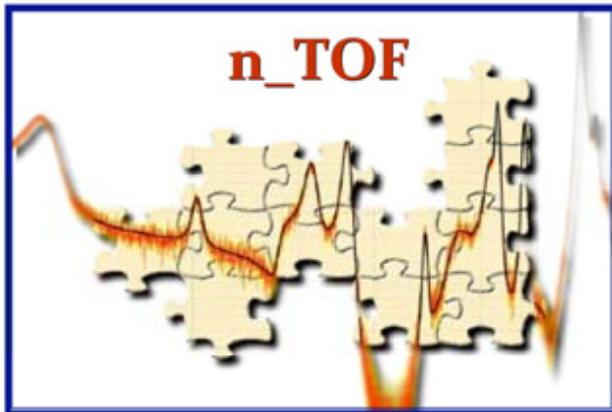


I reattori di IV Generazione e la richiesta di nuovi dati nucleari

Nuclear Data for Science, Technology and ... Society (Hans Blix, ND 2007)

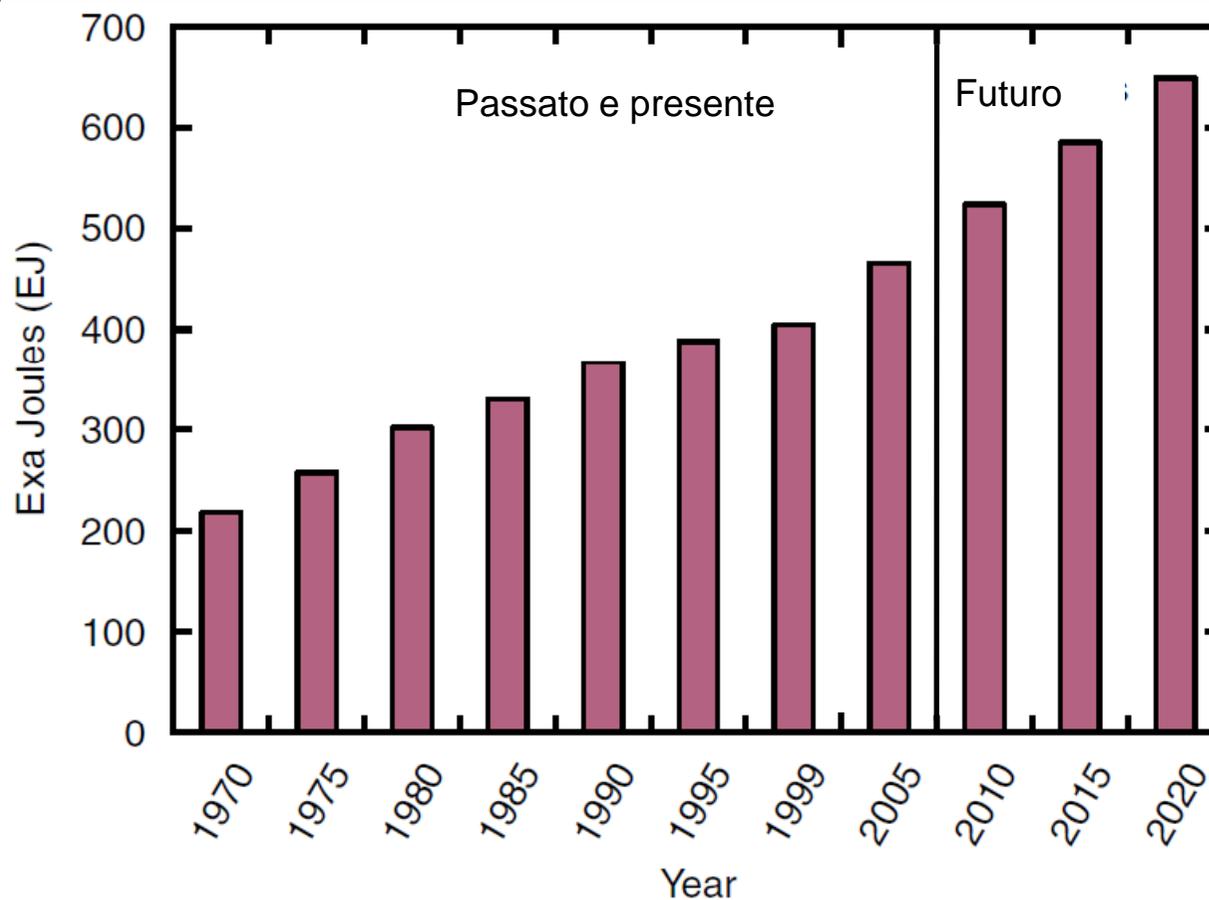


N. Colonna
INFN - Sezione di Bari

Outline

- **Introduzione**
- **Problemi dei reattori nucleari attuali**
- **Sistemi nucleari di nuova generazione**
- **Le richieste di dati nucleari per i reattori di Gen IV**
- **Recenti risultati ad n_TOF**
- **Conclusione**

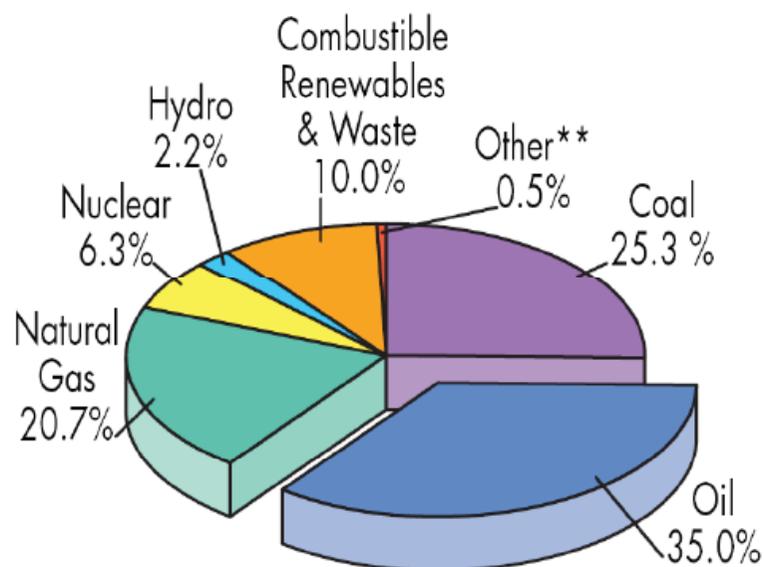
La produzione di energia nel mondo



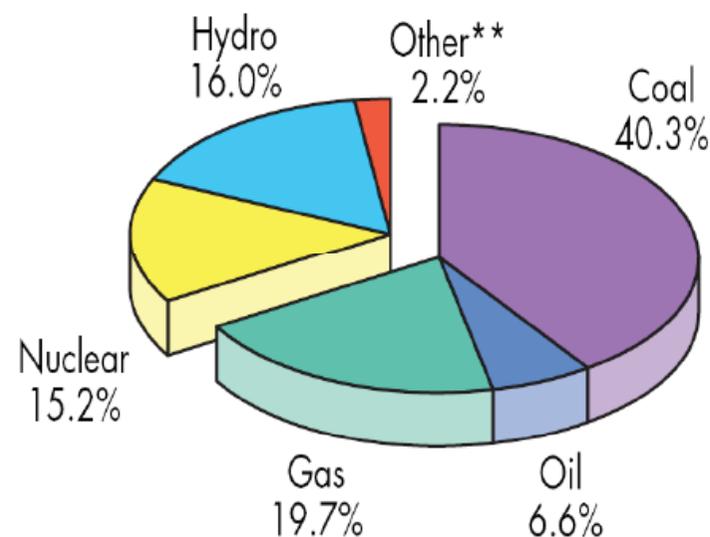
- Aumento della popolazione mondiale (10 miliardi nel 2050)
- Miglioramento generale degli standard di vita (soprattutto nell'area BRIC)

Aumento costante del consumo di energia nel mondo (+ 50 % nel 2020):

La produzione di energia nel mondo



Energia totale



Energia elettrica

85 % dell'energia attualmente consumata nel mondo è prodotta da combustibili fossili

Problemi associati allo sfruttamento dei combustibili fossili:

- approvvigionamento (picco di produzione entro 2020);
- ambientali (cambiamenti climatici in genere per CO₂ + inquinamento atmosferico).

La produzione di energia nel mondo

Necessario (e sempre più urgente) sviluppare fonti di energia **pulita, sicura e a basso costo**:

- **risparmio** e maggiore efficienza energetica (fondamentale nel breve termine)
- fonti **rinnovabili**: solare, eolico, biomasse, etc... (sviluppo nel medio termine)
- **NUCLEARE** (fissione e fusione)

Vantaggi del nucleare:

- emissione zero di **CO₂** o altri inquinanti
- riduce dipendenza dai paesi produttori di petrolio e da eventuali **turbolenze** politiche in alcune aree (Golfo, Iran, paesi arabi in genere)
- usato per produrre idrogeno, permetterebbe di sostituire il petrolio anche nei **trasporti**

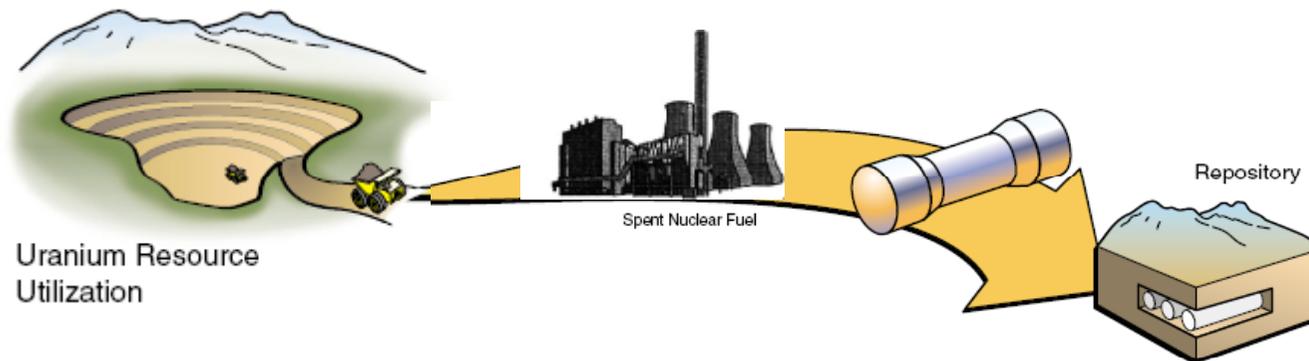
Attualmente, il nucleare contribuisce con il 6 % all'energia totale consumata, e per il 15 % all'energia elettrica:

- 439 centrali, per un totale di 356 GWe

Attualmente alcuni problemi frenano un utilizzo maggiore dell'energia nucleare

I reattori attuali

I sistemi attuali sono **“once through”**: il combustibile, U o Pu, passa una sola volta attraverso il core del reattore



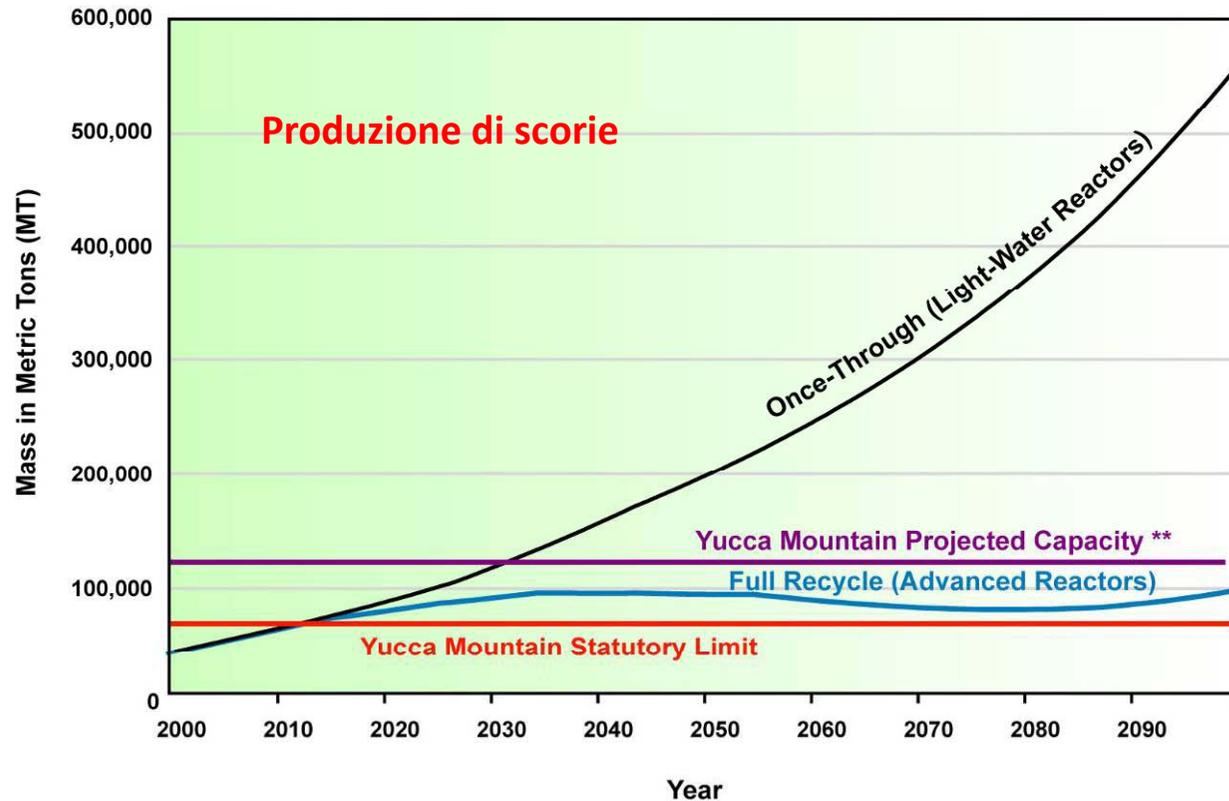
Problemi dei reattori attuali:

- bassa **efficienza di burn-up** e produzione di grandi quantità di **scorie radioattive** con tempi di decadimento molto lunghi.
- rischi di **incidenti**, soprattutto per i reattori più vecchi (e con il licensing esteso a 60 anni)
- necessità di grossi **investimenti** e lunghi **tempi** di costruzione.
- problemi di **proliferazione** (utilizzo di materiale fissile per scopi militari)

