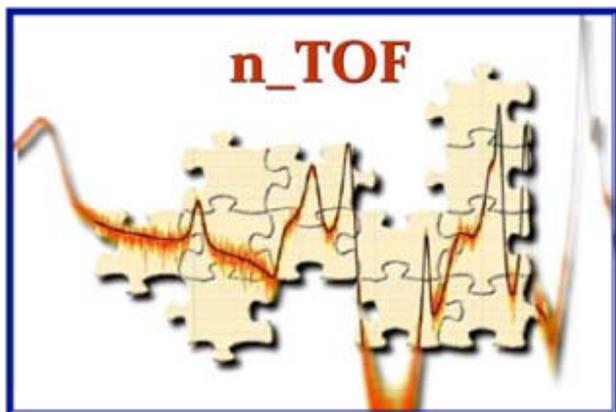


Fisica nucleare per i reattori di IV Generazione

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



N. Colonna
INFN - Sezione di Bari



Outline

- **Dati nucleari necessari per Gen IV**
- **I fasci di neutroni nel mondo**
- **La facility n_TOF al CERN**
- **Recenti risultati ad n_TOF**
- **Conclusione**

I dati nucleari per i reattori di nuova generazione

L'industria nucleare chiede continuamente **dati nucleari più accurati** (e stima delle incertezze associate), sia per la progettazione dei nuovi reattori, che per migliorare l'efficienza e la sicurezza di quelli odierni.

Si stima che dati migliori porterebbero **benefici economici** dell'ordine di centinaia di milioni di dollari all'anno nella gestione dei reattori nucleari.

Dati nucleari sono richiesti, per reattori presenti e futuri, al fine di:

- operare delle scelte nella **progettazione**
- ottimizzare la **sicurezza**
- evitare scelte ingiustificatamente **conservative**
- minimizzare gli **investimenti**

Per la progettazione dei reattori di nuova generazione, necessarie sezioni d'urto neutroniche su un gran numero di isotopi.



- **Combustibile nucleare**
Th, U, Pu, Np, Am, Cm (n,f), (n,γ) ...
- **Prodotti di fissione (anche "neutron poison")**
 ^{99}Tc , ^{103}Rh , ^{135}Xe , ^{135}Cs , ^{149}Sm (n,γ)
- **Materiale strutturale e di raffreddamento**
Fe, Cr, Ni, Zr, Pb, Na, ... tutte

I dati nucleari per i reattori di nuova generazione

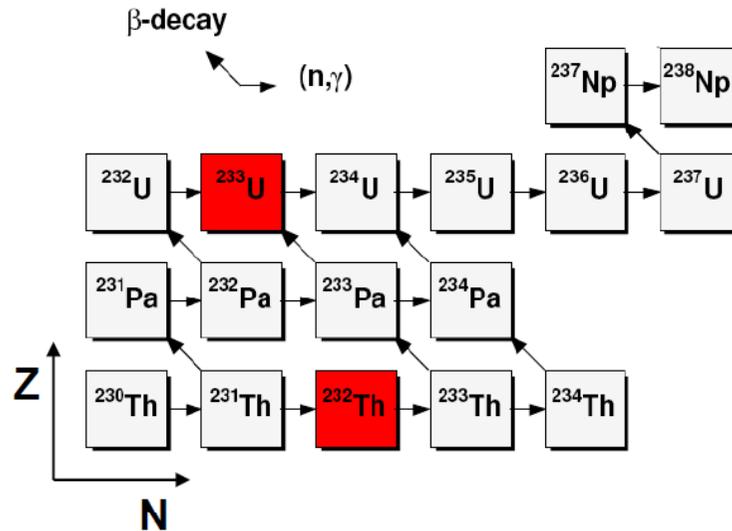
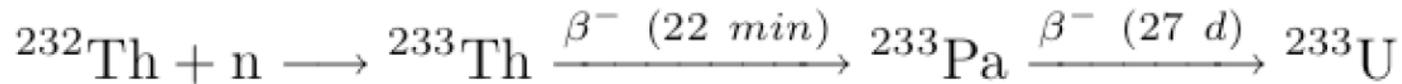
Dati nucleari necessari per i reattori:

- **sezioni d'urto** su tutte le reazioni possibili in un reattore (cattura, fissione, inelastiche)
- **molteplicità e spettro energetico** dei neutroni
- **neutroni ritardati** (difficili da misurare)
- distribuzione di **massa dei frammenti** di fissione
- decadimenti beta

I dati attualmente esistenti riguardano perlopiù reattori termici a U/Pu. Necessario migliorare l'accuratezza dei dati per:

- **energie** dei neutroni **più elevate** (reattori veloci)
- **nuovi isotopi** che entrano nel ciclo del combustibile (scorie, in particolare attinidi minori)
- nuovo ciclo di combustibile **(Th/U)**

Il ciclo di combustibile Th/U



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

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

Importante le sezioni d'urto di cattura e fissione del ${}^{233}\text{Pa}$, molto difficile da misurare direttamente.

I dati nucleari

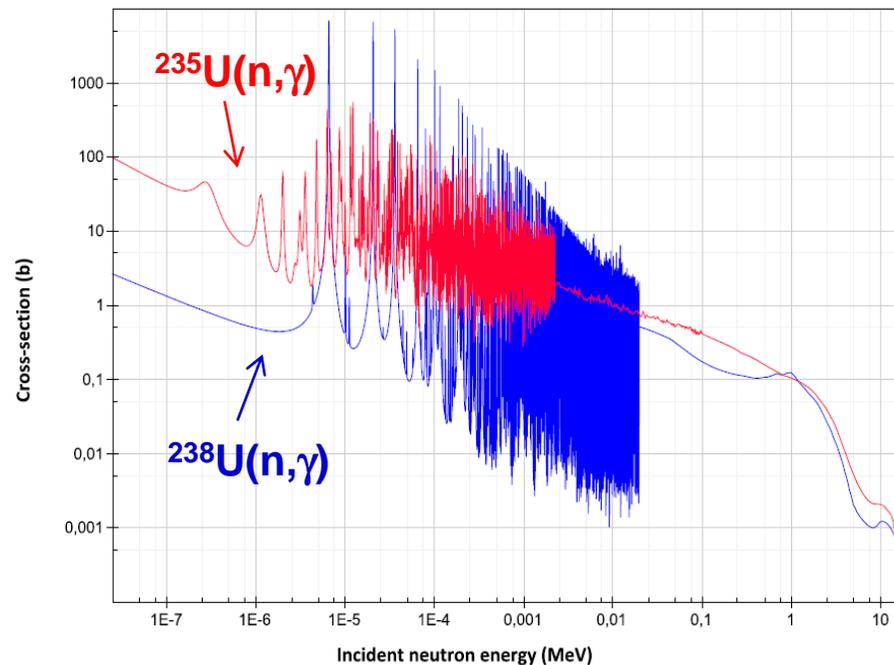
Per le reazioni indotte da neutroni, **risultati sperimentali** disponibili in un file:

- nome: **EXFOR** (Experimental nuclear reaction data)
- a cura di: Nuclear Data Centers Network, coordinato dalla IAEA
- sito web: www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm (molti mirrors)

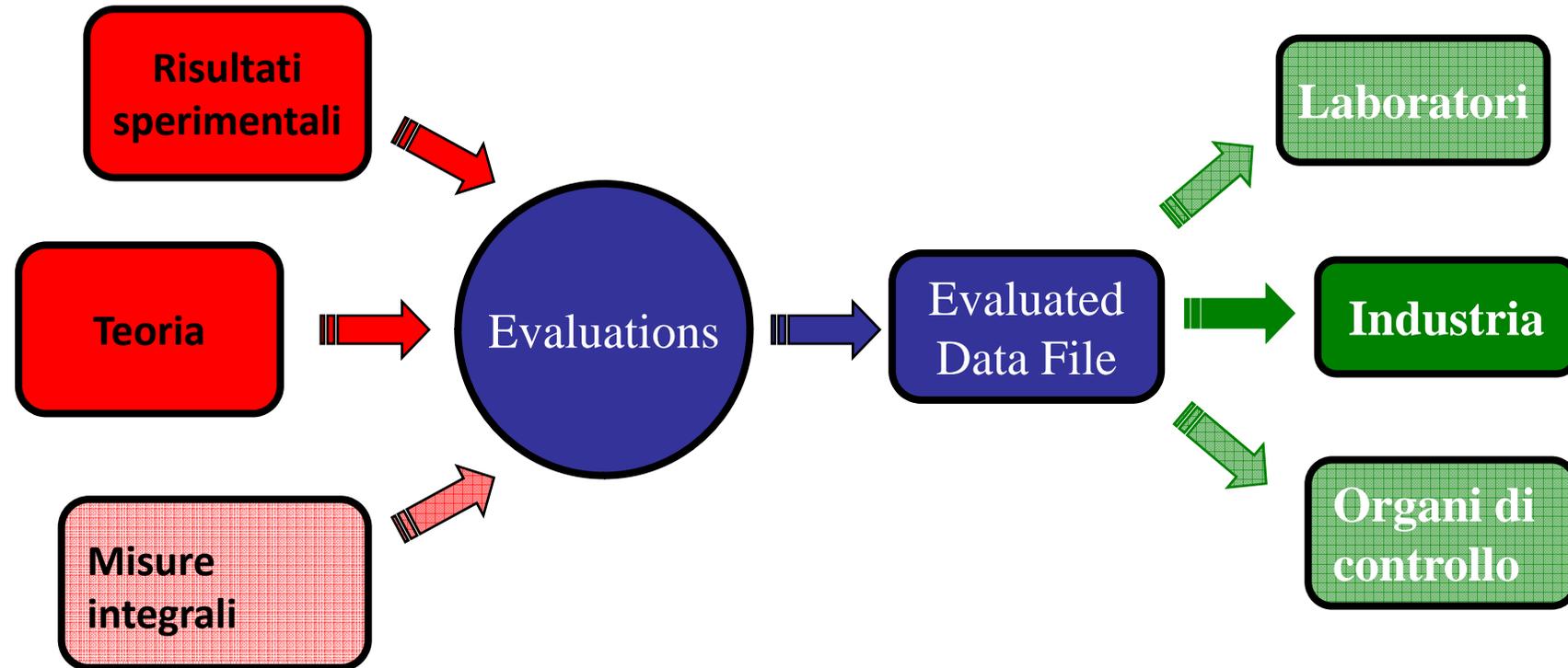
I vari risultati sperimentali sono combinati, fra loro e con teorie, in un processo di “nuclear data evaluation”.

Compilazione delle sezioni d’urto raccomandate, in **“Evaluated data files”** (o libraries):

- ENDF/B Stati Uniti
- JEFF Europa
- JENDL Giappone
- BROND Russia
- CENDL Cina
- JENDL-AC Giappone - attinidi



I database di sezioni d'urto



Richiesta sforzo sinergico in vari campi per:

