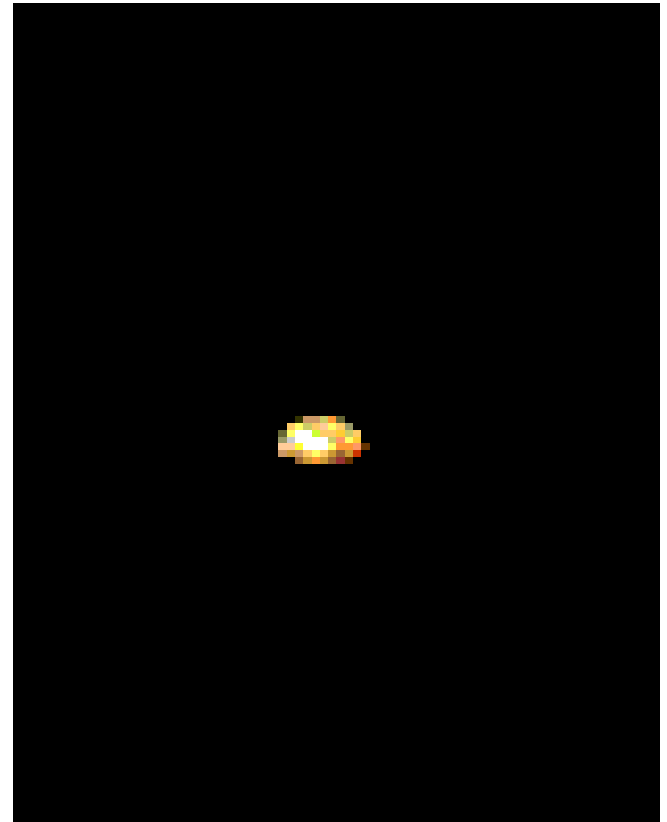


# L'ENERGIA NUCLEARE

**Roberto Ferrari**  
**Istituto Nazionale di**  
**Fisica Nucleare**  
**Pavia**

**Liceo Scientifico Statale**  
**Fiorenzuola D'Arda**  
**28 gennaio 2010**

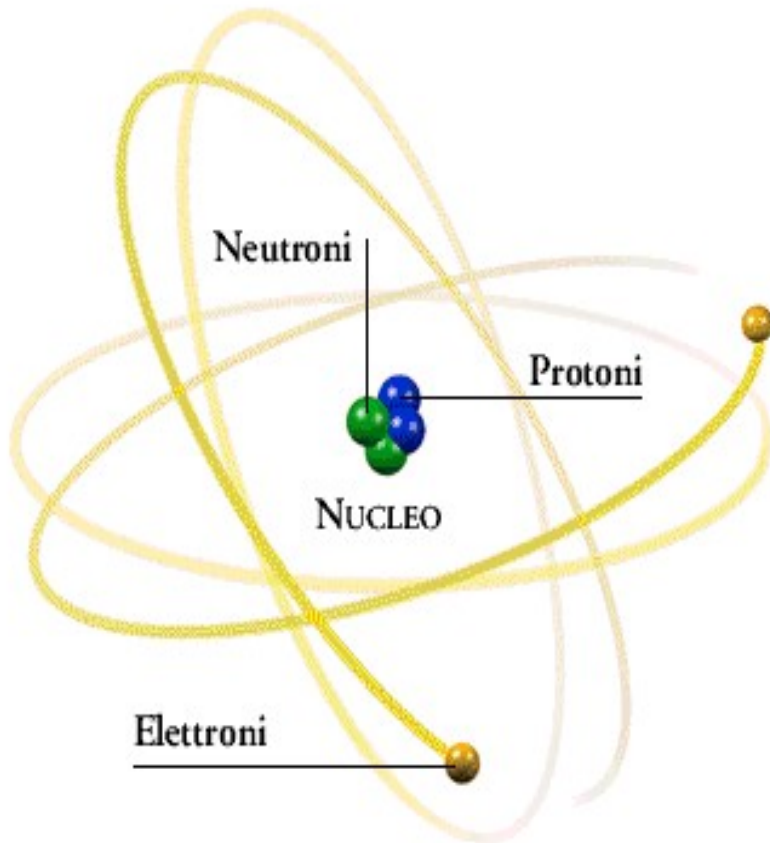


# Sommario

1. **Atomi e Nuclei**
2. **Le Radiazioni Nucleari**
3. **Le Centrali Nucleari**
4. **La Politica Energetica**

# 1. Atomi e Nuclei

# L' Atomo



Dimensioni  $d \sim 0,1 \text{ nm}$   
Nucleo con carica positiva  
 $+Z$  e massa  $A$   
 $Z$  elettroni con carica  
negativa  $(-Z)$

Nucleo:  $d \sim 1 \text{ fm}$   
 $Z$  protoni  
 $N$  neutroni ( $N+Z=A$ )  
 $= A$  nucleoni

$1 \text{ nm} = 1 \text{ nano-m} = 1 \text{ miliardesimo di m}$   
 $1 \text{ fm} = 1 \text{ femto-m} = 1 \text{ milionesimo di nm}$

# Dimensioni

Se

Diametro Nucleo = 1 mm

Diametro Atomo = campo da calcio (100 m)

oppure se:

Diametro Nucleo = Terra (12000 km)

Diametro Atomo = 8 x Distanza Sole-Terra (150 M km)

# Densità della Materia

La materia è concentrata nel nucleo:

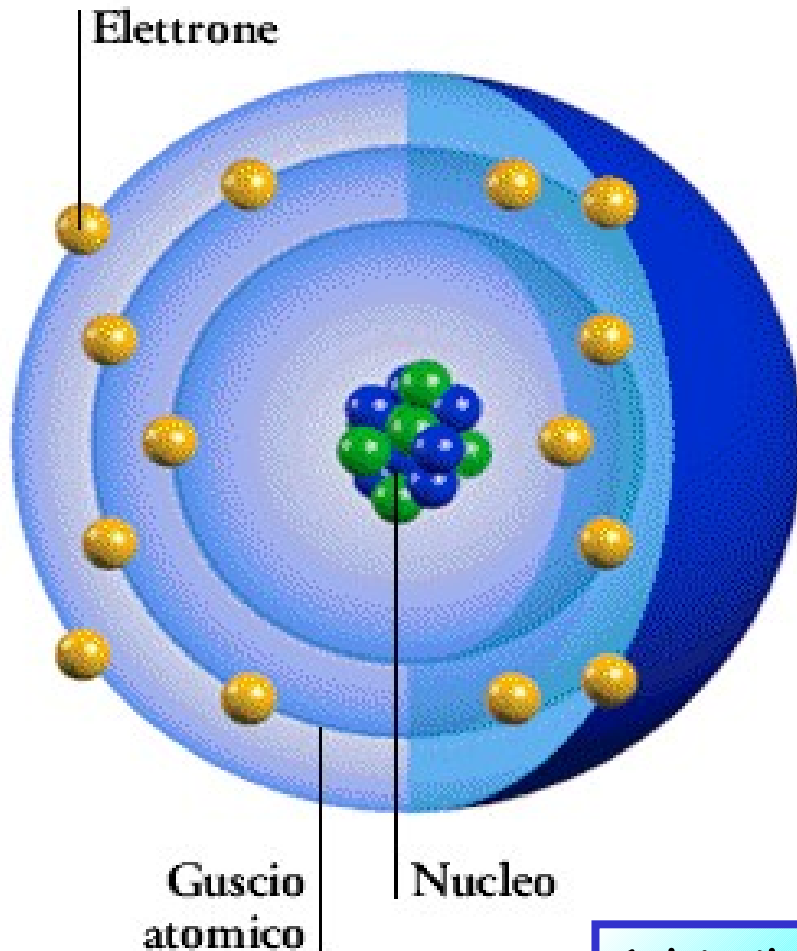
Massa (nucleoni)  $\sim$  2000-4000 x Massa (elettroni)

Densità nucleo  $\sim 10^{14}$  gr/cm<sup>3</sup> (!!!)

[ Densità terra  $\sim 5,5$  gr/cm<sup>3</sup> ]

Se la terra avesse la stessa densità di un nucleo il suo diametro sarebbe di circa 500 m invece che 12000 km

# Forze Atomiche



Elettromagnetismo:

- forze attrattive fra cariche opposte
- repulsive fra cariche con lo stesso segno

(pensate ai poli di due calamite)

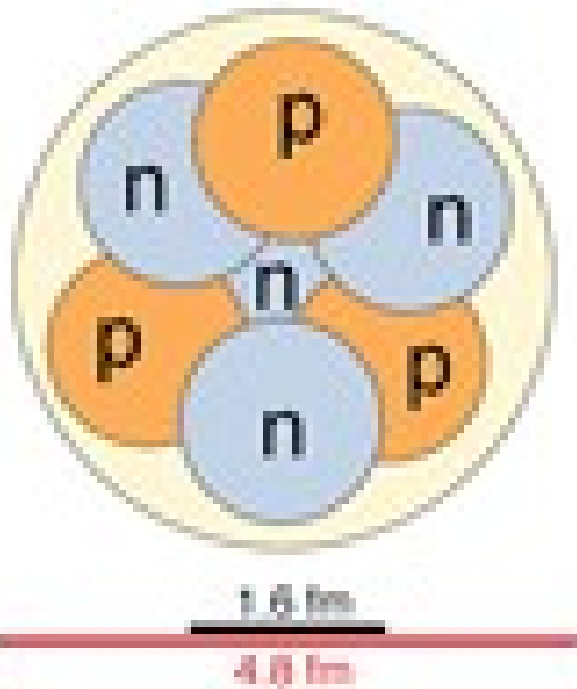
Meccanica Quantistica !

Energie di legame  $\sim 10$  eV

$1 \text{ kWh} \sim 22,5 \times 10^{24} \text{ eV}$



# Il Nucleo Atomico



Forza repulsiva fra 2 protoni (e.m.) a distanze  $\sim 1$  fm:  
=  $\sim$  peso 23 kg (=  $\sim 230$  N)  
su corpi di massa piccolissima

Cosa tiene assieme il nucleo (protoni e neutroni)? La "colla" nucleare ...

## Forza Nucleare Forte:

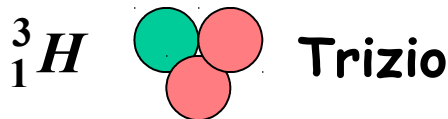
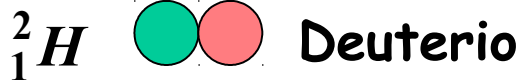
- sempre attrattiva
- 100 volte più intensa
- si manifesta solo a distanze  $< \sim 1$  fm



# Legami Nucleari

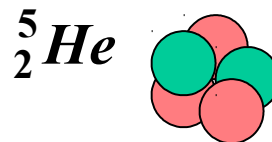
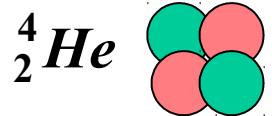
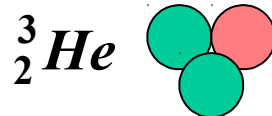
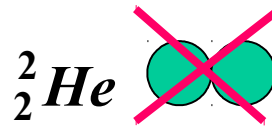
I protoni da soli non formano stati stabili  
Stati stabili = ~ tanti neutroni quanti protoni  
Energie ~ 1-10 MeV / nucleone

## Idrogeno (Z=1)



→ instabile!

## Elio (Z=2)



Non esiste!

→ instabile!

# Decadimenti Beta

Trizio (T)  $\rightarrow$   $^3\text{He}$  in  $\sim 12$  anni (tempo di dimezzamento)

Neutrone  $\rightarrow$  Protone in  $\sim 15$  minuti

Non spiegabile (non permesso!) dalle forze e.m. e forti.

Decadimento trizio [ $\beta^+$ ]:  $p \rightarrow n + e^+ + \nu$

Decadimento neutrone [ $\beta^-$ ]:  $n \rightarrow p + e^- + \nu$

**Forze Nucleari Deboli (Fermi, Pauli)**

# La valle dei nuclei

## Isotopi:

stesso n. protoni  $Z$

diverso n. neutroni  $N$

(stessa specie chimica, diversa massa)

stabili

radioattivi

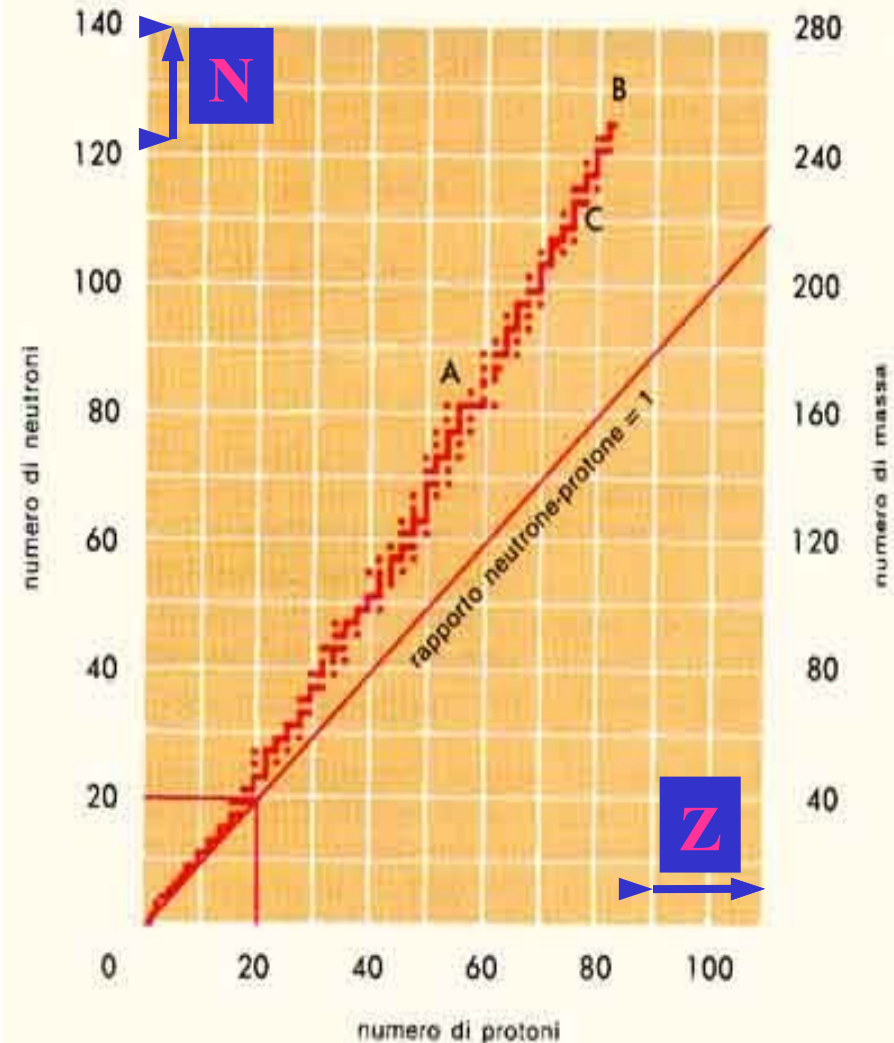
(naturali e artificiali)

## Stabilità dei nuclei:

Nuclei leggeri ( $Z \leq 20$ )  $\rightarrow N = Z$

Nuclei pesanti ( $Z > 20$ )  $\rightarrow N > Z$

... come si spiega? ...