Nel breve periodo: **problema dello smaltimento delle scorie**

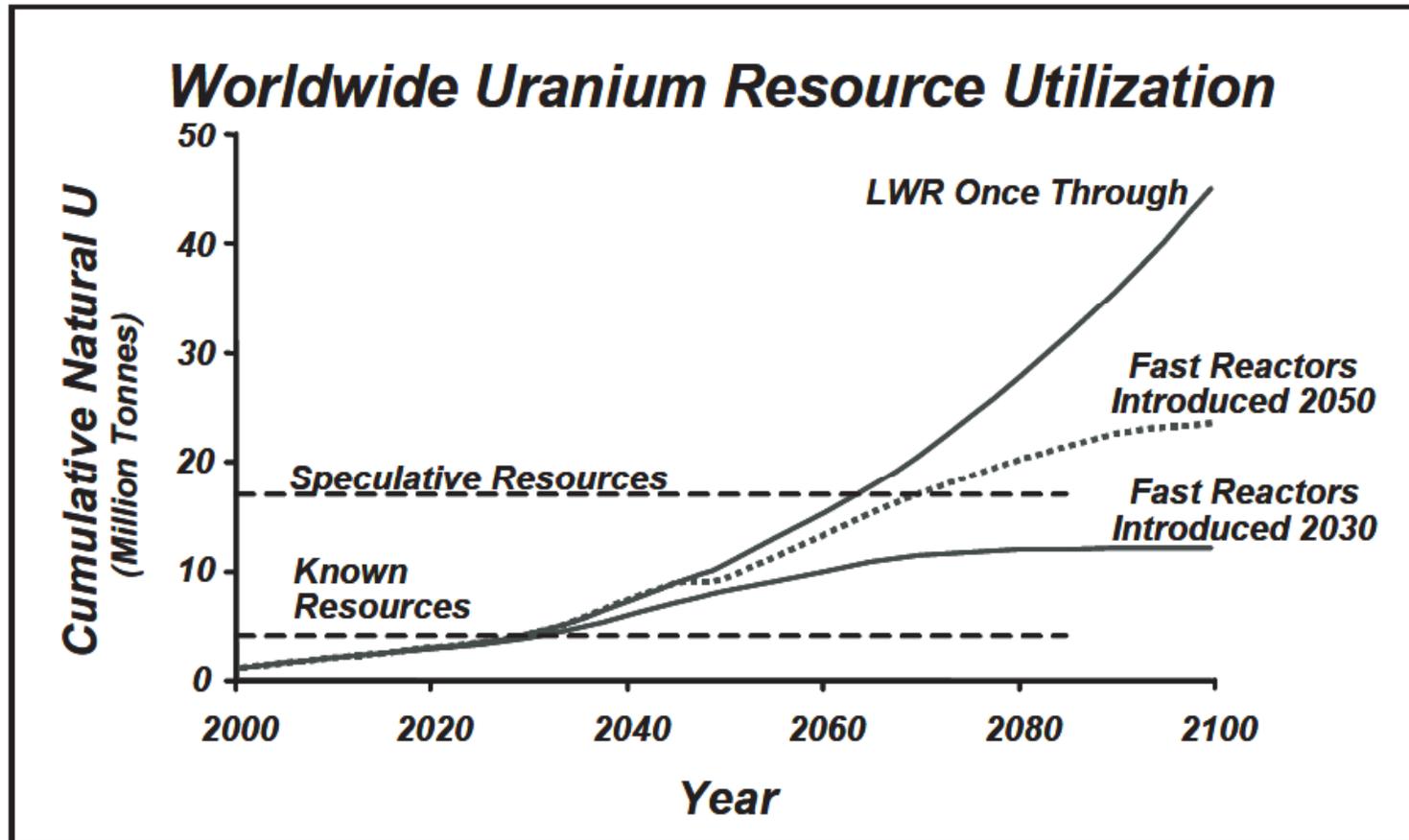
Nel lungo periodo (> 50 anni): **esaurimento disponibilità** di Uranio

Il problema delle scorie



Al rate attuale di crescita della produzione di energia elettrica, e con il nucleare al 20 % del totale, necessario approntare un deposito geologico tipo Yucca Mountain ogni 20 anni.

La richiesta di Uranio



Nel lungo periodo (50 anni a partire da ora), la **disponibilità** di uranio potrebbe diventare un problema (a meno di sviluppi tecnologici nell'estrazione).

Le scorie nucleari nei reattori (1 GW_e LWR)



Il ciclo Th/U

	Cm 238 2,4 h	Cm 239 3 h	Cm 240 27 d	Cm 241 32,8 d	Cm 242 162,94 d	Cm 243 29,1 a	Cm 244 18,10 a	Cm 245 8500 a	Cm 246 4730 a
Am 236 ? 3,7 m	Am 237 73,0 m	Am 238 1,63 h	Am 239 11,9 h	Am 240 50,8 h	Am 241 432,2 a	Am 242 141 a	Am 243 7370 a	Am 244 26 m	Am 245 10,1 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2,411 · 10 ⁴ a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 10 ⁵ a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 ² a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,5 h	Np 237 2,144 · 10 ⁵ a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 · 10 ⁵ a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 120 ns	U 237 6,75 d	U 238 99,2745	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 2,10 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 24,2 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m			
Th 231 25,5 h	Th 232 1,405 · 10 ¹⁰ a	Th 233 22,3 m	Th 234 24,10 d	Th 235 7,1 m	Th 236 37,5 m	Th 237 5,0 m			



LLFP

LLFP

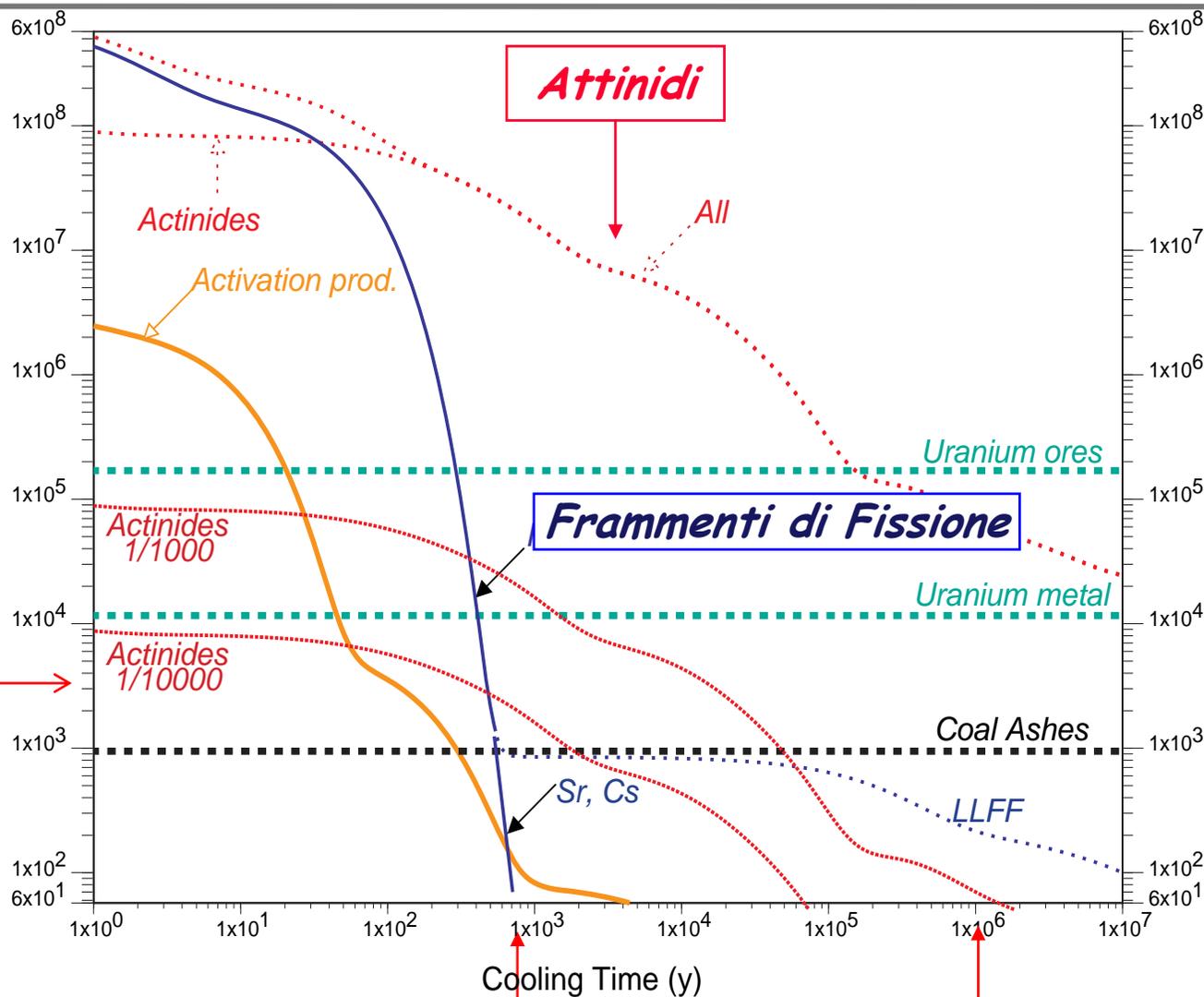
Le varie componenti delle scorie nucleari

I **Frammenti di Fissione** decadono in poche **centinaia di anni** (a parte alcune eccezioni).

Gli **attinidi** sopravvivono per **milioni di anni**.

Plutonio e attinidi minori rappresentano il problema principale per lo smaltimento delle scorie nucleari.

Radiotossicità naturale



700 anni

1 milione di anni



La produzione di scorie

La soluzione al duplice problema è il **riutilizzo del combustibile (ciclo chiuso)**.

Attualmente praticato in alcuni casi il **riprocessamento**, che consiste nel separare dal combustibile spento U e Pu, utilizzato per preparare nuovo combustibile.

- vantaggio -> riduzione del volume delle scorie;
- svantaggio -> al momento non è economicamente conveniente

Non è un vero ciclo chiuso (volume delle scorie prodotte è ancora significativo).

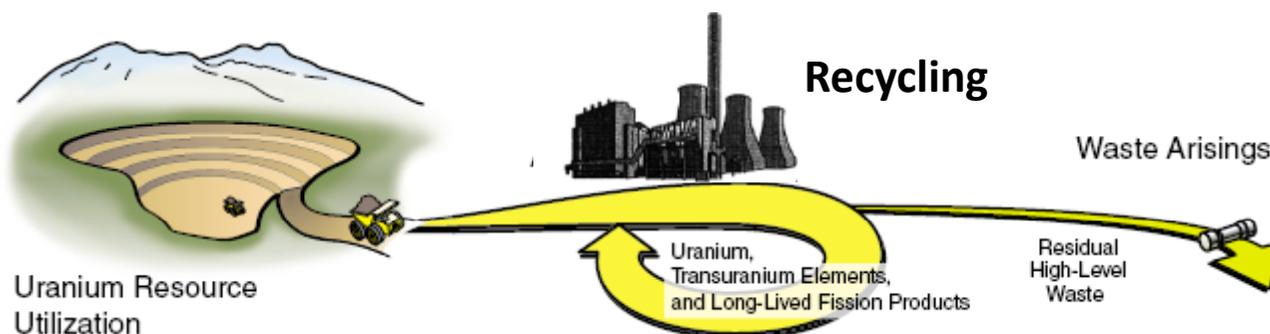
Il salto di qualità si avrebbe con sistemi che **riutilizzano** non solo U e Pu, ma anche una grossa parte delle **scorie** (soprattutto attinidi a lunga vita media).

Semplificherebbe notevolmente il problema dello **stoccaggio**, grazie al ridotto volume e vita media delle scorie residue.

I reattori di nuova generazione

Allo studio reattori di **nuova generazione** che non presentino i problemi attuali (in particolare limitata disponibilità di U e produzione di scorie).

Principio fondamentale è il **riutilizzo** di una parte importante del combustibile spento.



Attualmente allo studio due tipi di nuovi sistemi nucleari:

- reattori di **IV Generazione** (critici), con scopo primario la produzione di energia;
- **Accelerator Driven Systems** (sottocritici), mirati per lo più alla trasmutazione delle scorie radioattive (LLFF e MA).
- Fusion-fission (fissione indotta da neutroni prodotti dalla fusione)

La trasmutazione delle scorie radioattive

Trasmutazione (o incenerimento nucleare) delle scorie radioattive



reazioni indotte da **neutroni** che trasformano isotopi radioattivi a lunga vita media in **isotopi stabili** o a vita media breve.

Element (quantity)	Isotope	Half-life (years)	Quantity (ton/year)
Plutonium (11.4 ton/year)	²³⁸ Pu	88	0.19
	²³⁹ Pu	2.4×10^4	6.53
	²⁴⁰ Pu	6.5×10^3	2.52
Minor actinides (1.1 ton/year)	²³⁷ Np	2.1×10^6	0.48
	²⁴¹ Am	430	0.25
	²⁴³ Am	7.4×10^3	0.14
	²⁴⁵ Cm	8.5×10^3	0.001
Fission products (39 ton/year)	¹³⁵ Cs	2.3×10^6	0.4
	⁹⁹ Tc	2.1×10^5	1.0
	⁹³ Zr	1.5×10^6	0.9
	¹²⁹ I	1.0×10^7	0.2
	¹⁰⁷ Pd	6.5×10^6	0.25

Reazioni di trasmutazione

Frammenti di fissione (LLFF)

¹⁵¹Sm, ⁹⁹Tc, ¹²¹I, ⁷⁹Se ...



cattura neutronica (n,γ)



Pu e attinidi minori

²⁴⁰Pu, ²³⁷Np, ^{241,243}Am, ^{244,245}Cm, ...



fissione indotta da neutroni (n,f)

cattura neutronica (n,γ)

La fisica dei nuovi reattori

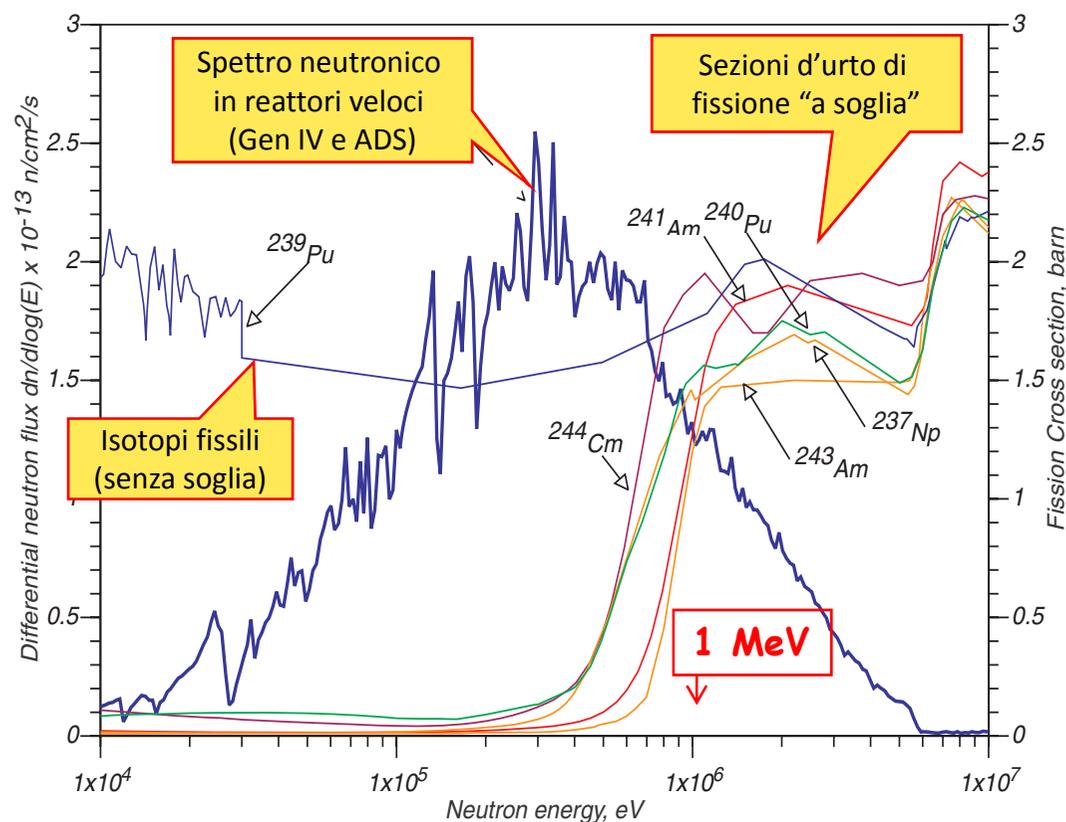
L'innovazione principale riguarda la possibilità di produrre energia bruciando le scorie a più alta radiotossicità: **Np, Am, Cm**

A parte il ^{245}Cm , gli attinidi minori presentano una **soglia di fissione** intorno al **MeV**.