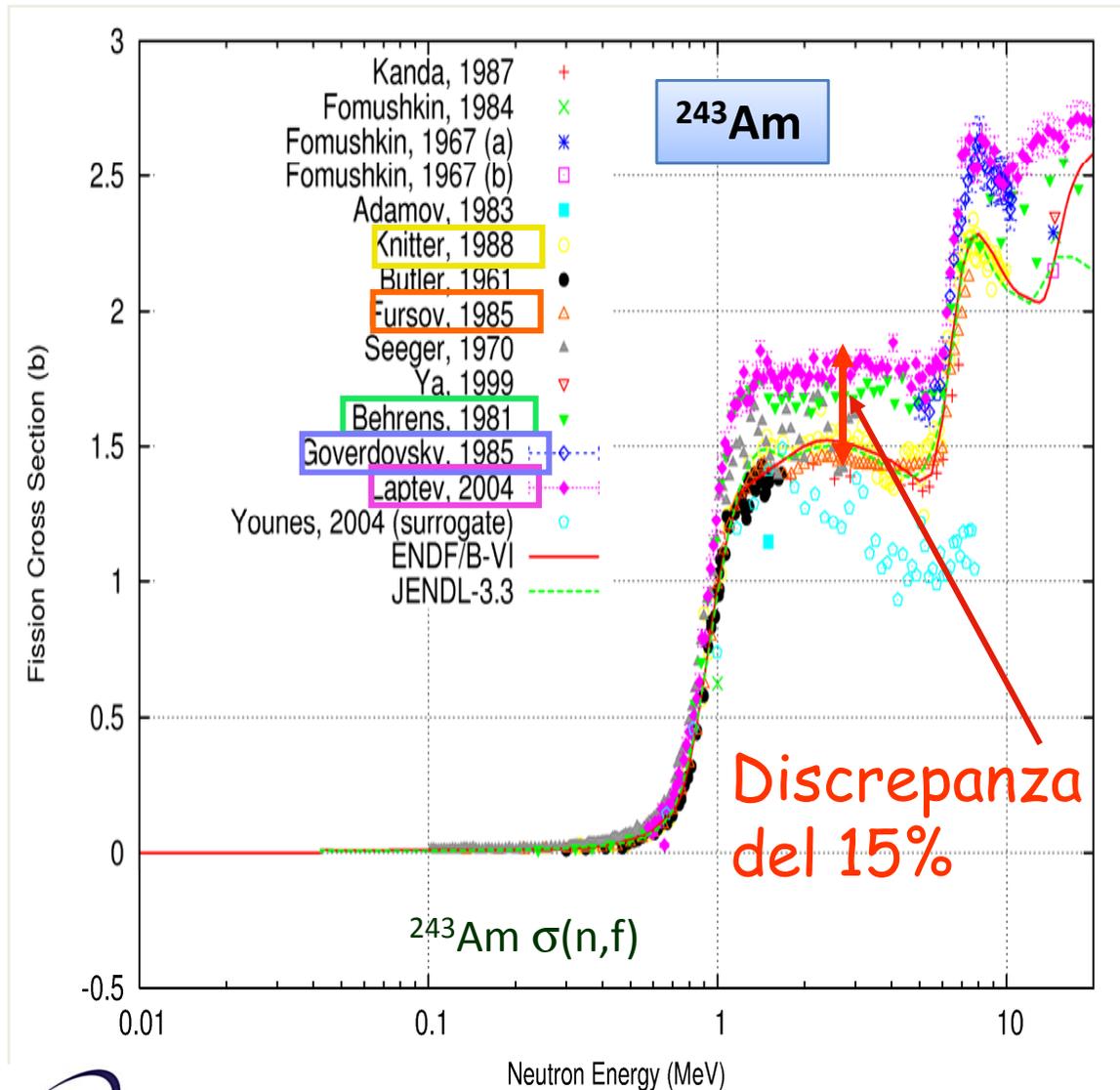
- misure di sezioni d'urto ad **alta accuratezza**
- **sviluppo di modelli nucleari** più attendibili (soprattutto per la fissione)
- data evaluation, analisi delle covarianze, **aggiornamento librerie**
- validazione dei risultati (esperimenti integrali nei reattori)

Accuratezze presenti e richieste per la progettazione dei reattori veloci

		Intervallo energia	Accuratezza presente (%)	Accuratezza richiesta (%)
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

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.

Necessari nuovi dati attendibili per fornire una risposta chiara sul problema.

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). **Dati sperimentali innattendibili.**

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, molti dei quali radioattivi.

Lista delle richieste continuamente aggiornata da vari organismi internazionali. Ad esempio, la Nuclear Energy Agency (NEA-OECD) pubblica un report periodico: **THE HIGH PRIORITY NUCLEAR DATA REQUEST LIST.**



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

I dati nucleari

Attualmente in corso nel mondo una notevole attività di **raccolta dei dati** necessari per i reattori di IV Generazione, nonché per la compilazione di **“evaluations”** più accurate. Attività di ricerca supportata da diversi organismi nazionali ed internazionali.

La **Commissione Europea** incentiva e finanzia ricerca in Fisica Nucleare applicata alla realizzazione di reattori innovativi (EURATOM).

FP VII EURATOM

Topic: Fission-2009-2.3.2: Improved nuclear data for advanced reactor systems.

The combination of advanced simulation systems and more precise nuclear data will allow optimising the use of and need for experimental and demonstration facilities in the design and deployment of new reactors. A concerted effort including new nuclear data measurements, dedicated benchmarks (i.e. integral experiments) and improved evaluation and modelling is needed in order to achieve the required accuracies. **The project shall aim to obtain high precision nuclear data for the major actinides present in advanced reactor fuels**, to reduce uncertainties in new isotopes in closed cycles with waste minimisation and to better assess the uncertainties and correlations in their evaluation.

Le misure di sezioni d'urto

Le misure di sezioni d'urto sono affette da numerose incertezze:

- **massa, uniformità e purezza** dei bersagli
- **efficienza di rivelazione**
- **background** e contaminazione del fascio di neutroni

Per la misura di isotopi radioattivi, problemi aggiuntivi:

- elevato **background** “naturale” dovuto alla radioattività del bersaglio
- disponibilità di **bersagli adeguati** (problemi di radioprotezione, separazione isotopica, 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**.

Dove fare le misure

Per le applicazioni ai reattori (presenti e futuri) è fondamentale misurare sezioni d'urto neutroniche in un **largo intervallo di energia**, dal termico fino a molte decine di MeV, con **alta accuratezza**.

Importante misurare le **risonanze** (per stima del self-absorption).

Neutroni termici

- Reattori
- Time of Flight facilities

Regione delle risonanze risolte

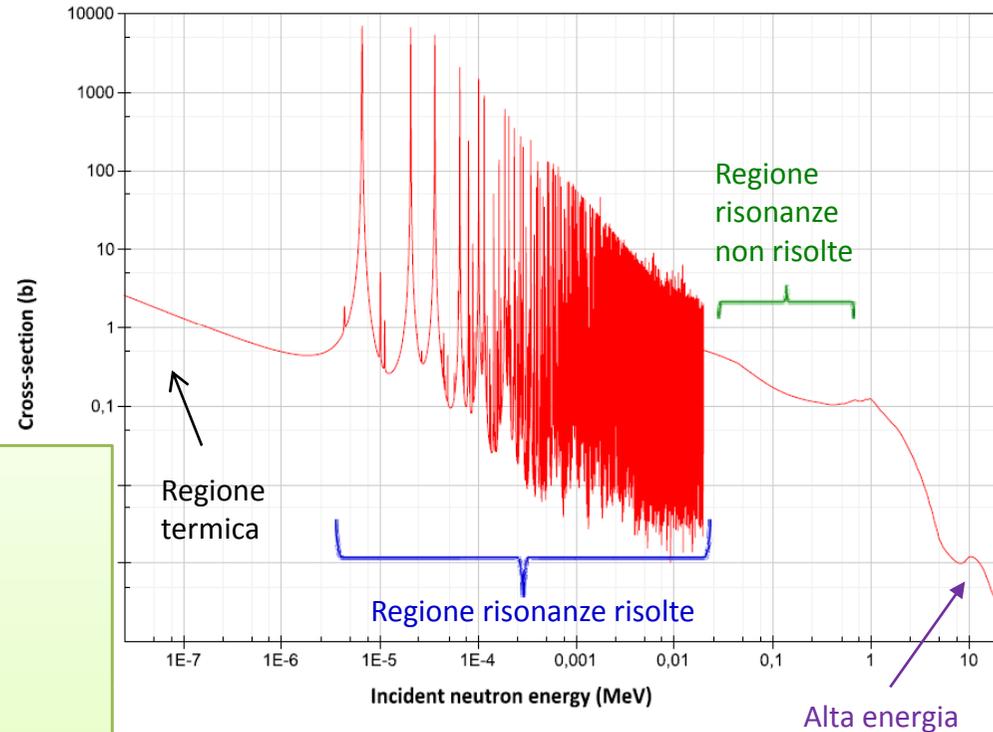
- TOF facilities (fotonucleari e spallazione)

Regione delle risonanze non risolte

- TOF facilities (fotonucleari e spallazione)
- Fasci di neutroni monoenergetici da acceleratori di bassa energia

Alta energia (> 20 MeV)

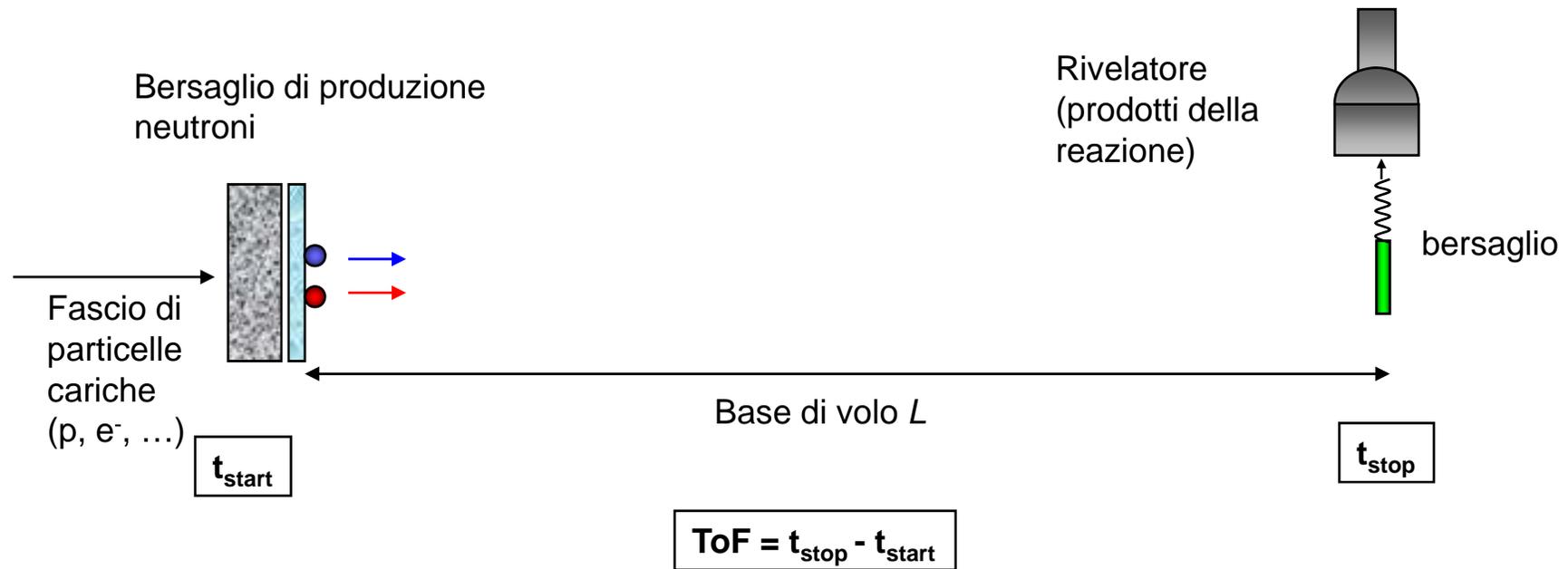
- TOF facilities (sorgenti di spallazione)
- Fasci di neutroni da ciclotrone



Nel mondo esistono diverse facilities per neutroni, con caratteristiche diverse.

Numerosi gruppi teorici (evaluators) collegati.

