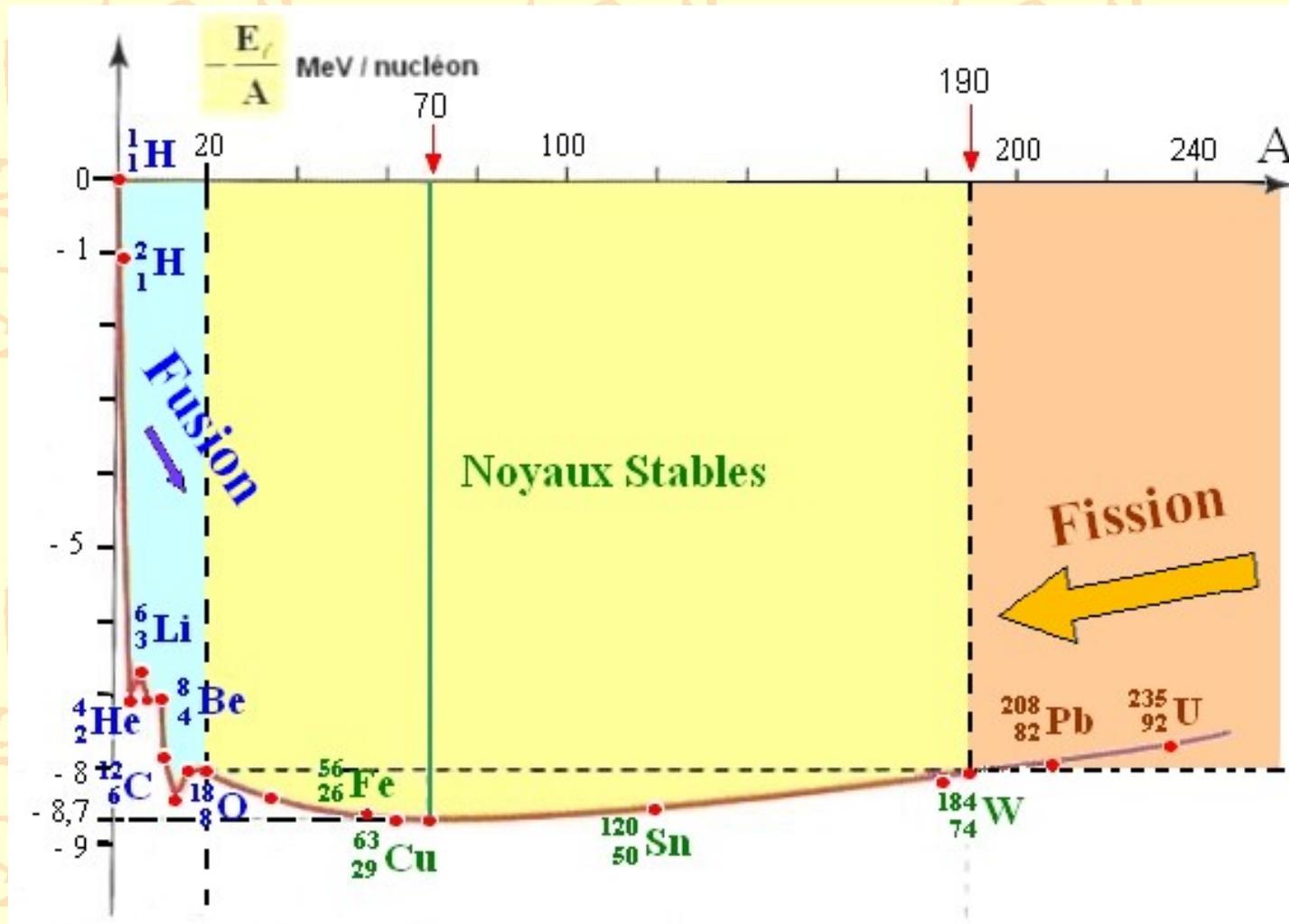
Il reattore distrutto e il sarcofago



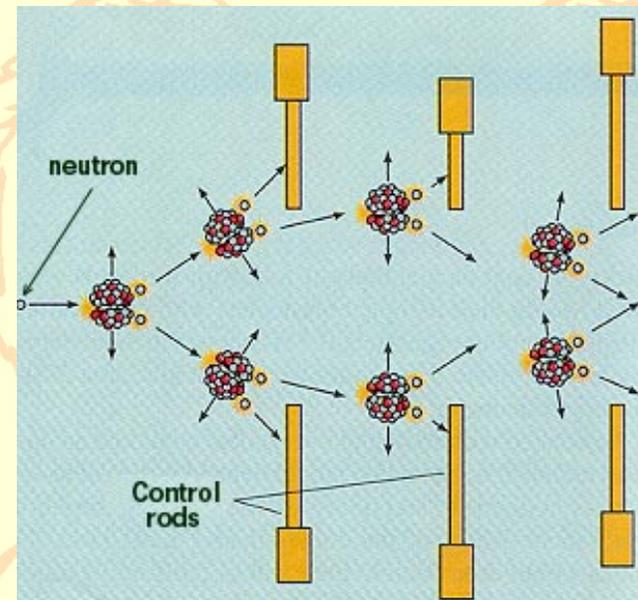
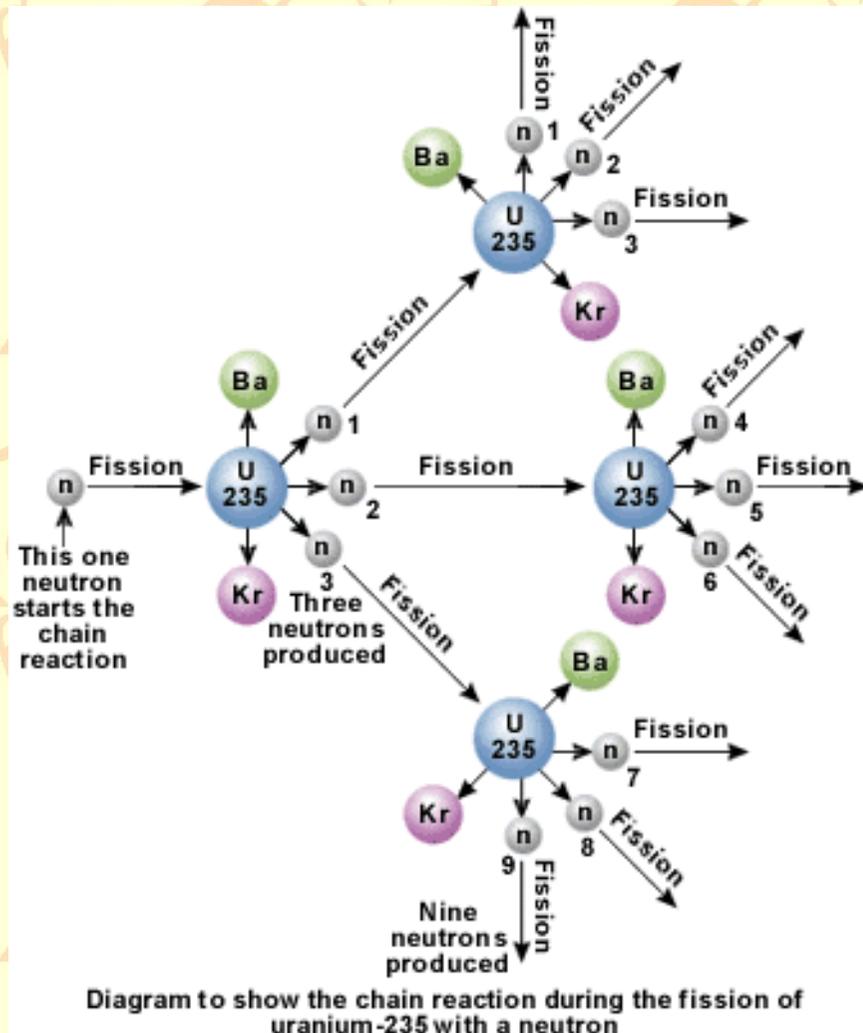
Come sono fatti gli atomi?



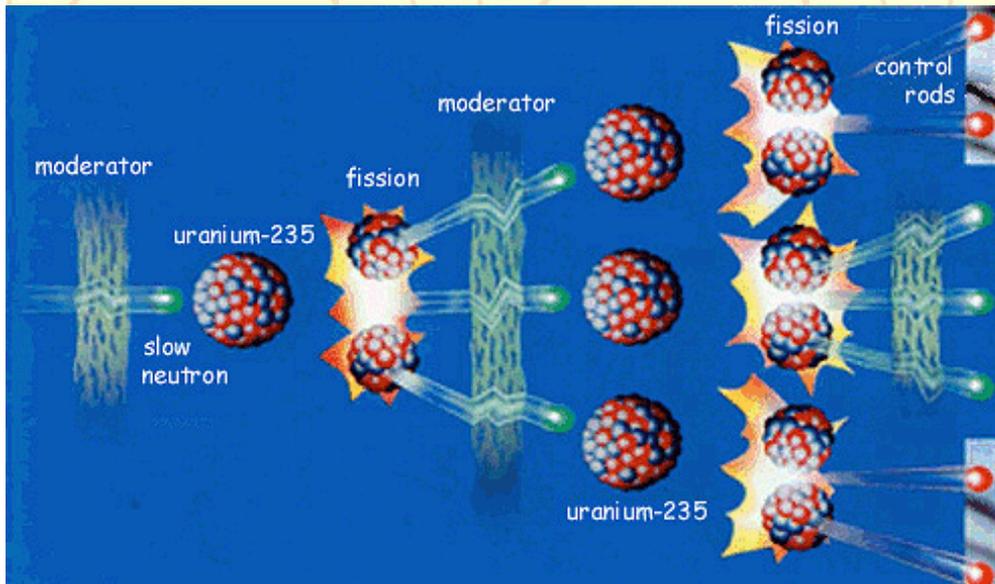
Come funziona il legame nucleare?



Cosa succede ai nuclei nella fissione?

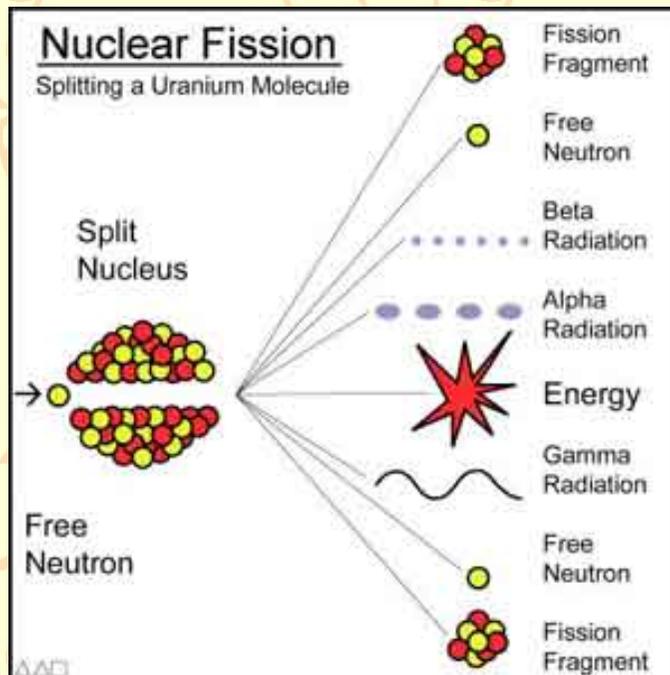


Quando avviene la fissione?