Per bruciare gli attinidi minori sono necessari **neutroni veloci** ($E_n > 500$ keV).

Sia gli **ADS** che i reattori **veloci di IV Generazione** hanno il doppio vantaggio:

- **maggior** flusso disponibile per la **fissione** degli attinidi ($E_n > 500$ keV)
- **minore** flusso disponibile per la **produzione** di attinidi (per cattura)



Non tutti i reattori di IV Generazione sono **reattori veloci**.

Gli obiettivi della IV Generazione

Richieste di progettazione per i reattori di **IV Generazione**

Vantaggi per l'ambiente:

- zero emissione di CO₂, SO₂, etc... (**energia pulita**)
- minore produzione di **scorie**

Sostenibilità:

- maggiore efficienza di **burn-up** e maggiore efficienza **termica**
- disponibilità del combustibile nel **lungo termine**

Economicità:

- **tempi e costi** di costruzione (capital risk) confrontabili con altre fonti energetiche
- **costo del kWh** confrontabile o inferiore ad altre fonti (rinnovabili)

Sicurezza

- Bassissimo rischio di danno al **nocciolo** (sicurezze passive)
- Maggiore **protezione** contro attacchi terroristici

Non-proliferazione

- bassa convenienza o impossibilità di **furto**
- impossibilità di utilizzo del combustibile per **scopi militari**

Possibilità di produrre idrogeno

- "estensione" del nucleare al settore dei **trasporti**

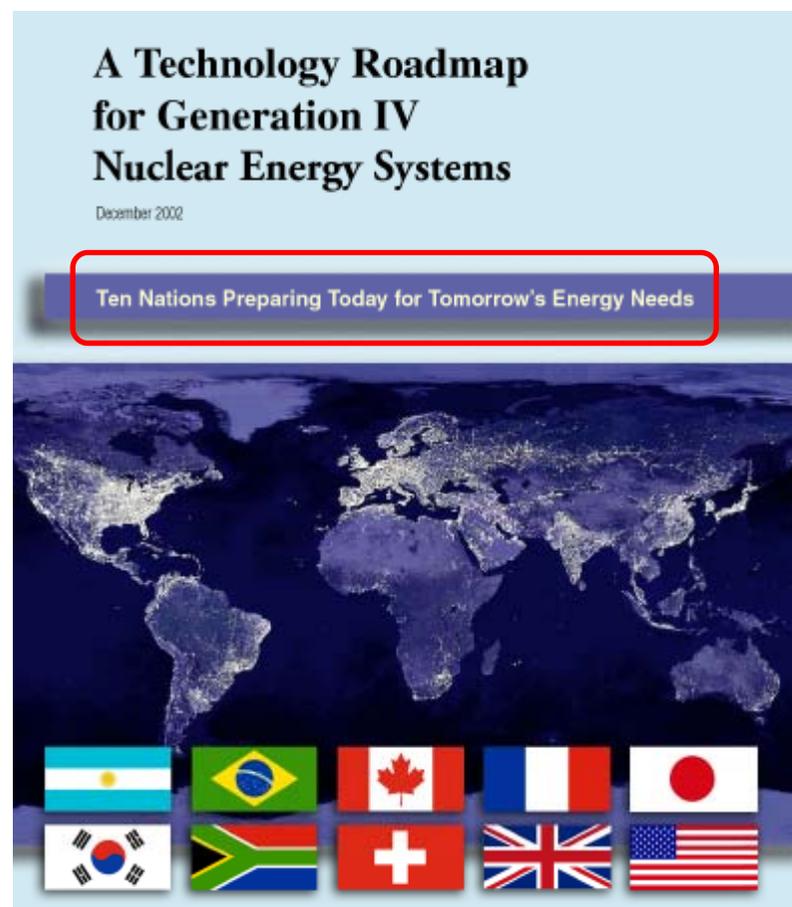
The Generation IV forum

Nel 2002 costituito un gruppo di lavoro (Generation IV International Forum, GIF) per lo sviluppo dei reattori di nuova generazione:

- studio di fattibilità
- Individuazione dei problemi tecnici
- suddivisione del lavoro

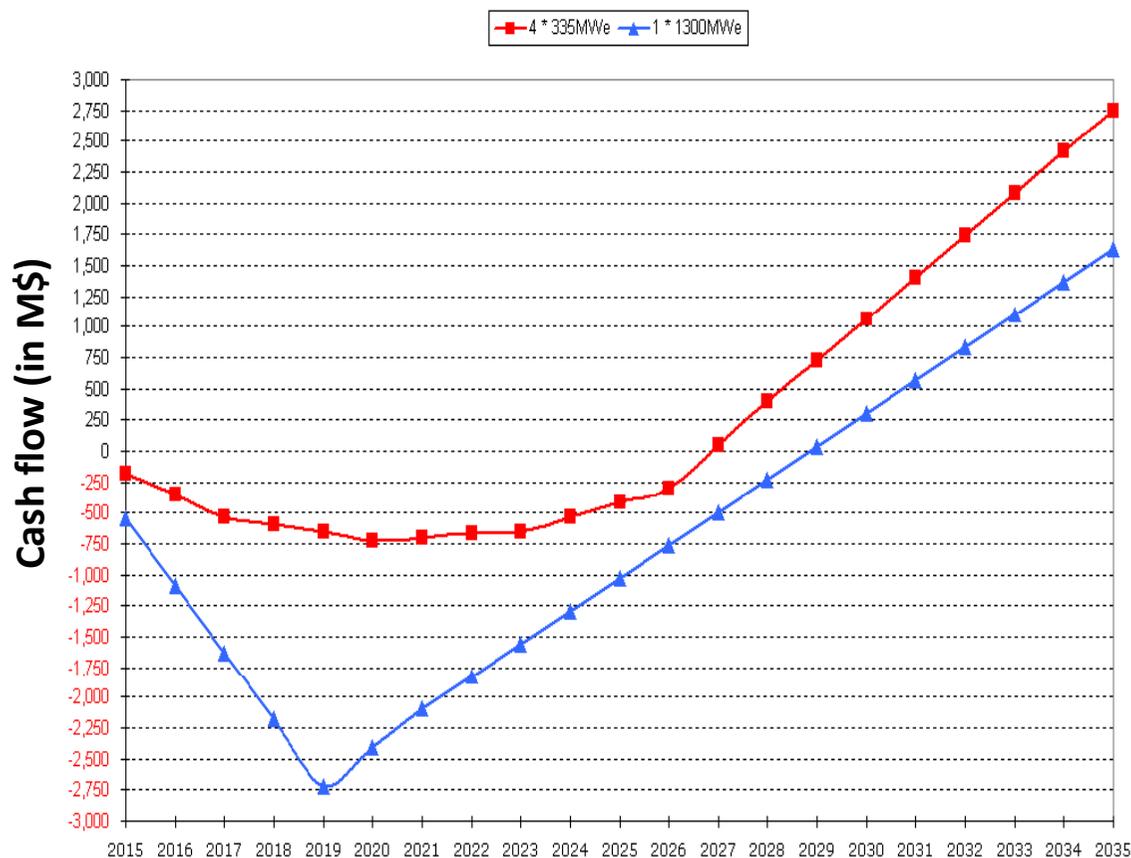
Al GIF per il momento aderiscono ufficialmente 10 nazioni, ma contributi importanti da enti di ricerca e industrie di altri paesi.

Per l'Italia, partecipa l'Ansaldo Nucleare.



**L'Italia non c'è
(ma qualcosa si sta muovendo)**

La convenienza dei reattori medio-piccoli



Soluzione interessante per l'Italia

E' più conveniente **costruire progressivamente** diversi reattori medio-piccoli che uno grande (a parità di potenza):

- ridotto investimento iniziale
- tempi di costruzione minori
- "learning curve"
- adattamento alle esigenze

La costruzione di reattori di dimensioni **medio-piccole** potrebbe essere una soluzione interessante per diversi casi:

- paesi con **reti elettriche** piccole (< 10 GW)
- posti **isolati** o lontani dalla rete elettrica (isole, Poli, etc...)
- paesi con **limitate** capacità di investimento.

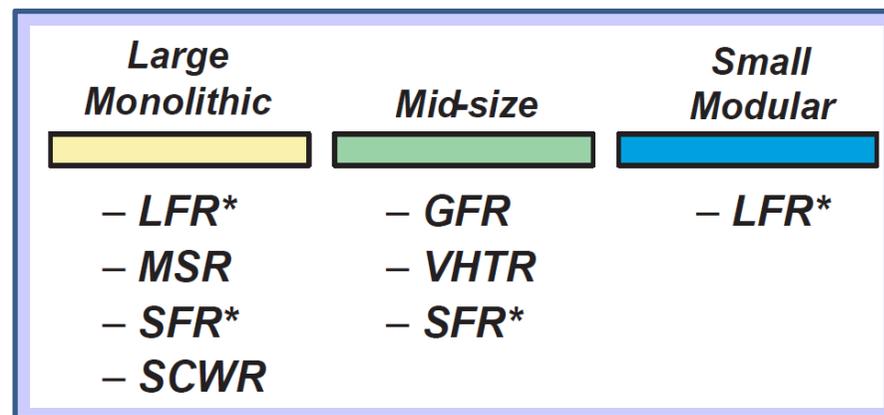
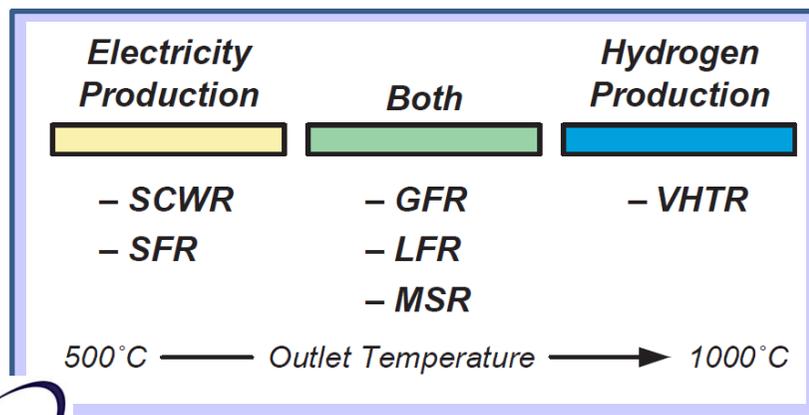
I reattori di IV Generazione

Attualmente allo studio **sei tipi di reattori** di IV Generazione (di cui tre veloci)

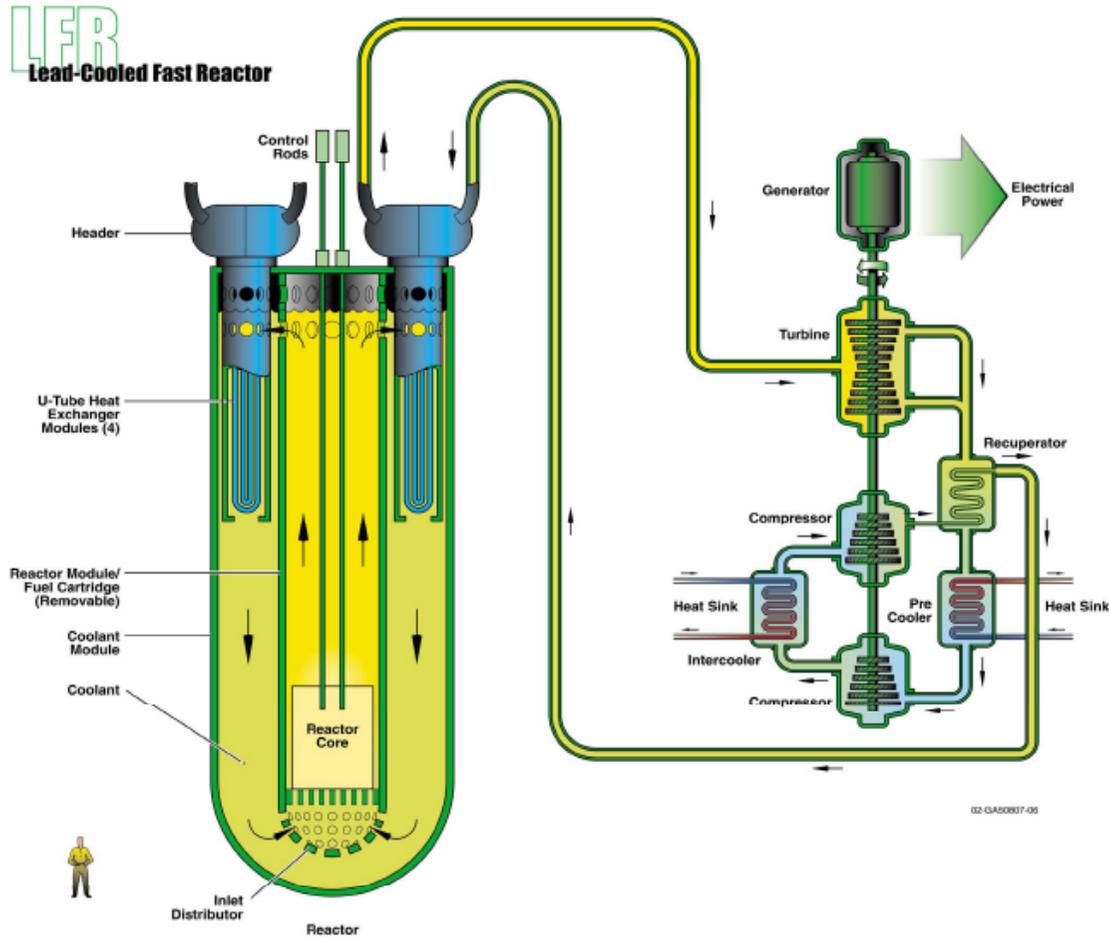
Sistemi di IV Generazione	Acronimo
Gas-cooled Fast Reactors	GFR
Lead-cooled Fast Reactors	LFR
Sodium-cooled Fast Reactors	SFR
Molten Salt Reactors	MSR
Supercritical-Water-Cooled Reactors	SCWR
Very-High-Temperature Reactors	VHTR

E' probabile che alcuni siano abbandonati strada facendo, o che siano introdotte altre varianti.

Oltre ai Gen IV, in corso ricerca su reattori a ciclo Th/U (termici) e sugli ADS.