La tecnica del tempo di volo



$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 = \alpha^2 \cdot \frac{L^2}{t^2}$$

$$E_n = E_{\text{tot}} - mc^2 = c^2p^2 + m^2c^4 - mc^2 = mc^2(\gamma - 1) \quad \gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$$

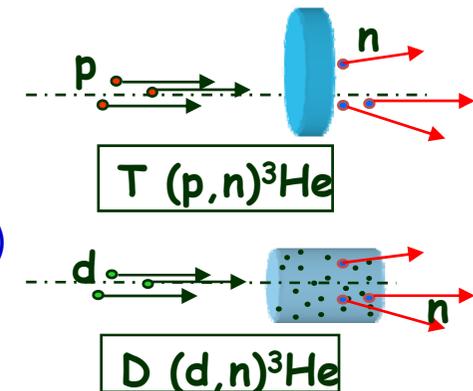
I fasci di neutroni

Fasci di neutroni termici:

- Flussi elevati disponibili ai **reattori nucleari**
- Prodotti con **acceleratori** (vedi sotto), e moderati

Sorgenti di neutroni monoenergetici:

- tipicamente si usano reazioni con **protoni o deutoni**
 - $D(d,n)$, $T(p,n)$, $T(d,n)$, ${}^7\text{Li}(p,n)$, ${}^9\text{Be}(p,n)$, ec...,
- necessari acceleratori di energia medio-bassa (qualche MeV, tipo VdG)
- **l'energia dei neutroni dipende dall'energia del fascio primario**
- In questo modo si possono produrre neutroni fino a **20 MeV**



Facilities per tempi di volo (ToF):

- Largo spettro energetico
- richiede acceleratori impulsati
- Base di volo trade-off fra risoluzione energetica e flusso

Time-of-flight facilities

Due tipi principali di facilities per tempi di volo

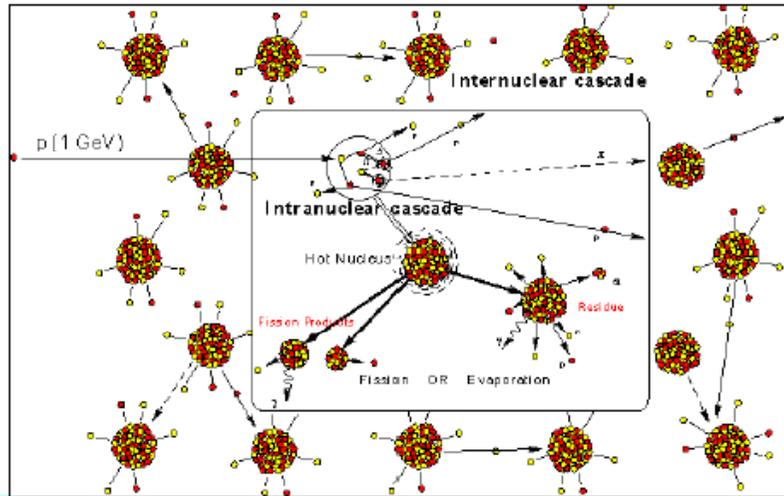
Fasci di neutroni prodotti con fasci di **elettroni** di alta intensità:

- gli elettroni producono raggi γ per bremsstrahlung
- i raggi γ producono neutroni attraverso le reazioni (γ, n) (reazioni fotonucleari)
- utilizzati bersagli ad alto Z (per esempio U)
- spettro di neutroni da termico fino a 20 MeV

Sorgenti di neutroni da spallazione:

- neutroni prodotti da fasci di **protoni di alta energia** (GeV)
- grossi blocchi di materiale pesante usati come bersagli di spallazione
- moderazione per largo spettro energetico dei neutroni

Sorgenti di neutroni per spallazione

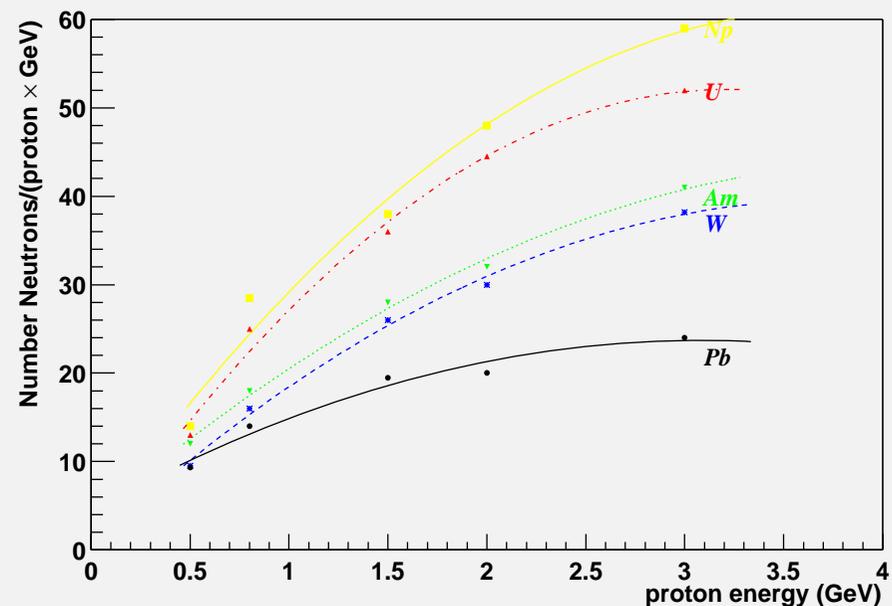


Neutroni prodotti da una serie di **reazioni nucleari** (intranuclear cascade, preequilibrio, evaporazione, etc...)

Necessita fasci di protoni di alta energia e bersagli di spallazione di grosse dimensioni.

La produzione di neutroni dipende dal **peso atomico** e dalla **densità** del materiale → preferibile materiale ad alto Z.

Dipende **dall'energia di protoni**



Fasci di neutroni prodotti con acceleratori di elettroni



ORELA (Oak Ridge Electron Linear Accelerator, Oak Ridge, Tennessee, USA):

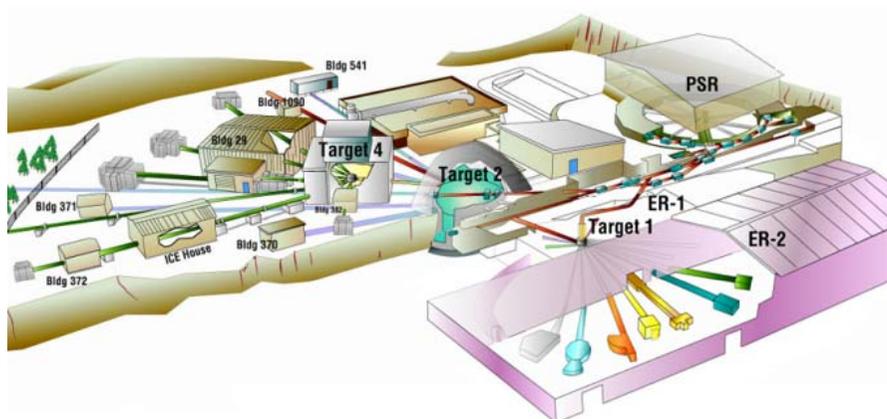
- fascio di elettroni da 180 MeV, su Ta, moderato ad acqua
- elettroni producono raggi γ per bremsstrahlung, e i raggi γ producono neutroni per reazioni fotonucleari (γ, n).
- 11 linee di fascio (distanza da 9 a 200 m)

GELINA (GEl LINear Accelerator), Geel, Belgio:

- fascio di elettroni da 140 MeV, su U, raffreddato a mercurio
- 10 linee di fascio (base di volo fino a 200 m)
- energia dei neutroni da 5 meV a 20 MeV

The Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE)

Utilizza **spallazione** di protoni da **800 MeV** su bersaglio di Tungsteno.



Due configurazioni per permettere misure in un largo spettro energetico:

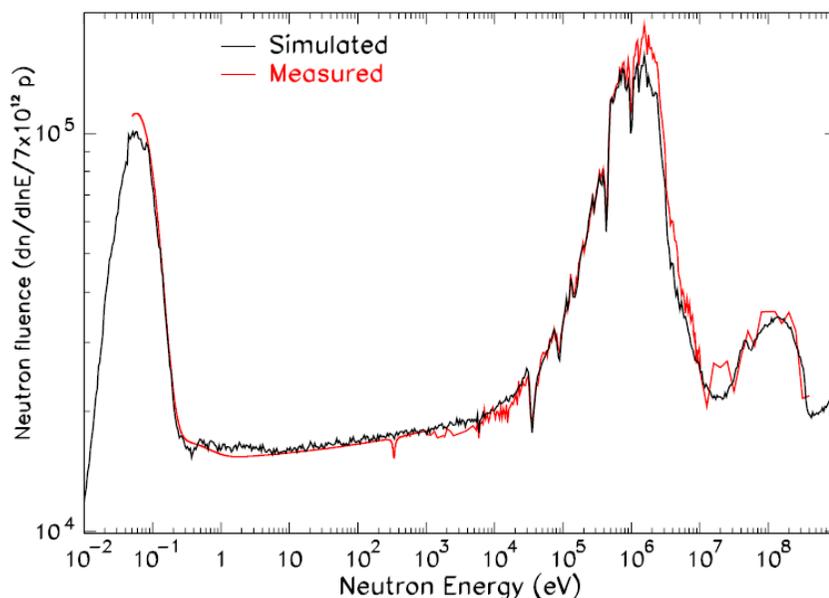
- target con moderatore per misure a bassa energia
- target senza moderatore per misure fino a 200 MeV

Moltissime misure negli ultimi anni fatte a LANSCE. Fino a poco tempo fa LANSCE era la facility per spallazione migliore al mondo (ma non l'unica, per esempio GNEIS in Russia).

Fino a quando, su idea di Rubbia, nel 2000 è stata costruita n_TOF al CERN

La facility n_TOF

n_TOF è una sorgente di **spallazione** basata su protoni da **20 GeV/c** del PS su un blocco di Piombo (prodotti 360 neutroni per ogni protone), e unica base di volo di 200 m.



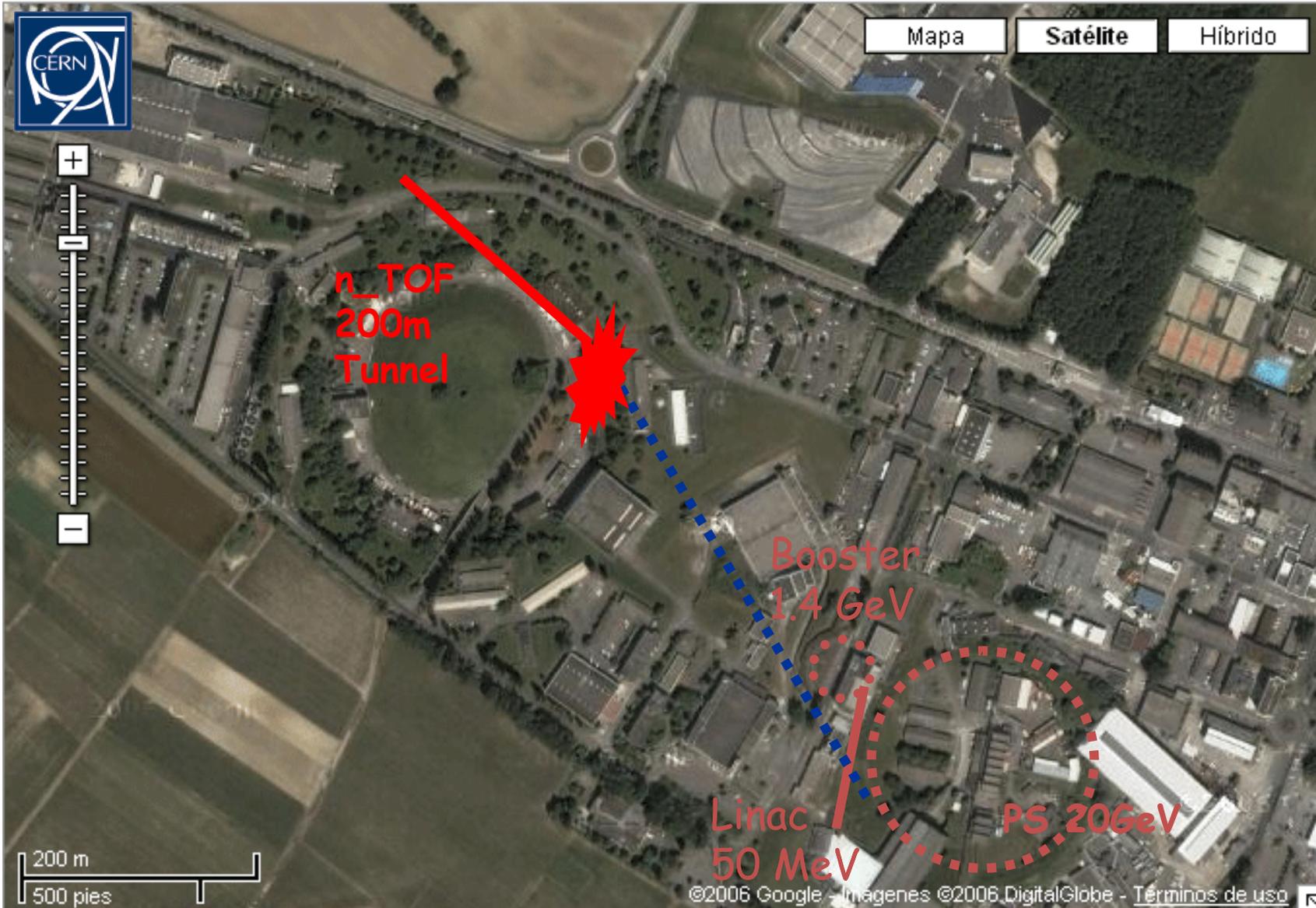
Caratteristiche principali:

- vasto **range energetico** (dal termico al 1 GeV)
- elevato **flusso istantaneo**
- elevata **risoluzione energetica** (dovuta alla grande base di volo)
- 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)

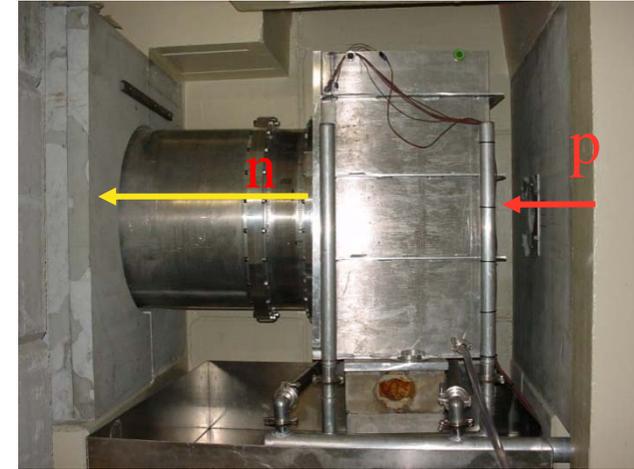
L'elevato flusso istantaneo consente misure accurate di **bersagli radioattivi**.

