

**Misura di sezioni d'urto neutroniche  
ad alta accuratezza per l'astrofisica nucleare  
e per le tecnologie nucleari emergenti**

[n\_TOF @ CERN]

# La facility n\_TOF (neutron Time Of Flight) si colloca all'interno delle tante opportunità offerte dal CERN di Ginevra

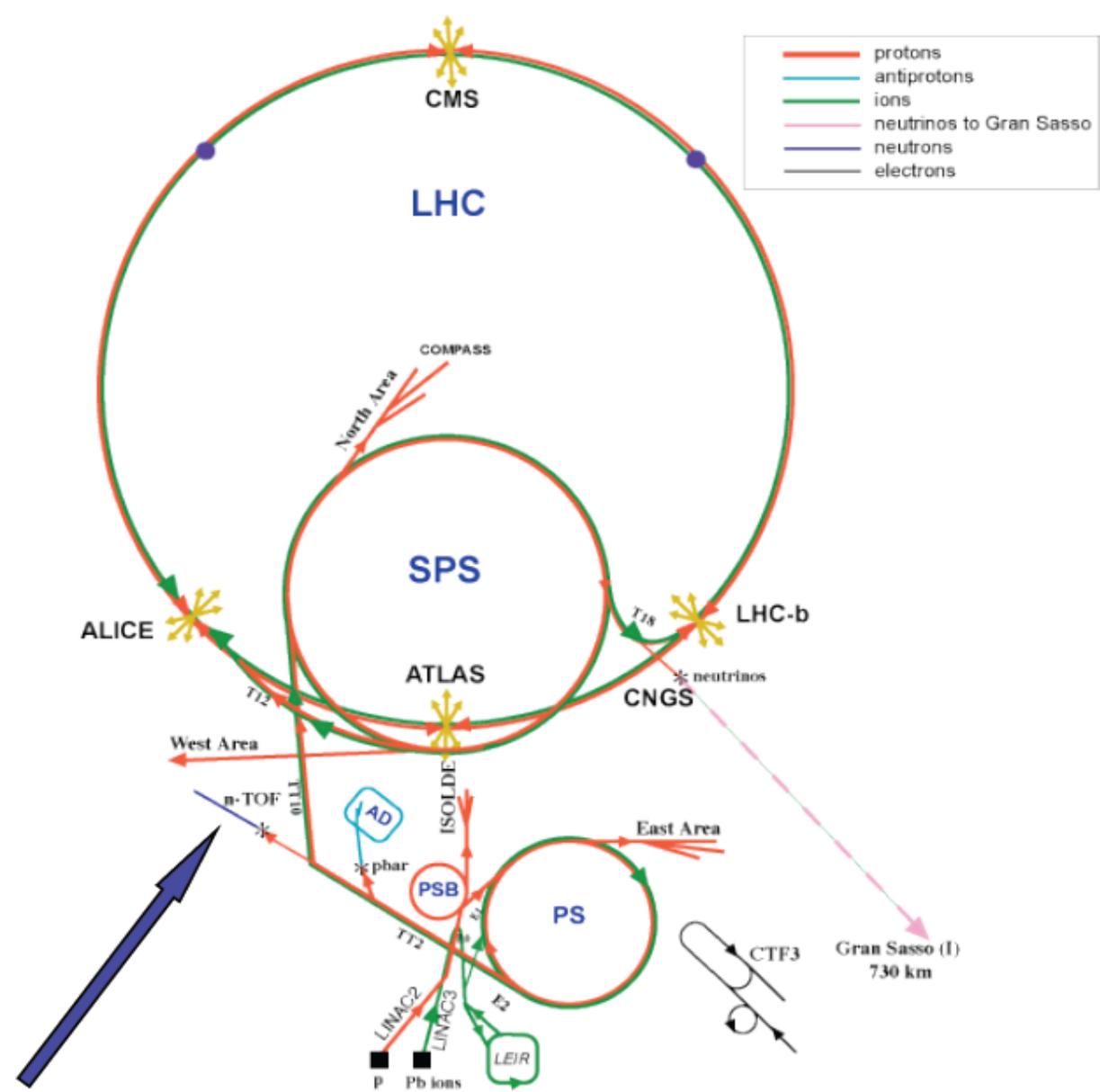
n\_TOF è una sorgente di **spallazione**  
che sfrutta un fascio di protoni da 20 GeV/c del PS

L'installazione rende disponibili neutroni in un  
ampio spettro energetico,  
dal termico fino al GeV.

La peculiarità consiste nell'elevato  
flusso neutronico istantaneo e  
nella alta risoluzione energetica.

Ciò rende possibili misure molto accurate di  
sezioni d'urto indotte da neutroni.

Dispone di tre sale sperimentali collocate a diversa  
base di volo ( $\approx 185$  m,  $\approx 19$  m,  $\approx 2$  m)



# BERSAGLIO DI SPALLAZIONE

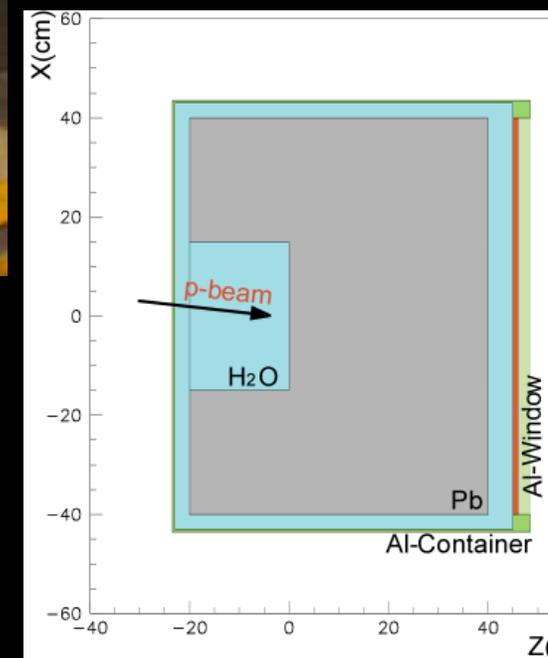
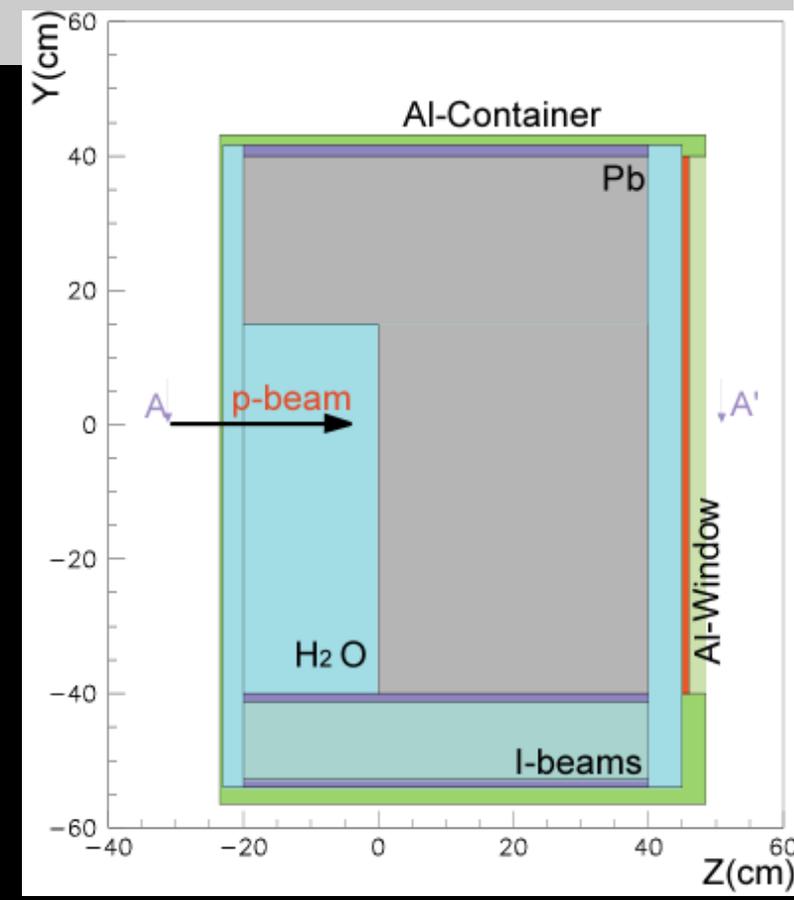
Dimensioni:  $80 \times 80 \times 40 \text{ cm}^3$

