

Applicazioni

Prima applicazione pratica di un radioisotopo

G. de Havesy, Nobel nel 1943

1911, Manchester

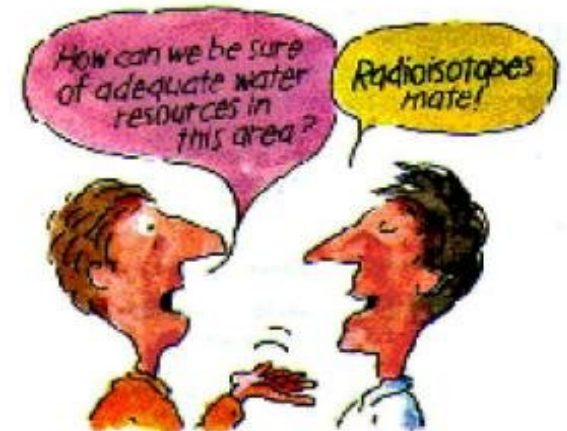
una minima quantità di radionuclide
un elettroscopio



Traduzione: -Non mi è piaciuto la settimana scorsa, perché dovrebbe piacermi questa settimana? -

Radioisotopi come traccianti del ciclo dell'acqua

origine, età e distribuzione delle riserve idriche
interconnessioni tra sorgenti sotterranee ed in superficie
sorgente e velocità di rinnovamento delle acque
dinamica dei fiumi, laghi, bacini artificiali
le correnti oceaniche



Traduzione: - Come possiamo essere sicuri dell'adeguatezza delle risorse idriche in quest'area? -
- Con i radioisotopi, capo! -

Applicazioni

La tecnica degli insetti sterili (SIT)

10% di perdita dei raccolti a livello mondiale

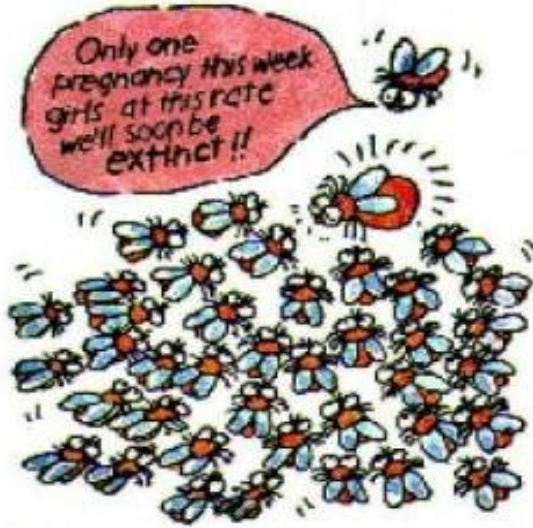
30% in alcuni Paesi in via di sviluppo

diversi aspetti negativi nell'uso di insetticidi

irraggiamento delle uova d'insetto prima della schiusa

allevamento dei maschi sterili in laboratorio

reinserimento nell'ambiente



Traduzione: - Solo un concepimento questa settimana: ragazze, con questo ritmo saremo presto estinte!! -

La conservazione dei cibi

25-30% del cibo immagazzinato va perso

importanza di prolungare la "vita in scaffale"

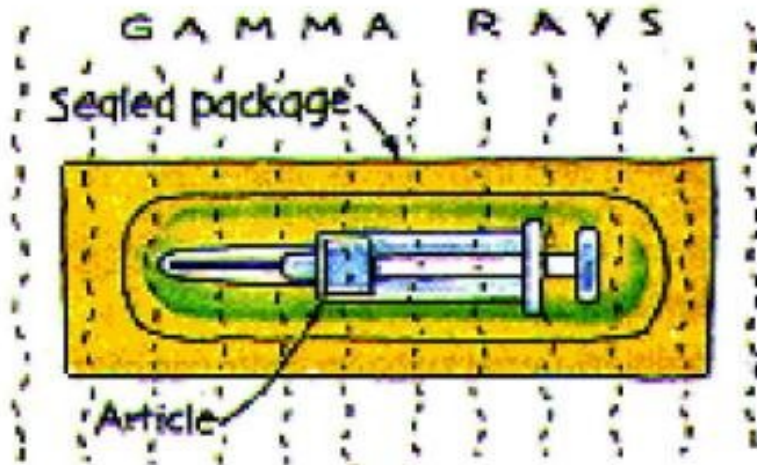
40 Paesi fanno uso di irraggiamento per: spezie, granaglie e derivati, frutta, verdura e carne

buon metodo anche di sterilizzazione dei contenitori



Traduzione: - Com'è che tu sei così fresco e saporito dopo 14 giorni? -
- Sono stato irradiato!! -

Applicazioni



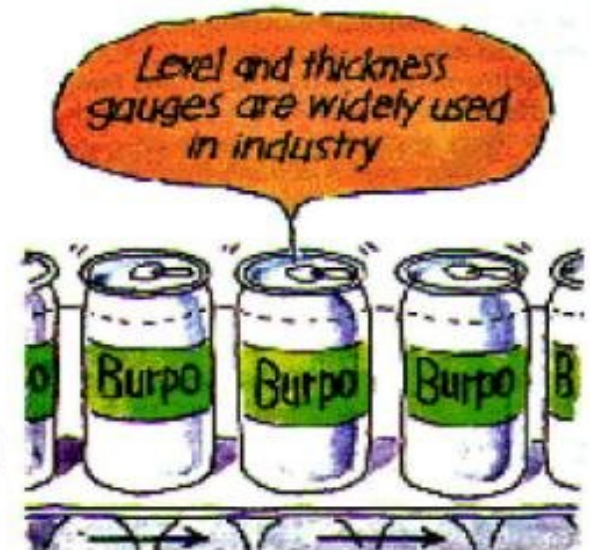
Sterilizzazione industriale

fondamentale in **medicina**
a confezione già sigillata
anche per materiali delicati
unica tecnica per **tessuti biologici**
non costoso e veloce

Traccianti e strumenti di misura nell'industria

controllo di miscele e flussi di **liquidi**, **polveri**, **gas**
individuazione di **perdite** negli impianti e nei dotti
controllo del **consumo** degli ingranaggi

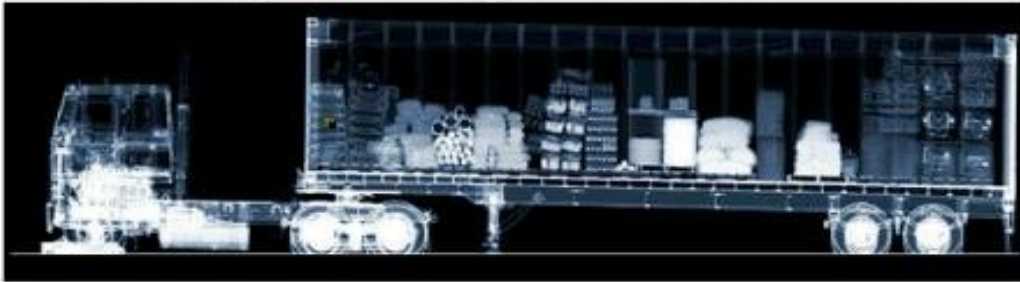
controllo di **livelli** in situazioni estreme
controllo di **omogeneità di spessore** nella produzione di
carta, film plastici, fogli metallici
misuratori di **densità** per il controllo di livello di liquidi



Traduzione: - Misuratori di livello e spessore sono ampiamente usati nell'industria

Applicazioni

Radiografie X, gamma, con neutroni

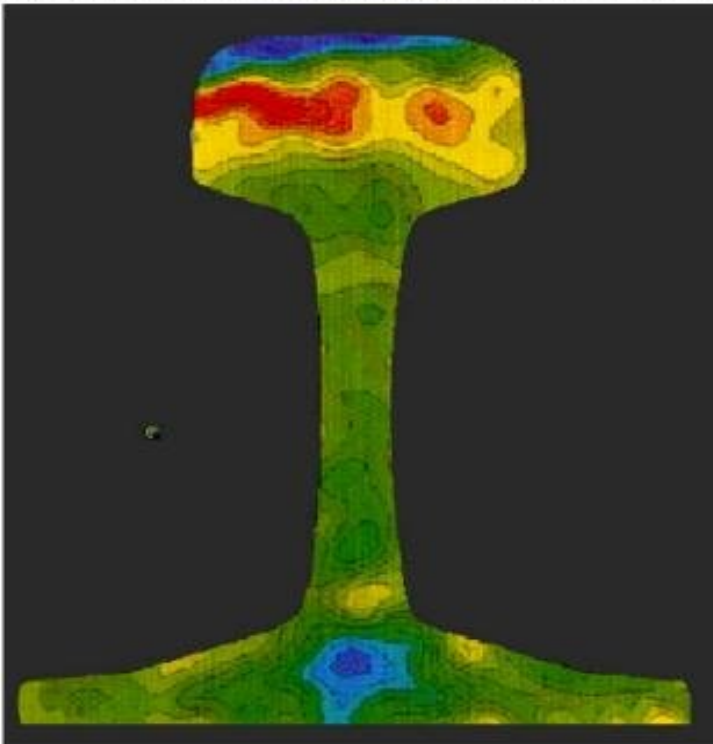


Il carico di un autocarro rivelato ai raggi X

Raggi X (come all' aeroporto)

- Strumentazione **ingombrante**
- Grosso consumo di elettricità
- Radiazione a banda larga
- Può essere spenta in qualsiasi istante

Studio della struttura interna di una rotaia mediante neutroni



Raggi gamma

- Strumentazione **facilmente trasportabile**.
- Radiazione più energetica ed a λ ben definite.
- Non può essere spenta

- Controllo difetti** di colata e di saldatura
- Ispezione interna di componenti critici