# Masse atomiche e nucleari

Sommando le masse dei componenti, dovrebbe essere:

$$M_{\text{nucleo}} = Zm_p + Nm_n$$

$$M_{\text{atomo}} = M_{\text{nucleo}} + Zm_e$$
$$= Zm_p + Nm_n + Zm_e$$

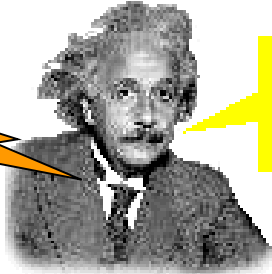
Ma sperimentalmente si misurano **masse inferiori**.

il **legame atomico/nucleare** equivale a una situazione di **minor energia ... che appare come minor massa!**



per togliere un elettrone a un atomo o un nucleone a un nucleo bisogna compiere lavoro cioè fornire energia

# Equivalenza massa-energia



La massa è solo  
una forma di  
energia

La massa di un corpo è già  
di per sé una forma di energia!  
E viceversa, ad ogni energia  
si può attribuire una massa!

Massa in quiete  $m_0$  → Energia di riposo  $E_0 = m_0 c^2$

Una variazione  $\Delta E$  di energia comporta una variazione  $\Delta m$  di massa:

$$\Delta E = \Delta m \cdot c^2 \rightarrow \Delta m = \Delta E / c^2$$

Energia di legame → Difetto di massa

Sorpresa:  
la massa  
non è costante!

# Massa (energia di riposo) delle particelle subatomiche

In fisica nucleare le masse si esprimono in unità di  $\text{MeV}/c^2$ :

$$m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2$$

$$m_e = 0.511 \text{ MeV}/c^2$$

(o anche solo in  $\text{MeV}$ , essendo  $c^2$  un termine costante)

Il decadimento del neutrone libero è possibile perché:

$$m_n = m_p + m_e + 0.782 \text{ MeV}/c^2$$

Poca roba ma ( $N_A$  = numero di Avogadro  $\rightarrow$  1 gr di neutroni):

$$N_A * 1 \text{ MeV} \sim 27000 \text{ kWh} (\sim 3000 \text{ l di benzina})$$



# Massa e difetto di massa

$B_A$  = Energia di legame del nucleo =  
= energia necessaria per separare tutti i nucleoni

$\Delta m$  = Difetto di massa =  
= differenza tra la somma delle masse dei nucleoni  
e la massa effettiva del nucleo

Conservazione dell'energia:  $\Delta m = B_A$

Energia di legame per nucleone:  $E_A = B_A/A = \Delta m/A$

# Energia di legame

Es. differenza idrogeno-deuterio ( $D = H+1n$ )

Somma delle masse:  $M_D = M_H + 1m_n = 1878.35 \text{ MeV}$

Misura sperimentale:  $M_D = 1876.12 \text{ MeV}$

L'energia di legame p-n nel nucleo di deuterio è

$$B_D = (1876.12 - 1878.35) \text{ MeV} = -2.23 \text{ MeV}$$

negativa =  
stato legato

Es. massa  $^{17}\text{O}$

Somma delle masse:  $15966 \text{ MeV}$

Mis. sperimentale:  $15844 \text{ MeV}$

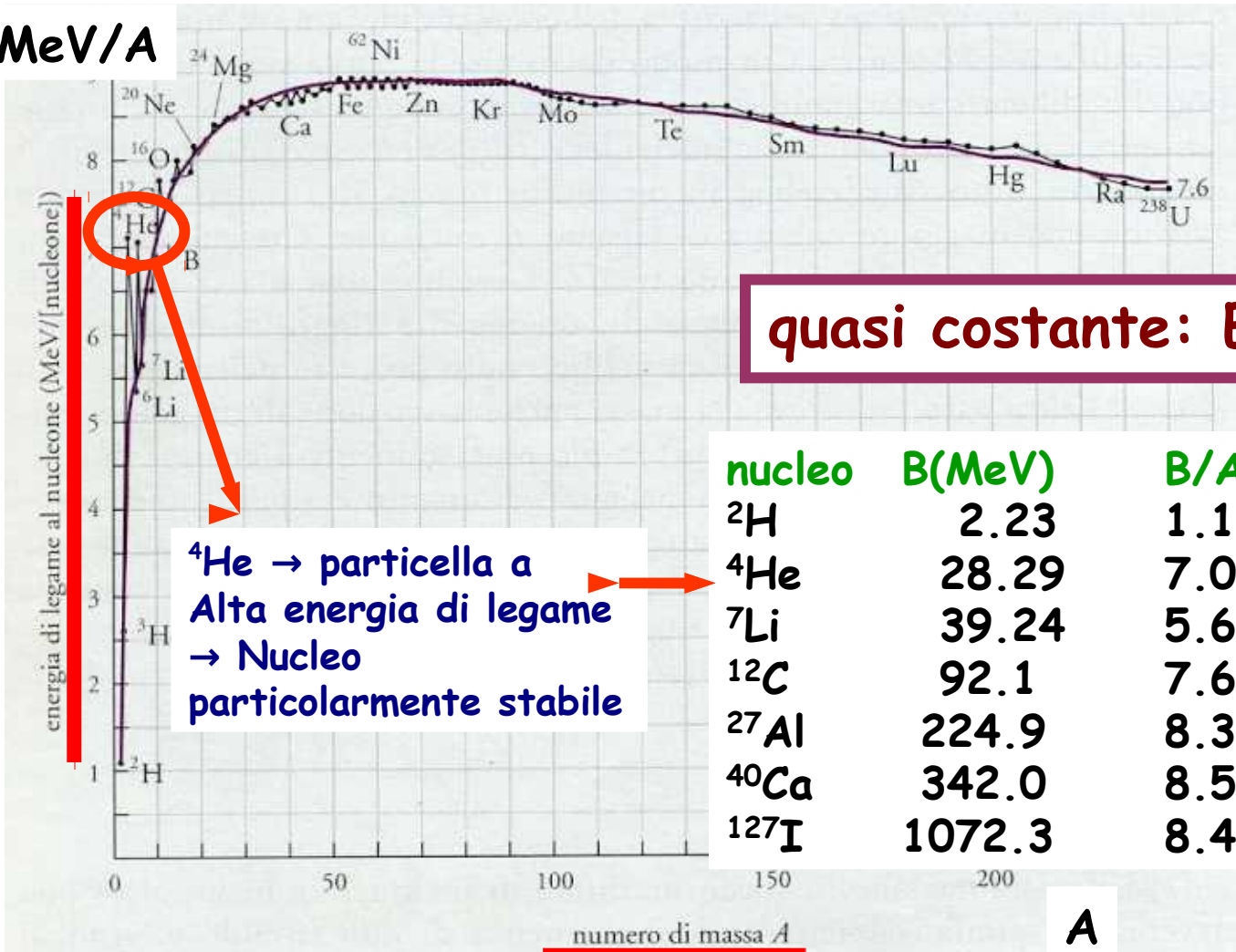
Energia di legame:

$$B_{O(17)} = 122 \text{ MeV}$$

Energia di legame per nucleone:  
 $E_A = 122 \text{ MeV} / 17 = 7.20 \text{ MeV}$

# Energia di legame per nucleone

MeV/A



# Energia di legame: esempi

	M (u.m.a.)	$Zm_P + Nm_N + Zm_e$ (u.m.a.)	En.leg./nucl. (MeV)
${}^2_1H$	2.0141	2.0165	1.1
${}^4_2He$	4.0026	4.0330	7.1
${}^{12}_6C$	12.0000	12.0989	7.7
${}^{13}_6C$	13.0034	13.1078	7.5
${}^{56}_{26}Fe$	55.9349	56.4633	8.8
${}^{238}_{92}U$	238.0508	239.9845	7.6

## 2. Le Radiazioni Nucleari

# RadioAttività

Tutte le interazioni fondamentali possono dare origine a **RadioAttività** attraverso:

- Decadimenti Alfa (forze n. forti)
- Decadimenti Beta (forze n. deboli)
- Decadimenti Gamma (forze elettromagnetiche)
- Emissione di neutroni, protoni, nuclei leggeri, e fissioni (forze n. forti)

Meccanica quantistica (solo probabilità definite a priori):

- tempo di dimezzamento = tempo in cui metà dei nuclei decade (in media!)
- andamento esponenziale



# Decadimenti

Dato 1 miliardo di nuclei  $N$  con un tempo di dimezzamento di 1h, quanti ce ne saranno ancora dopo 2, 3, 4, 5, 6, 12, 24 h ?

1h: 500 M (1/2)

2h: 250 M (1/4)

3h: 125 M (1/8)

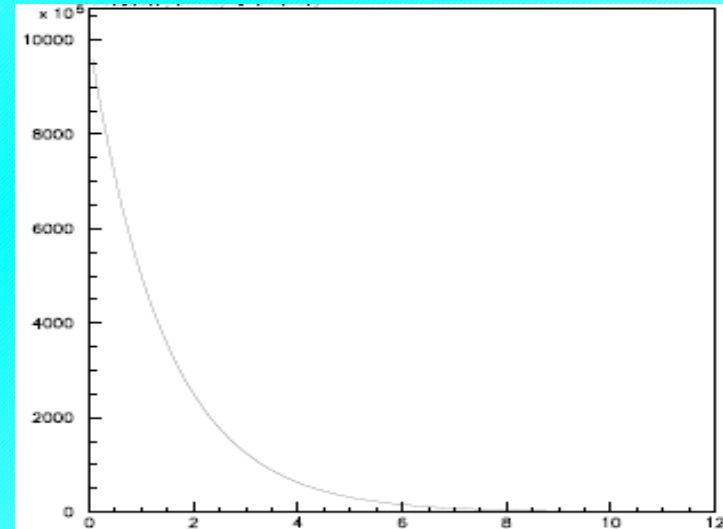
4h: 62 M (1/16)

5h: 31 M (1/32)

6h: 16 M (1/64)

dopo altre 6h :  $16M/64 = 250 \text{ k}$  (1/4096)

dopo altre 12h :  $250k/4096 = 62$  (1/16M)



# Radiazioni

**Attività: decadimenti per secondo**  
si misura in Bequerel (1 Bq = 1 disintegrazione/s)

**Vita media: varia enormemente, da  $10^{-10}$  a  $10^{+10}$  s**

**Radiazioni cariche:  $\beta$  (beta),  $\alpha$  (alfa), protoni**  
gran numero di piccole interazioni  
perdita di energia continua  
→ distanza finita

**Radiazioni neutre: raggi X, raggi  $\gamma$ , neutroni**  
maggiore potere di penetrazione  
produzione di particelle cariche  
→ riduzione del flusso esponenziale

**Possono "attivare" il materiale in cui interagiscono ( $E > 10$  MeV)**

# Attenuazione

Gamma : 50% di attenuazione in 10 cm di tessuto soffice

Alfa : si fermano in ~ 50 um di tessuto soffice

Beta : si fermano in ~ 5 mm di tessuto soffice

Protoni : si fermano in 10-20 cm di tessuto soffice

**Dispersione :**

Flusso = numero particelle per mq

Energia rilasciata per kg di materia

Sorgente puntiforme : il flusso diminuisce in proporzione inversa al quadrato della distanza

$$\text{Flusso}(1\text{cm}) = 100 * \text{Flusso}(10\text{cm}) = 10000 * \text{Flusso}(1\text{m})$$

# Assorbimento

Danno: rottura legami atomici o molecolari (DNA !)

→ lasciano elettroni liberi e ioni da cui il nome di  
Radiazioni Ionizzanti

Dose assorbita : Energia depositata per kg di materia [Gray]

Dose equivalente (danno biologico):

Fattore (X,  $\gamma$ ,  $\beta$ ) = 1

Fattore (alfa) = 20

Fattore (neutroni) = 2,5-20 (dipende dall'energia)

Fattore (protoni) = 2

In generale più il rilascio è concentrato in pochi punti,  
più il fattore è alto

Danno distribuito : maggiore capacità di recupero del corpo

# Sensibilità dei Tessuti

Ulteriori fattori tengono conto della diversa sensibilità dei tessuti ai danni da radiazione.

Ad esempio:

Genitali : 0,20

Midollo osseo, polmoni, stomaco : 0,12

Fegato, tiroide : 0,05

Pelle : 0,01

N.B.: tutti questi fattori sono in costante aggiornamento

Dosi acute: effetti deterministici

Dosi basse: effetti probabilistici

→ Effetti di bassi dosaggi ancora poco conosciuti !

# Effetti delle basse dosi

## non sono ben noti

Dose mSv	Tempo di esposizione	Attività
0.05	anno	Bere acqua
0.08	anno	RX torace
0.10	anno	Occhiali (contengono torio)
0.10	anno	RX ai denti
0.39	anno	Radionuclidi in corpo
2	anno	Radiazione naturale
2.4	anno	Media impiegati settore industria nucleare
2.5	anno	Media minatori Uranio
5	anno	Equipaggio volo di linea a medie latitudini
10	anno	Dose max. minatori Uranio
20	anno	Limite attuale per minatori e impiegati nucl.
50	anno	Radiazione naturale in alcune regioni
100	anno	Incremento della probabilità di cancro dimostrato
350	cumulativa	Criterio per decidere lo spostamento della popolazione a Chernobyl
1000	cumulativa	+ 5% di probabilità di contrarre il cancro
1000	singola dose	Temporanea sindrome da radiazione: nausea, diminuzione globuli bianchi
5000	singola dose	Probabilità di morte del 50% in un mese

OK 3 mSv  
anno

Cosa fa?

! 100 mSv  
anno

☠ 1 Sv



# Effetti delle basse dosi: Il modello lineare

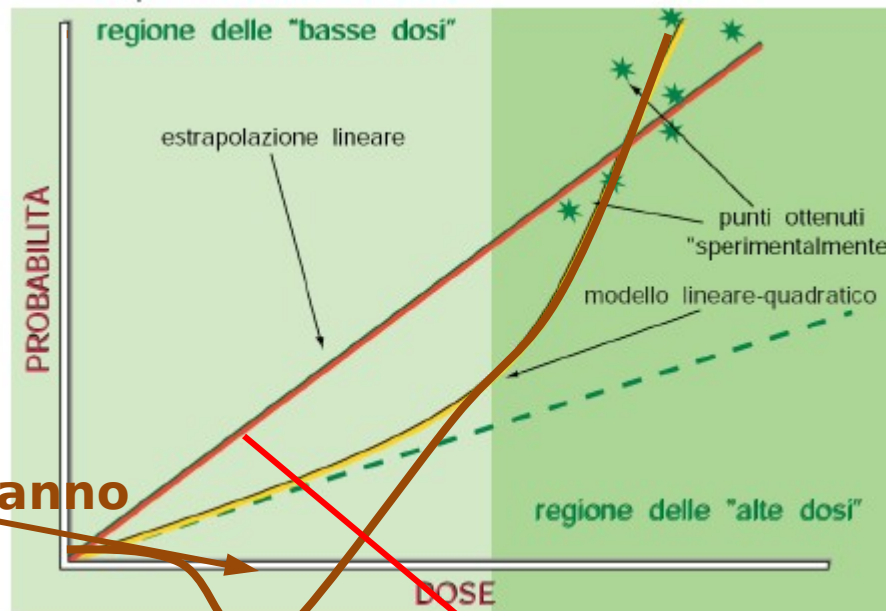
Se una persona fuma 300 sigarette al giorno,  
dopo un anno muore.