Piombo: 4 t

H<sub>2</sub>O moderatore: 5 cm

Al-window: 1.6 mm

Al-container: 140 l



**Proton beam momentum**

**20 GeV/c**

**Intensity (dedicated mode)**

**$7 \times 10^{12}$  protons/pulse**

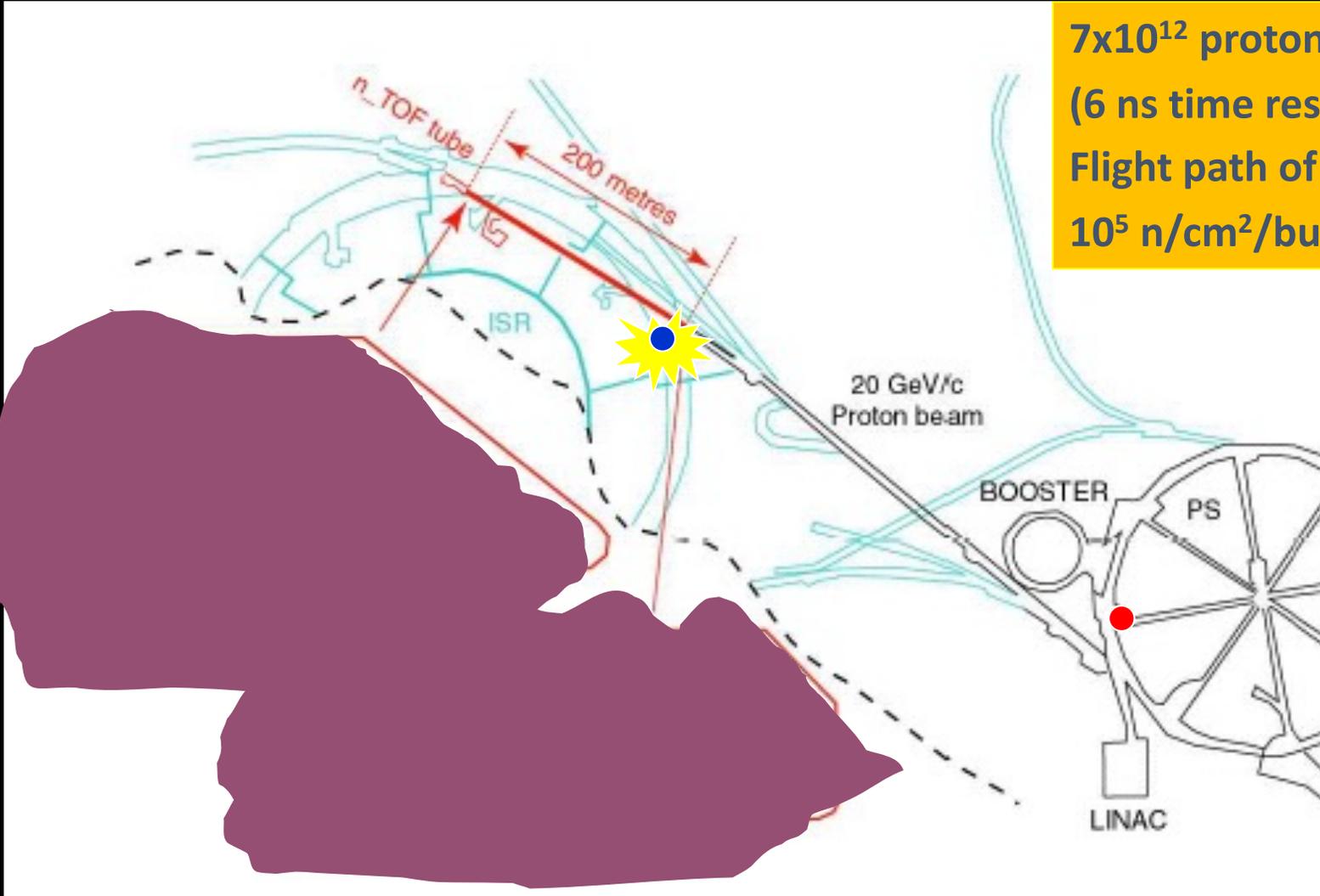
**Pulse width**

**6 ns (rms)**

**n/p**

**300**

# Experimental Area 1 (EAR1)



$7 \times 10^{12}$  protons/bunch @ 20 GeV/c dal PS  
(6 ns time resolution)