La facility n_TOF al CERN



Dettagli tecnici

- Bersaglio di spallazione: blocco di Pb 80x80x40 cm³
- Moderatore: 5 cm di acqua (usata anche per raffreddamento)
- Base di volo di 200 m (in un tunnel preesistente)
- Muri di ferro e cemento per schermaggio da n, γ , μ , etc...
- Magnete deflettore per particelle cariche nel fascio
- Collimatori (2 cm per la reazioni di cattura e 8 cm per la fissione)



La Collaborazione n_TOF

Collaborazione n_TOF composta da 120 ricercatori da 40 Istituti (perlopiù europei)

Technische Universitat Wien	Austria
IRMM EC-Joint Research Center, Geel	Belgio
CEA, IN2P3	Francia
FZK – Karlsruhe	Germania
Univ. Atene, Iannina, Demokritos	Grecia
Bhabha Atomic Research Center (BARC)	India
ENEA, INFN	Italia
LIP - Universidade de Coimbra, Politecnico Lisbona	Portogallo
Univ. Lodz	Polonia
Univ. Praga	Rep. Ceca
INR – Dubna, IPPE – Obninsk	Russia
CIEMAT, IFIC, USC, UC	Spagna
CERN, University of Basel	Svizzera
Univ. Notre Dame, ORNL, LANL	USA

Sezioni **INFN** coinvolte: **Bari – Bologna – LNL – Trieste** 15 ricercatori

Cofinanziamento CE: **FP5**: n-TOF-ND-ADS, **FP6**: EUROTRANS, **FP7**: ANDES



L'attività sperimentale ad n_TOF

Cattura

¹⁵¹Sm

^{204,206,207,208}Pb, ²⁰⁹Bi

^{24,25,26}Mg

^{90,91,92,94,96}Zr, ⁹³Zr

^{186,187,188}Os, ¹³⁹La

²³²Th, ^{233,234}U

²³⁷Np, ²⁴⁰Pu, ²⁴³Am

Fissione

^{233,234,235,236,238}U

²³²Th, ²⁰⁹Bi

²³⁷Np

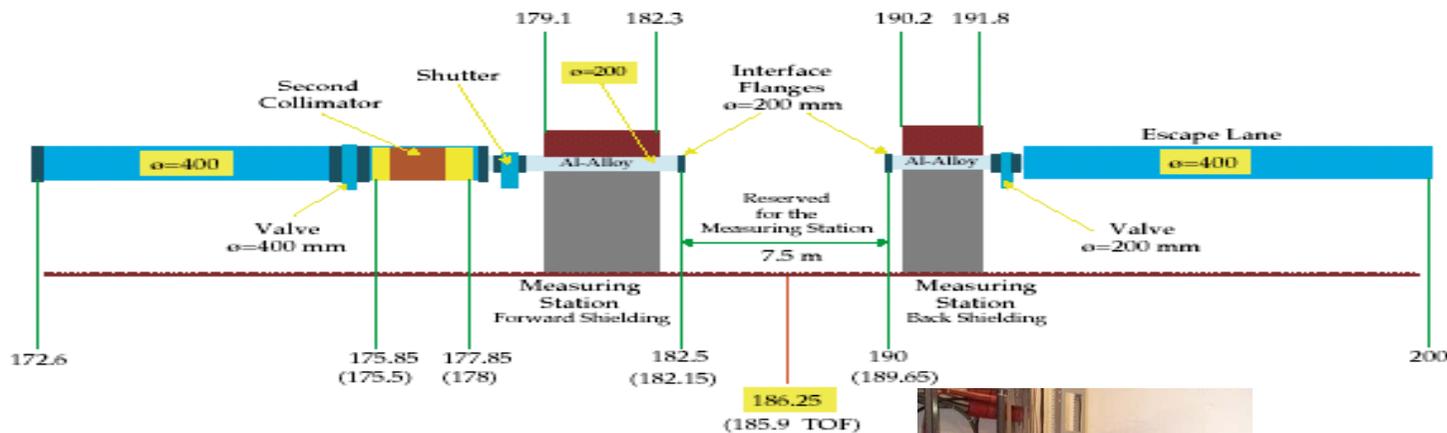
^{241,243}Am, ²⁴⁵Cm

Campagna sperimentale 2002-4

- **Misure di reazioni di cattura neutronica:**
 - **25 isotopi** (8 radioattivi)
 - Interesse anche per l'**Astrofisica**
 - Numerose pubblicazioni e risultati interessanti
- **Measure di fissione:**
 - **11 isotopi** (10 radioattivi)
 - rilevanti per il ciclo **Th/U, transmutazione e Gen IV**
 - **forte interesse** ai dati da parte delle Agenzie Atomiche Internazionali
 - risultati immediatamente disponibili attraverso normali canali (pubblicazioni, EXFOR, conference, etc...)

Gli apparati sperimentali ad n_TOF

Area sperimentale a 180 m dal bersaglio di spallazione



Monitor di flusso

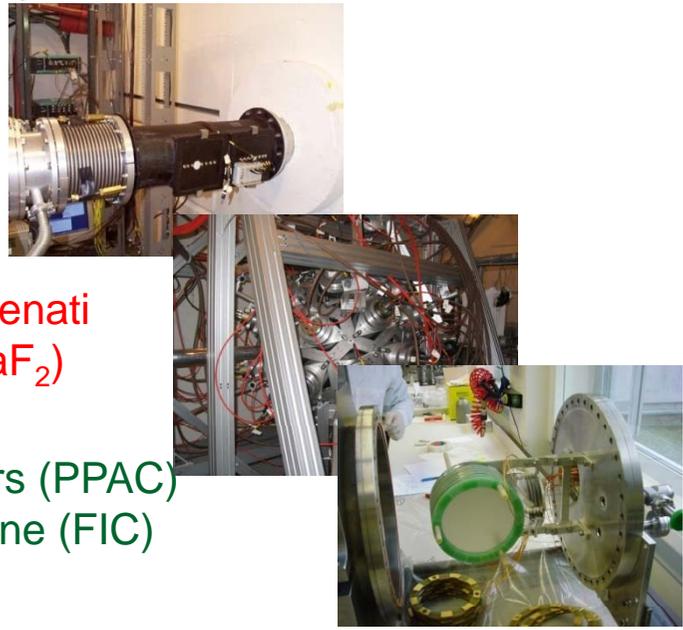
Rivelatori al silicio (SiMon)
BF₃ monitor

Rivelatori per cattura

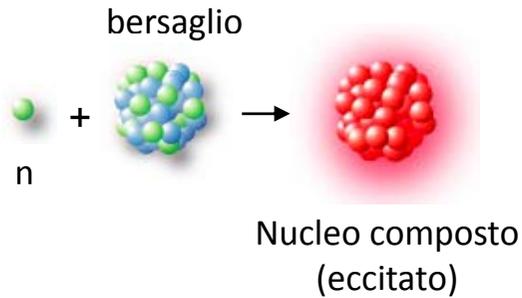
C₆D₆ scintillatori liquidi non-idrogenati
Calorimetro ad assorb. totale (BaF₂)

Rivelatori per fissione

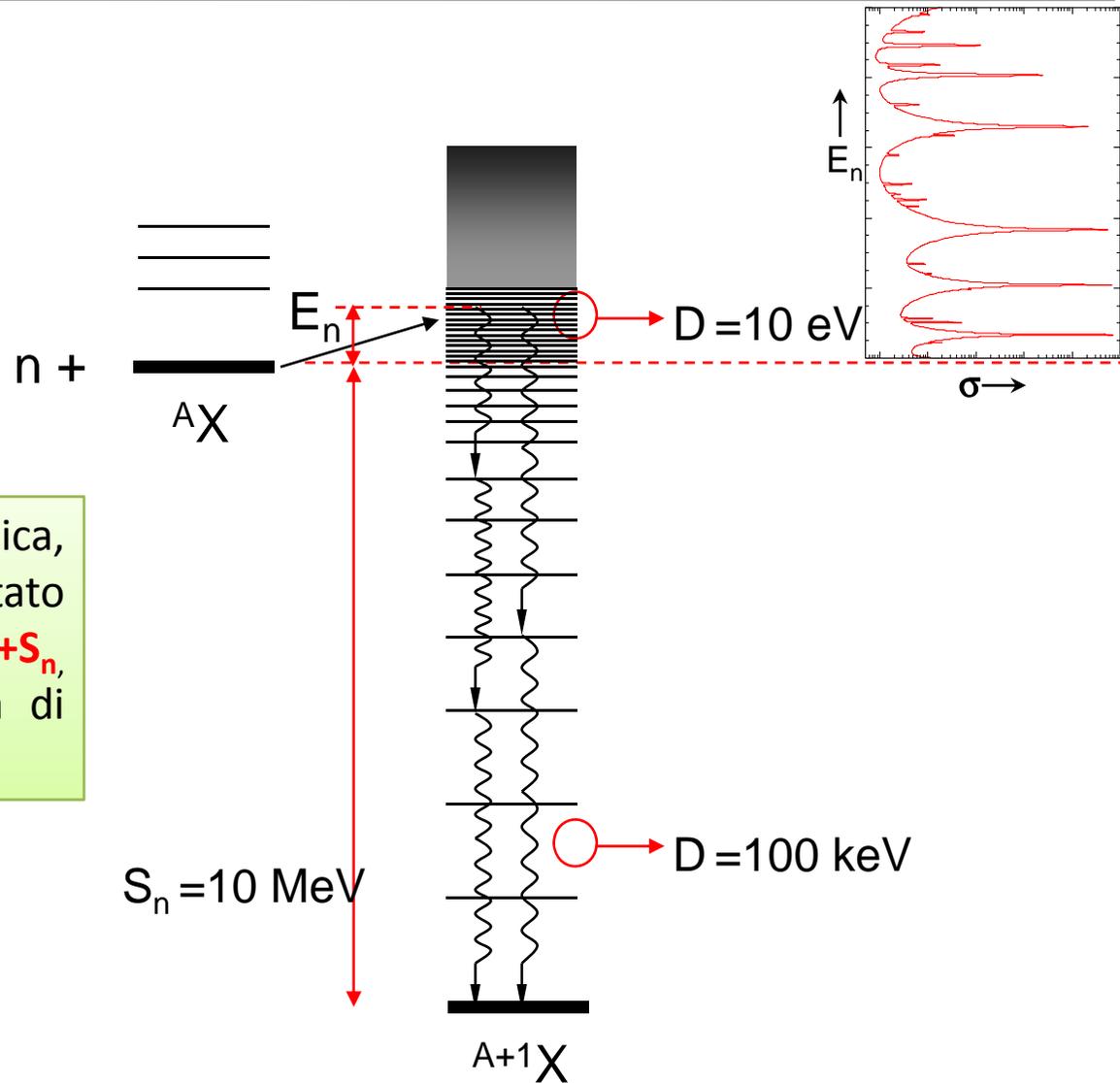
Parallel Plate Avalanche Counters (PPAC)
Camera a ionizzazione per fissione (FIC)



Le reazioni di cattura



In una reazione di cattura neutronica, si forma un nucleo composto eccitato con energia di eccitazione $E_x = E_n + S_n$, (energia del neutrone + energia di legame, $5 < S_n < 10$ MeV).