Se 300 persone fumano 1 sigaretta al giorno,  
di queste dopo un anno una muore per il fumo.

Dando una sigaretta al giorno a tutti gli italiani,  
dopo un anno avremo  
 $50.000.000/300 = 170.000$  morti per il fumo

**Questo non è vero!**

# Effetti delle basse dosi



20-50 mSv/anno

Il risultato incredibile di Taiwan: 50 mSv/anno per 20 anni

Morti per cancro	MC	morti attese	MC attese	morti mod. lineare	MC mod. lineare
7	3	232	46	302	67

# Il disastro di Chernobyl

**Chernobyl, Ucraina, 26 aprile 1986**

Per un test: interruzione del vapore +  
disattivazione sistemi di sicurezza

reazione a catena incontrollata

→ energia 100 volte superiore

aumento di temperatura

→ fusione del reattore

aumento di pressione

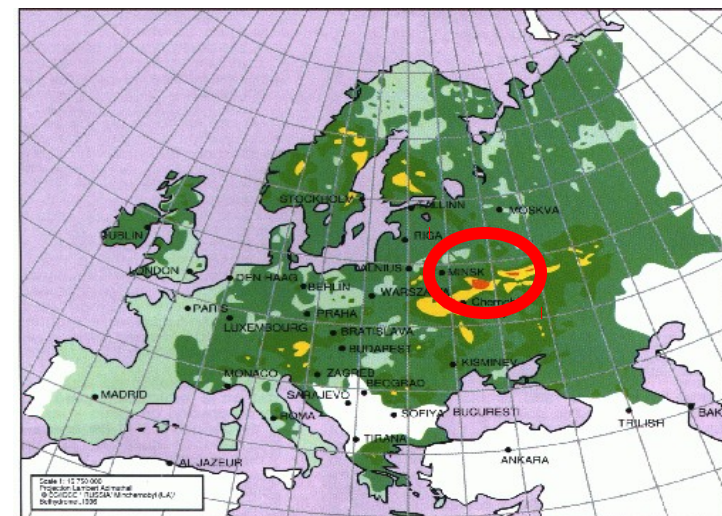
→ esplosione del "tetto"

incendio della grafite per 10 giorni

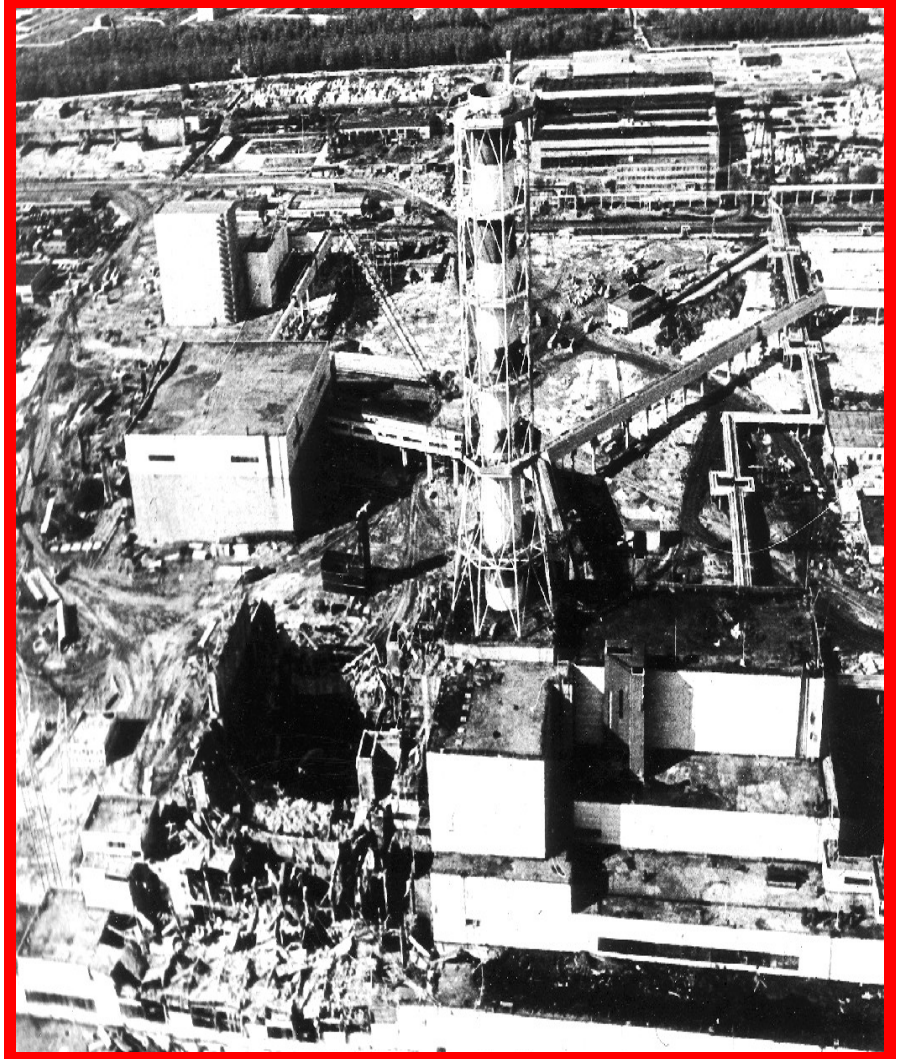
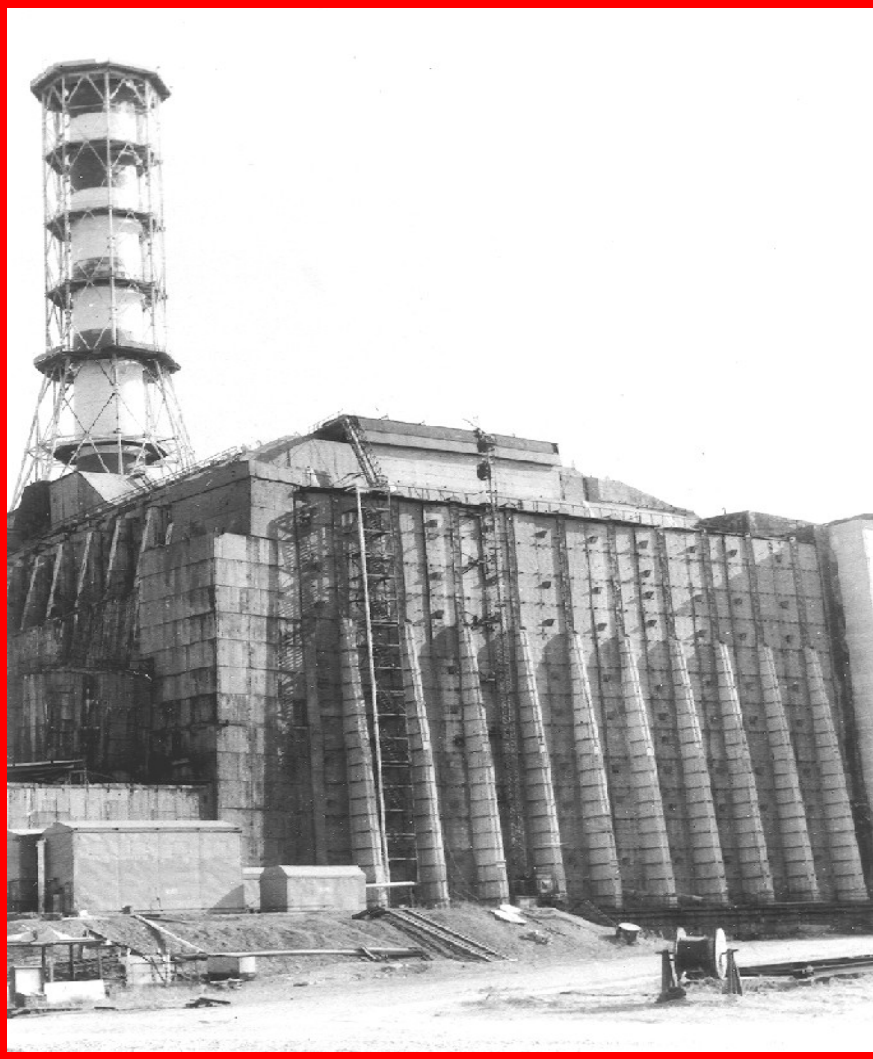
Nube radioattiva in tutta Europa:

$^{131}\text{I}$  →  $T_{1/2} \approx 8$  giorni

$^{137}\text{Cs}$  →  $T_{1/2} \approx 30$  anni



# Chernobyl prima e dopo





# Chernobyl: i fatti

- Paragonato ad altri eventi nucleari l'esplosione di Chernobyl
  - ha immesso nell'atmosfera materiale radioattivo in quantità 400 volte più grandi di quelle della bomba di Hiroshima
  - ma tutti i test sulle bombe atomiche condotti negli anni 50-60 hanno immesso nell'atmosfera quantità di materiale radioattivo da 100 a 1000 volte più grandi
- Nelle prime fasi sono stati utilizzati circa 200.000 "liquidatori"
  - nei lavori di contenimento e decontaminazione
  - in seguito, il numero è arrivato a circa 600.000 sebbene molti con dosi piccole
- Intorno alla centrale è stata delimitata una "zona proibita" (30 Km di raggio)
  - circa 116.000 persone, che vivevano in essa, sono state fatte evacuare
- Negli anni seguenti l'incidente, altre 210.000 persone delle Repubbliche dell'Ucraina, della Bielorussia e della Russia, sono state evacuate dalle loro case per ordine governativo e sistemate in zone meno contaminate

# Chernobyl: dosi ricevute



## • Liquidatori

- ~ 200.000 persone dosi di 100 mSv (5 volte limite annuale per lavoratori di inst. nucleari)
- ~ 20.000 liquidatori hanno ricevuto dosi dell'ordine di 250 mSv
- una piccola percentuale di essi ha assorbito dosi di 500 mSv
- a 134 persone è stata diagnosticata la "Sindrome Acuta da Radiazioni" (SAR)
- 28 sono morte nei primi tre mesi

## • Popolazione

- Il 10% dei 116.000 abitanti evacuati dalla "zona proibita" ha ricevuto > 50 mSv
  - Il 5 % ha ricevuto dosi maggiori di 100 mSv
  - 400.000 persone sono vissute in aree contaminate con più di 555.000 Bq/m<sup>2</sup>
- Per la popolazione fuori della ex-Unione Sovietica, la più alta dose di radiazione durante i primi anni dopo l'incidente è stata di 0.8 mSv
- **Fondo naturale: 2-5 mSv/anno**



# Effetti sanitari certi

Responso del United Nations Scientific Committee of the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR):

Risultati (sorprendenti e inattesi!!) dopo 20 anni:

4000 casi di cancro alla tiroide

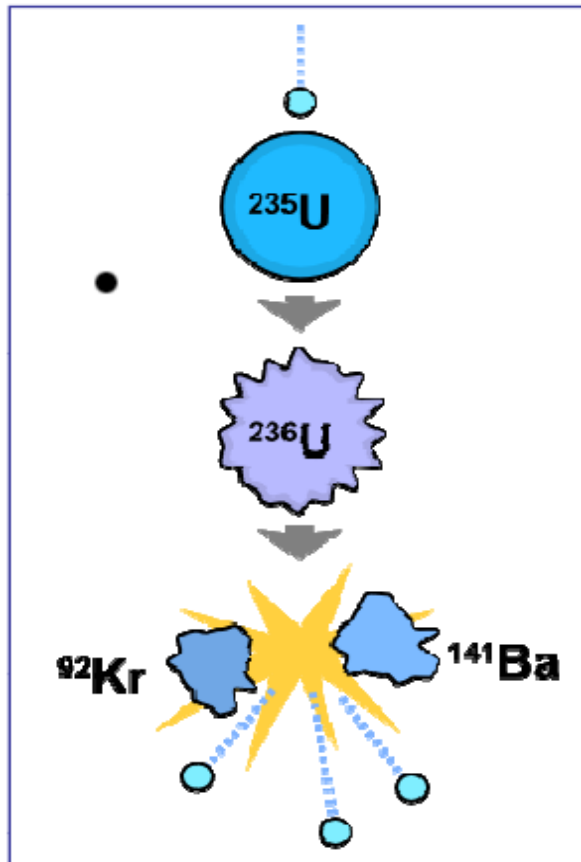
Non c'è evidenza di altri tipi di tumori

Non c'è evidenza di un incremento delle leucemie

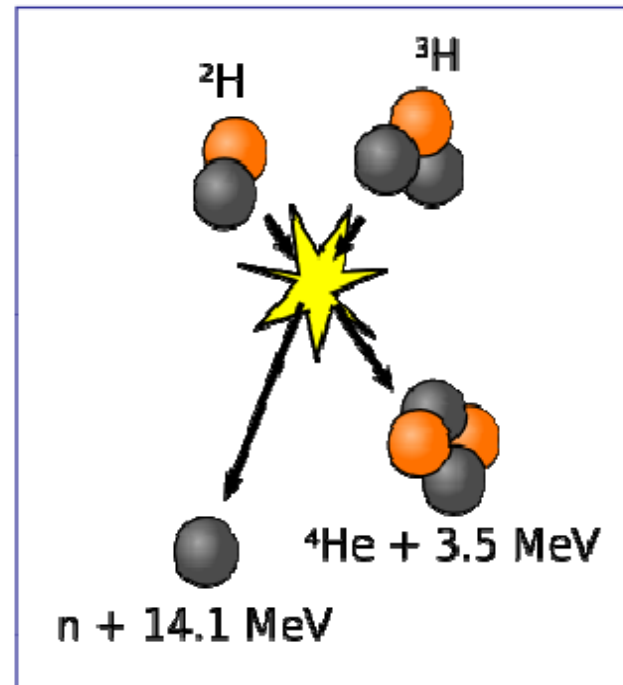
Non c'è evidenza di altre malattie e malformazioni genetiche

# 3. Le Centrali Nucleari

## FISSIONE NUCLEARE



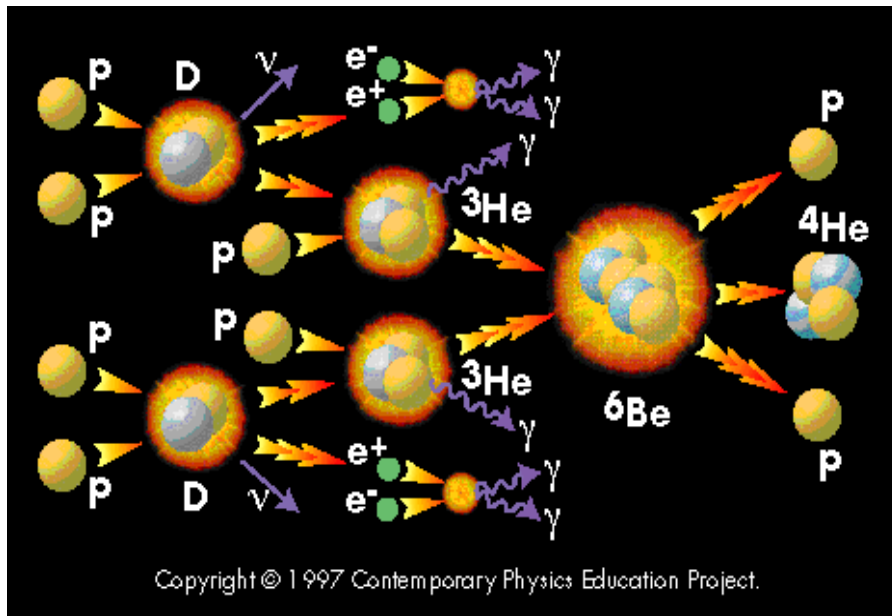
## FUSIONE NUCLEARE





# La fusione nucleare

I nuclei leggeri ( $Z < 15$ ), in condizioni particolari (es. altissime temperature) in cui riescono ad avvicinarsi l'un l'altro a piccolissime distanze, possono fondersi a due a due in nuclei più pesanti.