Flight path of 185 m

$10^5$  n/cm<sup>2</sup>/bunch in experimental area

# La facility n\_TOF @ CERN

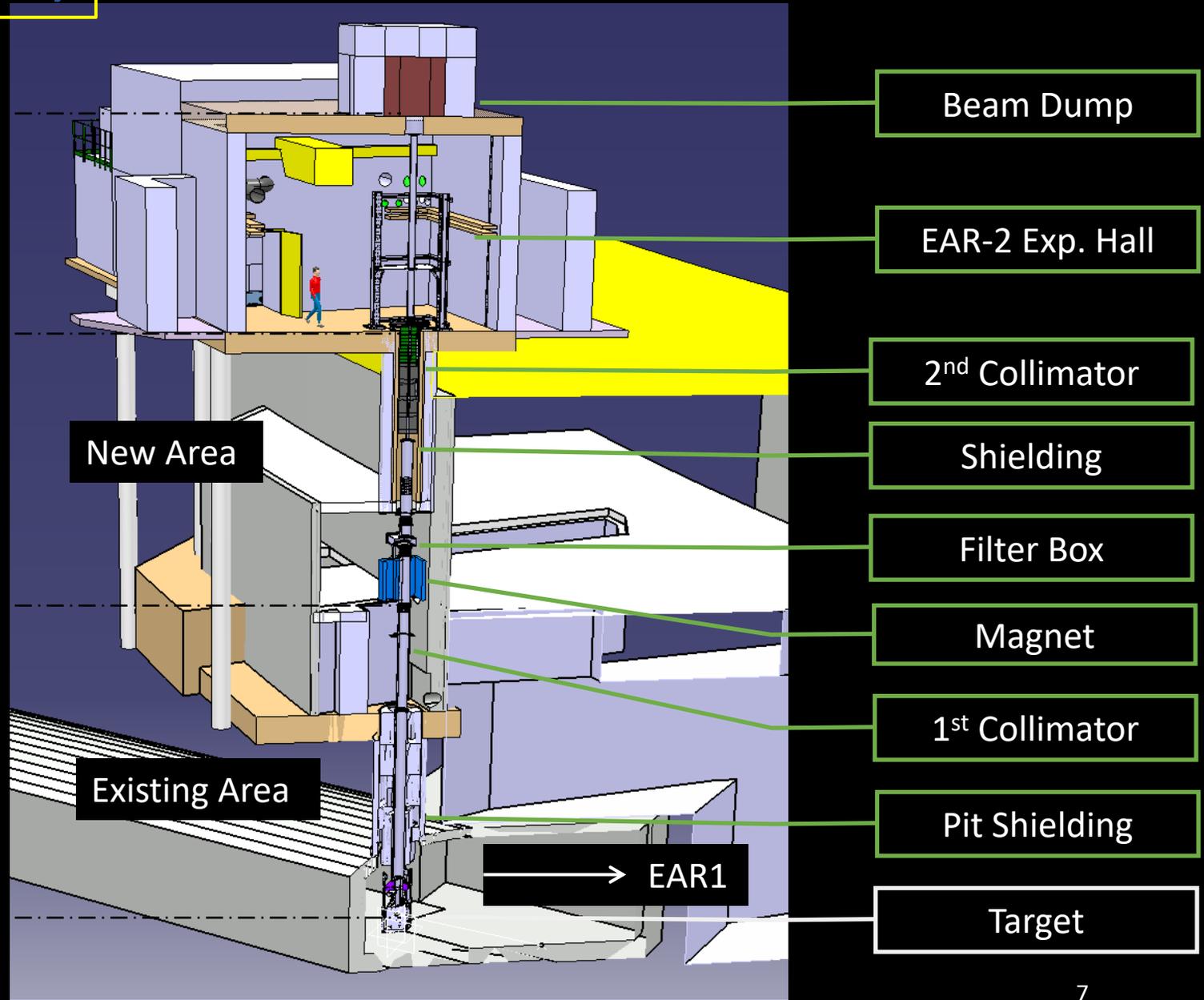
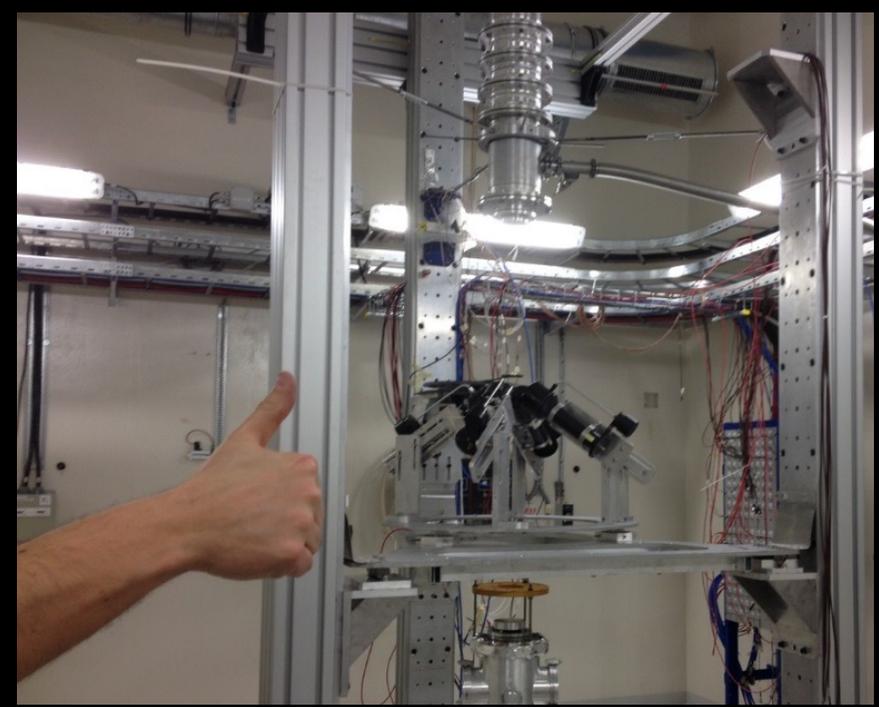
## Produzione e trasporto del fascio di neutroni

- Bersaglio di Pb 80x80x40 cm<sup>3</sup> circondato da 5 cm di acqua per la moderazione (flusso isoletargico) e il raffreddamento
- 200 m time-of-flight tunnel
- Muri di ferro e cemento per schermare n,  $\gamma$ ,  $\mu$ , etc...
- Magnete deflettore per le particelle cariche
- Secondo collimatore



# Experimental Area 2 (EAR2)

Base di volo di 19 m  
Flusso neutronico più intenso rispetto ad EAR-1



# Collaborazione internazionale



**18 Nazioni**  
**50 Istituti**  
**≈ 130 ricercatori**  
**≈ 40 PhD students**

INFN  
Bari  
Bologna  
LNF  
LNL  
LNS  
Pavia  
Perugia  
Roma I  
Torino  
Trieste

