
METODOLOGIE SPERIMENTALI IN FISICA E ASTROFISICA DELLE PARTICELLE

F.-L. Navarra
mar 2018 2a parte

2a parte

- Accelerator Driven Systems e Energy Amplifiers
– come si possono affrontare alcuni problemi connessi con l'uso dell'energia prodotta dalla fissione nucleare

- Introduzione
- Fukushima et al.
- il panorama nucleare
- interazione dei n con la materia
- moderazione dei n
- reattori a U arricchito
- le scorie nucleari
- ciclo del Torio
- ADS
 - spallazione
 - il reattore
 - esperimenti preliminari
 - il problema dell'acceleratore
- conclusioni

Accelerator Driven Systems: trasmutazione e produzione di energia

- The purpose of accelerator driven systems (ADS) is twofold: on the one hand the **transmutation of radioactive waste** into short lived or stable elements to decrease their radiotoxicity (see p. 56-58). On the other hand **energy production** with thorium rather than uranium as basic fuel. While countries like China or India are most interested in the energy production aspect, in countries which already do have a lot of radioactive waste the transmutation aspect is of primary interest.
- The disposal of nuclear waste is an urgent problem (see p. 54-58). In the EU more than 100 t of Pu need to be disposed of - the half-life period of Pu is 24360 years ! Worldwide the amount of Pu increases by more than 70 t/y. Till the year 2035 the USA will have 70000 t of nuclear waste of which 600 t of ^{239}Pu .

ADS: trasmutazione e produzione di energia/2

- In addition, since 3/4 of the present nuclear reactors are older than 20 y (see p. 21) and the lifespan of a nuclear reactor usually is assumed to be 30 - 40 y, many reactors will have to be shut down or replaced in the near future. Germany intends to close down a nuclear power plant after 32 y, in France the limit is 50 y and in Sweden and the USA the limit is 60 y (see also p. 18).
- The share of nuclear power in the electricity production varies quite a lot from country to country, and with time: it ranges from 1.5 % in China to 78.1 % in France, ~2007 (see p.25-28). It depends as well from reactors being shut and/or under maintenance, eg as it happens ~now (2017) with maintenance in France.
- For both reasons (transmutation and energy production), the development of accelerator systems is being pushed in many countries: beside Europe, also in China, India, Japan, Russia, Turkey, USA.

Fukushima: se si parla di EN non si può tacere F.

- 11 Marzo 2011, terremoto di Tohoku, magnitudine 9.0-9.1 (Richter) sotto al fondo del mare, 70 km al largo ad est del Giappone (130 km da F.) → tsunami devastante sulla costa – si tratta del più intenso terremoto in Giappone (4o nel mondo) dal 1900 (*)
- onda (14 m) allaga 4/6 reattori di Fukushima Daiichi (n. 1) → raffreddamento di emergenza fuori uso; fusioni e esplosioni; rilascio di radioattività nell'aria e nell'oceano – diversi altri reattori nella zona sono stati spenti e raffreddati senza subire eccessivi danni
- nell'anno successivo all'incidente, l'impianto di F. è stato stabilizzato e le emissioni radioattive in gran parte fermate
- i laboratori di alte energie, KEK a Tsukuba 50 km nord-est di Tokyo e Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) (**), a 115 km da T., non hanno subito troppi danni, non ci sono stati problemi per le persone, né rilasci di radiazione (J-PARC, a Tokai sempre sulla costa est, è progettato per resistere ad un'onda di tsunami alta 10 m)

(*) Honshu, la più grande isola del Giappone, si è spostata di 2.4 m verso est. Il giorno si è accorciato di 1.8 μ s in seguito alla redistribuzione della massa della terra. etc.

(**) J-PARC ospita una ADS Transmutation Experimental Facility, sia per studiare la trasmutazione che per provare il raffreddamento a PbBi fuso.

Effetti del terremoto



Effetti dello tsunami

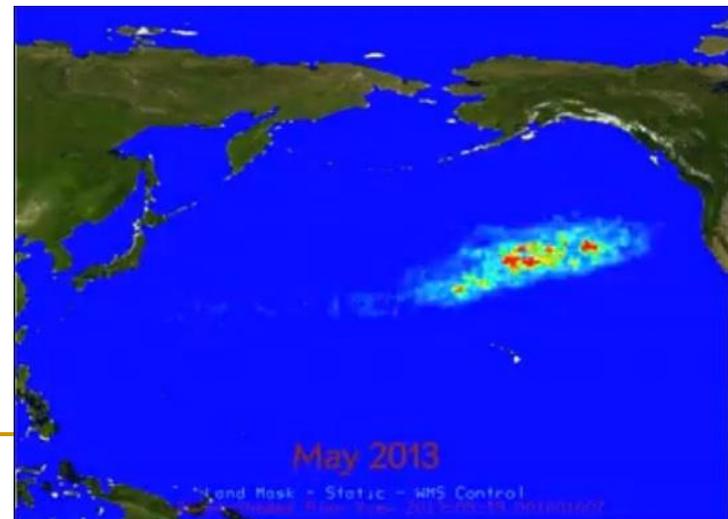
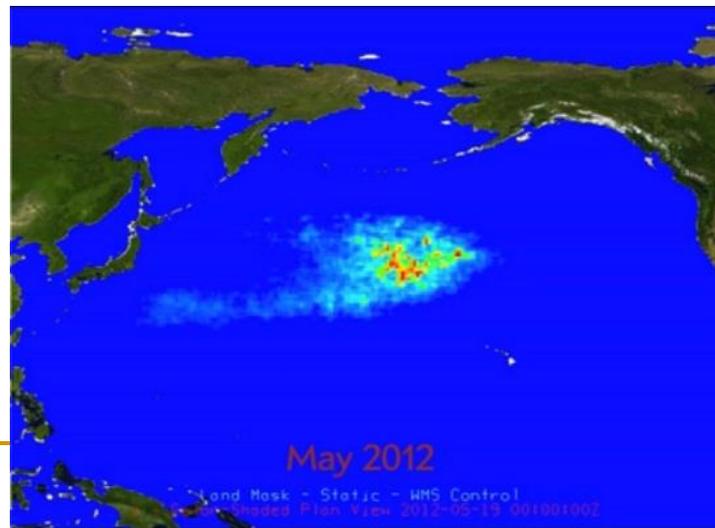
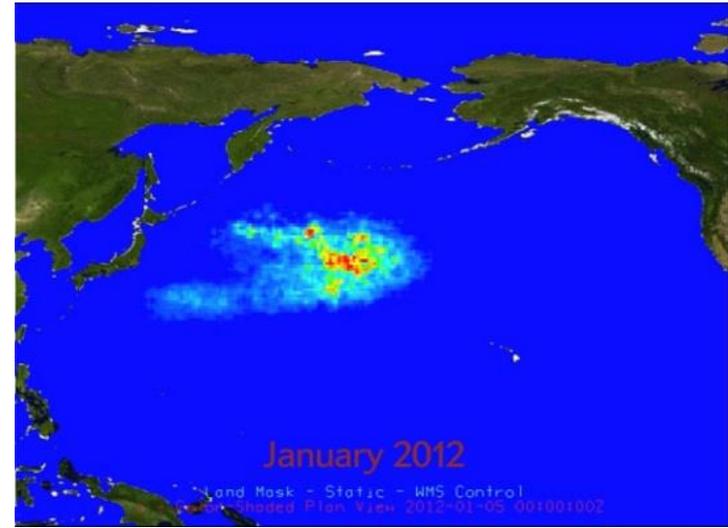
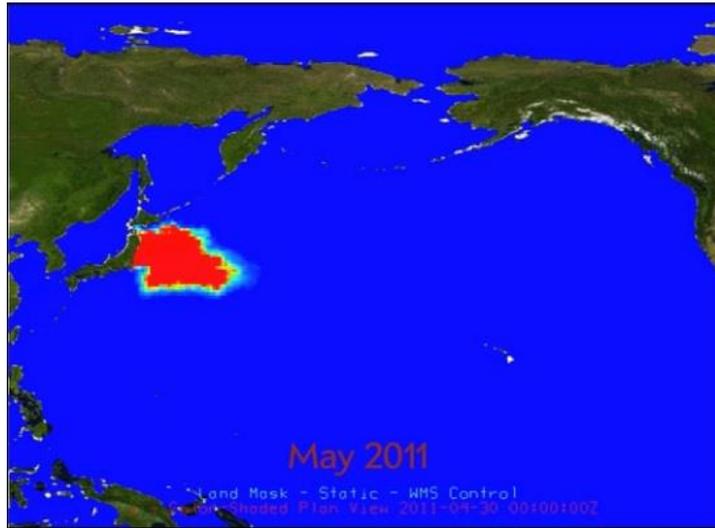


L'onda di tsunami ha viaggiato per 10 km all'interno nella zona di Sendai

Circa 230,000 persone spostate dalle loro abitazioni in parte distrutte o danneggiate

Circa 16,000 morti, 6,000 feriti e 3,000 dispersi

0.9 10^6 t di rifiuti galleggianti (~22 in fondo al Pacifico) al ritiro dell'onda di tsunami [modello Univ. Hawaii & NOAA]

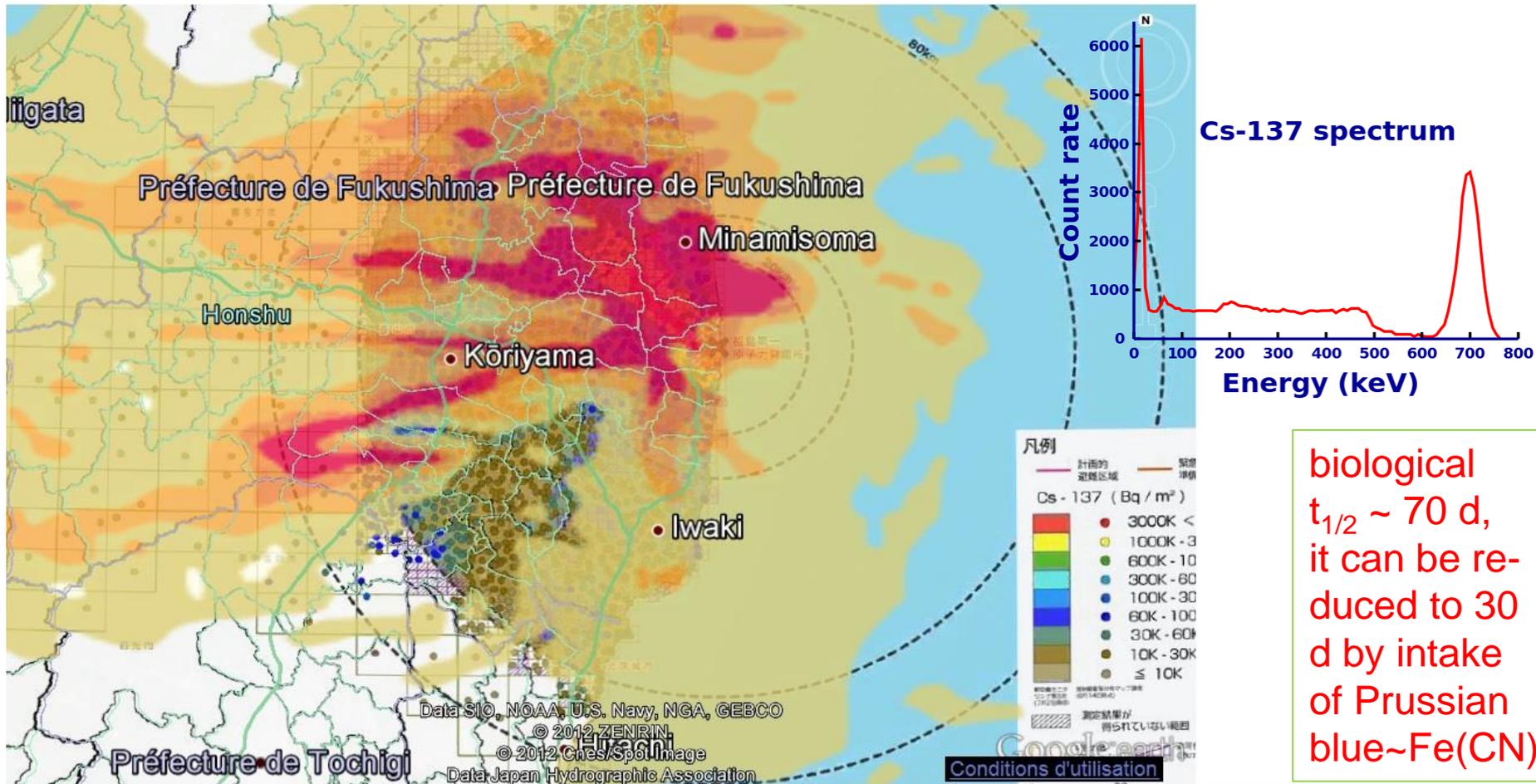


Effetti dello tsunami sulla centrale



Evacuazione della popolazione a seguito della fuoriuscita di radiazioni: più di 200,000 persone interessate

Rilascio di ^{137}Cs nell'intorno della centrale ($t_{1/2} = 30.2 \text{ y}$; 95%: $0.51 \text{ MeV } \beta^-$, $0.66 \text{ MeV } \gamma$)

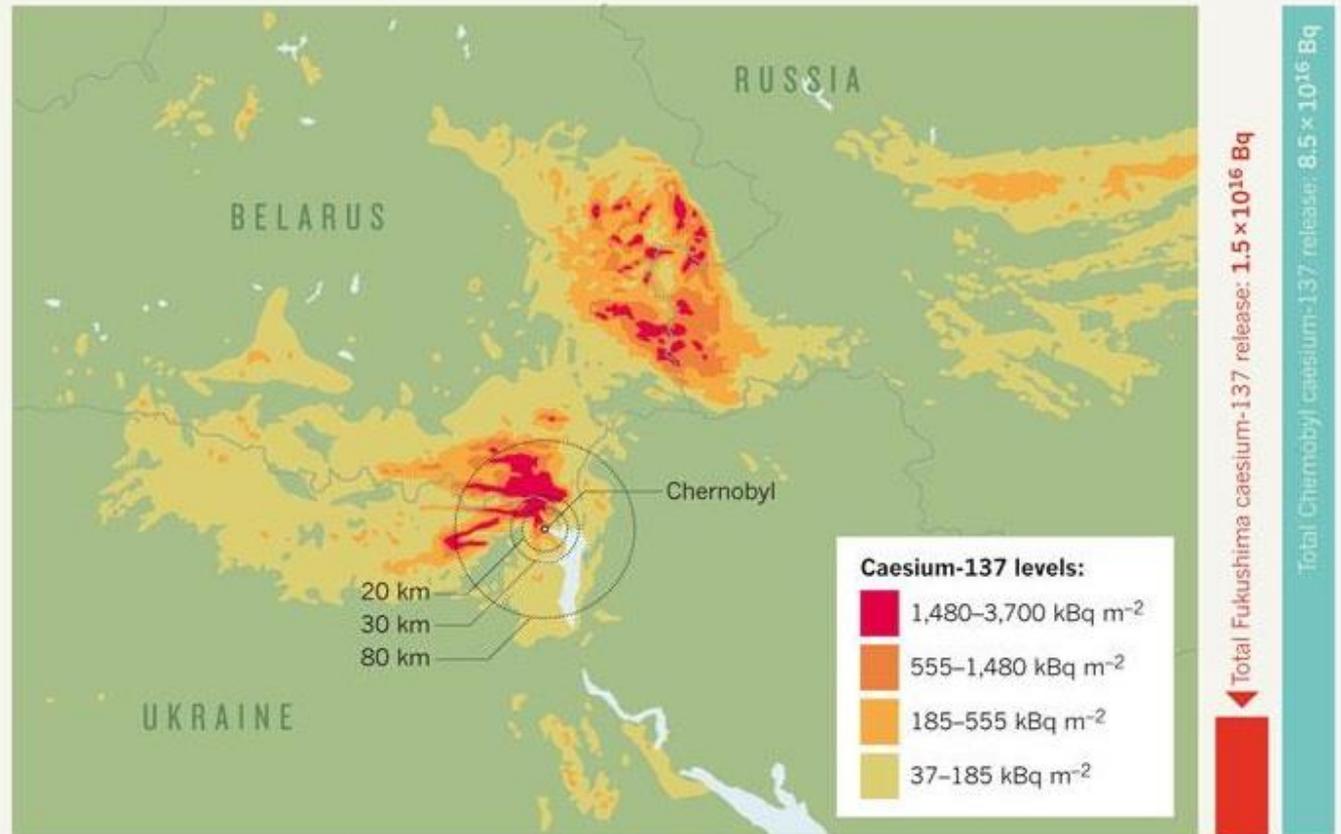
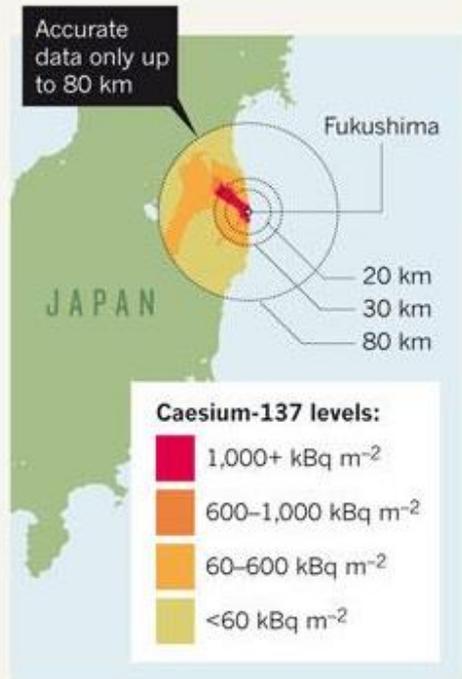


biological
 $t_{1/2} \sim 70 \text{ d}$,
 it can be reduced to 30
 d by intake
 of Prussian
 blue~ $\text{Fe}(\text{CN})_6$

Il confronto del fallout con l'incidente di Chernobyl (1986)

FALLOUT COMPARISONS

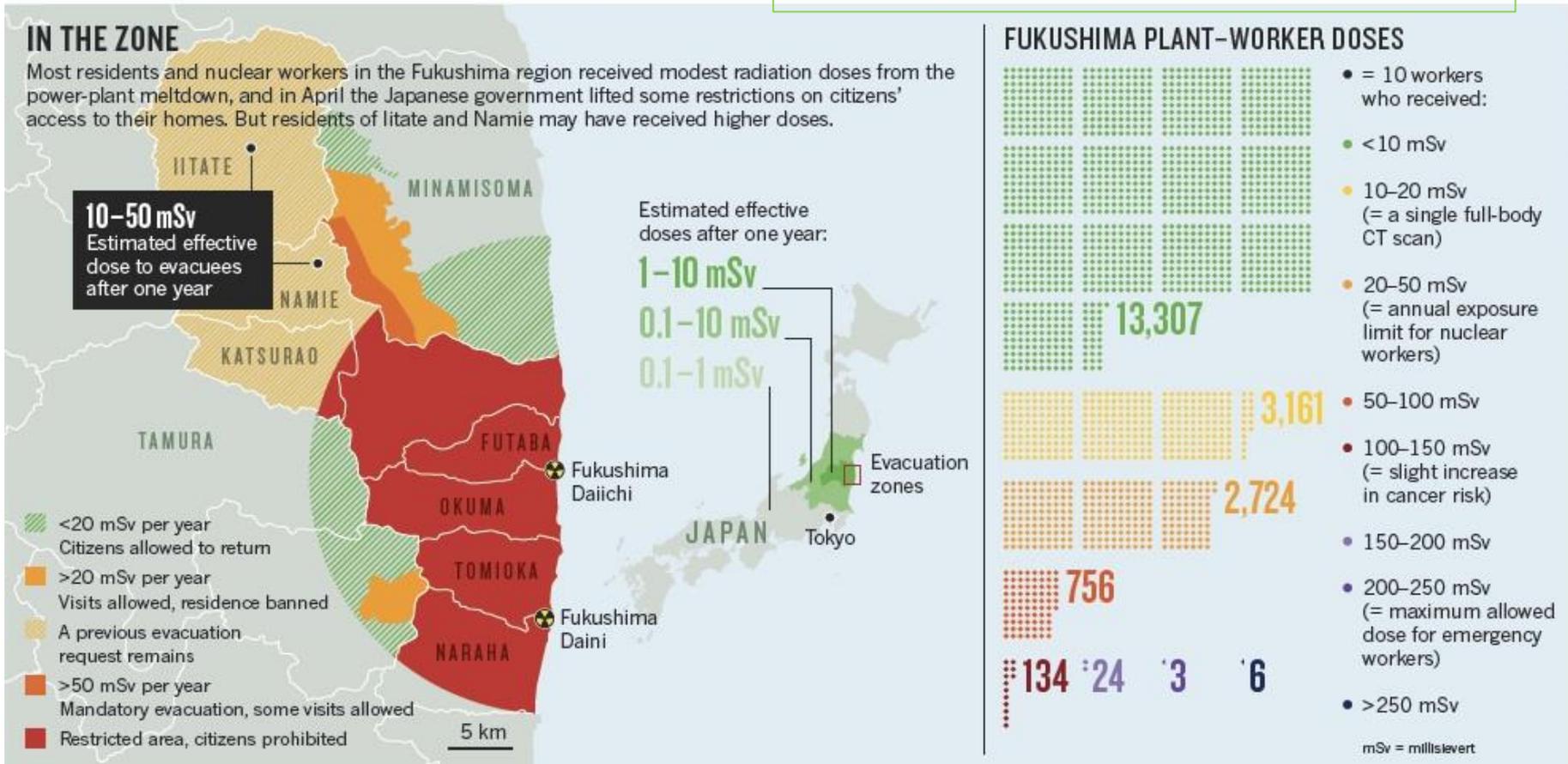
New data from Fukushima show caesium-137 levels approaching those of Chernobyl — but over a much smaller area.



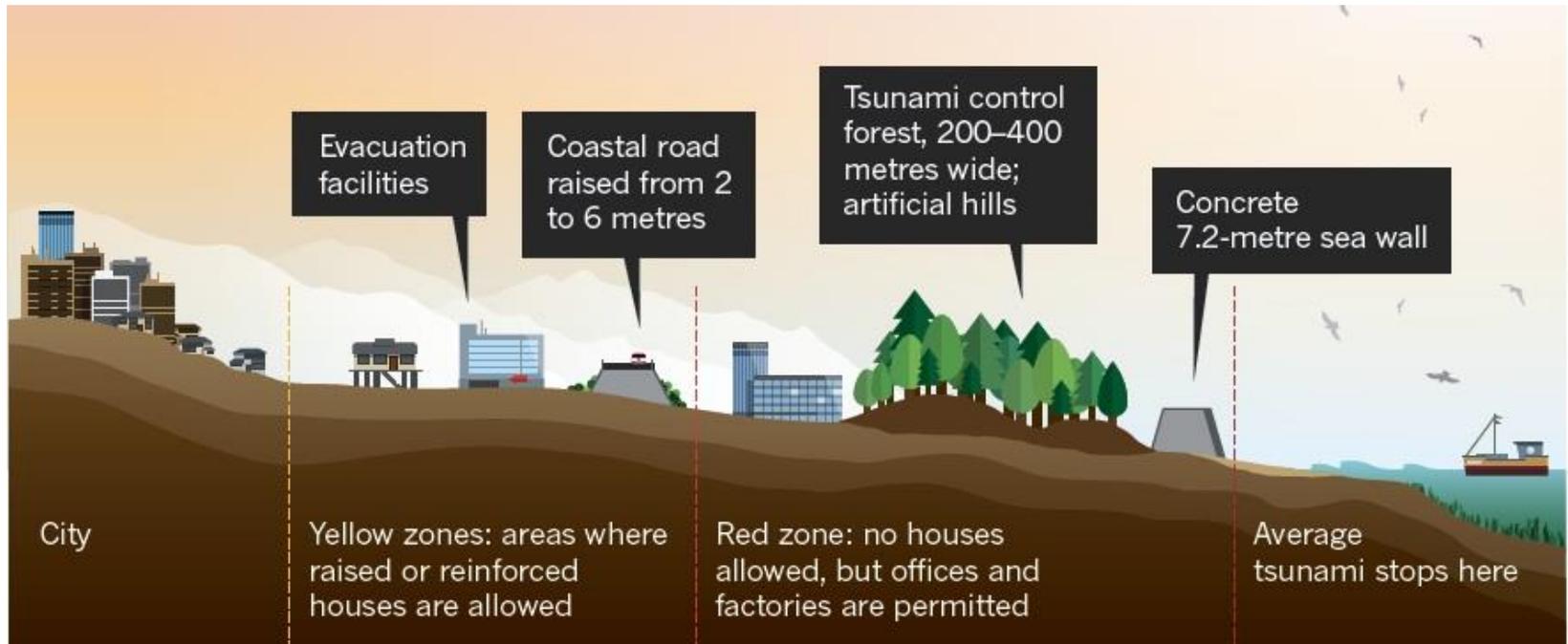
Source: UNSCEAR, MEXT, IAEA

Dosi registrate dopo l'incidente di F. e dosi ricevute dai lavoratori dell'impianto: poche persone hanno ricevuto dosi importanti

Average background radioactivity (mSv/y)			
natural	2.4 (world), 3.1 (US), 1.5 Japan)		
medical	0.6	3	2.3
other artif.	0.01	0.04	0.03

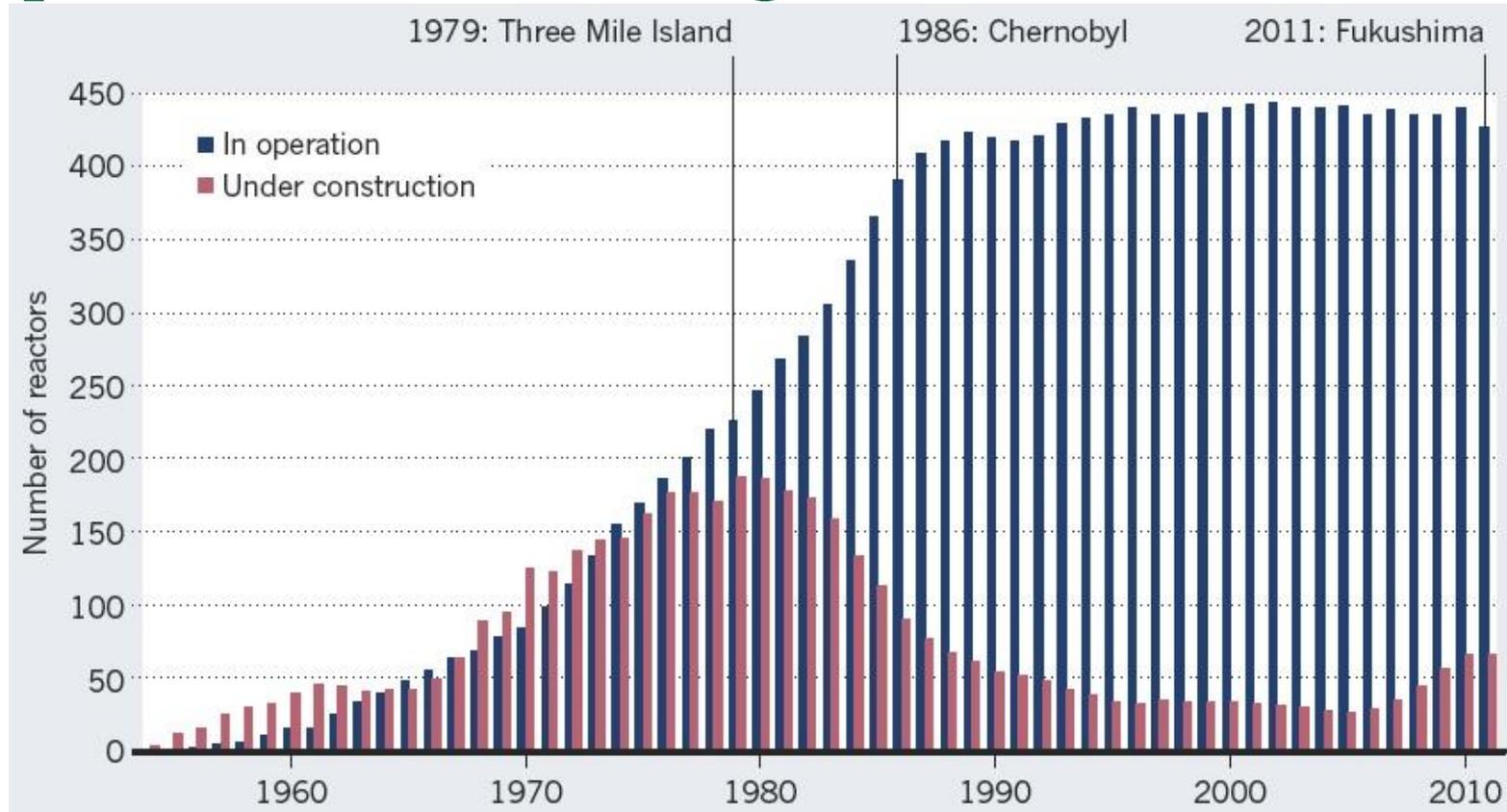


Piani per una città resistente agli tsunami



- Sendai, a town ~100 km north of Fukushima Daiichi, is considering refashioning its coastal area. A raised sea wall would block typical tsunamis and an elevated coastal road would protect against giant ones. A new law mandating zoning restrictions, e.g. only offices and factories before the coastal road, aims at lowering the number of fatalities.

Il panorama nucleare e gli incidenti



Non in crescita: la costruzione di centrali n. è diminuita a partire dall'incidente di ThreeMileIsland (TMI) in poi, anche a causa di realtà economiche; il numero in funzione stagna dalla fine degli 80. Non è mostrato l'incidente di Mayak (USSR) 1957, sconosciuto fino a molto più tardi in occidente, che quindi non ha avuto impatto sull'evoluzione.