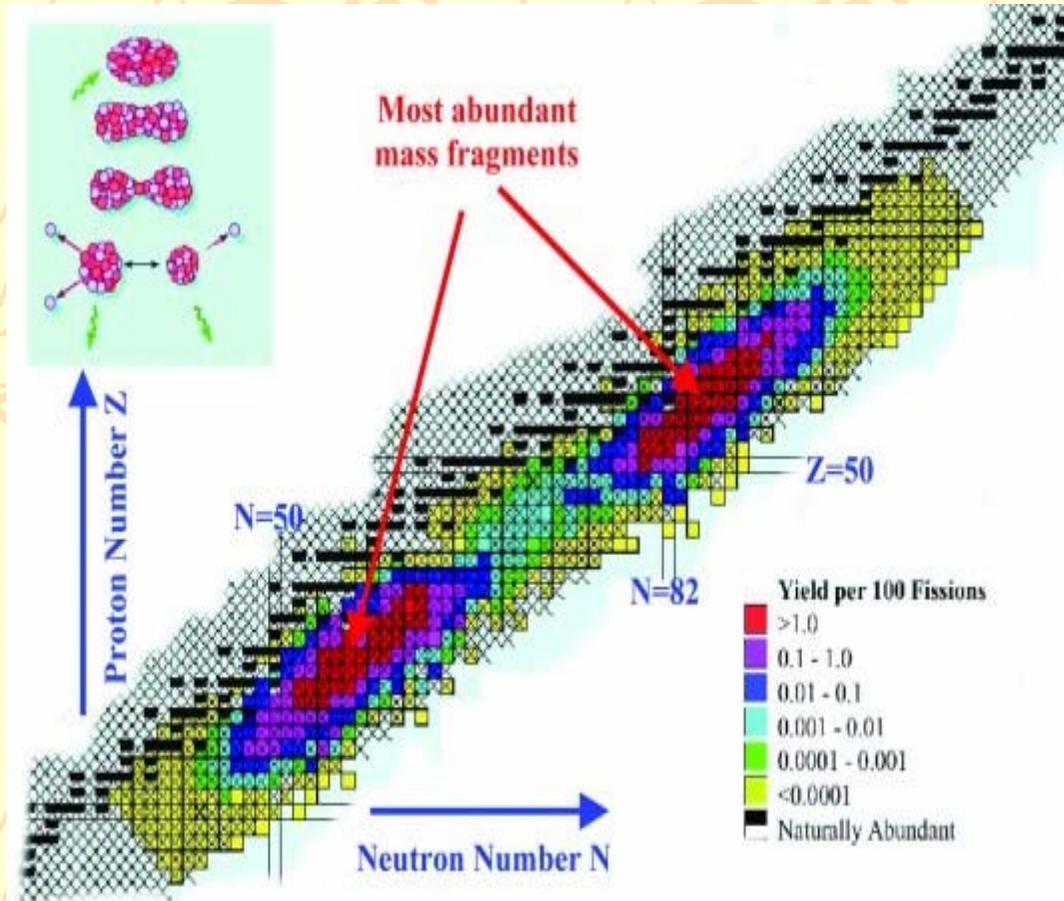
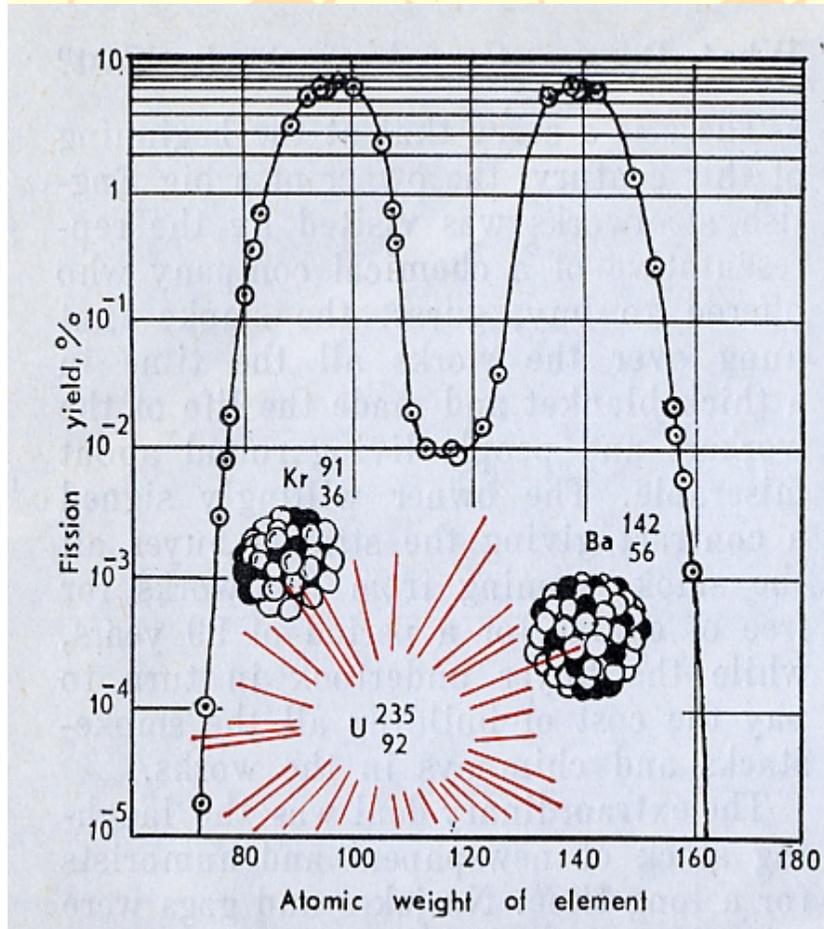
In una piccola massa di uranio la probabilità che i neutroni fuggano all'esterno è elevata

In una grande massa di uranio la probabilità che i neutroni fuggano all'esterno è più bassa

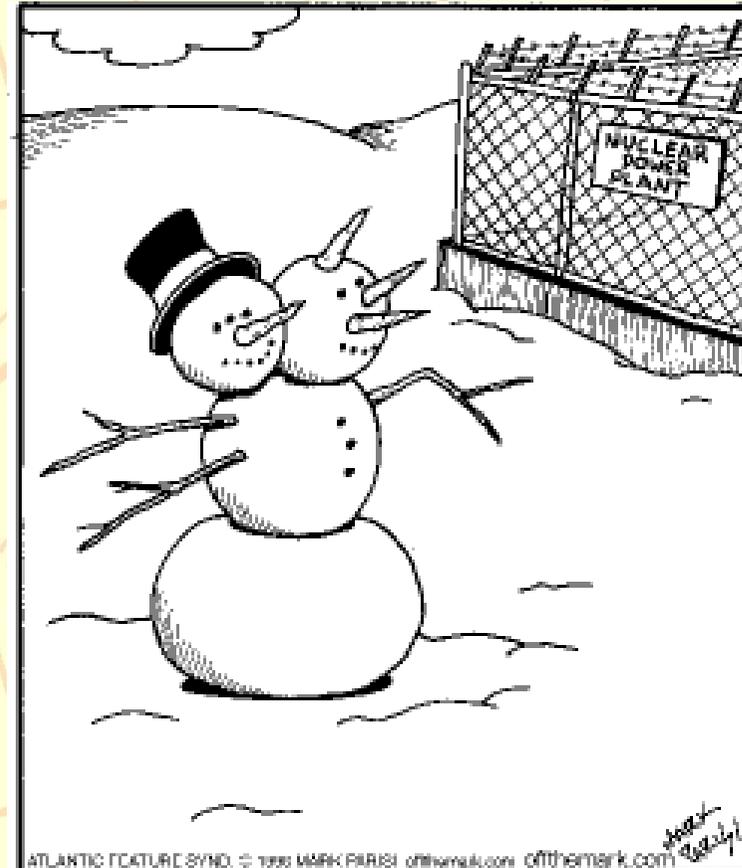
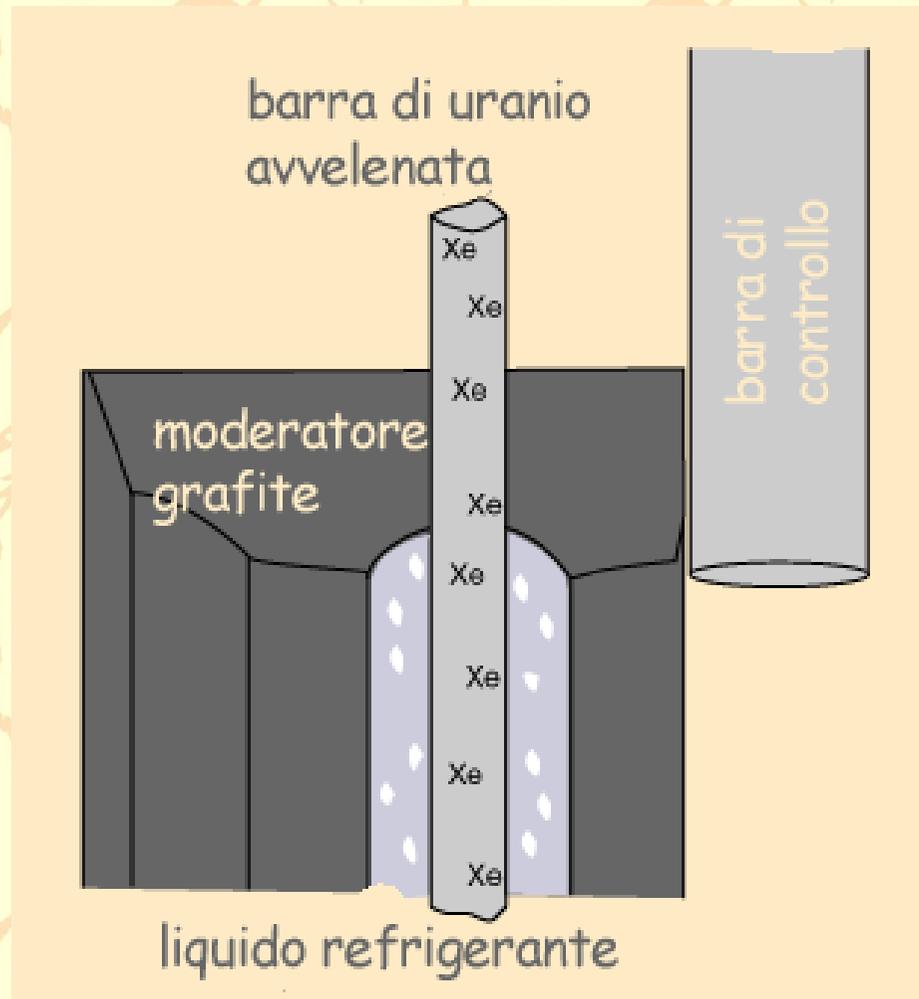


Chernobyl: nucleare insicuro o sistema sovietico?

Cosa si forma nella fissione?



L'avvelenamento da Xenon



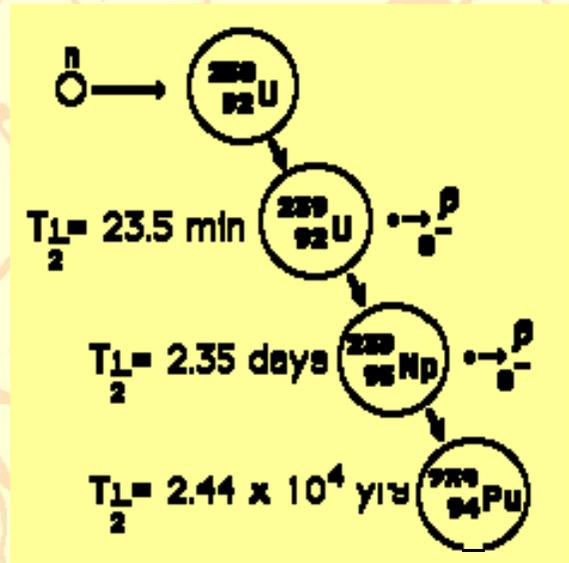
Materiali fissili

28 119 U uranium	241 17 Np neptunium	231 16 Pu plutonium	3 3
---------------------------	------------------------------	------------------------------	--------



uranium

Atomic Number:	92	Atomic Radius:	138.5 pm
Atomic Symbol:	U	Melting Point:	1135 °C
Atomic Weight:	238.029	Boiling Point:	4131 °C
Electron Configuration:	[Rn]7s ² 5f ³ 6d ¹	Oxidation State:	6, 5, 4




plutonium

Atomic Number:	94	Atomic Radius:	131 pm
Atomic Symbol:	Pu	Melting Point:	640 °C
Atomic Weight:	244	Boiling Point:	3228 °C
Electron Configuration:	[Rn]7s ² 5f ⁶	Oxidation States:	6, 5, 4, 3