Le reazioni di cattura

Le misure delle sezioni d'urto di cattura neutronica sono effettuate **rivelando i raggi γ** emessi a seguito della **diseccitazione** del nucleo composto formato nella cattura.

Due metodi:

1. Rivelazione del singolo γ pochi rivelatori, ma bassa efficienza (da correggere)
2. Rivelazione dell'intera cascata alta efficienza, ma più complicato e costoso

1. Rivelazione del singolo γ

- basso costo
- bassa sensibilità ai neutroni
- efficienza **bassa e dipendente dalla cascata**
- richiede grosse correzioni (incertezze)
- non permette buona discriminazione del background

2. Rivelazione dell'intera cascata

- alta efficienza
- ottima discriminazione del background
- sensibilità ai neutroni
- costi
- sistemi complicati (anche per l'analisi)

Metodo calorimetrico: identifica la reazione di cattura sulla base dell'energia totale della cascata ($E_{\text{tot}} = E_n + S_n$) e della **molteplicità**.

Per rivelare l'intera cascata, è necessario avere un rivelatore che copra **l'intero angolo solido** (rivelatore a 4π), e **alta efficienza intrinseca ai raggi γ** .

Le misure di cattura con rivelatori C_6D_6

Rivelatori γ con bassa sensibilità ai neutroni: C_6D_6

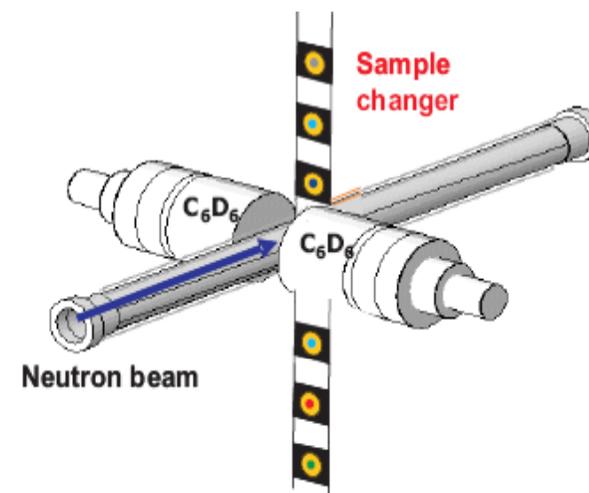
Necessarie simulazioni molto dettagliate **dell'efficienza** (MCNP, Geant3.21, Geant4)

Misure di interesse sia per applicazione ai reattori, che per Astrofisica Nucleare (processi s nella nucleosintesi stellare)



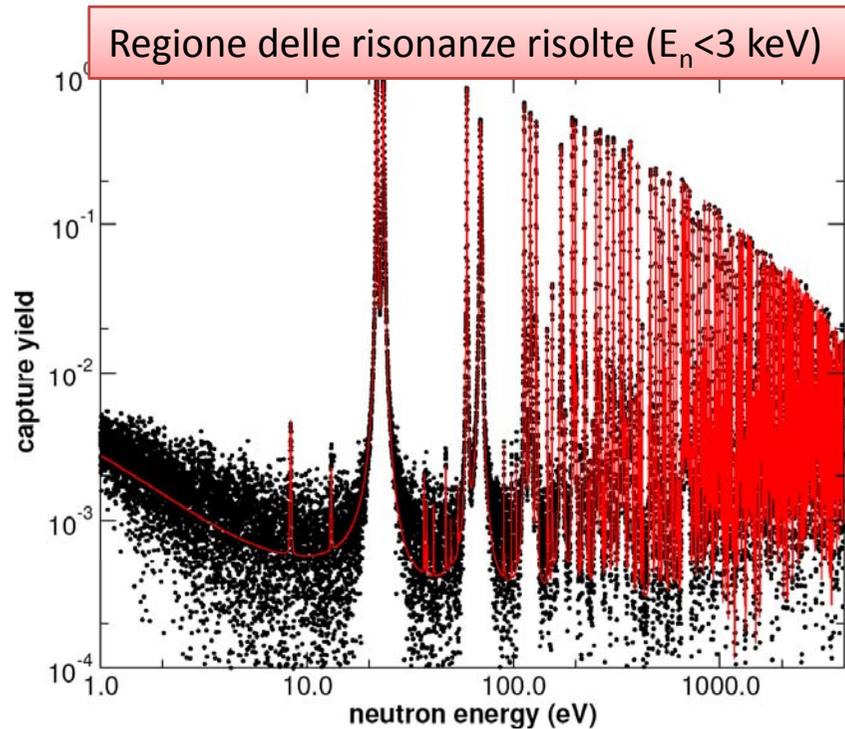
Isotopi misurati (2002-2003):

	^{151}Sm	PRL + PR C
	^{209}Bi	PR C
	$^{204,206,207,208}\text{Pb}$	PR C + PR C + PR C
	^{232}Th	PR C
	^{139}La	PR C
	$^{24,25,26}\text{Mg}$	In preparazione
	$^{186,187,188}\text{Os}$	in preparazione
	$^{90,91,92,93,94,96}\text{Zr}$	PR C

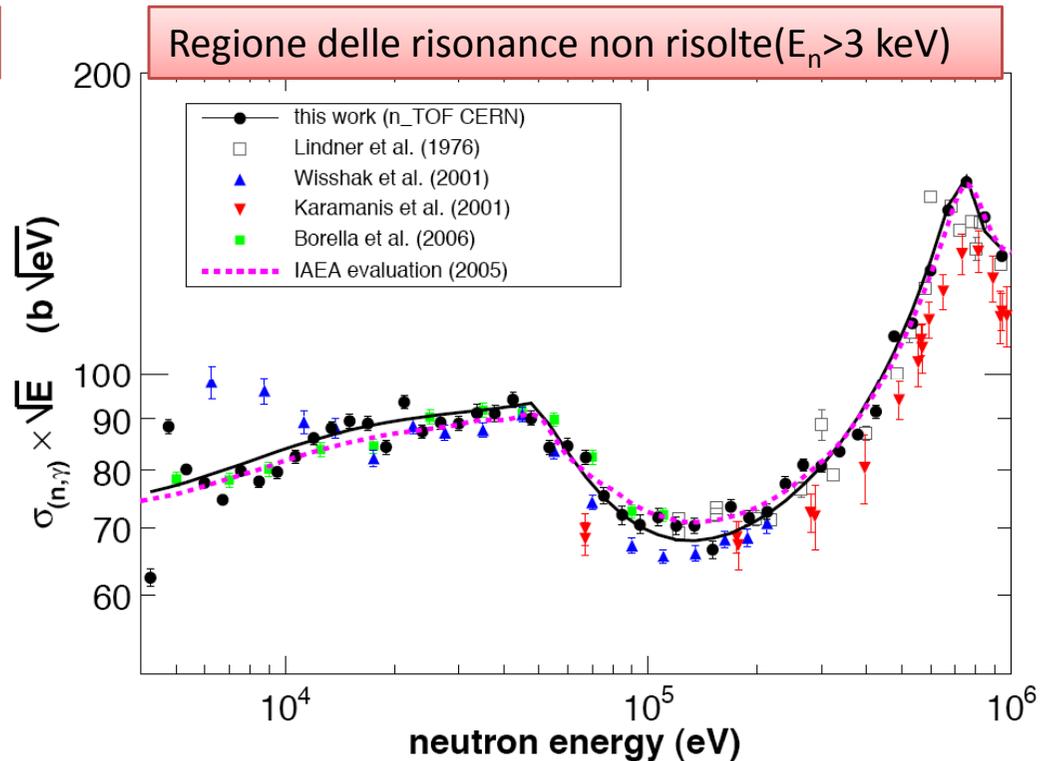


La sezione d'urto di cattura del ^{232}Th

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 India).



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

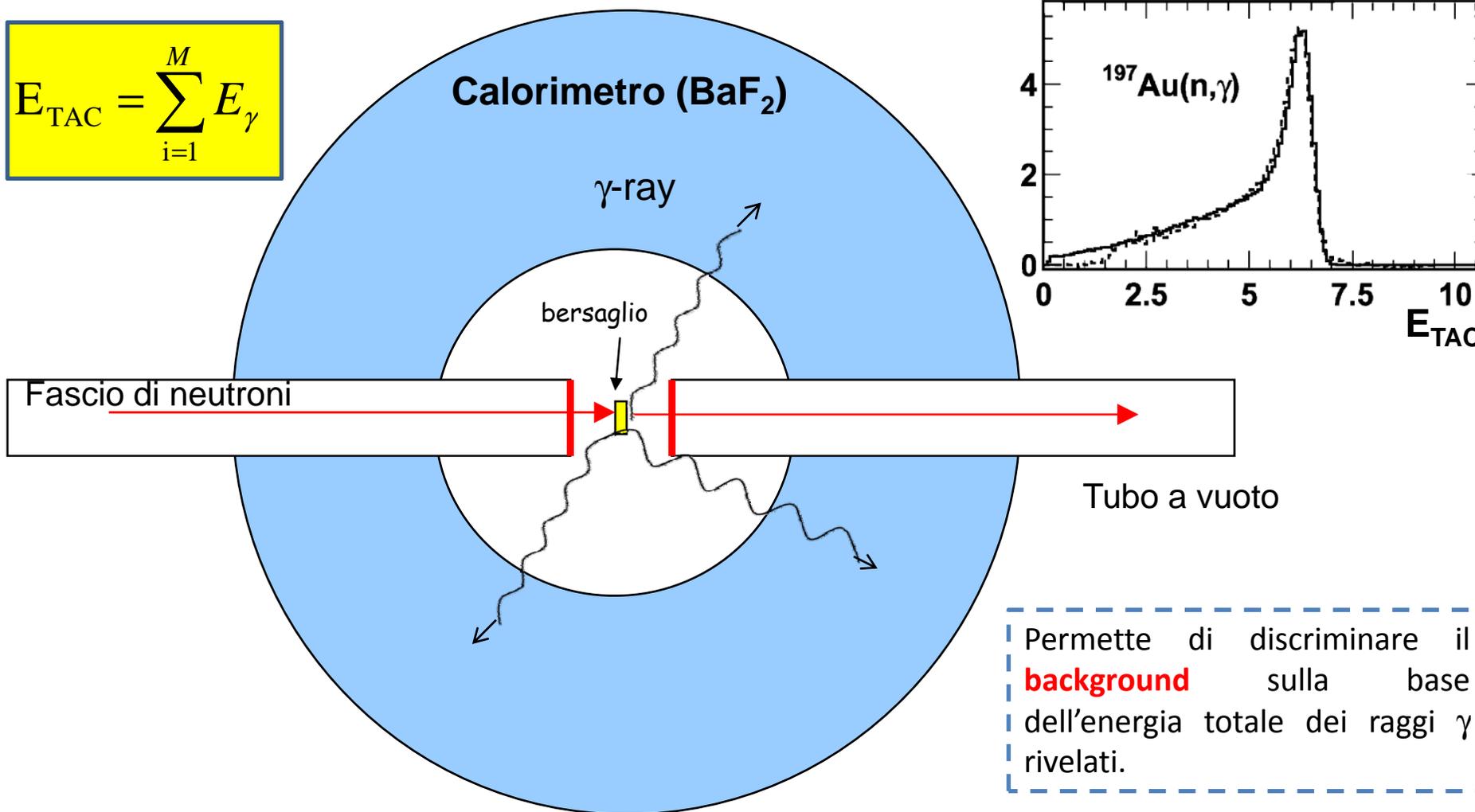


G. Aerts et al., *Phys. Rev. C* **73**, 054610 (2006)

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).