Tecniche di analisi con neutroni

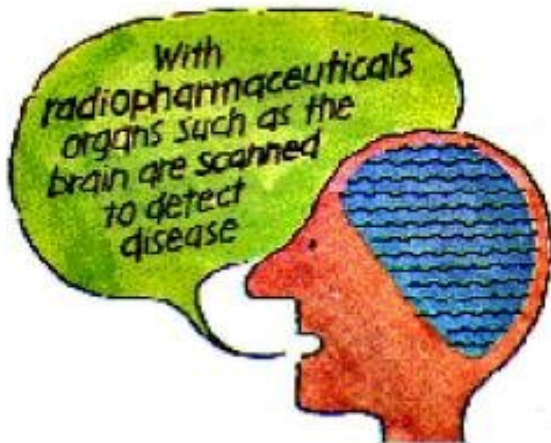
- Studio dell' emissione di **raggi γ caratteristici** dovuti a:
 - Cattura radiativa di neutroni termici
 - Diffusione inelastica di neutroni veloci

- Misura del contenuto di **acqua** nel terreno di un pozzo

- Analisi in linea** e lungo il rullo trasportatore nelle industrie di cemento, del carbone e minerarie in generale

Applicazioni

Medicina nucleare per la diagnosi



Traduzione: - Grazie ai radiofarmaci, organi come il cervello vengono analizzati per rivelare le malattie -

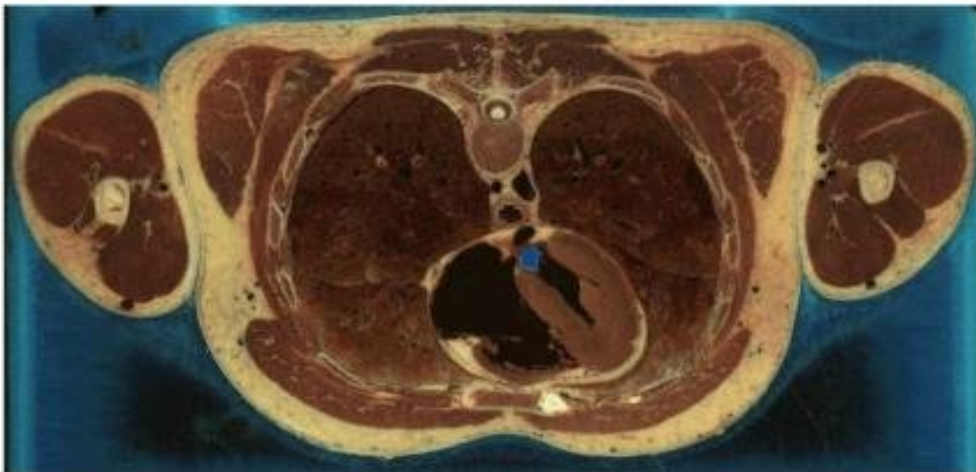
Circa **1** paziente **su 3** beneficia in qualche modo della medicina nucleare

Scintigrafia e PET sono tecniche diagnostiche della medicina nucleare

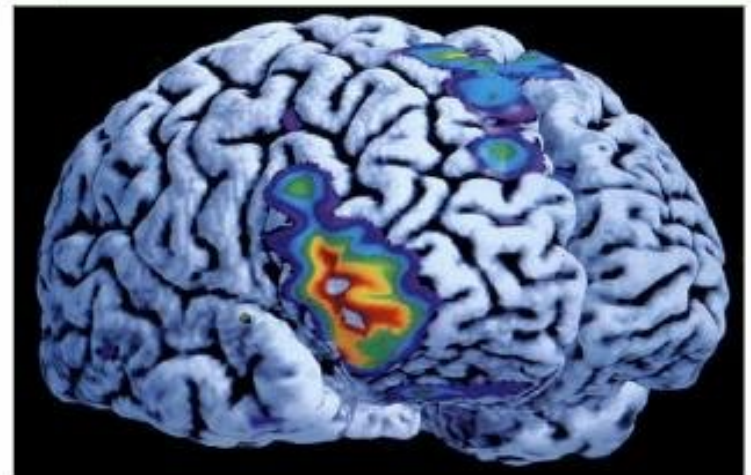
Il radioisotopo **emettitore γ o β^+** viene o iniettato o ingerito o inalato e quindi assorbito dall'organo in studio

L'informazione non è solo statica, ma anche **fisiologica** e riguarda sia tessuti duri (ossa) che molli

Sezione trasversale di un torace ottenuta con una TAC



Zone attive del cervello durante la memorizzazione di parole, rese evidenti dalla PET



Applicazioni

Medicina nucleare per l'analisi



Misura di **minime concentrazioni** nel sangue di ormoni, enzimi, antigeni, virus, medicinali ed altro

Il paziente non entra mai in contatto con i radioisotopi

Traduzione: - Con le prove radioimmunologiche, il sangue è analizzato per ricercare malattie, concentrazioni anomale, ecc. -

Medicina nucleare per la terapia

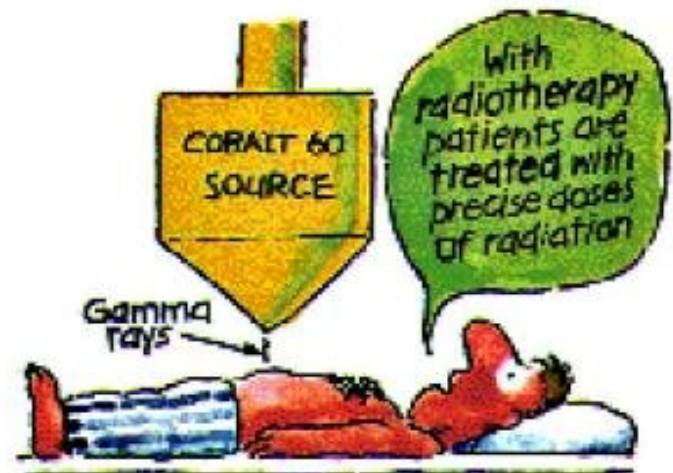
Le cellule in rapida crescita (come il **cancro**) sono molto sensibili ai danni da radiazione ionizzante

Irraggiamento **esterno**: gamma da ^{60}Co , raggi X da LINAC, adroni da ciclotrone

Irraggiamento **interno**: fili di ^{192}Ir inseriti attraverso un catetere, a scadenze fissate (per cervello e polmoni)

Somministrazione di radioisotopi: ^{131}I per la tiroide

Ora anche radioisotopi per la **terapia del dolore** (^{89}Sr e ^{153}Sm)



Traduzione: - Con la radioterapia i pazienti sono trattati con precise dosi di radiazioni -

Applicazioni biomediche

I radioisotopi vengono utilizzati principalmente per:

- Creazione di immagini (imaging): ^{131}I , ^{99}Tc , ^{18}F
- Diagnosi di laboratorio: timidina triziata, ^{125}I
- Circolazione sanguigna: ^{51}Cr
- Radioterapia

L'idea di base di queste tecniche è:

- marcare il tessuto/sistema da analizzare con un radioisotopo
- valutarne la concentrazione (mediante misure di radioattività) in funzione del tempo e della posizione

Studio delle cellule tumorali \Rightarrow Divisione cellulare \Rightarrow Sintesi di acidi nucleici \Rightarrow Presenza delle strutture molecolari di base \Rightarrow Utilizzo della timina come veicolatore \Rightarrow Sostituzione dell'idrogeno ^1H con il trizio ^3H nella timidina (timina + zucchero).

Imaging: Scintigrafia

Per avere un'immagine di un organo interno al corpo umano, di densità simile a quella degli organi circostanti, si rende "radioattivo" per un breve periodo di tempo l'organo che interessa e si studiano le radiazioni emesse.

Scintigrafia: somministrazione di una sostanza radioattiva e misura della sua concentrazione in un determinato tessuto o organo o apparato. Ogni tracciante possiede specificità per uno o pochi degli organi e tessuti del corpo (per esempio il tecnezio per le ossa, lo iodio per la tiroide). Vario uso in biologia animale e vegetale.

Tiroide usa lo iodio per fabbricare l'ormone tiroideo.

^{131}I ($t_{1/2} = 6\text{h}$: immagini)

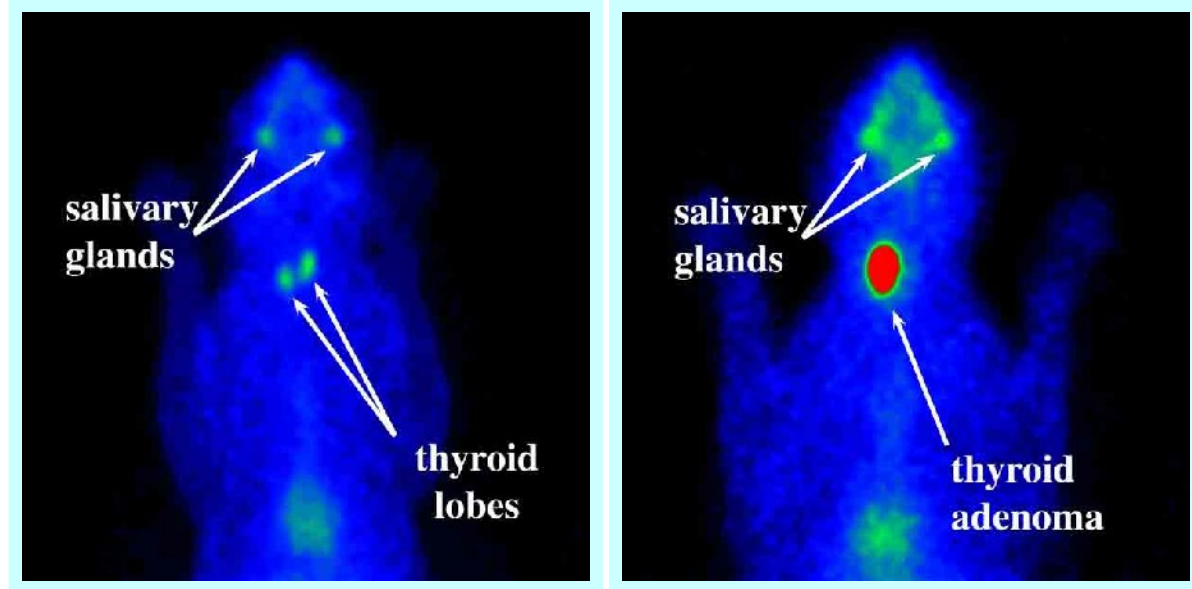
^{125}I ($t_{1/2} = 60\text{gg}$: tracciante)

Lo ^{131}I è un potente emettitore γ e β : rilevando i fotoni e gli elettroni emessi posso valutare la concentrazione dell'elemento nella tiroide.