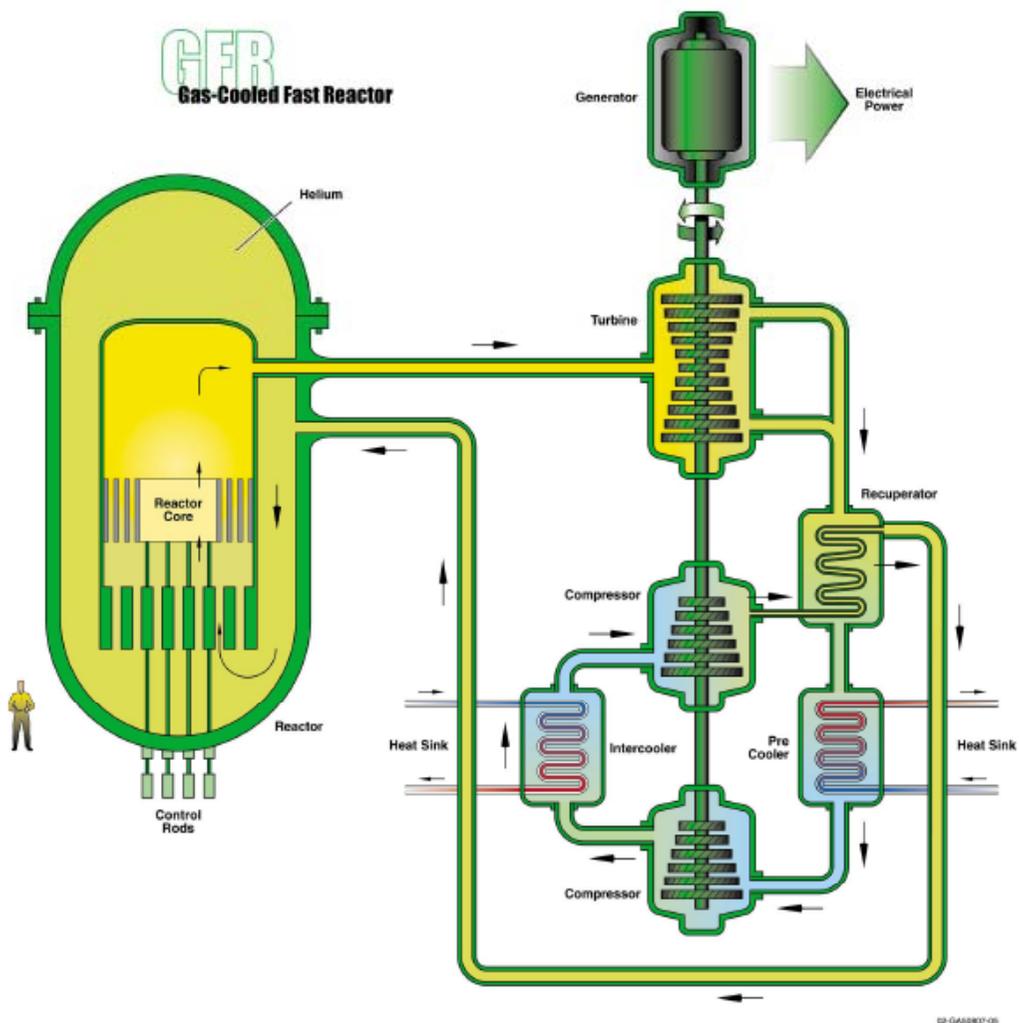
Lead-Cooled Fast Reactor



- Pb liquido (o miscela Pb/Bi) come refrigerante primario, contenuto nel reattore.
- Circolazione per convezione
- Potenza da 50 a 1200 MWe
- Produzione di elettricità ed idrogeno

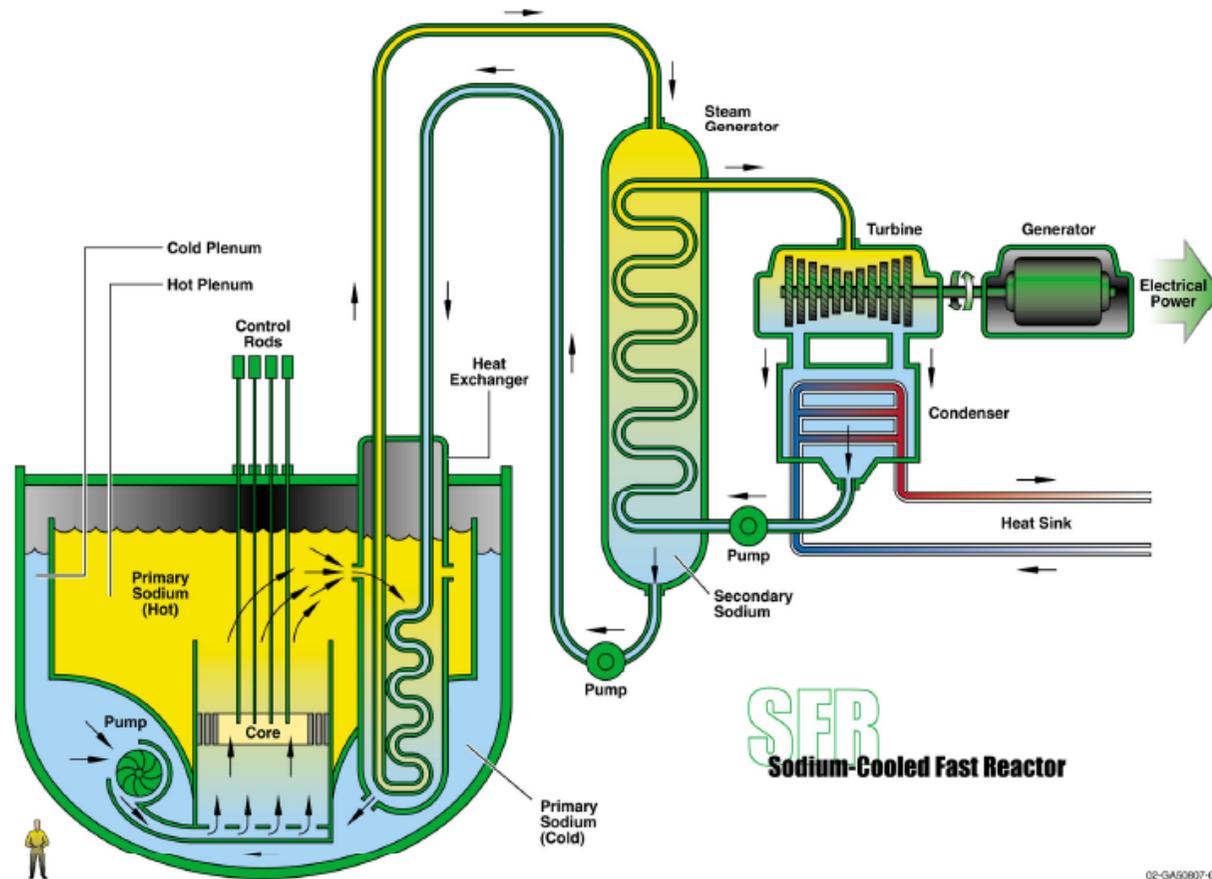
Allo sviluppo del Lead-Cooled Fast Reactor partecipa l'Ansaldo Nucleare

Gas-cooled Fast Reactor



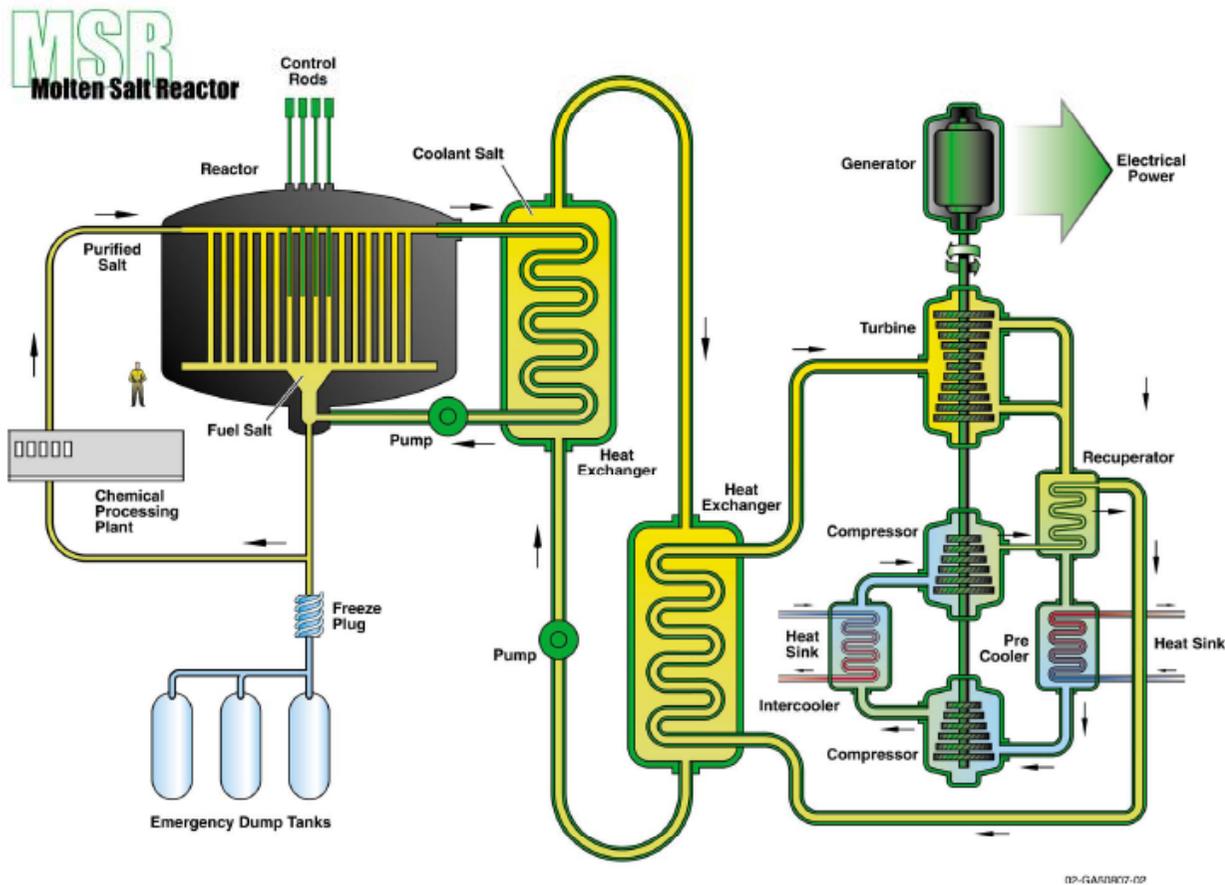
- Unico scambiatore
- Uso di elio
- Alta efficienza termica
- Economico

Sodium-Cooled Fast Reactor



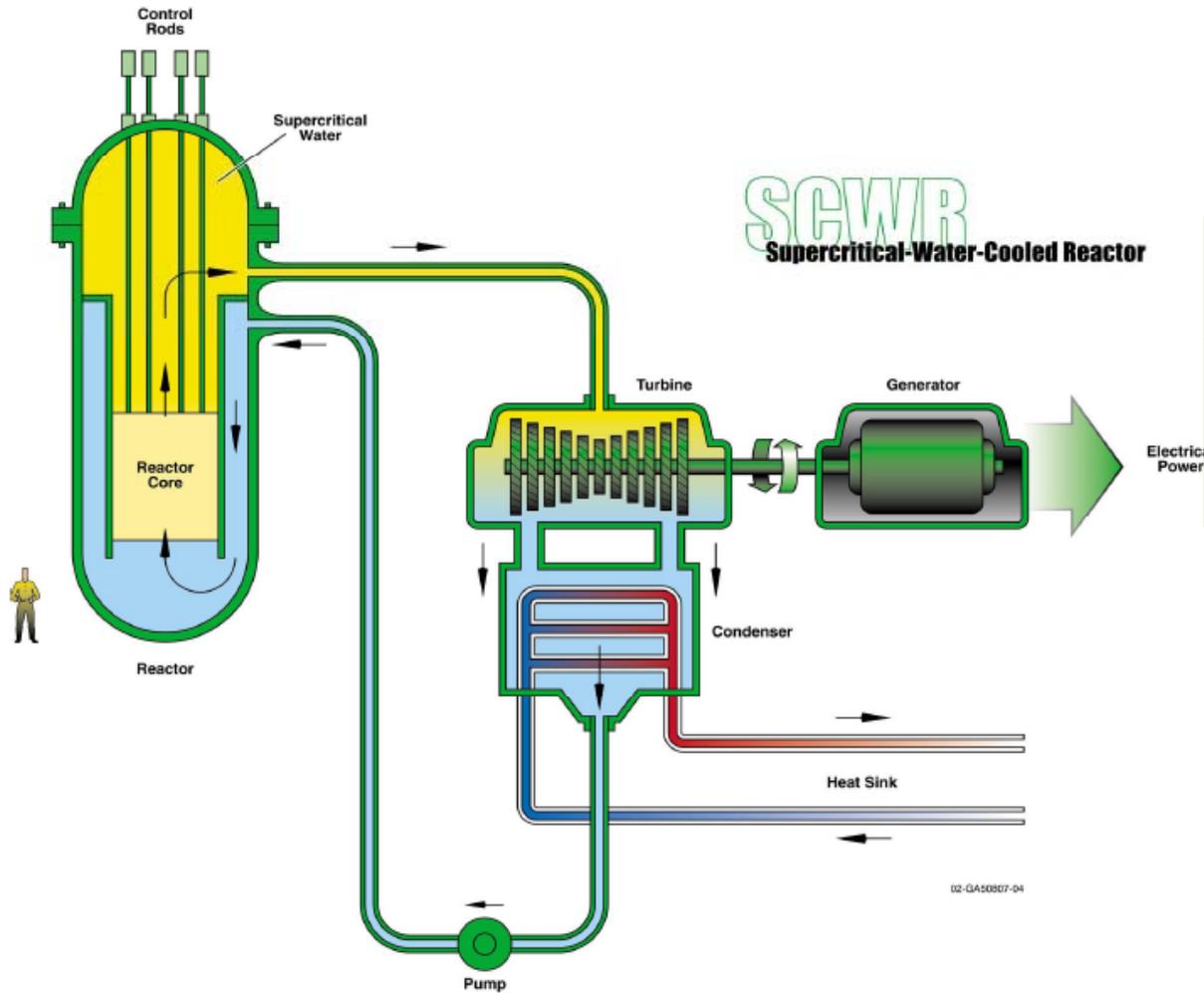
- Sodio liquido usato come refrigerante
- Doppio scambiatore di calore per maggiore sicurezza.