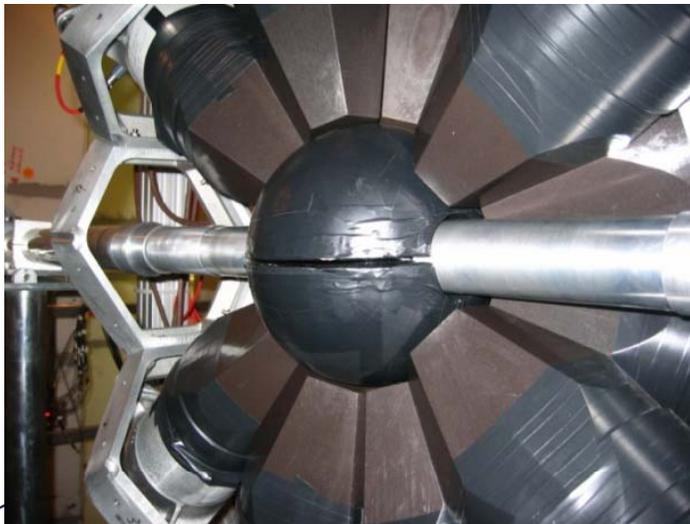
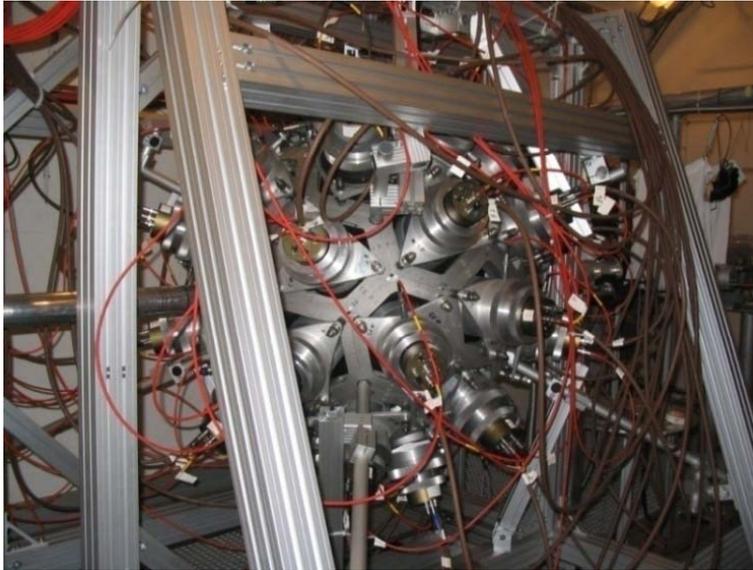
Il metodo calorimetrico

$$E_{\text{TAC}} = \sum_{i=1}^M E_{\gamma}$$



Metodo calorimetrico scelta obbligata per misure accurate di **bersagli radioattivi**

Il total absorption calorimeter (TAC)



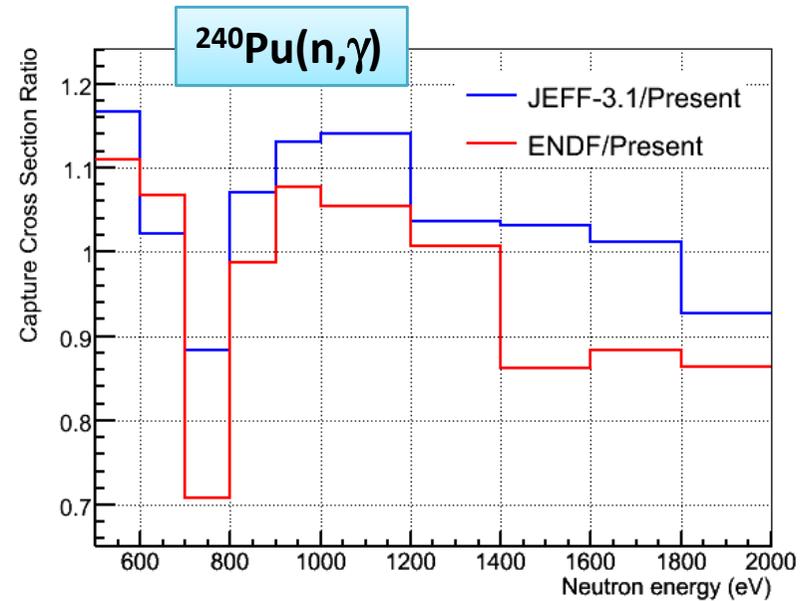
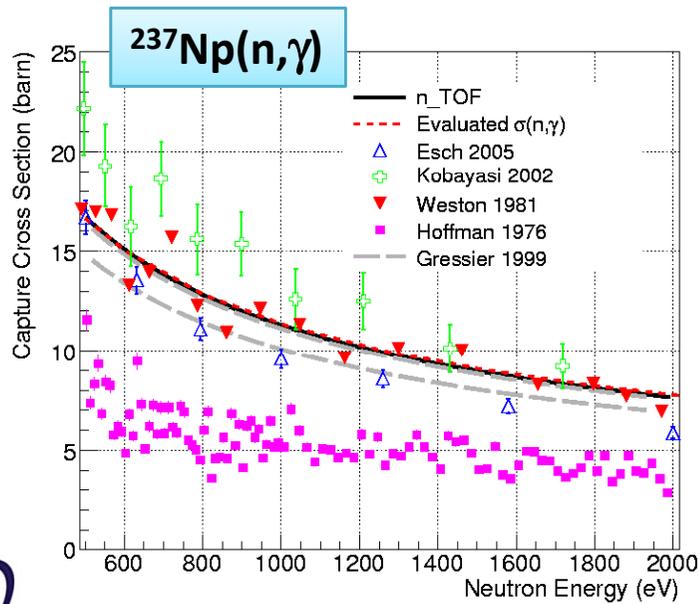
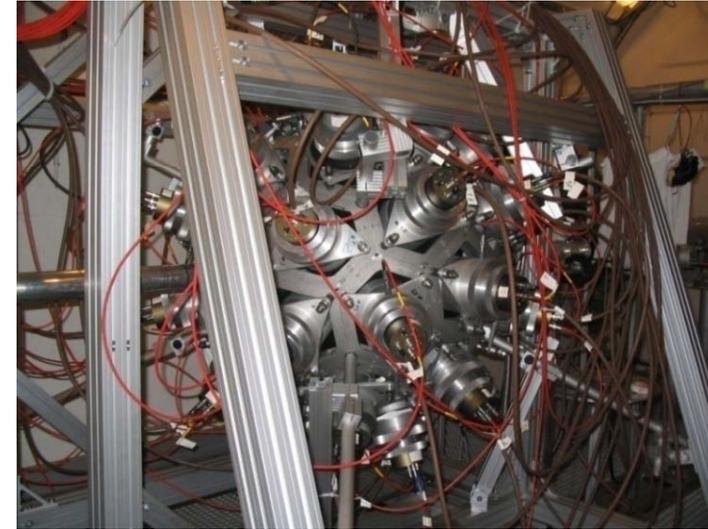
Utilizzate capsule in fibra di carbonio borata (brevetto INFN), per minimizzare la sensibilità ai neutroni.

Le misure di cattura con il calorimetro

Isotopi misurati:



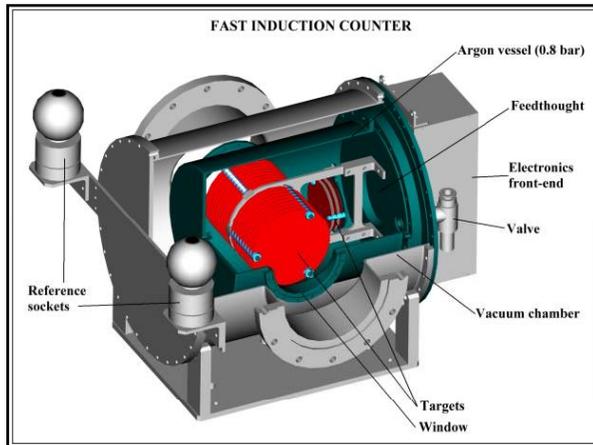
^{197}Au}	.....	standard di misura
^{234}U}	.....	ciclo Th/U
^{233}U}	.....	ciclo Th/U
^{237}Np}	.....	trasmutazione e Gen IV
^{240}Pu}	.....	trasmutazione e Gen IV
^{243}Am}	.....	trasmutazione e Gen IV



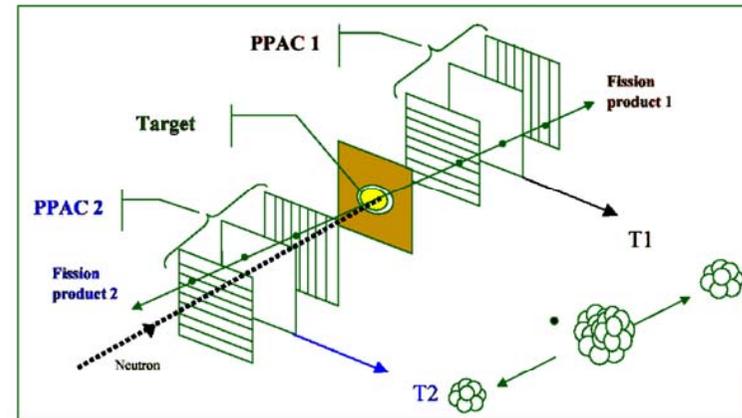
Le misure di fissione ad n_TOF

Usati due diversi rivelatori per FF

Fast Ionization Chamber



Parallel Plate avalanche counter



Isotopi misurati:

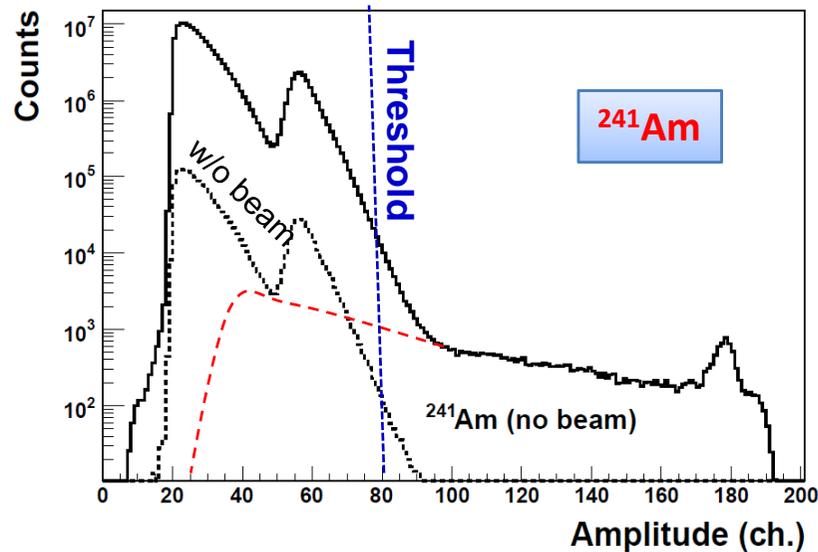
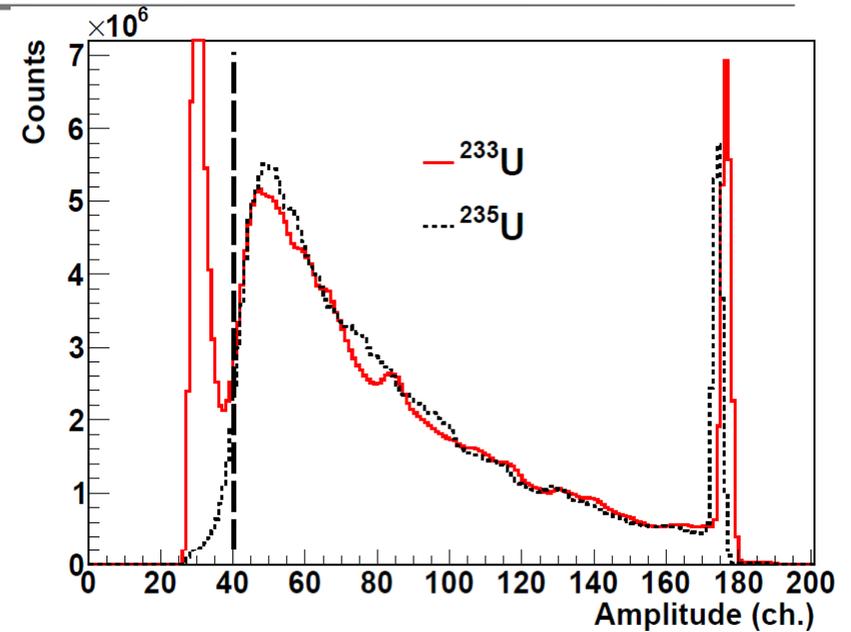


^{209}Bi , ^{235}U , ^{238}U}	.....standard
^{232}Th}	..... ciclo Th/U
^{233}U}	..... ciclo Th/U
^{237}Np}	..... trasmutazione e Gen IV
$^{241,243}\text{Am}$	..... trasmutazione e Gen IV
^{245}Cm}	..... trasmutazione e Gen IV