Confronto fra gli incidenti

- TMI 1979: fusione parziale e rilascio di materiale radioattivo, perimetro di evacuazione di 8 km esteso a 32, ma non sempre rispettato dagli abitanti, effetti sulla salute pochi o assenti
- Chernobyl 1984: esplosione e successivo incendio, materiali pericolosi sparsi lontano e abbondanti, $\sim 1.4 \cdot 10^{19}$ Bq in totale, $\sim 7.5 \cdot 10^{16}$ Bq ^{137}Cs , evacuazione massiccia, impatto psicologico pesante
- Fukushima 2011: fusione parziale, materiali meno pericolosi, $\sim 0.08\text{-}1.7 \cdot 10^{19}$ Bq totale (in gran parte ^{133}Xe poco pericoloso, perché non è assorbito, né dall'organismo né dall'ambiente), $\sim 1.5\text{-}3.5 \cdot 10^{16}$ Bq ^{137}Cs , evacuazione, effetto psicologico

Nonostante questo: primi reattori autorizzati e in costruzione negli USA dal '78

- il 9 Feb 2012 sono stati approvati dalla Nuclear Regulatory Commission due reattori AP1000 della Westinghouse (PWR, Pressurized Water Reactor), con sistemi di sicurezza passivi per prevenire surriscaldamento in seguito a perdita di potenza (à la F.), più robusti vs terremoti ed impatti di aerei
- attualmente 8 impianti in costruzione in USA e Cina, alcune decine di impianti programmate nel mondo

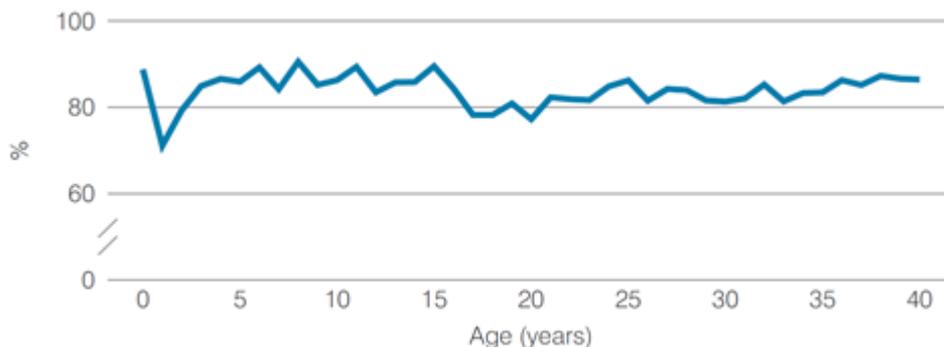


Le sfide di carattere economico al nucleare

- l'EN è relativamente costosa (mai quanto alcune energie rinnovabili) – una ulteriore sicurezza ha un ulteriore prezzo (si spera però che il prezzo cali via via che si costruiscono centrali)
- la domanda di E è stata debole recentemente, eg a causa della crisi economica
- il costo del gas è diminuito
- il costo del petrolio è diminuito
- la deregulation nell'industria elettrica ha tirato giù i prezzi (anche se in Italia c'è stato proprio di recente, marzo 2017, un forte aumento dovuto alla manutenzione di alcune centrali n. francesi)
- ma alla lunga la domanda di E risalerà e l'essere l'EN a bassa emissione di CO₂ giocherà un ruolo

Altri problemi dell'EN

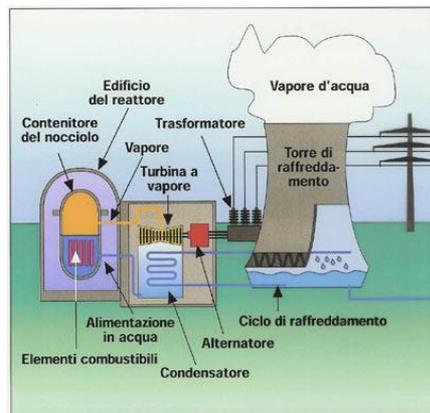
- sicurezza rispetto ad eventi naturali ed errori o attentati umani
- le scorie da smaltire
- pericolo della proliferazione
- dismissione delle vecchie centrali
 - (però l'efficienza dei reattori sembra non diminuire col tempo e mediamente c'è stato un notevole miglioramento nel funzionamento dei reattori dal 1976 ad oggi, il che potrebbe portare a correggere al rialzo le aspettative di vita)



Median Capacity Factor
2007-2016 by Age of Reactor

L'energia Nucleare e l'Italia

In Europa: 229 centrali nucleari (448 nel mondo)

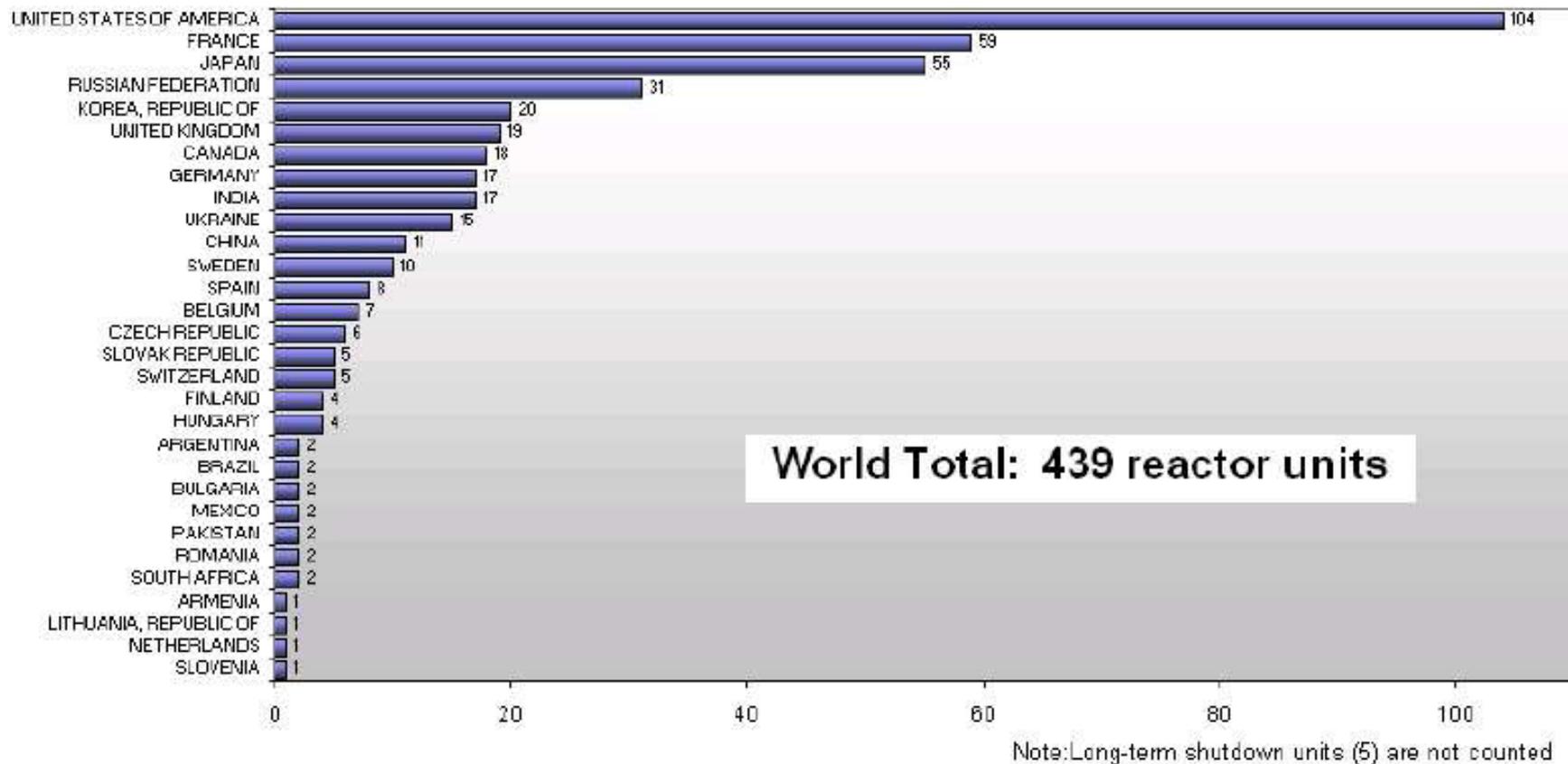


“E le scorie?”

L'Italia abbandona il nucleare con il referendum del 1987 (ribadito di recente dal referendum del 2011) - Ancora presenti 4 reattori non più funzionanti: Caorso (Piacenza), Trino (Vercelli), Garigliano (Caserta), Latina

N. di reattori in funzione nel mondo

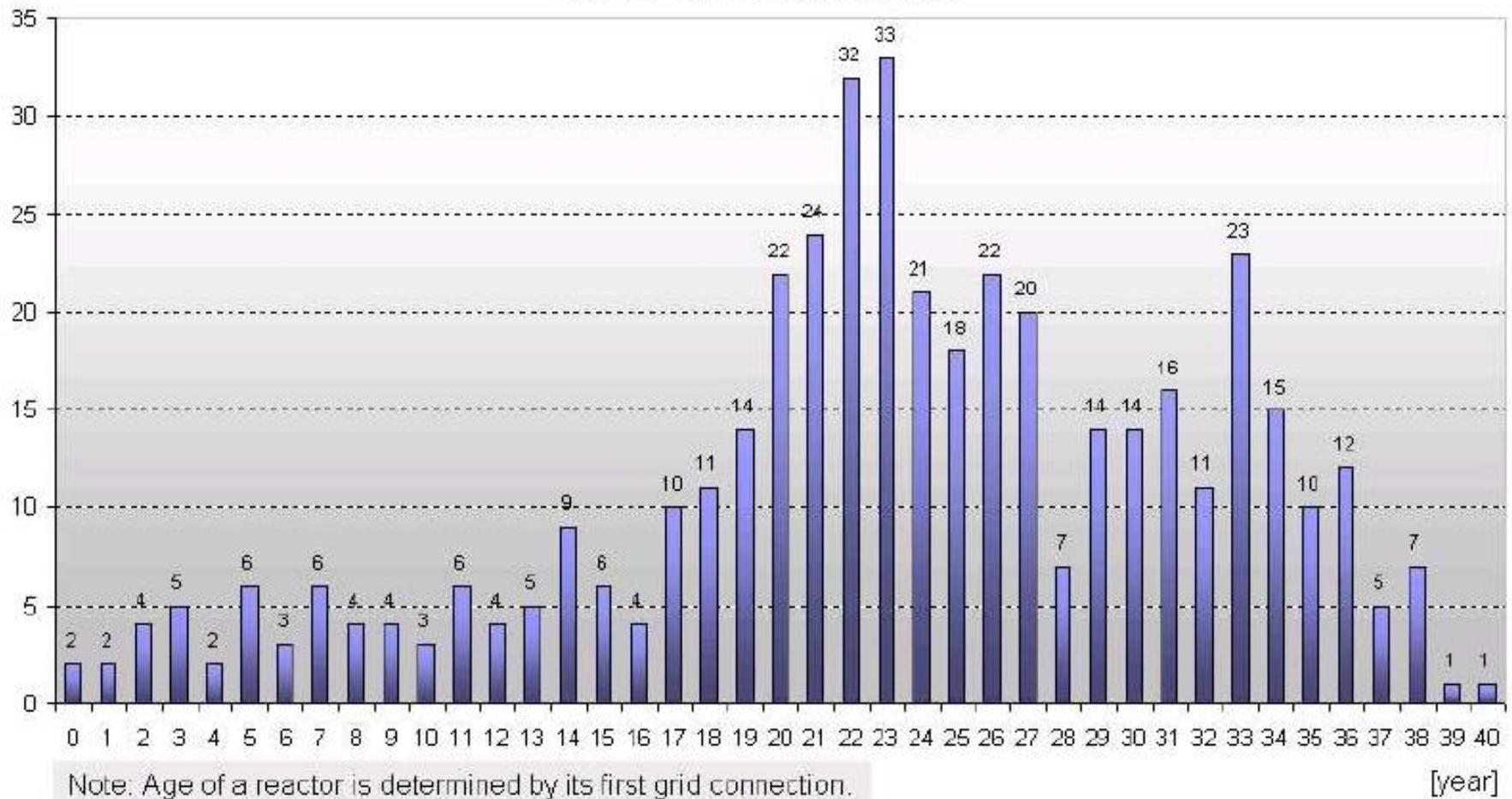
(as of 8 of August 2007)



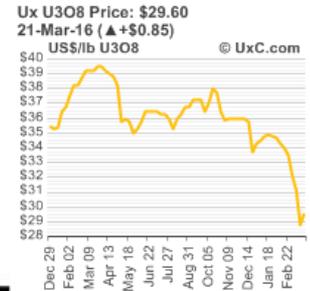
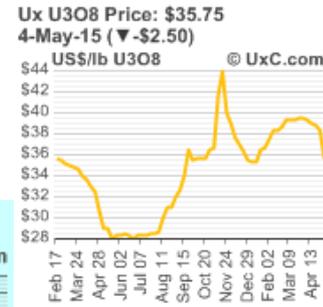
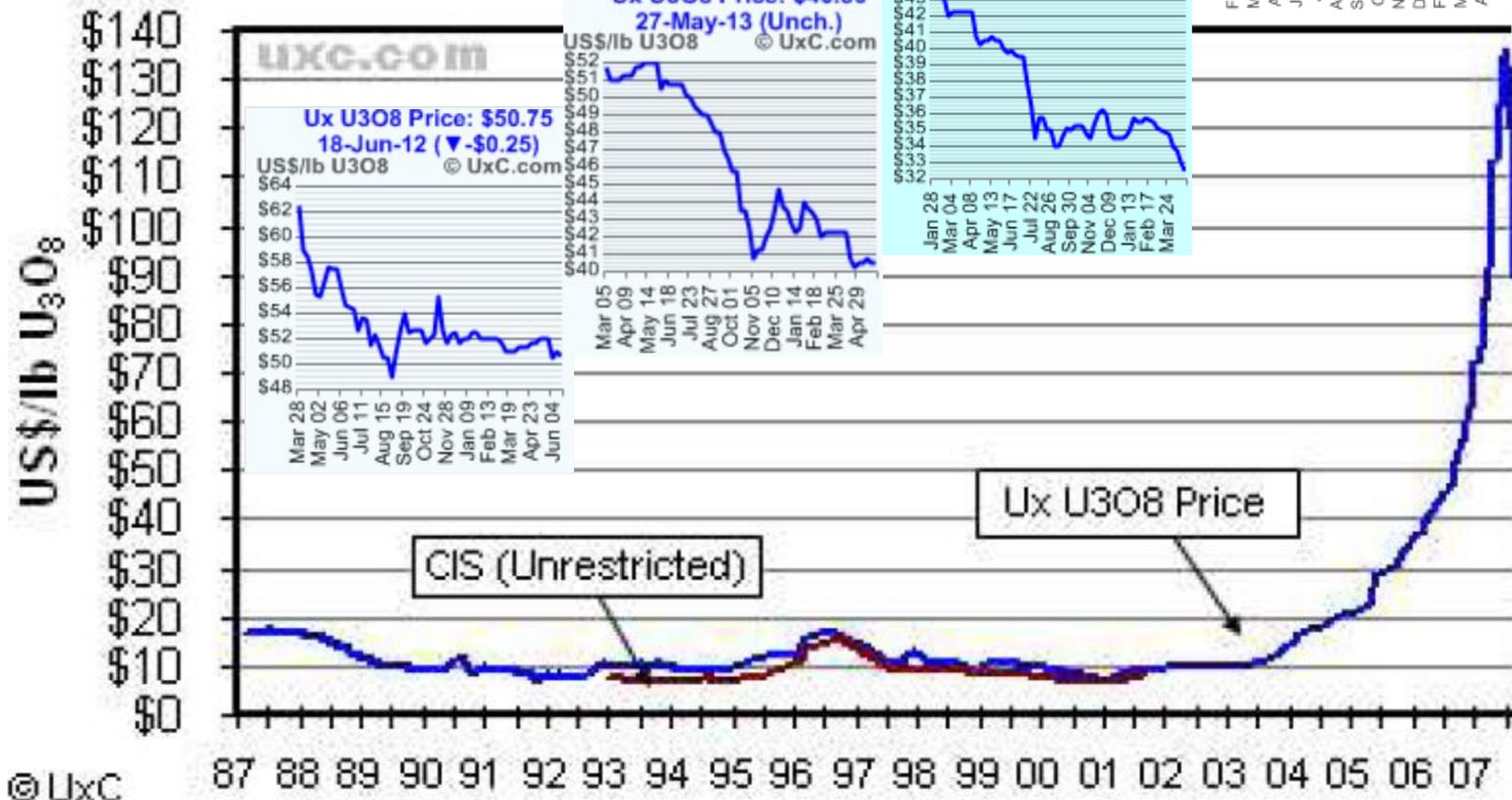
Nel 2011 il n. di reattori in attività era 435: 370 GW o 2754 TWh/a (17% del tot.)
Il consumo di U nelle centrali nel 2008 è stato di 70000 t (in parte provenienti da depositi militari riciclati), ossia 2.2 kg/s: la produzione attuale di U è 1.7 kg/s

Età dei reattori esistenti

(as of 26 of June 2007)

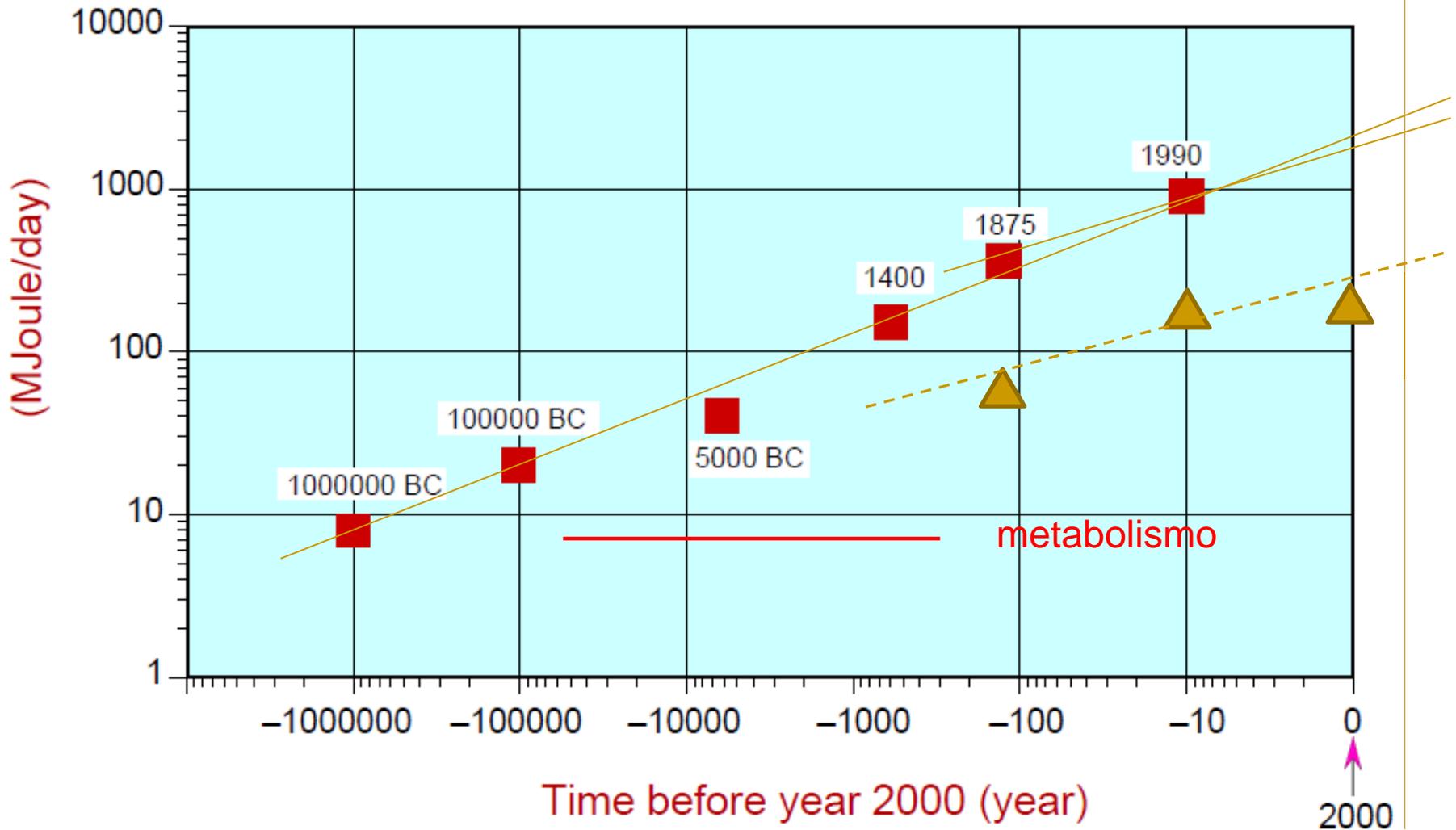


Il prezzo dell'U (yellow cake) negli ultimi anni/giorni:
 sta +- calando dopo
 un picco nel 2007



marzo 2018

Evoluzione del consumo medio di energia – pro capite



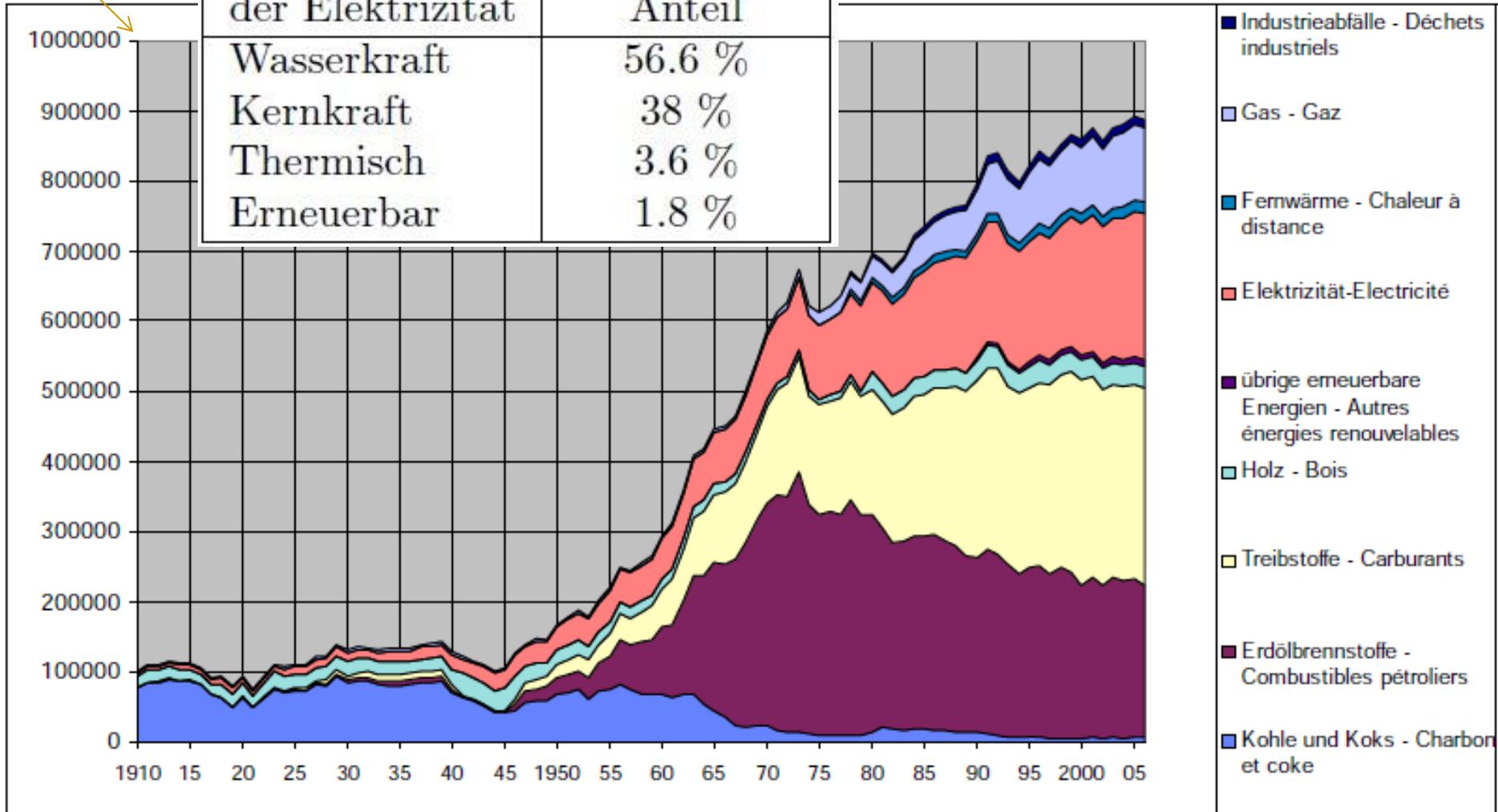
- basandosi su dati della IEA (International Energy Agency) ed altri dati si ha nel 2013 un consumo medio di 150-200 MJ/g/persona, circa 5-10 volte più piccolo di quello riportato in figura (quadrati rossi)

Consumo di energia in Svizzera (TJ) - dove è disponibile l'energia idroelettrica

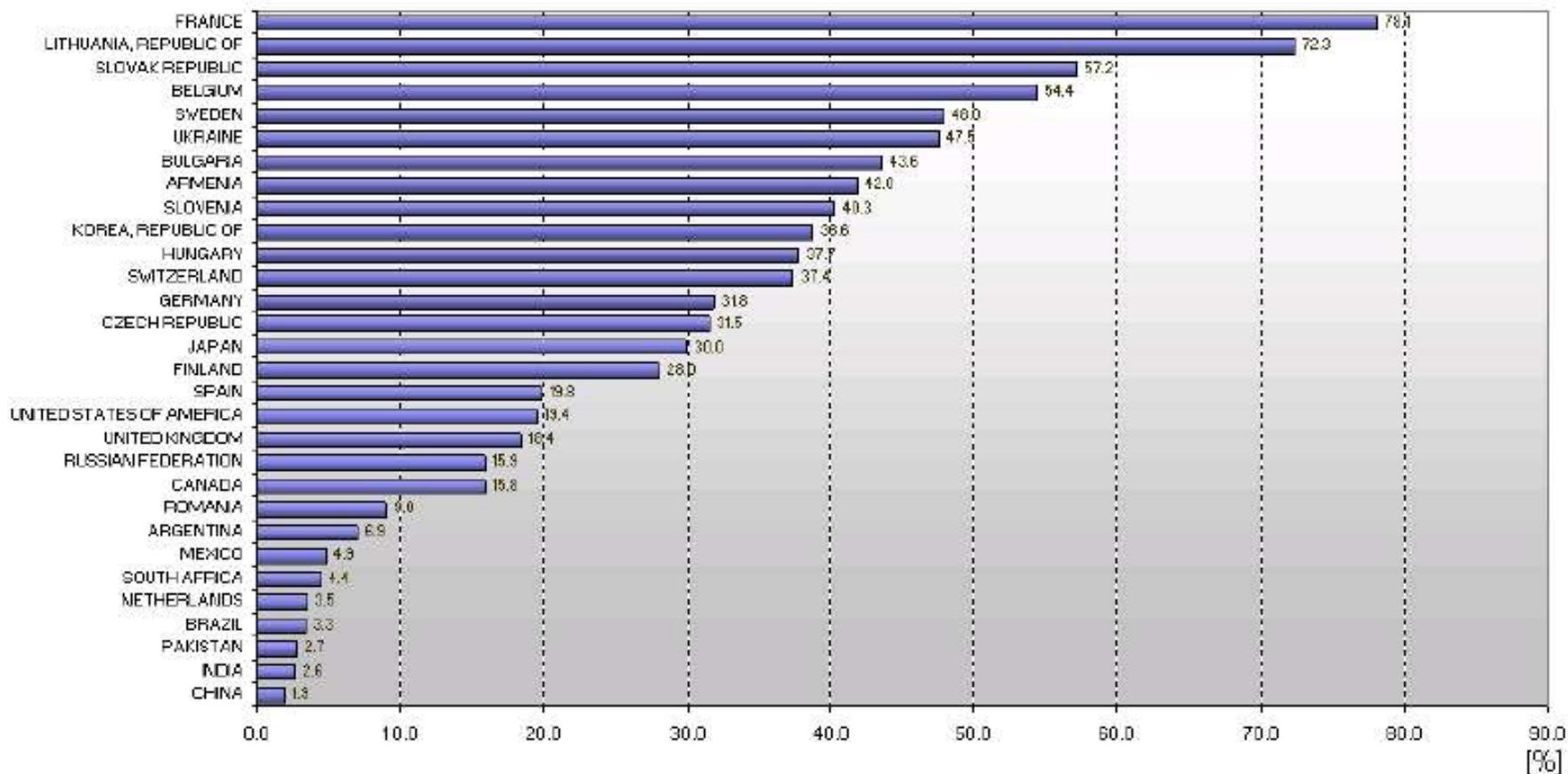
1 TJ = 1 TWh/3600

278 TWh

Herkunft der Elektrizität	Prozentualer Anteil
Wasserkraft	56.6 %
Kernkraft	38 %
Thermisch	3.6 %
Erneuerbar	1.8 %



Percentuale di energia generata col nucleare



Numerose informazioni sull'energia nucleare (e non solo) in Francia e nel mondo si trovano su <http://www.planetoscope.com/energie/nucleaire>

Percentuale di Energia Elettrica da EN e n. di reattori in servizio

Land	Anteil der Kernkraft an der Elektrizitäts Erzeugung	Anzahl der Reaktoren in Betrieb
Frankreich	78 % (~ 63.3 GW)	59
Litauen	80 %	2
Slowakei	65 %	6
Belgien	57 % (5.7 GW)	7
Schweden	46 % (9.5 GW)	11
Slowenien	41 %	1
Schweiz*	38 %	5
Ungarn	36 %	4
Deutschland	30 % (21 GW)	19
Finnland	30 % (2.6 GW)	4
Spanien	26 % (7.4 GW)	9
Tschechien	25 %	6
Gross-Britannien	22 % (12 GW)	27
Niederlande	4 % (0.5 GW)	1

Aggiornamento al 2016

Il nucleare rappresenta circa l'11% della produzione di energia elettrica di 31 paesi

Nuclear power by country in 2016

Country	Number of operated reactors	Capacity <u>Net-total (MWe)</u>	Generated <u>electricity (GWh)</u>	Share of total electricity use
France	58	63130	386453	72.3%
Slovakia	4	1814	13733	54.1%
Ukraine	15	13107	76078	52.3%
Belgium	7	5913	41430	51.7%
Hungary	4	1889	15183	51.3%
Sweden	10	9740	60647	40.0%
Slovenia	1	688	5431	35.2%
Bulgaria	2	1926	15083	35%
Switzerland	5	3333	20303	34.4%
Finland	4	2764	22280	33.7%
Armenia	1	375	2195	31.4%
Korea, Republic of	25	23077	154307	30.3%
Czech Republic	6	3930	22730	29.4%
Spain	7	7121	56102	21.4%
United Kingdom	15	8918	65149	20.4%
United States	100	100351	804873	19.7%
Romania	2	1306	10388	17.1%
Russia	36	26528	184054	17.1%
Canada	19	13554	95650	15.6%
Taiwan	6	5052	30461	13.7%
Germany	8	10799	80069	13.1%
South Africa	2	1860	15209	6.6%
Mexico	2	1552	10272	6.2%
Argentina	3	1632	7677	5.6%
Pakistan	4	1005	5439	4.4%
China	36	31384	197829	3.6%
India	22	6240	35007	3.4%
Netherlands	1	482	3750	3.4%
Brazil	2	1884	14970	2.9%
Japan	43	40290	17537	2.2%
Iran	1	915	5924	2.1%
World total	451	392,553 MW	2,476 TWh	10.9%

La variazione più notevole riguarda il Giappone: dopo Fukushima, tutti i 54 reattori sono stati chiusi, 12 dei quali in modo permanente; 42 reattori restano in condizioni di operare, di questi per 24 è stato chiesto il permesso di ripartire, e 5 reattori sono tornati in funzione.