U 235 Hiroshima

prima



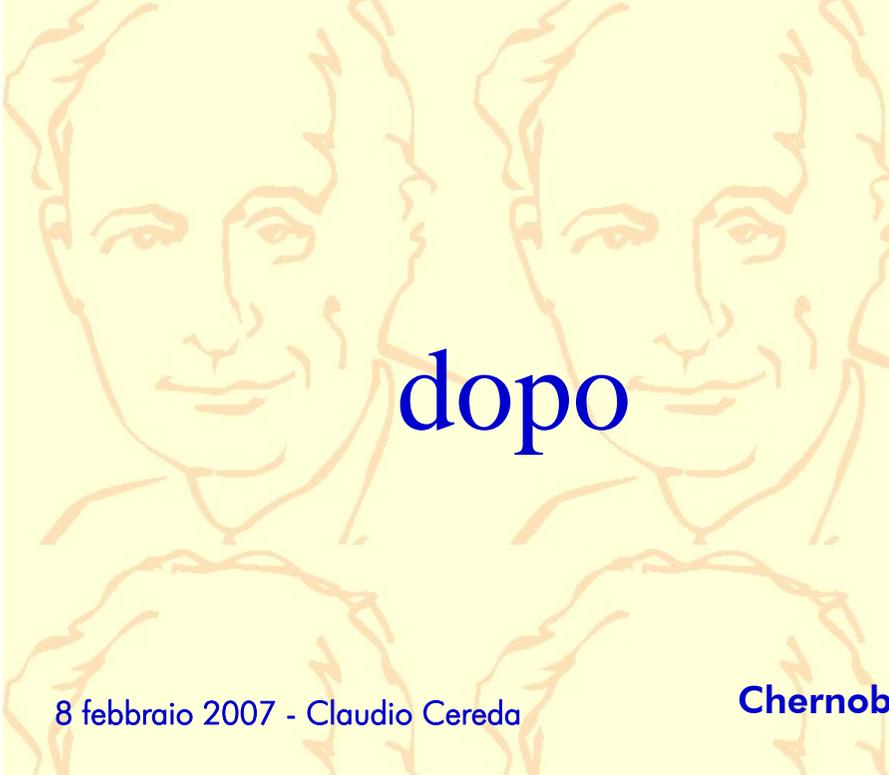
dopo





Pu 239 Nagasaki

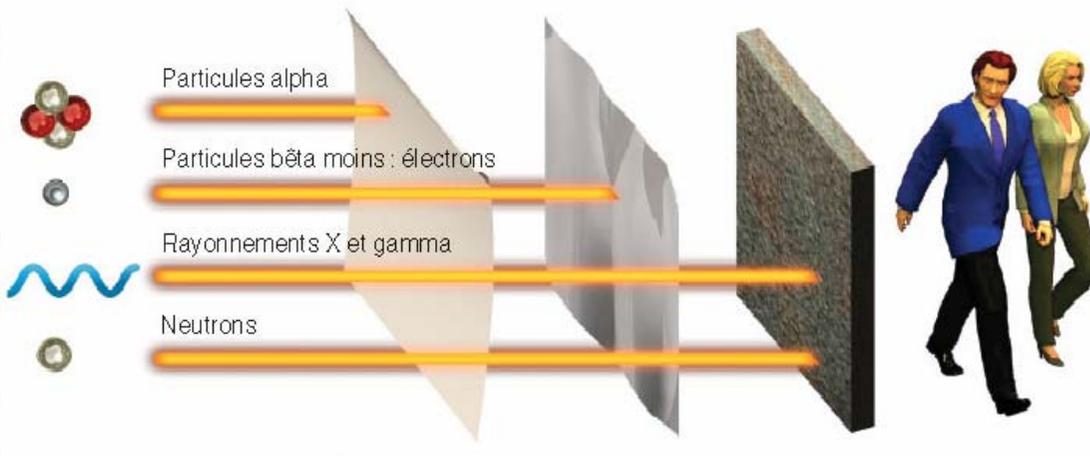
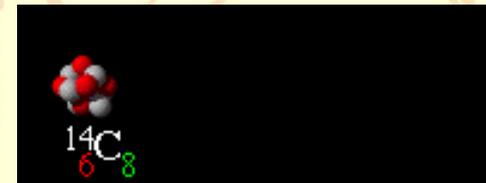
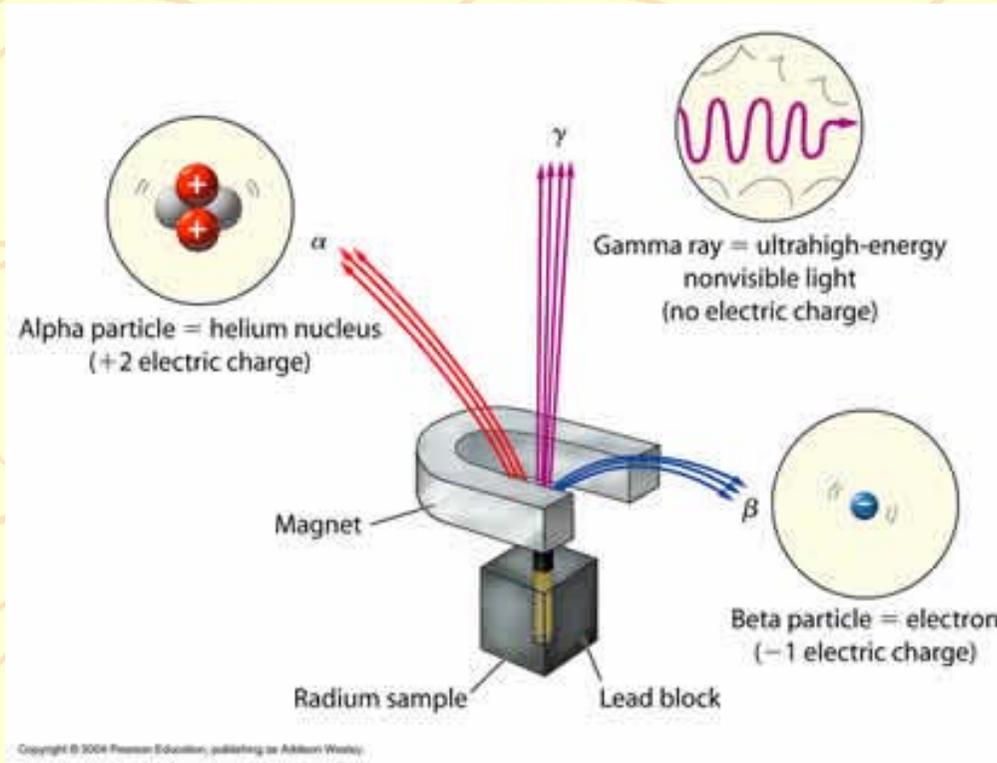
prima



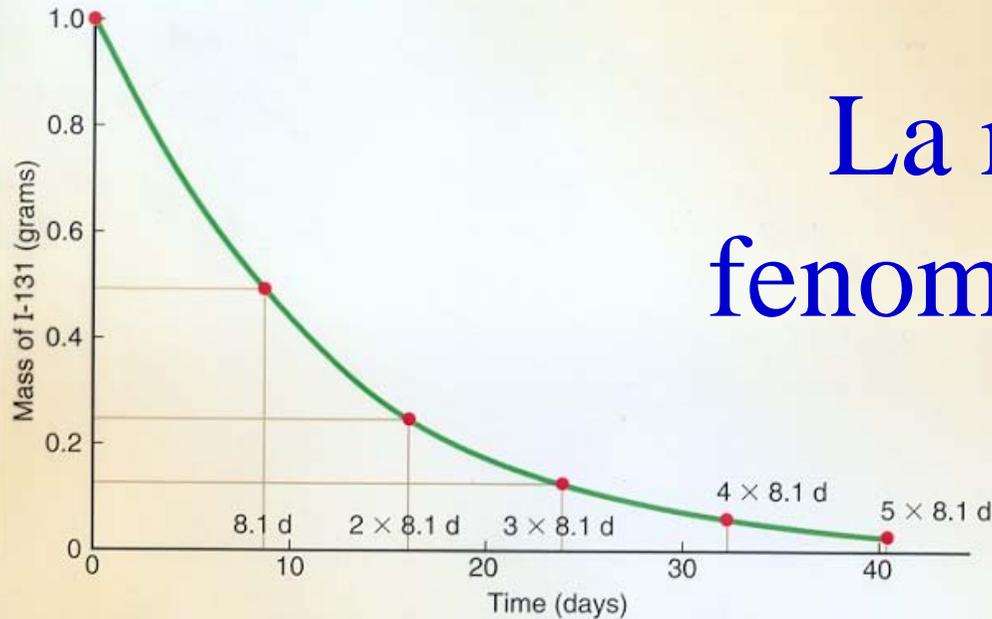
dopo



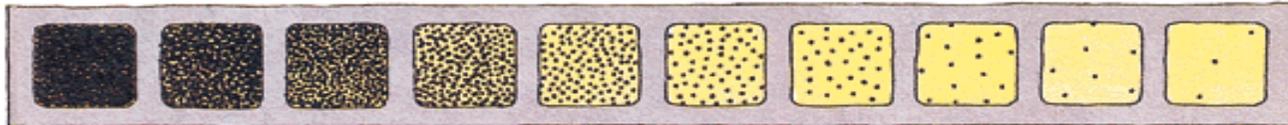
La radioattività cos'è?



La radioattività fenomeno stocastico



Decay rate of radioactivity: After ten half lives, the level of radiation is reduced to one thousandth



Time: One half life two three four five six seven eight nine

Nuclide	Half-Life ^a	Nuclide	Half-Life ^a	Nuclide	Half-Life ^a
${}^3_1\text{H}$	12.26 y	${}^{40}_{19}\text{K}$	$1.25 \times 10^9 \text{ y}$	${}^{214}_{84}\text{Po}$	$1.64 \times 10^{-4} \text{ s}$
${}^{14}_6\text{C}$	5730 y	${}^{80}_{35}\text{Br}$	17.6 min	${}^{222}_{86}\text{Rn}$	3.823 d
${}^{13}_8\text{O}$	$8.7 \times 10^{-3} \text{ s}$	${}^{90}_{38}\text{Sr}$	27.7 y	${}^{226}_{88}\text{Ra}$	$1.60 \times 10^3 \text{ y}$
${}^{28}_{12}\text{Mg}$	21 h	${}^{131}_{53}\text{I}$	8.040 d	${}^{234}_{90}\text{Th}$	24.1 d
${}^{32}_{15}\text{P}$	14.3 d	${}^{137}_{55}\text{Cs}$	30.23 y	${}^{238}_{92}\text{U}$	$4.51 \times 10^9 \text{ y}$
${}^{35}_{16}\text{S}$	88 d				

Le tre famiglie naturali

Element	Uranium-238 series					Th-232 series			U-235 series			
Uranium	U-238 4.5*10 ⁹ y		U-234 245500 y							U-235 7.0*10 ⁸ y		
Protactinium		Pa-234 1.2 min									Pa-231 32800 y	
Thorium	Th-234 24.1 d		Th-230 75400 y			Th-232 1.4*10 ¹⁰ y	Th-228 1.91 y	Th-231 25.5 h			Th-227 18.7 d	
Actinium							Ac-228 6.1 h				Ac-227 21.8 y	
Radium			Ra-226 1600 y			Ra-228 5.75 y		Ra-224 3.7 d				Ra-223 11.4 d
Francium												
Radon			Rn-222 3.8 d									
Astatine												
Polonium			Po-218 3.1 min	Po-214 0.00014 s	Po-210 138 d							
Bismuth				Bi-214 19.9 min	Bi-210 5.0 d							
Lead			Pb-214 26.8 min	Pb-210 22.3 y	Pb-206 stable			Pb-208 stable				Pb-207 stable

<p>α-decay Z: -2 N: -4</p>	<p>β-decay Z: +1 N: +/-0</p>	<p>decay series of short-lived nuclides</p>	<p>symbol of the element</p> <p>Pa-231 32500 y</p> <p>mass number</p> <p>half-life</p>	<p>particle reactivity</p> <p>low (blue box)</p> <p>intermediate (yellow box)</p> <p>high (red box)</p>
------------------------------------	--------------------------------------	---	--	---

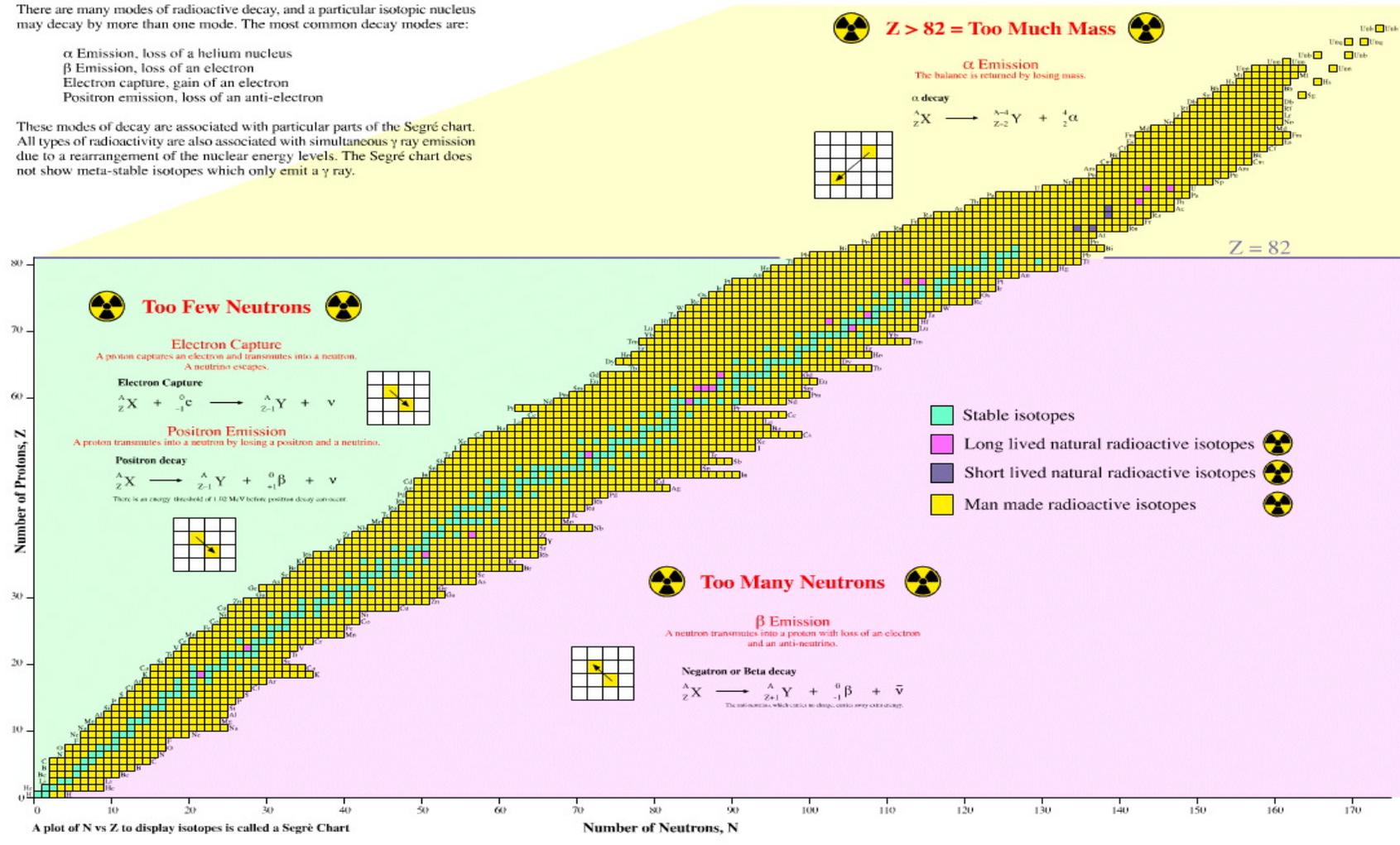
Gli isotopi artificiali oggi

Radioactivity

There are many modes of radioactive decay, and a particular isotopic nucleus may decay by more than one mode. The most common decay modes are:

- α Emission, loss of a helium nucleus
- β Emission, loss of an electron
- Electron capture, gain of an electron
- Positron emission, loss of an anti-electron

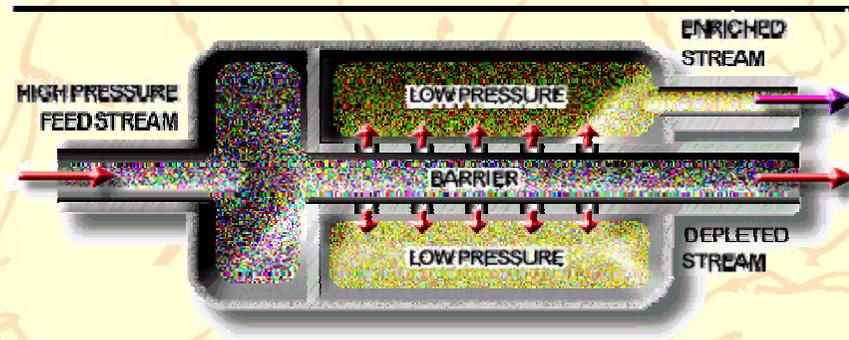
These modes of decay are associated with particular parts of the Segrè chart. All types of radioactivity are also associated with simultaneous γ ray emission due to a rearrangement of the nuclear energy levels. The Segrè chart does not show meta-stable isotopes which only emit a γ ray.