CNR  
Bari

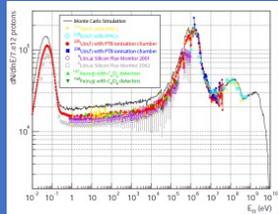
ENEA  
Bologna  
LNF

INAF  
Teramo  
Torino

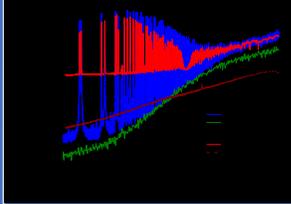
# Timeline

2000

Commissioning



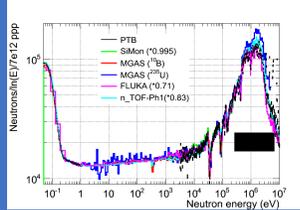
2001-2004



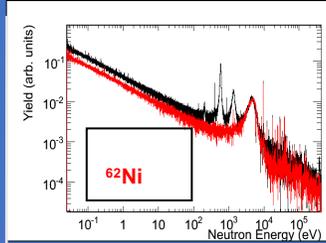
Prima  
campagna di  
misura

2009

Re-Commissioning

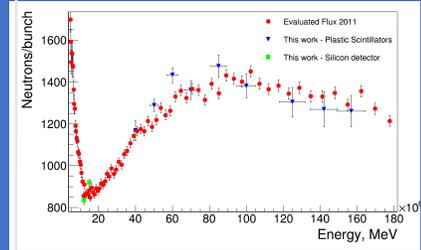


2009-2012



Seconda  
campagna di  
misura

2015-2018



Terza  
campagna di  
misura

Quarta  
campagna di  
misura

202X

1997

1999

Inizio  
realizzazione



2008

Sostituzione  
bersaglio di  
spallazione

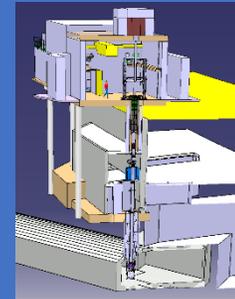


2010

Upgrades  
<sup>10</sup>B-water  
Class-A area



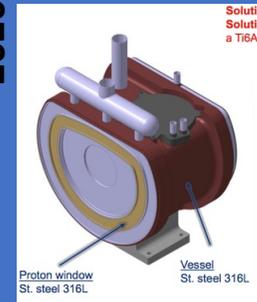
Seconda  
Area  
sperimentale



2014

2020

Nuovo  
bersaglio di  
spallazione

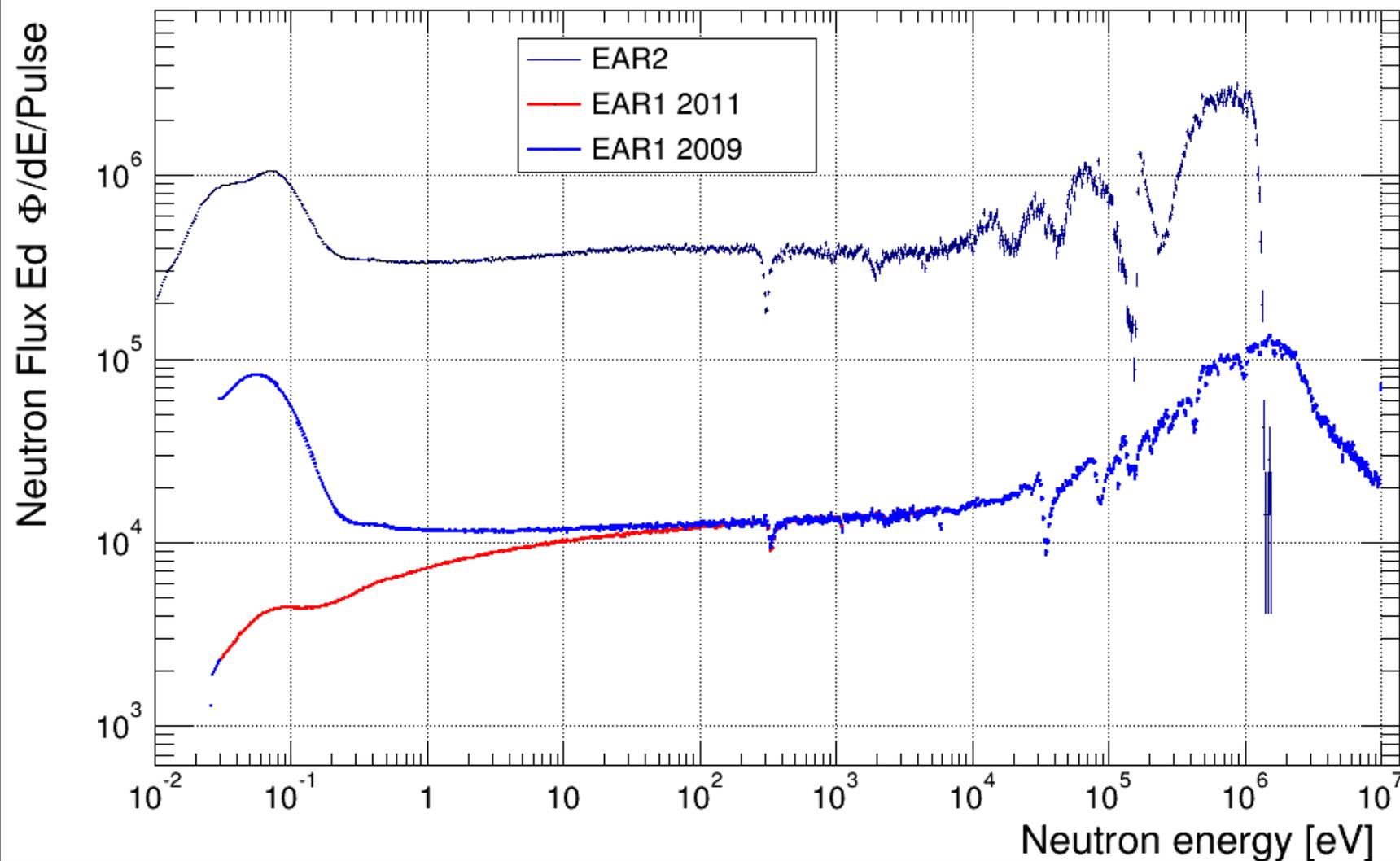


Costruzione  
NEAR station

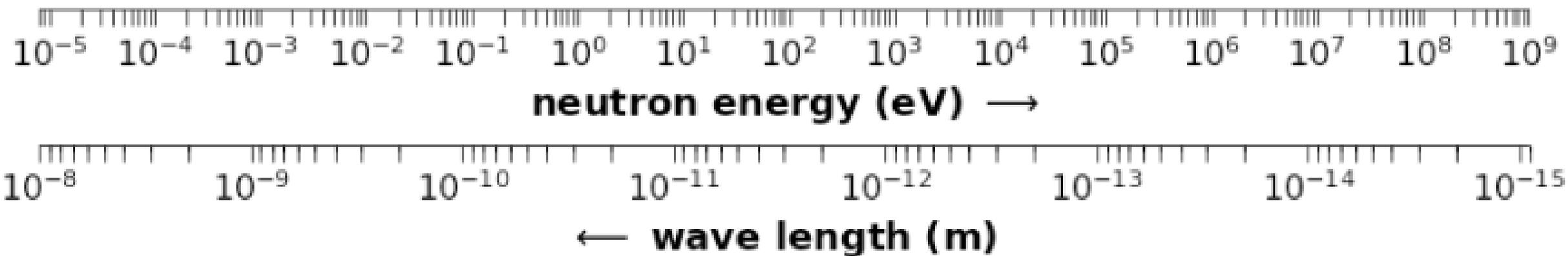


**Broad neutron energy range**

**meV  $\rightarrow$  GeV**



**High instantaneous flux  $10^5 - 10^6$  n/cm<sup>2</sup>/bunch**



## Cosa offre ?

Neutroni disponibili in un ampio intervallo di energia ( $1 \text{ eV} < E_n < 1 \text{ GeV}$ )

Elevato flusso istantaneo ( $10^5$ - $10^8 \text{ n/cm}^2/\text{bunch}$ )