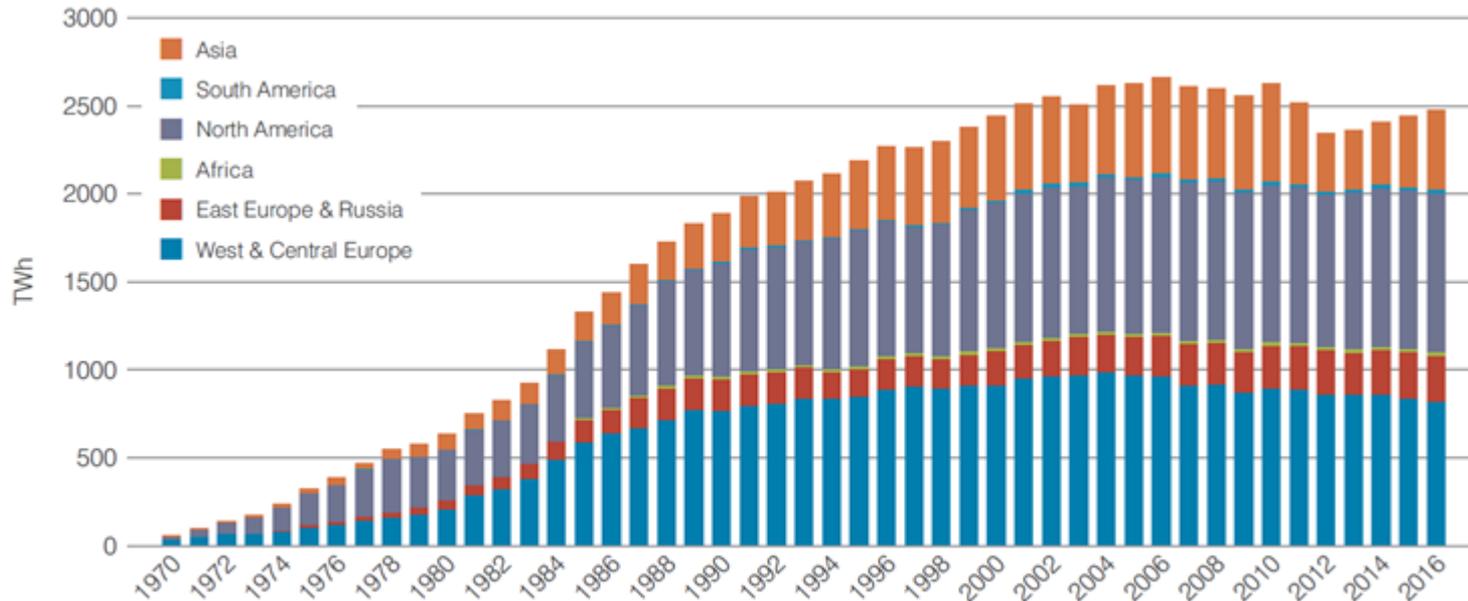
Valori medi:

0.870 GWe/reattore

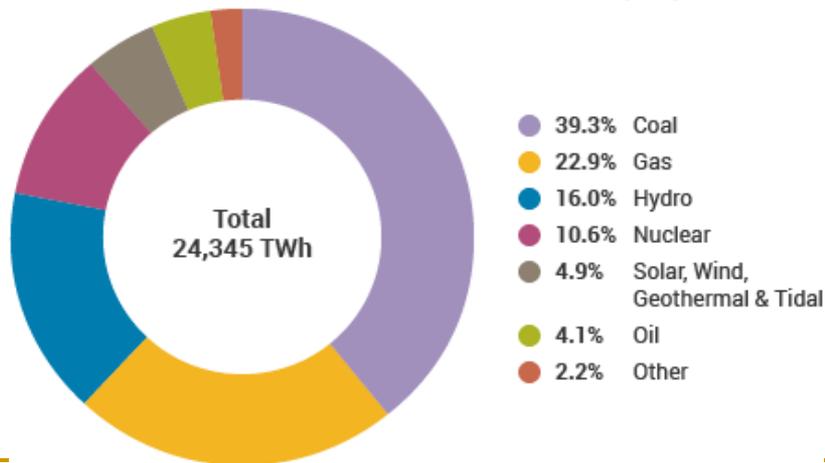
6.31 TWh/GWe

→ reattori in funzione il 72% del tempo

Evoluzione della produzione di EnEl dal nucleare fino al 2016



Source: World Nuclear Association, IAEA Power Reactor Information Service (PRIS)



Source: IEA Electricity Information 2017

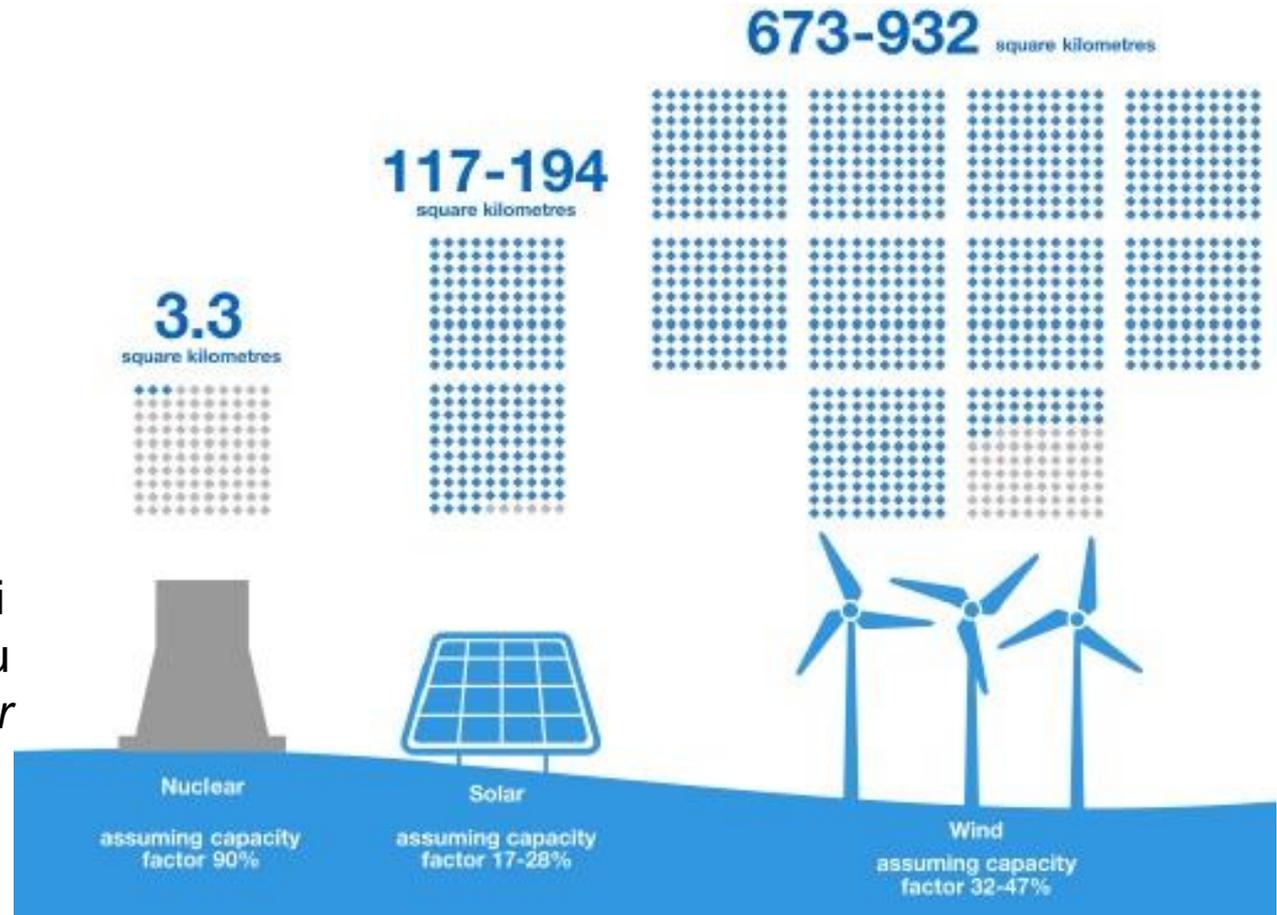
Varie fonti per la produzione di Energia Elettrica a livello mondiale nel 2017: il carbone fornisce 39.3%, il gas naturale 22.9%, fonti rinnovabili 21-23%, l'EN 10.6% - la produzione di CO₂ è il risultato di bruciare carbone, gas, olio (~2/3 del totale)

Italia: energia elettrica, dati 2007

- 70% si ottiene bruciando:
 - 44.3% gas naturale
 - 15.3% carbone
 - 10.2% olio combustibile (equivalente a ~140 petroliere da 80,000 t; ~5-6 centrali n. da 1600 MWe di ultima generazione, l'It è l'unica a farlo fra i paesi eur. più importanti)
- 16% è di importazione (in gran parte da e. nucleare prodotta all'estero)
- 14% proviene da fonti rinnovabili:
 - 12% idroelettrico nazionale
 - 1.7% biomasse e rifiuti
 - 1.5% geotermia
 - 0.7% eolico
 - 0.001% solare (fortemente aumentato di recente)

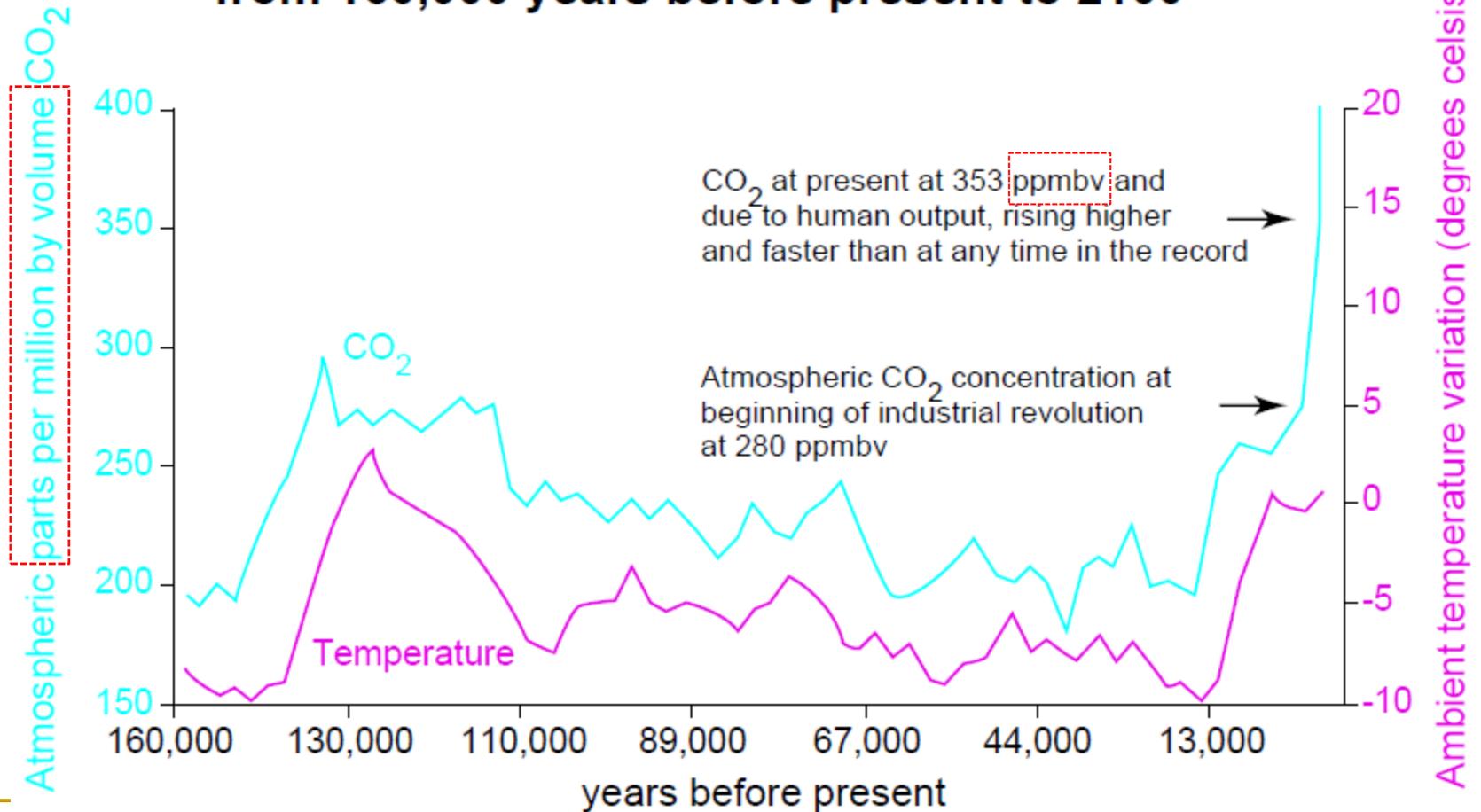
Occupazione di suolo per produrre una stessa quantità di energia: nucleare vs solare e eolico

Superficie necessaria per una potenza installata di 1 GW: il solare occupa 35-60 lo spazio del nucleare, l'eolico 200-280. → Vi possono essere limiti di spazio al produrre energia solare o eolica su scala molto grande. Altre fonti citano rapporti molto più elevati. Il *capacity factor* è l'energia prodotta divisa quella producibile data una certa potenza.

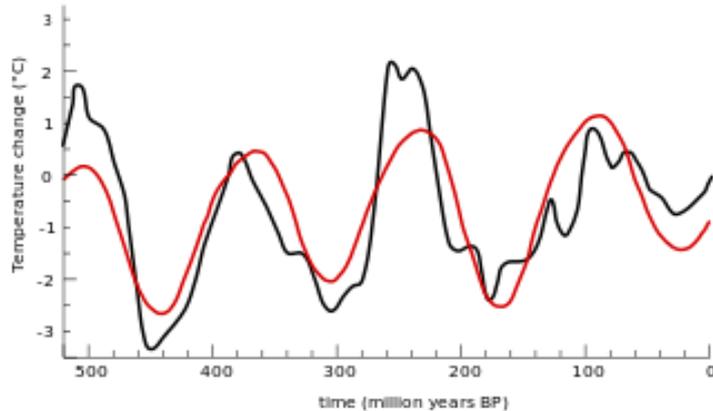


CO₂ e riscaldamento climatico. Correlazione fra CO₂ e variazione di temperatura (dallo studio dei ghiacci ai poli)

from 160,000 years before present to 2100



Raggi cosmici e variazioni di temperatura



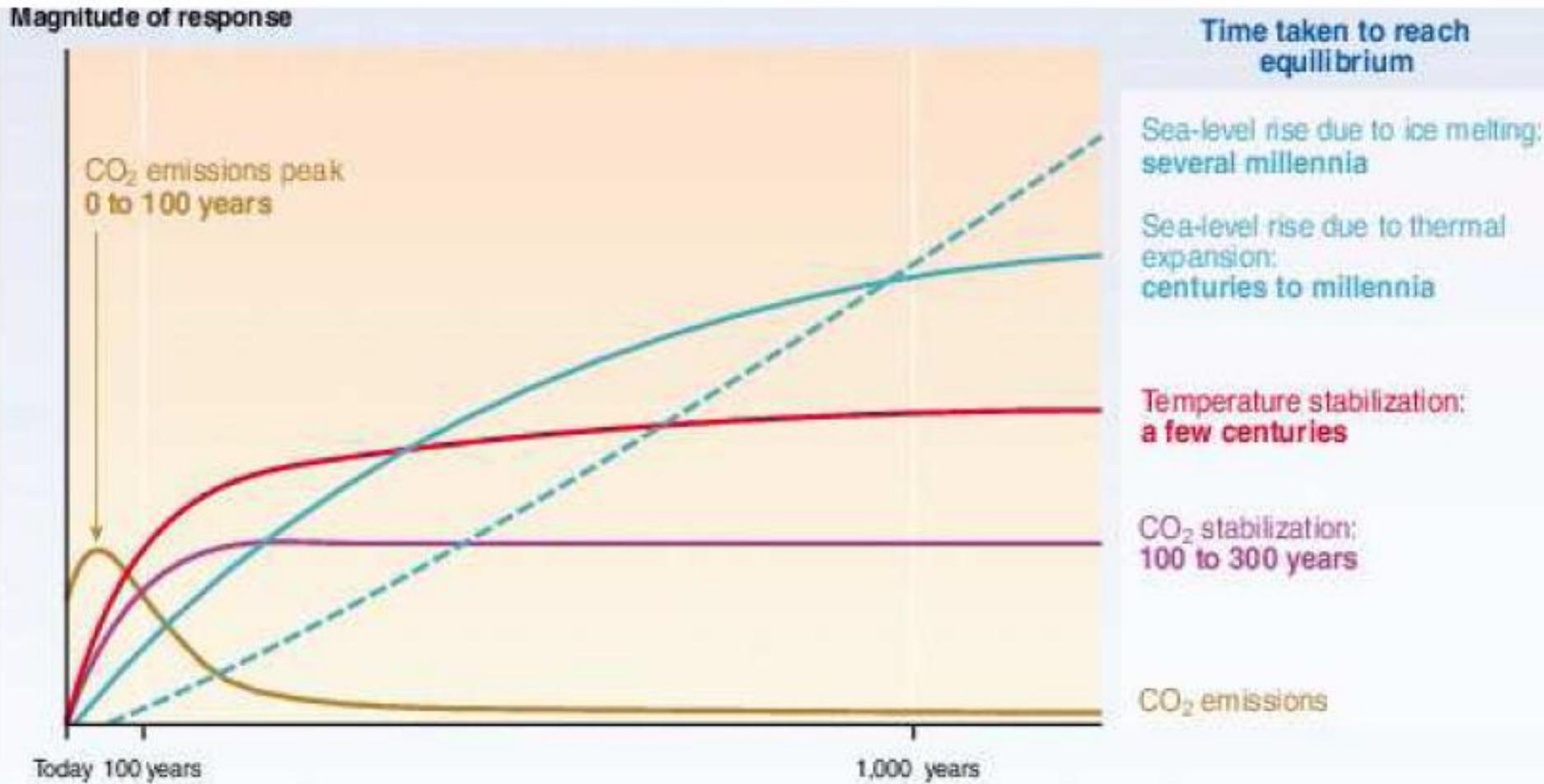
Variazione dell'intensità dei Raggi Cosmici (rosso) e della temperatura terrestre (nero) (ultimi 500 Manni)

Variazione dell'intensità dei RC (nero) e della T terrestre (rosso), 1951-2006: non c'è molta correlazione



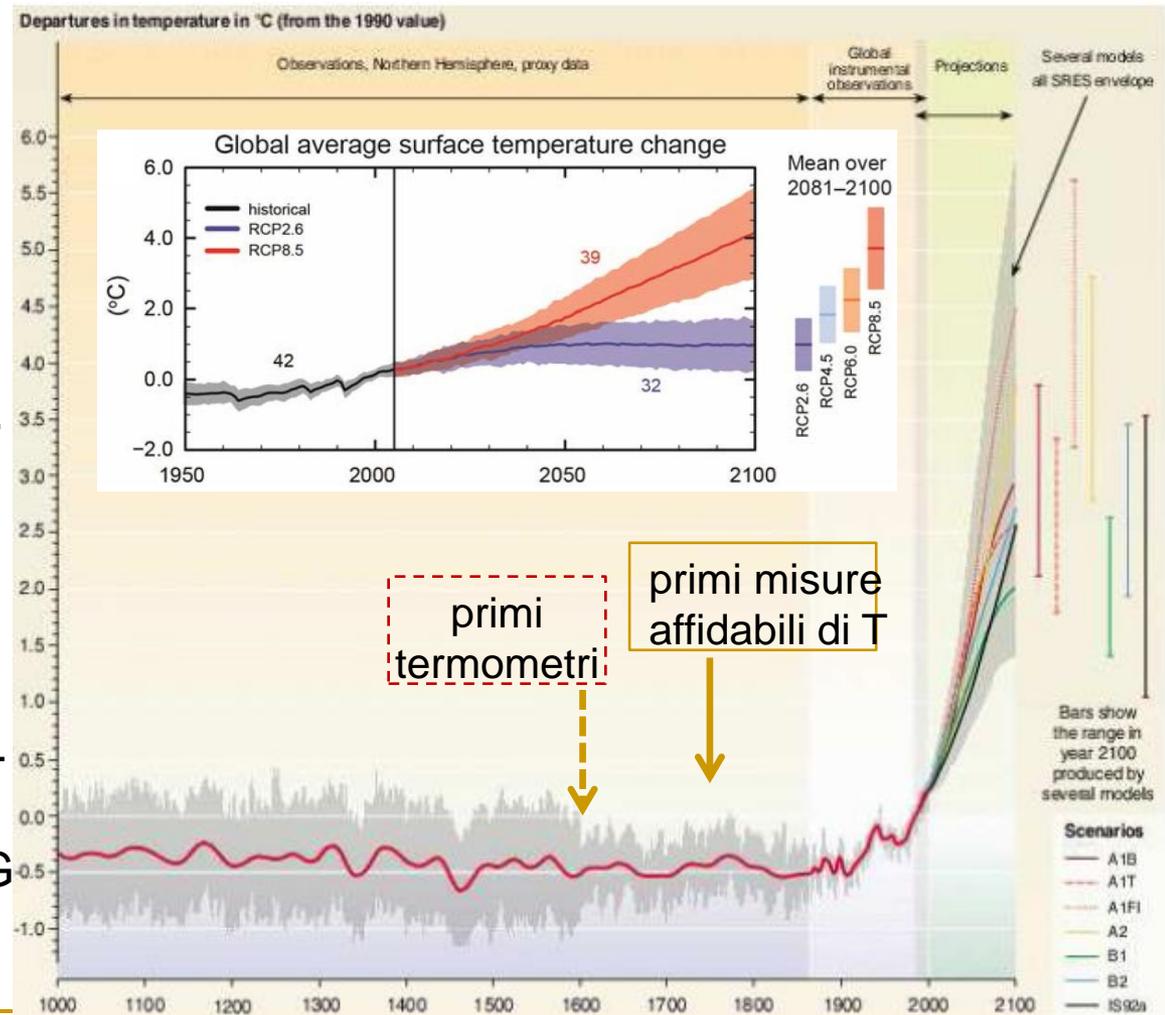
→ Esperimento CLOUD (Cosmics Leaving Outdoor Droplets) al CERN, un grande volume, 26 m³, riempito di aria artificiale, dove può essere studiata la formazione e crescita di aerosol nell'atmosfera e la loro interazione con le nuvole. Fasci di particelle provenienti dal ProtoSincrotrone forniscono una sorgente artificiale ed aggiustabile di RC

Sviluppo della concentrazione di CO₂ e livello del mare: tempi di stabilizzazione in seguito all'arresto/riduzione delle emissioni di CO₂ – la scala delle risposte è arbitraria



Evoluzione della temperatura terrestre secondo differenti modelli: da un impatto limitato a uno scenario catastrofico

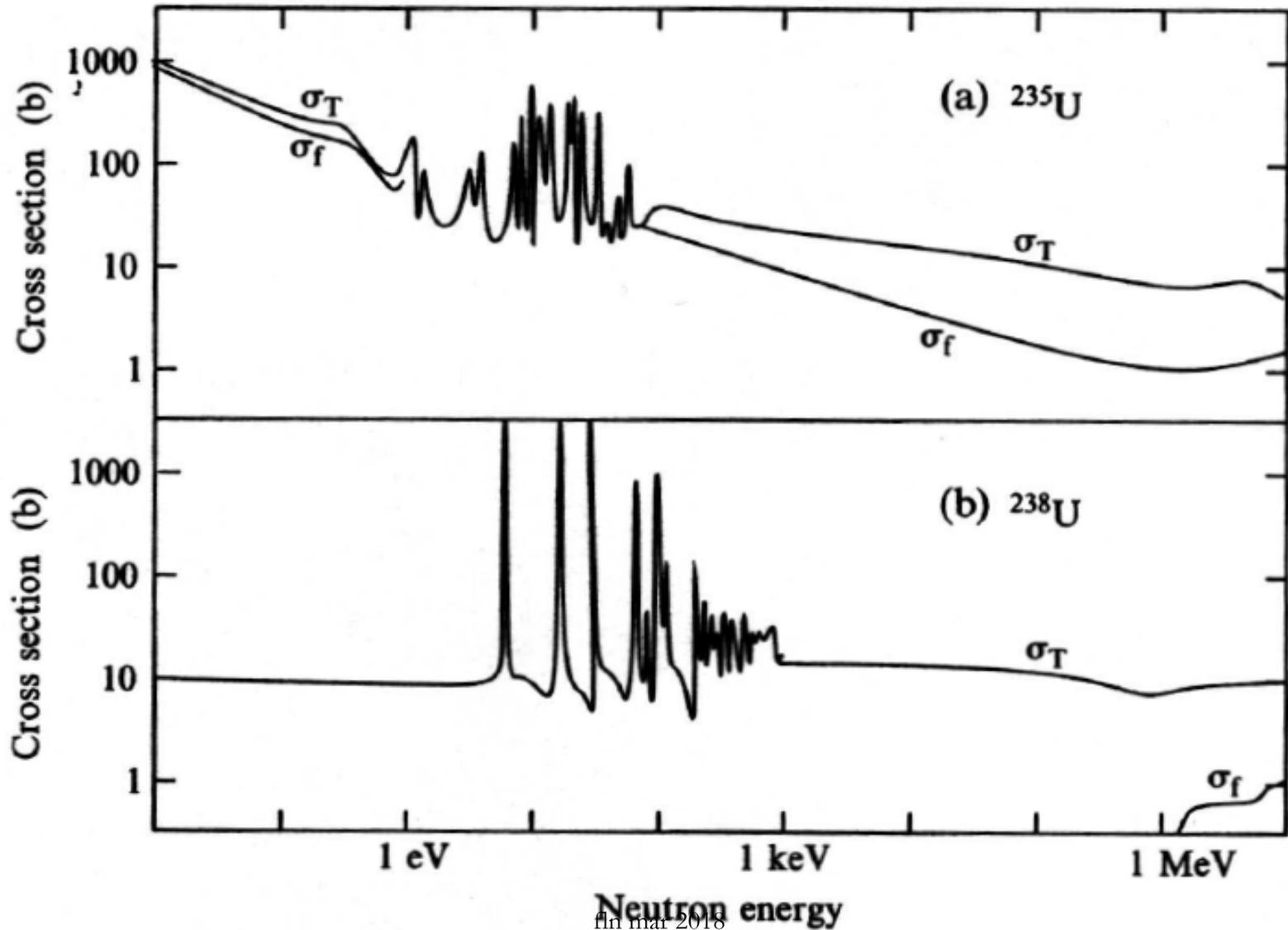
Nell'inserto, la scala dei tempi è espansa, i numeri corrispondono al numero di modelli di ciascuna classe usati per calcolare i valori medi, il livello 0° è ottenuto dalla media sugli anni 1986-2005. RCPx.y: Representative Concentration Pathway. 2.6 ... 8.5 W/m² è il cambiamento in flusso di energia a livello della tropopausa che altera il bilancio energetico della terra dovuto a cause naturali e antropomorfe (Green House Gas emissions etc.). RCP2.6 implicano una riduzione immediata di GHG mentre RCP8.5 assumono che le emissioni continuino ad aumentare durante tutto il secolo.



Interazioni dei neutroni nella materia

- i neutroni non hanno interazioni coulombiane, ma solo forti (range $\sim 10^{-13}$ cm) \rightarrow percorso lungo nella materia
- per un fascio collimato $I = I_0 \exp(-x/\lambda_n)$
con $1/\lambda_n = N_A \rho \sigma_T / A$
- $\sigma_T = \sigma_S + \sigma_C + \sigma_f$ (scattering, cattura radiativa, fissione nucleare)
- ^{235}U vs ^{238}U : per ^{235}U σ_f è grande a bassa E (cresce come $1/v$), per $1 \text{ eV} < E < 100 \text{ eV}$ ci sono molti stati risonanti di ^{236}U , ad alta E σ_S domina (10 barn) – per ^{238}U $\sigma_f \sim 0$ a bassa E, $10 \text{ eV} < E < 1000 \text{ eV}$ stati risonanti, σ_f importante solo per $E > 1 \text{ MeV}$

Sezioni d'urto totali e di fissione



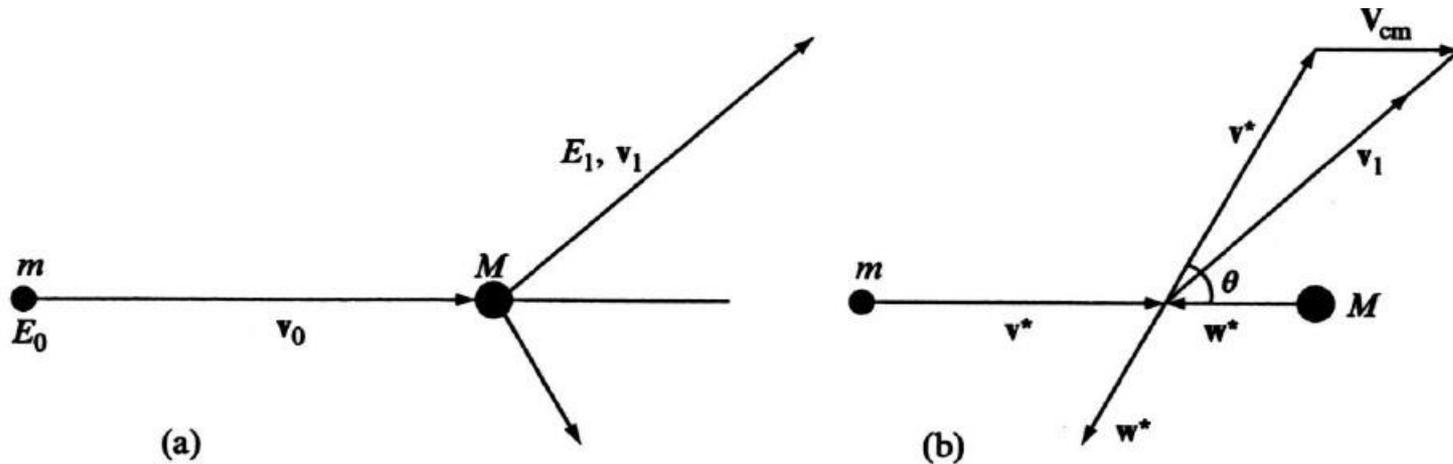
Classificazione dei neutroni vs E

- High Energy n, $E_{\text{kin}} > 100 \text{ MeV} \rightarrow$ cascate adroniche
- n veloci, $100 \text{ keV} < E_{\text{kin}} < 100 \text{ MeV}$, urti elastici e inelastici
- n epitermici o di risonanza, $0.1 \text{ eV} < E_{\text{kin}} < 100 \text{ keV}$, $\sigma \sim 1/v$
- n termici, $E_{\text{kin}} = kT = (8.62 \cdot 10^{-5} \text{ eV K}^{-1})T$, = 0.03 eV per $T = 293 \text{ K}$, producono la fissione nucleare
- n freddi, $E_{\text{kin}} \sim \text{meV}$ o μeV

per ottenere n termici, adatti per la fissione, E va diminuita mediante urto elastico senza assorbimento
→ moderatori (basso Z)

Urto di neutroni su nuclei

vedi pdg.lbl.gov 48.Kinematics, sotto indico le eq. corrispondenti, NB le notazioni sono diverse



- m, M masse del n, nucleo; v_0, p_0, E_0 velocità iniz., momento ed energia del n nel lab; l'en. del c.m. è

$$E^* = (m^2 + M^2 + 2E_0 M)^{1/2} \quad (\text{calcolata nel lab, eq. 48.3})$$
- il momento del n o del N nel c.m. p^* è

$$p^* = \{[E^{*2} - (m+M)^2][E^{*2} - (m-M)^2]\}^{1/2} / 2E^* = Mp_0 / E^*$$
 (eq. 48.17, l'ultimo passaggio si ottiene sostituendo E^* e semplificando \rightarrow eq. 48.6)

Urto di neutroni su nuclei/2

- approx: $E^* \sim (m^2+M^2+2mM)^{1/2} = m+M$ e
 $v^* = p^*/m = p_0 M / (mE^*) = v_0 M / (m+M)$ (n nel c.m.)
 $w^* = p^*/M = v_0 m / (m+M)$ (N nel c.m.)
- V_{cm} velocità del c.m.
 $v_0 = v^* + V_{cm}$
 $V_{cm} = v_0 - v^* = v_0 m / (m+M) = w^*$ (\approx eq. 48.4)
- considero l'urto con un angolo θ nel c.m., la velocità finale sarà (vedi fig. b)
 $\vec{v}_1 = \vec{v}^* + \vec{V}_{cm}$; $v_1^2 = v^{*2} + V_{cm}^2 - 2v^*V_{cm}\cos(\pi-\theta)$

Urto di neutroni su nuclei/3

- sostituendo le espressioni di v^* e V_{cm} e dividendo per v_0^2 , si ottiene ($E_i = 1/2mv_i^2$)

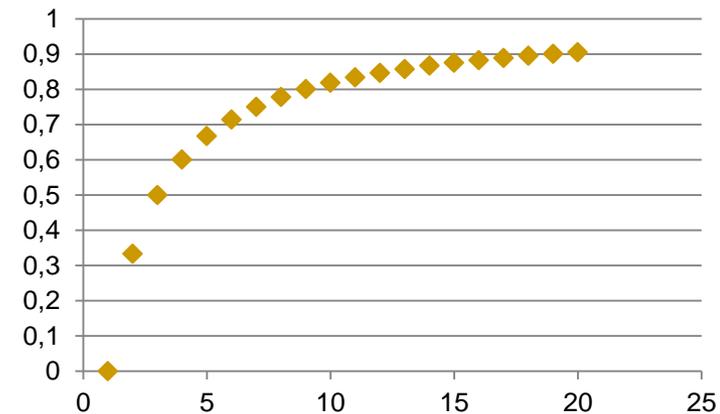
$$\frac{E_1}{E_0} = \frac{M^2 + m^2 + 2mM\cos\theta}{(m + M)^2}$$

ossia con i limiti $\cos\theta = \pm 1$

$$\left(\frac{M - m}{M + m}\right)^2 E_0 \leq E_1 \leq E_0$$

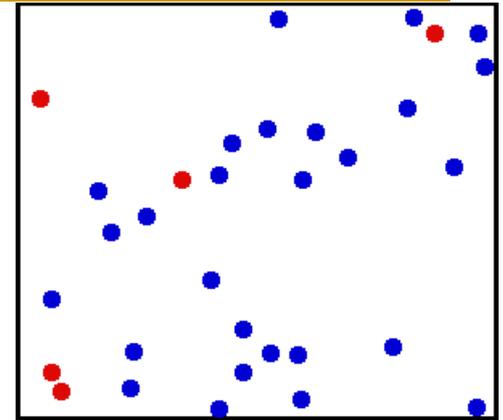
per cui la massima perdita di E si ottiene con $M = m$,
 $0 \leq E_1 \leq E_0$ (p o nuclei leggeri) – inoltre il moderatore
deve avere $\sigma_{\text{assorbimento}}$ piccola per non perdere n

$(M-m)/(M+m)$



M/m

Moderazione di neutroni



- **alternativamente: dopo j urti**
 $n(\text{rossi}) + p \rightarrow \text{equil. termico } (E = 3/2kT)$
- **i moderatori più usati sono acqua, acqua pesante (D_2O) e C (grafite), la paraffina (CH_2) è anche un buon moderatore** - per passare da 2 MeV \rightarrow 1 eV ci vogliono 16 (29) urti in H_2O (D_2O); H ha una σ_{scatt} più alta, ma anche relativamente una molto più alta σ_{abs} e alla fine l'efficienza di moderazione è 80 volte più alta con D_2O (e 2.7 volte con la grafite)
- **nei cosiddetti fast breeders reactors, una delle soluzioni avanzate per il problema delle scorie, non ci sono moderatori ma solo sbarre di Boro (che ha una σ molto elevata per la cattura di n) per controllare il flusso di n**

Reattori e moderazione

BN - Bystrych Neutronach (fast neutrons)
 AGR Advanced Gas-cooled R.
 Magnox Mg non oxidizing, Gas cooled/CO₂
 RBMK High Power Channel-type, H₂O cooled
 CANada Deuterium Uranium (uses natural U)

Currently operating nuclear power reactors by moderator			
Moderator	Reactors	Design	Country
none (<u>fast n</u>)	1	<u>BN-600</u>	Russia (1)
graphite	29	<u>AGR</u> , <u>Magnox</u> , <u>RBMK(*)</u>	United Kingdom (18), Russia (11)
heavy water	29	<u>CANDU</u>	Canada (17), South Korea (4), Romania (2), China (2), India (2), Argentina, Pakistan
light water	359	<u>PWR</u> , <u>BWR</u>	27 countries

PWR Pressurized Water R.
 BWR Boiling Water R:

(*) il reattore di Chernobyl era di questo tipo 2018

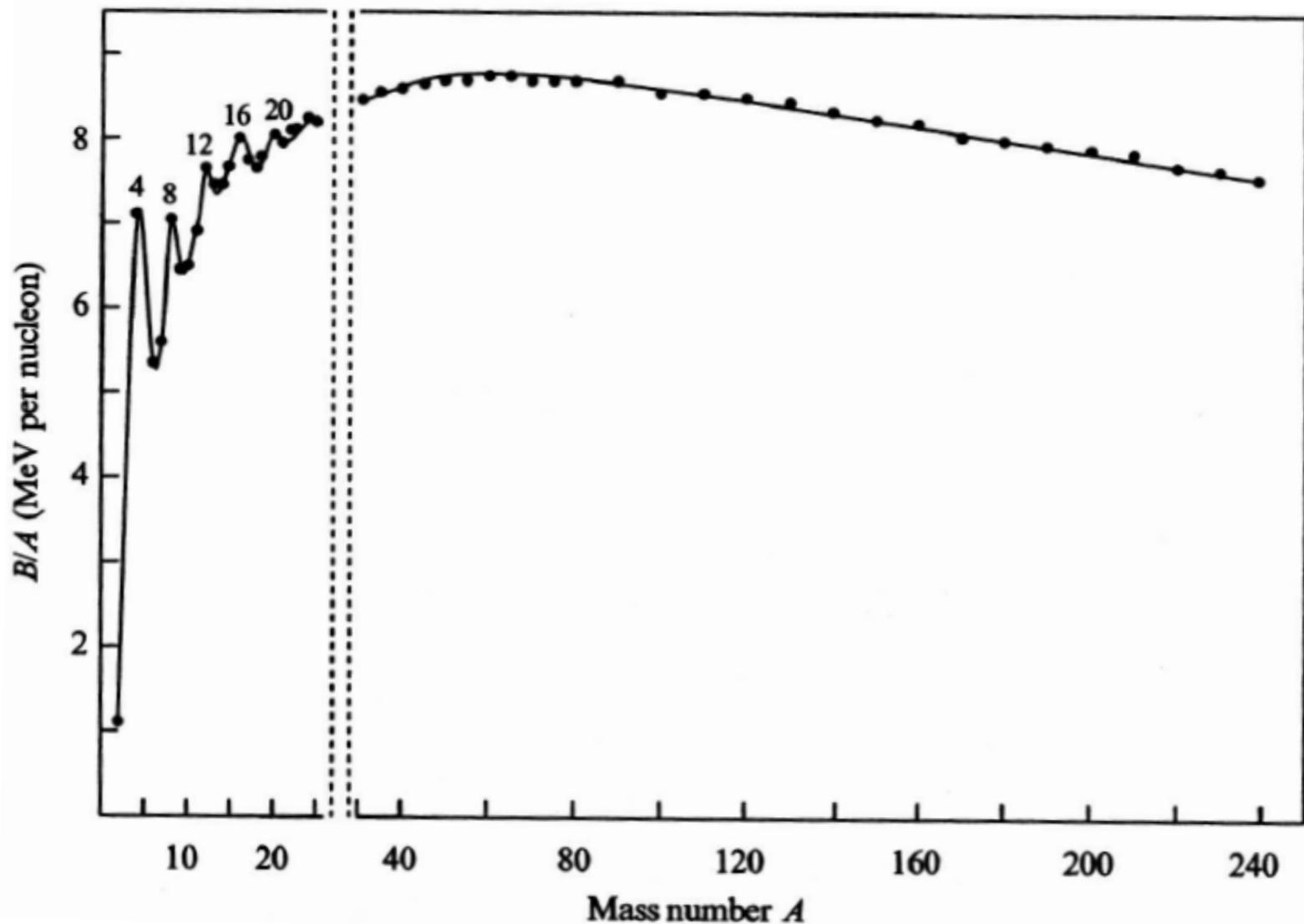
Energia di legame e fissione

- l'energia di legame (BE) per nucleone è

$$\frac{BE}{A} = \frac{[Zm_p + (A - Z)m_n - {}^A M_Z]c^2}{A}$$

con un valore massimo per ferro/nichel (fig.),
cioè questi sono i nuclei più stabili – per A più
grande la tendenza alla stabilità porta alla
fissione, per A più piccolo alla fusione

Energia di legame e fissione/2



Fissione nucleare di $^{235}\text{U}_{92}$

SEU 0.9-2%

LEU <20%

HEU >20%

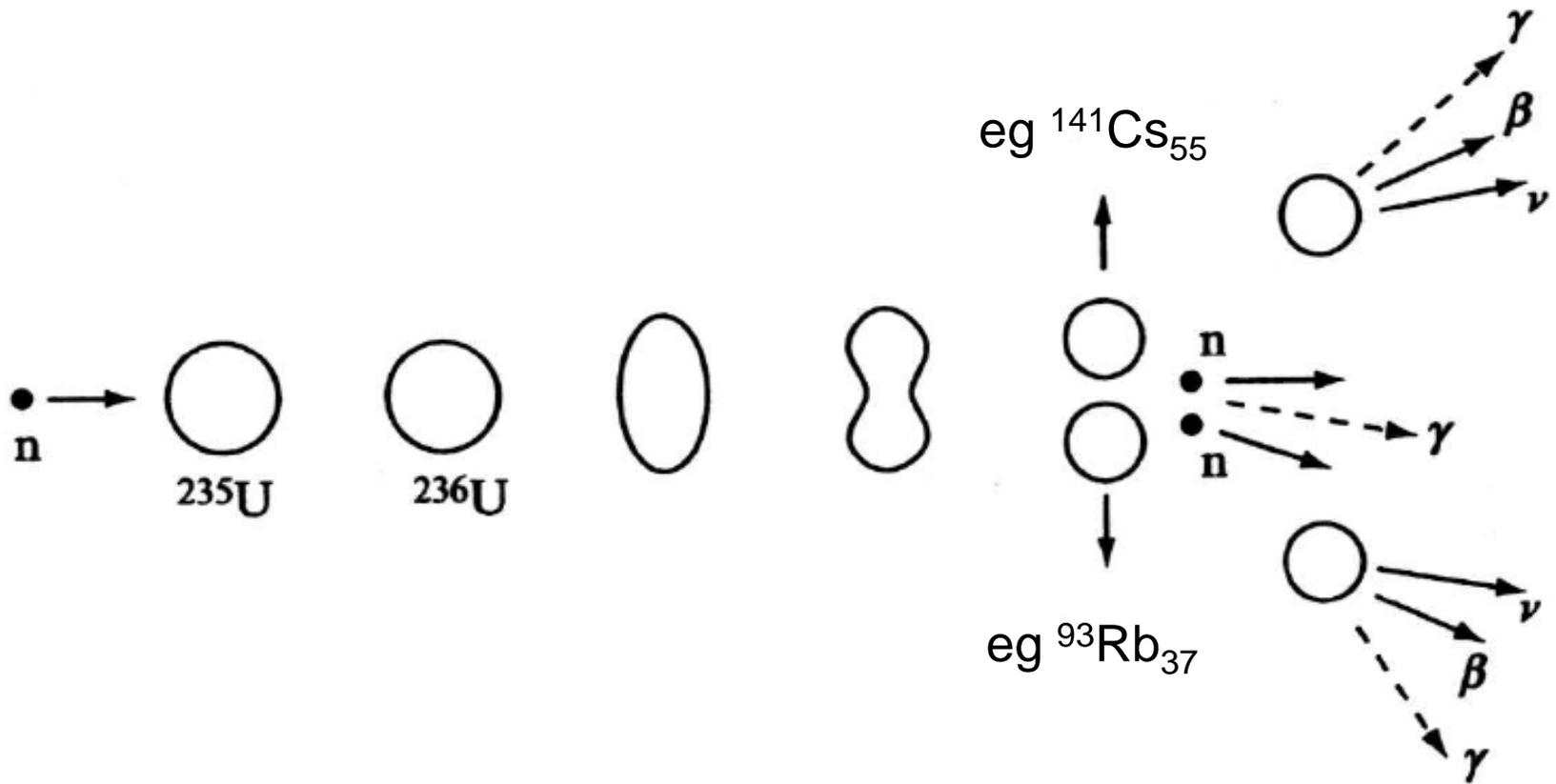
weapon grade >85%

weapon usable >20%

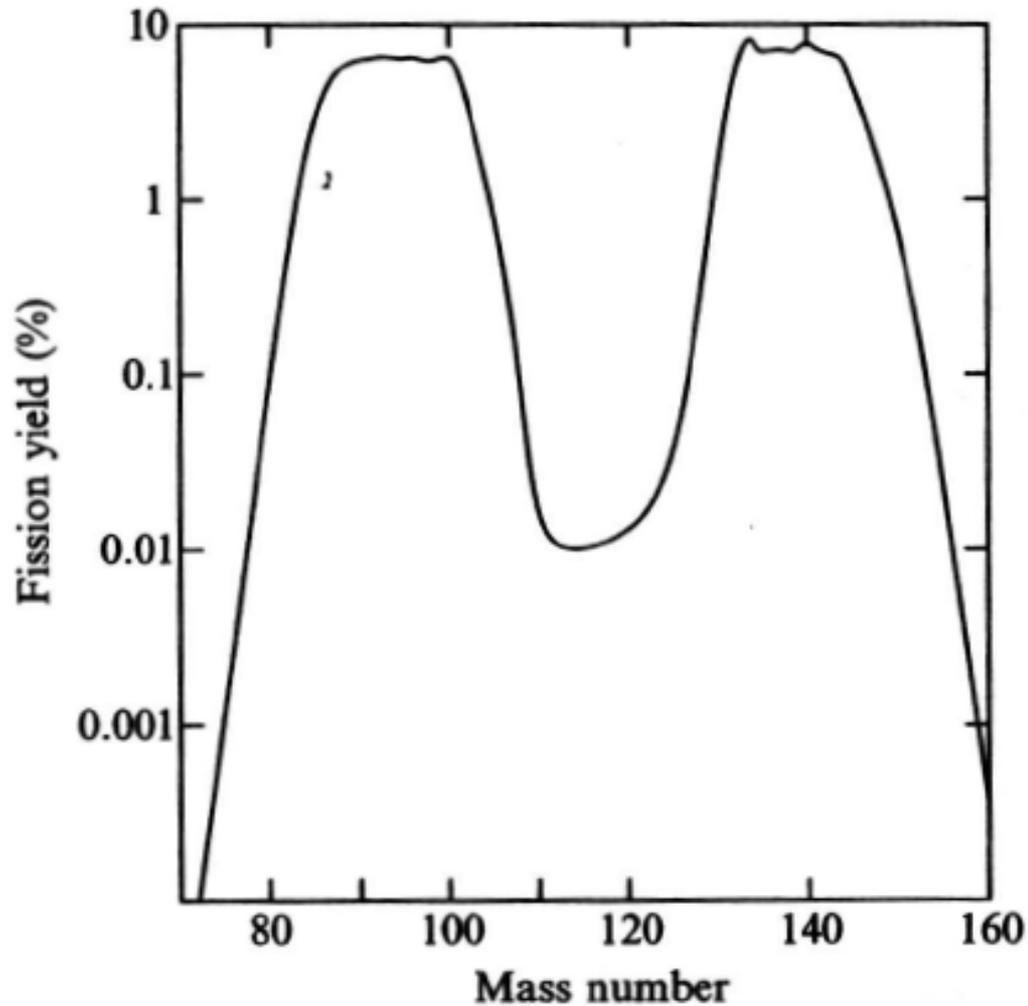
(crit. mass = ∞ at 6%)

- l'U naturale consiste (in peso) di
 - 99.27% ^{238}U
 - 0.72% ^{235}U
 - 0.006% ^{234}U
- per essere usato in un reattore la frazione di ^{235}U deve essere aumentata/arricchita al 3-5% (SlightlyEU 0.9-2%, HeavyWR; LowEU <20%, LightWR); bombardando ^{235}U con n termici si ottengono fissioni in due nuclei con in media 2.56 n prodotti ed energia (Q) che può essere usata
- le reazioni più importanti:
 - $n + ^{235}\text{U}_{92} \rightarrow ^{236}\text{U}_{92} \rightarrow ^{141}\text{Cs}_{55} + ^{93}\text{Rb}_{37} + 2n + Q$
 - $n + ^{235}\text{U}_{92} \rightarrow ^{236}\text{U}_{92} \rightarrow ^{141}\text{Ba}_{56} + ^{92}\text{Kr}_{36} + 3n + Q$

Fissione nucleare – modello a goccia



Distribuzione di massa dei frammenti di fissione di ^{235}U bombardato da n termici



Bilancio energetico

- Il bilancio energetico (M_i massa iniziale, M_f massa finale) per la reazione $n + {}^{235}\text{U}_{92} \rightarrow {}^{236}\text{U}_{92} \rightarrow {}^{141}\text{Ba}_{56} + {}^{92}\text{Kr}_{36} + 3n$ è

$$M_i = 92 m_p + 143 m_n - 235 \text{ BE}({}^{235}\text{U}_{92}) + m_n$$

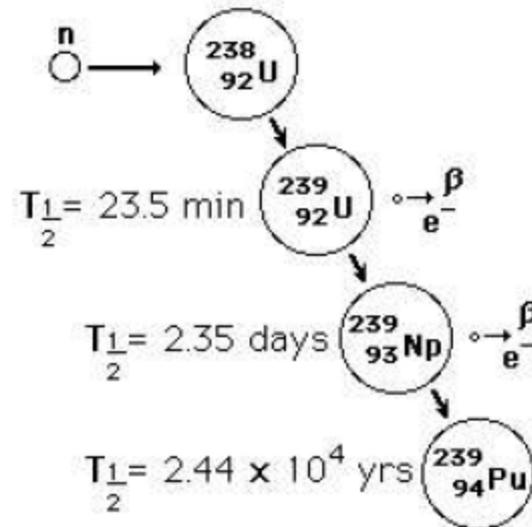
$$M_f = 56 m_p + 85 m_n + 36 m_p + 56 m_n - 233 \text{ BE}(\text{Ba}; \text{Kr}) + 3 m_n$$

$$M_i - M_f = -235 \text{ BE}({}^{235}\text{U}_{92}) + 233 \text{ BE}(\text{Ba}; \text{Kr}) = \\ -235 \cdot 7.6 \text{ MeV} + 233 \cdot 8.5 \text{ MeV} = +194.5 \text{ MeV}$$

- L'energia non è tutta disponibile subito. I prodotti di fissione sono parzialmente radioattivi: danno ~13 % dell'energia totale sotto forma di raggi β e γ \rightarrow il raffreddamento dei reattori nucleari deve continuare dopo averli spenti (si applica anche al trattamento delle scorie radioattive)

Il ^{239}Pu

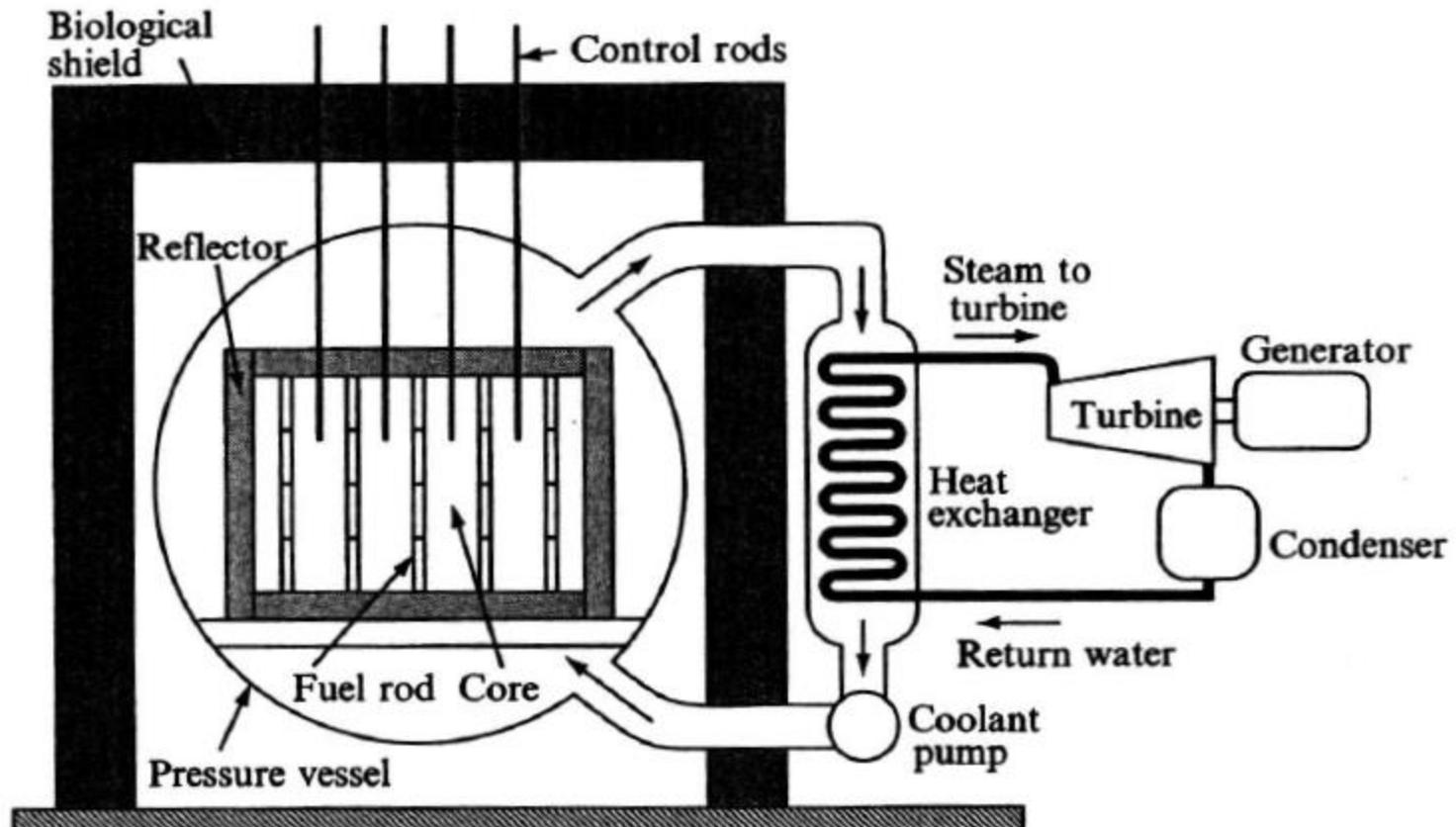
- in aggiunta alla fissione del ^{235}U c'è anche breeding (fertilizzazione) di ^{239}Pu partendo da ^{238}U



- dopo un po' di tempo la fissione di ^{239}Pu contribuisce alla produzione di energia (e alla proliferazione!) → per produrre una potenza elettrica di 1 GW servono solo 640 kg of ^{235}U (invece di 1000 kg)

Schema di reattore (termico) tipico

- il moderatore consiste di H_2O o D_2O , qualche volta di C (vedi e.g. p. 43) – il core è circondato da materiale con proprietà riflettenti per i n – le barre di controllo consistono di B o Cd (σ_{catt} elevata per i neutroni) – il calore è trasformato in vapore che pilota una turbina e il generatore

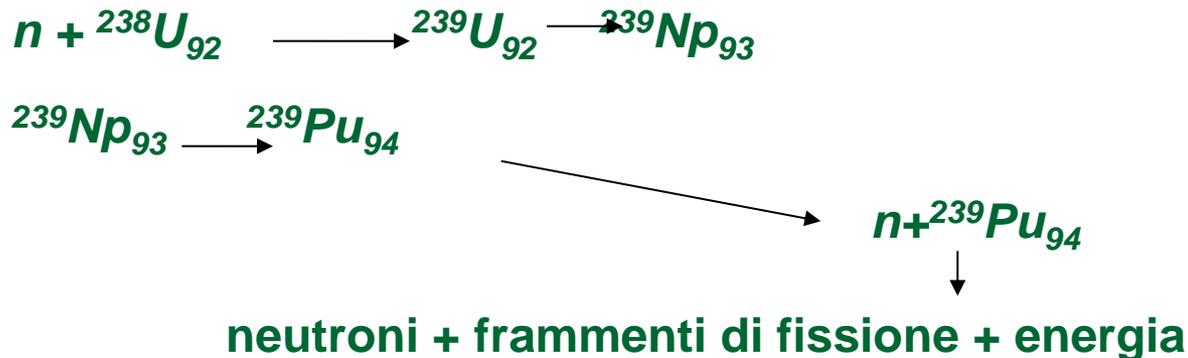


Reazione a catena con ^{235}U - criticità

- per via delle perdite, > 1 n deve essere prodotto nella fissione per sostenere la reazione a catena; per 100 n incidenti 256 n sono prodotti nella fissione di $^{235}\text{U}_{92}$; in un reattore moderato a grafite, i 256 n sono usati come segue:
 - 100 n usati per la prossima fissione,
 - 90 n catturati radiativamente da $^{238}\text{U}_{92}$,
 - 20 n catturati radiativamente da $^{235}\text{U}_{92}$,
 - 30 n assorbiti dal moderatore,
 - 5 n assorbiti dalle strutture del reattore,
 - 9 n sfuggono dal contenitore,
 - 2 n assorbiti dalle barre di controllo.
- per operare un reatt. nucl. a potenza costante, il cosiddetto breeding ratio k – chiamato anche condizione critica – è molto importante:
 $k = (N_n \text{ nella } (n + 1)\text{esima generazione}) / (N_n \text{ nella } n\text{-esima})$
- deve essere $k \geq 1$
- con l'aiuto di barre di controllo di Cd o B, che hanno un'elevata sezione d'urto per cattura di n, k è mantenuto ≈ 1 .

Reattori a Fissione (veloci)

COMBUSTIBILE: U e Pu e vengono utilizzati neutroni “veloci” (100 keV – 100 MeV)



Si brucia tutto l'U e si può produrre più Pu di quanto se ne consumi.

Si può recuperare più del 99% dell'energia del combustibile esausto di un reattore termico

RAFFREDDAMENTO: metallo liquido (e.g. Na)

SCORIE: Pu e frammenti di fissione

Scorie nucleari (cfr mondo 2015: 322 milioni t di plastica)

SCORIE	CLASSIFICAZIONE	CARATTERISTICHE	DEPOSITI
U + elementi attivati	<i>short-lived waste</i> <i>Low-level waste</i> (LLW)	grande volume, radioattività bassa e modesto calore sprigionato	In loco presso il reattore
Frammenti di fissione a breve vita media	<i>short-lived waste</i> <i>Low-level waste</i>	5% in volume, maggiori responsabili della radioattività e calore a breve termine (50 anni)	Depositi superficiali
Frammenti di fissione a lunga vita media	<i>Long-lived waste</i> <i>Medium-level waste</i>	Es: I, Tc, Zr, Cs Vite medie >10 ⁴ anni Piccole quantità 4% in volume	Depositi geologici profondi (>300 metri)
Attinidi (Pu, Np, Am, Cm, ...)	<i>Long-lived waste</i> <i>High level waste</i> (HLW)	Fissili, emettitori α Piccole quantità 0.2% in volume Vite medie >10 ⁴⁻⁵ anni	Depositi geologici profondi (>300 metri)

Element (quantity)	Isotope	Half-life (years)	Quantity (ton/year)
Plutonium (11.4 ton/year)	²³⁸ Pu	88	0.19
	²³⁹ Pu	2.4x10 ⁴	6.53
	²⁴⁰ Pu	6.5x10 ³	2.52
	...		
MA - Minor actinides (1.1 ton/year)	²³⁷ Np	2.1x10 ⁶	0.48
	²⁴¹ Am	430	0.25
	²⁴³ Am	7.4x10 ³	0.14
	²⁴⁵ Cm	8.5x10 ³	0.001
Fission products (39 ton/year)	¹³⁵ Cs	2.3x10 ⁶	0.4
	⁹⁹ Tc	2.1x10 ⁵	1.0
	⁹³ Zr	1.5x10 ⁶	0.9
	¹²⁹ I	1.0x10 ⁷	0.2
	¹⁰⁷ Pd	5.5x10 ⁶	0.25
	...		

- TRansUranics (TRU) prodotti da catture successive di n
- High Level Waste (HLW)
- Long Lived Fission Fragments (LLFF)
- Minor Actinides (MA)

Dati relativi ai reattori francesi. *NIM A(2003)*
(per ottenere i dati mondiali bisogna x 8-10)

Scorie (semplificate)

- 1 t di U combustibile spento, non processato, contiene:
 - 955 kg U
 - 10 kg Attinidi
 - 8.5 kg $^{239-240-242}\text{Pu}$ (emivita fino a 375 ka)
 - 0.6 kg ^{243}Am (7370 a)
 - 0.5 kg ^{237}Np ($2.14 \cdot 10^6$ a)
 - 31 kg frammenti di fissione a vita media breve
 - 4 kg altri prodotti

Gestione delle scorie

L'immagazzinamento geologico risulta pericoloso per:

- Criticità
- Possibilità di contaminazione falde acquifere
- Terrorismo nucleare



Alternativa

Trasformazione nucleare (trasmutazione):

neutroni (o altre particelle) inducono reazioni nucleari che trasformano i materiali indesiderati in specie nucleari accettabili, per es:

Attinidi —————> farli fissionare

Frammenti di fissione → trasformarli da “a lunga vita media” a “a corta vita media” o stabili

Un esempio di trasmutazione:

$^{99}\text{Tc} (2.1 \times 10^5 \text{ y}) + n$



$^{100}\text{Tc} (16 \text{ sec})$

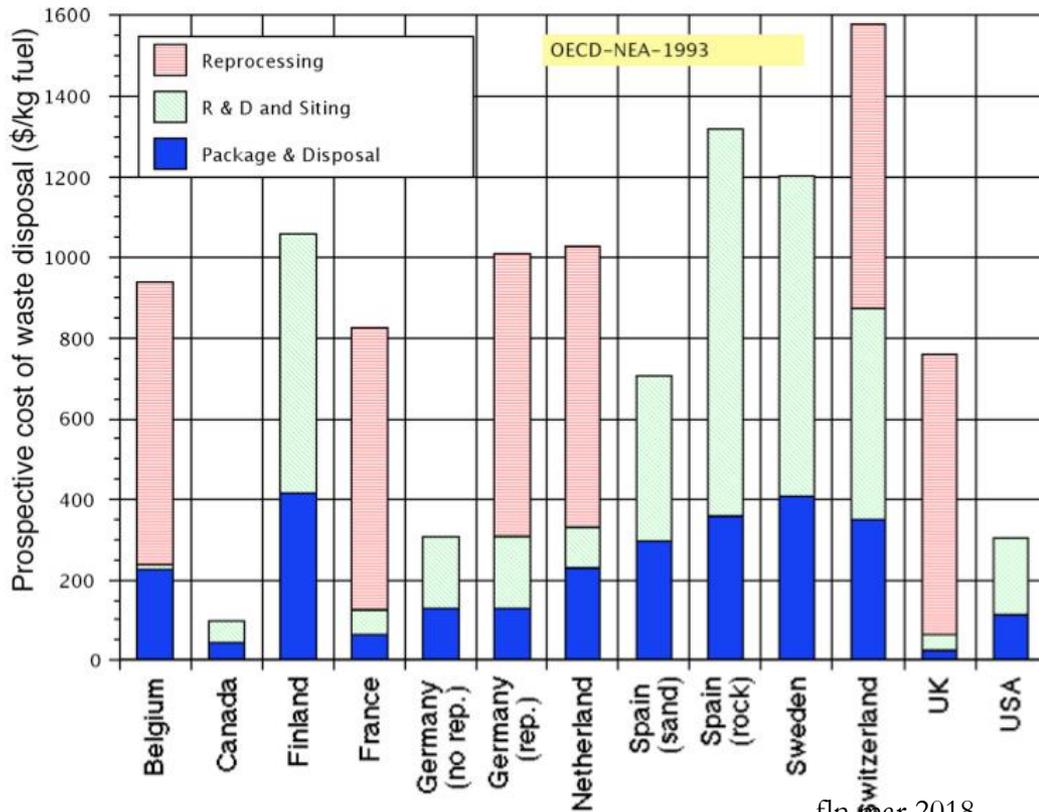


^{100}Ru

Gestione delle scorie/2

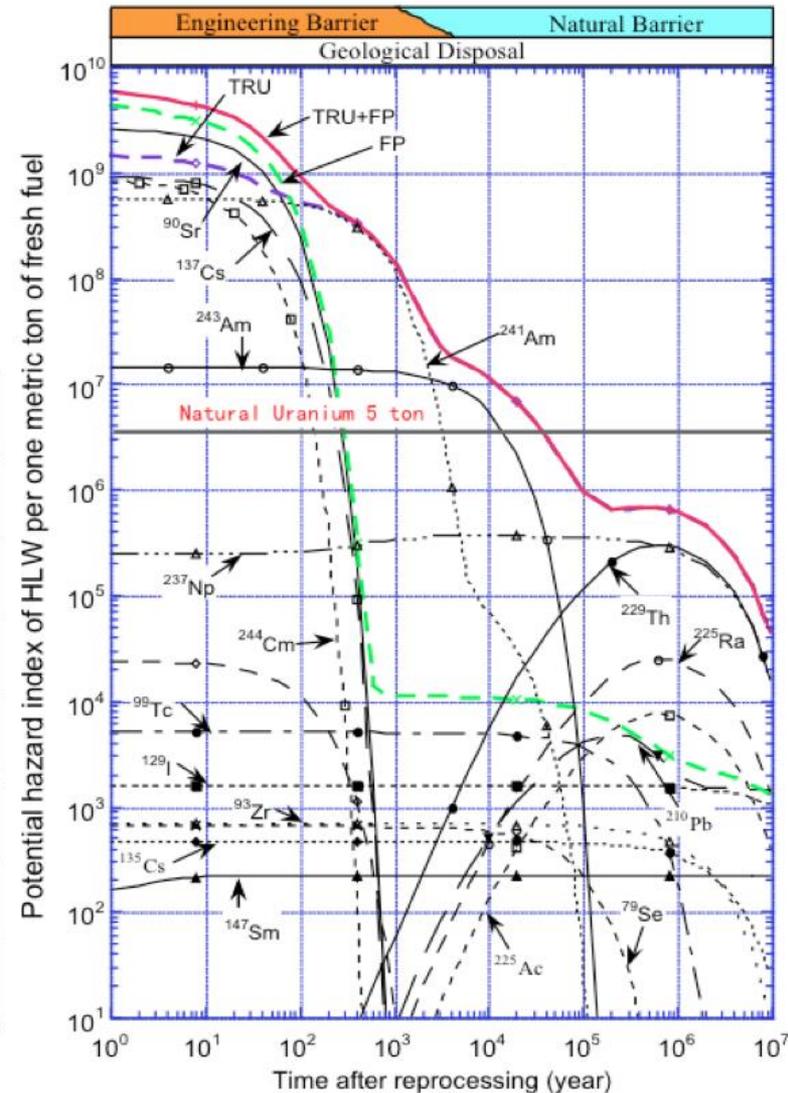
- Elevato costo aggiunto per la produzione di energia
- Necessità di depositi geologici di difficile individuazione.

costi per disporre delle scorie



fln 9 mar 2018

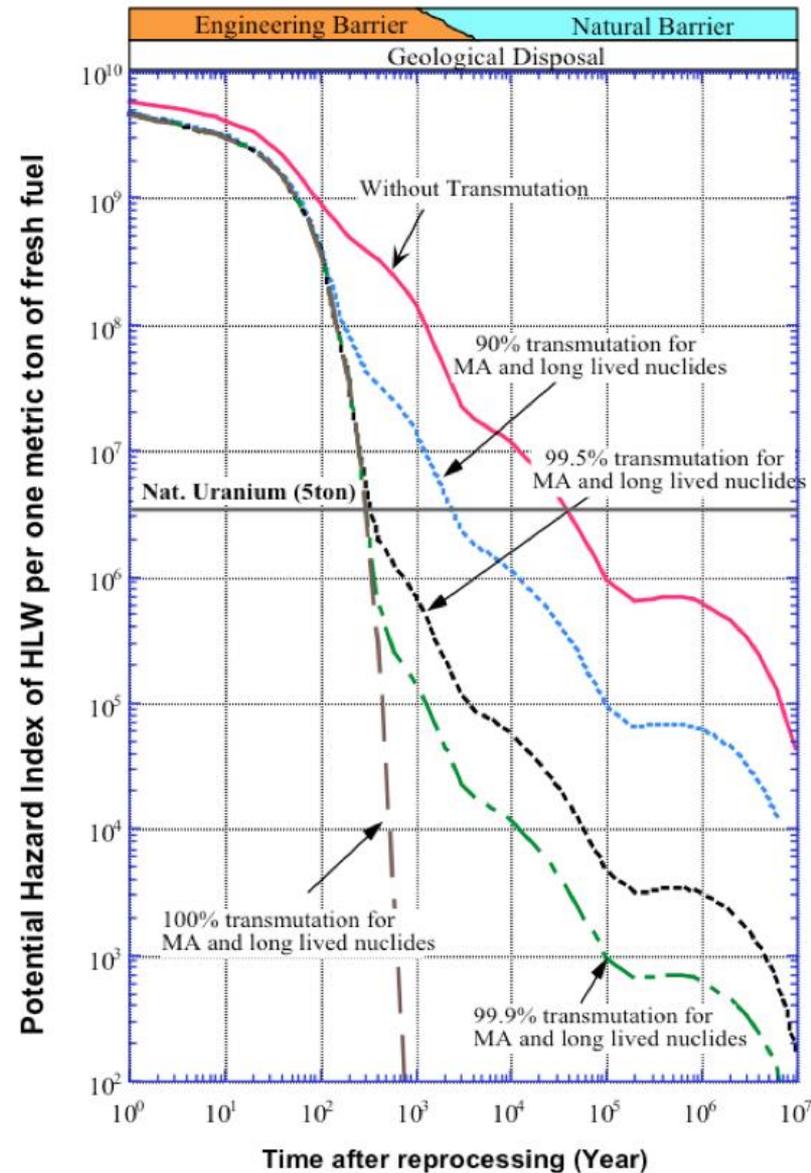
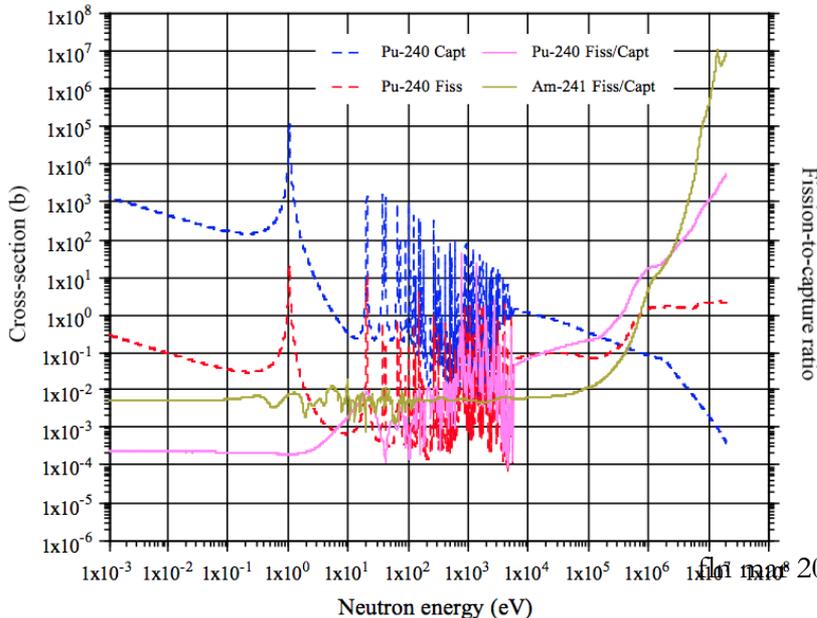
radiotossicità vs t



non mostrato a lezione 58

Riprocessamento delle scorie

- L'eliminazione degli attinidi implica l'uso di processi di fissione.
- L'eliminazione dei HLW potrebbe essere effettuata aggiungendo piccole quantità al combustibile dei reattori tradizionali.
- Ma i MA presentano piccole sezioni d'urto di fissione ad energie termiche e alte sezioni d'urto di cattura che degradano l'economia dei neutroni nel reattore costringendo ad aumentare l'arricchimento e portando per alcuni isotopi, a una produzione di TRU > di quella smaltita.