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

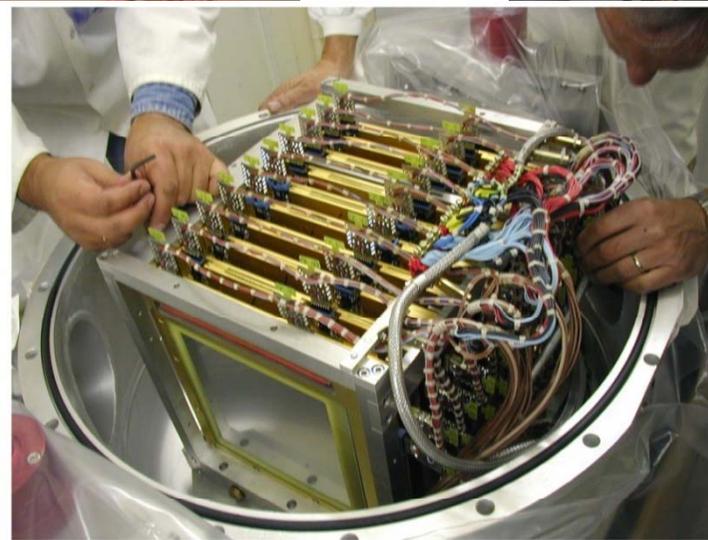
Le misure di fissione ad n_TOF

Isotope	Total mass (mg)	Uncert. (%)	Half-life	Activity
^{235}U	31.8 (/2)	1.57	7.04E8 y	0.2 kBq
^{233}U	28.8 (/4)	1.73	1.6E5 y	5 MBq
^{241}Am	2.26 (/8)	1.33	432 y	76 MBq
^{243}Am	4.8 (/8)	2.0	7370	7.4 MBq
^{245}Cm	1.71 (/4)	1.75	8500 y	0.2 GBq

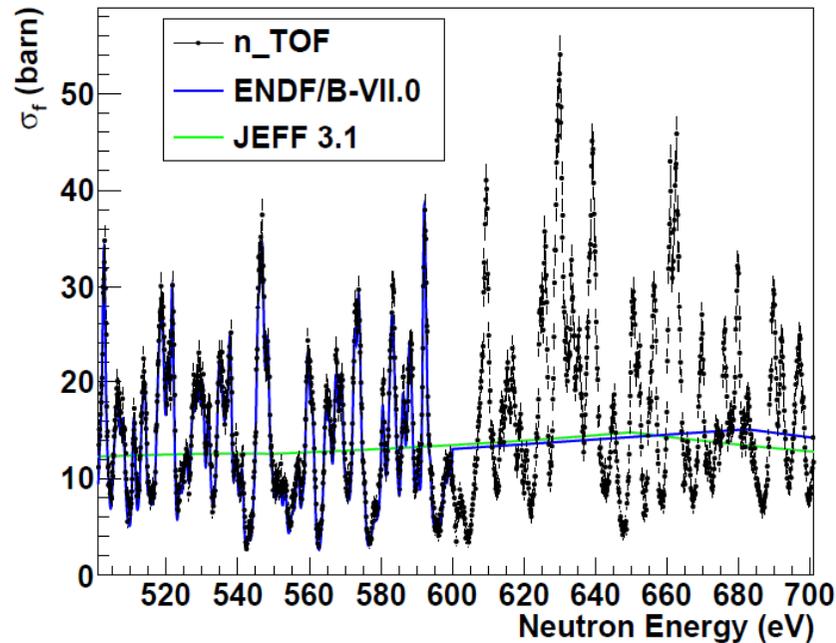


Per i bersagli più radioattivi, il background dovuto alle particelle α , e al pile-up, rende difficile estrarre sezioni d'urto accurate persino ad n_TOF. Misure difficili anche per problemi di radioprotezione.

I rivelatori per misure di fissione



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

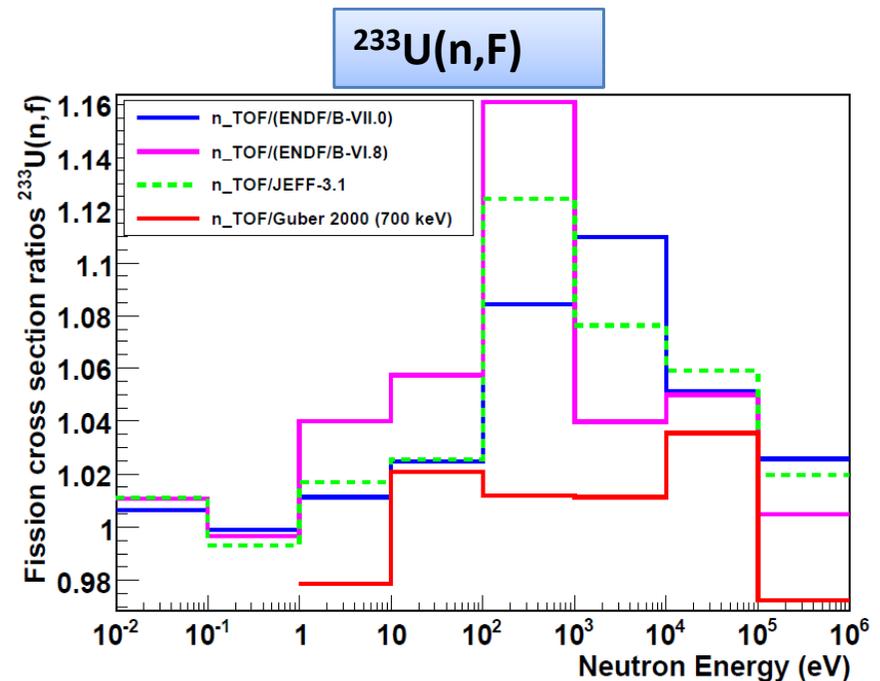


Grazie alle caratteristiche di n_TOF, raggiunta per la prima volta **accuratezza** $\sim 3\%$.

Librerie inattendibili nella regione veloce (necessarie nuove valutazioni).

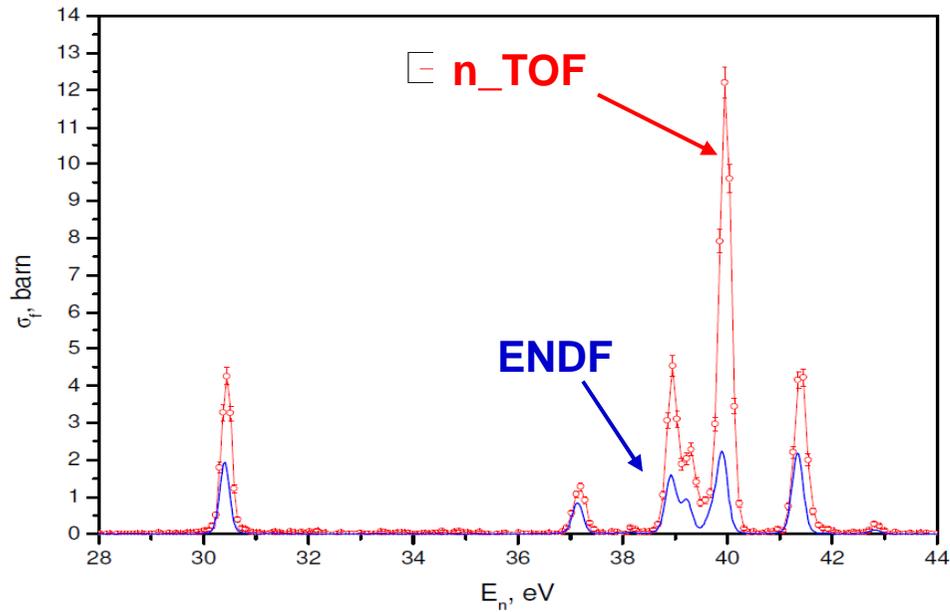
Misura **simultanea** della sezione d'urto in un largo range energetico (dal termico fino a 500 MeV).

Risonanze risolte fino a 10 keV (contro i 600 eV del passato) !!



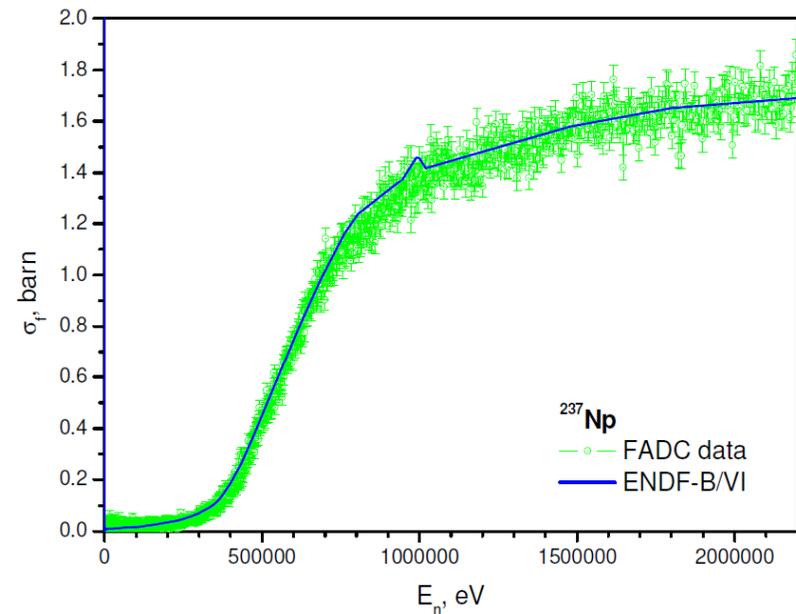
M. Calviani et al., Phys. Rev. C, in press

Sezioni d'urto di fissione del ^{237}Np

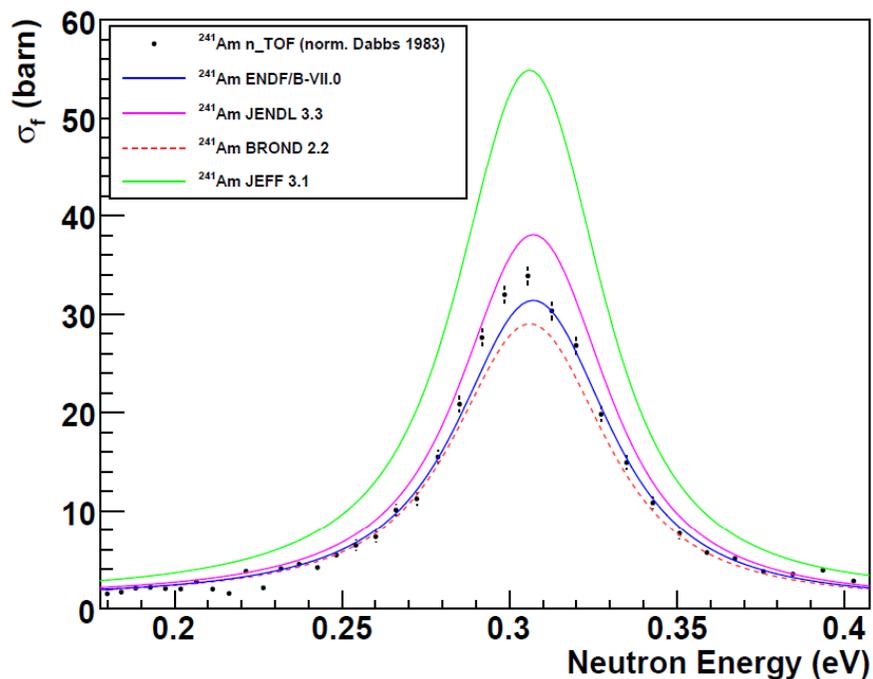


Ad alte energie (soglia di fissione), le librerie sono attendibili.

Situazione delle librerie disastrosa nella regione delle risonanze.
Nuovi dati moltopiù accurati che in passato.