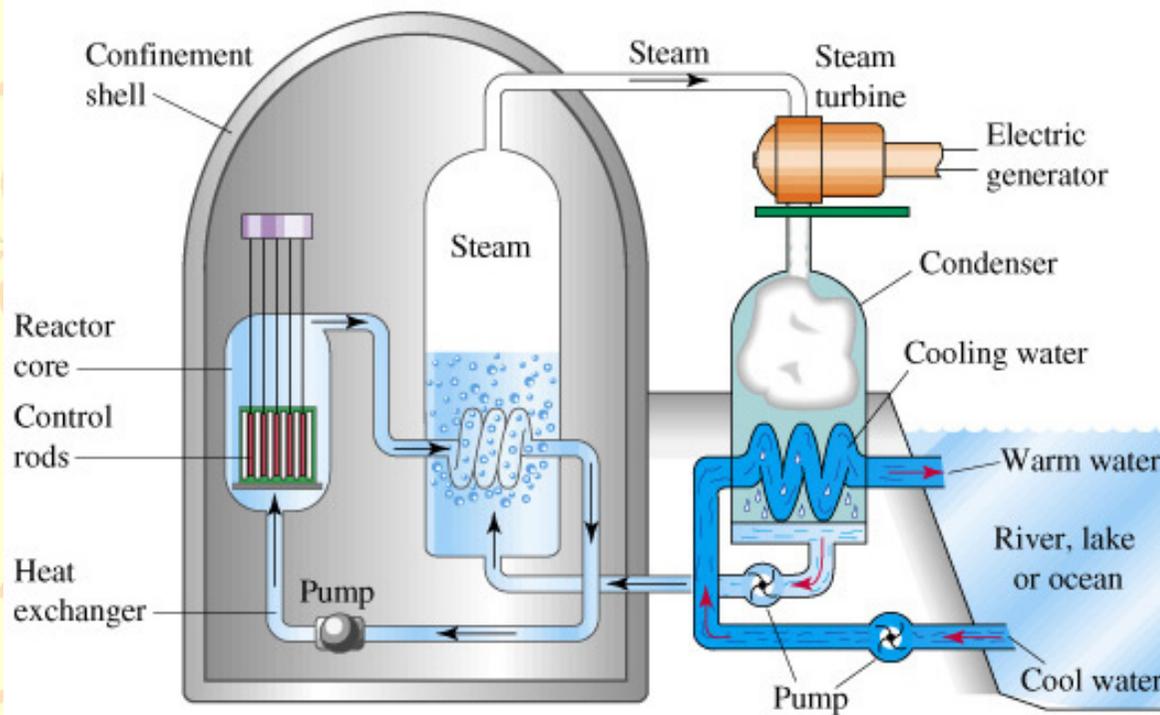
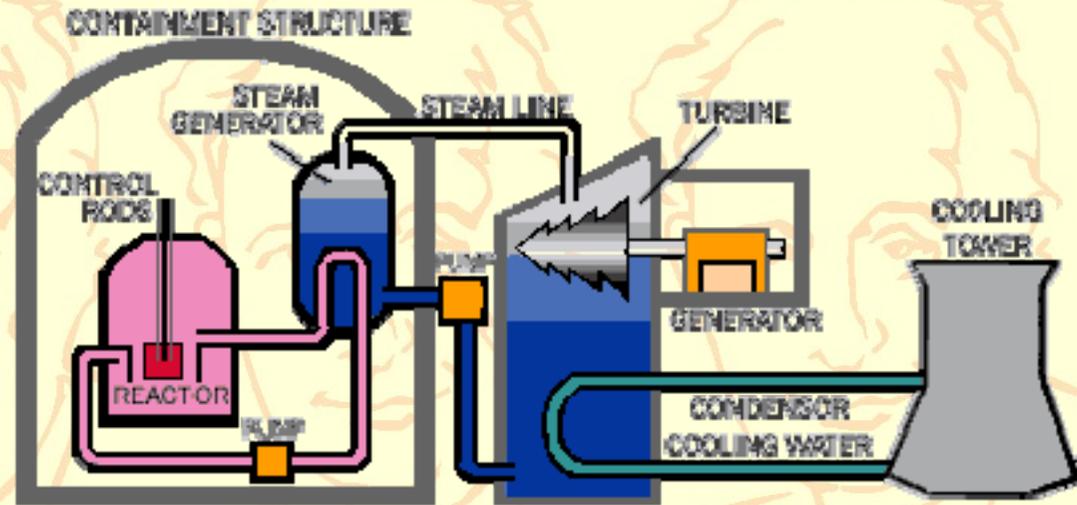
Il primo reattore: la pila di Fermi



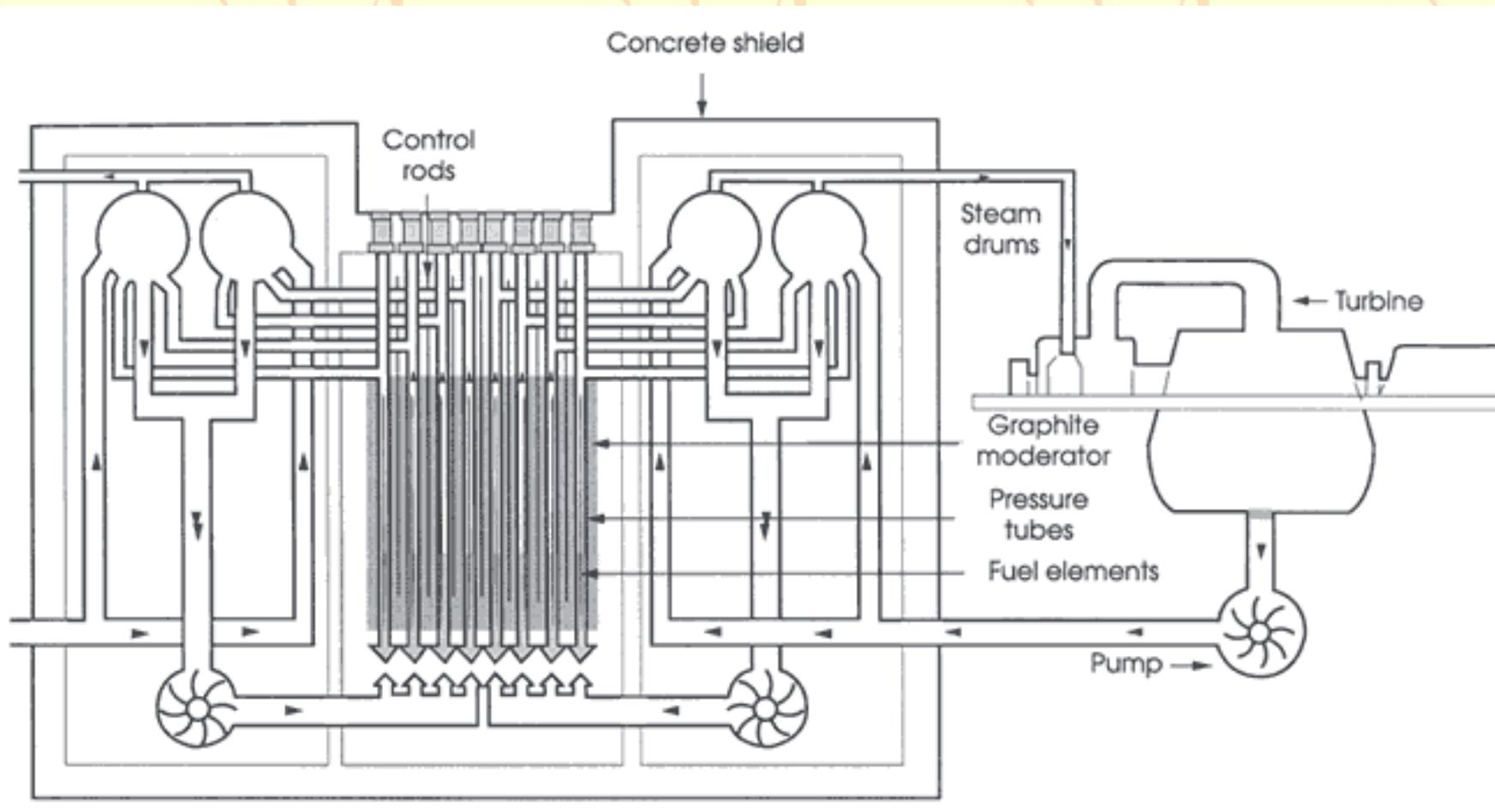
GASEOUS DIFFUSION STAGE



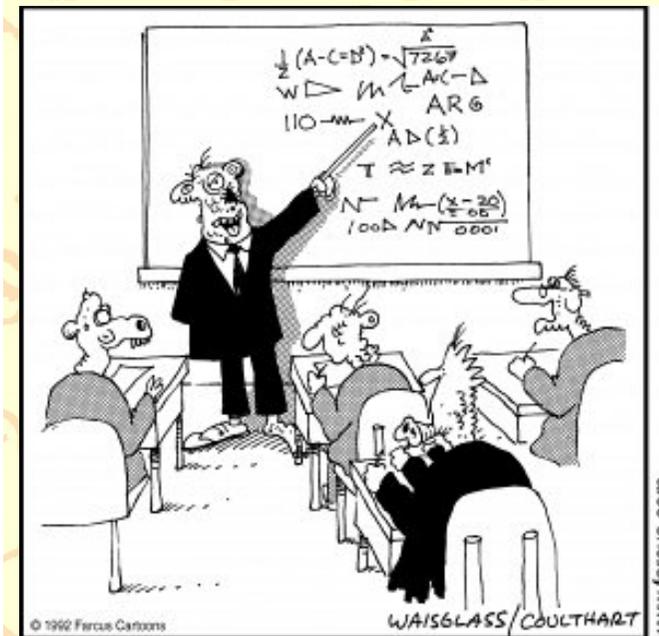
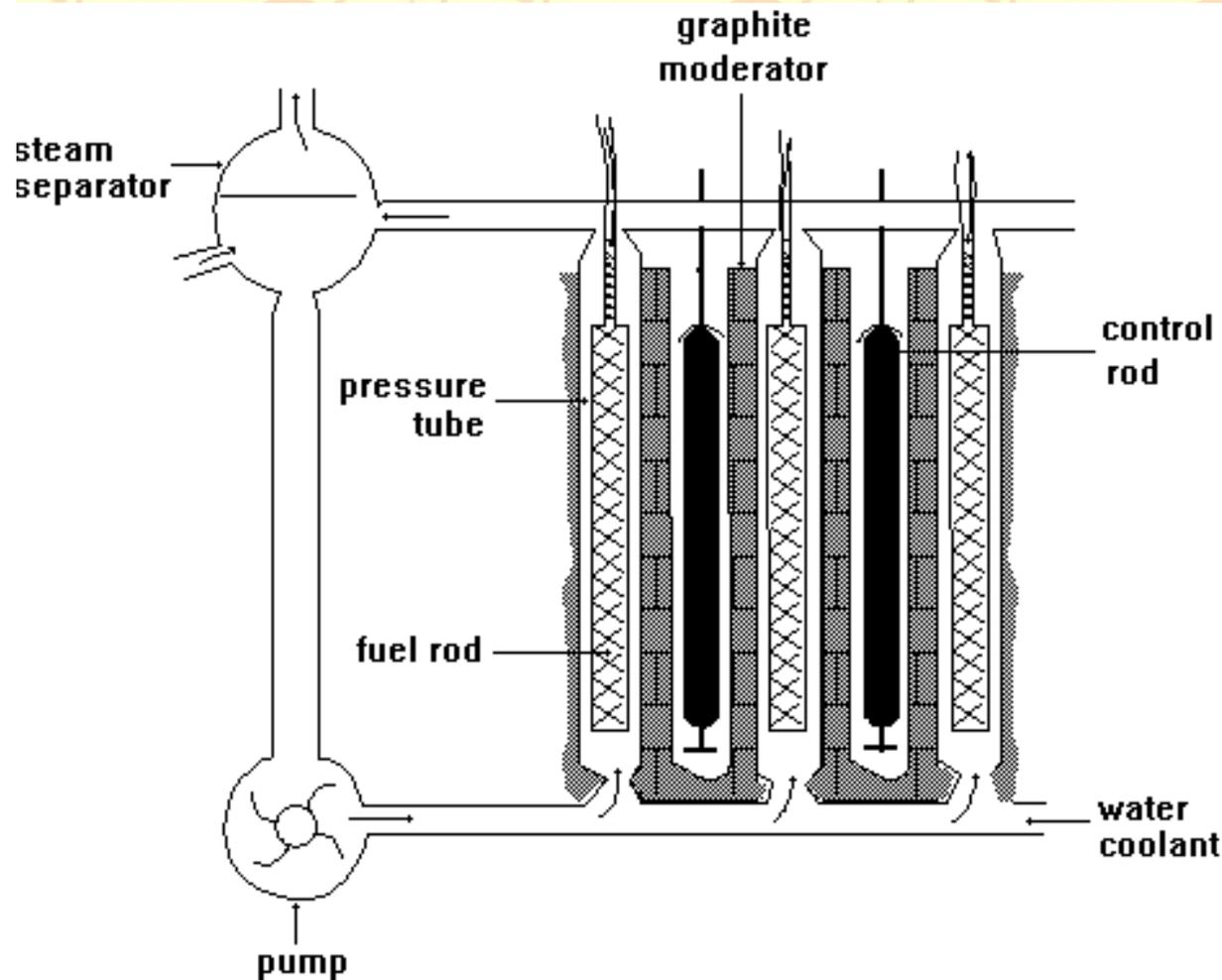
Come è fatto un reattore?