Imaging: Tiroide

Si può utilizzare il tecnecio sotto la forma $^{99m}\text{TcO}_4^-$:

il pertecnato si concentra inoltre nelle ghiandole salivari e nella mucosa gastrica.

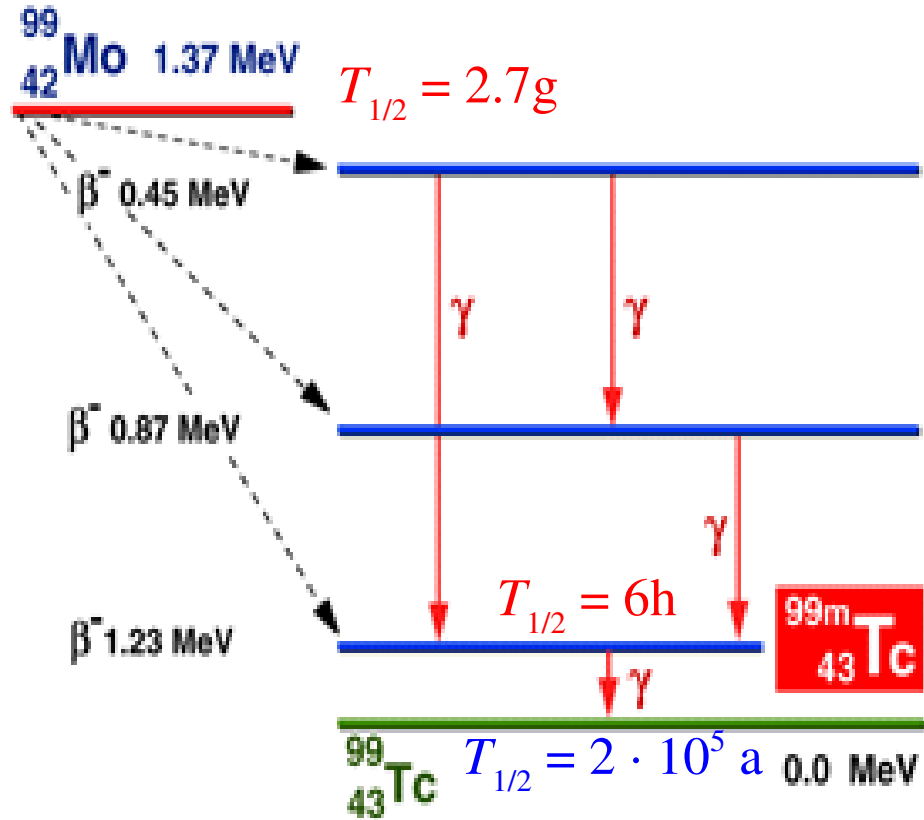


Lo studio della **concentrazione di tracciante** è importante nella diagnostica di processi tumorali: in questi casi le **cellule tumorali** risultano **molto più attive delle cellule sane** ed accumulano, dunque, maggiori concentrazioni di radioisotopo.

Altri radioisotopi dello iodio hanno **vite medie molto lunghe**

Imaging: Scheletro

Utilizza la caratteristica del tecnezio di concentrarsi in modo proporzionale alla vascolarizzazione e nell'osso alla attività osteoblastica, permettendo di valutare il grado di attività metabolica delle ossa dello scheletro



L'utilizzo del **decadimento γ** del tecnezio eccitato



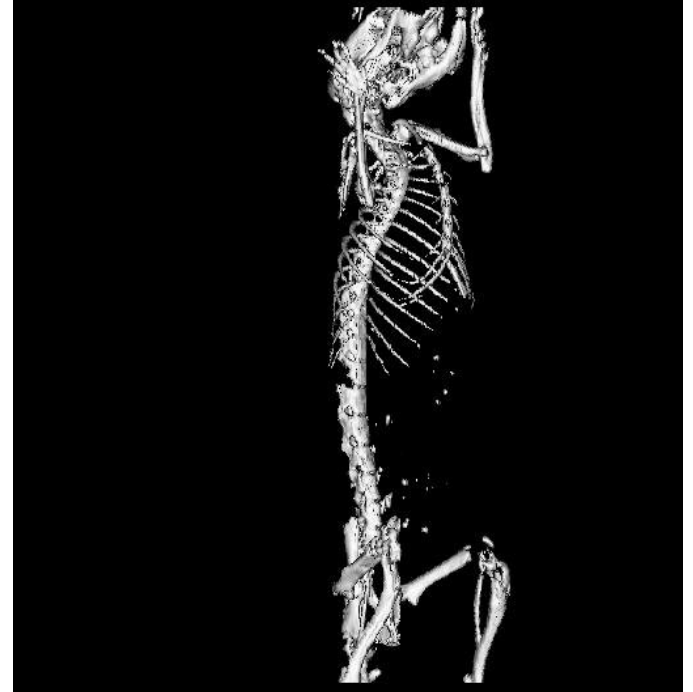
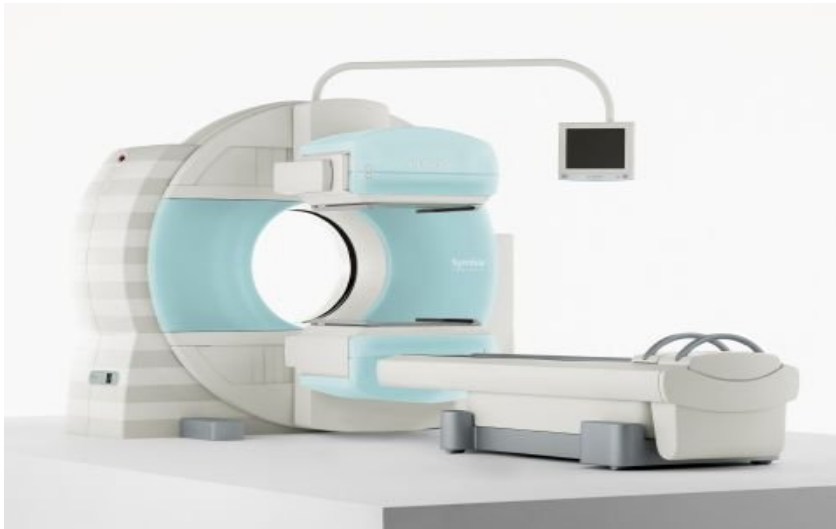
$t_{1/2} = 6\text{h}$, permette **l'esplorazione contemporanea** di tutti i distretti scheletrici, in breve tempo, **con bassa irradiazione e con elevata sensibilità** diagnostica

Imaging: SPET

Versione tomografica della scintigrafia:

single-photon emission computed tomography

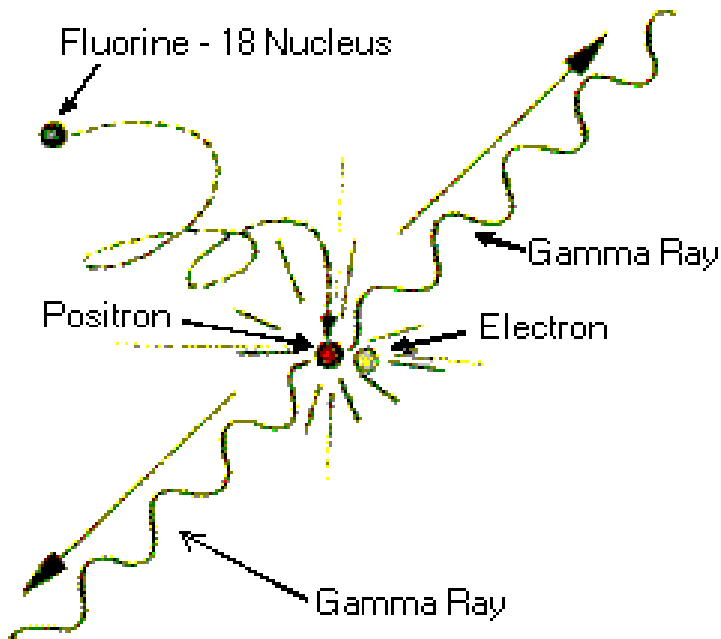
I γ (140 keV) sono praticamente come raggi X, visibili con CCD o meglio con scintillatori (cristalli di NaI) e fotomoltiplicatori che trasformano un singolo fotone in un impulso elettrico misurabile