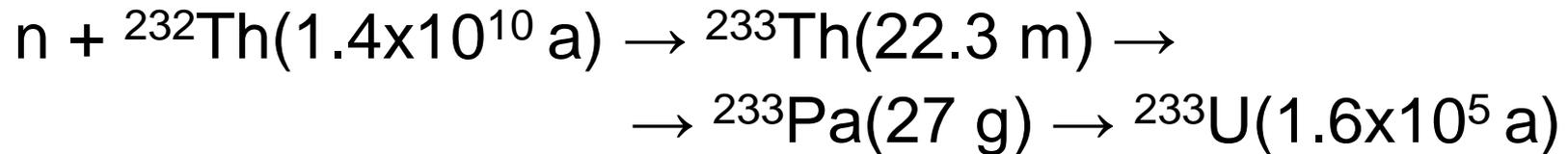


Fissione con $^{232}\text{Th}_{90}$ come combustibile

- l'interesse nell'uso di $^{232}\text{Th}_{90}$ consiste in un ciclo che evita quasi del tutto la produzione di $^{239}\text{Pu}_{94}$ (**non-proliferating**) (fig. pag. seguente)
- in un reattore a torio $^{233}\text{U}_{92}$ è la principale sorgente di energia:

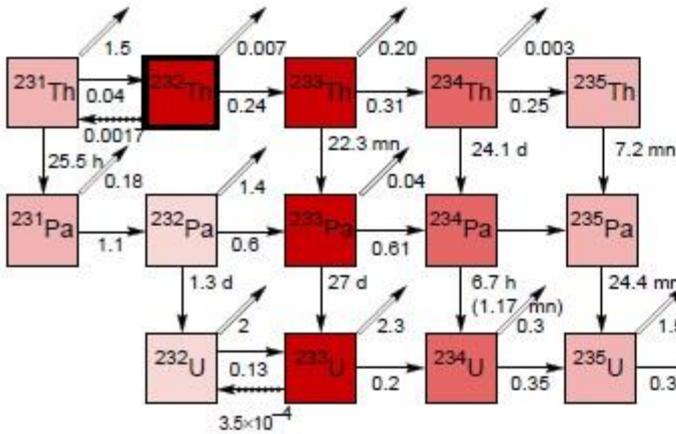
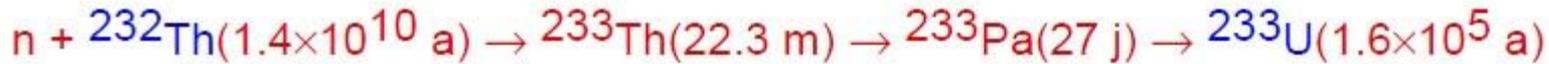
$$\sigma_{\text{fissione}}(^{233}\text{U}) = 2.3 \text{ barn}$$

$$\sigma_{\text{fissione}}(^{233}\text{Th}) = 0.2 \text{ barn}$$

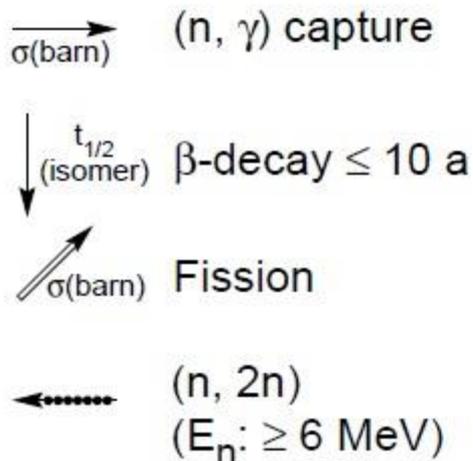
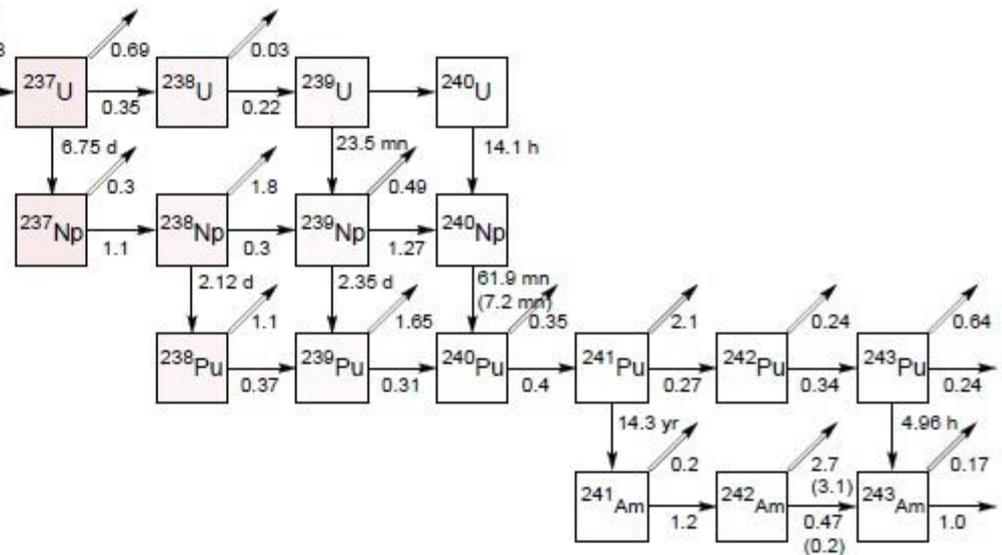


- però un reattore a torio non funziona per conto suo, per via della lunga vita media del $^{233}\text{Pa}_{91}$ (protoactinio, 27 g) e, poichè $k < 1$, un reattore a torio ha bisogno di un rifornimento esterno di n

Ciclo di fissione per Th (σ per n veloci)



Among the 60% of neutrons not used for fission, 20% are lost and 40% are used to breed ${}^{233}\text{U}$ from ${}^{232}\text{Th}$. In this way, new fissile material replaces what is used for fission.



Note the difference between ${}^{232}\text{Th}$ and ${}^{238}\text{U}$ in terms of TRU access!

Vantaggi del Torio (*,**) vs Uranio

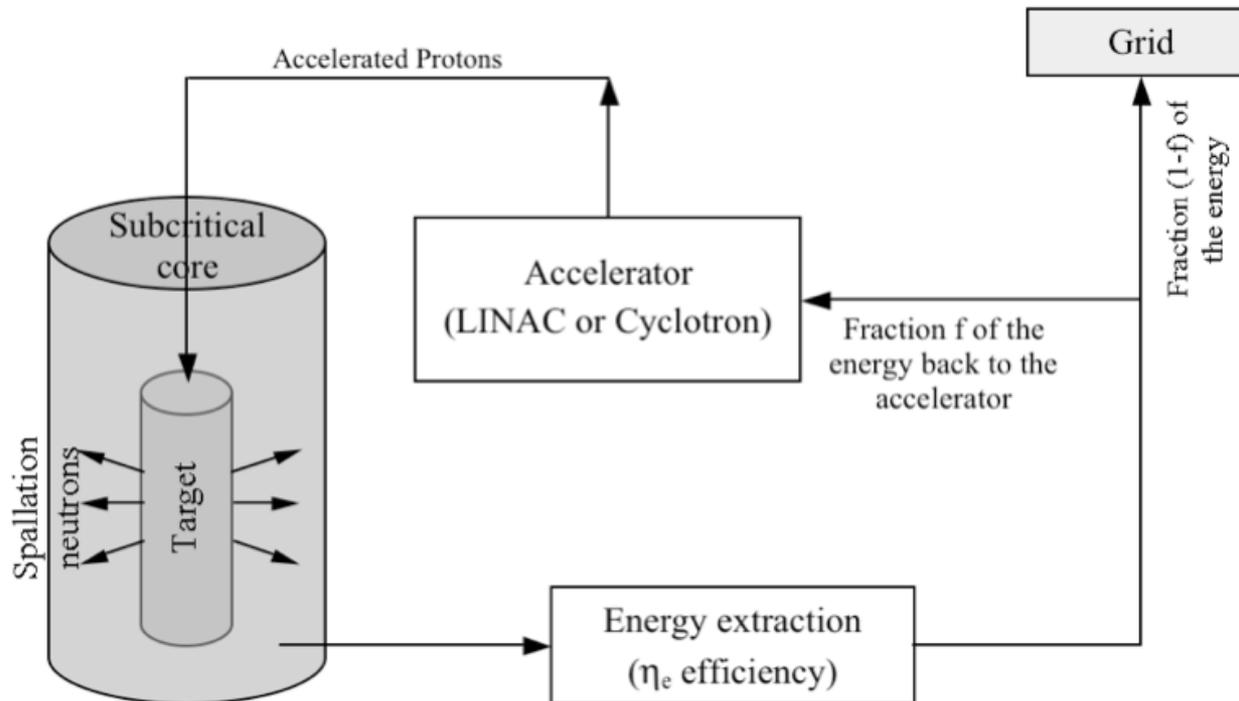
- il Th naturale esiste come isotopo puro; può essere usato direttamente, se si forniscono i n in più, senza arricchimento; è 4-5 volte più abbondante dell'U – non solo: il Th è fertile, non fissile, ma l' ^{232}U , che ne deriva in catena è fissile; il Th è quindi ~140 volte più efficiente dell'U naturale
- nel ciclo del Th si producono molti meno attinidi TRU vs l'U, in un reattore a U si producono 0.4-0.9 ^{239}Pu per nucleo di ^{235}U , con $t_{1/2} = 24360$ a
- la radiotossicità nel reattore a Th (che forma la base dell'Energy Amplifier (EA)) decresce molto più in fretta rispetto a un PWR

(*) al di fuori dell'industria nucleare, il Th è usato per elettrodi da saldatura ad arco mescolato al 1-2% col W, mentre si mescola al vetro per ottica di fascia alta e per strumentazione scientifica

(**) in passato sono stati costruiti pochi reattori al Th, spesso di bassa potenza, eg aggiungendo ^{235}U per pilotare la reazione e rinnovando il Th: solo in India ci sono alcuni r. ancora in funzione

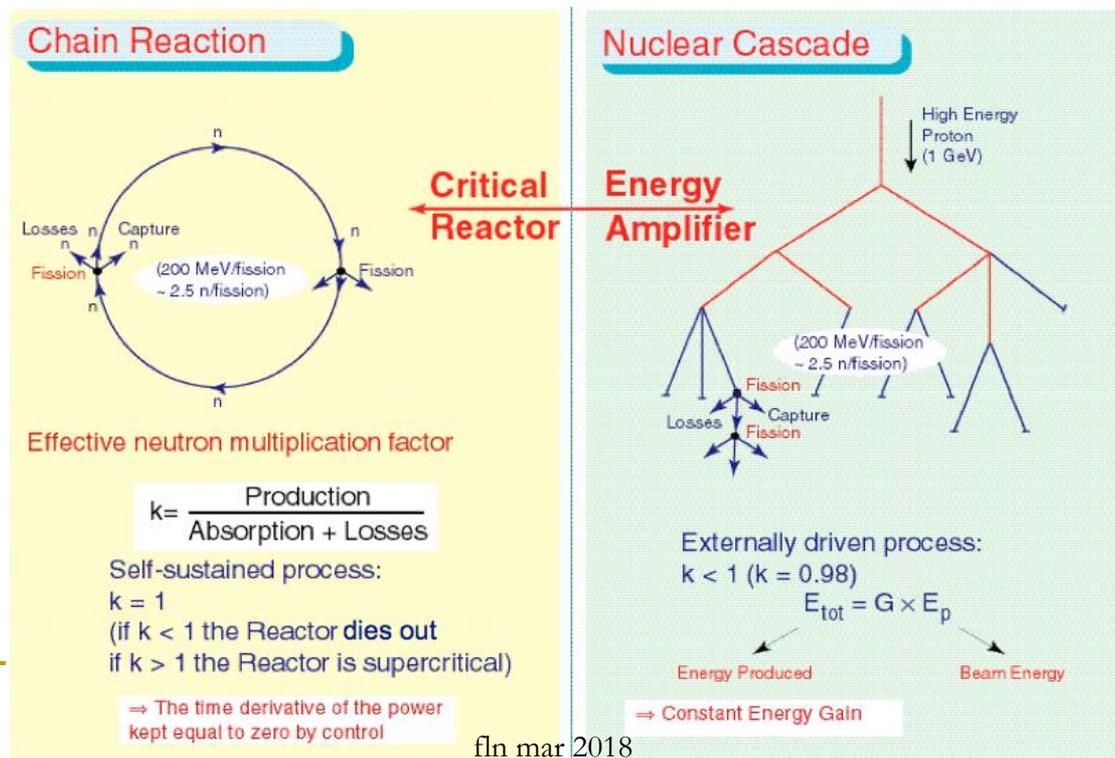
Accelerator Driven Systems

- Gli ADS sono dispositivi formati tramite l'unione di un reattore sottocritico con un acceleratore di particelle cariche, generalmente protoni.



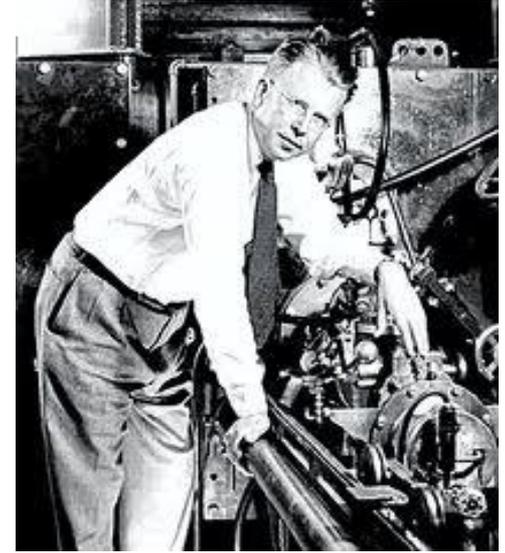
Accelerator Driven Systems/2

- In questi sistemi l'energia è prodotta come risultato della cascata nucleare iniziata dall'interazione dei protoni accelerati con un bersaglio di spallazione.
- Il reattore è sottocritico, ovvero opera con una reazione che non si auto-sostiene in assenza dell'immissione di neutroni da una sorgente esterna, a differenza dei reattori tradizionali che operano in regime di criticità, ovvero i neutroni prodotti dalle reazioni di fissione forniscono esattamente quelli necessari per le successive fissioni.



Storia

- L'idea di produrre neutroni da spallazione per trasmutazione è stata presente in tutta la storia del nucleare.
- Nel 1950, Ernest O. Lawrence a Berkeley propose di produrre Pu dall'U impoverito tramite l'uso di un ciclotrone. Il progetto fu abbandonato nel 1954.
- Nel 1952, W. B. Lewis in Canada propose l'utilizzo di un acceleratore per produrre ^{233}U dal Th allo scopo di chiudere il ciclo del combustibile per i reattori CANDU. Il progetto prevedeva di irradiare direttamente il materiale fissile con un acceleratore ma fu presto abbandonato
- Un rinnovato interesse si è avuto negli anni '80 e all'inizio dei '90 in particolare in Giappone (progetto OMEGA) e in America (proposta di Hiroshi Takahashi per un sistema ibrido a neutroni veloci per la trasmutazione degli attinidi minori a Brookhaven).
- Nel 1993 Carlo Rubbia propose un primo progetto di Energy Amplifier basato su neutroni termici usando sul ciclo del Th per la produzione di energia. Quando divenne chiaro che nel mondo occidentale la priorità è la distruzione delle scorie radioattive, il sistema subì un'evoluzione verso un Energy Amplifier a neutroni veloci



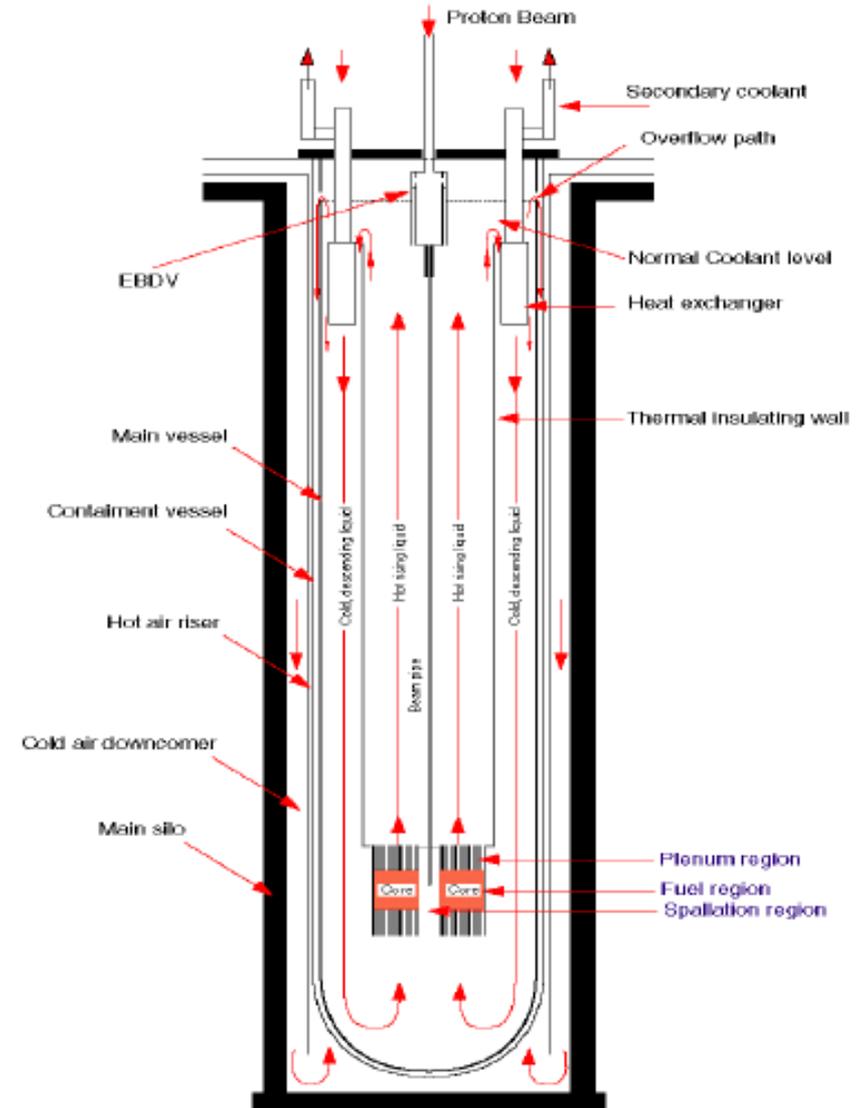
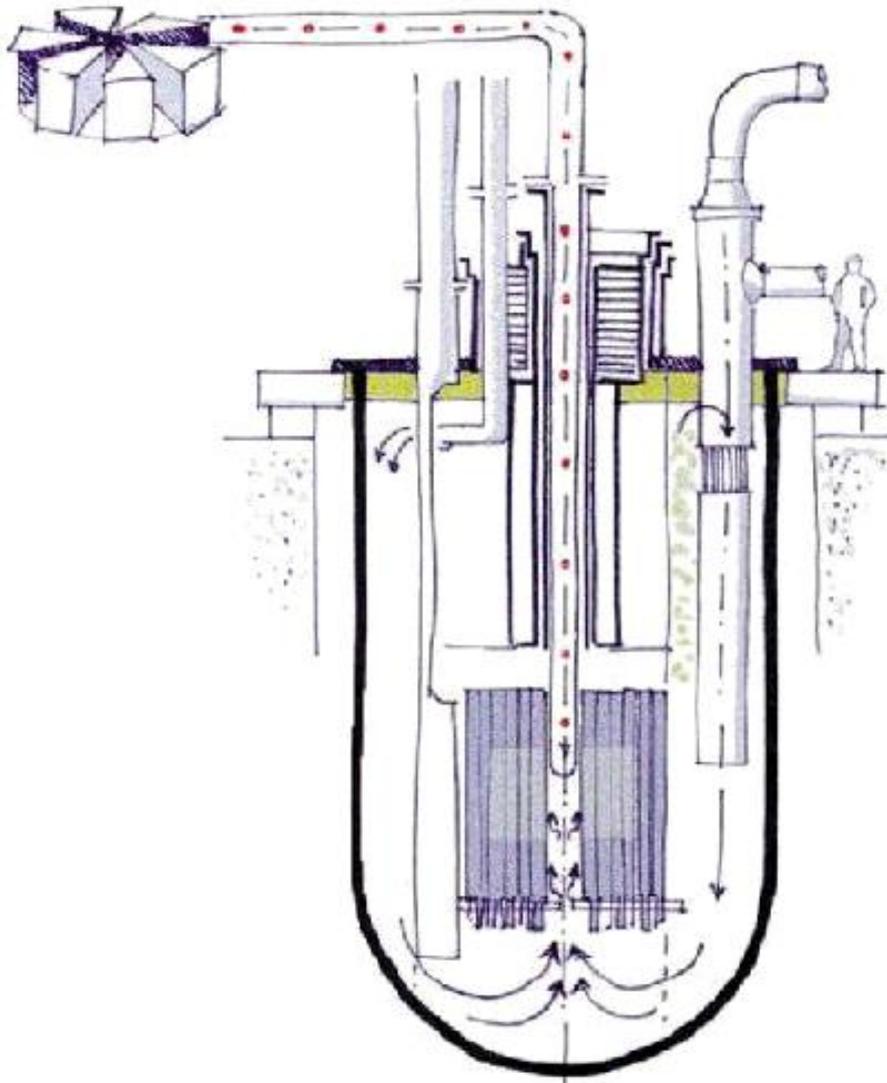
ADS e EA

Dalla relazione di Carlo Rubbia al International Symposium on Neutrons in Basic Science and Nuclear Technologies n_BANT, CERN, Geneva - March 22- 23, 2005 :

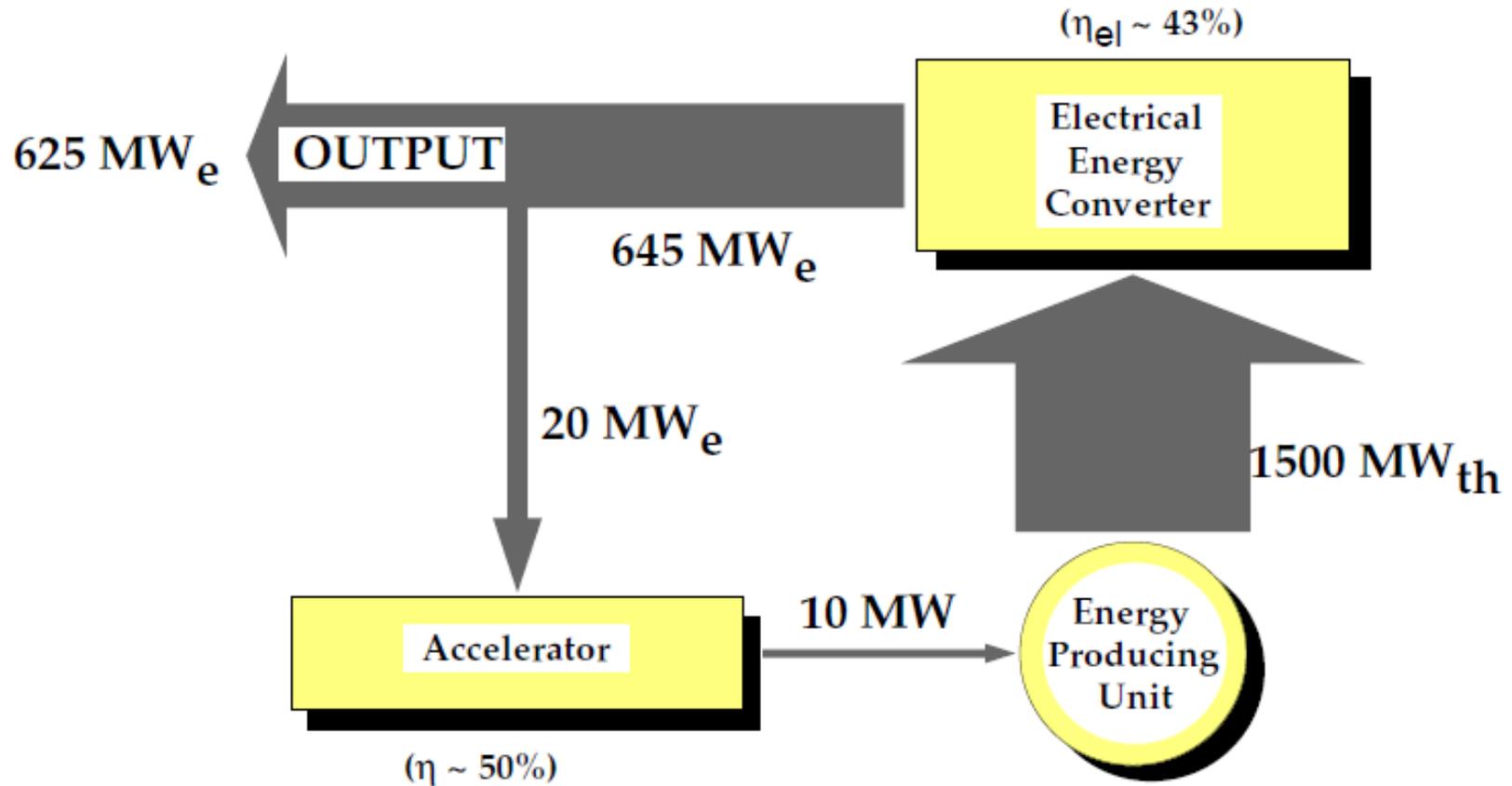
- In a **sub-critical operation** the energy process is controlled and driven by some additional neutrons (typically $\approx 1\%$ to 2%), externally supplied with a proton spallation target (ADS).
- In these conditions, the energy gain G is controlled and directly proportional to the power produced by the external accelerator. Because of the excellent neutron yield of the spallation process, **high values of G are possible**, typically in the range of G between 250 and 500. This means that a thermal power in the GWatt range is controlled by a p-beam of only a few MWatt (a few mA) (EA).
- $[10 \text{ mA} \times 1 \text{ GeV} = (10^{-2} / 1.6 \cdot 10^{-19}) \times 10^9 \times 1.6 \cdot 10^{-19} = 10 \text{ MW}]$



Schema di ADS e di reattore al Th (EA)



EA: bilancio energetico



- fascio: $1 \text{ GV} \times 10 \text{ mA} = 10 \text{ MW}$
- acceleratore: ad es. $\eta = 33\%$ (PSI), pessimistico 20%

Struttura globale dell' EA

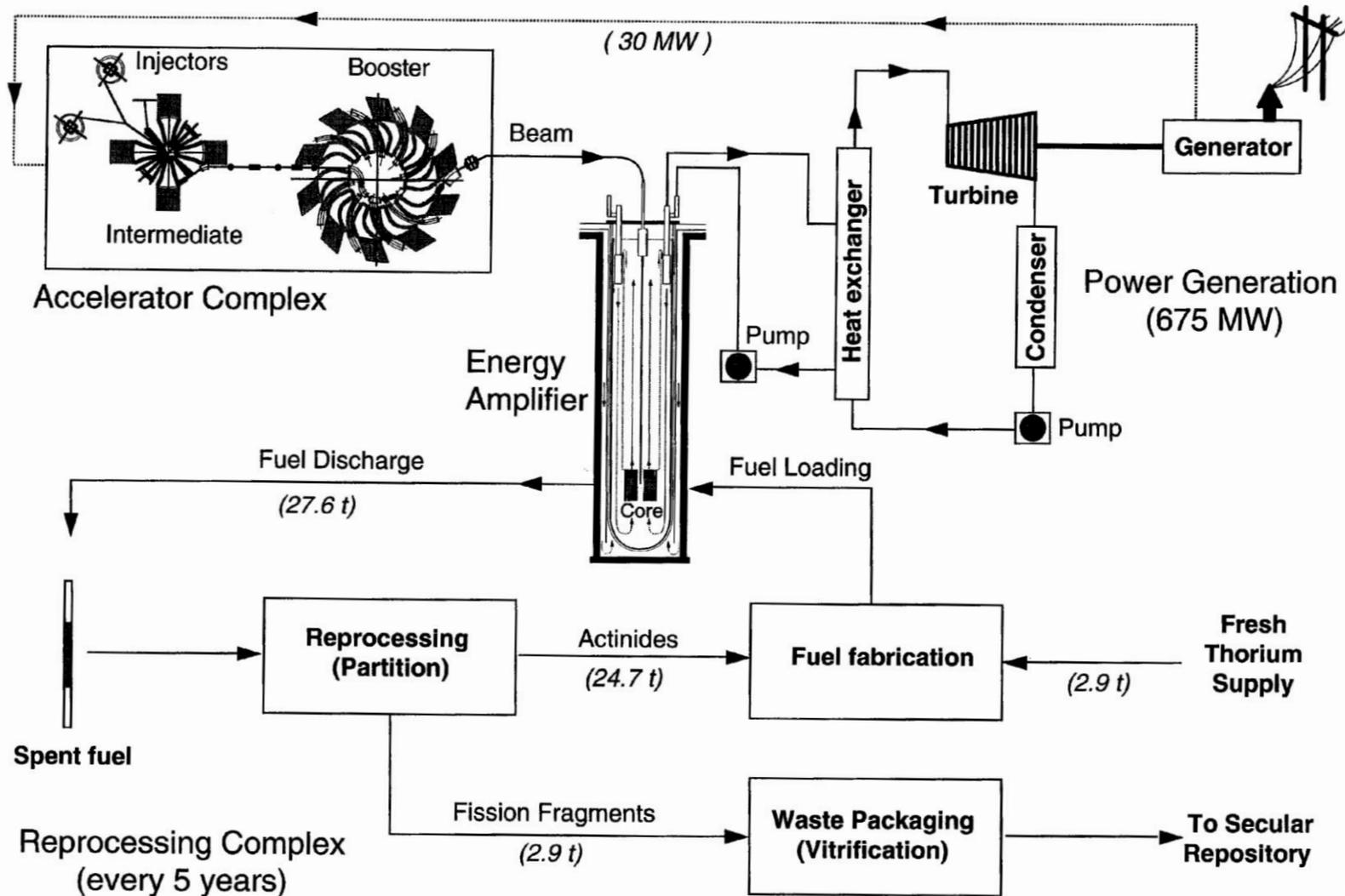
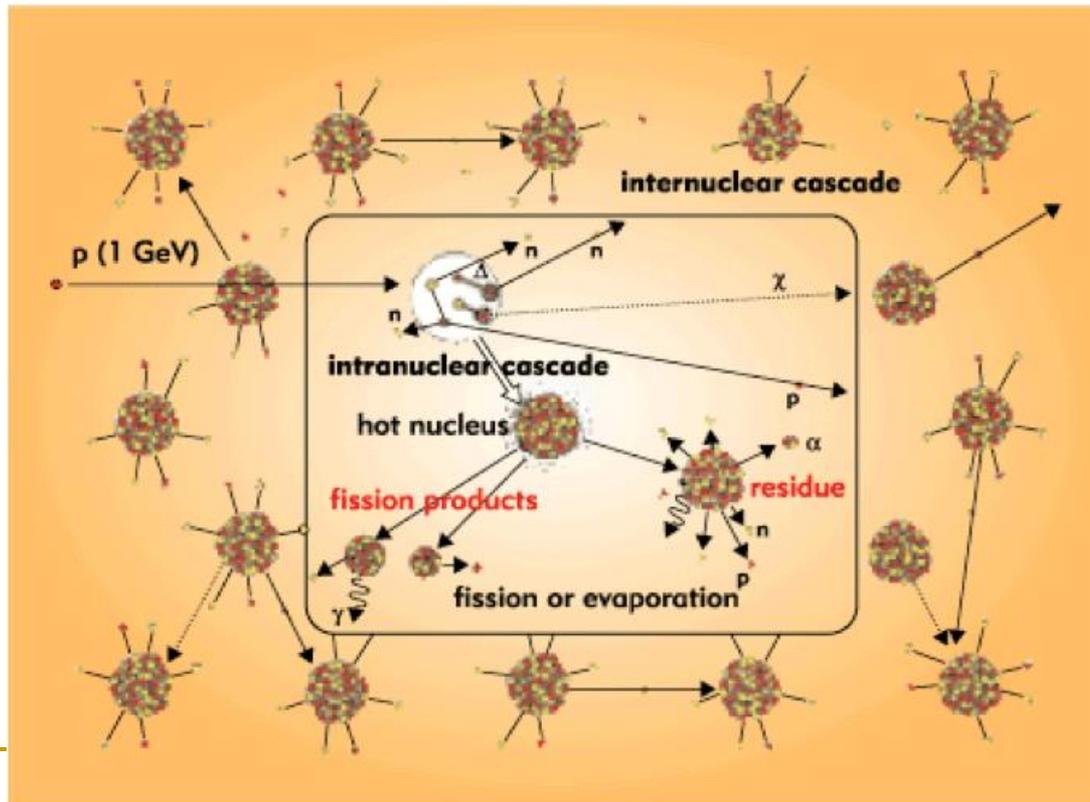


Figure 1.1

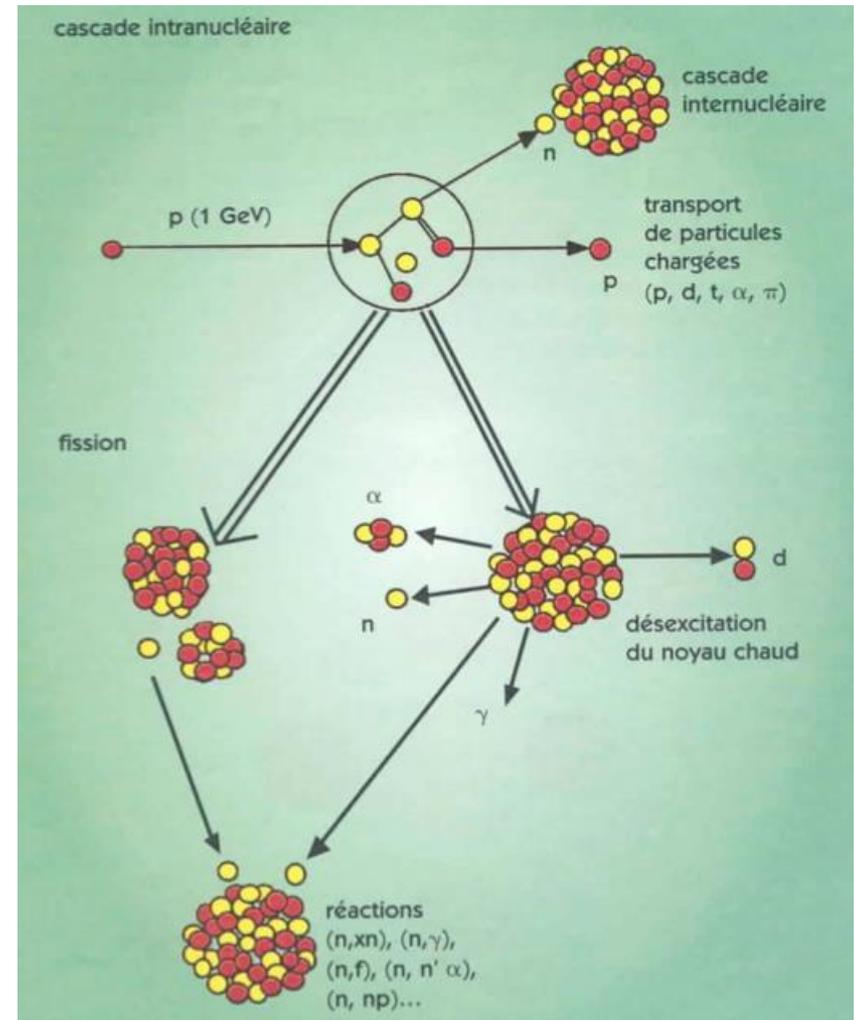
Fisica per gli ADS: Spallazione

- Con il termine spallazione si comprendono le interazioni fra adroni ad alta energia o di nuclei leggeri contro nuclei atomici.
- È un meccanismo di reazione dove il proiettile ad alta energia provoca l'espulsione dal bersaglio di qualche nucleone o particelle leggere
- In base alle condizioni, il numero di particelle espulse, in particolar modo neutroni, può essere abbastanza grande, caratteristica di grande importanza per un ADS.