Nella fusione viene emessa **energia**:  
 $\sim 10\text{-}30 \text{ MeV}$   
(contro i  $20 \text{ eV}$  delle reazioni chimiche)

Nel Sole, a ogni secondo, 564,5 ton di idrogeno si convertono in 560 ton di elio; 4,5 ton diventano energia che viene irraggiata nello spazio.

# Fusione di due nuclei leggeri

Il sole funziona con le reazioni



# Fusione: Condizione di Ignizione

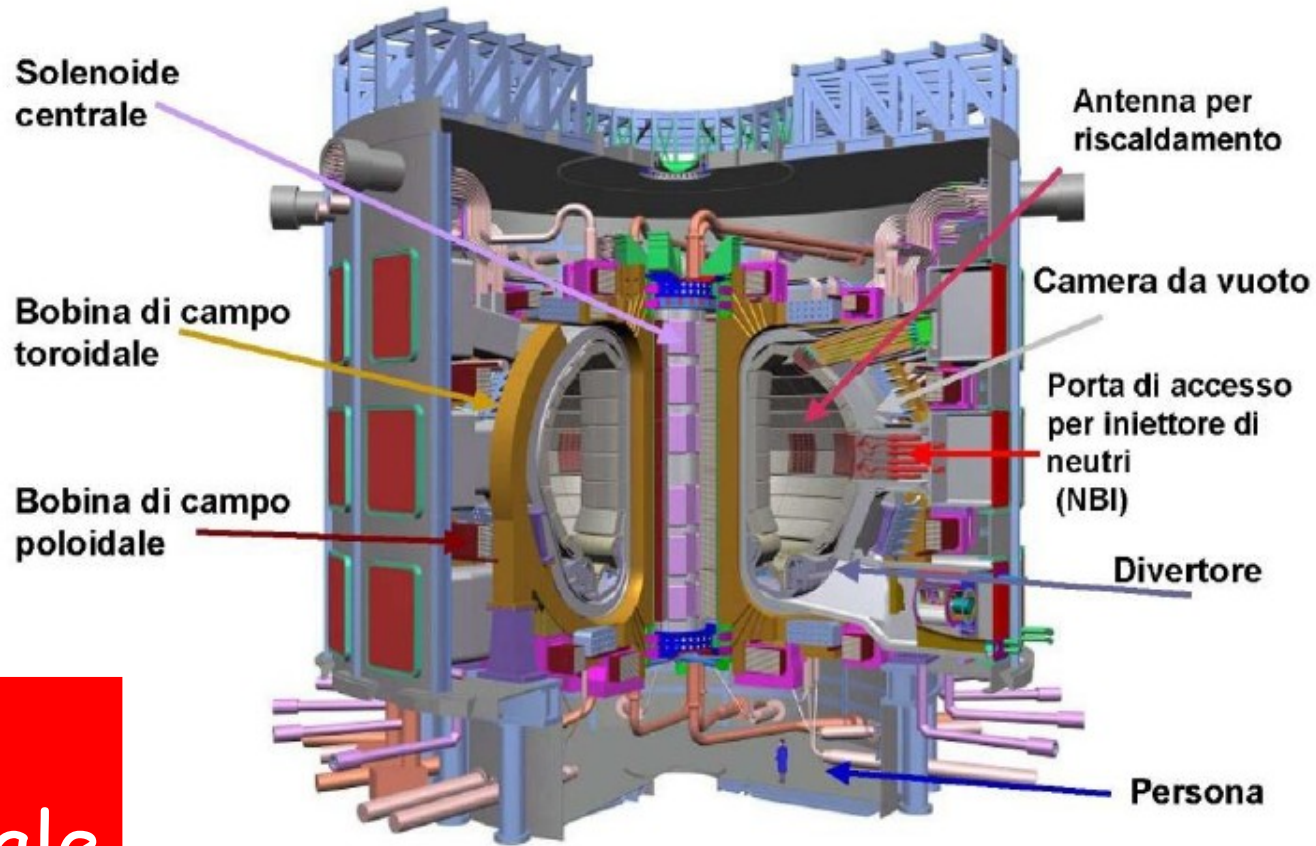
- Temperatura, densità e tempi di confinamento sufficienti a tenere la reazione in equilibrio (bilancio energetico = zero)

Servono ~ 200 milioni di gradi

Con meno di ~ 50 milioni di gradi la reazione si spegne rapidamente

# Progetto ITER

UE, Cina, Giappone, Corea, Russia, USA



Il sole  
artificiale



# Progetto ITER (2)

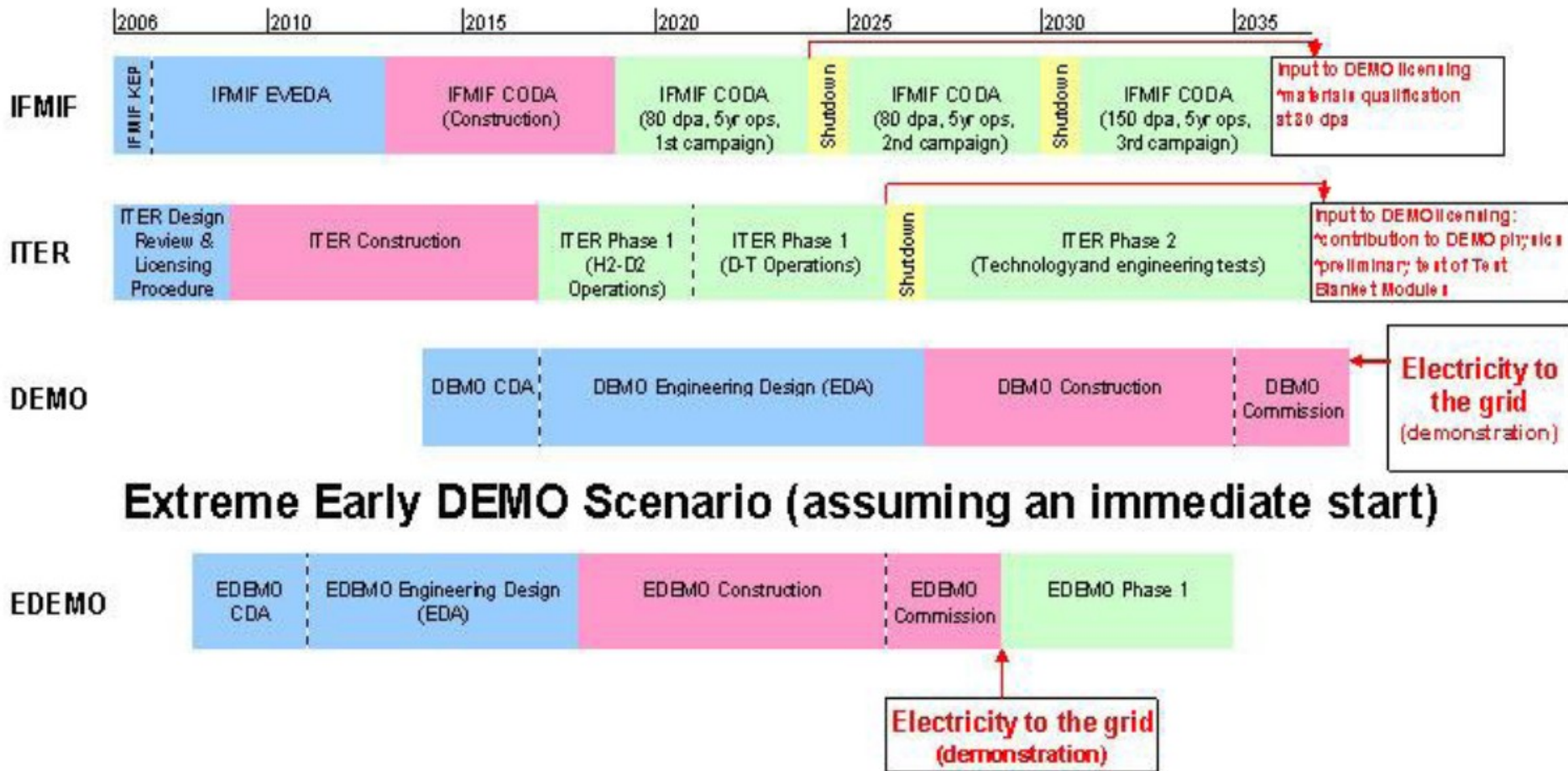


Fig.7.3: Programma di riferimento (*fast track*) e scenario "Early DEMO" della fusione.



# La fissione nucleare

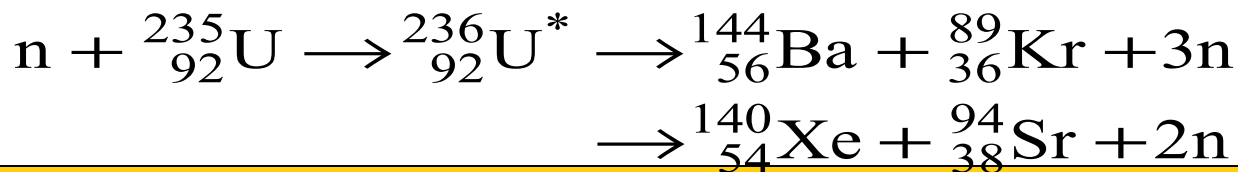
Elementi fissili: nucleo pesante ( $Z > 92$ ) + cattura di neutroni  $\rightarrow$  scissione in due elementi di massa intermedia, che si trovano in eccesso di neutroni.

Se più di uno di questi neutroni viene mediamente riemesso, si può innescare una reazione a catena.



Nella fissione viene emessa **energia**: circa 200 MeV (contro i 20 eV delle reazioni chimiche)

1g di fissione  $\rightarrow$   
30000 kWh di energia  
= consumo familiare  
di 5 anni!!!



# I neutroni lenti e l'uranio

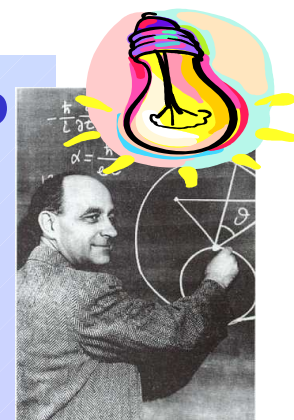
1932: scoperta del neutrone

Il neutrone è neutro, e quindi non è soggetto a repulsione elettrica. Ha quindi un'elevata capacità di penetrazione nel nucleo.



Bombardando nuclei di uranio con neutroni si ottengono moltissime sostanze radioattive.

Usando sostanze (**moderatori**) che contengono protoni (cioè idrogeno, es. acqua o paraffina), i neutroni diminuiscono la loro velocità e l'effetto radioattivo aumenta molto. I **neutroni** emessi possono innescare un processo a catena.







# Combustibile

## Materiali fissili:

- Alta probabilità di fissione da cattura di neutroni
- Rilascio di due o più neutroni in media per fissione
- Vita media ragionevolmente lunga
- Disponibilità in quantità adatte

## In pratica:

$Z > 88$  (= radio)

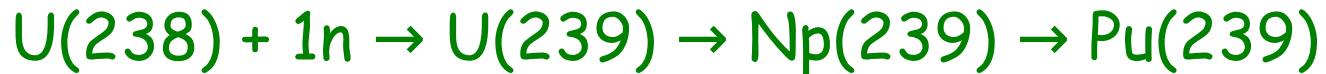
Oltre all'uranio, in generale si tratta di transuranici con  $Z$  pari e  $A$  dispari (con eccezioni):

U(233), U(235), Pu(239), Np(237), Cm(244), Am(241)

# Combustibile (2)

Materiali fertili:

Assorbendo neutroni, trasmutano in elementi fissili



dove i tempi di dimezzamento di U(239) e Np(239) sono rispettivamente di ~ 24 min e di ~ 2 giorni e 9 ore

**N.B.:**

- la fertilizzazione diventa efficiente solo con neutroni veloci
- la fissione diventa meno efficiente (i neutroni che fertilizzano non generano fissioni)