Come è fatto un reattore a grafite ?

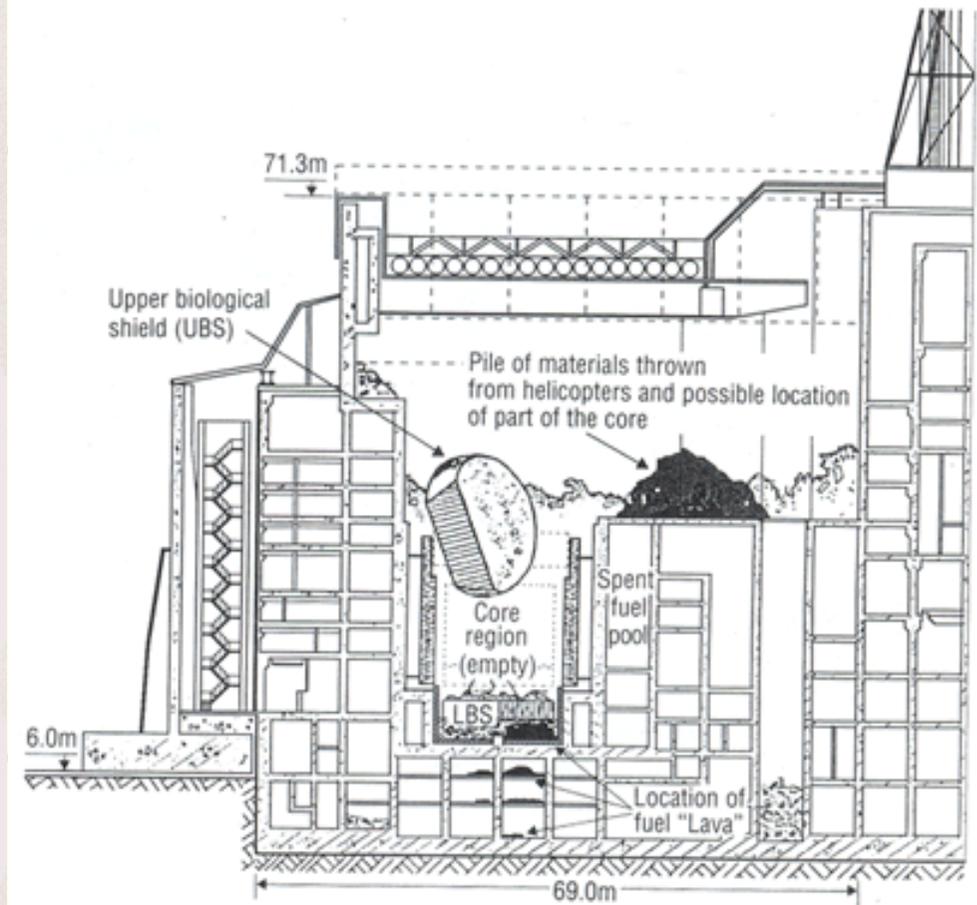
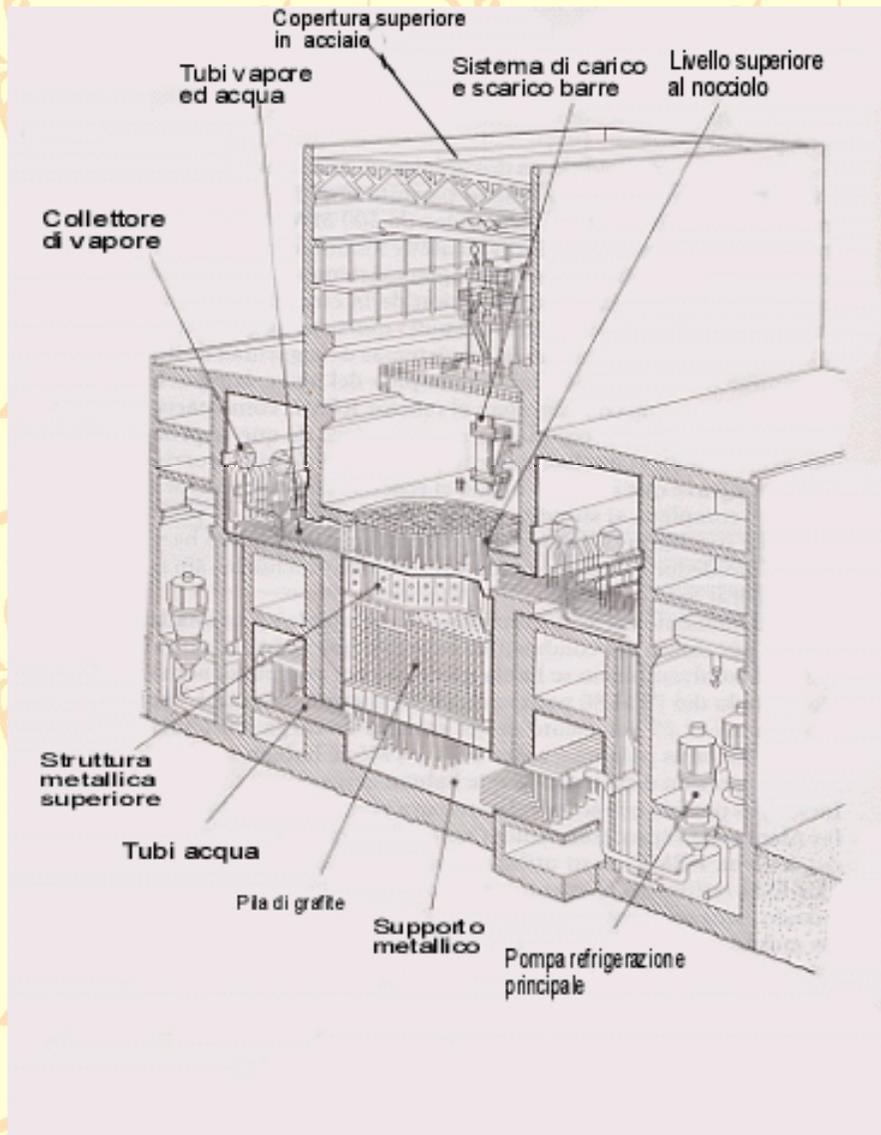


Il dettaglio del reattore

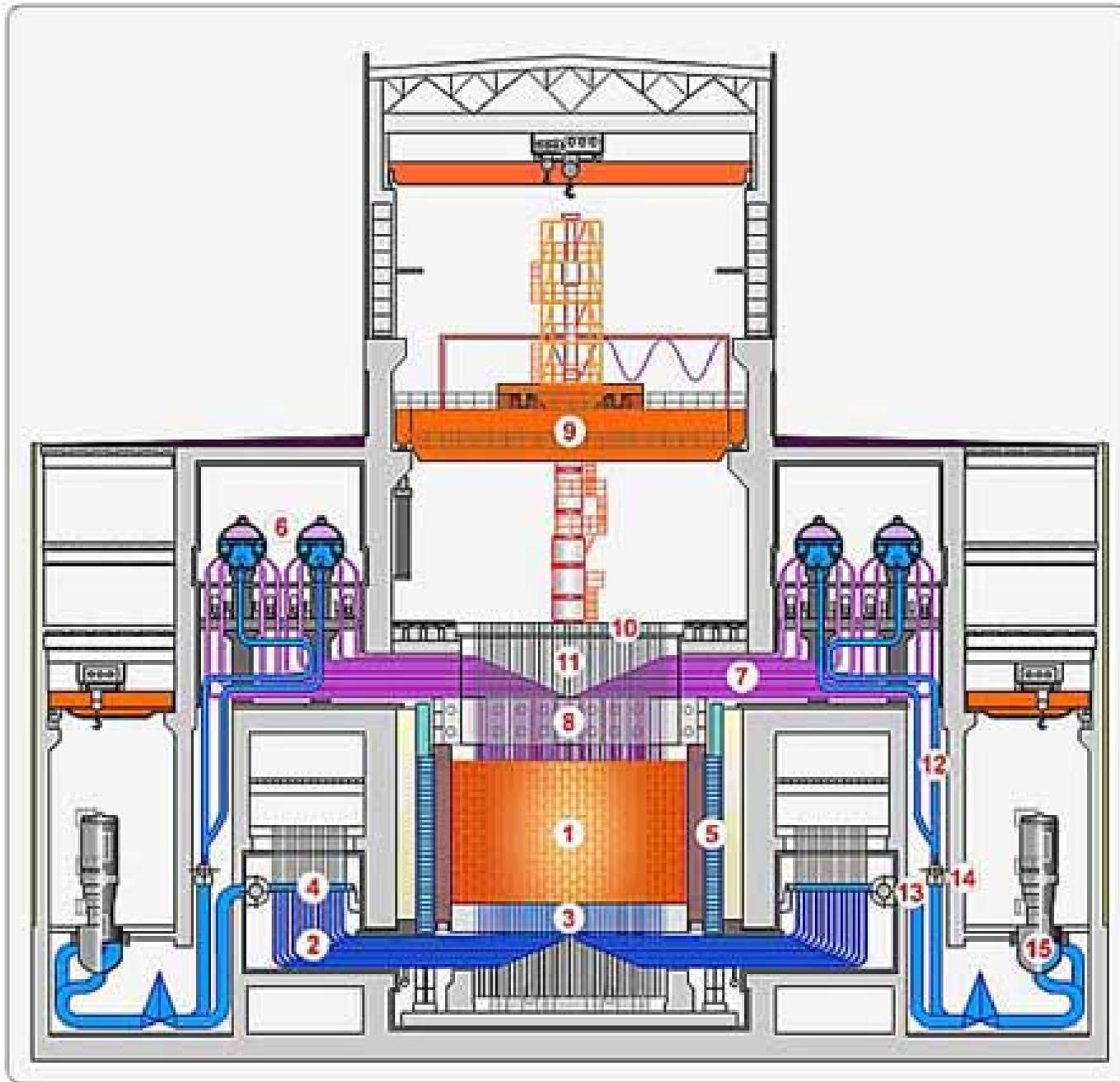


“... and without nuclear physics, we wouldn't be here today.”