Risoluzione in energia

Low neutron sensitivity

Basso background

## Qual è la ricaduta diretta sulle misure ?

Misura di sezioni d'urto di cattura fino a 1 MeV

Misura simultanea di sezioni d'urto di fissione dall'eV alle centinaia di MeV

Misura di piccole sezioni d'urto di cattura

Misura di campioni disponibili in modeste quantità

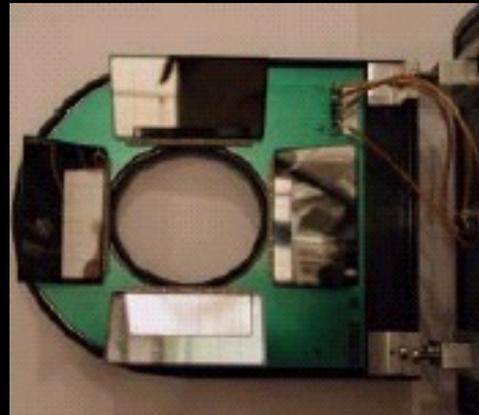
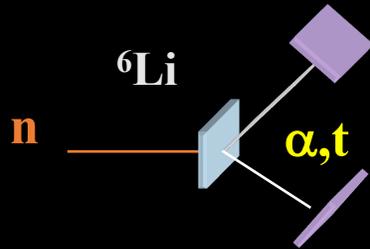
Misura di campioni radioattivi

Studio accurato delle risonanze

Misura accurata di sez. d'urto anche nei casi in cui  $\sigma_{\text{el}}/\sigma_{\text{capture}} \gg 1$

## Monitor di fascio

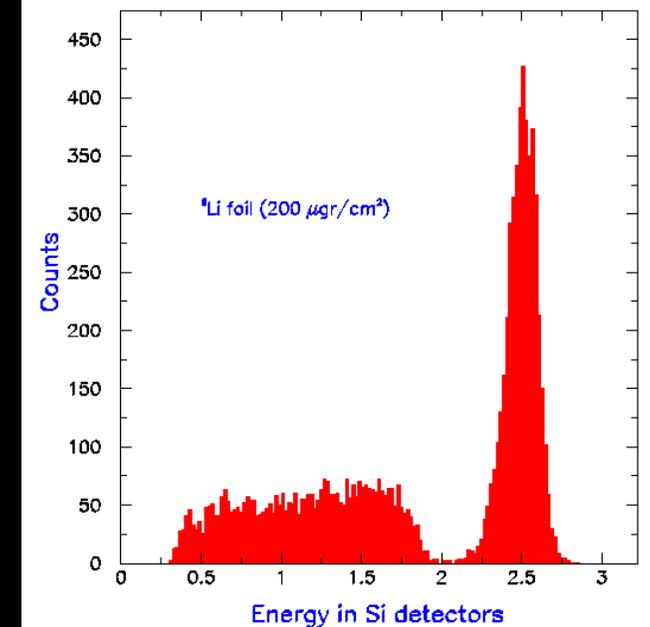
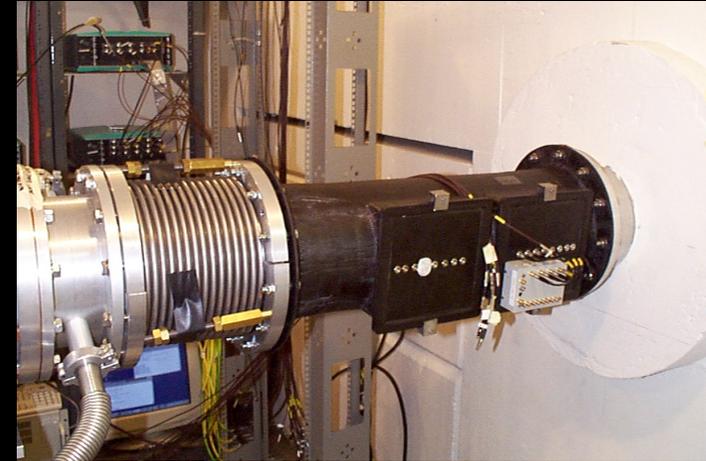
- ✗ Trasparenza al fascio
- ✗ Basso background indotto
- ✗ Semplicità d'uso



Foglio di Mylar con deposito di  ${}^6\text{Li}$  ( $200 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ )

Rivelatori al Silicio fuori dal fascio

Camera a vuoto in fibra di Carbonio



Le misure portate a termine ad n\_TOF sono dedicate allo studio di sezioni d'urto neutroniche in funzione dell'energia dei neutroni.

Sperimentalmente viene determinato lo Yield: la probabilità che un neutron dia luogo ad una determinate reazione nel campione di misura (numero di eventi normalizzato al numero di neutroni incidenti).

In ogni singolo esperimento ad n\_TOF, quantità tipicamente misurate sono:

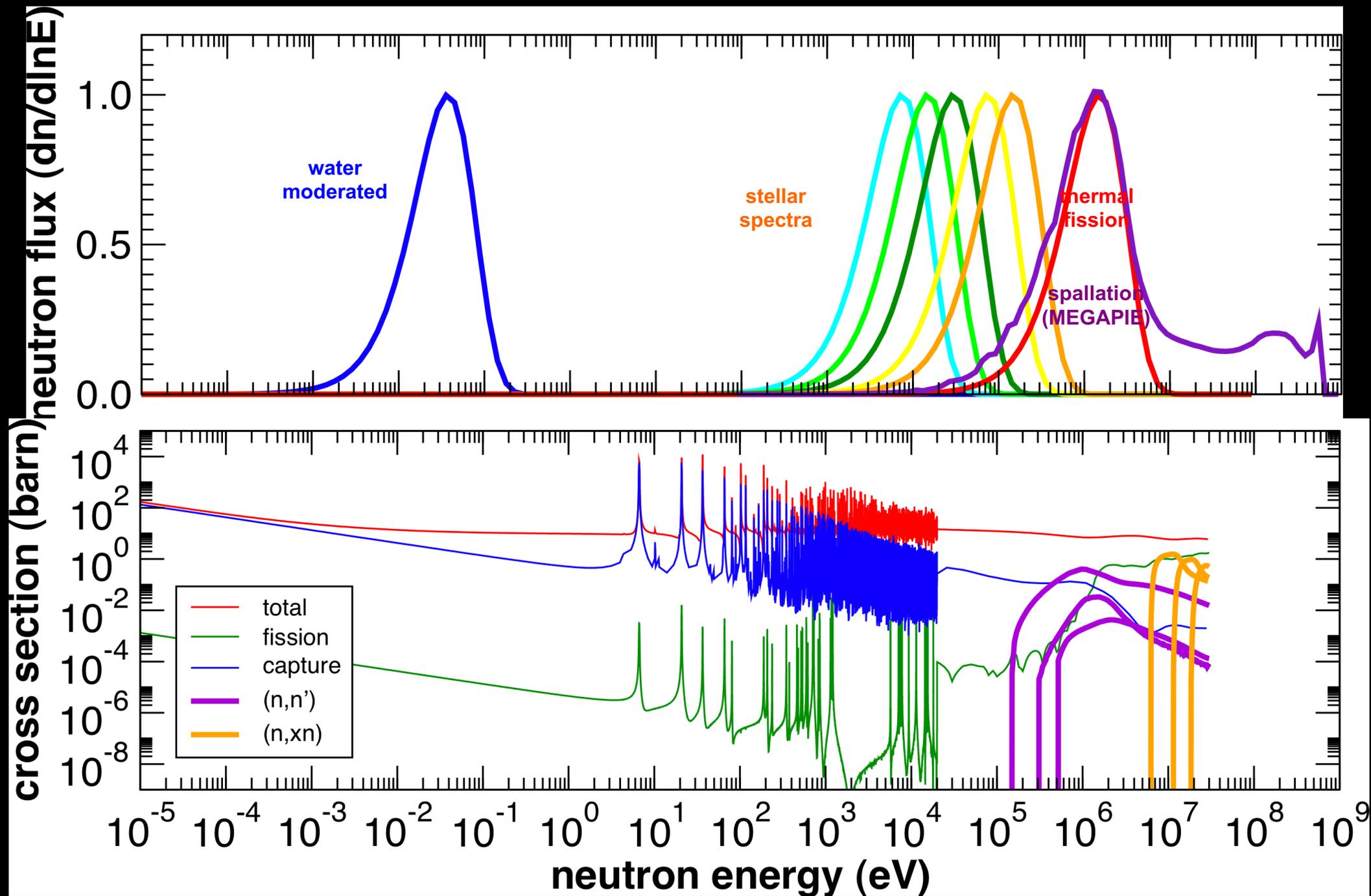
- time-of-flight (relativo ad un riferimento definito, i.e.  $\gamma$ -flash)
- L'energia depositata nel rivelatore
- L'identificazione del tipo di particella rivelata