# Combustibile (3)

Uranio: unica sorgente naturale a disposizione

99.3% U(238), vita media ~ 4,5 G anni

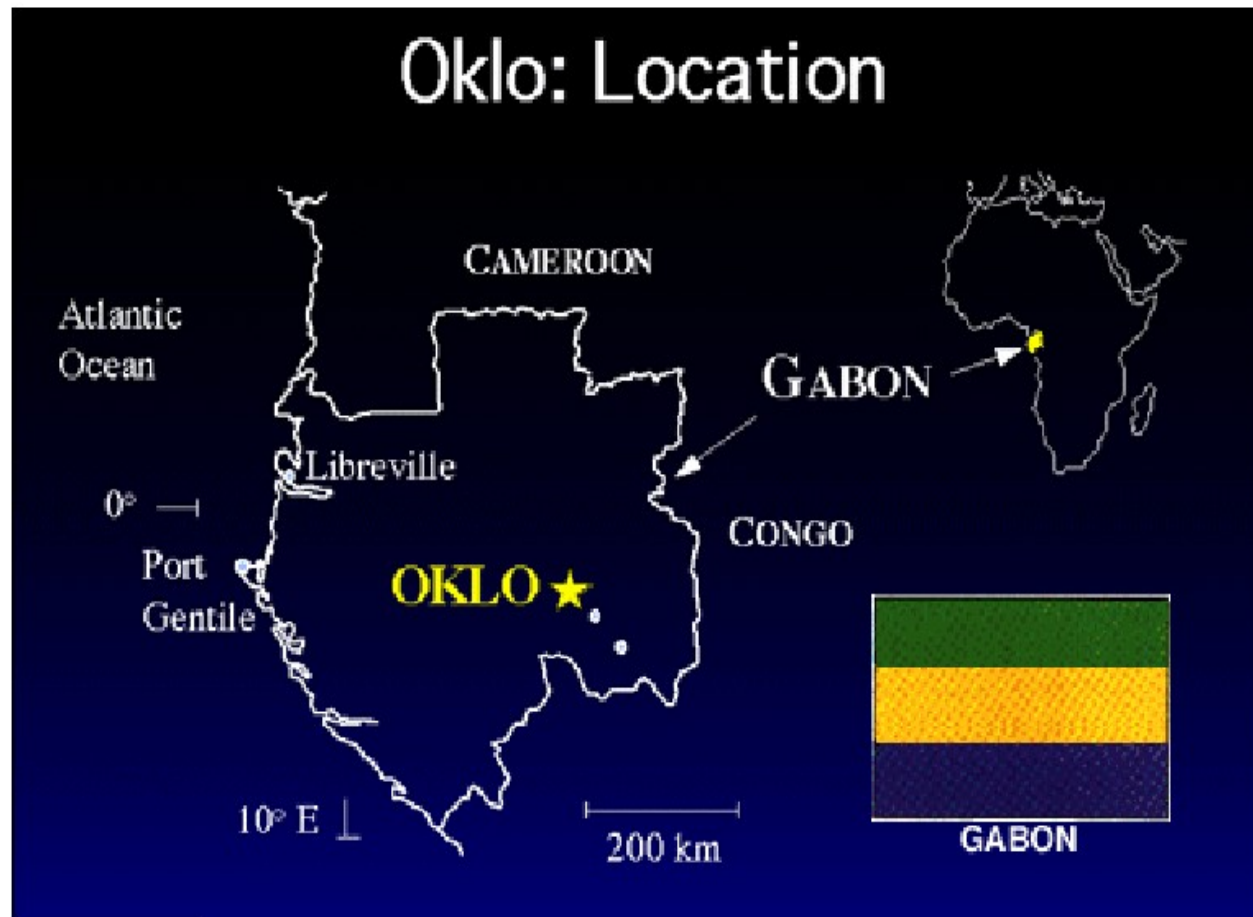
0.7% U(235), vita media ~ 0,7 G anni

U(238) assorbe neutroni e spegne la reazione

Arricchimento: U(235) ~ 3-7%

→ reiterato [ 97% di U(235) ] può servire alla costruzione di bombe

# Il Reattore n. 1 del pianeta





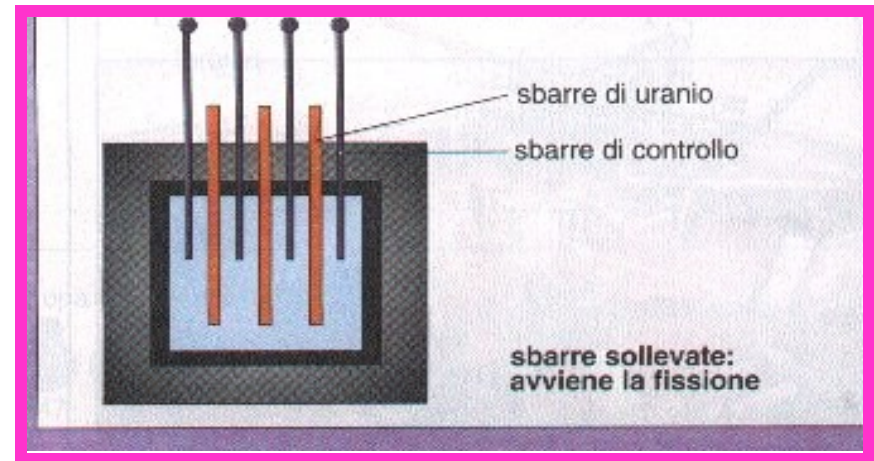
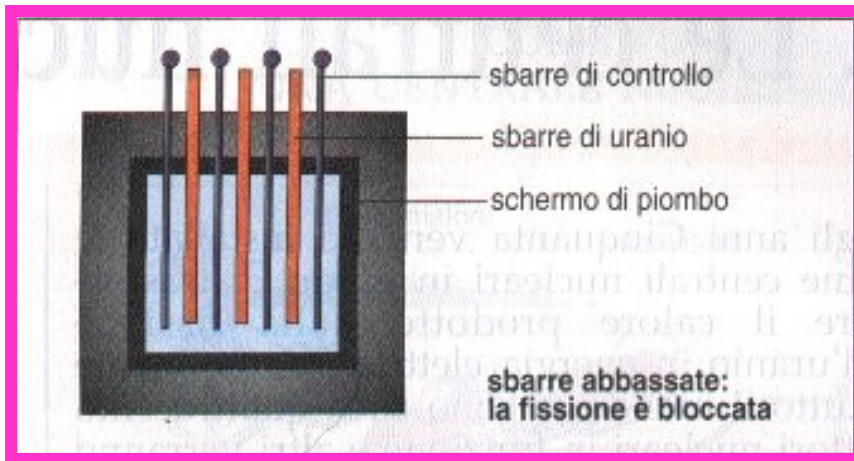
# Oklo

- **Dove:** Oklo nel Gabon
- **Quando:** 1.7 Miliardi di anni fa
- **Quanti reattori:** almeno 17
- **Per quanto tempo:** > 1 Milione di anni di funzionamento intermittente
- **Potenza:** circa 20 kW<sub>th</sub>
- **Burn-up:** almeno 6 ton di U-235
- **Energia Termica prodotta:** circa 100 TWh prodotti (~ 3 anni di produzione di un impianto nucleare da 1300 MWe)
- **Arricchimento combustibile:** circa 3.7% di U-235
- **Prodotti di Fissione:** 5.4 ton + 1.5 ton di Pu (**mobilità dei FP non volatili di pochi cm in 1.5 MLD di anni!!**)
- **Requisiti per un reattore nucleare naturale:**
  - Bassa concentrazione di materiali assorbitori di neutroni
  - – Alta concentrazione di materiali moderatori: acqua
  - Massa critica per sostenere la catena di fissione

# Il reattore nucleare

- **Cubo di grafite** (moderatore dei neutroni)
- **barre di uranio**
- **barre di controllo** di boro e cadmio (assorbitori dei neutroni in eccesso)

**Pila di Fermi,  
Chicago 1942**



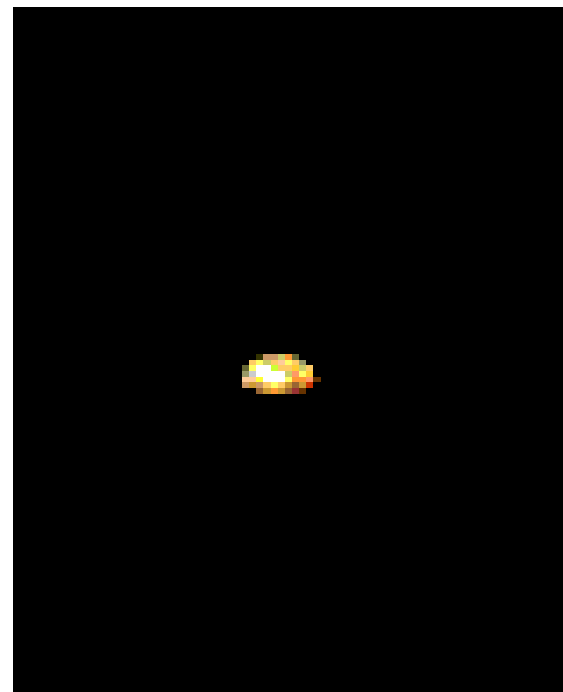
Sollevando o abbassando le barre di controllo,  
è possibile innescare o bloccare la reazione a catena.

# Hiroshima e Nagasaki



Hiroshima  
uranio 235  
98% distruzione  
70000 morti

Nagasaki  
plutonio 239  
47% distruzione  
75000 morti



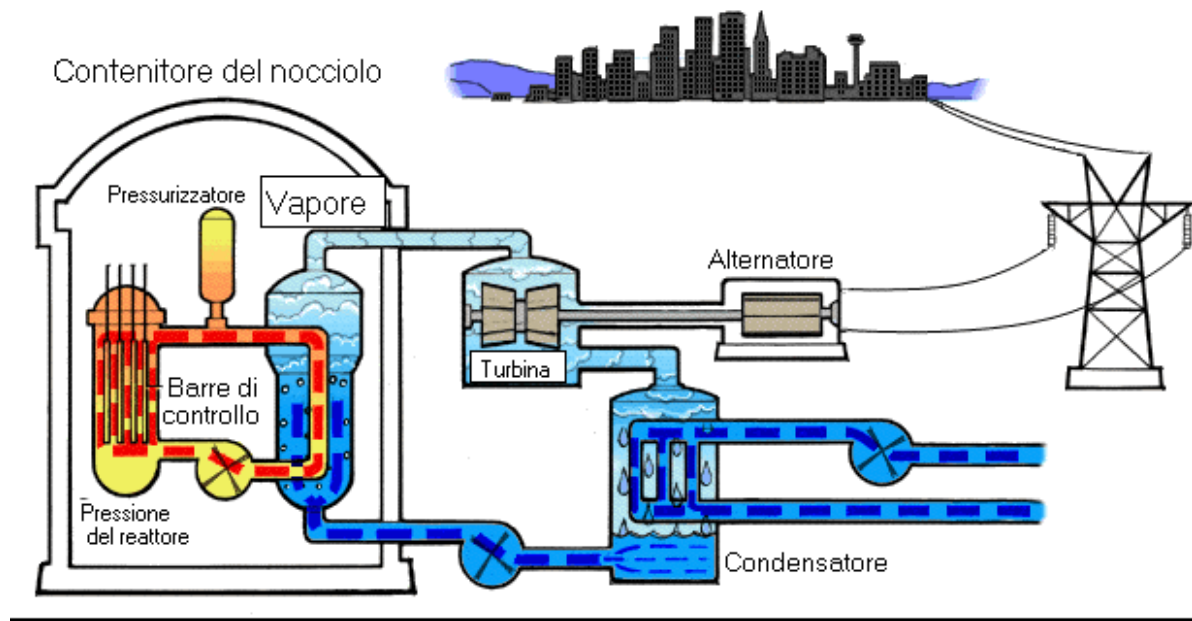
La scienza in crisi

# Centrali nucleari...

Reattore protetto da una campana di rivestimento + sistema di raffreddamento in cui circola acqua.

L'acqua trasformata in vapore mette in azione una turbina collegata con un alternatore che produce energia elettrica.

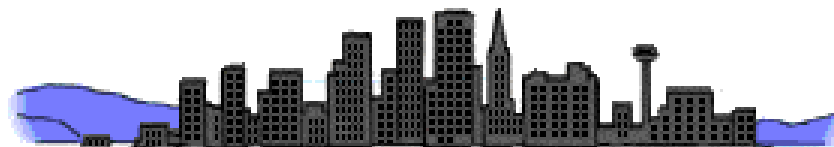
Il vapore uscito dalla turbina passa in un condensatore dove viene raffreddato e trasformato in acqua. Quest'acqua viene di solito inviata al reattore per essere riutilizzata.



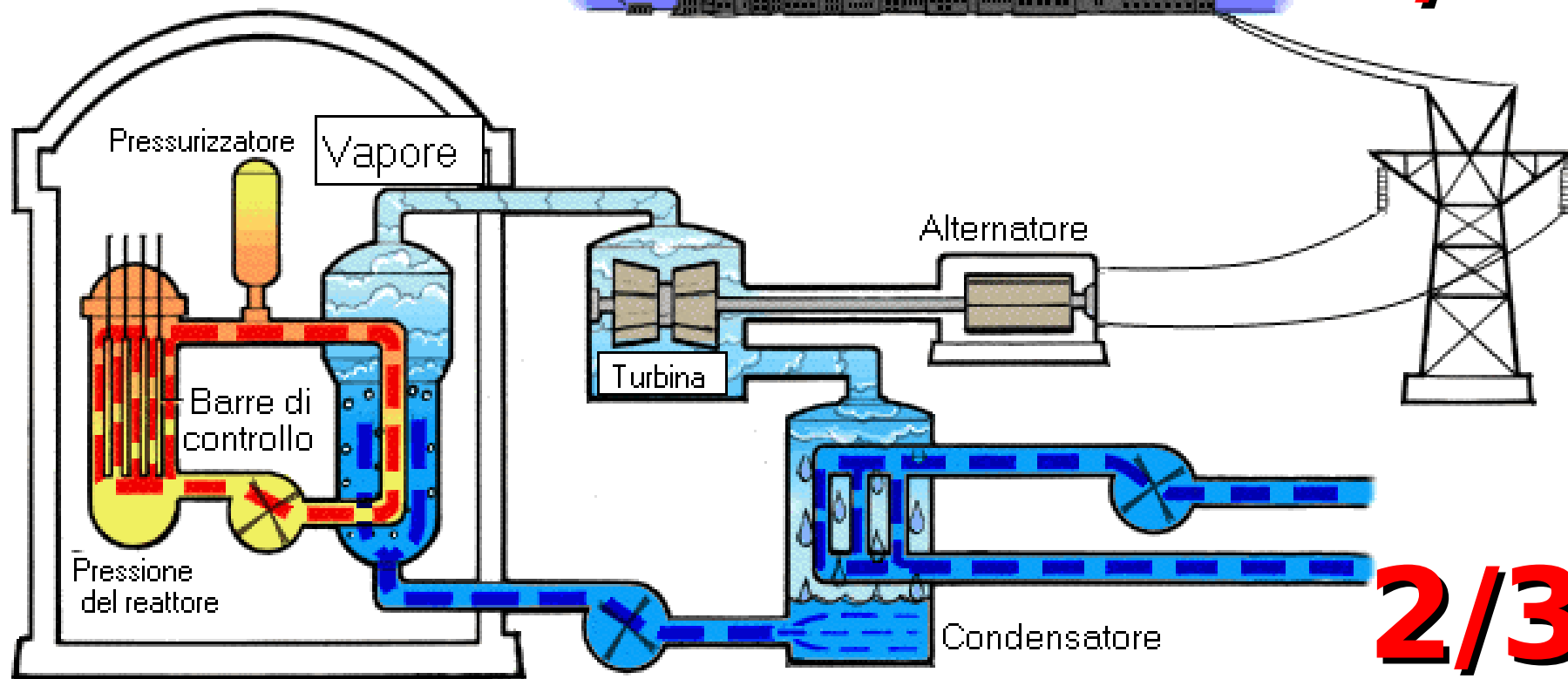
## macchine a vapore (!)