Visione di insieme: prima e dopo



Schema in scala contorno



La prova di sicurezza scellerata

- 100 volte potenza nominale = 320'000 MWt
- 2 esplosioni una da vapore e l'altra da idrogeno
- Espulsione di $12 \cdot 10^{18}$ Becquerel \approx 20 ton di Radio
- Nube sull'Europa
- Fine del nucleare in numerosi paesi tra cui il nostro e paura collettiva
- Molti meno morti di quanto non si dica ma forte inquinamento
- Difficoltà a discutere razionalmente di energia

Il botto minuto per minuto 1/2

- Ore 22 del 25/4 chiusura ECSS alla vigilia di un ponte lungo 1-2/5
- Ore 23 inizia il test e per difetto di regolazione la potenza va a 30 MWt contro i 1000 MWt previsti (ore 0.30 del 26)
- Invece di sospendere si disattivano gli automatismi per operare in manuale
- Ore 1.00 la potenza risale a 200 MWt ma non va oltre (avvelenamento da Xenon che alle basse potenze si fa molto sentire); si alzano altre barre
- Inizia il test e tra la 1.03 e la 1.07 si mette in azione la pompa principale (collegata alla rete). Si ha un brusco calo di pressione (ma gli automatismi di spegnimento sono stati esclusi). Il liquido di raffreddamento è prossimo allo stato di vapore per la diminuzione di velocità (maggiore permanenza in vicinanza delle barre)
- Ore 1.07-1.22 si procede in manuale con regolazioni ogni 5 s, si estraggono altre barre, per mantenere la pressione si diminuisce la portata; e ne restano 6-8 in tutto contro 240; ci sono le condizioni critiche per il test (secondo manuale bisognava spegnere immediatamente). La potenza è al 12%
- Ore 1.23.4 si scollega la turbina: le pompe dovranno andare per inerzia
- L'acqua inizia a ristagnare nei tubi e si formano bolle (cessano raffreddamento e azione moderatrice secondaria; l'acqua assorbe neutroni, il vapore no); la temperatura sale
- Ore 1.23.40 allarme; sganciare le barre: inizia la discesa, ma nei primi 4 s invece che boro scende grafite che sposta acqua, la reazione aumenta e fondono i tubi; in 3 s si arriva a 530 MW e nei 4 s successivi va a 100 volte la potenza nominale 300'000 MWt. Le barre non possono più scendere

Il botto minuto per minuto 2/2

- Ore 1.24.00: prima esplosione per contatto tra acqua e combustibile ad alta temperatura (esplosione termodinamica). Viene distrutto il nocciolo e salta il coperchio da 2000 ton di acciaio
- Il coperchio ricade di traverso e completa la distruzione del core e dei servomeccanismi
- 1.24.15: il vapore surriscaldato a contatto con lo Zr si scinde, si forma H e si ha una nuova esplosione che coinvolge tutti i locali adiacenti saturi di H e O; la centrale esplose
- La grafite si incendia; un pennacchio sale per 1 km: dentro c'è di tutto
- La reazione prosegue e il nocciolo fonde scendendo di 4 metri; ci sono oltre 100 incendi e intorno ci sono altri 3 reattori in funzione con 3000 kg di Pu e 700'000 kg di U
- Centinaia di pompieri lavorano per giorni senza protezione per tamponare il disastro; alcuni fanno di andare incontro alla morte; sono gli eroi di Chernobyl



Cause: errori di concezione

- Sistema instabile sotto 25% (era noto; Xenon)
- 20 s per l'inserimento delle barre contro 2 s
- Barre di controllo con punta di Carbonio
- Uso della grafite (infiammabile) come moderatore
- Non c'è struttura di contenimento (plutonio per i militari)

un autobus senza carrozzeria, dove il volante non risponde più e nel quale il sistema di frenatura lancia il veicolo a piena velocità per qualche secondo, prima di rallentarlo efficacemente, una ventina di secondi dopo... ossia ben dopo che il veicolo sia finito nel fosso o contro un muro

E magari hanno detto all'autista che è tutto in ordine, o che si deve sacrificare in nome di ...(ditelo voi perché ci sono tante risposte)

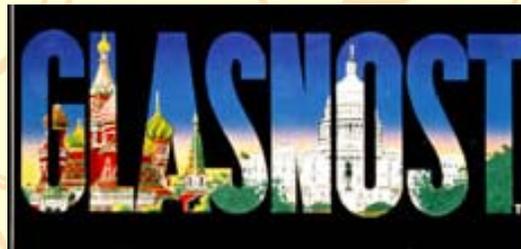
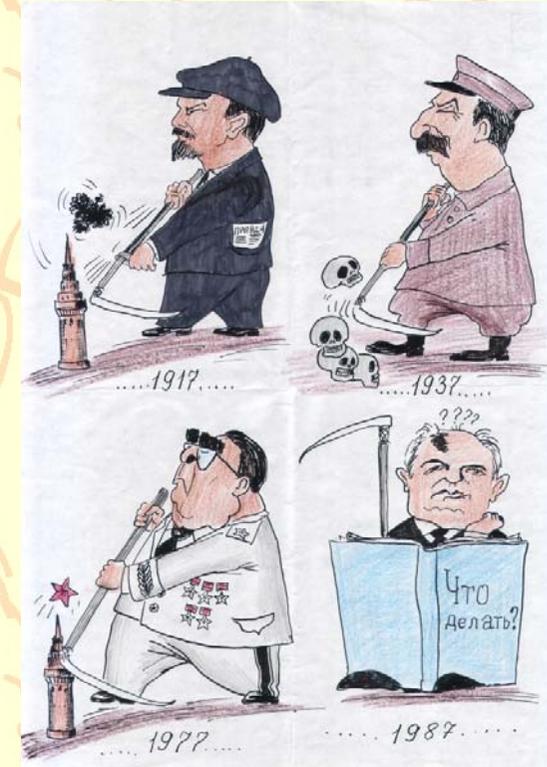
Sei errori e colpe del personale

- 2 violazioni di consegne permanenti (potenza < 25%, < 30 barre nel core; si arrivo a 7 su 240)
- 1 mancato rispetto procedure
- 3 messe fuori servizio di dispositivi di sicurezza

Ne bastava una sola in meno e non sarebbe successo, **ma è successo**; supponiamo di dare 0.01 alla probabilità di un evento; $(10^{-2})^6 = 10^{-12}$; non doveva accadere ma è accaduto; come mai?

Sistema sovietico autoritario e sfatto

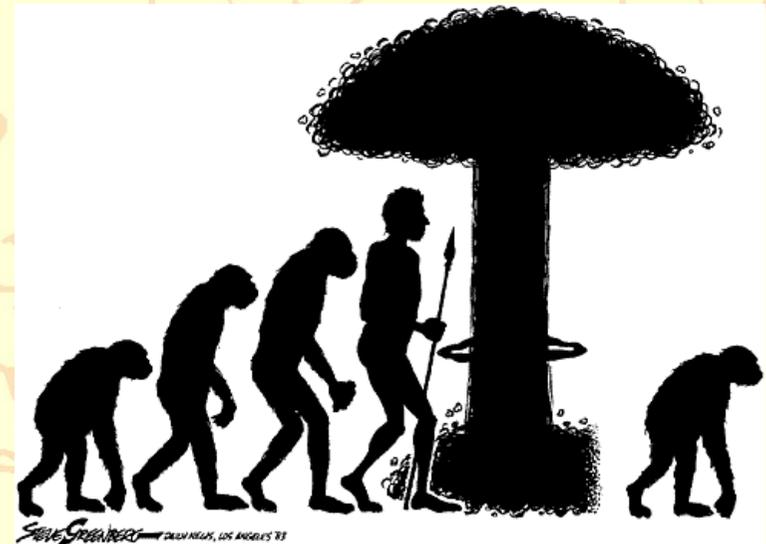
- Produrre plutonio, produrne tanto, produrlo in fretta: in nome del socialismo
- La cultura del segreto e la segmentazione delle conoscenze (tipiche delle strutture autoritarie e militari)
- La scienza e la tecnologia asservite al potere
- Mancanza cultura della sicurezza: progettazione, esercizio, piani di emergenza
- Evacuazione in ritardo, segretezza, mancata informazione della popolazione, mancata informazione dei liquidatori, mancata distribuzione dello iodio alla popolazione



Danni alla salute dati ONU 2000

- 134 casi di irraggiamento acuto: morti 2 + 28 + 1 + altri 19 nei 10 anni successivi (tra i liquidatori)
- 313'000 (o 800'000) liquidatori: problemi alla qualità della vita (ma mancano dati). Attesi 10'000 decessi per tumore maligno (chiarire la importanza di Δ = confrontare)
- Aumento cancro alla tiroide (1800 in più) con 10 morti (unico dato vero) ed erano evitabili

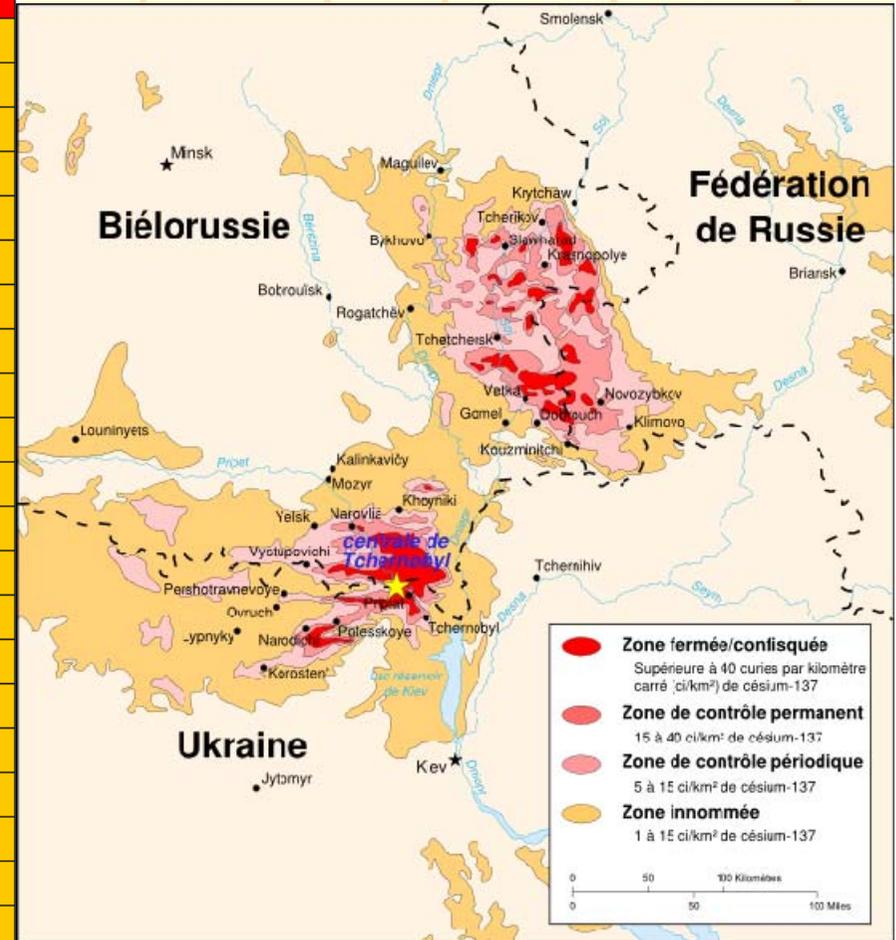
Ma c'è anche chi spara numeri assurdi tipo 200'000 morti e se ne esce con vignette come queste