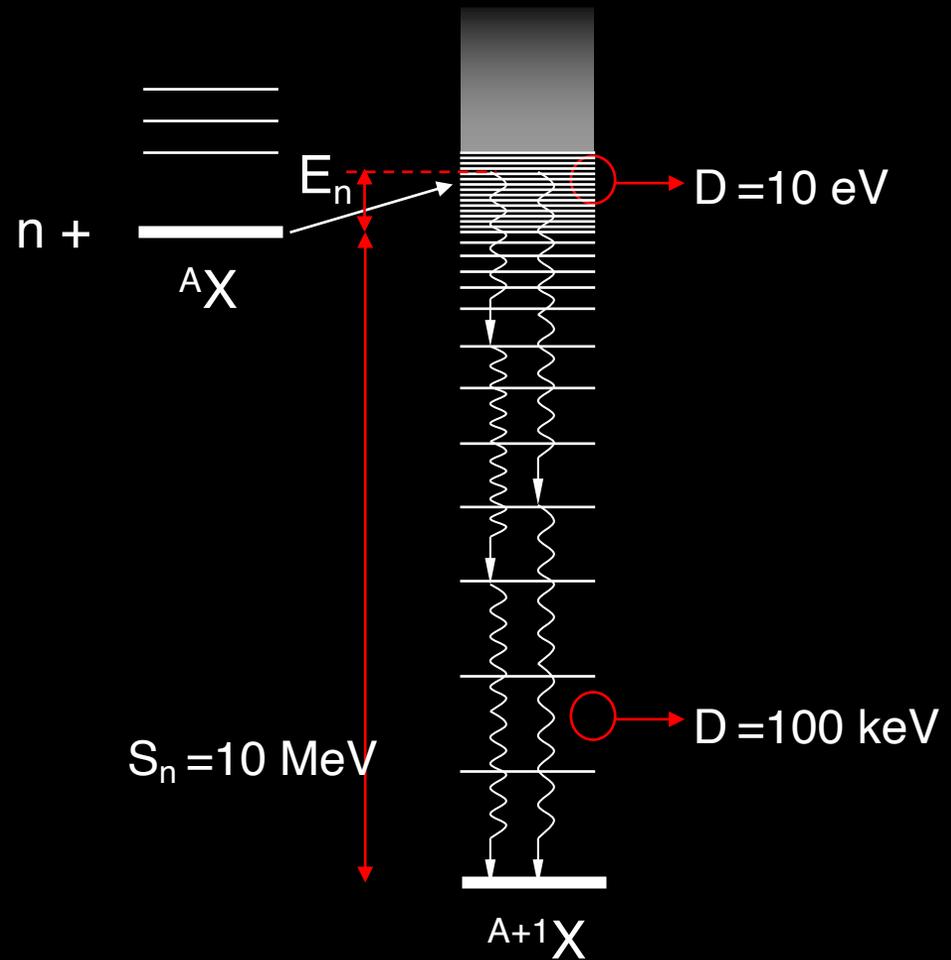
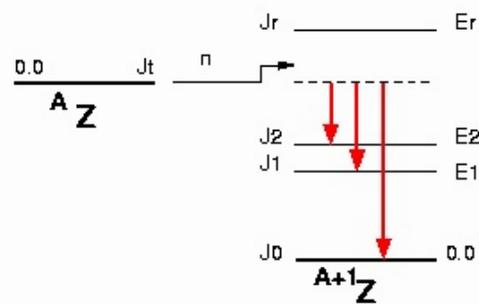
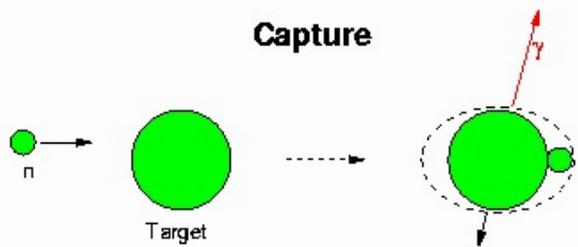
L'energia del neutrone che ha dato luogo alla reazione è ricavata dal ToF:

$$E_n = \left( \frac{72.2977 \cdot L}{t - t_0} \right)^2$$

$$L = 185.2 \text{ m}$$

$$t_0 = 68 \text{ ns}$$

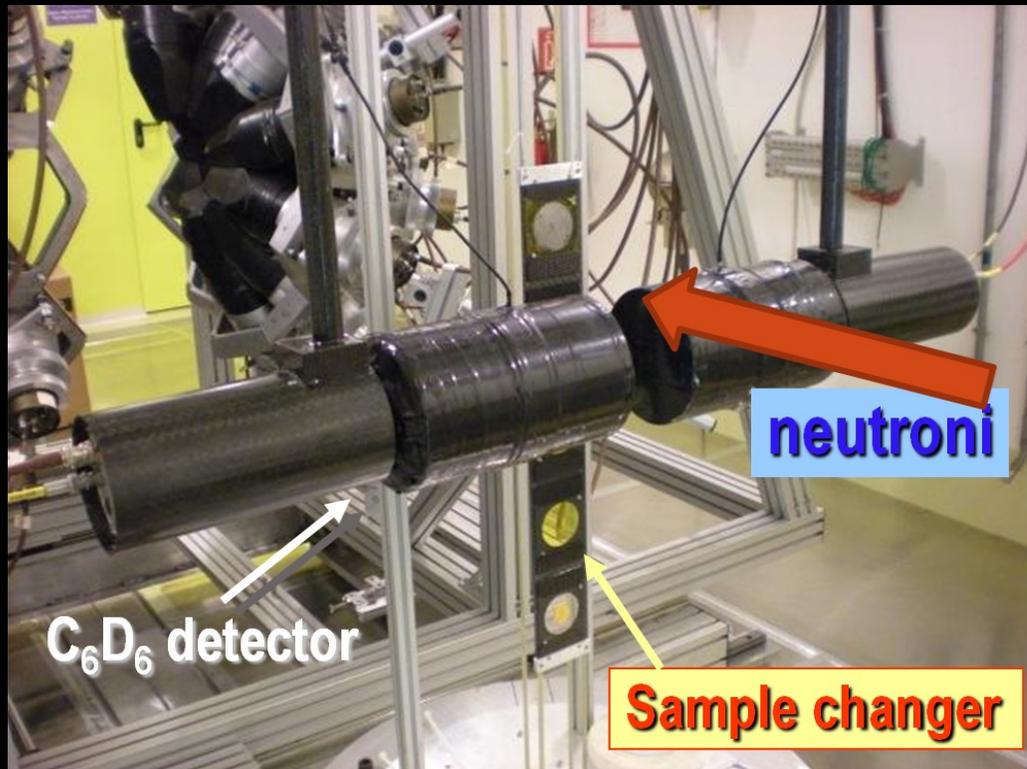




# Set-up di cattura

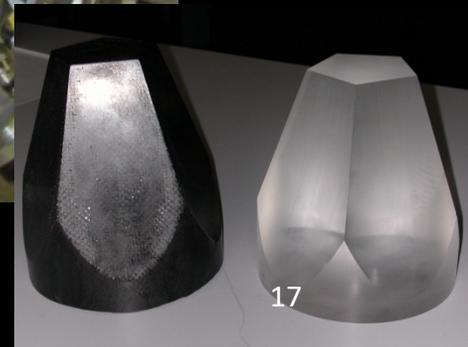
## Scintillatori liquidi

- per misure a bassa neutron sensitivity

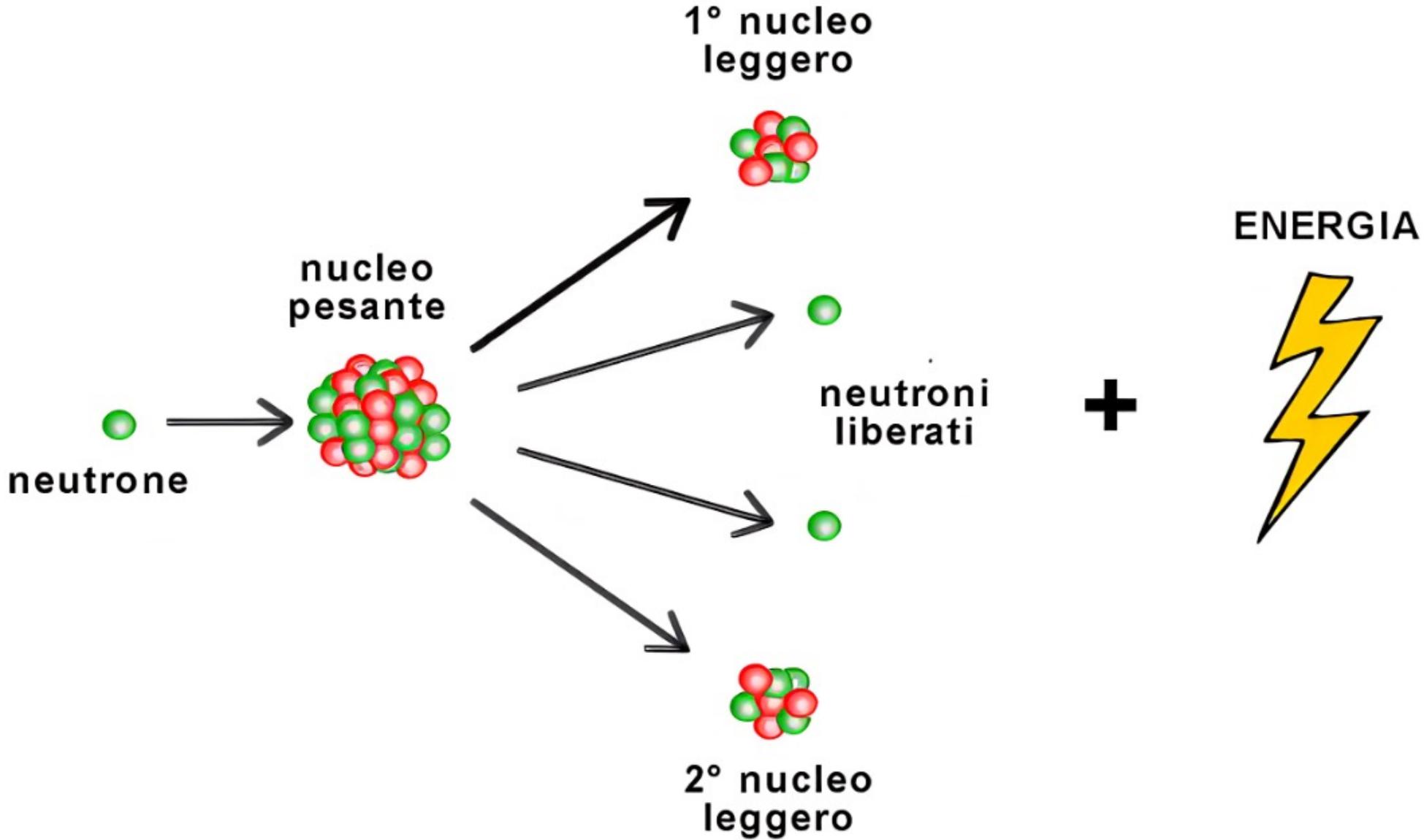


## Total Absorption Calorimeter

- geometria  $4\pi$
- 40 cristalli BaF<sub>2</sub> (segmentazione)
- Buona risoluzione in energia
- Discriminazione di eventi spuri e background
- Utilizzato soprattutto per cattura su attinidi