Contenitore del nocciolo



**1/3**



**2/3**

DEMO  
MODE



**2/3**

**1/3**

# Impianti Nucleari di 2 Gen.

La prima generazione erano reattori sperimentali

Seconda generazione:

- reattori termici (PWR, BWR, LWGR, CANDU)
- reattori veloci (autofertilizzanti)

Tutte le centrali attualmente in funzione e quasi tutte quelle in costruzione sono di seconda generazione



# Reattori Veloci

Non possono usare acqua (contiene idrogeno che rallenta i neutroni)

Usano metalli liquidi (es. sodio)

Di fatto hanno funzionato poco e male (SuperPhenix) e soprattutto a costi non competitivi



# Reattori Termici

**439 reattori in funzione nel mondo:**

370 GW (16% elettrico, 6% totale, 30% el. Europa)

**Tipologia:**

- 22% ad acqua bollente (BWR)
- 66% ad acqua pressurizzata (PWR)
- 6% ad acqua pesante (CANDU)
- 3% moderati a grafite (LWGR) → Chernobyl
- 3% raffreddati a gas (AGR, CGR)

# Impianti Nucleari di 3+ Gen.

## EPR (European Pressurized Reactor)

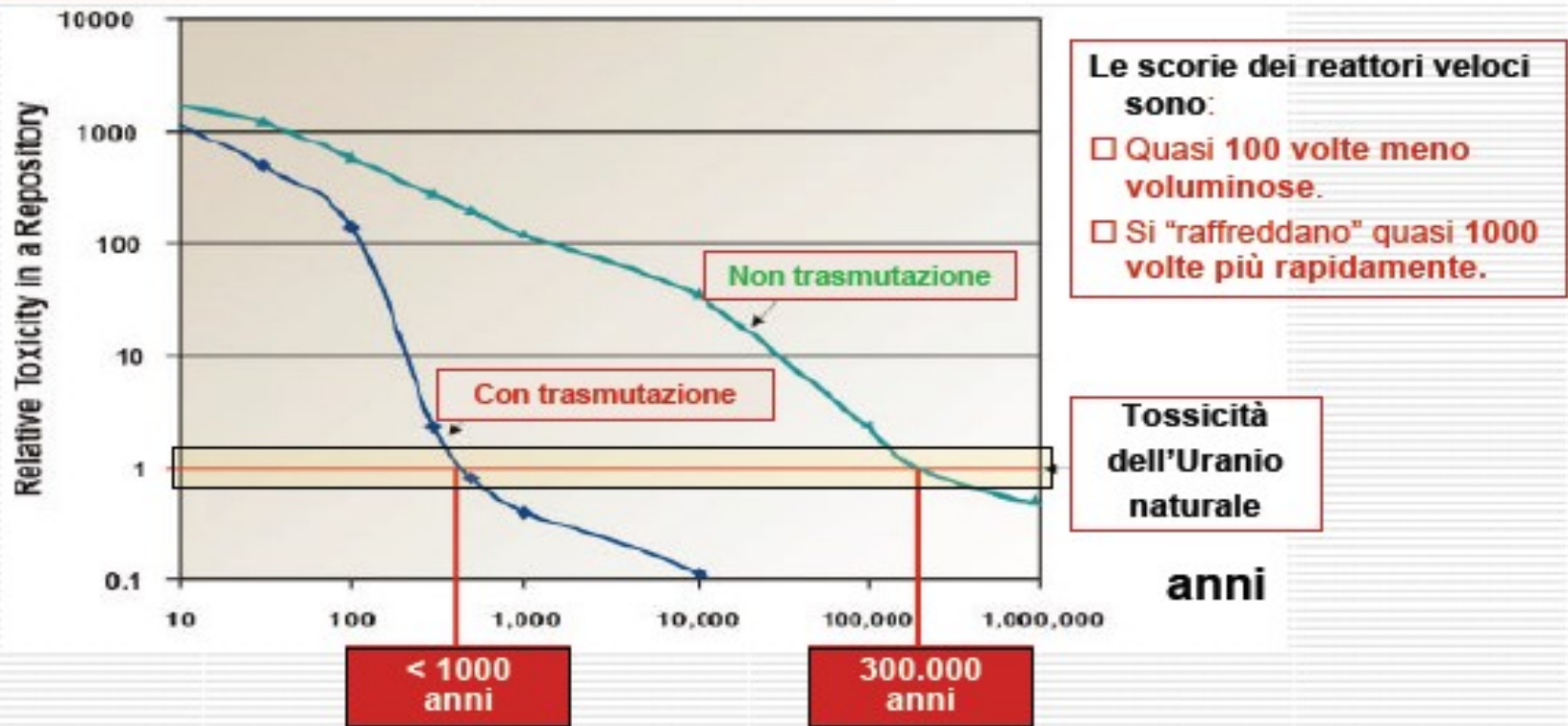
- ++ sicurezza
  - ++ vita
  - + efficienza (37%)
  - + risparmio uranio
  - + riduzione scorie a lunga vita
- 
- nessun reattore EPR in funzione ancora
  - due in costruzione con tempi che si allungano (> 10 anni)
  - costi ancora non definitivi (criteri di sicurezza rivisti qualche mese fa)

**OLKILUOTO 3 : 1600 MWe + 2700 MW termici**  
pari alla energia elettrica di una città di 2 M di abitanti



# Quarta Generazione → 30 anni

## Riguardo le scorie.





# Una centrale da 1000 MWe nel corso di un anno

	A Carbone	Nucleare
--	-----------	----------

Combustibile	1-2 milioni di ton 600 carri al giorno	100 ton 5 carri all'anno
Rifiuti	in loco e sparsi	tutti in loco
Quantità totale	7.000.000 ton	30 ton
Pericolosi	-----	2 ton
Da trattare	250.000 ton	20 ton
Rifiuti radioattivi	50 GBq	2 GBq

Scorie dei combustibili fossili: poco tossiche ma ingestibili e delocalizzate

Scorie nucleari: altamente tossiche ma gestibili (nel breve periodo) e localizzate

# Proliferazione nucleare



# Proliferazione nucleare

Trattato di non proliferazione nucleare

arricchimento

Uranio al 5%

Reattori civili



Industria militare

plutonio

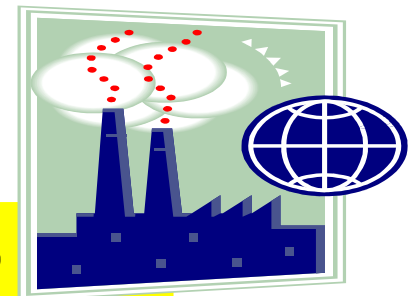
Scorie e barre

Impianto ritrattamento



deposito

Scorie trattate





# 4. La Politica Energetica

# Il nucleare in Italia

- 4 centrali: Latina, Garigliano, Trino, Caorso
  - fermate dopo il referendum del 1987
  - solo Caorso in realtà aveva davanti ancora anni di funzionamento
  - cancellate le 2 centrali (Montaldo di Castro, Trino2)
- Previste dal Piano Energetico Nazionale

# Il nucleare ai nostri confini

13 centrali straniere sono a un passo. L'Anpa (Agenzia nazionale per la protezione ambientale) le considera, dal punto di vista delle conseguenze di un eventuale incidente, come se fossero praticamente nel territorio italiano.



13 centrali a meno di 200 km dai nostri confini:

**Francia:** Phenix, Tricast, Cruas, St-Alban, Bugey, Fessenheim  
**Svizzera:** Muenleberg, Goesgen, Beznau, Leibstadt  
**Germania:** Grundemmingen, Isar  
**Slovenia:** Krsko

Mappa delle fonti di un possibile inquinamento nucleare per l'Italia

Sono evidenziati in rosso i centri di rilevamento di radiazioni che dovrebbero dare tempestivamente l'allarme in caso di incidente nucleare.

# Il nucleare in Europa e nel mondo

Paese	Reattori in funzione	Reattori in costruzione	Per centuale dell'energia nucleare prodotta nel 1999 rispetto al totale
Argentina	2	1	9.04
Armenia	1	0	36.36
Belgio	7	0	57.74
Brasile	1	1	1.12
Bulgaria	6	0	47.12
Canada	14	0	12.44
Cina	3	7	1.15
Corea del Sud	16	4	42.84
Finlandia	4	0	33.05
Francia	59	0	75
Germania	19	0	31.21
Giappone	53	4	36
India	11	3	2.65
Iran	0	2	0
Lituania	2	0	73.11
Messico	2	0	5.21
Paesi Bassi	1	0	4.02
Pakistan	1	1	0.12
Regno Unito	35	0	28.87
Repubblica Ceca	4	2	20.77
Romania	1	1	10.69
Russia	29	3	14.41
Slovacchia	6	2	47.02
Slovenia	1	0	37.18
Spagna	9	0	30.99
Sud Africa	2	0	7.08
Svezia	11	0	46.8
Svizzera	5	0	36.03
Ucraina	14	4	43.77
Ungheria	4	0	38.3
Usa	104	0	19.8

Fonte: Agenzia internazionale per l'energia atomica



International Nuclear Safety Center at ANL, Aug. 2005

## Potenza Nucleare Installata

374 GW (16% elettrico, 6% totale, 30% el. in Europa)

## Impianti attivi (consumo Uranio):

438 (68650 ton/anno)

## Richiesta:

per mantenere questo livello, nei prossimi 40 anni  
il numero dei reattori deve raddoppiare: +500 reattori