Spallazione/2

- Ad alte energie **non** si può pensare la reazione nucleare tramite la formazione di un nucleo composto.
- I protoni ad alta energia producono un ampio spettro di reazioni nell'interazione con i nuclei
- Prima di tutto il processo diretto crea la formazione di una Intra-Nuclear Cascade (10^{-23} - 10^{-22} s).
- Successivamente l'interazione con le particelle secondarie e i nuclei del bersaglio di spallazione viene descritta usando i modelli Pre-Compound Stage (che include pre-equilibrium, multi-fragmentation, Fermi break-up) e Compound Nuclei (evaporazione di neutroni e fissione).
- Alla fine avvengono reazioni inelastiche a bassa energia (n, xn) , (n, α) , (n, γ) , una volta che le particelle secondarie sono scese sotto una certa soglia (per i neutroni circa 20 MeV), 10^{-18} - 10^{-19} s.



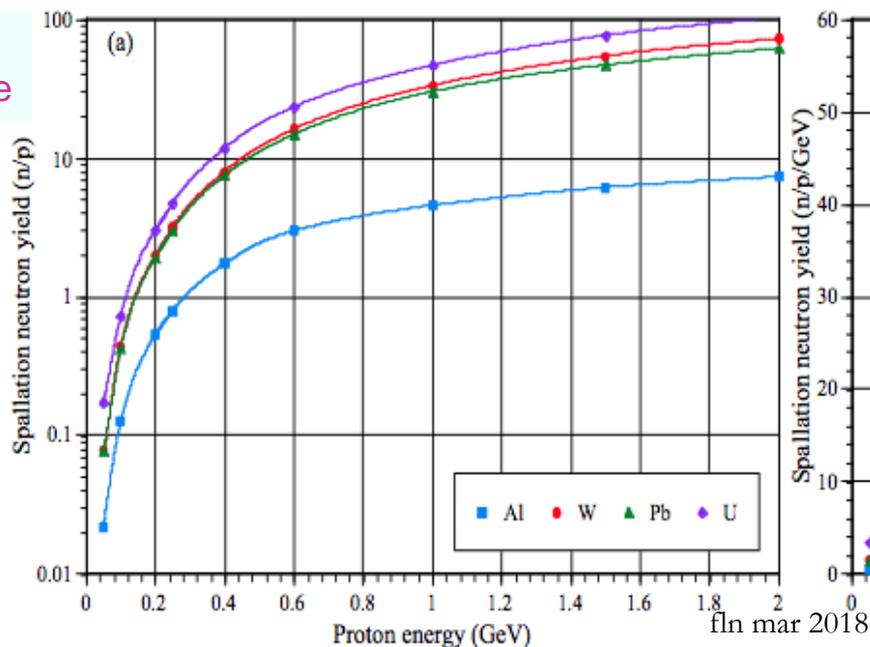
Spallazione/3

- Gli aspetti più interessanti che caratterizzano il processo di spallazione sono:
- Resa di Neutroni di Spallazione (molteplicità dei neutroni emessi), che determina le richieste per la potenza dell'acceleratore.
- Spettro dei Neutroni di Spallazione, che determina i danni e l'attivazione dei materiali strutturali (design della finestra del fascio e del bersaglio di spallazione) e il tipo di bersagli che potranno essere trasmutati dalla sorgente. Solitamente questo spettro è simile a quello dei neutroni da fissione, con un piccolo spostamento ad energie superiori (3-4 MeV anziché 2 MeV).
- Distribuzione dei prodotti di Spallazione, che determina la radiotossicità dei residui
- Deposizione di energia, che determina le caratteristiche termoidrauliche per il bersaglio di spallazione.

Resa di Neutroni di Spallazione

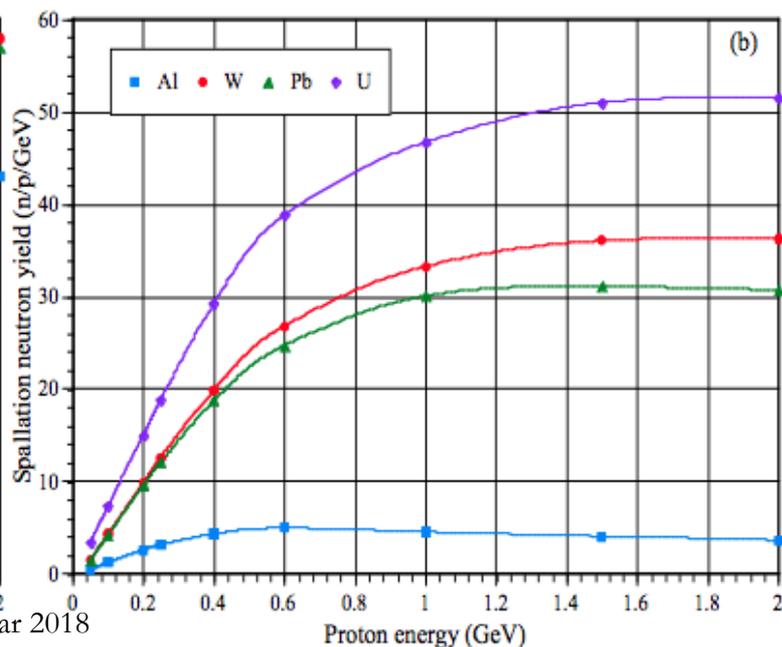
- Il numero di n emessi varia in funzione del nucleo bersaglio, delle dimensioni del bersaglio e dell'en. della particella incidente. Utilizzando protoni, satura a circa 2 GeV. Per valutare l'efficienza è importante il rapporto fra la resa in n e l'en. dei p
- Elementi pesanti, come l'U naturale, producono un numero maggiore di n, ma possono anche fissionare e i prodotti di entrambe le reazioni sono altamente radioattivi.
- Per il W, più leggero del Pb, la maggiore resa è data dalla più alta densità.
- La scelta del Pb come bersaglio per la maggioranza dei design di ADS è in parte legata ai vantaggi di un bersaglio liquido (o granulare, ADANES, Cina) rispetto a uno solido, in quanto ha meno limiti meccanici e migliori proprietà termiche. Inoltre i prodotti dalle reazioni col Pb sono notevolmente meno reattivi di quelli di ogni altra sorgente di spallazione accettabile.

log scale



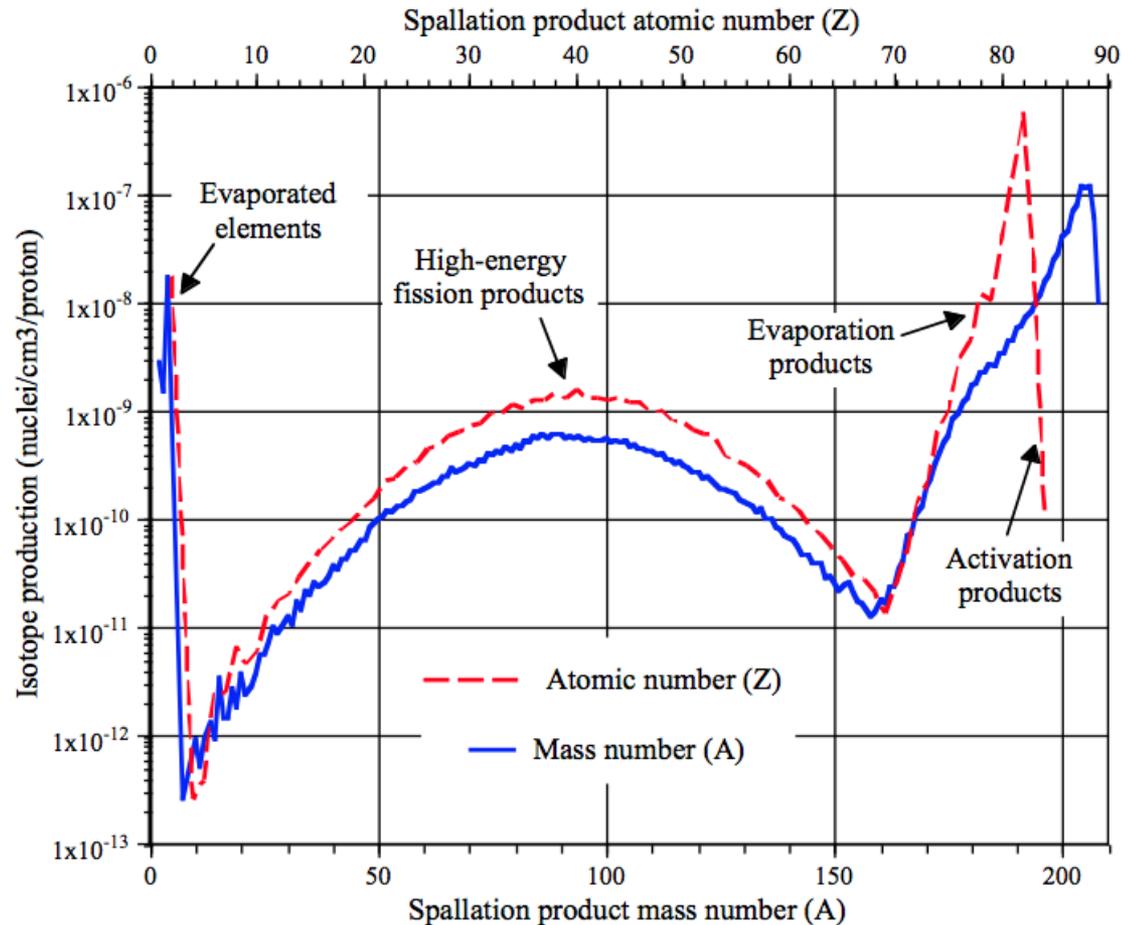
fln mar 2018

linear scale



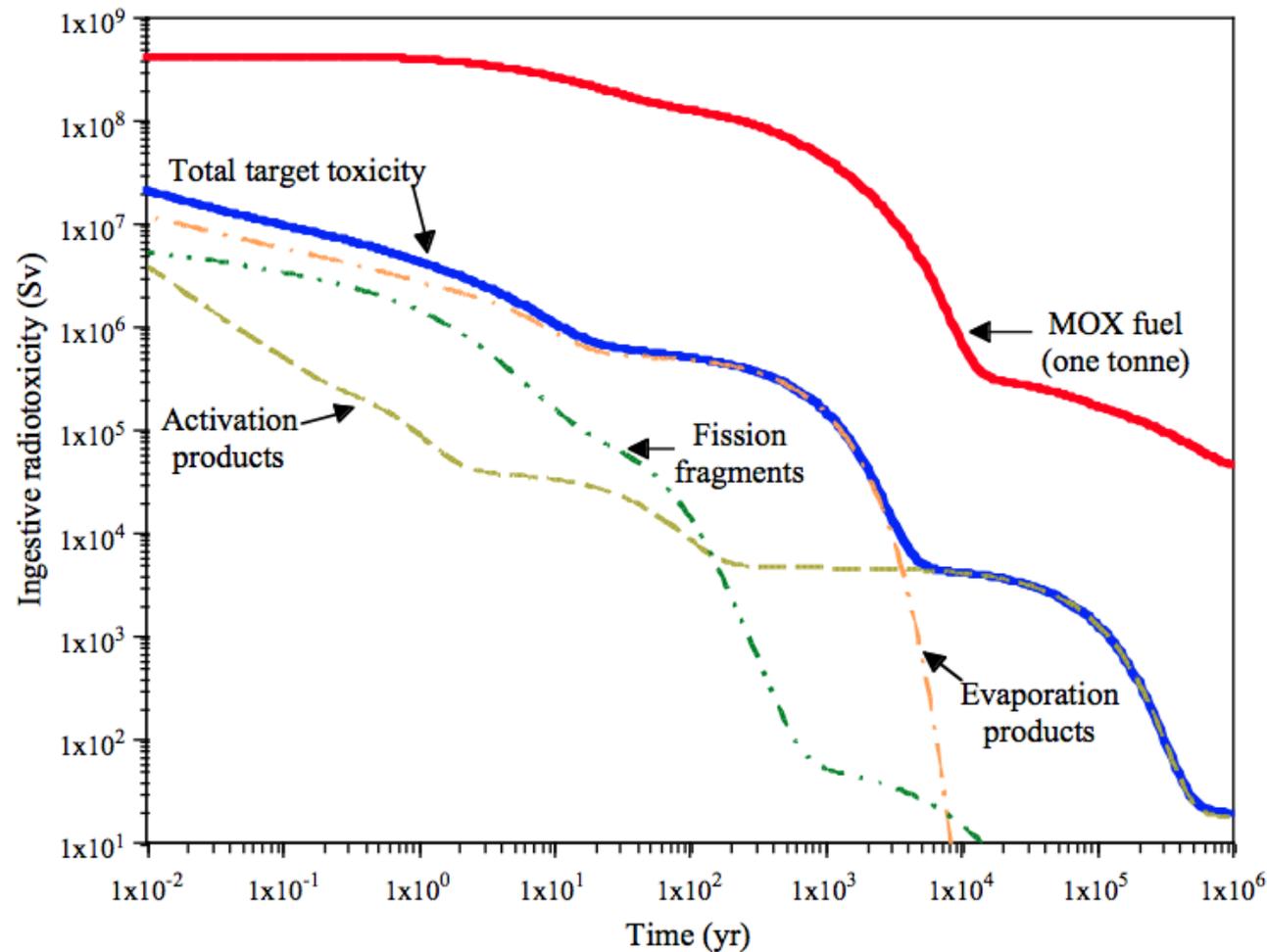
Prodotti di Spallazione

- La distribuzione dei prodotti di spallazione varia in funzione del materiale bersaglio e dell'E dei protoni.
- Ad alte masse un andamento con picchi corrispondenti al nucleo bersaglio originale e dopo l'evaporazione, seguiti da picchi legati all'evaporazione di nuclei leggeri.
- In seguito è presente una zona corrispondente ai nuclei prodotti dalla fissione



Radiotossicità del bersaglio

- La radiotossicità del bersaglio in piombo è inizialmente dominata dai prodotti di evaporazione, fino al loro decadimento esponenziale dopo 4000 anni.
- Essa rimane comunque molto meno tossica ad esempio del MOX, (U,Pu)O₂ (che è già 20 volte meno tossico delle normali scorie da reattore).



Sfide tecnologiche:

■ Acceleratore:

- Necessità di alta affidabilità e funzionamento continuo. La perdita improvvisa dei fasci provoca shock termici nel bersaglio (tipicamente liquido, vedi sotto).
- Correnti di protoni maggiori per avere una significativa produzione di energia.
- Alta efficienza energetica
- Finestra per il fascio in grado di reggere al danno da radiazione e agli stress termici e di corrosione.

■ Bersaglio di spallazione

- Alta densità per la produzione dei neutroni porta anche ad alta densità termica
- Necessità di smaltire l'eccesso di calore
- Favoriti bersagli liquidi, ma grossi limiti per problemi di corrosione e stress delle strutture, oltre che necessità di pre-riscaldare il sistema prima dell'attivazione

Moltiplicazione dei neutroni in un sistema sottocritico

- Per la j-esima generazione possiamo definire

$$N_j < N_{j-1} < N_0 \quad k_j = \frac{N_j}{N_{j-1}} \quad \text{with } k_j < 1 \text{ for } \forall j \geq 1$$

- Ora il numero totale di neutroni prodotti in m generazioni:

$$N_T = N_0 + N_1 + \dots + N_m = N_0 \cdot \left(1 + k_1 + k_1 \cdot k_2 + \dots + \prod_{j=1}^m k_j \right)$$

- Definiamo il fattore di moltiplicazione come $M_n = \frac{N_T}{N_0}$
- Se la produzione è dominata dalla fissione la serie converge

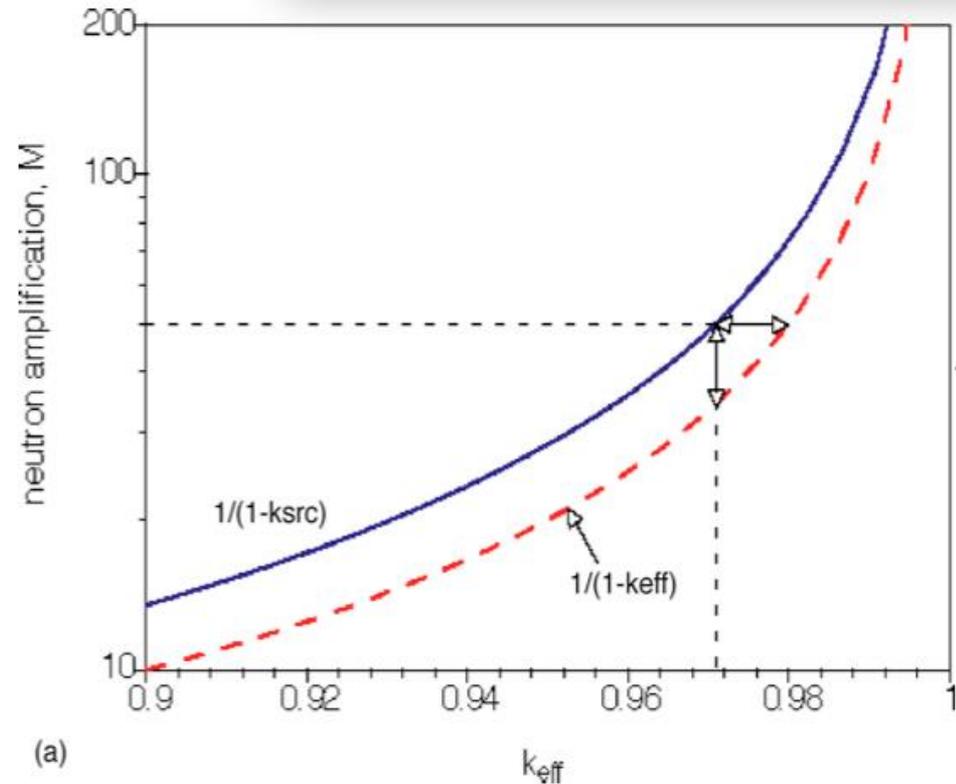
$$N_T = N_0 \cdot \sum_{j=0}^m k^j = N_0 \cdot \frac{1 - k^{m+1}}{1 - k} \xrightarrow{m \rightarrow \infty} \frac{N_0}{1 - k}$$

- Possiamo definire il k in presenza di sorgente come:

$$N_T \equiv \frac{N_0}{1 - k_{src}}, \text{ thus, } k_{src} = 1 - \frac{1}{M_n}$$

Moltiplicazione e sorgente

- In generale $k_{eff} \neq k_{src}$ anche se in condizioni normali hanno valori simili.
- k_{eff} è un parametro intrinseco del sistema, che indica quanto sia vicino allo stato critico.
- k_{src} lega la popolazione di neutroni con l'intensità e le altre caratteristiche della sorgente.
- Queste differenze rispetto a un reattore critico permettono anche di stimare i margini di sicurezza del sistema stesso.



Diffusione dei neutroni

- La distribuzione del flusso dei neutroni $\Phi(x,y,z,t)$ è il parametro base nel design di un reattore nucleare.
- La distribuzione in flusso è data dalla soluzione dell'equazione differenziale:

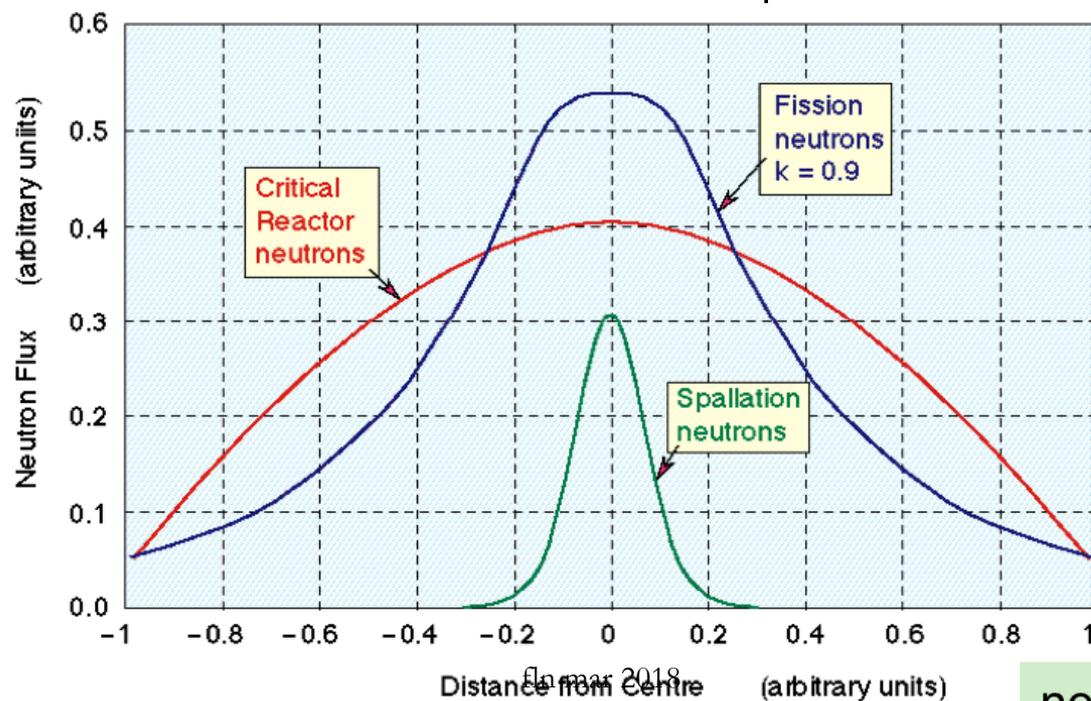
$$\frac{\partial n}{\partial t} = s + P - A + R$$

s = contributo della sorgente

P = produzione di neutroni per fissione

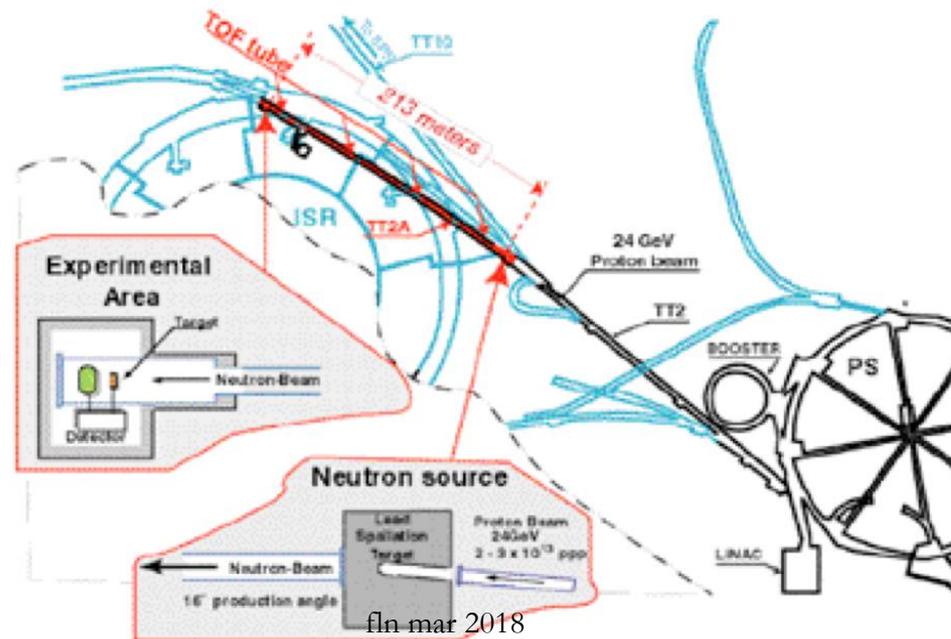
A = cattura di neutroni

R = perdita di neutroni per leakage.



Esperimento n_TOF

- Dati accurati per le sezioni d'urto neutroniche sono essenziali per il design di un dispositivo di trasmutazione per poter descrivere il comportamento del core (& per l'astrofisica nucleare).
- Sempre da queste informazioni dipendono le predizioni sulla natura delle scorie che verranno prodotte e la loro radiotossicità.
- La mancanza di informazioni affidabili per numerosi isotopi ha motivato nel 1999 la proposta di costruire l'esperimento n_TOF al CERN, che ha iniziato a raccogliere dati dal 2002.
- Dall'estate 2014 nuova area sperimentale, EAR-2: flusso di n aumentato x25, impulsi di p più corti, x1/10



n_TOF neutron time of flight facility @ CERN

Misure di sezione d'urto neutroniche ad alta risoluzione ed in un largo intervallo energetico, di interesse per l'Astrofisica e per Applicazioni (ADS).

Collaborazione internazionale:

130 ricercatori

40 istituzioni europee + 3 Usa + India

Partecipazione italiana:

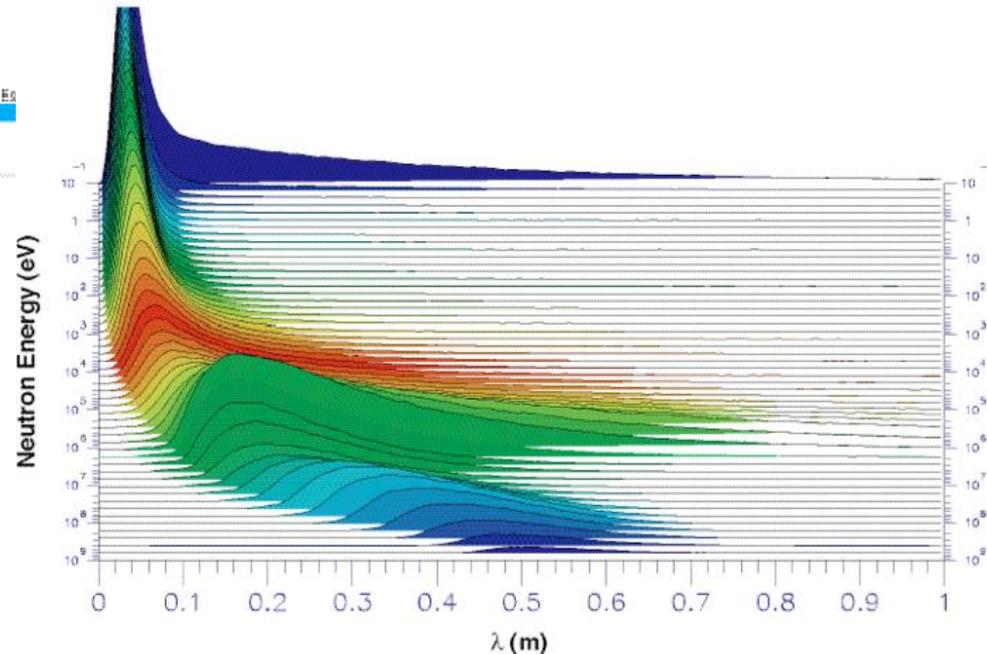
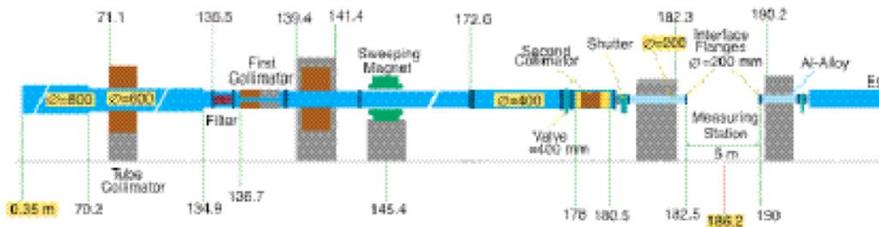
15 ricercatori di 4 sezioni INFN
(Bari, **Bologna**, LNL, Trieste)

fra cui Sergio Lo Meo
(simulazione di n_TOF
con GEANT4)



Struttura di n_TOF

- L'esperimento n_TOF usa n di spallazione prodotti dalla collisione di p da 20 GeV forniti dal sincrotrone PS del CERN contro un target di 80×80×60 cm³ di Piombo al alta purezza (99.999%), seguito da 5 cm di acqua.
- L'acceleratore fornisce 7×10¹² p in pacchetti da 6 ns.
- Il tubo per il tempo di volo è lungo ~200 m ed ha un'inclinazione di 10° rispetto al fascio al fine di ridurre la contaminazione da particelle cariche. Sempre a questo scopo a 145 m è posto un dipolo da 1.5 T lungo 2 m.
- Due collimatori in ferro e cemento servono a ridurre la larghezza del fascio nei 2 cm richiesti.