Molten-Salt Reactor



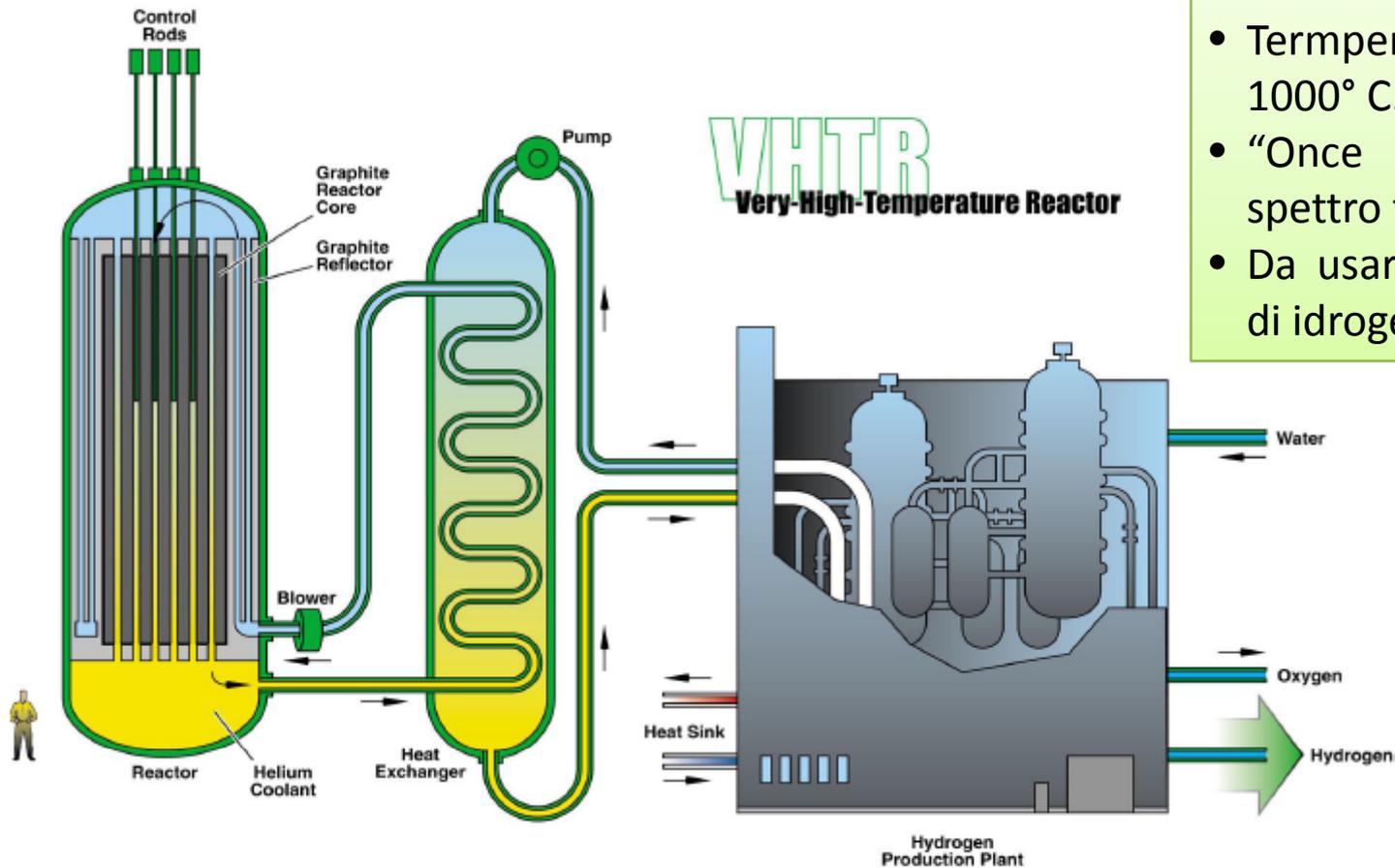
- Spettro epitermico
- Combustibile fatto da miscela liquida di sodio, zirconio e fluoruro di uranio
- Doppio scambiatore di calore per maggiore sicurezza.

Supercritical-Water-Cooled Reactor



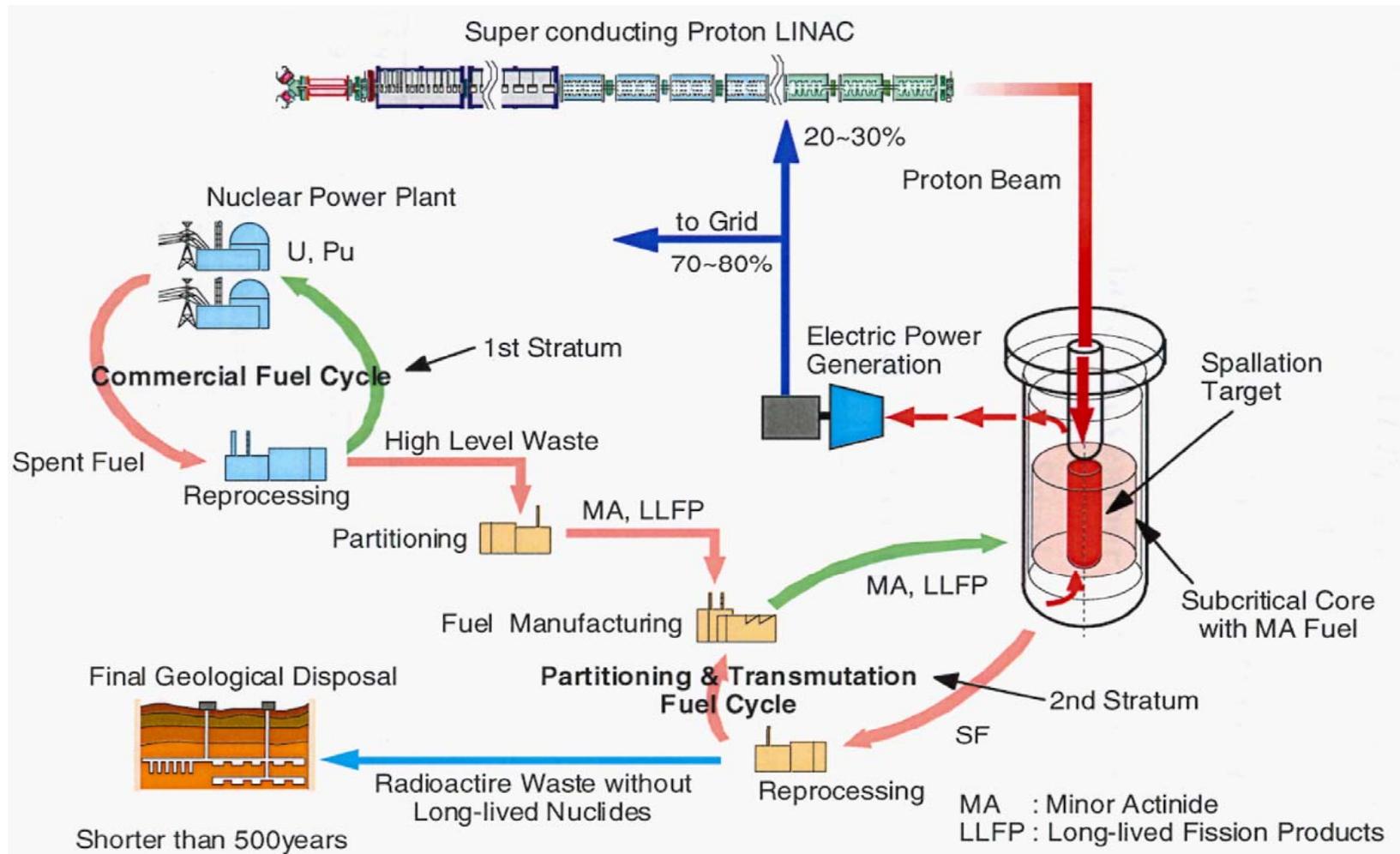
- Spettro termico
- Uso di acqua supercritica e unico scambiatore per efficienza termica del 44 %.

Very-high-Temperature Reactor

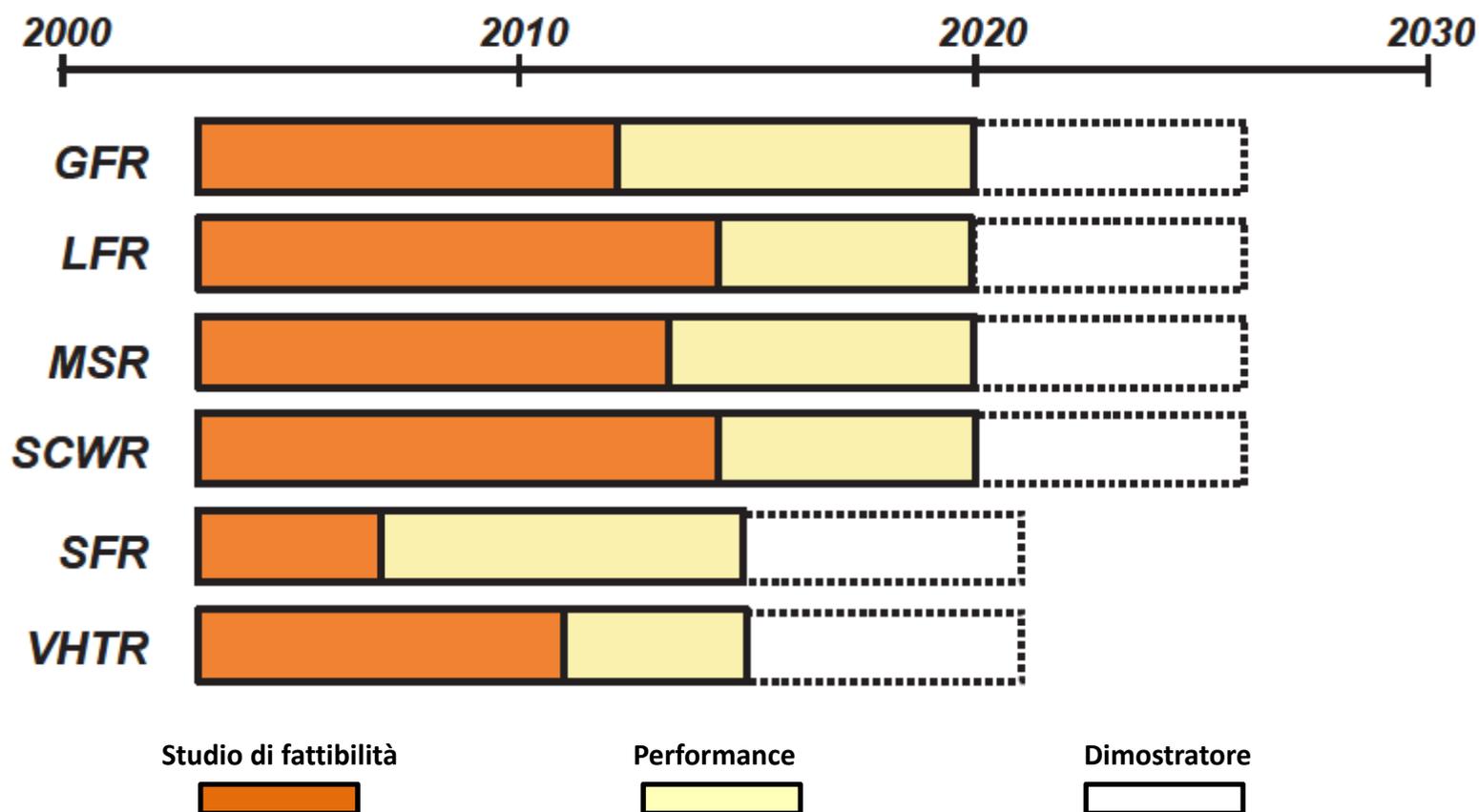


- Raffreddato a He
- Temperatura di uscita 1000° C.
- “Once through” con spettro termico.
- Da usare per produzione di idrogeno.

Accelerator Driven Systems



La schedula dei reattori Gen IV



L'obiettivo è di fare in modo che i reattori di IV Generazione siano pronti per il 2030, quando starà per scadere la licenza della maggior parte dei reattori attuali.

I dati nucleari per i reattori di nuova generazione

L'industria nucleare chiede continuamente **dati nucleari più accurati** (e stima delle incertezze associate) anche per i reattori odierni.

Stimato che dati migliori porterebbero **benefici economici** dell'ordine di centinaia di milioni di dollari all'anno.

Reattori futuri richiedono dati nucleari:

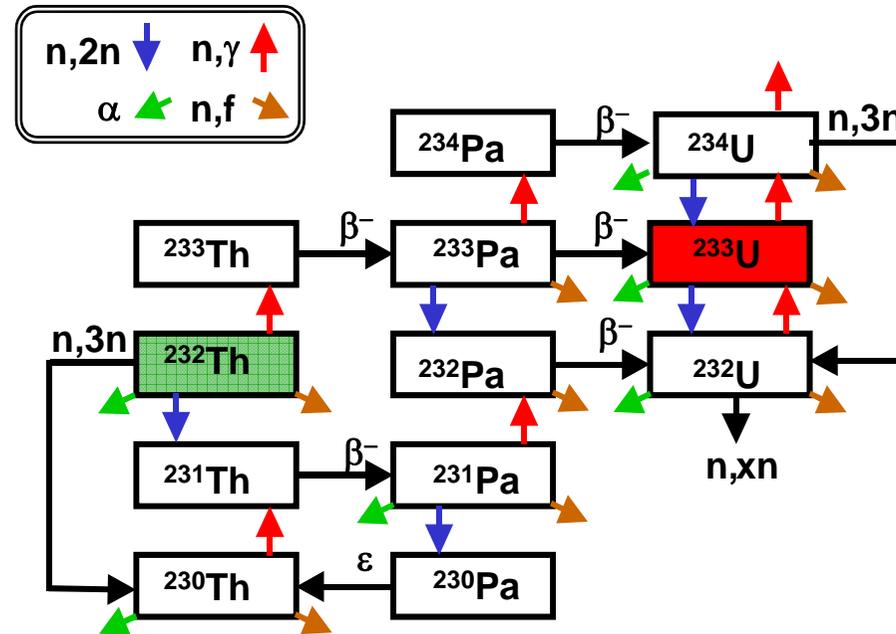
- per ottimizzare le scelte nella **progettazione**
- per migliorare la **sicurezza**
- per evitare scelte ingiustificatamente **conservative**
- per minimizzare gli **investimenti**

Necessarie sezioni d'urto
neutroniche di cattura,
fissione ed inelastiche
per diversi isotopi



• Combustibile nucleare	Th, U, Pu, Am, Cm	(n,f), (n,γ) ...
• Prodotti di fissione (anche "neutron poison")	^{103}Rh , ^{135}Xe , ^{135}Cs , ^{149}Sm	(n,γ)
• Materiale strutturale	Fe, Cr, Ni	tutte

Il ciclo di combustibile Th/U (reattori termici)



Il ^{232}Th è l'isotopo **fertile**: a seguito della cattura neutronica (e successivi decadimenti β), produce il ^{233}U , **isotopo fissile**.

Allo studio soprattutto in India (buona disponibilità di Torio)

Necessarie sezioni d'urto accurate su $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$ e $^{233}\text{U}(n,f)$

Accuratezze richieste per la progettazione dei reattori veloci

		Energy Range	Current Accuracy (%)	Target Accuracy (%)
U238	inel	0.5 ÷ 6.1 MeV	10 ÷ 20	2 ÷ 3
	capt	2.04 ÷ 24.8 keV	3 ÷ 9	1.5 ÷ 2
Pu241	fiss	454. eV ÷ 1.35 MeV	8 ÷ 20	2 ÷ 5
Pu239	capt	2.04 ÷ 498 keV	7 ÷ 15	4 ÷ 7
Pu240	fiss	0.498 ÷ 1.35 MeV	6	1 ÷ 3
Pu242	fiss	0.498 ÷ 2.23 MeV	19 ÷ 21	3 ÷ 5
Pu238	fiss	0.183 ÷ 1.35 MeV	17	3 ÷ 5
Am242m	fiss	67.4 keV ÷ 1.35 MeV	17	3 ÷ 4
Am241	fiss	2.23 ÷ 6.07 MeV	9	2
Am243	fiss	0.498 ÷ 6.07 MeV	12	3
Cm244	fiss	0.498 ÷ 1.35 MeV	50	5
Cm245	Fiss	67.4 ÷ 183 keV	47	7
Fe56	Inel	0.498 ÷ 2.23 MeV	16 ÷ 25	3 ÷ 6
Na23	inel	0.498 ÷ 1.35 MeV	28	4 ÷ 10
Pb206	inel	1.35 ÷ 2.23 MeV	14	3
Pb207	Inel	0.498 ÷ 1.35 MeV	11	3
Si28	inel	1.35 ÷ 6.07 MeV	14 ÷ 50	3 ÷ 6
	capt	6.07 ÷ 19.6 MeV	53	6

Necessaria accuratezza elevata (~3%) per Pu e Attinidi Minori, da qualche keV a molti MeV

I database di sezioni d'urto e le nuove richieste

I database sezioni d'urto neutroniche (ENDF, JENDL, JEFF, BRONDL, etc...) per molti isotopi coinvolti nei Gen IV / ADS sono **incompleti**, presentano **discrepanze** fra loro o con i dati sperimentali (soprattutto per gli attinidi).