## Kyoto

2000 reattori

## Eliminazione dei fossili

5000 reattori

## Risorse di uranio

Stimate ~6 Mton

Possono alimentare 1000 reattori per ~40 anni

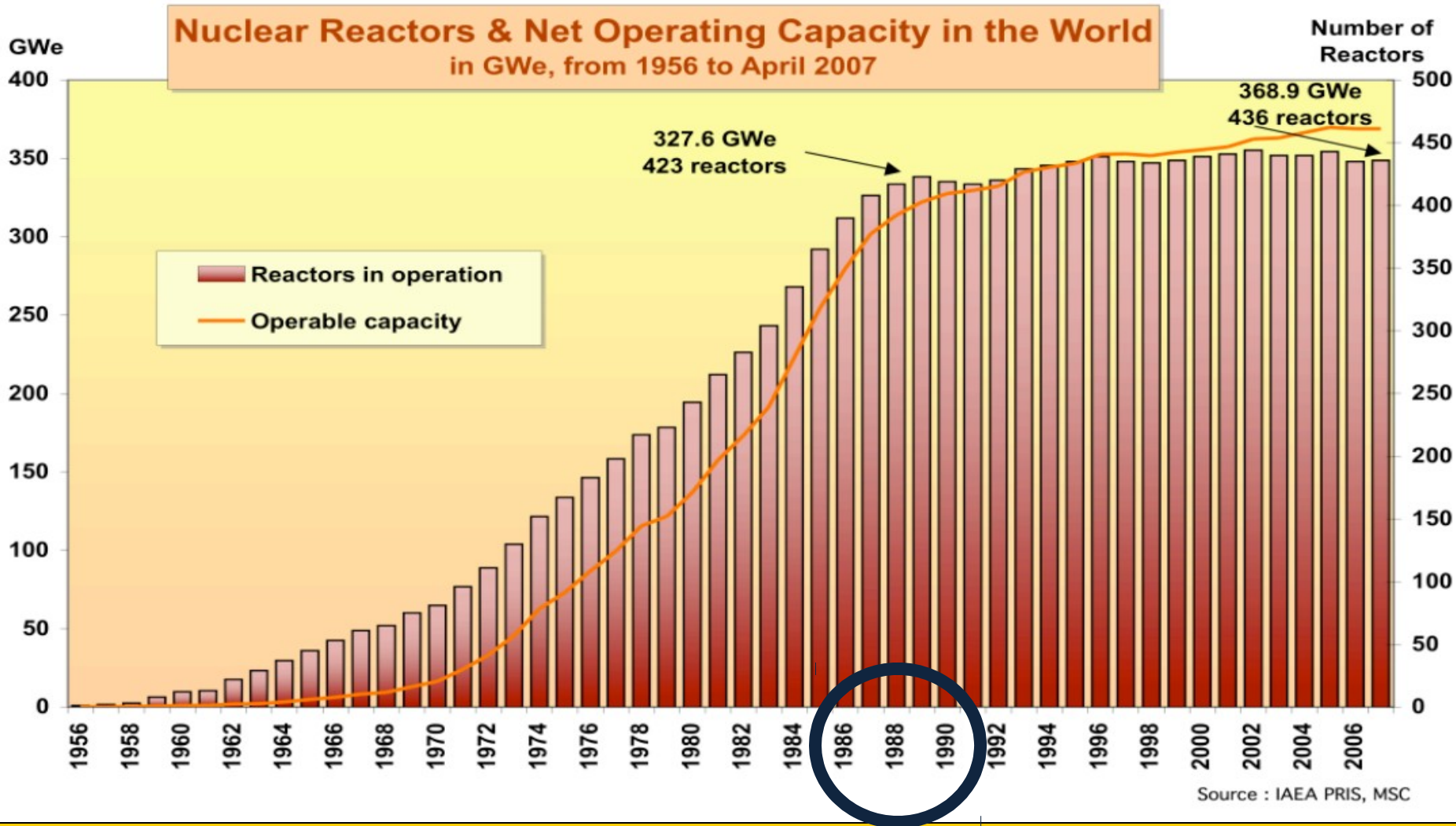
## Capacità costruttiva mondiale

qualche decina di reattori all'anno

54 reattori in costruzione a maggio 2010

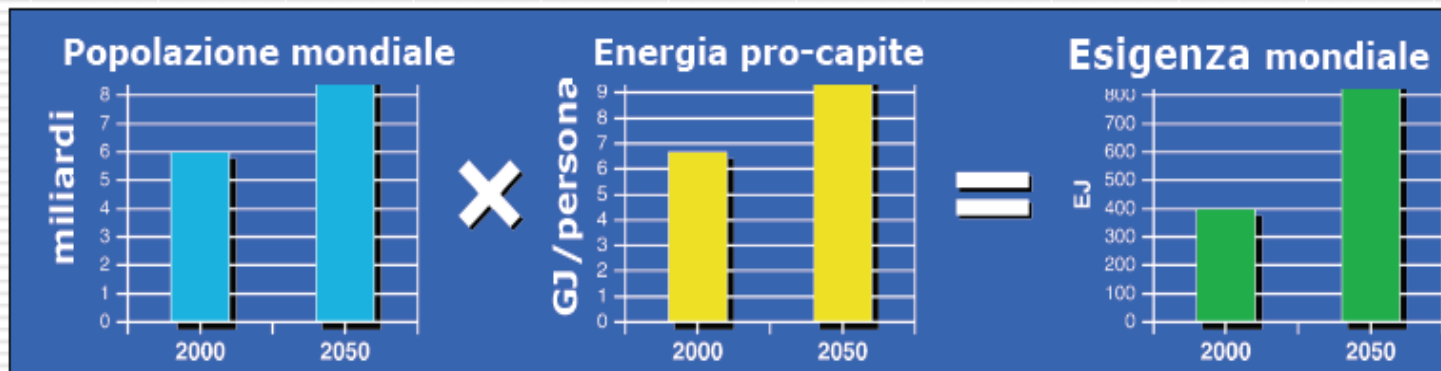


# Numero di reattori negli anni: sottoprodotto del sistema militare (?)

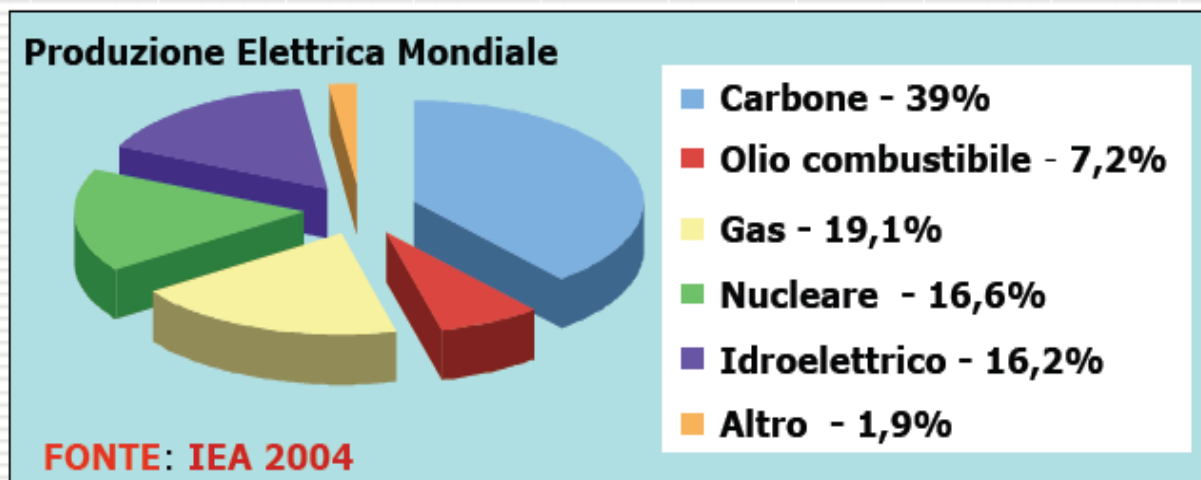


# Le dimensioni del problema

- Prevedibile, **nei prossimi 40 anni**, almeno un **raddoppio della richiesta**.

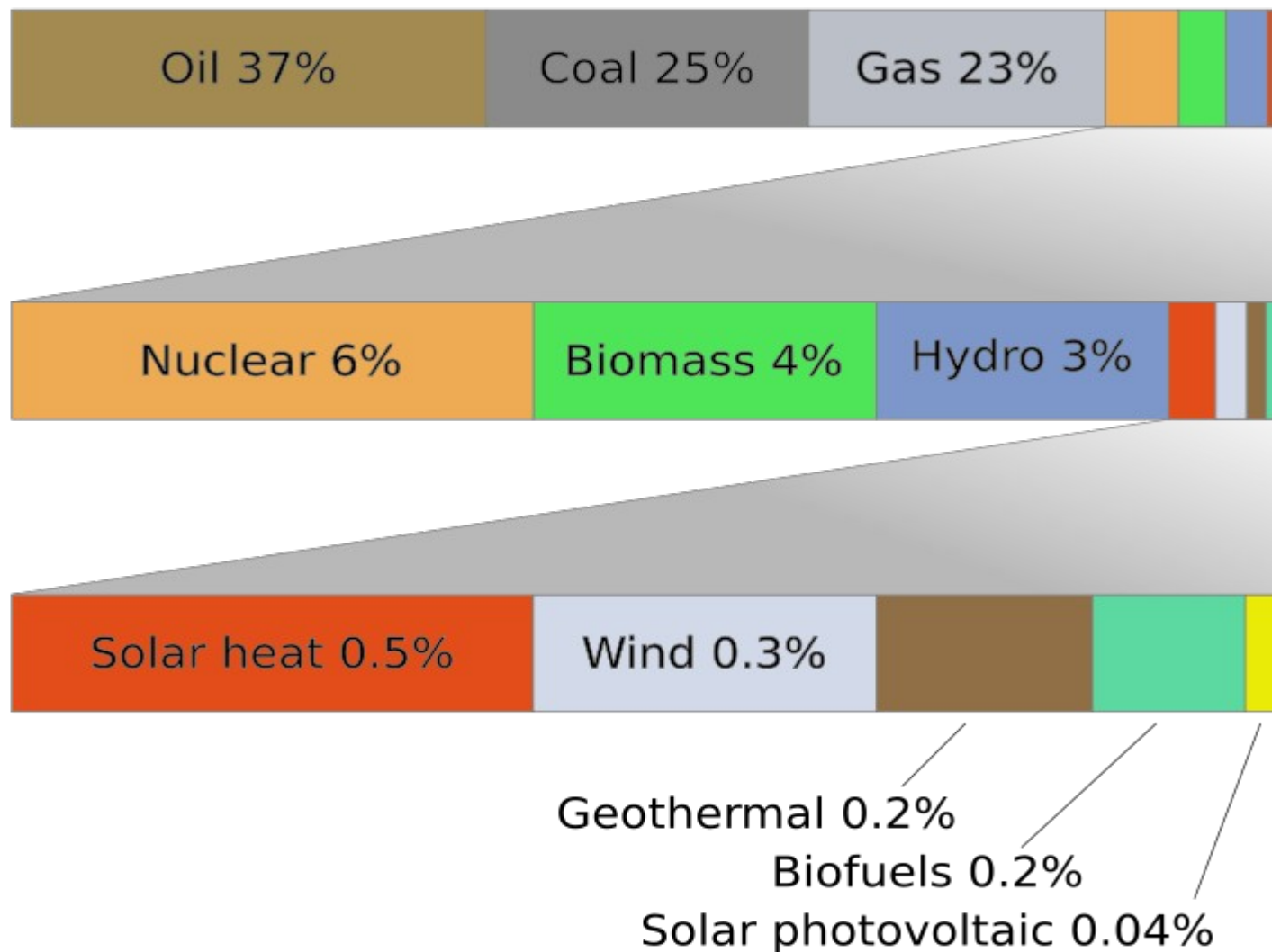


- Le fonti attuali. **Fossili= 65,3%; Idroelettrico= 16,2%; Nucleare= 16,6%**

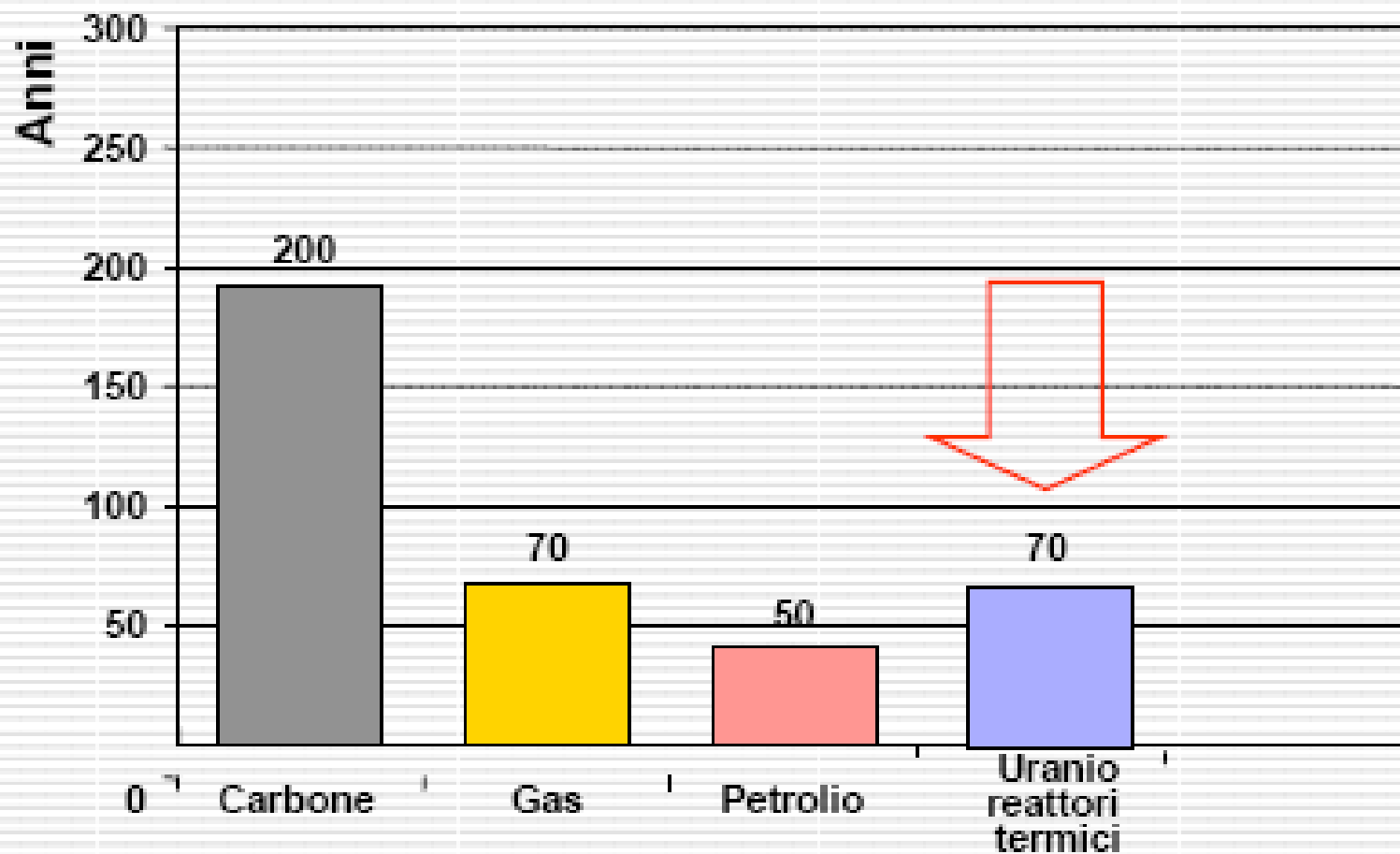




# Consumi mondiali totali di energia

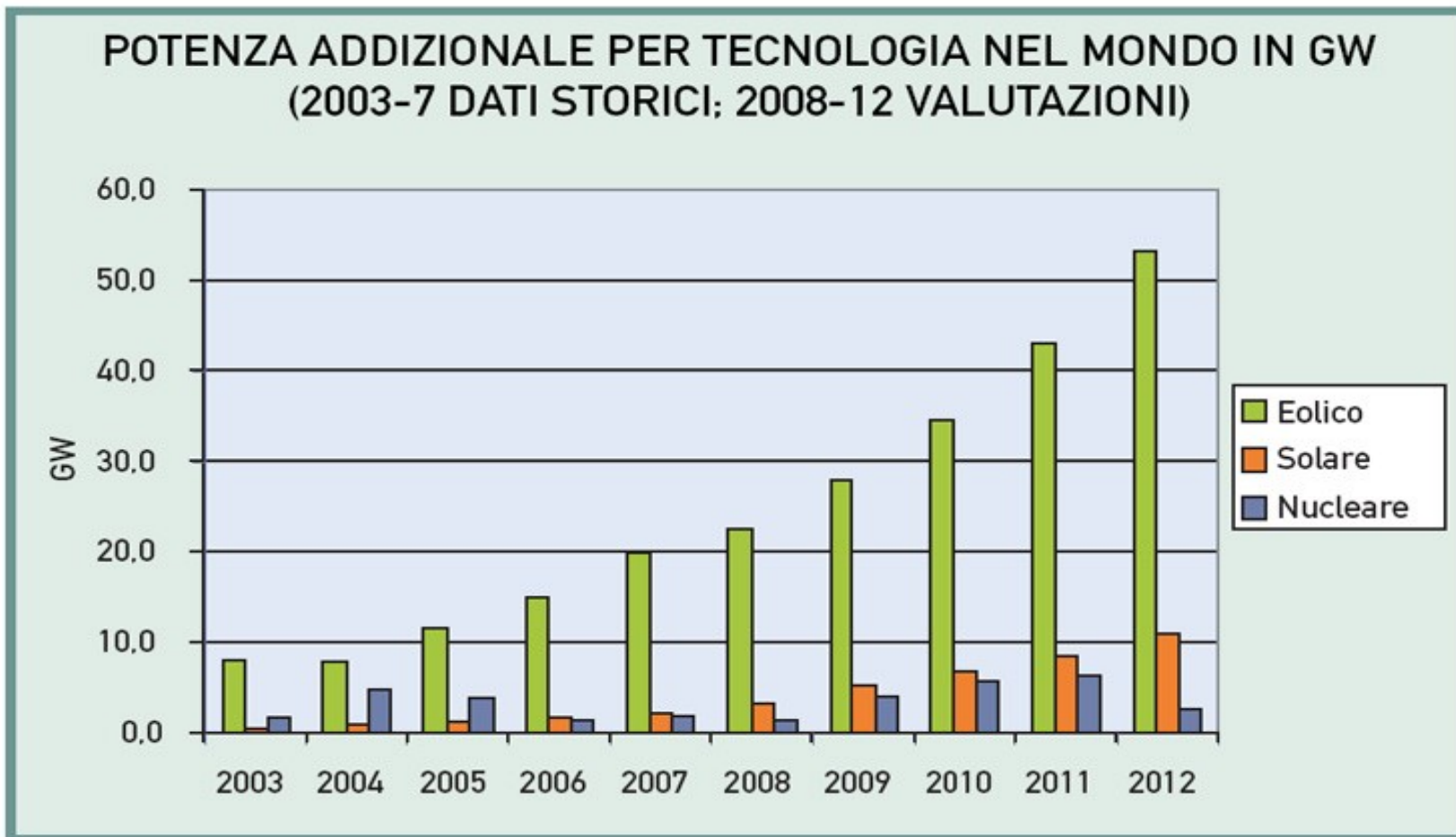


# Le riserve di combustibile



Fonte: dati BP e IAEA del 2003

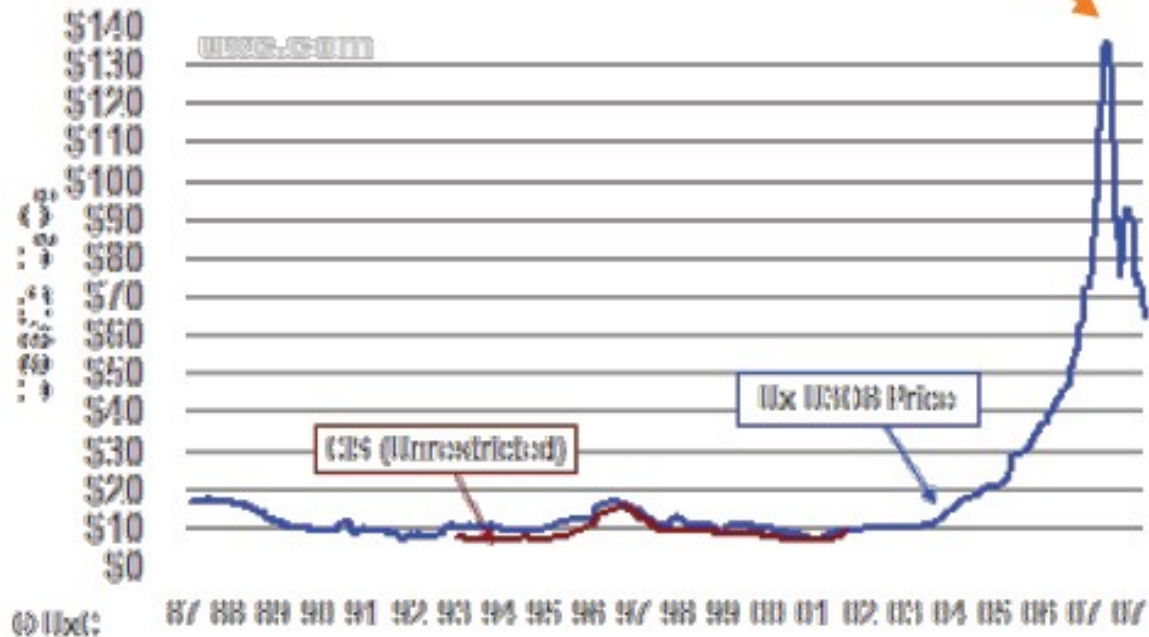
# Le rinnovabili superano il nuovo nucleare