L'en. dei neutroni è ottenuta dal tempo di volo:

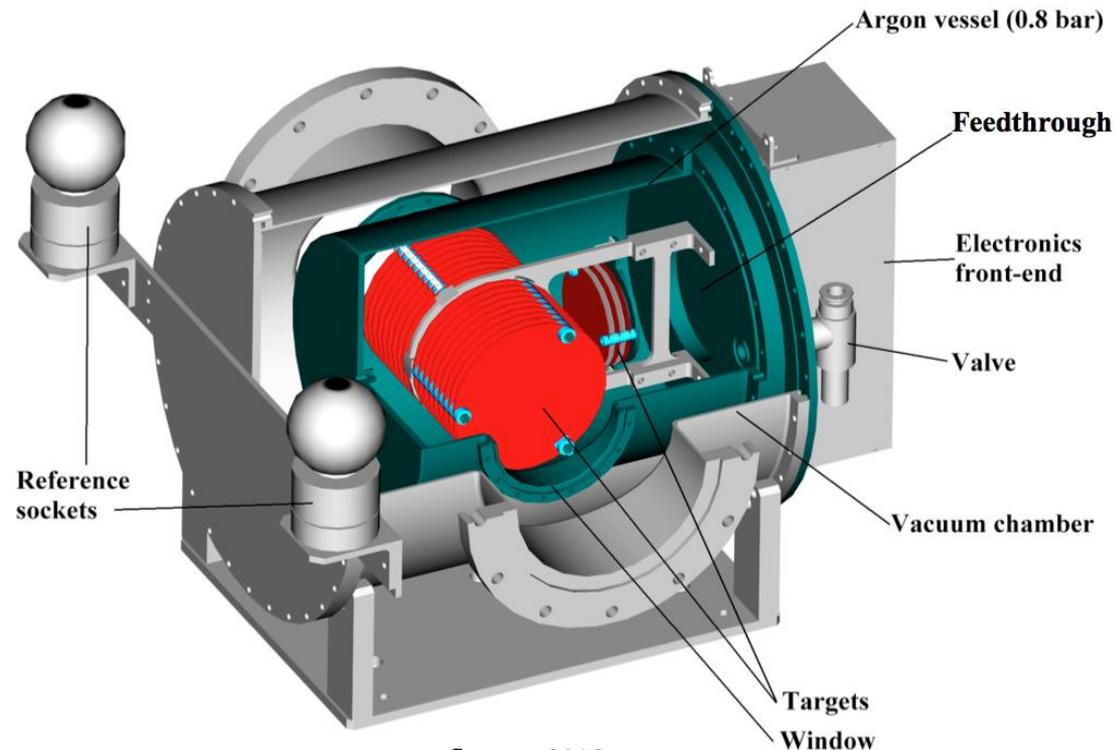
$$E = m_n/2 \cdot (L/t)^2$$

La risoluzione in energia dipende dal percorso nel target di piombo:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{-2 \cdot \Delta t}{t} = \frac{2 \cdot \Delta \lambda}{\lambda + L}$$

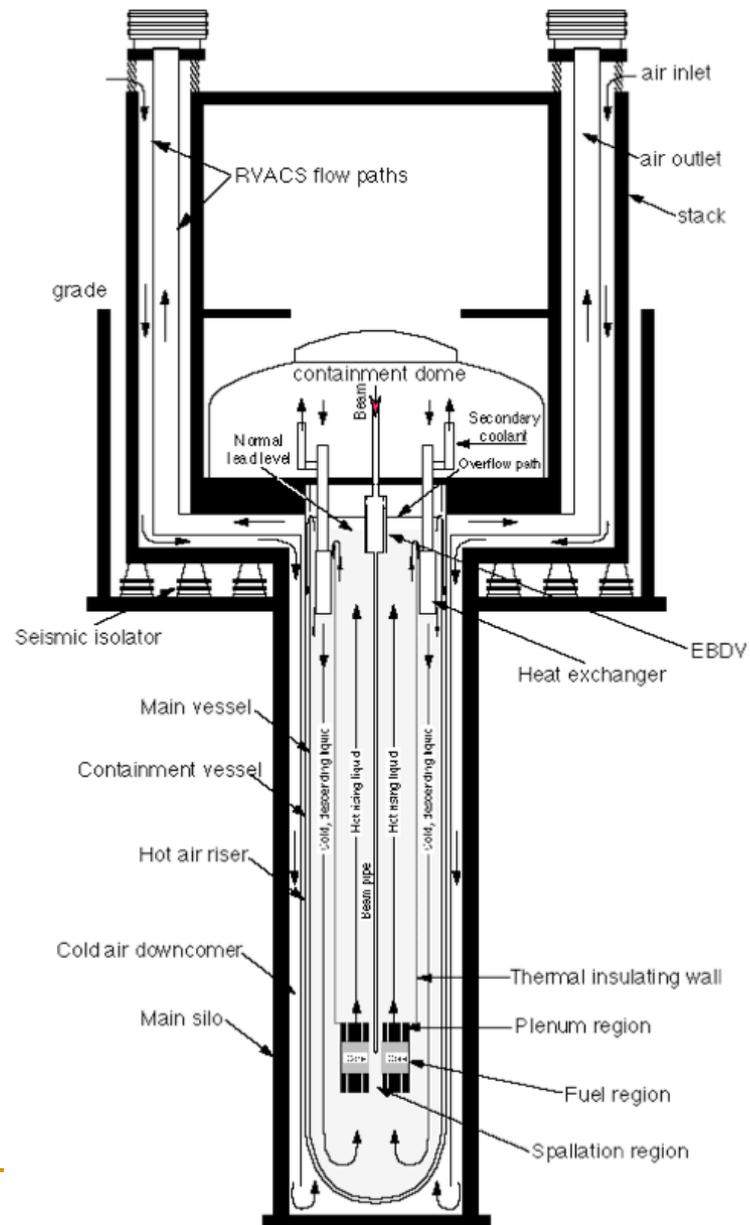
n_TOF Fission Ionization Chamber

- Il fascio di n entra nella camera tramite un foglio di Kapton di 125 μm
- La camera è interamente realizzata in alluminio ed è riempita con un gas (90% Ar, 10% CF_4) senza circolazione visto che la camera opera in modo non proporzionale.
- Il materiale fissile è disposto su foglio di alluminio, lungo la direzione del fascio. Nella camera sono posti 16 bersagli e 18 elettrodi, distanziati 5 mm. Altri 3 bersagli e 4 elettrodi sono montati perpendicolarmente, in modo da valutare il background provocato da neutroni scatterati.



Energy Amplifier

- Core sottocritico ($0.95 \leq k \leq 0.98$) immerso in Pb
- Controllato tramite un fascio di p circa 1 GeV, i di 12.5 mA
- Il Pb ha ottime caratteristiche di trasparenza ai n, piccola sezione d'urto di cattura, e funge anche da sistema di raffreddamento tramite convezione naturale (Pb liquido).
- Al fine di avere un moto convettivo dato dalla differenza di temperatura è necessaria una grande mole di piombo (~10.000 tonnellate) e un dislivello di circa 20 m.
- Capacità di funzionare in modo continuo per 4-5 anni bruciando Th e scorie radioattive.



Il Pb (fuso) nell'EA

Il Pb ha una triplice funzione nell'EA

a) E' determinante per le reazioni di spallazione

b) Raffreddamento

c) Schermo

- Trasparente per neutroni al di sotto di 1 MeV
- Bassa sezione d'urto d'assorbimento per neutroni
- Alta densità e alto coefficiente di espansione che lo porta ad essere un ottimo materiale per i movimenti convettivi.
- Alta efficienza nell'assorbimento di radiazioni γ prodotte nel "core" dell'EA
- Ha un punto di ebollizione (1743 °C) quasi il doppio del Sodio (880 °C) e non reagisce a contatto con l'aria [punto di fusione 327 °C, un po' alto]
- Bassa pressione di saturazione e bassa "evaporation rate" che rendono possibile avere Pb fuso nella regione evacuata

Alternativa: bersaglio granulare (ADANES)



Sistemi di sicurezza nell'EA

Nell'EA non ci sono barre di controllo.

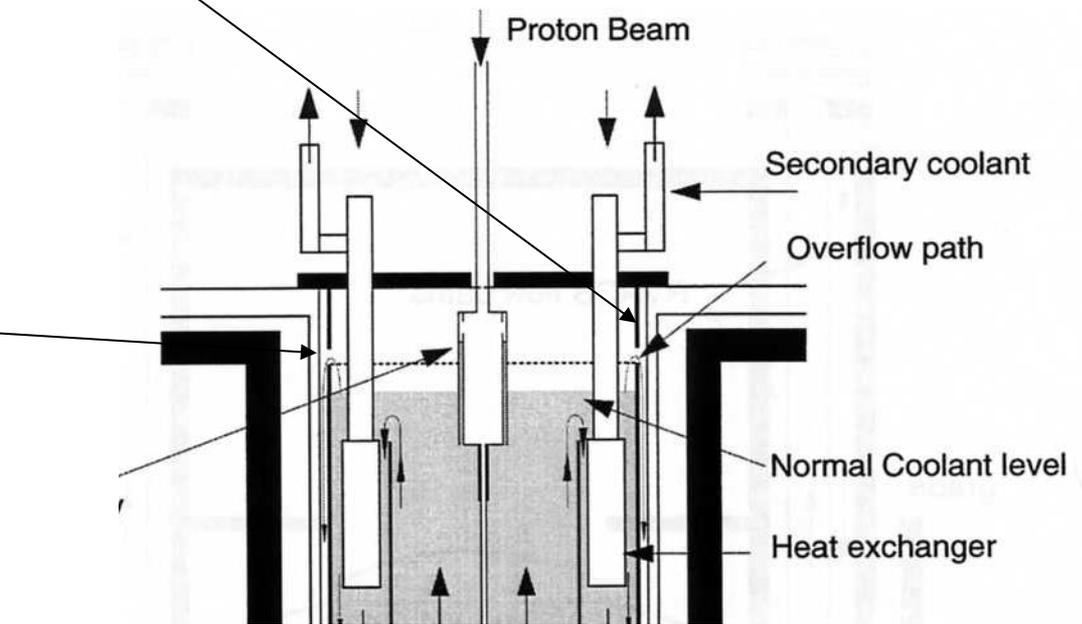
Unico sistema attivo è lo spegnimento del fascio.

Un aumento di calore, dovuto ad un evento accidentale, è controllato tramite sistemi passivi:

1) L'aumento di calore, provoca la naturale dilatazione del Pb liquido, che risalendo riempie la cavità dove transita il fascio di protoni. Il fascio è assorbito, fermando l'EA

2) Il Pb fuso riempie la cavità esterna al "main vessel" di solito riempita di He, determinando un incremento della conduttività termica da 0.03 W/m/K (He) a 16 W/m/K (Pb)

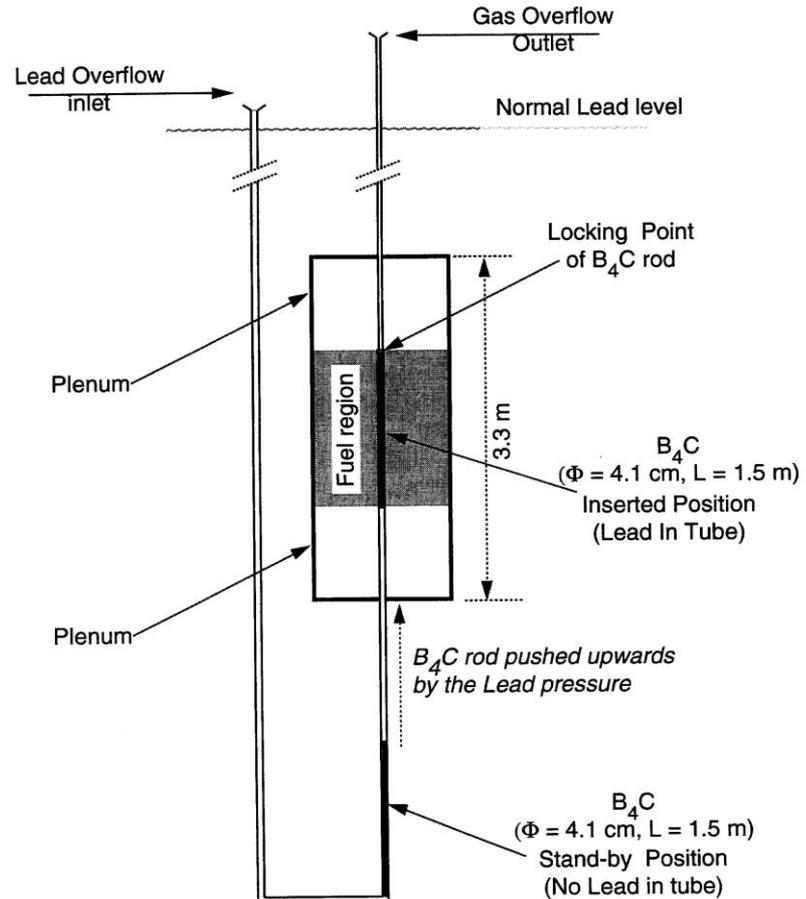
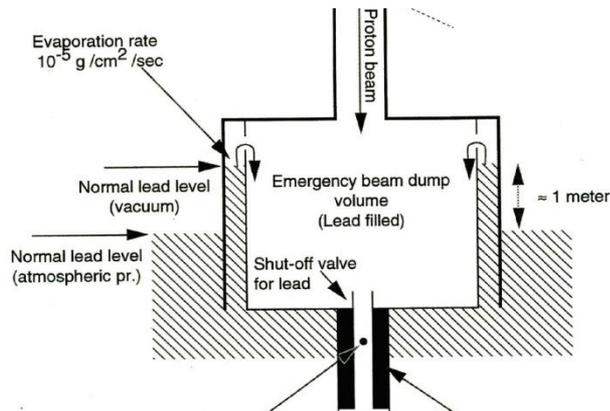
Il Pb fuso è utile anche nel caso di rottura accidentale della finestra d'entrata del fascio.



Sistemi di sicurezza nell'EA/2

3) "Scram device": blocchi di CB_4 all'interno del "core". L'aumento di temperatura del Pb determina l'innalzamento della pressione che fa risalire questi blocchi (vedi figura) fino al "core"

Questo materiale è altamente efficiente, infatti 20 kg di CB_4 producono un $\Delta k = -0.04$

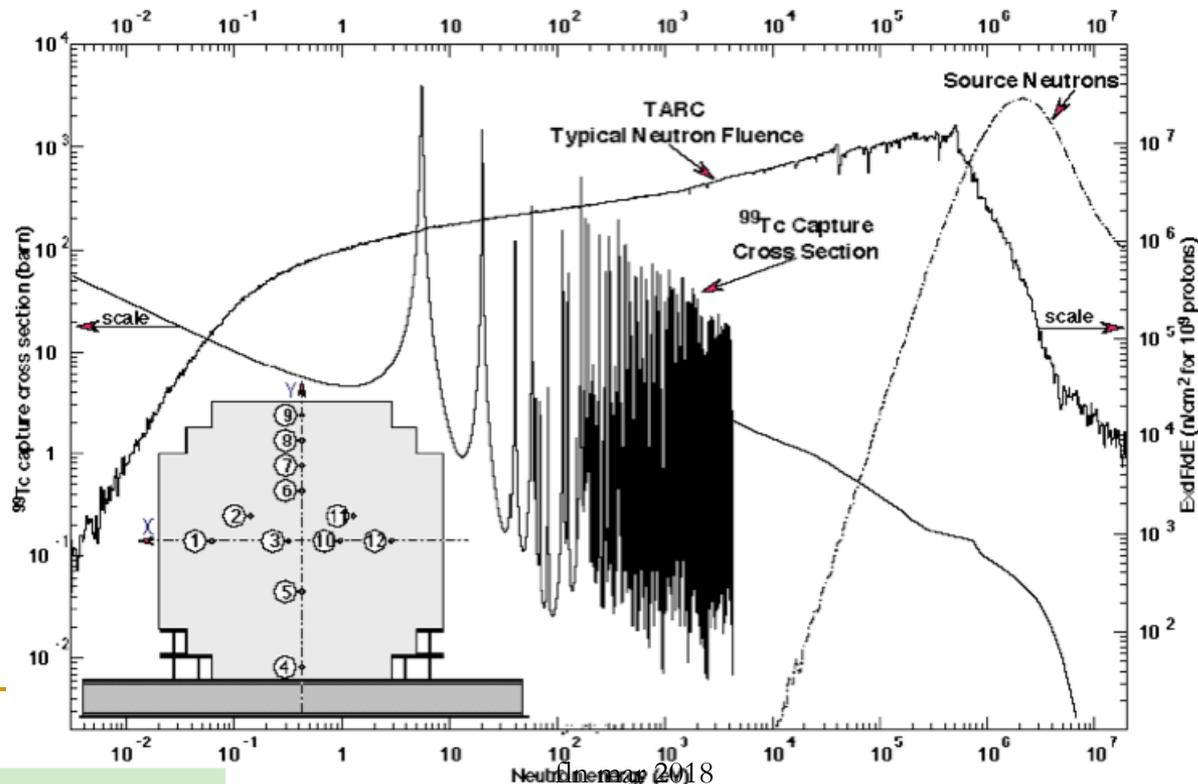


RoadMap Europea

- La RoadMap Europea (2001) verso la dimostrazione sperimentale degli ADS può essere riassunta in 3 diversi livelli:
 - ① Validazione delle diverse componenti considerate separatamente (acceleratore, bersaglio, reattore sottocritico, combustibile dedicato e metodi per il suo processamento). Esempi di esperimenti a questo livello sono FEAT, TARC, MUSE e il progetto MEGAPIE.
 - ② Validazione dell'accoppiamento di differenti componenti in un ambiente realistico, facendo uso di reattori esistenti adattati allo scopo. Un esempio di questo tipo è l'esperimento TRASCO dell'ENEA alla Casaccia.
 - ③ Validazione e installazione di una struttura espressamente disegnata per la dimostrazione (EADF). Questo progetto dovrebbe evolvere nella dimostrazione della trasmutazione del combustibile, dopo una prima fase in cui il core verrà caricato con combustibile standard, segue la realizzazione di un sistema di potenza

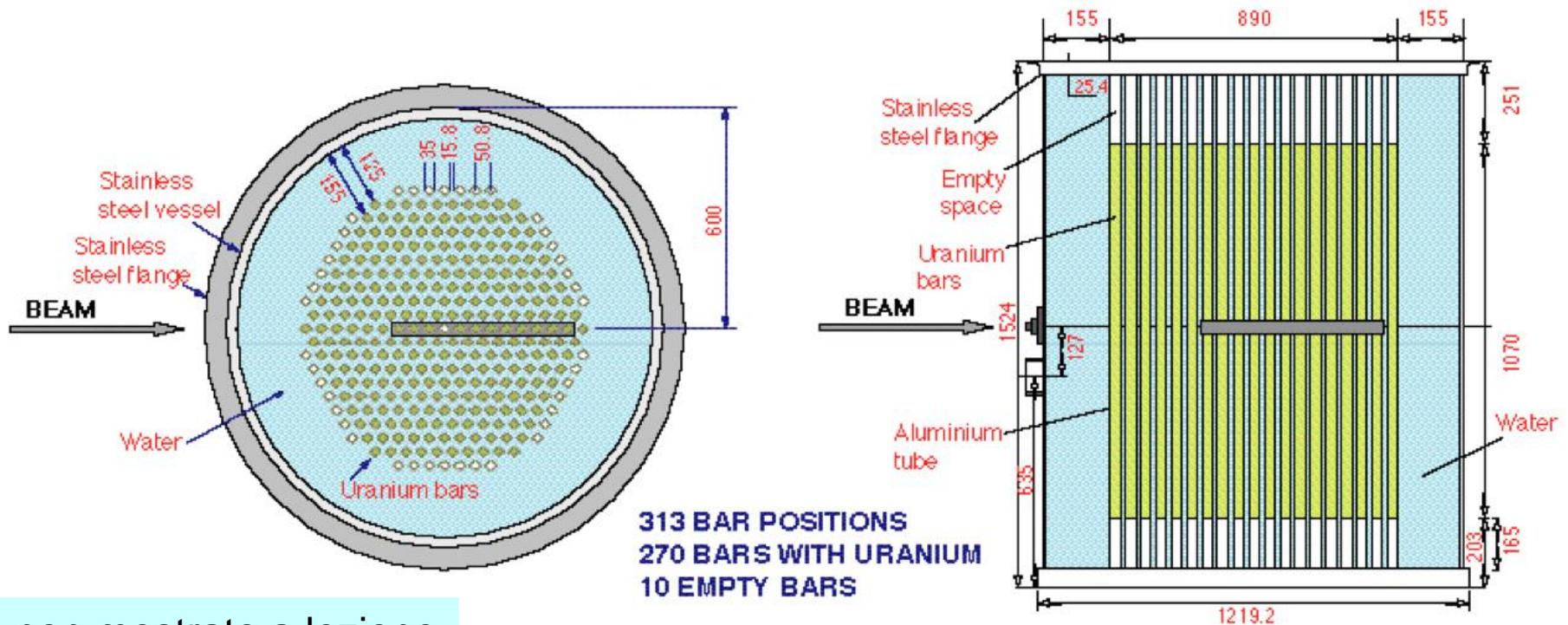
Trasmutation by Adiabatic Resonance Crossing (TARC)

- In un ADS dedicato alla trasmutazione delle scorie nucleari, dove i TRUs sono consumati tramite fissione, la radioattività a lungo termine è dominata dai LLFF.
- La loro eliminazione implica cattura neutronica seguita da decadimento radioattivo.
- L'idea è provare il principio dell'Adiabatic Resonance Crossing, basato sulla proprietà dei neutroni di spallazione in piombo di trasmutare efficacemente i LLFF.
- L'esperimento è stato realizzato al CERN ponendo campioni di LLFF (in particolare ^{99}Tc) in diverse posizioni in un bersaglio di Pb.



First Energy Amplifier Test (FEAT)

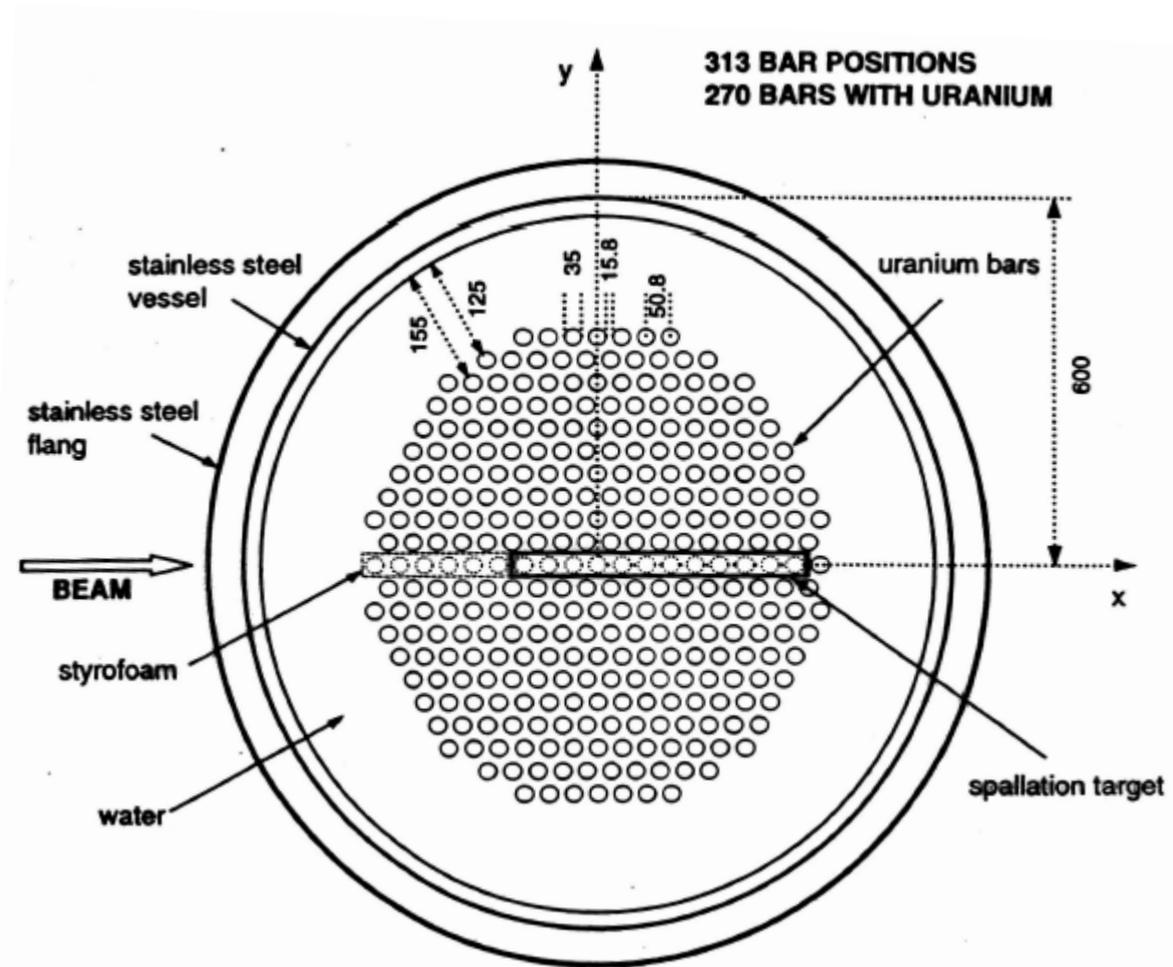
- L'idea base dell'Energy Amplifier è la produzione di una grande quantità di energia a partire da una sorgente iniziale, ovvero l'energia cinetica dei protoni forniti dall'acceleratore.
- Lo scopo era verificare sperimentalmente questo guadagno.
- Esperimento effettuato al CERN utilizzando protoni provenienti dal PS e un semplice modello di reattore.



non mostrato a lezione

FEAT - Misura dell'efficienza di spallazione, G

- esperimento al PS del CERN, 270 barre di U naturale + moderatore H_2O , fascio di p (0.6-2.75 GeV), bersaglio di spallazione: U depleto \rightarrow Q prodotto solo dallo $\ll 0.71\%$ di $^{235}U \rightarrow \Delta T$ misurate in vari punti, $k = 0.895 \rightarrow G_0 = 3.1 \pm 0.4$

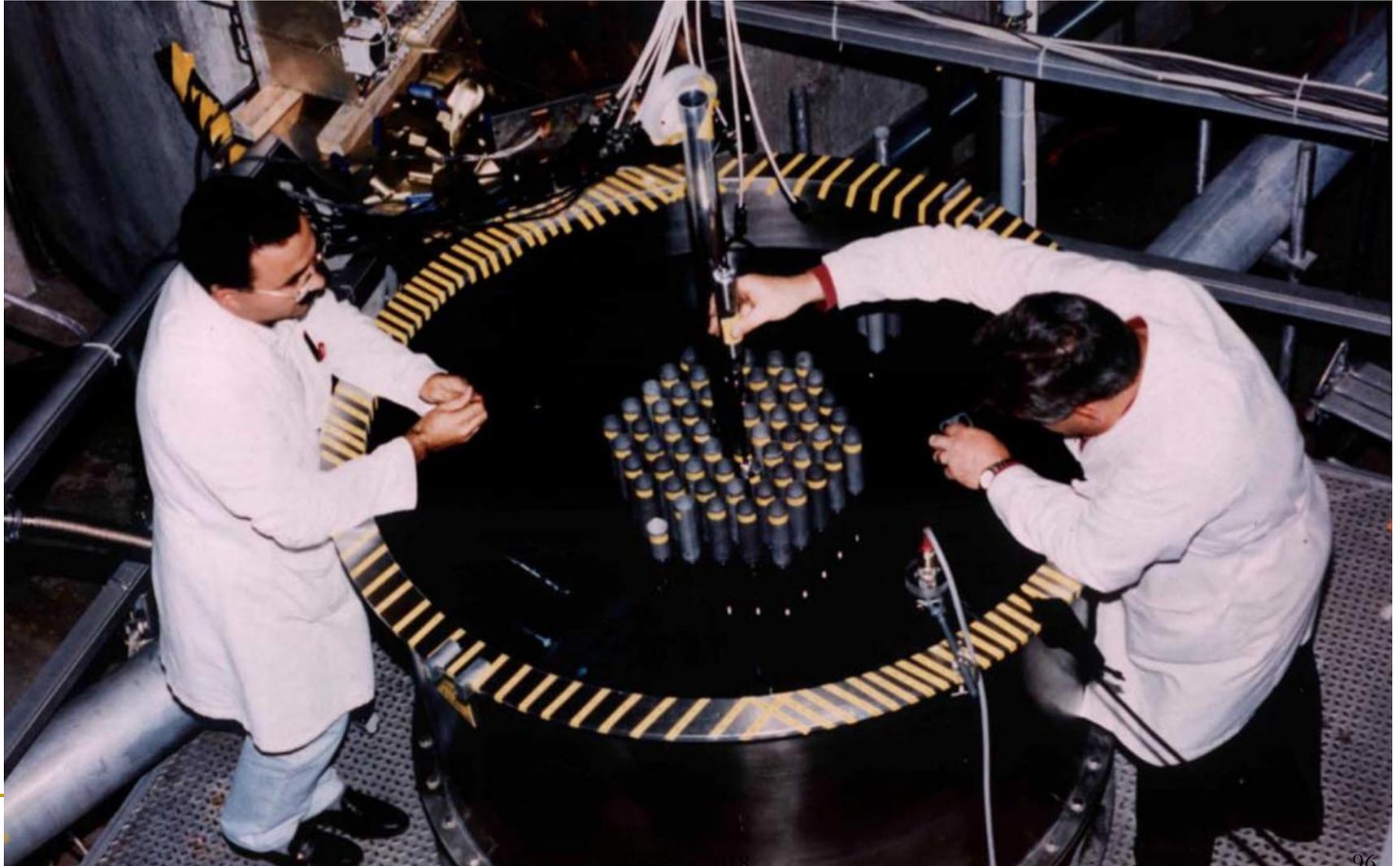


non mostrato a lezione

FEAT Assembly

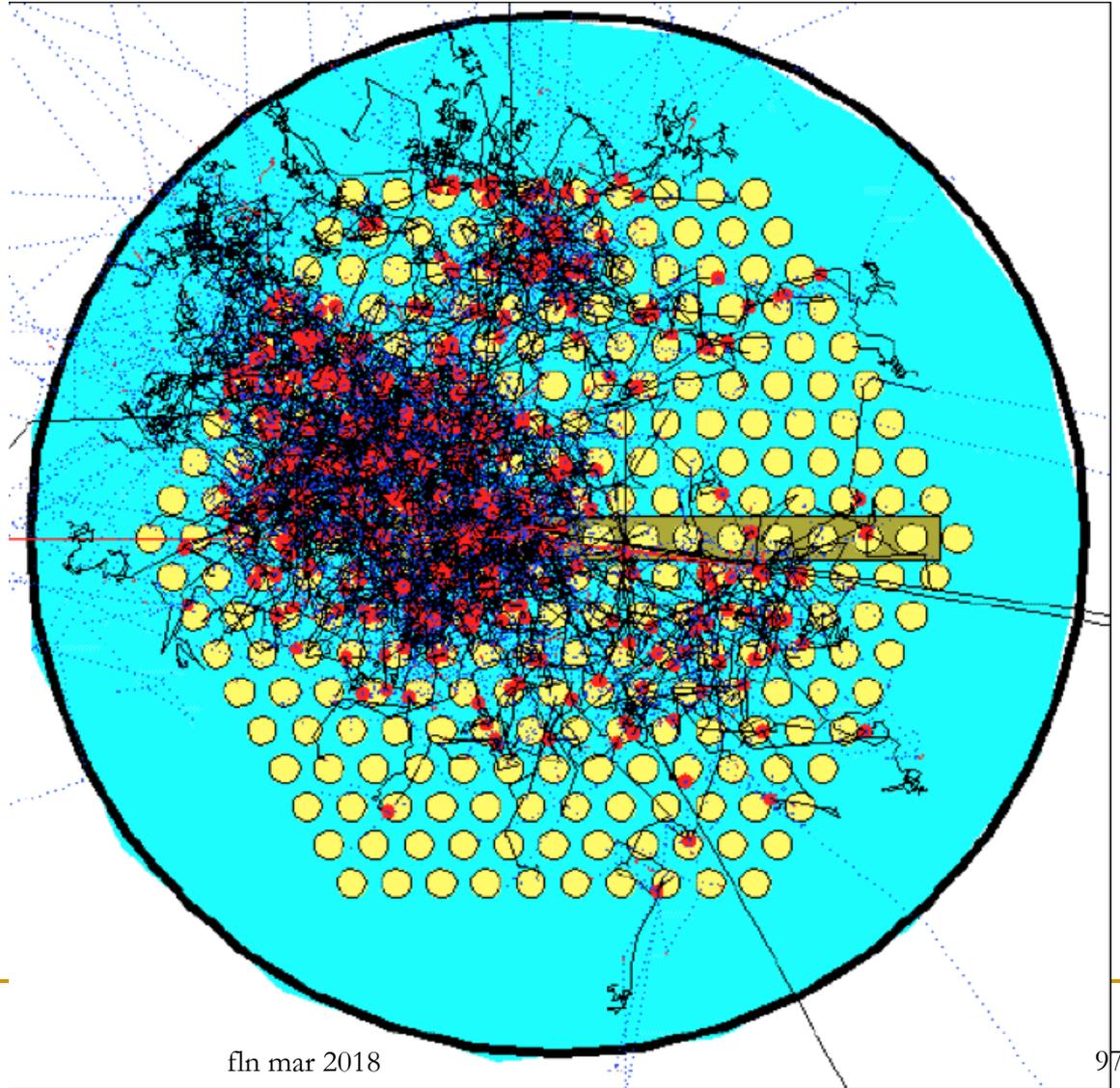
non mostrato a lezione

3.6 Tonnellate di Uranio in acqua naturale:



FEAT Simulation

- Esempio di cascata secondaria provocata da un singolo protone



non mostrato a lezione

Rivelatori di FEAT

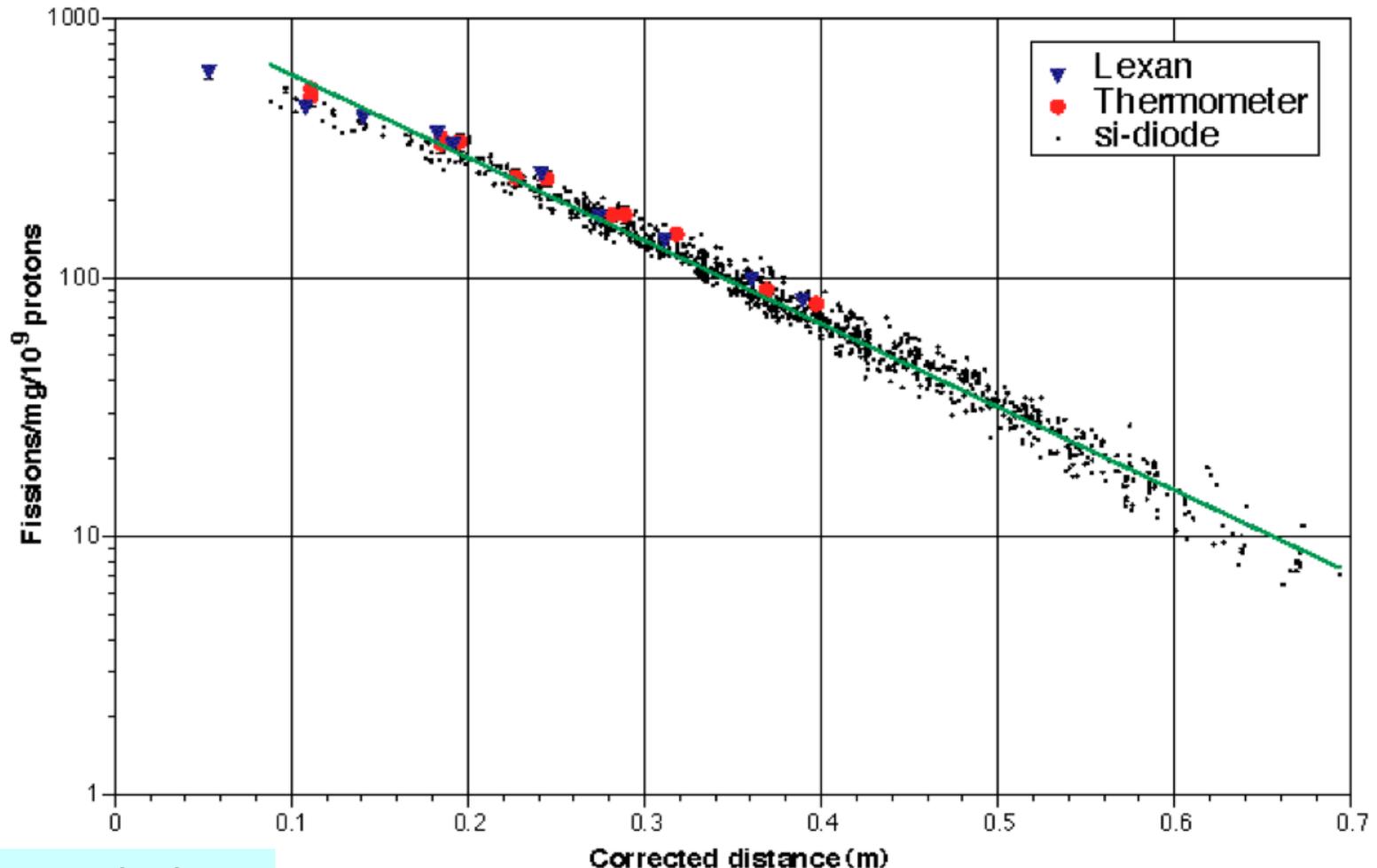
- Lo scopo era misurare la distribuzione del rate di fissione (con 3 differenti tecniche) e la deposizione di calore all'interno dell'esperimento (tramite termometri).