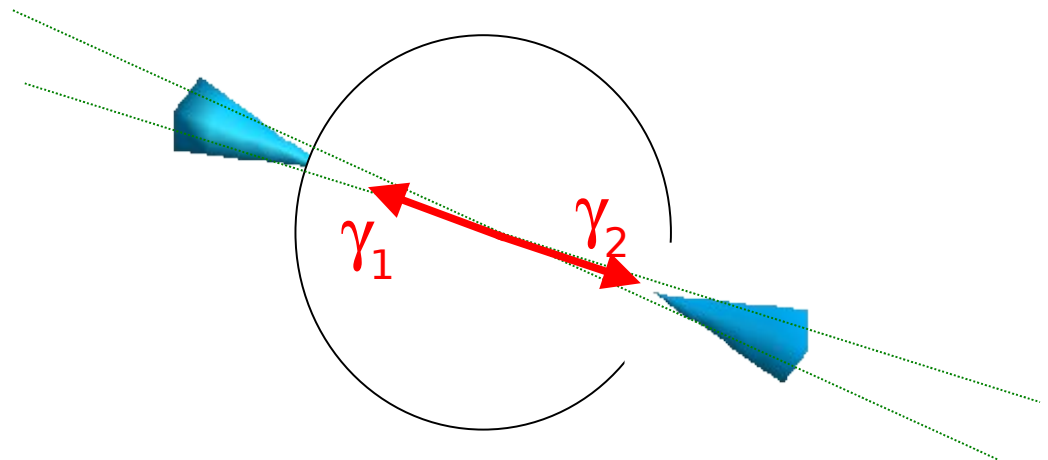
Imaging: PET

Si utilizzano e^+ (da emettitori β^+ come ^{11}C , ^{13}N , ^{15}O , e ^{18}F) per ottenere immagini della PET: tomografia ad emissione di positroni

Il radioisotopo emette il positrone e^+ che, dopo aver viaggiato perdendo energia per non più di 1 mm, si lega con un e^- del materiale / tessuto biologico, annichilendosi e convertendo la massa a riposo in una coppia di γ di pari energia $E(\gamma) \sim 511 \text{ keV}$

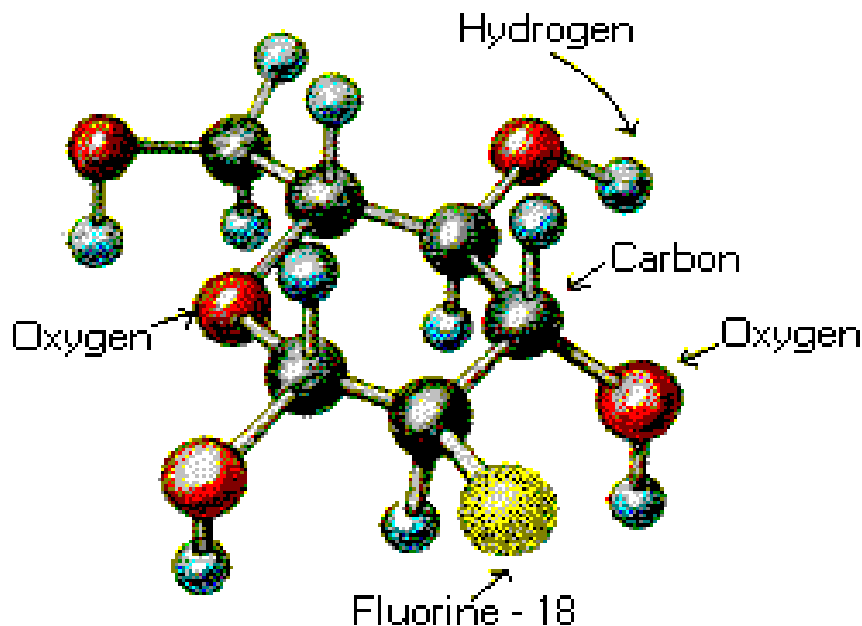


I fotoni vengono emessi in direzioni opposte per conservare l'impulso totale del sistema.



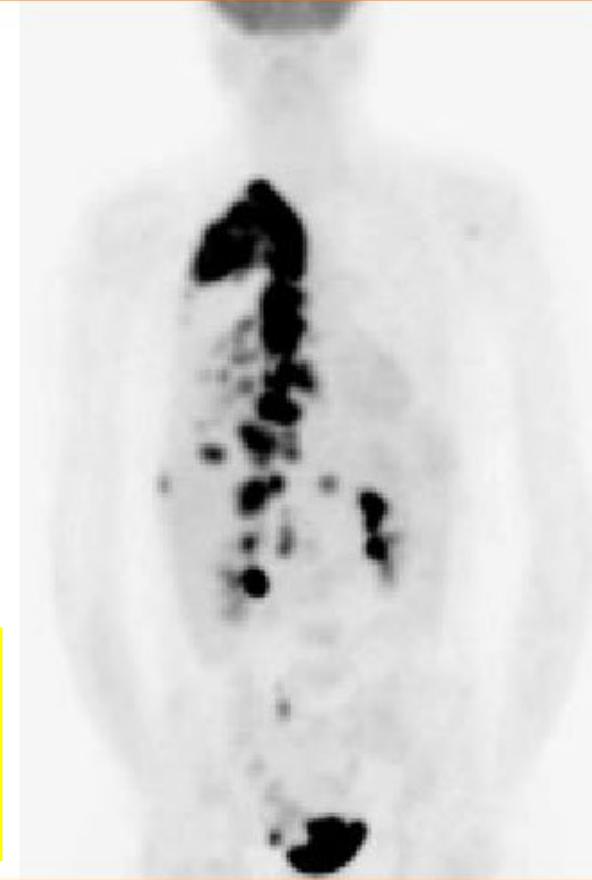
Imaging: PET scan

Nello studio delle cellule tumorali (a metabolismo anaerobio) è stata riscontrata un'efficienza glicolitica più elevata rispetto alle cellule sane: si utilizza pertanto un emettitore β^+ che possa essere facilmente veicolato: un glucosio fluorurato



Medscape®

www.medscape.com



Radioisotopo (^{18}F) che si concentra maggiormente nelle cellule di maggiore attività (tumorali) e meno in quelle sane (o danneggiate)

Radioterapia

Interazione radiazioni-cellule è distruttiva se supera soglia di energia:
utilizzo delle radiazioni per distruggere cellule tumorali (radioterapia).
Somministrazione di un radioisotopo utilizzato dalle cellule da trattare

La BNCT (Boron neutron capture therapy) utilizza Boro (^{10}B): le cellule neoplastiche assorbono in quantità superiore rispetto a quelle sane.

Fascio collimato di neutroni di bassa energia emessi da un mini-reattore nucleare “attiva” il ^{10}B , a ^{11}B arricchito in neutroni, che decade in $\alpha + {}^7\text{Li}$ di alta energia nelle vicinanze dell'area tumorale:



L' α ed il ${}^7\text{Li}$ depositano la loro energia a breve distanza ($\sim 10 \mu\text{m}$, diametro di una cellula).

Potendo iniettare nel tumore un composto contenente ^{10}B (atossico) è possibile distruggerlo in maniera selettiva irraggiando il tumore con neutroni di bassa energia.

Altri esempi

Bombardamento esterno

^{60}Co - si espone l'area interessata ai raggi γ .

Impianto

^{182}Ta - usato come spira, trattamento dell'occhio.

^{137}Cs - usato in un catetere espandibile nel trattamento della vescica.

Terapia interstiziale

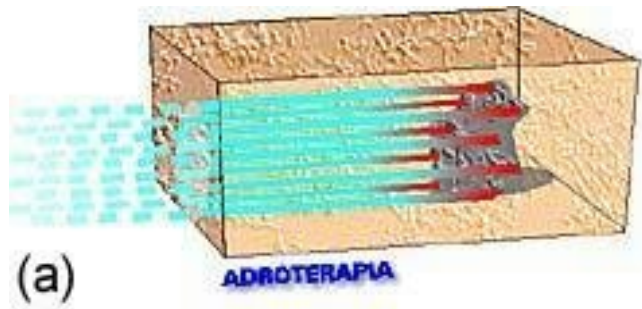
^{196}Au - iniettato direttamente nel tumore.

Irraggiamento interno

^{131}I - per ingestione nel trattamento della tiroide.

Adroterapia

- Figlia più giovane della radioterapia convenzionale X
- Utilizza fasci di protoni (o altri ioni più pesanti) detti *adroni*
- Fascio di adroni rilascia la maggior parte della sua energia alla fine del suo percorso (tumore). Si può quindi aumentare la dose
- Possibilità di irradiare tumori profondi risparmiando tessuti sani
- Protoni da 200 MeV (FQ=5)
- Ioni carbonio rilasciano circa 24 volte più energia dei protoni (FQ=20) in una regione più localizzata, ma necessitano di essere accelerati maggiormente, a 4700 MeV (\Rightarrow acceleratore al Centro Nazionale di Adroterapia Oncologica - CNAO di Pavia)



Applicazioni energetiche del nucleare

Premessa: potenza massima teorica

Irraggiamento **solare** totale fornisce $170000 \text{ TW} \pm 3.5\%$,
di cui termodinamicamente utilizzabile circa 120000 TW