Da Repubblica del 23 maggio 2008

# Prezzo dell'Uranio

Blocco di una centrale da 8.200 MW per terremoto in Giappone



# Emissioni di CO<sub>2</sub>

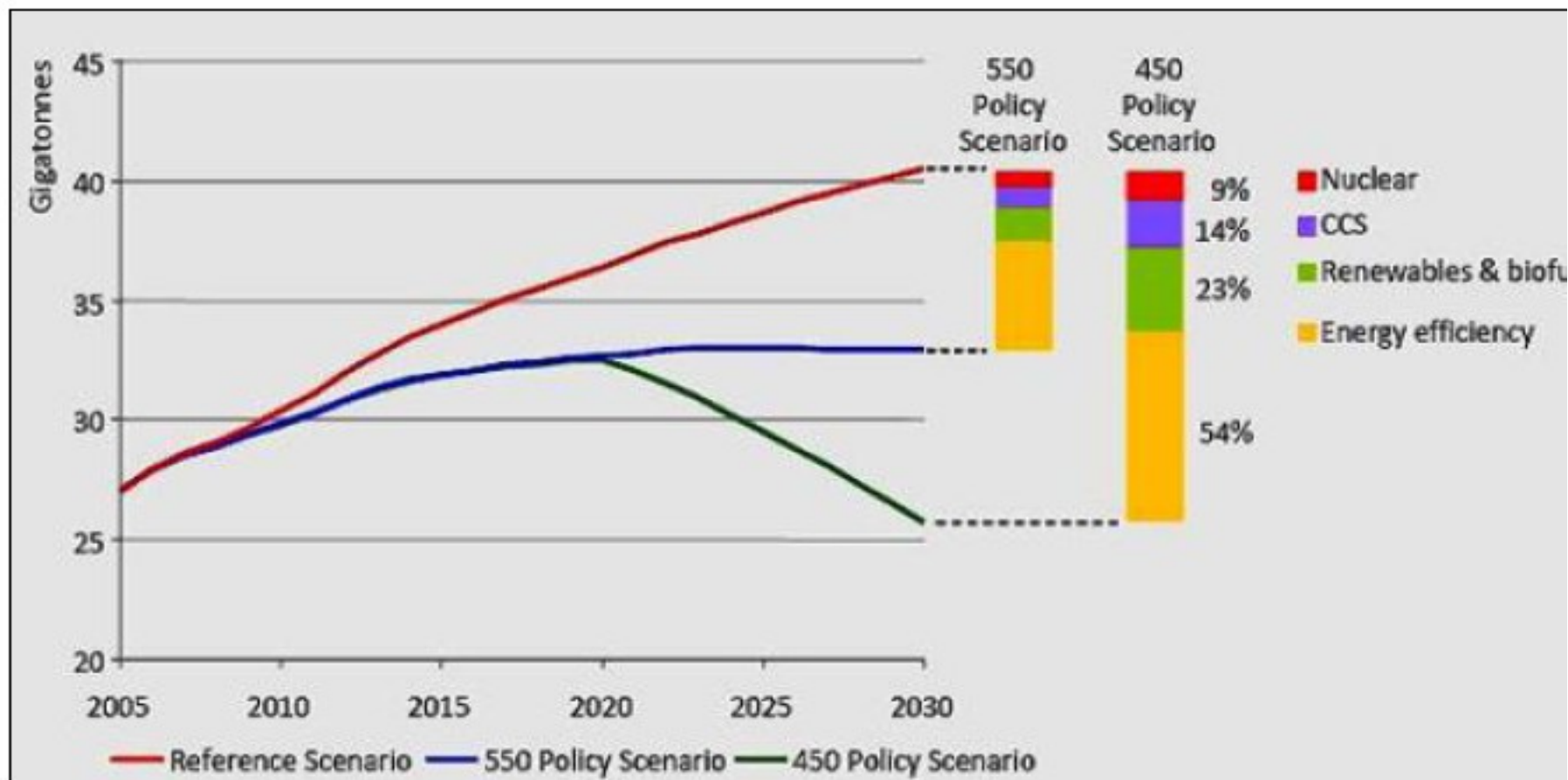


Figura 4: Mix energetico nella generazione elettrica globale per scenari di riduzione delle emissioni di CO<sub>2</sub> da fonti energetiche (fonte: IEA, ETP2008)

# Scenari di Sviluppo

	2005 MTOE	2030 RS MTOE	Produzione %	2030 APS MTOE	Produzione %
IDROELETTRICO	251.6	410.4	+63.1%	415.8	+65.3%
NUCLEARE	720.4	855.0	+18.7%	1 062.6	+47.5%
GAS NATURALE	2367.0	3 864.6	+63.3%	3 372.6	+42.5%
OLIO COMB.	4002.3	5 574.6	+39.3%	4 958.8	+23.9%
CARBONE	2893.0	4 446.0	+53.7%	3 511.2	+21.4%
ALTERNATIVE + COMBUSTIBILE RINN. & WASTE	1200.7	1 949.4	+62.3%	2 079.0	+73.1%
<b>TOTALE (TPES)</b>	<b>11 435</b>	<b>17 100</b>	<b>+49.5%</b>	<b>15 400</b>	<b>+34.6%</b>

*Fonte IEA - KWES 2007*

# Il piano UE 20/20/20 (fine 2007)

- Ridurre la  $CO_2$  del 20% (rif. 1990) entro il 2020 e del 50% entro il 2050
- Risparmio fino al 20% sul TOTALE dell'energia consumata
- Almeno il 20% dell'energia TOTALE da fonti rinnovabili
- 10% da biocarburanti per autotrazione
- Si raccomanda ricorso a energia nucleare e cattura  $CO_2$  nei grandi impianti
- Promuovere ricerca di nuove tecnologie



Tabella 6.3: Rilasci ed emissioni di un impianto da 1000 MWe [t/anno].

	CO <sub>2</sub>	SO <sub>2</sub>	MO <sub>x</sub>	Polveri	Residui di produzione
Nucleare	0	0	0	0	100
Carbone	7.500.000	60.000	22.000	1.300	250.000
Olio comb.	6.200.000	43.000	10.000	1.600	70.000
Gas (ciclo Comb)	4.300.000	35	12.000	100	100
Fotovoltaico	0	0	0	0	0
Eolico	0	0	0	0	0

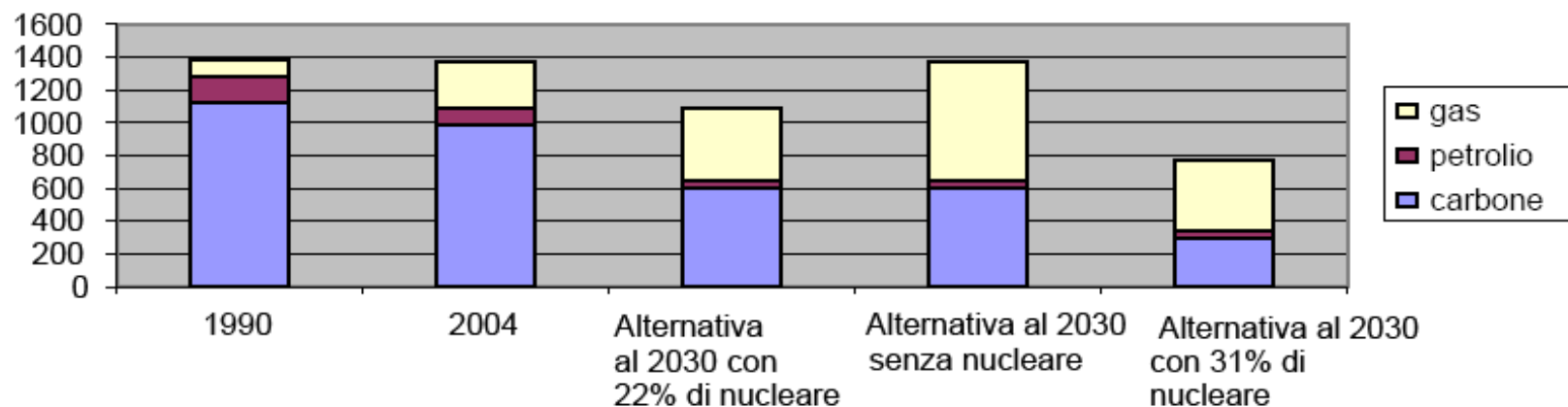


Fig. 6.3: Emissioni di CO<sub>2</sub> da produzione di energia elettrica nell'UE [Mt] (fonte: World Energy Outlook 2006).

**Mantenendo costante la attuale frazione di nucleare  
- 15% di emissioni **totali****

# Né buona né cattiva ...

## Vantaggi:

+ limitate emissioni di CO<sub>2</sub>

## Dubbi/Contestazioni (tecnologia attuale):

? costo kWh

? reperibilità uranio

## Problemi:

- grande investimento iniziale [ ~65% del costo ]
- gestione scorie
- tecnologia [ ad oggi solo U<sub>235</sub> ]
- raffreddamento [ flussi acqua ]

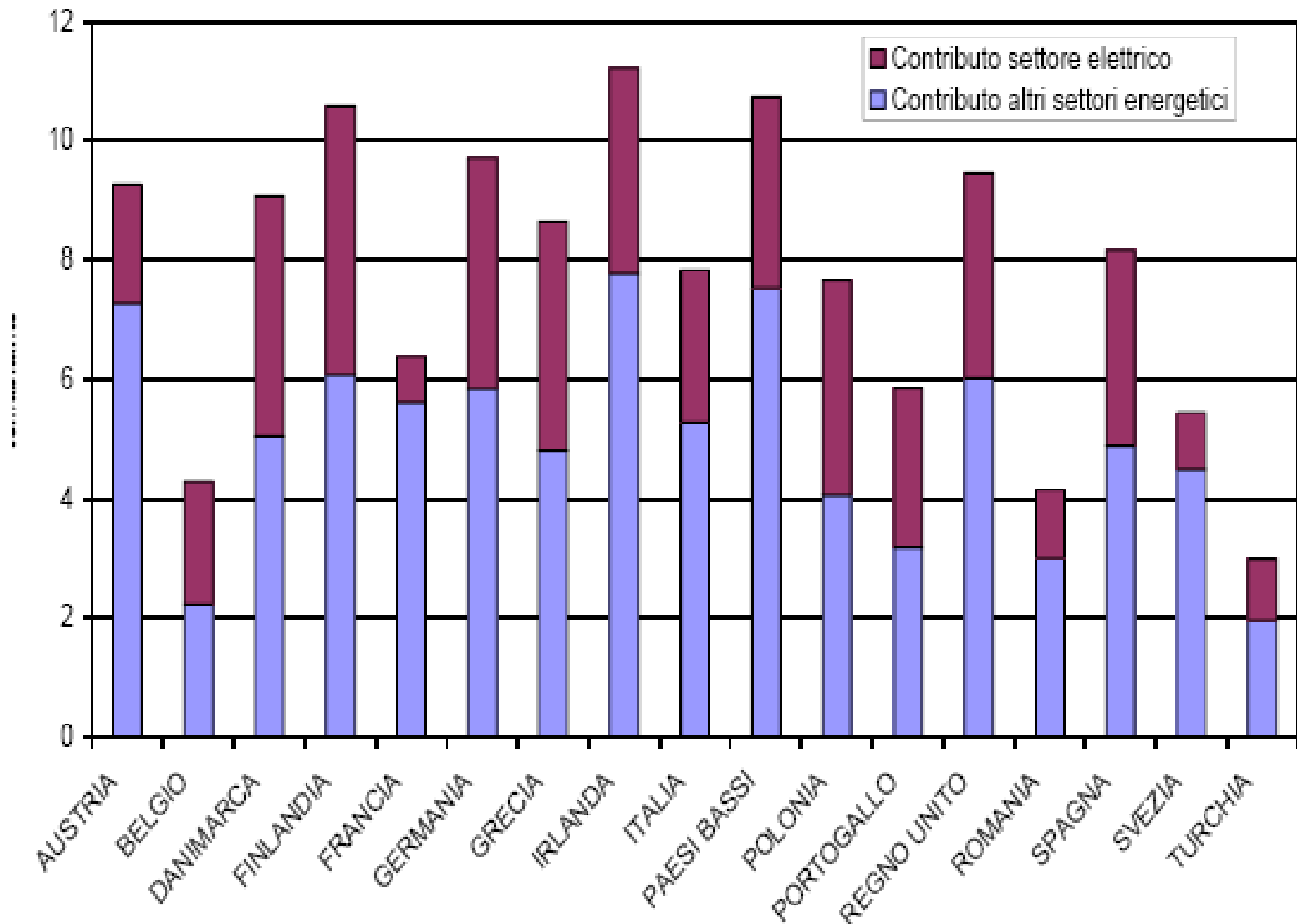
Non è la Soluzione, ma può contribuire alla Soluzione



**Grazie per  
l'attenzione**



# EMISSIONI DI CO2 PRO CAPITE NEL 2005



# Energy Returned On Energy Invested

energia ricavata/energia spesa

## Fossili

*Petrolio* .....5 - 15

*Carbone* ..... 2 - 17

*Gas naturale* .....5 - 6

*Sabbie bituminose* < 1

## Nucleari

*Fissione nucleare* .....5 - 100

*Fusione nucleare*..... < 1

## Rinnovabili

*Idroelettrico* .....30 - 270

*Eolico* .....5 - 80

*Fotovoltaico* .....1 - 9

*Solare Termodinamico* .....4

*Biomassa* .....3 - 27

*Etanolo* .....0,6 - 1