Detector	Active Element	Uranium converter	Clustering	Location
Gas Ionisation Chamber <i>4 ata Argon (*)</i>	Circular window, $\varnothing = 15$ mm vertical plane	1 mg/cm ² deposit	1 array of 6, spaced 10 cm vertically . 2 arrays of 8, spaced 12.3 cm vertically	in water, between U bars
Polycrystalline Si Diode <i>thickness 300µm</i>	Rectangular. window 9.6 x 11.6 mm ² vertical plane	1 mg/cm ² deposit	10 arrays of 16 counters, spaced 6.4 cm vertically	in water, between U bars
Polycrystalline Si Diode <i>thickness 300µm</i>	90° sector r = 14 mm horizontal plane	1 mg/cm ² deposit	4 clusters of 6 counters spaced 21.3 cm vertically	in fuel bar, between U cartridges
Thermistances in metallic probes	U Cylinders : $\varnothing = 8$ mm Pb Cylinder : $\varnothing = 10$ mm	~ 55 g U	3 thermometers with two U probes	in water, between U bars
Lexan foils track detectors	Equilateral triangles r = 37 mm Circles $\varnothing = 32$ mm Rectangle 10x25 mm ² (Vert. Plane)	~ 1 mg/cm ²	5 vertical sets of 2 detectors	in water, between U bars

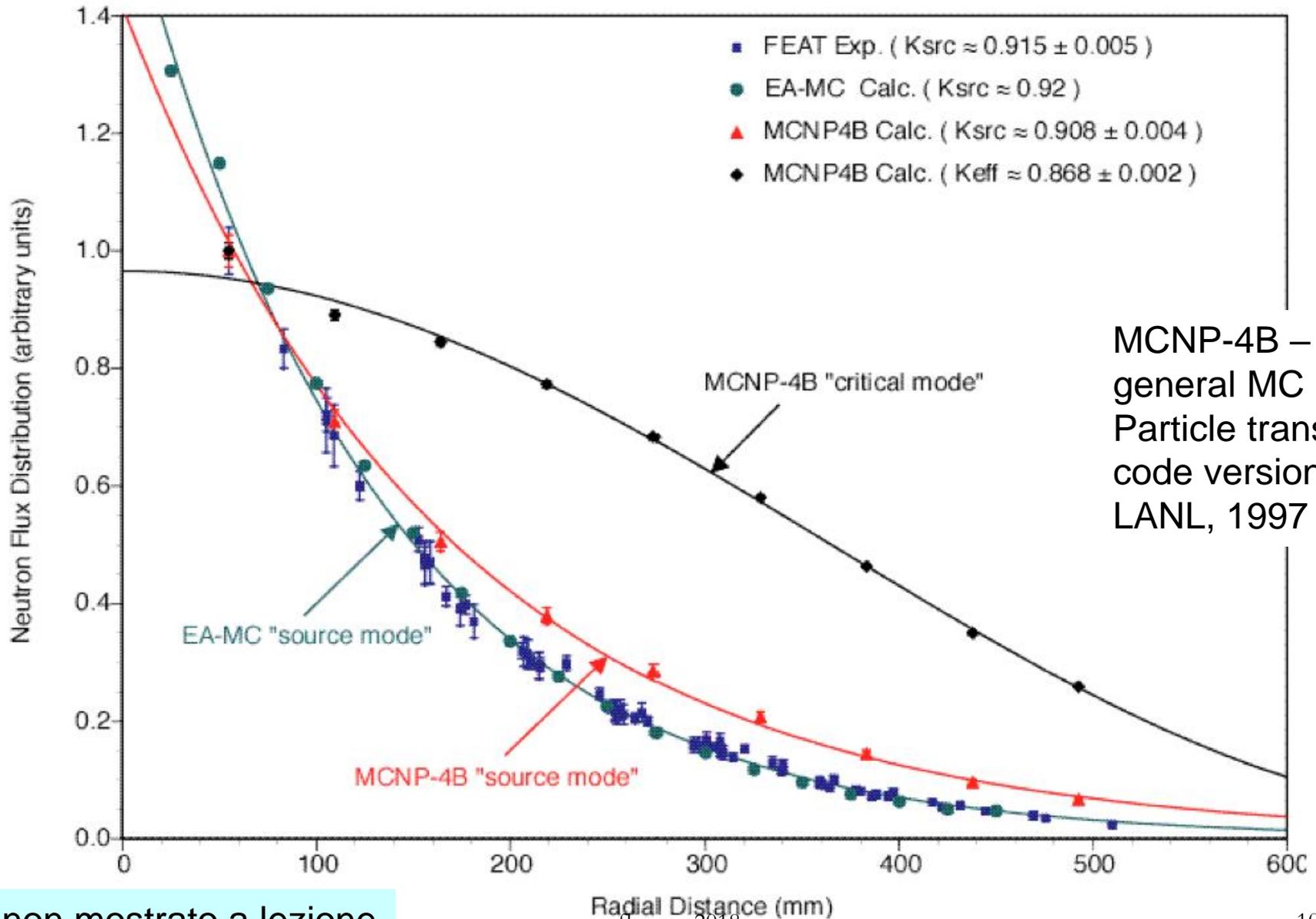
(*) 3 atm overpressure

FEAT: Rate di Fissione

- I differenti tipi di rivelatori hanno dato risultati coerenti. Il guadagno di energia è calcolato integrando la densità di fissione sul volume del dispositivo.

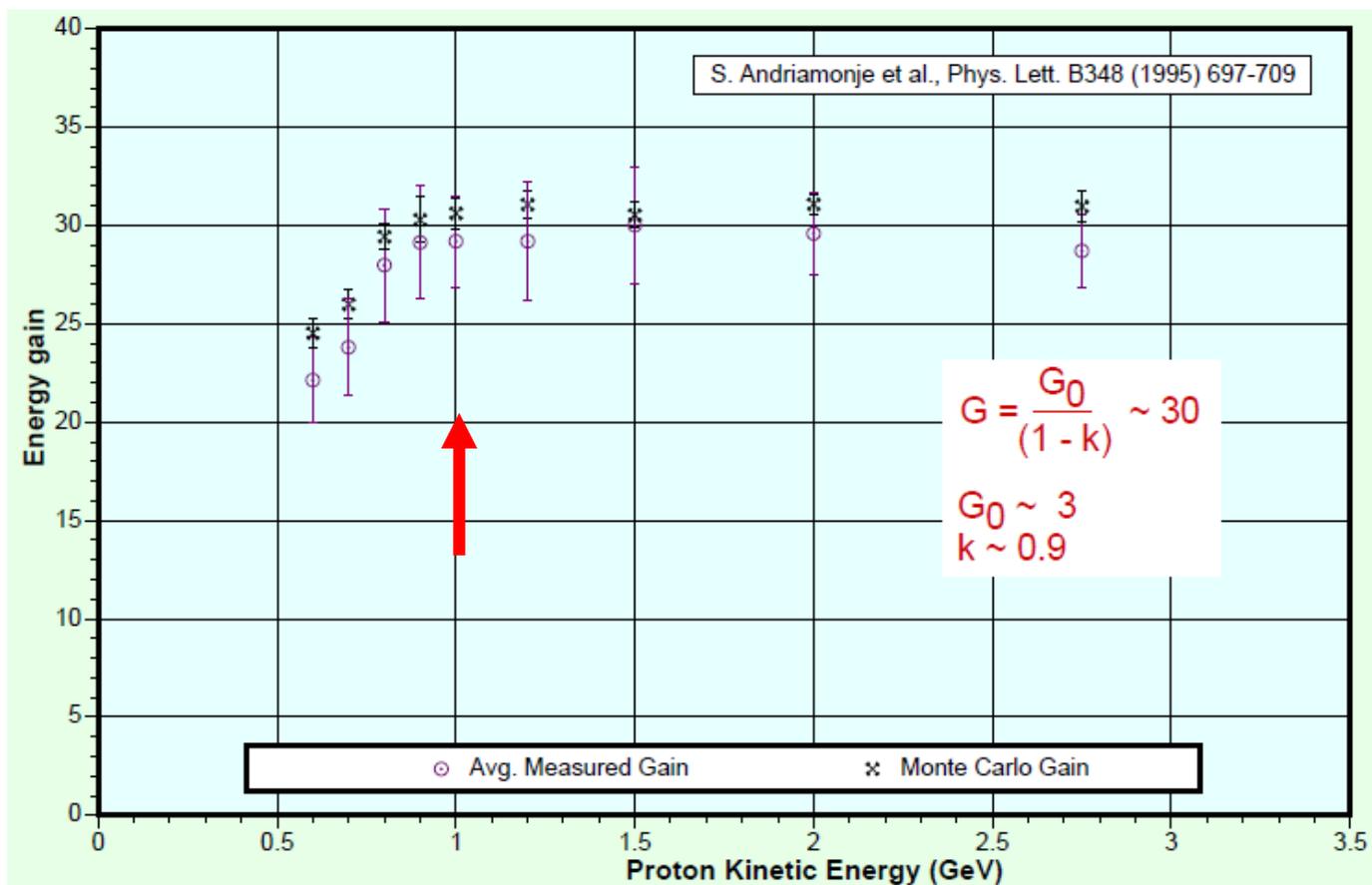


Validazione delle simulazioni MC



MCNP-4B – A
general MC P-
Particle transport
code version 4B,
LANL, 1997

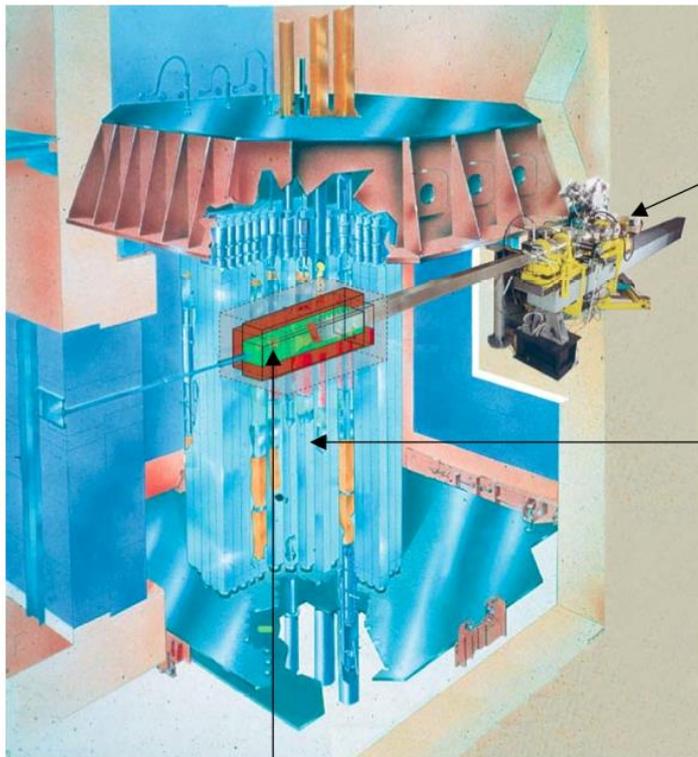
Risultati, misura G



- il guadagno G in energia satura sopra 1 GeV per i p, ottimo accordo dati-MC

Multiplication Source Externe (MUSE)

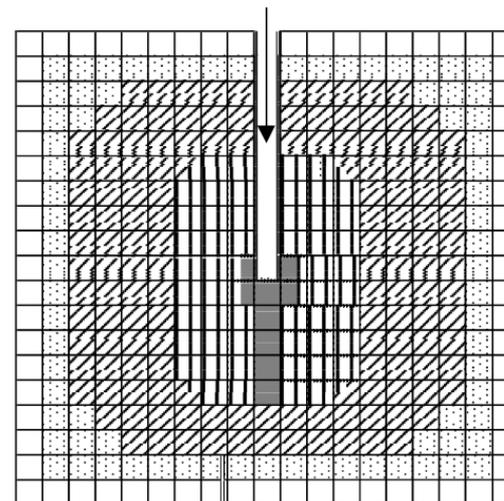
- Studio della fisica dei sistemi sottocritici accoppiati con un acceleratore.
- Realizzato nella struttura/reattore MASURCA a Cadarache (Francia)
- Utilizzo di un assembly sottocritico di bassa potenza (<5 kW) accoppiato a un acceleratore di deutoni (GENEPI, GENérateur de NEutrons Pulsé Intense).



MUSE configuration

The GENEPI
deuteron accelerator

Vertical loading of
MASURCA tube



- MASURCA tube (10 × 10 cm)
- ▤ Steel shielding
- ▨ NaSS reflector
- ▧ Core (Na-UO₂ - PUO₂)
- Lead (simulating spallation target)
- ▩ Tritium or deuterium target

Beam pulse width $\approx 1 \mu\text{s}$.

Source intensity $\approx 2 \times 10^{10}$ n/s.

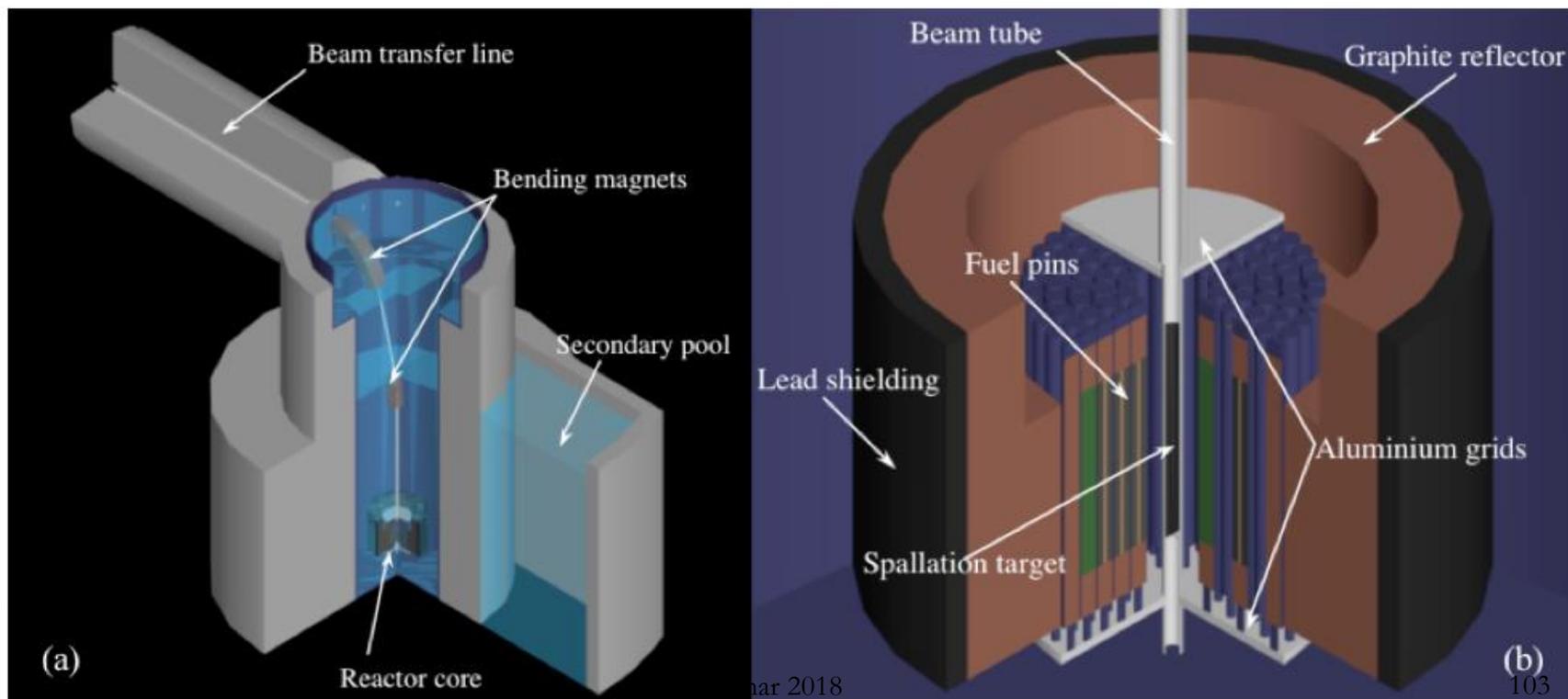
Sub-critical core: $k_{\text{eff}} = 0.95 + 0.98$

non mostrato a lezione

Esperimento TRADE

non mostrato a lezione

- TRADE (TRiga Accelerator Driven Experiment) è basato sull'accoppiamento di un ciclotrone per protoni commerciale potenziato con un reattore sottocritico (terminato nel 2004).
- Reattore TRIGA Mark II da 1 MW posto nella sede ENEA di Casaccia.
- Grazie alla modularità di TRIGA è possibile creare diversi scenari sottocritici variando la disposizione delle barre del combustibile.
- Il design del target di spallazione è stato una delle maggiori sfide per l'esperimento, essendo il primo ADS con vera potenza. Per il bersaglio è stato scelto Tantalio.
- L'acceleratore può fornire $\sim 0.13-0.3$ mA di protoni a 115-140 MeV, $P_{\text{beam}} \sim 15-40$ kW.



Un reattore al Th ADS

- acceleratore, obiettivo: fascio di p da 1 GeV (en. cin.), 10 mA, 10 MW, produce n veloci di spallazione in Pb liquido, guadagno

$$G = G_0 / (1 - k)$$

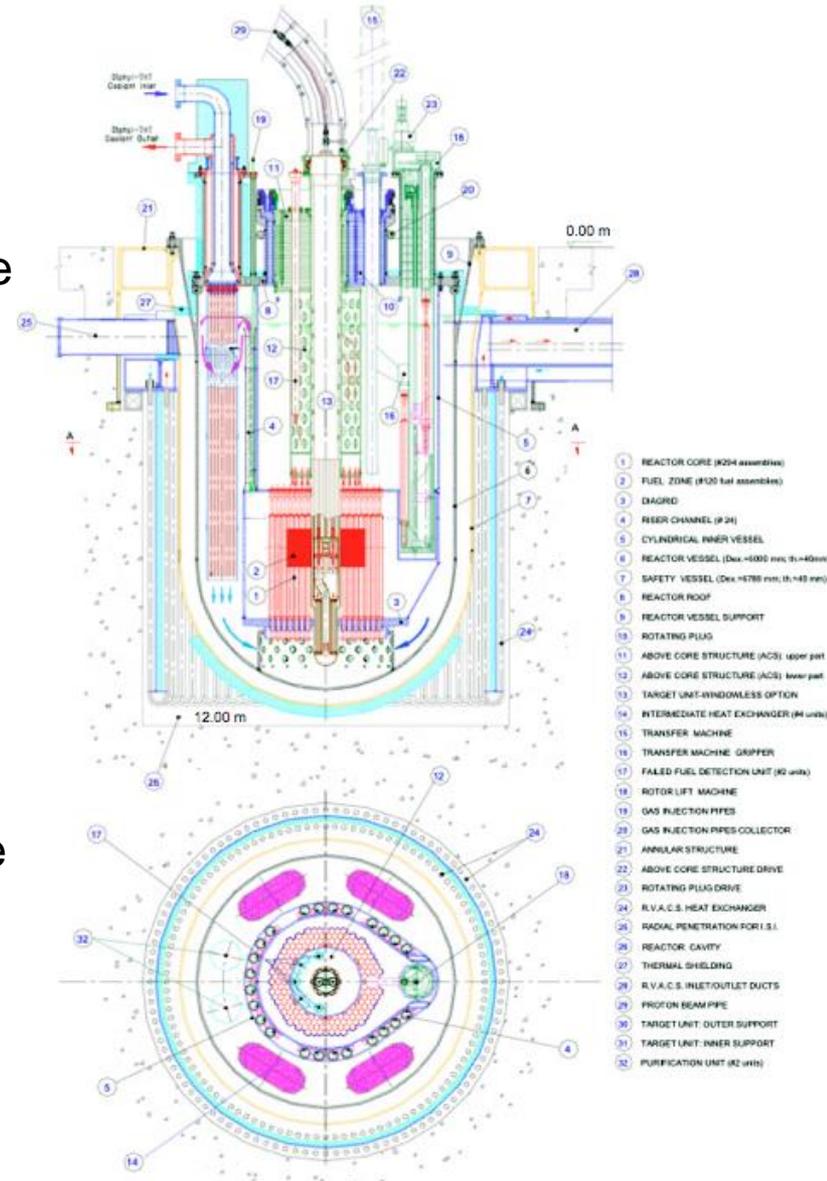
con $G_0 \sim 3$ (dipende dal processo di spallazione), se $k = 0.98 \rightarrow G \sim 150$

- raffreddamento ad es. con miscela eutettica di Pb e Bi (LBE) (\rightarrow **MEGAPIE**, 920 kg bersaglio di spallazione LBE per 1 MW di potenza del fascio), punto di fusione 124 °C, di ebollizione 1670 °C, il Q prodotto è trasportato per convezione, $v_{Pb} = (0.7-2)$ m/s e rimosso con uno scambiatore di calore [Pb e Bi: trasparenti per n con $E_{kin} < 1$ MeV, ideali come bersaglio di spallazione, ottimo schermo per i γ]

non mostrato a lezione

Energy Amplifier Demonstration Facility (EADF)

- Progetto di Ansaldo Nucl. (1999). Lo scopo era mostrare la realizzazione di un ADS con neutroni veloci (→2015) – **non realizzato**
- Core formato da una struttura anulare, immersa in LBE (Lead-Bismuth Eutectic) che funge da bersaglio di spallazione e raffreddamento.
- LBE permette le operazioni a temperatura inferiore rispetto al Piombo puro ($T_{\text{fusione LBE}} 124\text{ °C}$ vs $T_{\text{fusione Pb}} \sim 327\text{ °C}$) riducendo i problemi di erosione e corrosione.
- Il combustibile è inizialmente MOX (U-Pu) O_2 come per i reattori veloci quali SuperPhenix.
- La scelta del tipo di acceleratore non era stata effettuata, ma è necessaria una macchina in grado di fornire 5 mA di protoni a 600 MeV, quindi 2-4 volte più potente delle macchine attuali.
- L'obiettivo era raggiungere un output di energia termica di ~80 MWth, il minimo ritenuto necessario per la dimostrazione di poter ottenere trasmutazioni su larga scala (oltre il Kg).

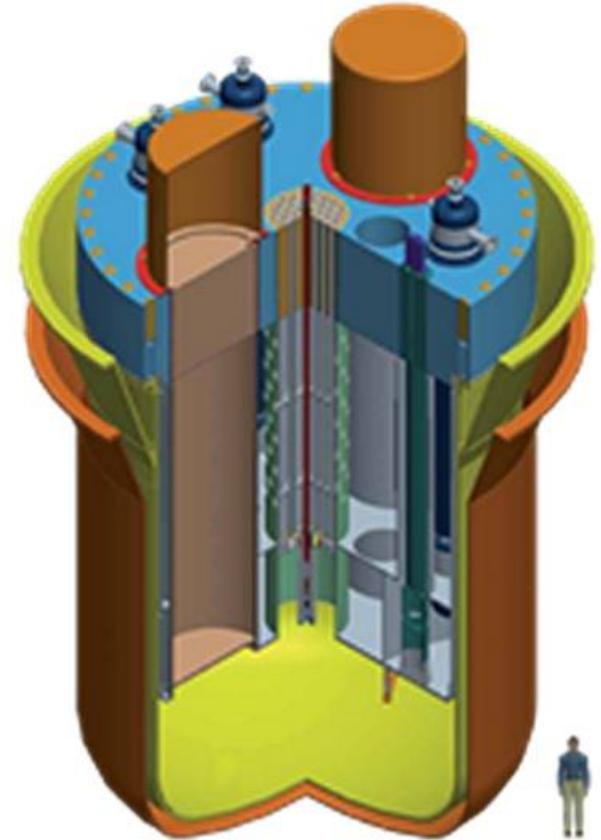


Stato degli esperimenti

- n_TOF continua, attualmente in presa dati al PS del CERN (nuova versione nel 2014, alta intensità)
- FirstEnergyAmplifierTest terminato
- TransmutationAdiabaticResonanceCrossing terminato
- MUSE/GENEPI (2001-5) terminato
- MEGAPIE/PSI (2006) terminato
- TRASCO/TRADE terminato
- EADF (progetto Ansaldo Nucleare 1999, avrebbe dovuto essere in funzione nel 2015, non è stato finanziato)
- GENEPI riassembleato per essere utilizzato in GUINEVERE (Generator of Uninterrupted Intense NEutrons at the lead VEnus REactor) a Mol (Be), un primo passo verso MYRRHA

Una prospettiva a medio/lungo termine

- MYRRHA: Multi-purpose hYbrid Research Reactor for High-tech Applications della SCK-CEN a Mol (Be) dovrebbe essere operativo nel ~2023 per un costo totale di M€ 960 (€ 2009)
- MYRRHA, un reattore di ricerca con uno spettro flessibile di n veloci (50-100 MWth) è concepito come ADS, in grado di operare in modo sottocritico e critico. Contiene un acceleratore di p da 600 MeV, un bersaglio di spallazione ed un nocciolo moltiplicante con combustibile MOX, raffreddato da Pb-Bi liquidi
- Agenda (per ora/2017 ci sono solo ~ 360 M€):
 - 2010-2014: Front End Engineering Design (FEED) e R&D associato; licensing process; set-up of the international consortium.
 - Costruzione della facility e assemblaggio dei componenti nel 2015-2019
 - 2020-2022 sono previsti per la messa in opera completa della facility.



Il problema degli acceleratori

- la coll. CONFORM (R. Barlow et al.) sta lavorando per ridurre le dimensioni dell'acceleratore – un acceleratore lineare, data l'en. richiesta occupa diverse centinaia di m, uno circolare 10-20 m – sviluppando macchine Fixed-Field Alternating Gradient (FFAG). Cinque anni fa in marzo hanno messo in funzione un prototipo per una prova del principio, EMMA (Electron Model for Many Applications) a Daresbury (UK), una macchina compatta, potente ed economica, adatta per applicazioni mediche – il prossimo passo è una macchina con le specifiche adatte per un ADS, che richiederà 5 a per essere costruita
- potrebbe anche essere possibile operare un reattore al Th senza acceleratore (Ben Lidley) utilizzando una opportuna miscela di Th e di attinidi più pesanti, con un numero di n generati dalla disintegrazione delle scorie sufficienti per pilotare mantenendo generazione di en. e sicurezza



© Neale Haynes

Un esempio in Giappone

- il Kyoto Univ. Research Reactor Inst. (KURRI) è stato autorizzato a condurre esperimenti per un Accelerator Driven Subcritical Reactor (ADSR) usando il Kyoto Univ. Critical Assembly (KUCA) – il 4 marzo 2010 è stato provato un Fixed-Field Alternating Gradient (FFAG) p accelerator connesso a KUCA – il progetto è iniziato nel 2002
- il FFAG (un anello di magneti, quadrupoli, con un campo fisso che focalizza il fascio accelerato e lo fa spiralizzare in modo simile ad un ciclotrone) produce un fascio di p ad alta energia su un bersaglio di spallazione di metalli pesanti per produrre n in KUCA e pilotare reazioni di fissione a catena
- gli obiettivi sono gli stessi dell'EA del CERN e di CONFORM in UK, oltre alla produzione di energia, sorgenti di n e sistemi di trasformazione di scorie
- gli acceleratori FFAG possono avere anche applicazioni mediche ad es. adroterapia e Boron Neutron-Capture Therapy (BNCT).

acceleratore FFAG (\approx ciclotrone)



l'acceleratore FFAG
connesso a KUCA
per le prove ADSR

non mostrato a lezione

una sorgente intensa di n
termici ed epitermici per la
BNCT è stata sviluppata a
KURRI usando un anello di
accumulazione FFAG con un
sottile bersaglio interno di Be



Conclusioni/1

L'EA rappresenta un ottimo esempio di trasferimento tecnologico, in quanto esporta tecniche e strumentazioni tipiche della Fisica Nucleare e Subnucleare:

Per es:

- 1) L'utilizzo dell'acceleratore di particelle che funge da "accensione" dell'EA.
- 2) "la spallazione" che muove i neutroni utilizzati per far fissionare il combustibile.
- 3) La trasmutazione per incenerire le scorie

Con questo trasferimento si è potuto progettare un dispositivo (l'EA) i cui risultati possono avere un forte impatto socio-economico:

- a) Aumento dell'energia prodotta senza avere negativi impatti ambientali
- b) Smaltimento delle scorie
- c) Sicurezza

Conclusioni/2

- Gli ADS hanno ottime prospettive di risolvere gran parte dei problemi legati al nucleare:
 - Scorie radioattive
 - Proliferazione
 - Sicurezza
 - Fonti di combustibile
- Lo sviluppo di questi sistemi sta avvenendo tramite vari esperimenti [e in vari paesi, ad es. Europa, Giappone, Cina (ADANES)], e la tecnologia necessaria per la realizzazione di un impianto funzionante è ≈vicina all'essere disponibile.

Fine della 2a parte