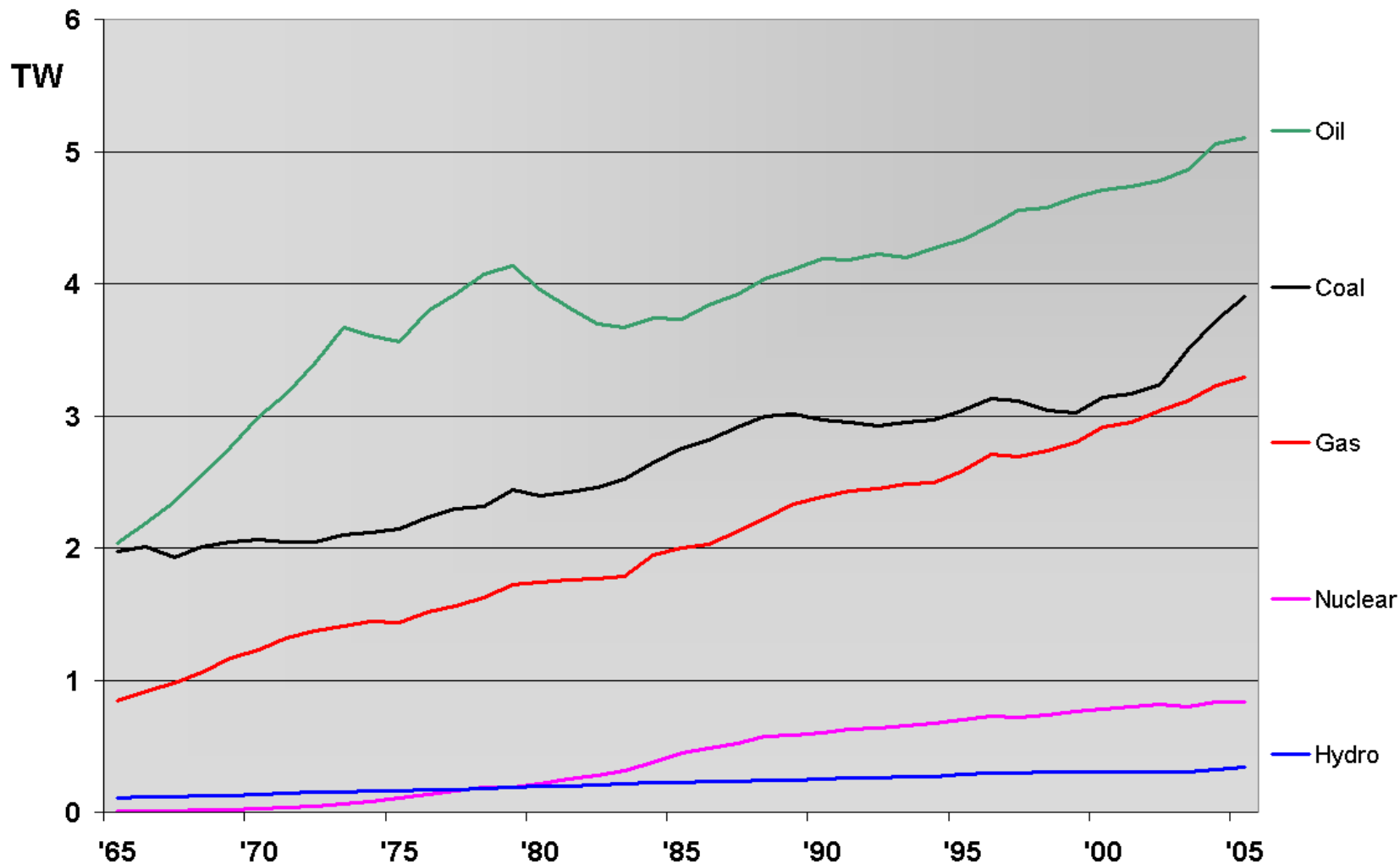
Se bruciassimo **in un anno** tutte le risorse stimate di **combustibili fossili** (carbone, petrolio e gas) produrremmo una potenza di 13000 TW

Al tasso di consumo attuale, 15 TW , **esauriremmo le risorse fossili totali in circa 850 anni** (petrolio e gas molto prima)

In realta il consumo aumenta!

Evoluzione dei consumi energetici

Fabbisogno energetico mondiale **totale** 2005 = 15 TW \pm 10%



Previsioni WEC

- Aumento popolazione mondiale
- Aumento popolazione nelle città (10 città con oltre 20 milioni di abitanti)
- Aumento generale del benessere
- Aumento esplosivo della richiesta di energia dei paesi in via di sviluppo
- L'energia elettrica è comoda e pulita rispetto ad altre sorgenti di energia
- L'energia elettrica è poco utile per trasporti individuali

Situazione attuale

- Combustibili fossili (petrolio, carbone e gas) forniscono circa 90% dell'energia **totale**
- Idroelettrica il 3%
- Nucleare il 7%

e nel 2050?

Confronto impatto ambientale

Materiale	Energia (kWh/kg)
Legno	2
Carbone	4
Petrolio	6
Uranio (PWR)	50 000
Uranio (FBR)	2 500 000

Per produrre 3000 MW	Potenza (MW)	Superficie (km ²)
Nucleare	3000	1.5
Gas	3000	1.5
Carbone	3000	3
Pannelli solari	3000	60-150
Eolica	3000	150-300

Per produrre 1000 MWh con centrale di tipo:	Combustibile (tonnellate)	Volume per alimentare centrale da 1000 MW
Nucleare (FBR – fast breeder reactor)	0.0004	1 camion all'anno
Nucleare (PWR – pressurized water reactor)	0.02	1 camion alla settimana
Petrolio	170	1 petroliera ogni 3 settimane
Carbone	250	2 o 3 treni al giorno

Confronto con centrale a carbone

Centrale di 1000 MW produce ogni anno

- 6 000 000 tonnellate di anidride carbonica CO_2
- 44 000 tonnellate di anidride solforosa SO_2
- 22 000 tonnellate di ossidi d'azoto NO_x
- 320 000 tonnellate di ceneri (tra cui 400 t di uranio, torio & c.)

Centrali nucleari non producono SO_2 , NO_x , gas dell'effetto serra, polveri.

Producono invece scorie radioattive, solide, in quantità (massa e volume) relativamente limitate (specialmente FBR)

Confronto costi

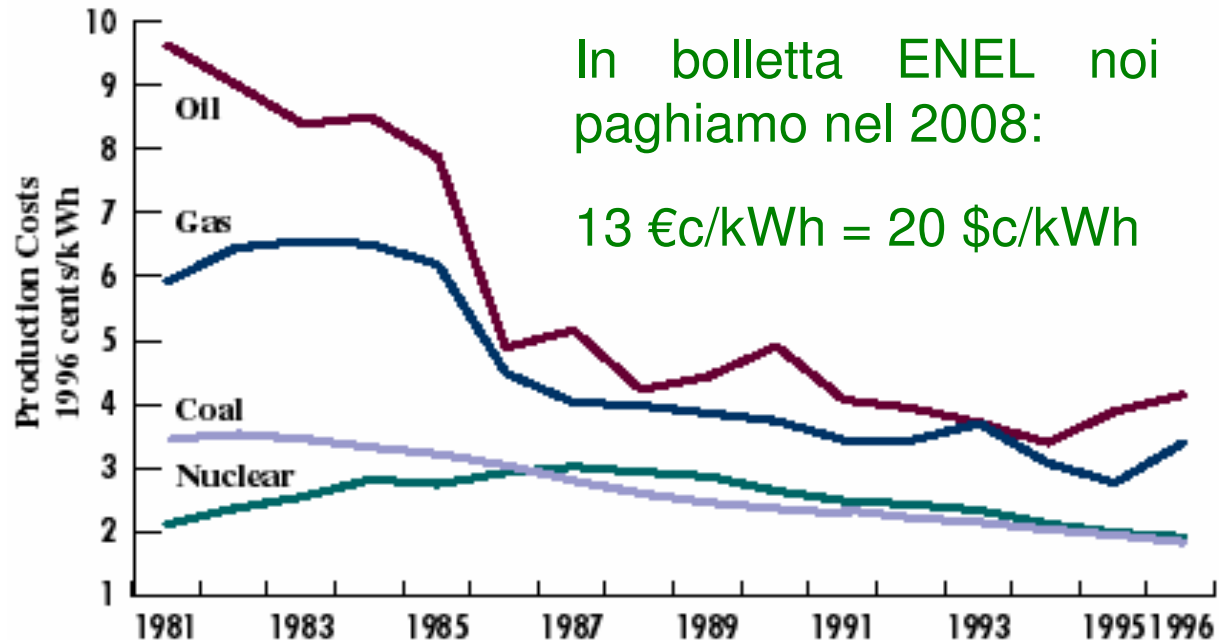
Dati **NEI** (Nuclear Energy Institute - USA)

Secondo Greenpeace i costi reali del nucleare sono molto meno competitivi

I costi di eolico e tecnologie basate su maree e correnti si aggirano sui livelli attuali del petrolio (molto più cari di carbone e nucleare)