Chiaramente **inadatti** per le necessità connesse allo sviluppo di sistemi nucleari avanzati.

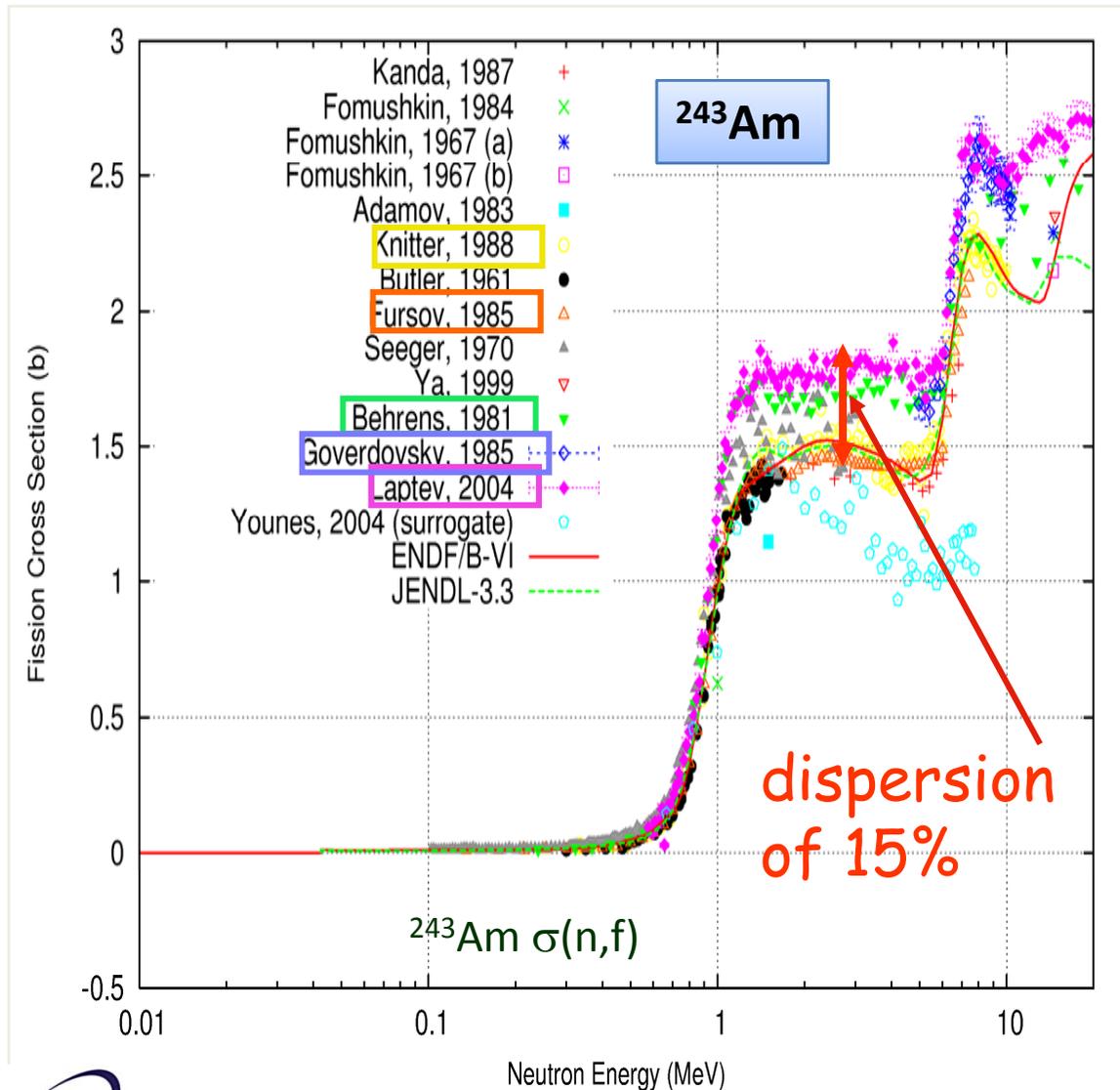
Necessari nuovi dati (in particolare per reazioni di **cattura e fissione**) per molti isotopi, spesso radioattivi.

Lista delle richieste continuamente aggiornata dalla NEA in un report periodico: **THE HIGH PRIORITY REQUEST LIST**



www.nea.fr/html/dbdata/hprl/

Lo strano caso del $^{243}\text{Am}(n,f)$

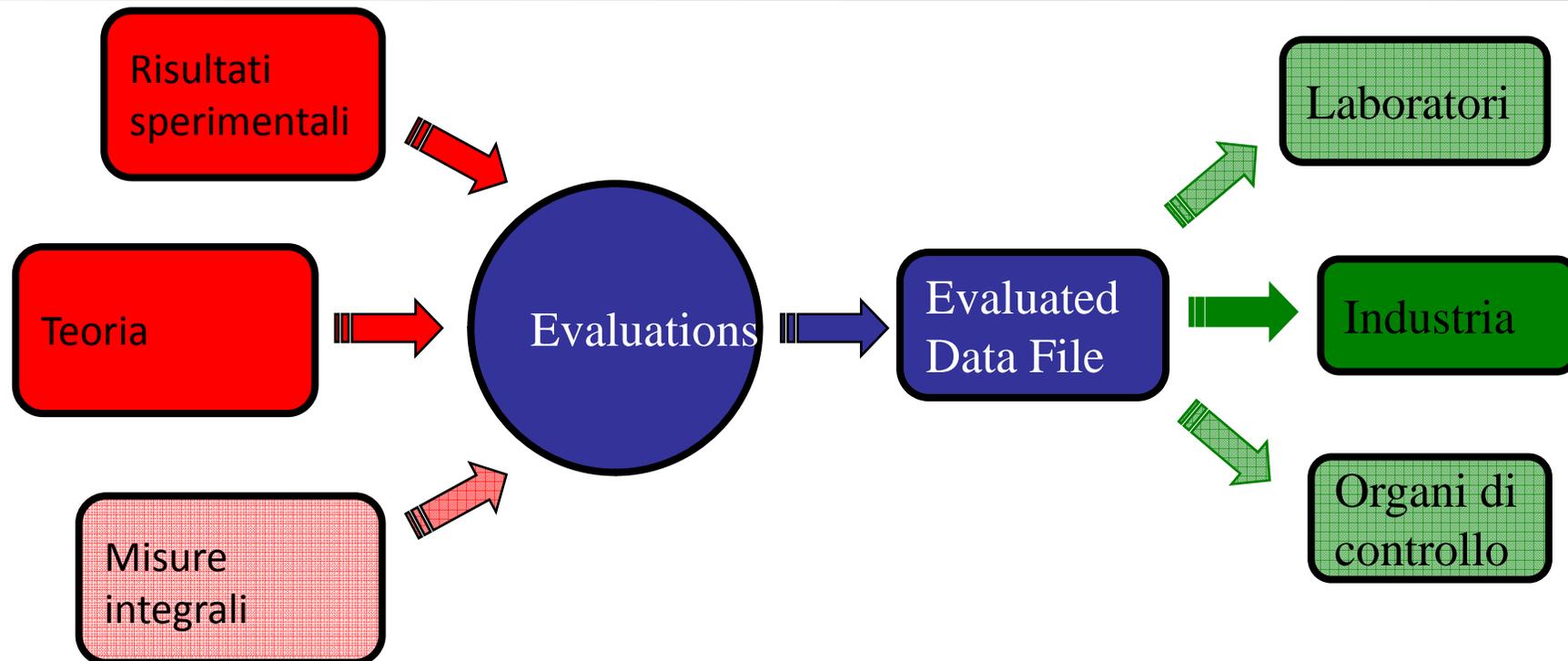


Esistono numerose misure di sezioni d'urto di fissione (dai primi anni '60 al 2004).

Sopra soglia formano due cluster, separati dal 15 % di differenza.

Solo nuovi dati possono fornire una risposta chiara sul problema. (dati n_TOF e Geel confermano il cluster "basso").

I database di sezioni d'urto



Richiesta sforzo sinergico in vari campi per:

- misure di sezioni d'urto ad **alta accuratezza**
- **sviluppo di modelli nucleari** più attendibili (soprattutto per la fissione)
- data evaluation, analisi delle covarianze, **aggiornamento librerie**
- validazione dei risultati (esperimenti integrali nei reattori)

Le misure di sezioni d'urto

Le sezioni d'urto sono affette da numerose incertezze:

- **massa e uniformità** dei bersagli tipicamente qualche %
- **efficienza di rivelazione** dipende dagli apparati
- ...

Per la misura di isotopi radioattivi, problemi aggiuntivi:

- elevato **background** “naturale” radioattività del bersaglio
- disponibilità di **bersagli adeguati** radioprotezione, impurità, etc...

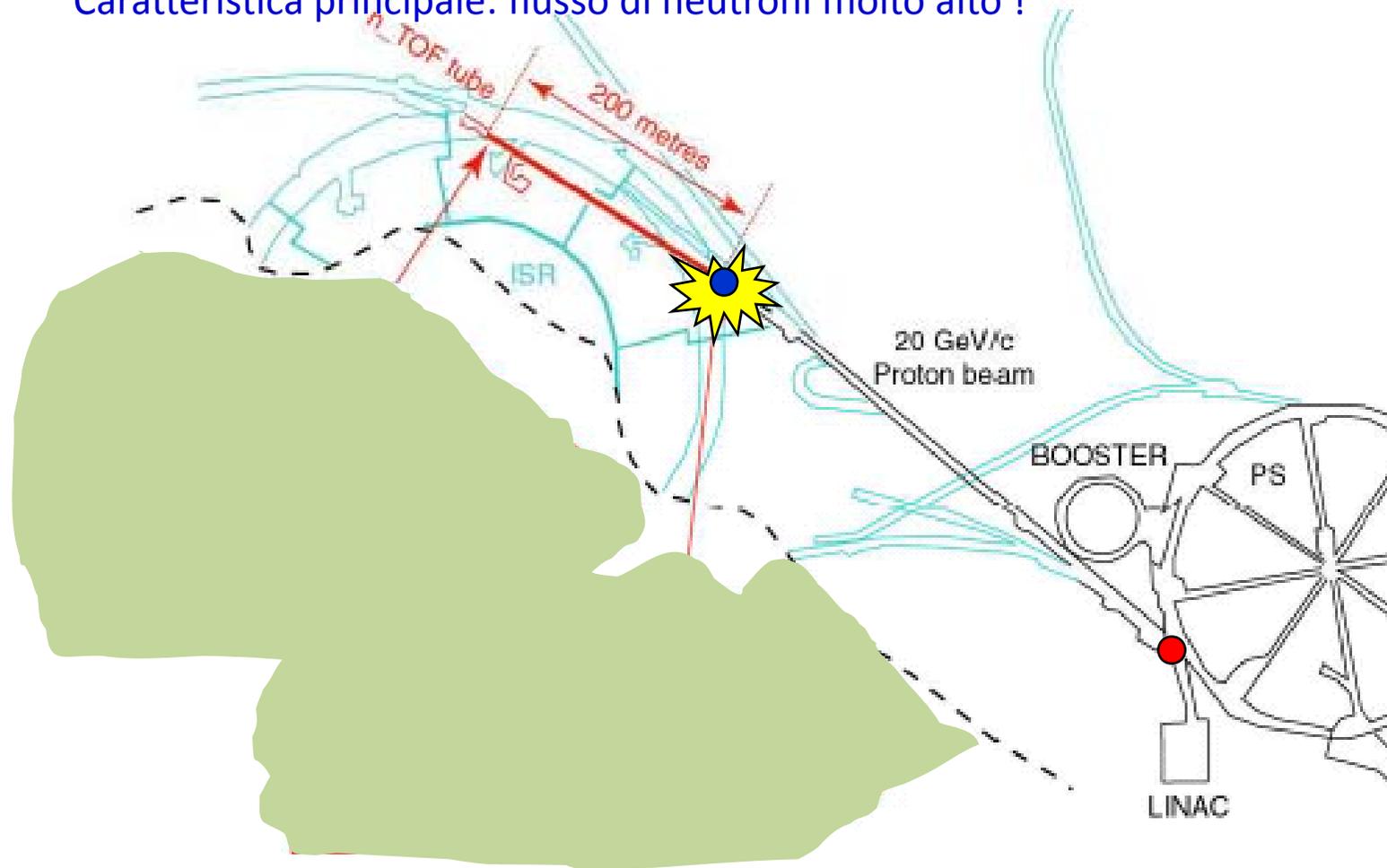
Non è facile misurare sezioni d'urto per “scorie radioattive” con accuratezze (richieste) di qualche percento

Le misure più difficili richiedono **miglioramenti nelle tecniche sperimentali e nelle facilities** (ma non è chiaro se alcune misure potranno mai essere fatte)

Alcune misure attualmente “impossibili” possono essere eseguite con metodi alternativi (**surrogate methods**), o ricavati da **modelli teorici**.

La facility n_TOF al CERN

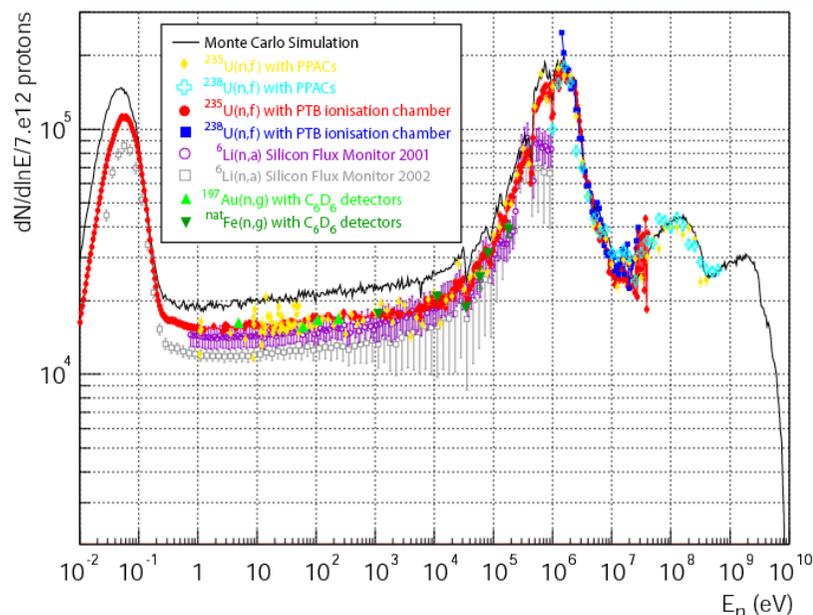
Costruita al CERN a tempo di record (1.5 anni), su proposta di **Rubbia**.
Neutroni prodotti per spallazione da p (20 GeV/c) su Pb.
Caratteristica principale: flusso di neutroni molto alto !





La facility n_TOF

n_TOF è una sorgente di **spallazione** basata su protoni da 20 GeV/c del PS (prodotti 360 neutroni per ogni protone).