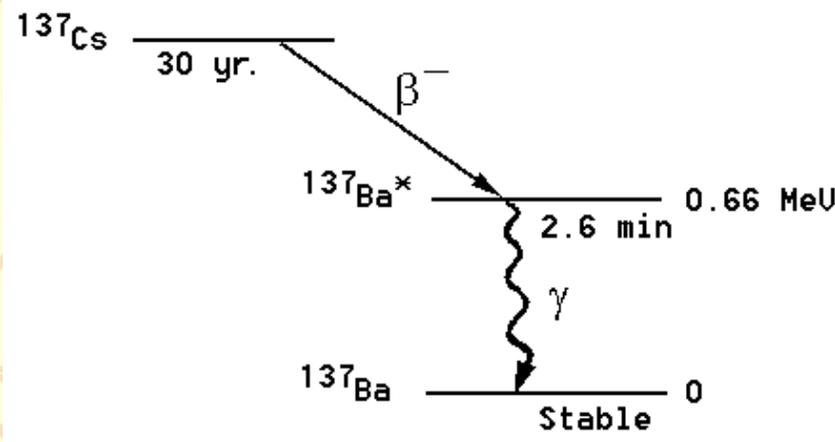
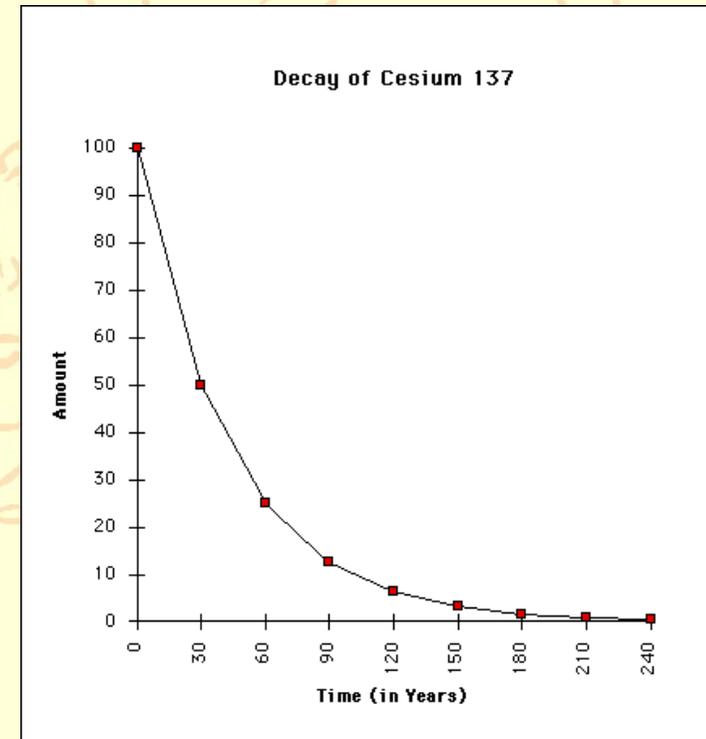
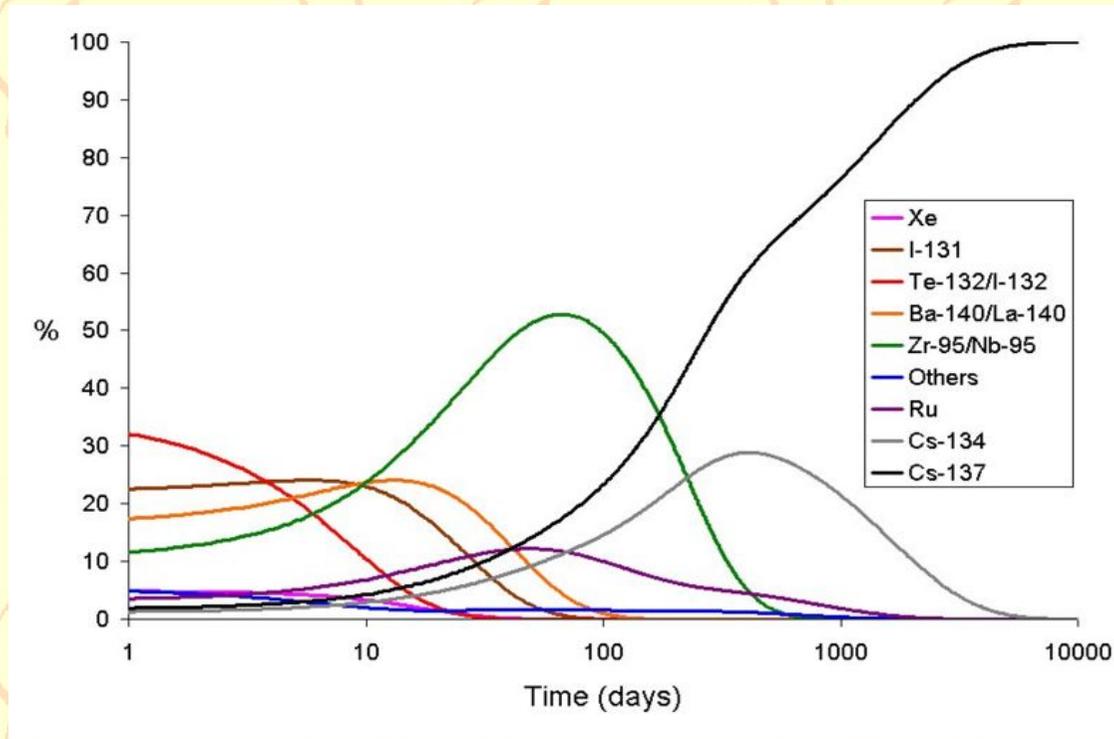
Rilascio in atmosfera

Elementi radioattivi presenti nel reattore 4 di Chernobyl al momento dell'esplosione e loro dispersione nell'ambiente

Radionuclide	Sigla	Attività presente in Bq · 10 ¹⁵	% rilasciata	T _{1/2}
Barium-140	140Ba	2.900,0	15%	12,7 giorni
Cerio-141	141Ce	4.400,0	6%	32,5 giorni
Cerio-144	144Ce	3.920,0	8%	284 giorni
Cesio-134	134Cs	153,0	25%	2,06 anni
Cesio-137	137Cs	260,0	30%	30 anni
Curio-242	242 Cm	31,0	8%	162,8 giorni
Iodio-131	131I	1.300,0	50%	8,05 giorni
Krypton-85	85Kr	33,3	100%	10,72 ore
Molibdeno-99	99Mo	4.800,0	5%	2,75 giorni
Neptunio-239	239Np	58.070,0	8%	2,35 giorni
Plutonio-238	238Pu	0,9	8%	87,74 giorni
Plutonio-239	239Pu	0,9	8%	24.390 anni
Plutonio-240	240Pu	1,5	8%	6.537 anni
Plutonio-241	241Pu	183,5	8%	14,4 anni
Rutenio-103	103Ru	1.960,0	8%	39,3 giorni
Rutenio-106	106Ru	860,0	8%	368 giorni
Stronzio-89	89Sr	2.000,0	10%	50,5 giorni
Stronzio-90	90Sr	228,0	10%	29,12 anni
Tellurio-132	132Te	540,0	35%	3,26 giorni
Xenon-133	133Xe	1.700,0	100%	5,25 giorni
Zirconio-95	95Zr	4.400,0	8%	64 giorni



Rilascio in atmosfera: cosa rimane?



Interactive periodic table interface for Cesium (Cs). It shows the element's position in the periodic table, its atomic number (55), name (Cesium), symbol (Cs), and atomic mass (132.90). It also includes a key for electronic configuration and buttons for history, physical properties, and chemical properties.

Grandezze dosimetriche

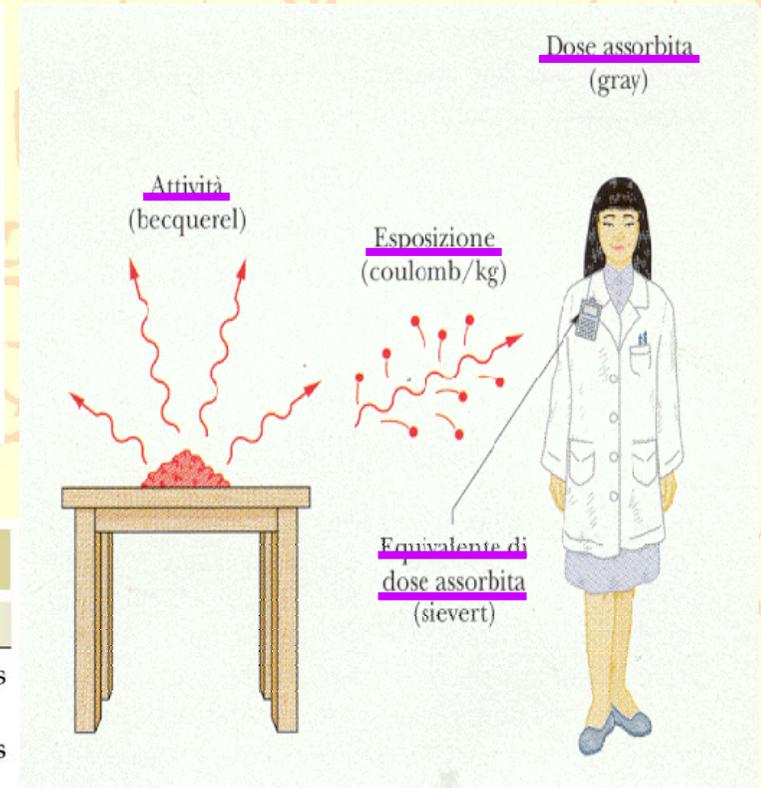
TABLE 22.4 Some Properties of Ionizing Radiation

Type of Radiation	Energy Range	Penetrating Distance in Water*
α	3–9 MeV	0.02–0.04 mm
β	0–3 MeV	0–4 mm
X	100 eV–10 keV	0.01–1 cm
γ	10 keV–10 MeV	1–20 cm

* Distances at which one-half of the radiation has been stopped

TABLE 22.3 Units for Measuring Radiation

Unit	Quantity Measured	Description
Becquerel (Bq)	Decay events	Amount of sample that undergoes 1 disintegration/s
Curie (Ci)	Decay events	Amount of sample that undergoes 3.7×10^{10} disintegrations/s
Gray (Gy)	Energy absorbed per kilogram of tissue	1 Gy = 1 J/kg tissue
Rad	Energy absorbed per kilogram of tissue	1 rad = 0.01 Gy
Sievert (Sv)	Tissue damage	1 Sv = 1 J/kg
Rem	Tissue damage	1 rem = 0.01 Sv



Un po' di numeri in mSievert

2 mSv/ anno	Valore tipico
2.4 mSv/ anno	Dose media lavoratori industria nucleare negli Usa
sino a 5 mSv/ anno	Tipico incremento di dose per personale di bordo aerei
10 mSv/ anno	Dose massima per minatori uranio
20 mSv/ anno	Valore limite per lavoratori professionalmente esposti
50 mSv/ anno	Vecchio limite per lavoratori pari anche alla radioattività naturale in alcune zone d'Europa, Iran e India
100 mSv/anno	Livello di soglia per l'evidenza di cancro. Per valori superiori la probabilità e severità crescono con la dose
350 mSv/vita	Criterio per determinare spostamento di colazione a rischio
1'000 mSv/cumulativi	Incremento assoluto del 5% nel determinare la probabilità di sviluppare un cancro a distanza di anni
1'000 mSv/singola	Causa un temporaneo malessere da radiazione (nausea), diminuzione dei globuli bianchi ma non la morte. Al di sopra la severità dei sintomi cresce con la dose.
5'000 mSv/singola	Morte entro un mese nel 50% dei casi
10'000 mSv/singola	Morte entro poche settimane.

Effetti duri delle radiazioni ionizzanti

Dose (Sv):

< 0.25

0.25 - 1

1 - 2

2 - 3

4 - 7

> 8



Effetto:

nessuno

lievi alterazioni sangue, raddoppio rischio leucemia e anomalie genetiche

notevoli alterazioni sangue, nausea, emorragie intestinali, forte rischio leucemia e anomalie genetiche

gravi emorragie, shock, stato di prostrazione

morte nel 30-60% dei casi

morte nel 100% dei casi

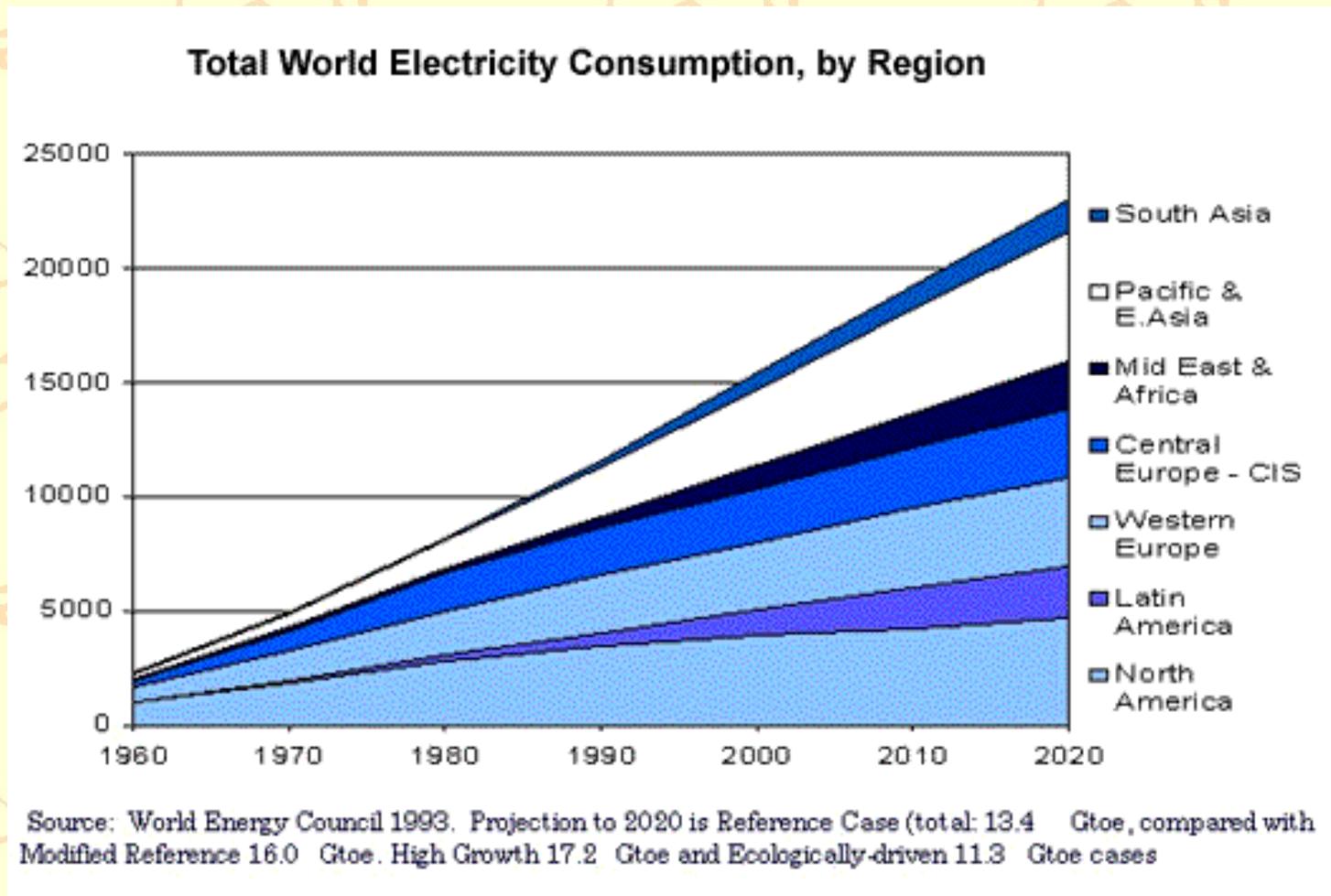
Population category	Number	Average dose (mSv)
Liquidators (1986-1989)	600 000*	~100
Evacuees from highly-contaminated zone (1986)	116 000	33
Residents of "strict-control" zones (1986-)	270 000	>50
Residents of other 'contaminated' areas (1986-)	5 000 000	10-20

* including 240 000 who worked in 1986-87.