Electricity Production Costs

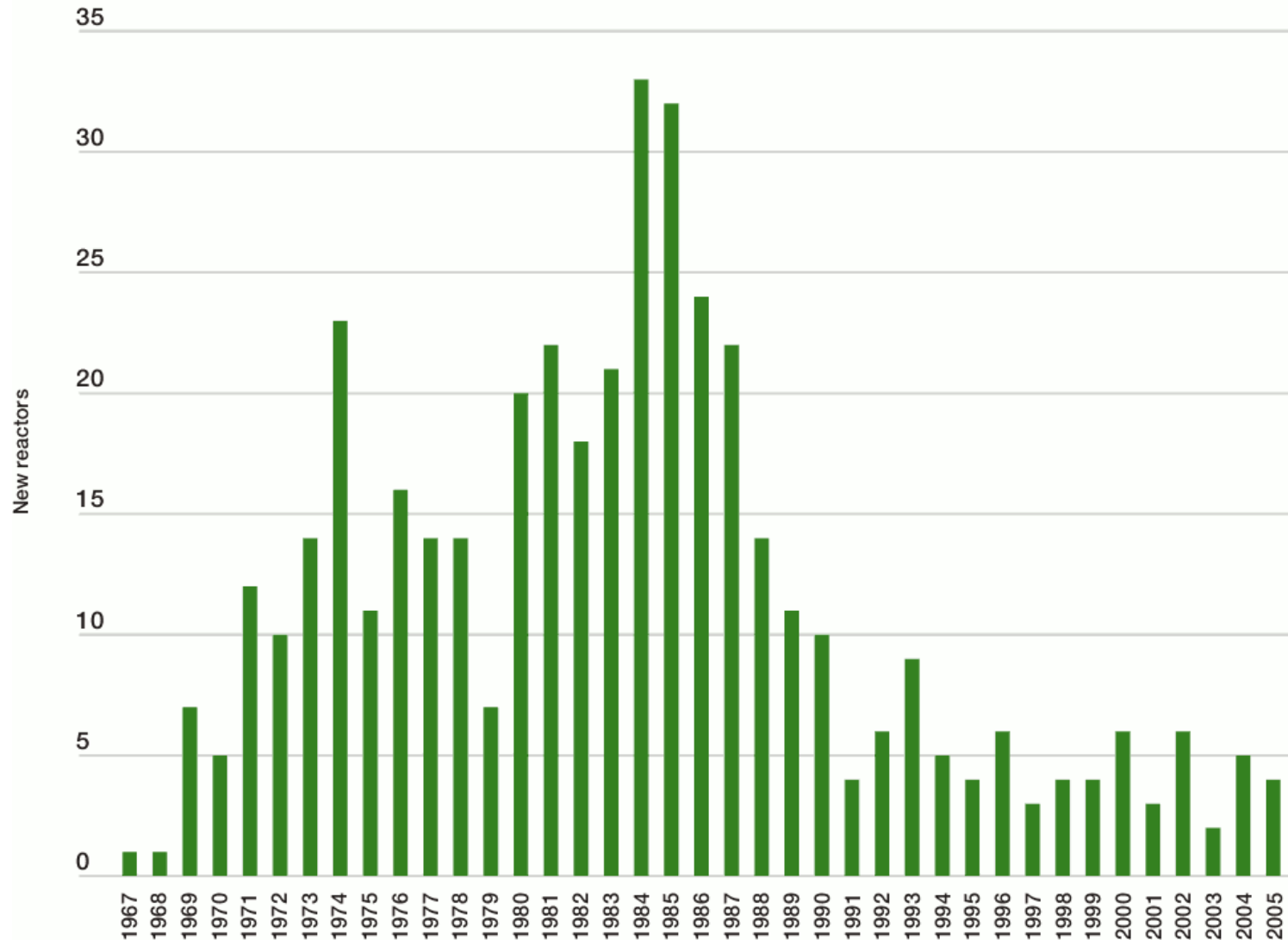
(1996 dollars)



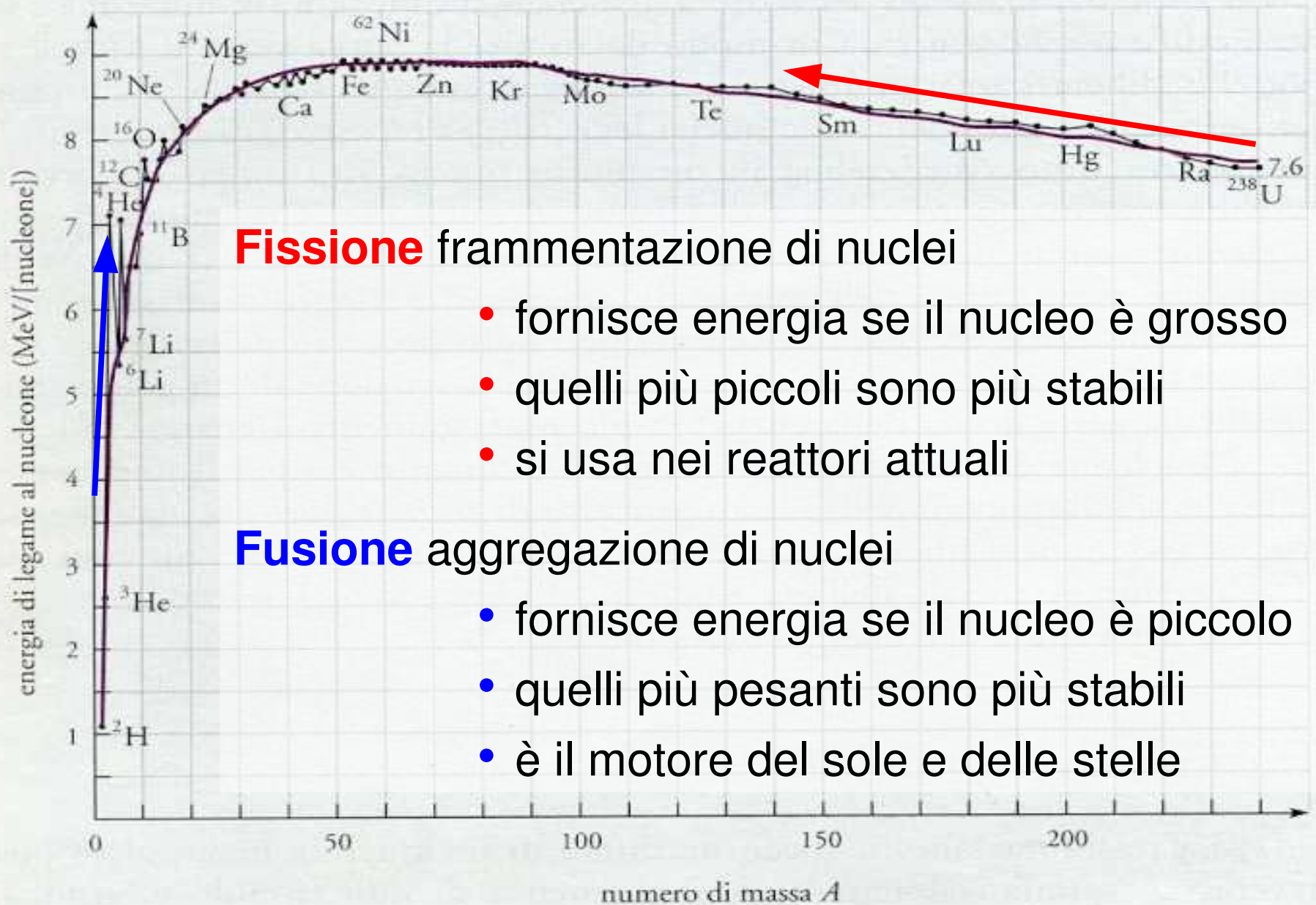
Year	Production Costs (2007 \$c/kWh)			
	Coal	Gas	Nuclear	Petroleum
1995	2.48	3.60	2.60	5.64
2000	2.07	7.00	2.09	6.28
2005	2.34	8.04	1.81	8.71

La prova dei fatti?