Caratteristiche principali:

- vasto **range energetico** (dal termico al 1 GeV)
- elevato **flusso istantaneo**
- elevata **risoluzione energetica** (base di volo di 200 m)
- basso **background**

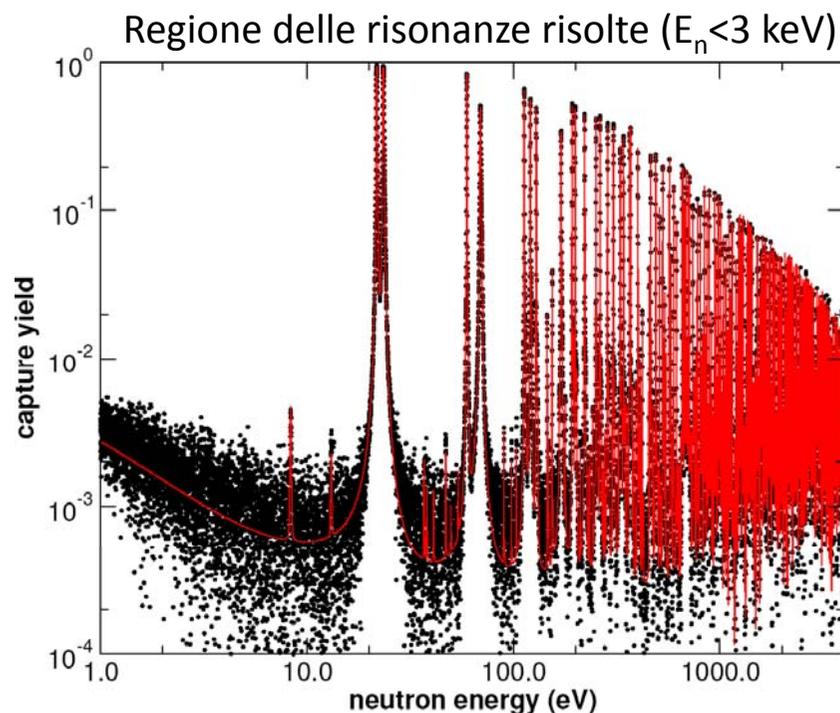
Elevato flusso istantaneo	10^5 n/cm ² /pulse
Largo spettro energetico	$1 \text{ eV} < E_n < 250 \text{ MeV}$
Alta risoluzione energetica	$\Delta E/E \sim 10^{-4}$ (fino a 100 keV)
Basso repetition rate	1 pulse/2.4 s (0.8 Hz)
Basso background	10^{-5} (1 particella/cm ² /pulse)

L'elevato flusso istantaneo consente misure accurate di bersagli radioattivi

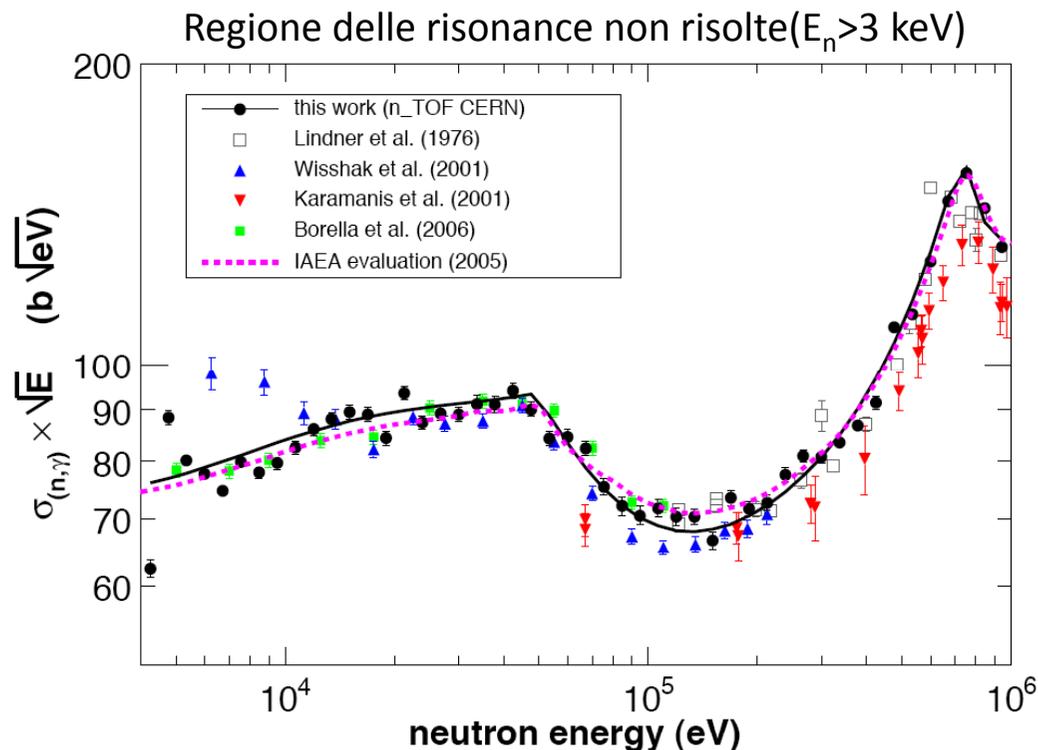
Sezioni d'urto di cattura del ^{232}Th



Le sezioni d'urto di cattura del ^{232}Th fondamentali per la progettazione dei reattori che sfruttano il ciclo Th/U (attualmente allo studio in Francia e India).



F. Gunsing et al., *Phys. Rev. C* in preparation



G. Aerts et al., *Phys. Rev. C* **73**, 054610 (2006)

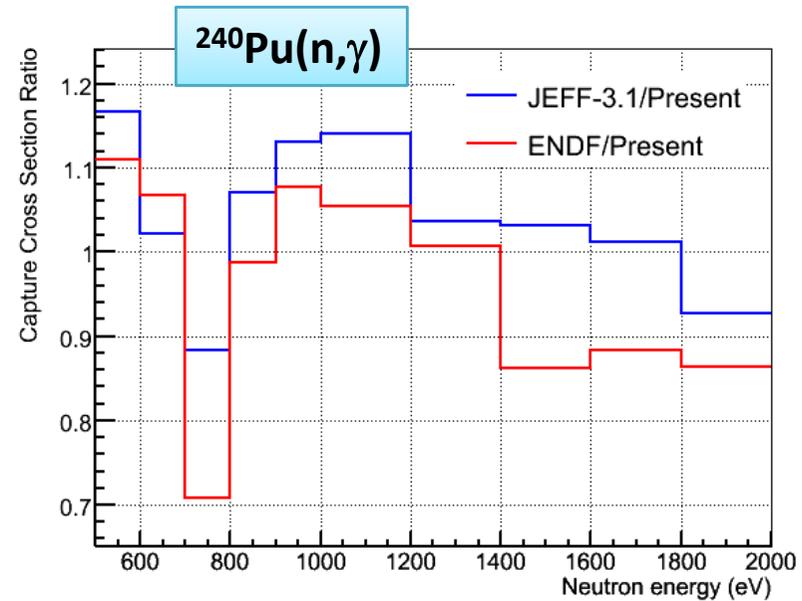
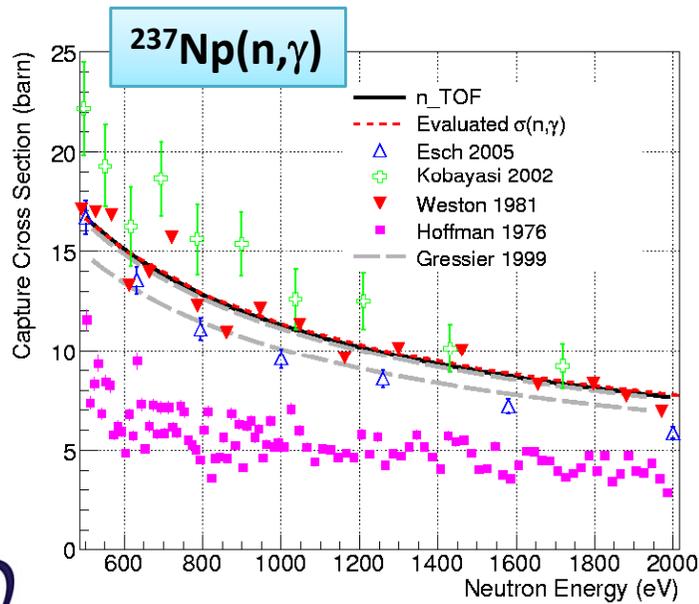
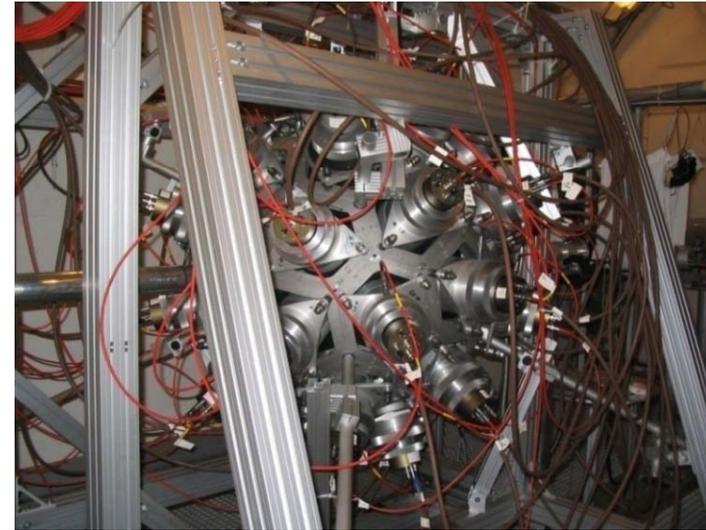
La misura ad n_TOF ha permesso di risolvere una **discrepanza del 40 %** (ad alta energia) e di determinare i **parametri delle risonanze** (utili anche per modelli statistici).

Le misure di cattura con il calorimetro

Isotopi misurati:



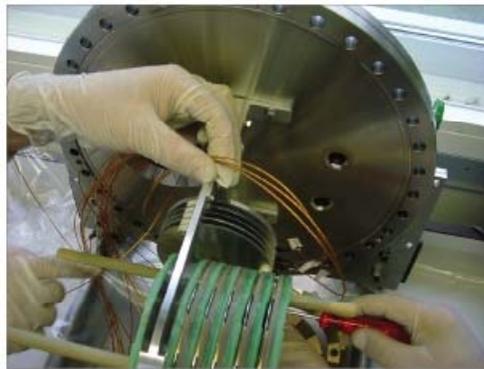
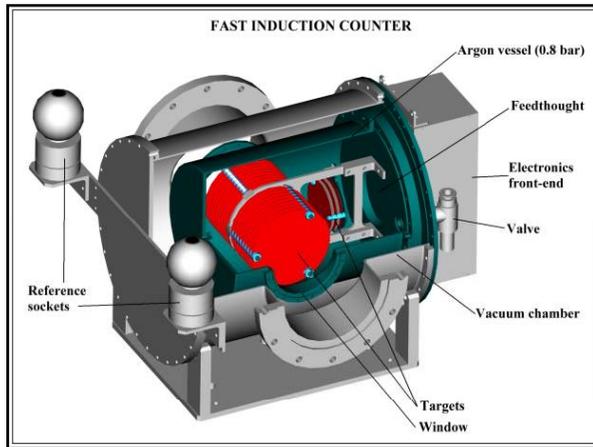
^{197}Au}	.....	in preparazione
^{234}U}	.....	draft
^{233}U}	.....	analisi dati
^{237}Np}	.....	draft
^{240}Pu}	.....	draft
^{243}Am}	.....	analisi dati



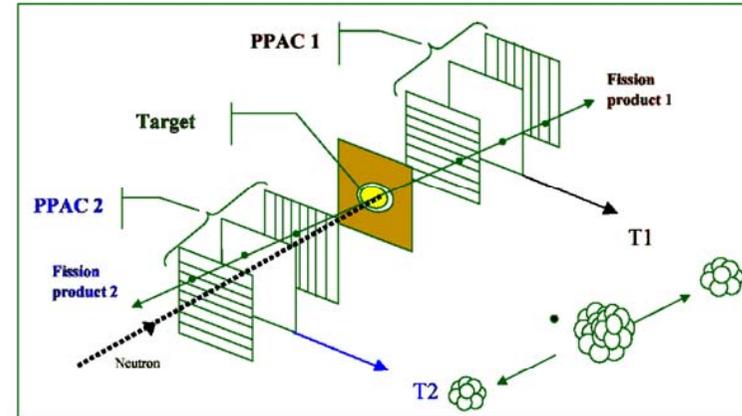
Le misure di fissione ad n_TOF

Usati due diversi rivelatori per FF

Fast Ionization Chamber
(CERN, Dubna, INFN)



Parallel Plate avalanche counter
(IN2P3, Santiago de Compostela)



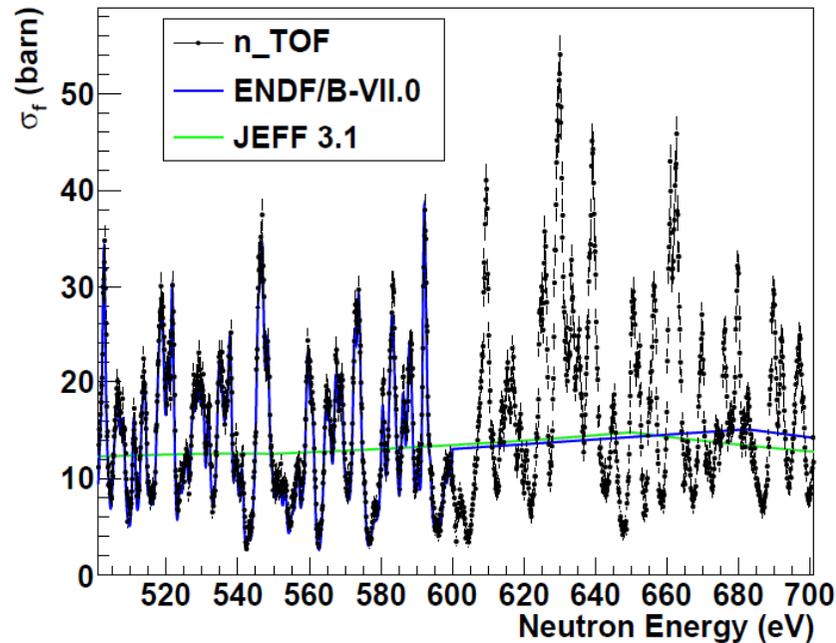
Isotopi misurati (2003-2004):

^{209}Bi , ^{235}U , ^{238}U}	.....	standard
^{232}Th}	.....	analisi dati (IN2P3)
^{233}U}	.....	preparazione (INFN)
^{237}Np}	.....	analisi dati (IN2P3)
$^{241,243}\text{Am}$	.....	analisi dati (INFN)
^{245}Cm}	.....	analisi dati (INFN)