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



Accuratezza del 5-10 %

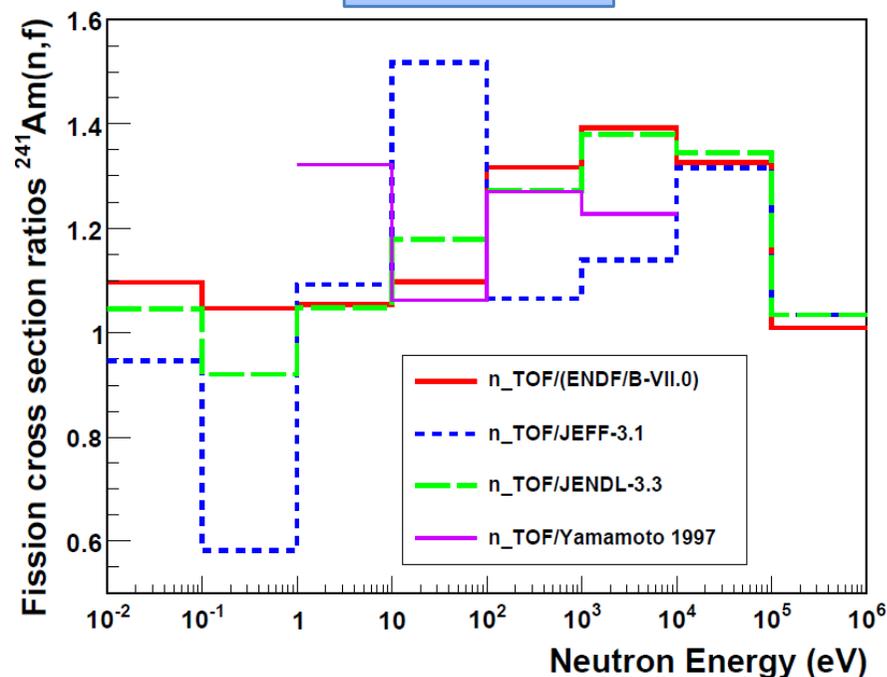
Il database più attendibile a bassa energia è ENDF-B/VII.0

Tutti i database sottostimano la sezione d'urto da 100 eV a 100 keV (range importante per i reattori veloci)

Grosse discrepanze fra diversi database (fino al 40 % !!!).

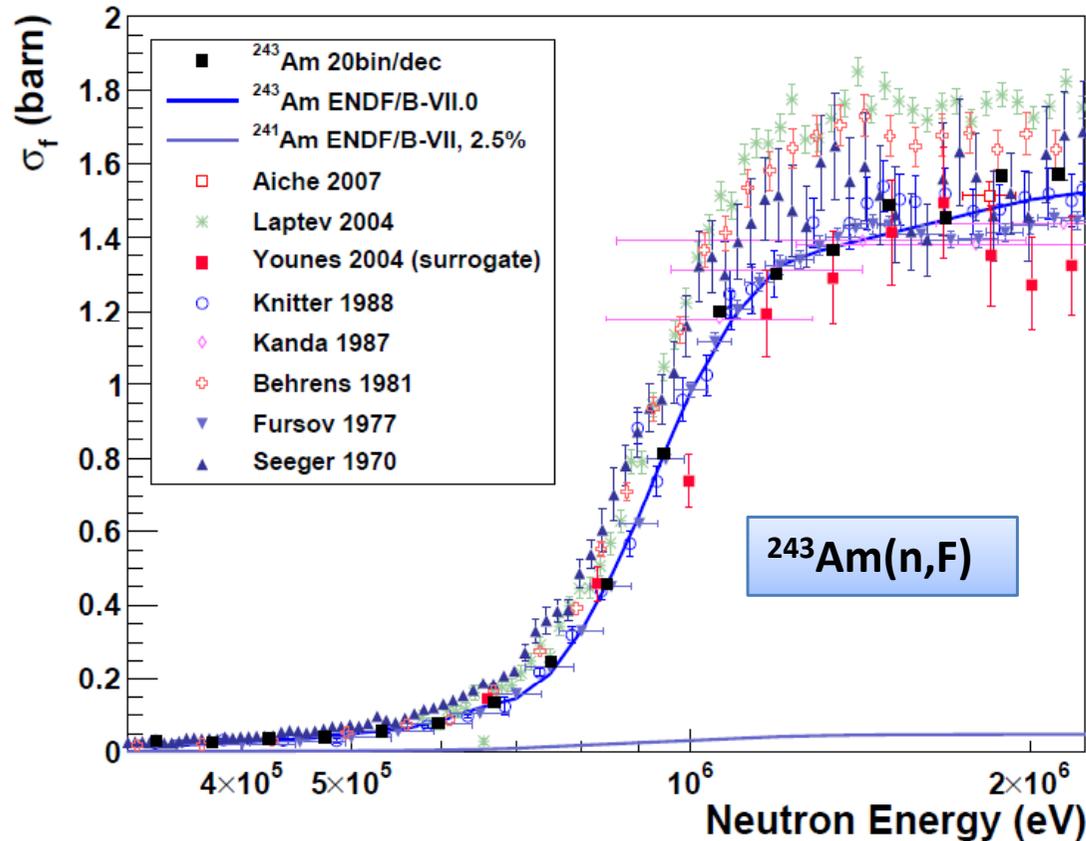
Misura molto difficile per via della radioattività del bersaglio (200 MBq)

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



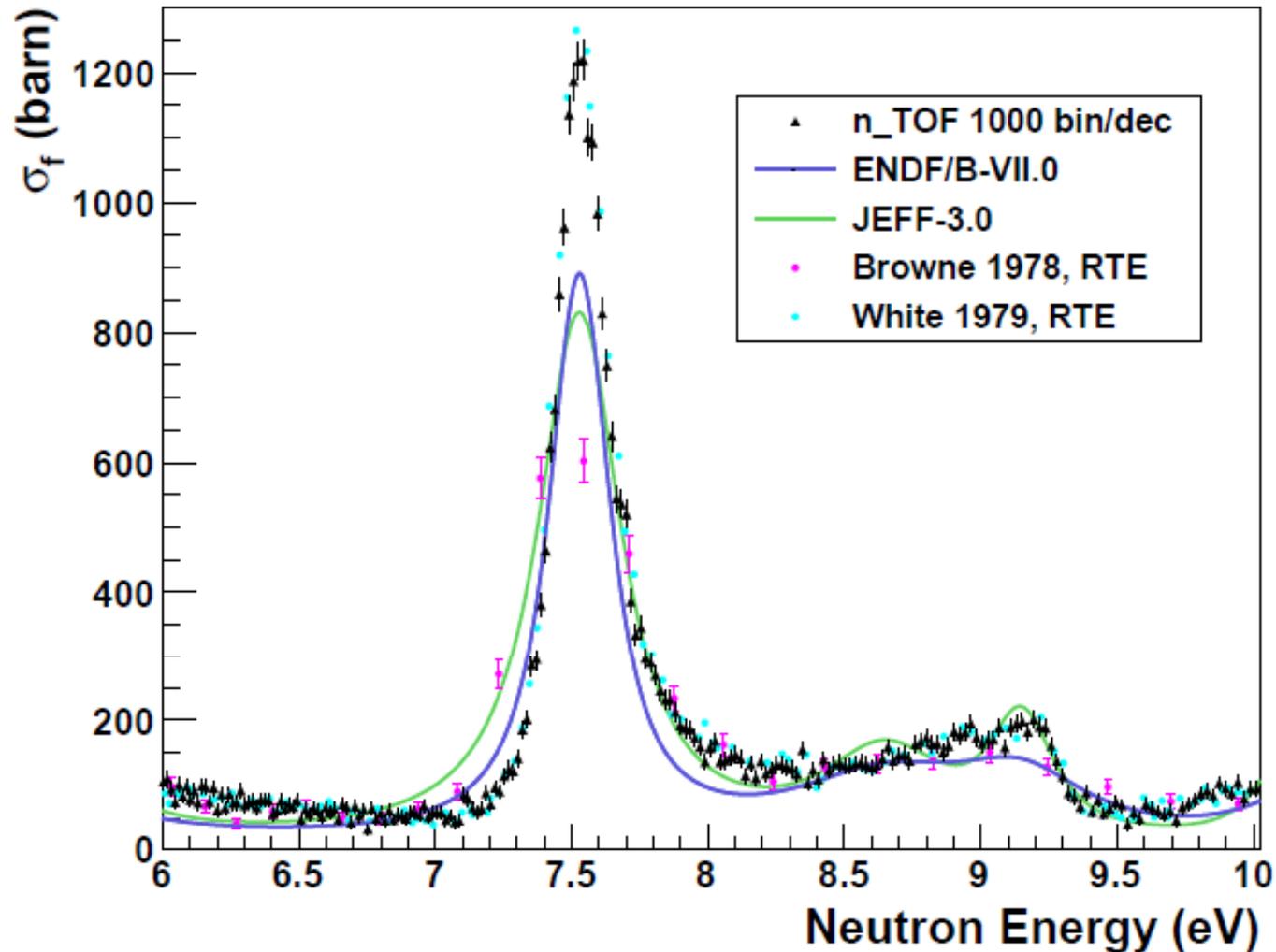
La fissione del ^{243}Am

F. Belloni et al., Nucl. Sci. Eng., in preparation



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

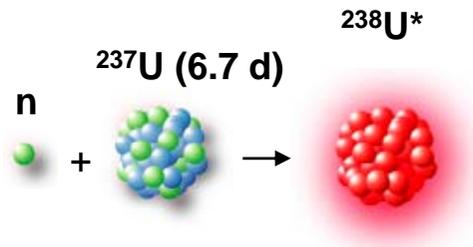
La fissione del ^{245}Cm



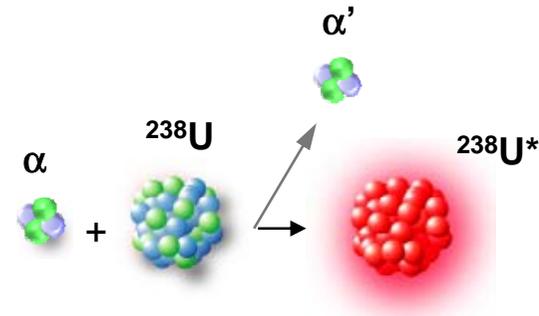
Librerie del tutto inattendibili per questo isotopo (a causa della discrepanza fra dati)

Il metodo delle reazioni surrogate

Reazione di fissione $^{237}\text{U}(n,f)$
(molto difficile da misurare)



Reazione surrogata $^{238}\text{U}(\alpha,\alpha')$
(facile da misurare)



$$\sigma_{\alpha X}(E_a) = \sum_{J, \pi} \sigma_{\alpha}^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi) \underline{G_X^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi)}$$

Desired

Calculated

$$P_{\delta X}(E_{\text{ex}}) = \sum_{J, \pi} \underline{F_{\delta}^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi)} G_X^{\text{CN}}(E_{\text{ex}}, J, \pi)$$

Measured

Calculated

Reazione surrogata: reazione indotta da particelle cariche, che però portano allo stesso **nucleo composto** della reazione indotta da neutrone.

La sezione d'urto di fissione può essere estratta da una combinazione di osservabili sperimentali e calcoli di modello.

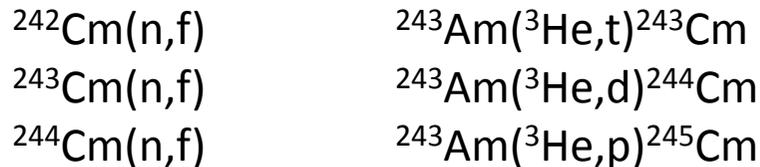
Vantaggio: può essere usato per misure molto difficili (o impossibili).

Attenzione: fa affidamento su calcoli di modello, che necessitano di verifica.

Le “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.

Conclusioni

Impellente richiesta di **nuovi dati, e più accurati**, sulle sezioni d'urto di cattura e di fissione indotta da neutroni, in un largo range energetico e per numerosi isotopi di interesse per la progettazione di reattori nucleari avanzati.

Da qualche anno, rinnovato vigore nelle attività sperimentali, con varie **facilities** per neutroni, in particolare ad n_TOF (CERN).

Per il ciclo Th/U, sono ora disponibili dati su **$^{233}\text{U}(n,f)$ e $^{232}\text{Th}(n,\gamma)$** , di accuratezza sufficiente per permettere la progettazione di tali reattori.

Per i reattori Gen IV e ADS, si stanno facendo notevoli passi avanti (per esempio sul **^{237}Np e ^{243}Am**), ma molto resta da fare su altri isotopi (**$^{240,242}\text{Pu}$, ^{241}Am , ^{245}Cm**).

Questioni aperte su isotopi a breve vita media (**$^{238,241}\text{Pu}$** , vari isotopi del **Cm**). Risultati interessanti potrebbero venire dal metodo delle reazioni surrogate.

Necessari dati sulla **molteplicità** dei neutroni, distribuzione di **massa** dei frammenti di fissione, etc...

Necessaria attività di ricerca anche su teoria e valutazione.

Sforzo immane, ma necessario.



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

Grazie per l'attenzione