Figure 1.1 Installation of new nuclear capacity onto grid



Energia nucleare

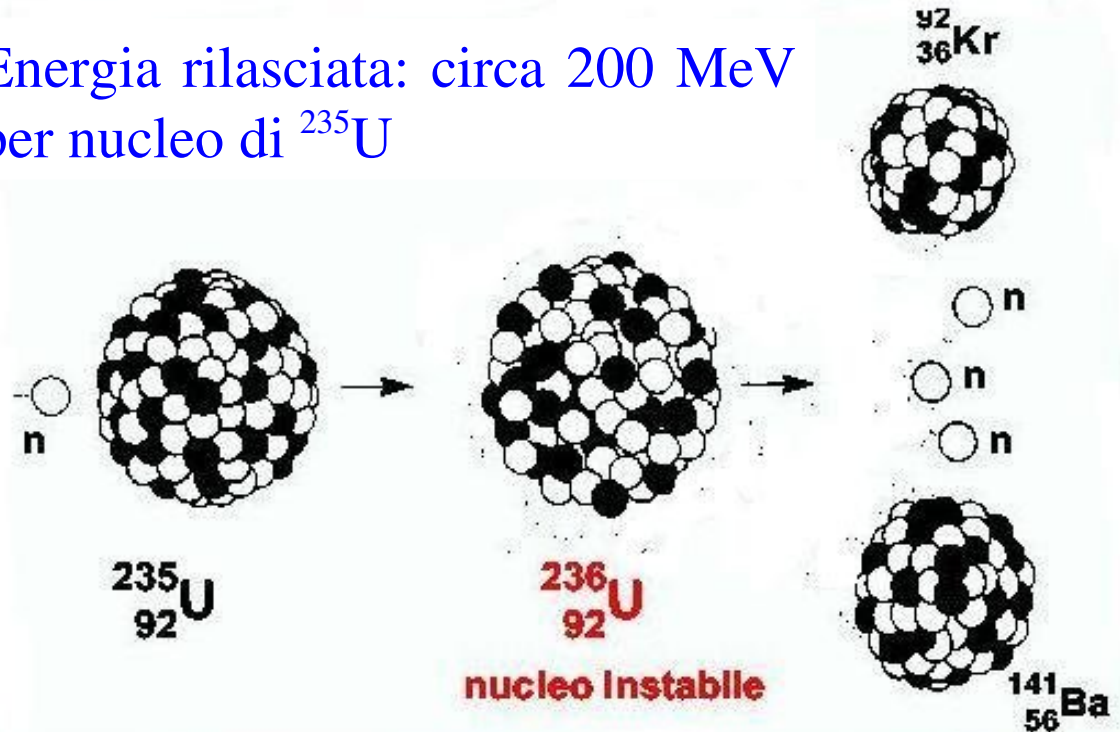


Fissione

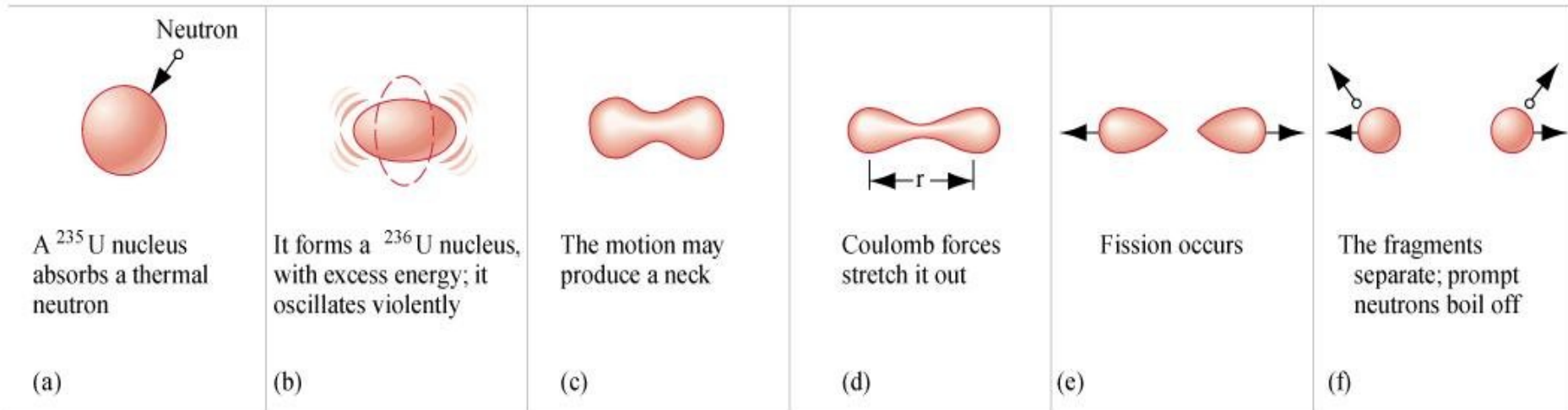
Nel 1938 Hahn e Strassmann scoprirono la fissione

^{235}U bombardato
con neutroni lenti
si spacca in due
parti di massa
simile

Energia rilasciata: circa 200 MeV
per nucleo di ^{235}U



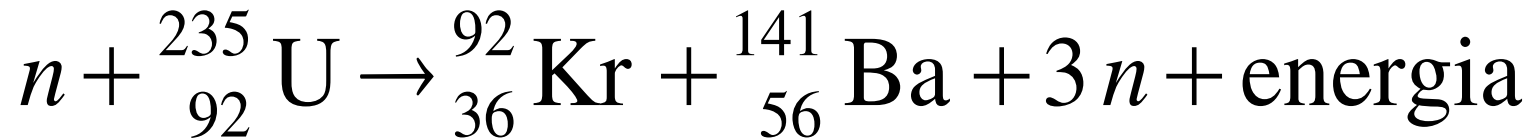
Processo di fissione



Si ha liberazione notevole di energia (circa 200 MeV per nucleo di uranio), in quanto la massa dell'uranio è notevolmente maggiore della massa totale dei frammenti di fissione più i neutroni (i nucleoni in ^{235}U sono meno fortemente legati che nei suoi frammenti)

La reazione di fissione

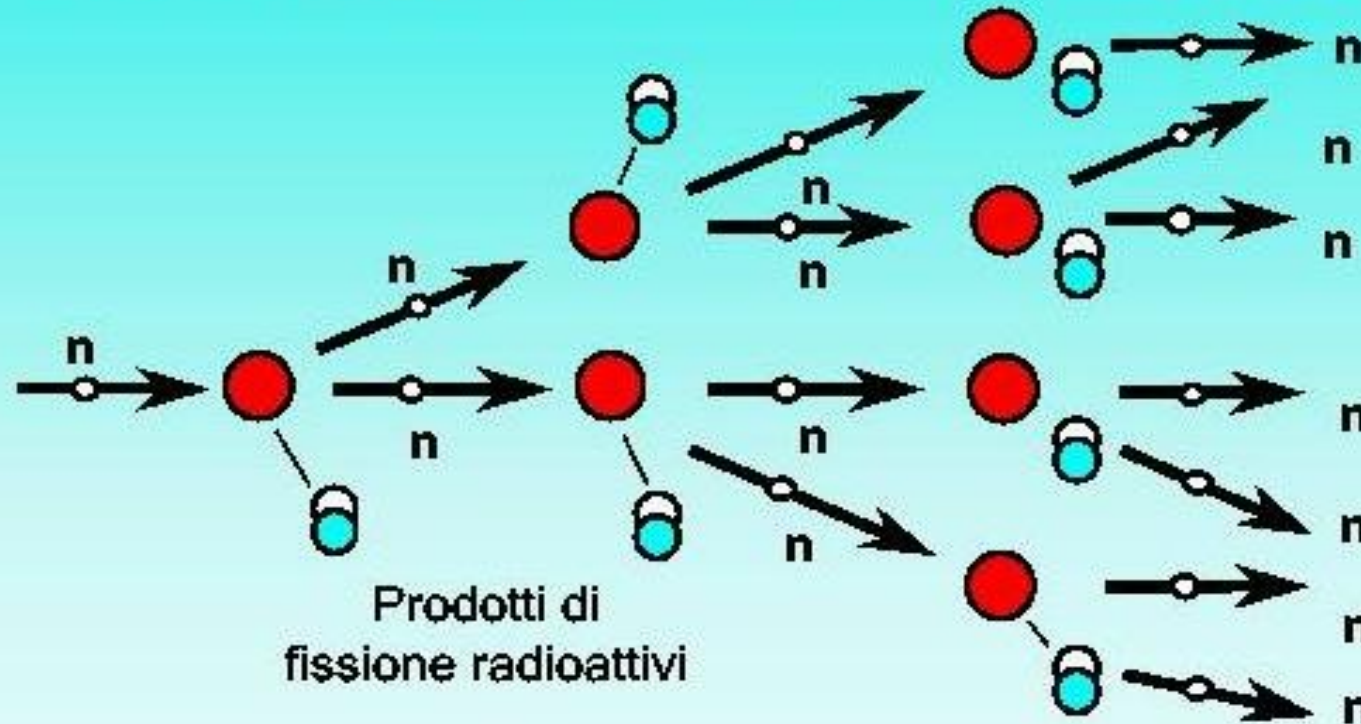
Esempio di reazione di fissione:



(ci sono altre possibilità di nuclei prodotti!)

Reazione a catena

Si instaurano quando i neutroni prodotti sono superiori a quelli decomposti o sfuggiti (neutroni iniziano e sostengono la catena).



La massa critica del materiale fissile per cui si autosostiene il processo è di 5-15 Kg nel caso del Plutonio. Altri materiali fissili impiegati come combustibili in centrali nucleari: U-235 e U-233.

Criticità

- **Reazione critica:** quando il numero di neutroni da fissione assorbiti da altri nuclei di combustibile ogni secondo è identico al numero di nuclei che fissionano al secondo (*centrali nucleari*)
- **Reazione subcritica:** quando vanno persi più neutroni di quanti necessari a sostenere la reazione (*spegnimento centrali nucleari*)
- **Reazione supercritica:** quando vengono catturati un eccesso di neutroni, in modo che il tasso di reazione tende (per un po') ad aumentare esponenzialmente nel tempo (*bombe nucleari*)

Problemi della fissione

- **Moderatore:** rallenta i neutroni veloci prodotti dalla fissione (i neutroni lenti aumentano la probabilità di cattura da parte dei nuclei). I migliori moderatori sono il deuterio (acqua pesante) e l'idrogeno (ma assorbe neutroni); si usa anche il carbonio (grafite)
- **Arricchimento:** aumenta la concentrazione di ^{235}U , fissile, che è il meno abbondante, aumentando la probabilità di fissione dei nuclei
- **Massa critica:** massa minima di uranio necessario per autosostenere la reazione, perché molti neutroni si perdono dalla superficie, quindi meno la superficie del combustibile, meno è la frazione che si perde

Reattore nucleare

Ne esistono di vari tipi in dipendenza degli anni di costruzione.

Reattori ad acqua normale

usano l'acqua normale come moderatore di neutroni e U_2O_3 come combustibile (^{235}U)