M. Calviani et al., NIM A 594, 220 (2008)

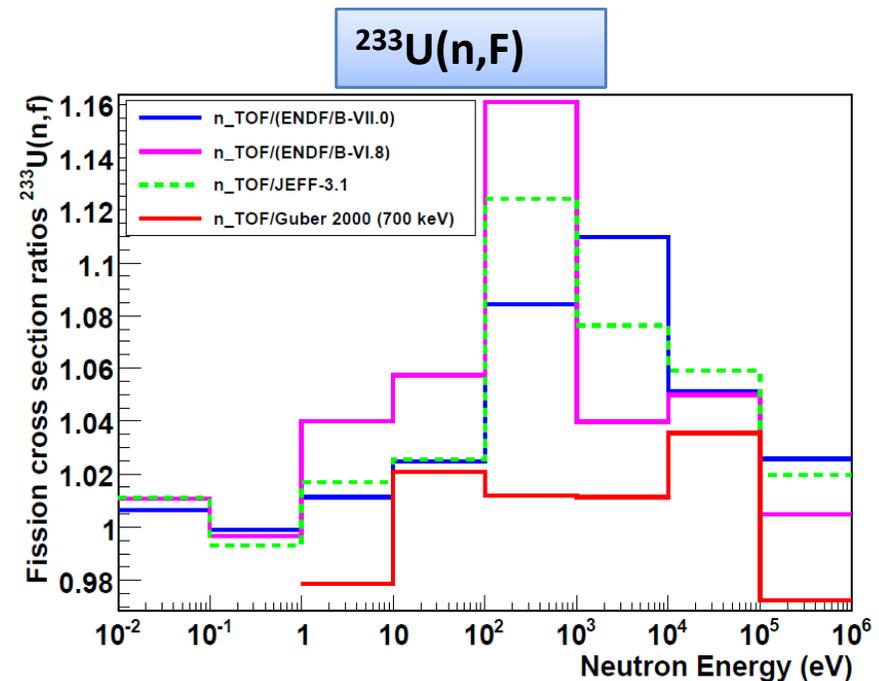


La reazione $^{233}\text{U}(n,f)$



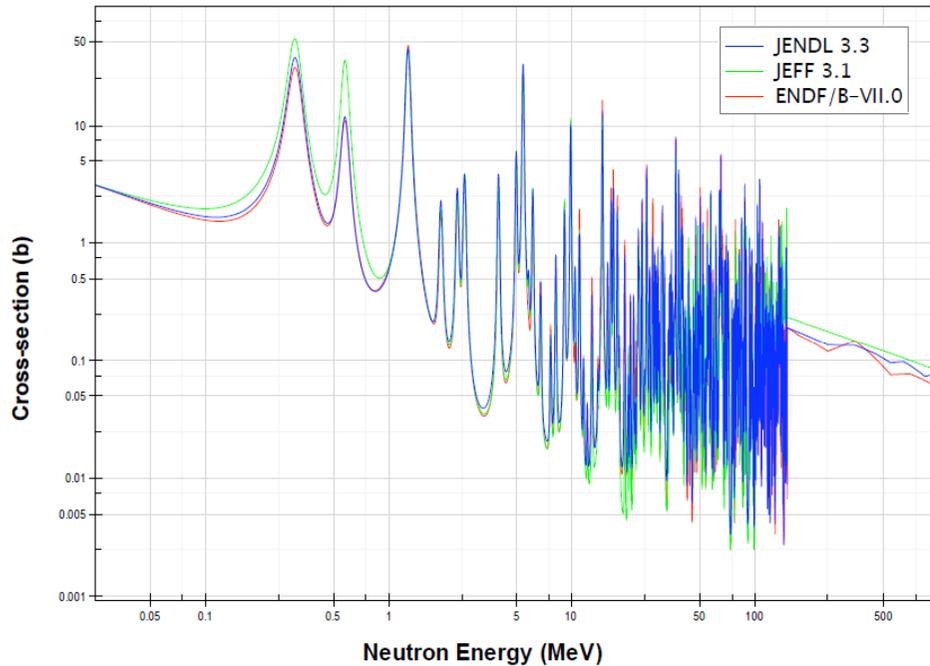
- Grazie alle caratteristiche di n_TOF, raggiunta **accuratezza** $\sim 3\%$.
- Dimostrata inattendibilità delle librerie (nuove valutazioni sono necessarie).

- Misura **simultanea** della sezione d'urto in un largo range energetico (dal termico fino a 500 MeV).
- **Risonanze** risolte fino a 10 keV (contro i 600 eV del passato) !!



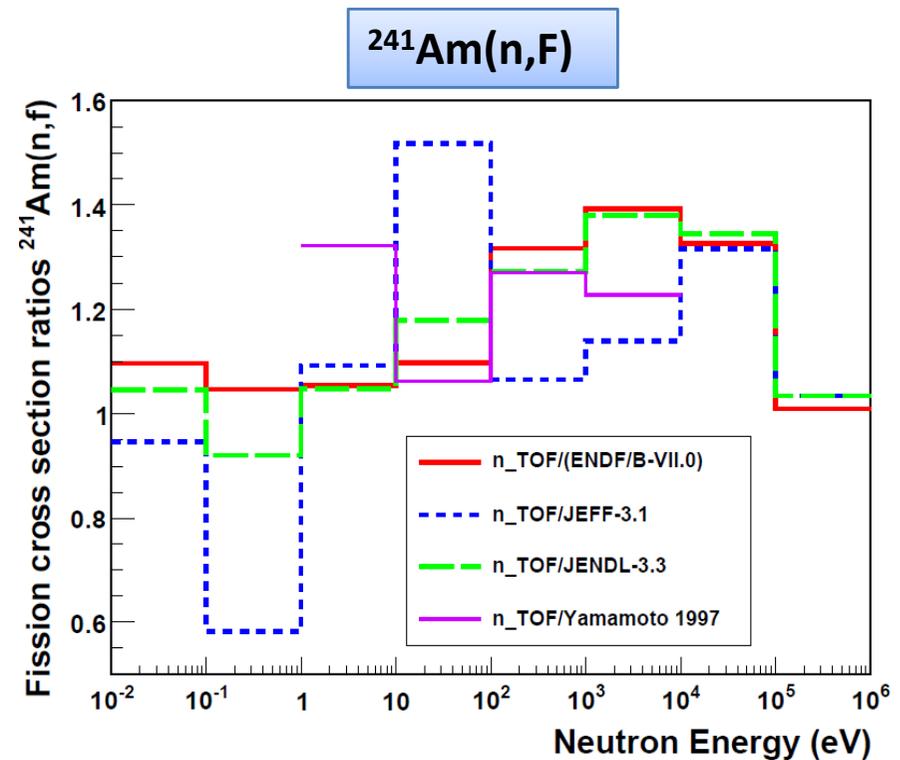
M. Calviani et al., **sub. to Phys. Rev. C**

La reazione $^{241}\text{Am}(n,f)$

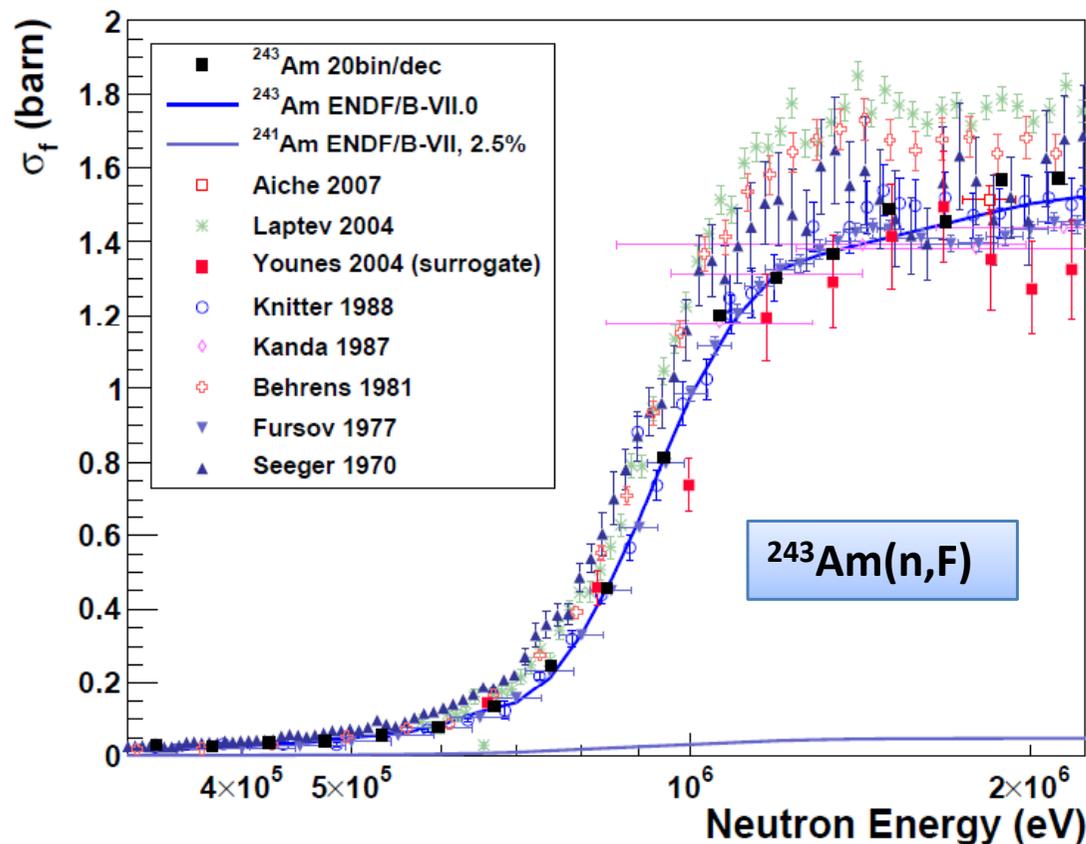


- Grosse discrepanze fra diversi databases (fino al 40 % !!!).
- Misura molto difficile per via della radioattività del bersaglio (200 MBq)

- Accuratezza del 5-10 %
- Il database più attendibile a bassa energia è ENDF-B/VII.0
- Tutti I database sottostimano la sezione d'urto da 100 eV a 100 keV (range importante per I reattori veloci)



Sezione d'urto di fissione per gli attinidi minori



- Risolta una “long-standing discrepancy” (del 15 %)
- I dati di n_TOF confermano le valutazioni, e smentiscono dati precedenti (anche recenti, 2004).

Annuncio

Per chi vuole saperne di più su n_TOF (e attività collegate)



“The n_TOF Spring School”

Galileo Galilei Institute for Theoretical Physics,

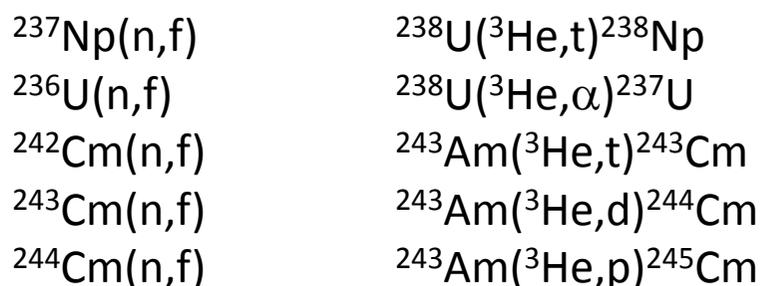
Arcetri, 25 - 29 Marzo 2009

http://nds121.iaea.org:80/alberto/n_TOF/wiki/index.php/Activities:SpringSchool09

Il metodo delle “surrogate reactions”

Alcune sezioni d'urto neutroniche (di fissione) **non possono essere misurate direttamente** perché bersagli non sono disponibili (radioattività elevata, alte contaminazioni, piccole quantità disponibili).

Possibile studiarle attraverso reazioni surrogate: reazioni indotte da particelle cariche, che portano allo **stesso nucleo composto**:



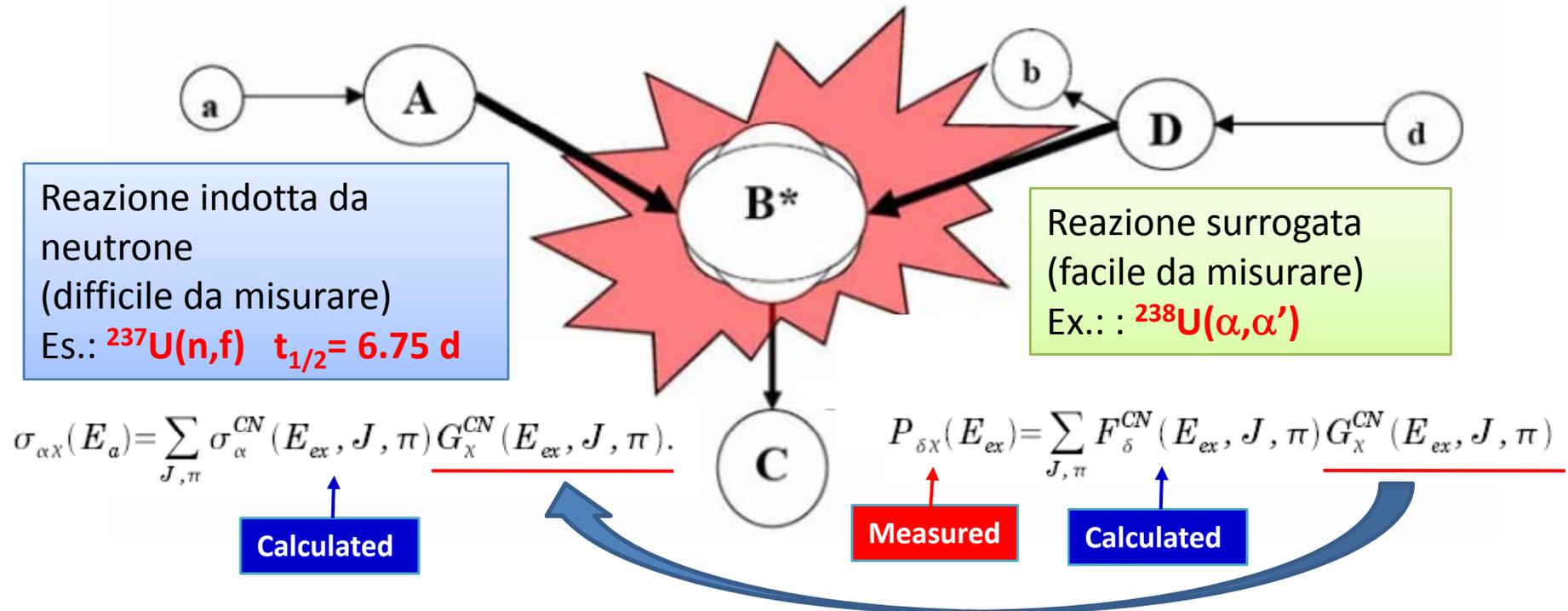
....

Problema principale associato al **momento angolare** del nucleo composto, che nelle reazioni surrogate può essere notevolmente diverso dalle reazioni indotte da neutroni.

Necessario applicare **correzioni con modelli**.

In alcuni casi, **l'unica possibilità** di stimare le sezioni d'urto di fissione.

The surrogate method



Una reazione surrogata porta alla formazione dello **stesso Nucleo Composto** della reazione indotta da neutroni.

Assunzione di base: la **formazione** e **decadimento** del CN sono **indipendenti** fra loro.

In una reazione surrogata, il Nucleo Composto è selezionato dalla particella uscente (b) in coincidenza con i prodotti del decadimento del CN.

Conclusioni

Reattori di nuova generazione (Gen IV e ADS) risolverebbero molti problemi dei reattori attuali (Gen II e III), in particolare quello delle scorie.

Reattori veloci permettono di “riutilizzare” (bruciandole) una grossa parte delle scorie radioattive (in particolare attinidi minori quali Np, Am, Cm).

C'è un grosso sforzo internazionale per lo studio di fattibilità e progettazione dei Gen IV, con forze che si stanno via via aggregando (compresa la EC, nel VII FP).

Esiste la necessità di migliorare i dati nucleari su numerosi isotopi (attinidi minori, LLFF, materiale strutturale), al livello di qualche percento di incertezza.

Necessario migliorare le facilities per neutroni, ottimizzare le tecniche sperimentali, raffinare le teorie. Aumentare le sinergie fra i diversi campi.

Sforzo immane, ma necessario.



**Fare ricerca oggi, per prepararsi
ai bisogni energetici del futuro**

Grazie per l'attenzione