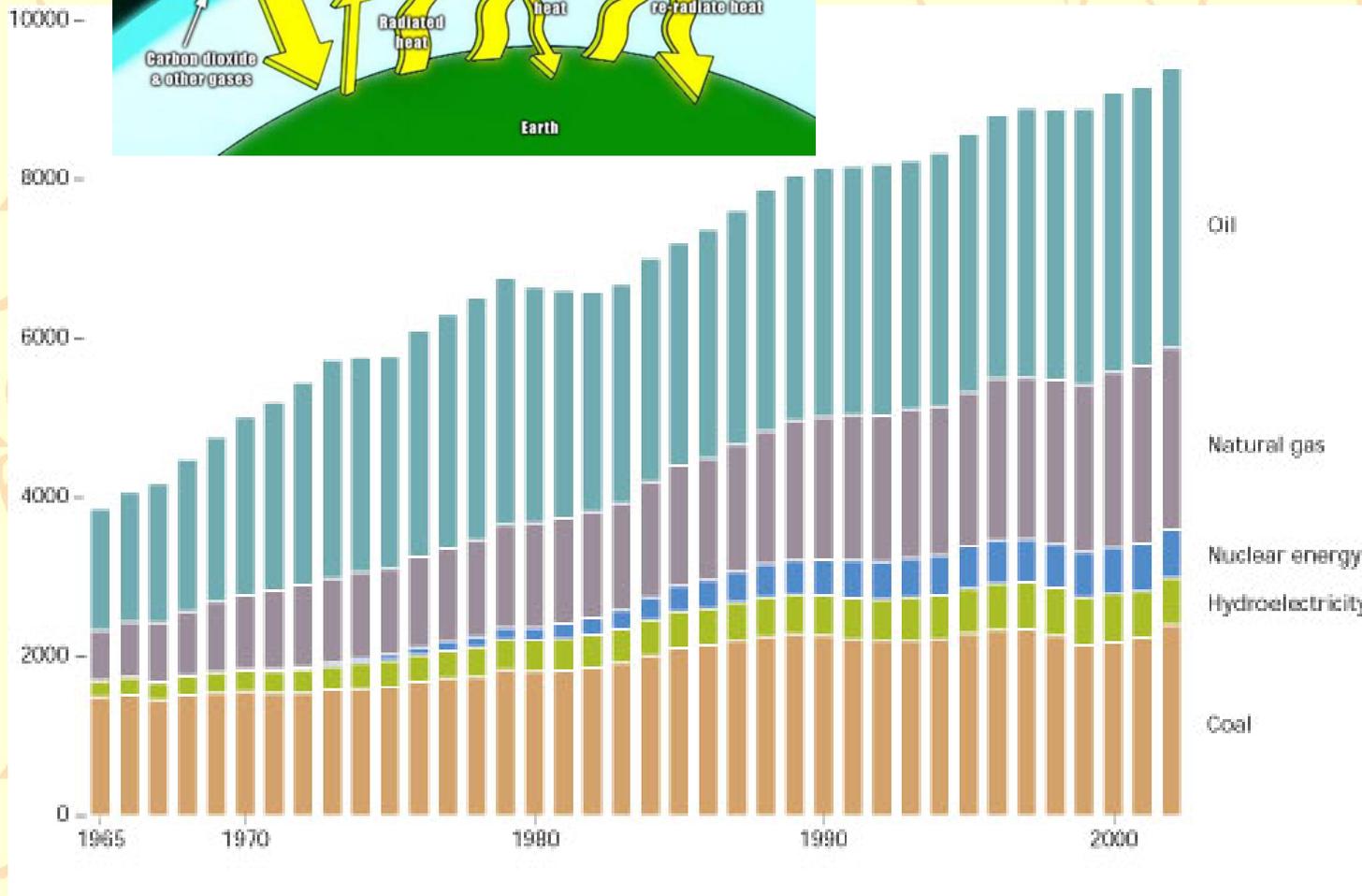
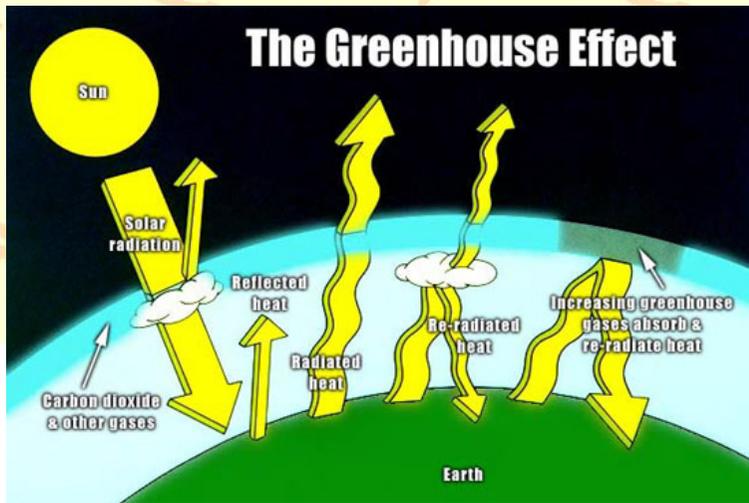
Effetti radiazioni ionizzanti

- ❑ **Danni somatici deterministici**, costituiti da alterazioni gravi degli organi e tessuti dell'individuo irradiato (es. radiolesioni cutanee, danni al cristallino, midollo osseo, testicoli, ovaie ecc.) . Sono sostanzialmente **caratterizzati da un valore di dose soglia** al di sotto della quale non si manifestano e la cui **gravità aumenta con la dose**. I valori della dose soglia per i diversi tessuti sono in genere abbastanza elevati ed è poco frequente che questo tipo di danno si riscontri nelle odierne condizioni di impiego delle radiazioni.
- ❑ **Danni somatici stocastici**, costituiti principalmente da **leucemie e tumori solidi indotti** nell'individuo irradiato. **Non presentano un valore di dose soglia** (ipotesi cautelativa assunta a livello internazionale) ed hanno una **probabilità di accadimento** (non di gravità) che è **proporzionale alla dose** ricevuta. Per l'ipotesi dell'assenza di una dose soglia anche un valore minimo di dose comporta una probabilità non nulla di danno sanitario stocastico
- ❑ **Danni genetici stocastici**, costituiti da un aumento di malattie ereditarie nelle progenie dei soggetti esposti alle radiazioni rispetto alle progenie dei soggetti non esposti. Non presentano un valore di dose soglia (ipotesi cautelativa assunta a livello internazionale) ed hanno una probabilità di accadimento (non di gravità) che è proporzionale alla dose ricevuta.

Energia e clima: consumi per area



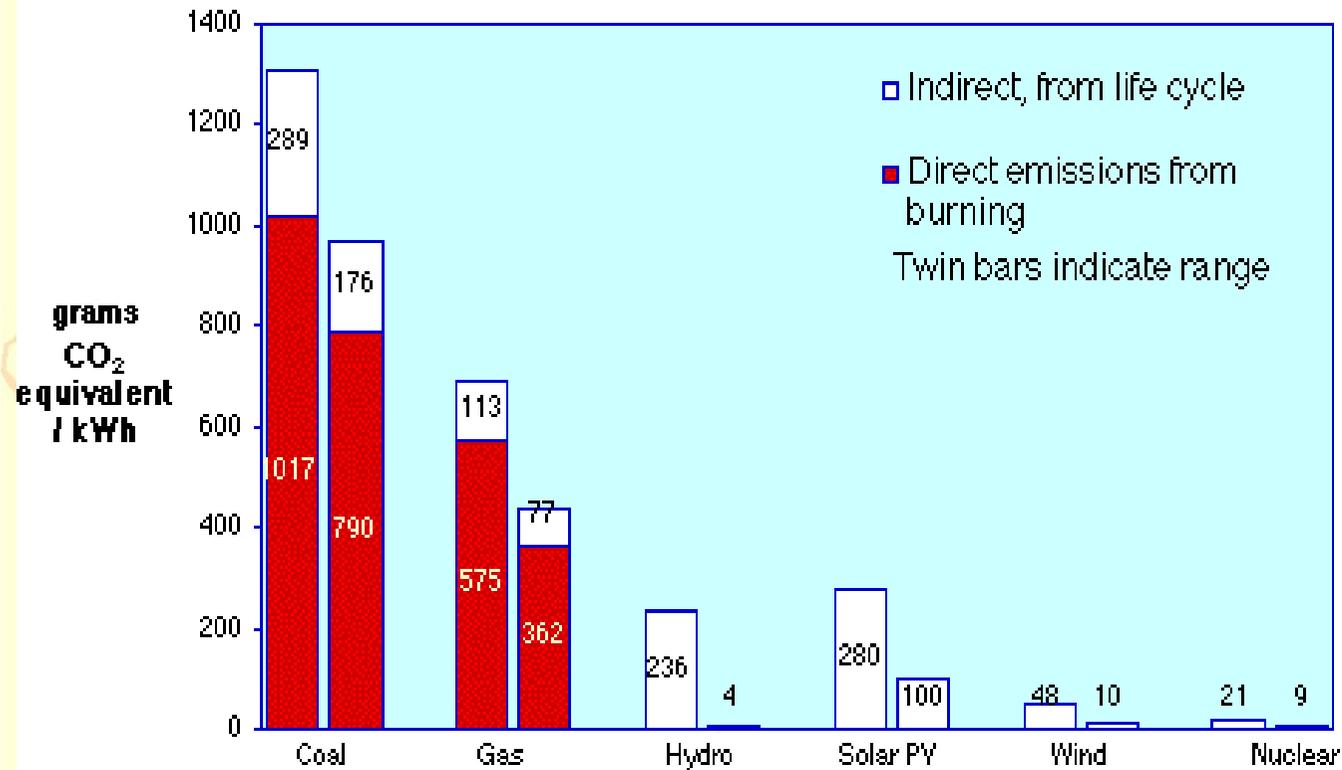
Energia elettrica e fonti



E' meglio l'effetto serra?



Greenhouse Gas Emissions from Electricity Production

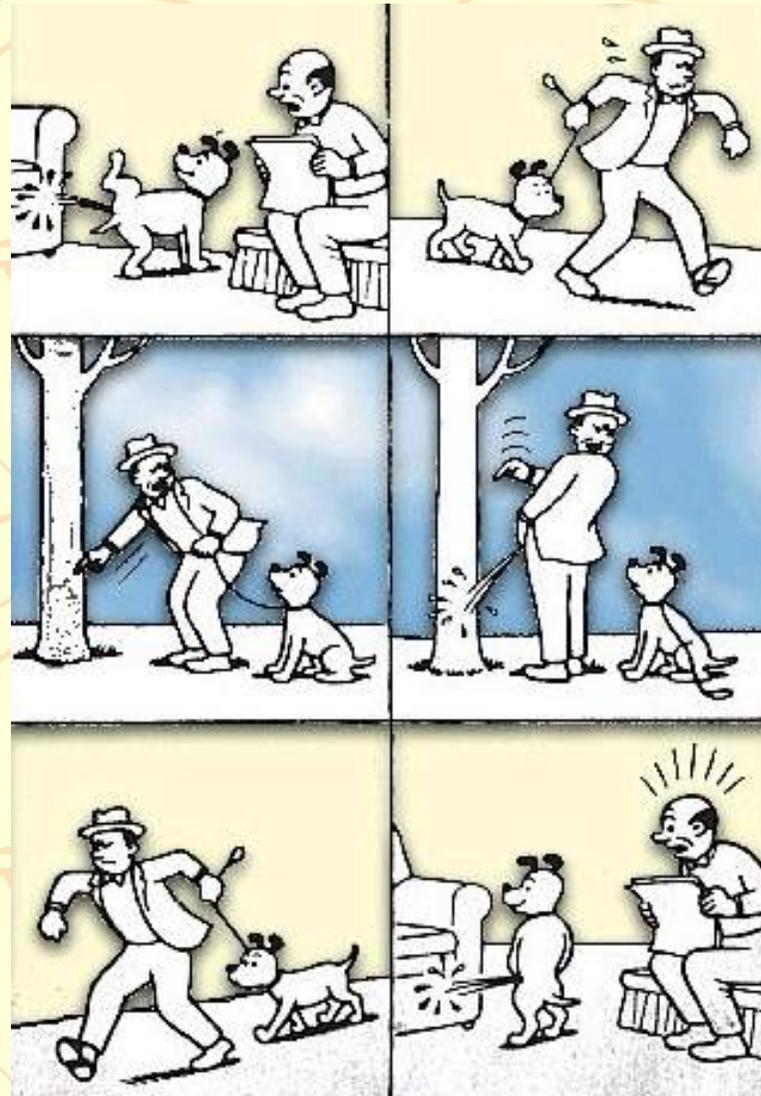


Source: IAEA 2000

Il dubbio



è il sale



della vita

Ciao a tutti

perché gli dà senso e anche sapore