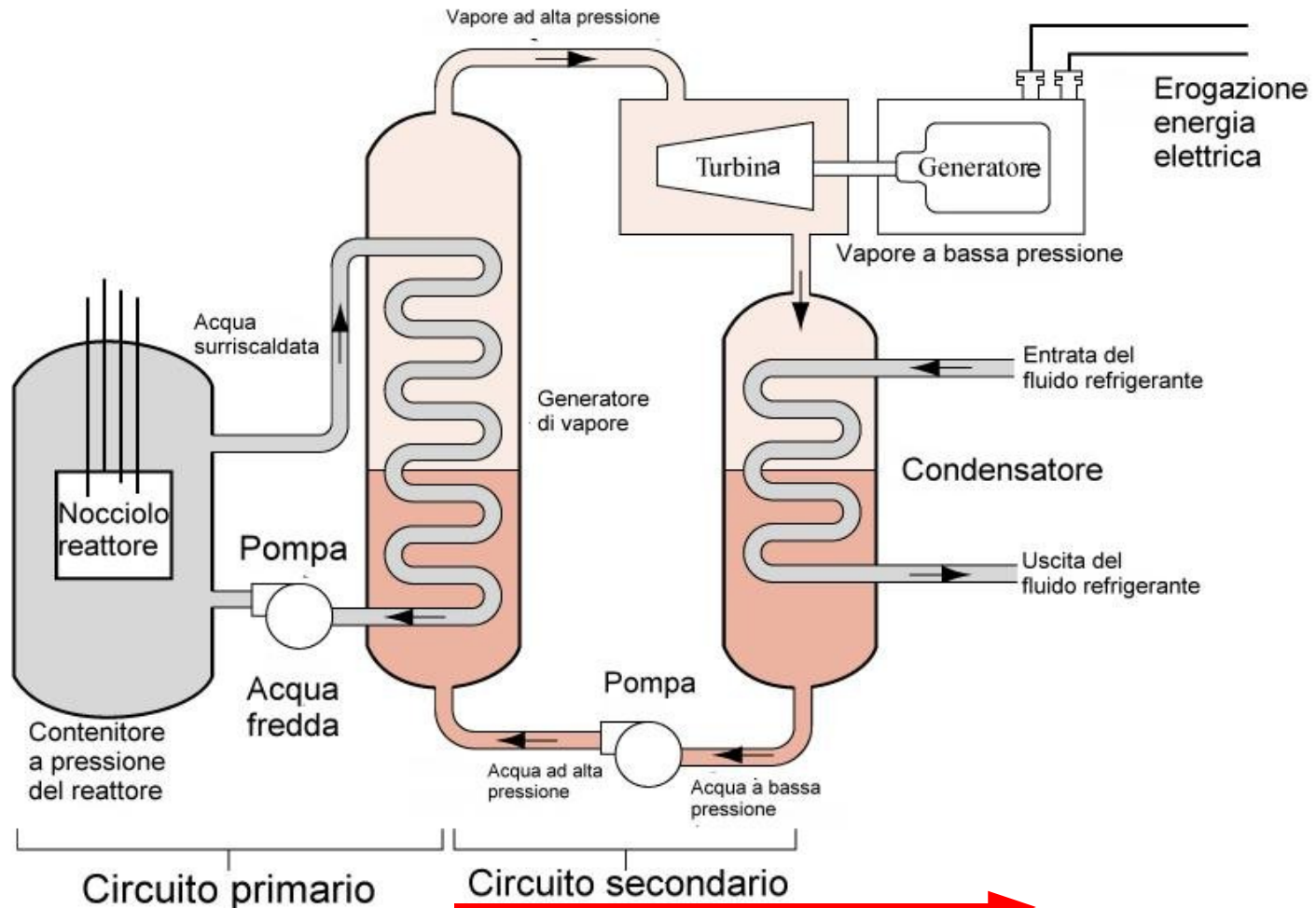
Reattori ad acqua pesante

usano acqua deuterata come moderatore e U_2O_3 come combustibile (U naturale)

Reattori Breeder (autofertilizzanti)

usano miscele di ^{235}U , ^{238}U e ^{239}Pu come combustibile, trasformando ^{238}U in ^{239}Pu .

Schema di reattore nucleare (PWR)

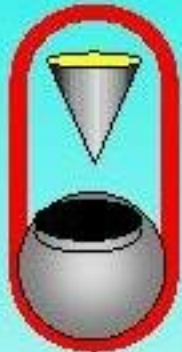


Da qui in avanti è identica a un qualunque centrale termoelettrica

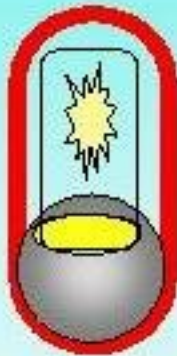
Incidenti nucleari

- **1979 - Three Mile Island (USA):** persona più esposta ha ricevuto 35-40 mSv, negli anni successivi è stato rilasciato ^{133}Xe gas nobile radioattivo in maniera controllata
- **1986 – Chernobyl (Ucraina):** attività totale rilasciata: $1.2 \cdot 10^{10}$ Bq (400 volte più di Hiroshima); alcuni addetti alla sala di controllo morti per sindrome acuta da radiazione, altri sono sani. 31 morti nel primo anno e 9 negli anni seguenti a causa dell'esposizione a dosi eccessive. Sul lungo periodo ci sono stati 900 casi di tumore alla tiroide nei bambini (100 mortali). Nessun aumento dei nati morti o deformi
- **1999 – Tokaimura (Giappone):** 3 lavoratori esposti a 3, 8 e 17 Sv (solo il primo è sopravvissuto). Altre 119 persone esposte a dosi superiori a 1 mSv

Bomba atomica



Si usa un esplosivo convenzionale per aggregare due porzioni di U-235.



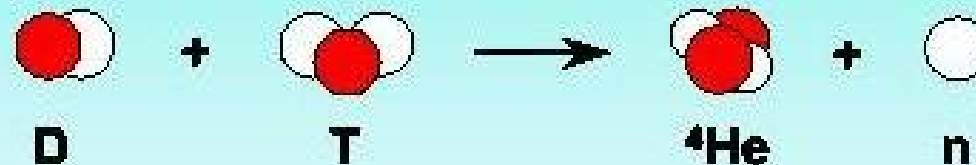
Si raggiunge così la massa critica che innesca l'esplosione.



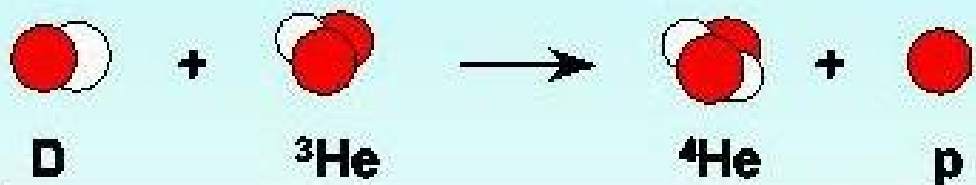
Fusione nucleare



$6.3 \cdot 10^{-13} \text{ J}$



$2.8 \cdot 10^{-12} \text{ J}$



1g di ${}^2\text{H}$ e ${}^3\text{H}$ (50%)
fornisce
 $340 \text{ GJ} = 94 \text{ MWh}$

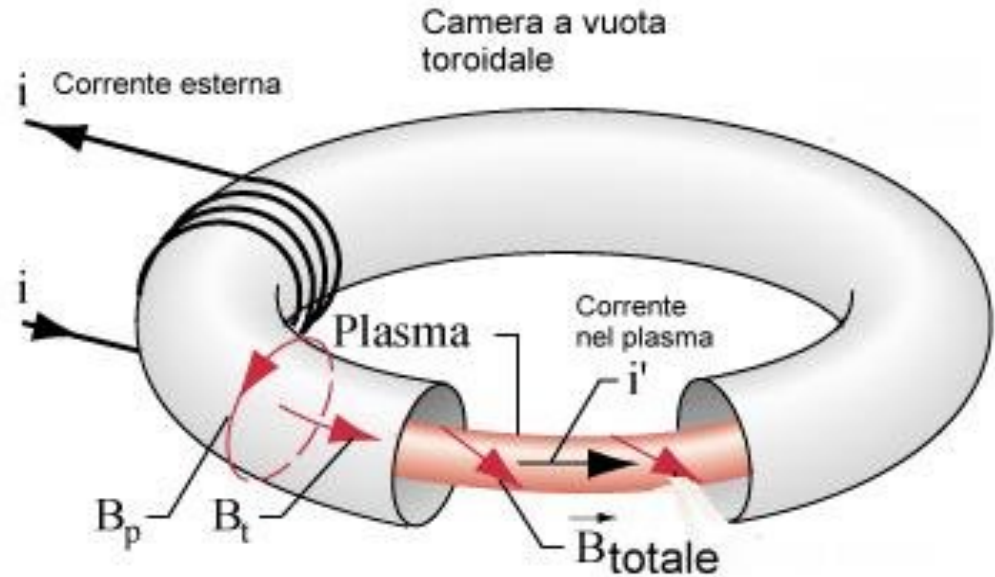


Reazione complessiva

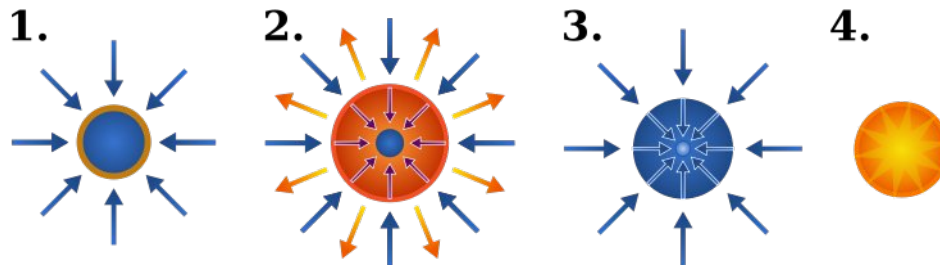
Confinamento

Confinamento
magnetico:

TOKAMAK



Confinamento inerziale (ICF): potenti lasers sono usati per indurre un'onda d'urto che comprime una piccola porzione di ^2H e ^3H , con fusione e rilascio di energia



Reattori a fusione

VANTAGGI

- Il deuterio è facilmente reperibile (anche troppo economico!)
- Niente scorie radioattive a lunga vita media: il prodotto principale è elio, stabile
- L'altro prodotto, trizio ^3H , è radioattivo ma è un intermedio del ciclo chiuso
- Pochissimo combustibile presente nel reattore

PROBLEMI

- Forte flusso di neutroni può indurre attivazione e danneggiare la struttura del reattore
- Neutroni veloci portano la maggior parte dell'energia
- Elevatissime temperature d'innescò (>50 MK)
- Tecnologia (ancora?) commercialmente immatura
- Ricerca molto costosa

Considerazioni finali sull'energia nucleare

Osservazione naive:

Il nucleare ha un ruolo marginale: è solo il 7% dell'energia prodotta nel mondo...

In realtà:

- Il nucleare non serve a produrre energia, ma energia **elettrica**, il suo contributo va quindi confrontato con la produzione di energia elettrica
- L'energia nucleare contribuisce alla produzione elettrica (dati ONU 2002): per il 35 % in Europa, per il 25 % nei paesi dell'OCSE, per il 17 % nel mondo
- Oggi l'energia nucleare è la prima fonte di produzione elettrica in Europa (davanti al carbone), con buona pace dei referendum italiani del 1987