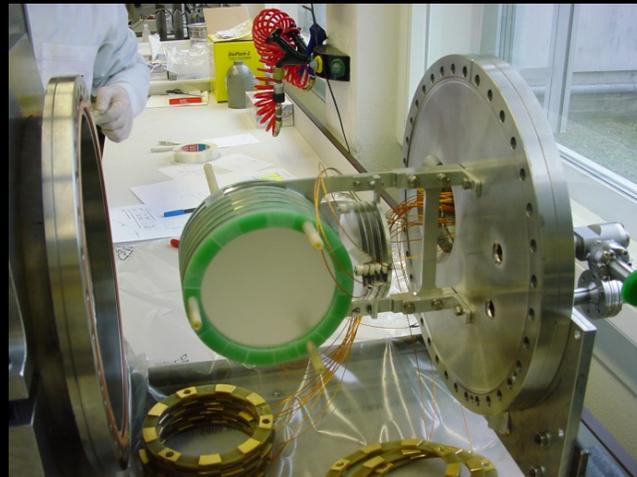
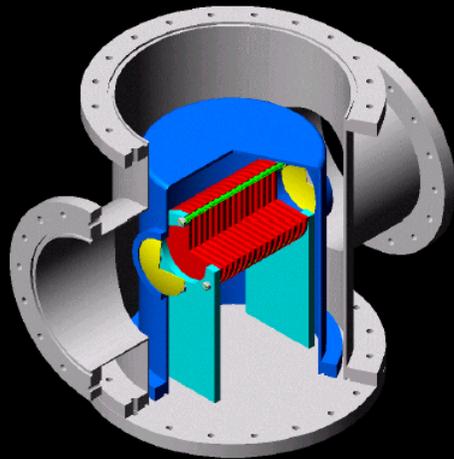


FISSIONE NUCLEARE



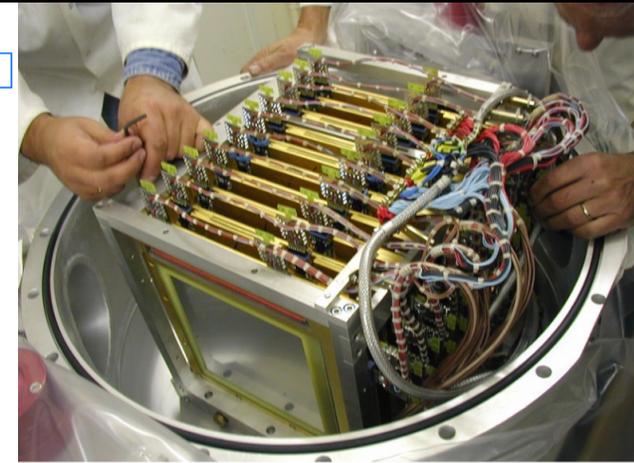
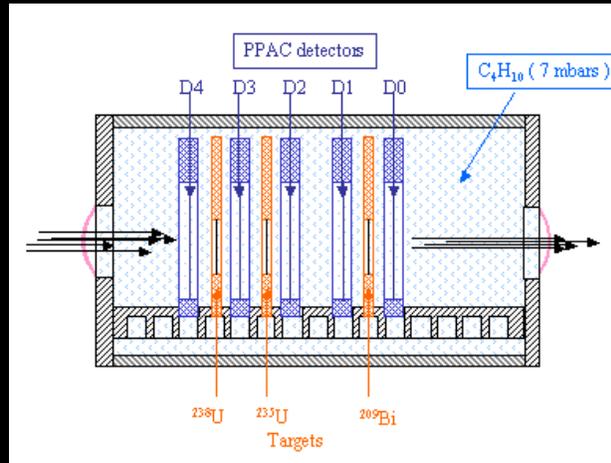
# Set-up di fissione

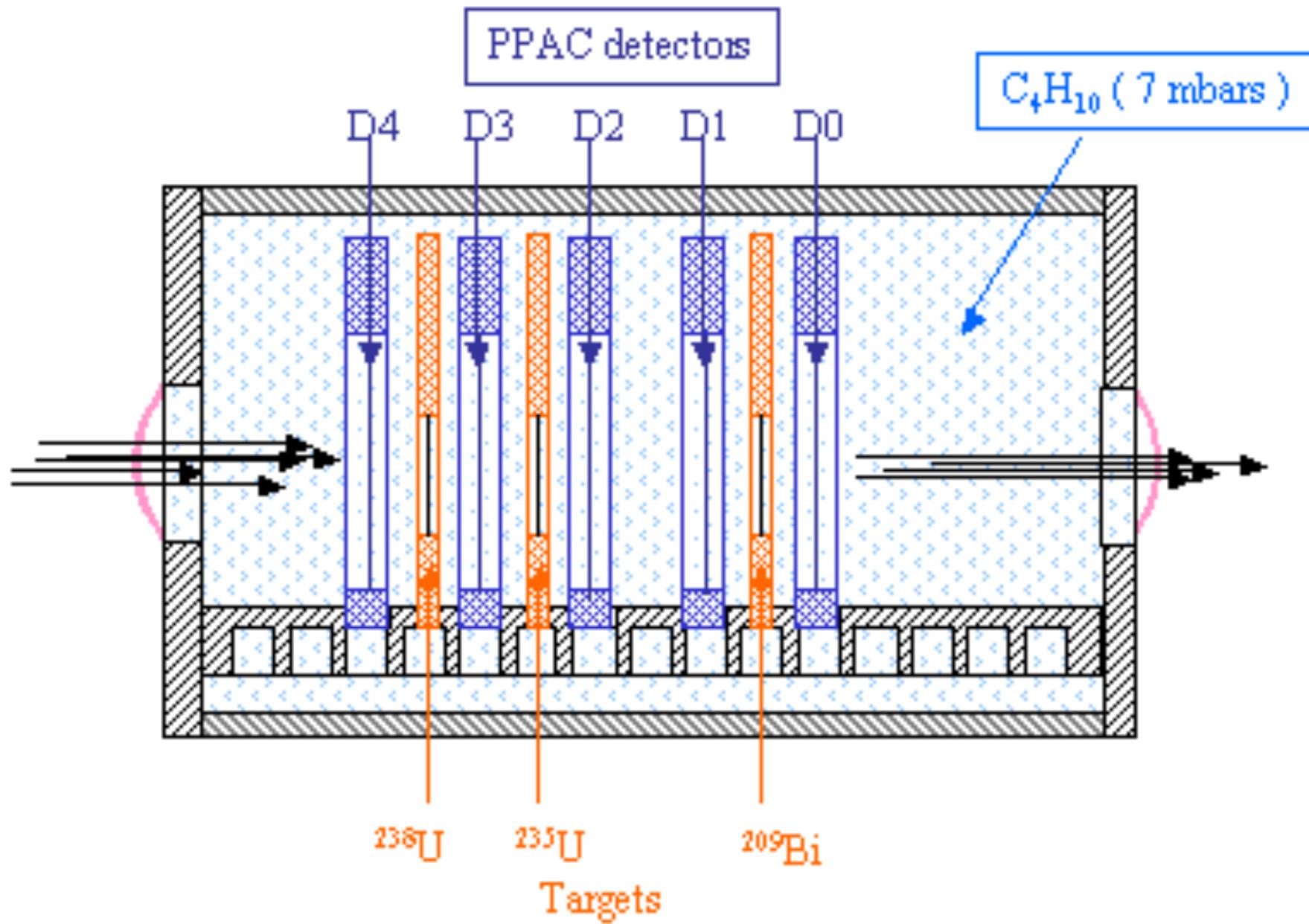
## Multi-sample Fission Ionization Chamber



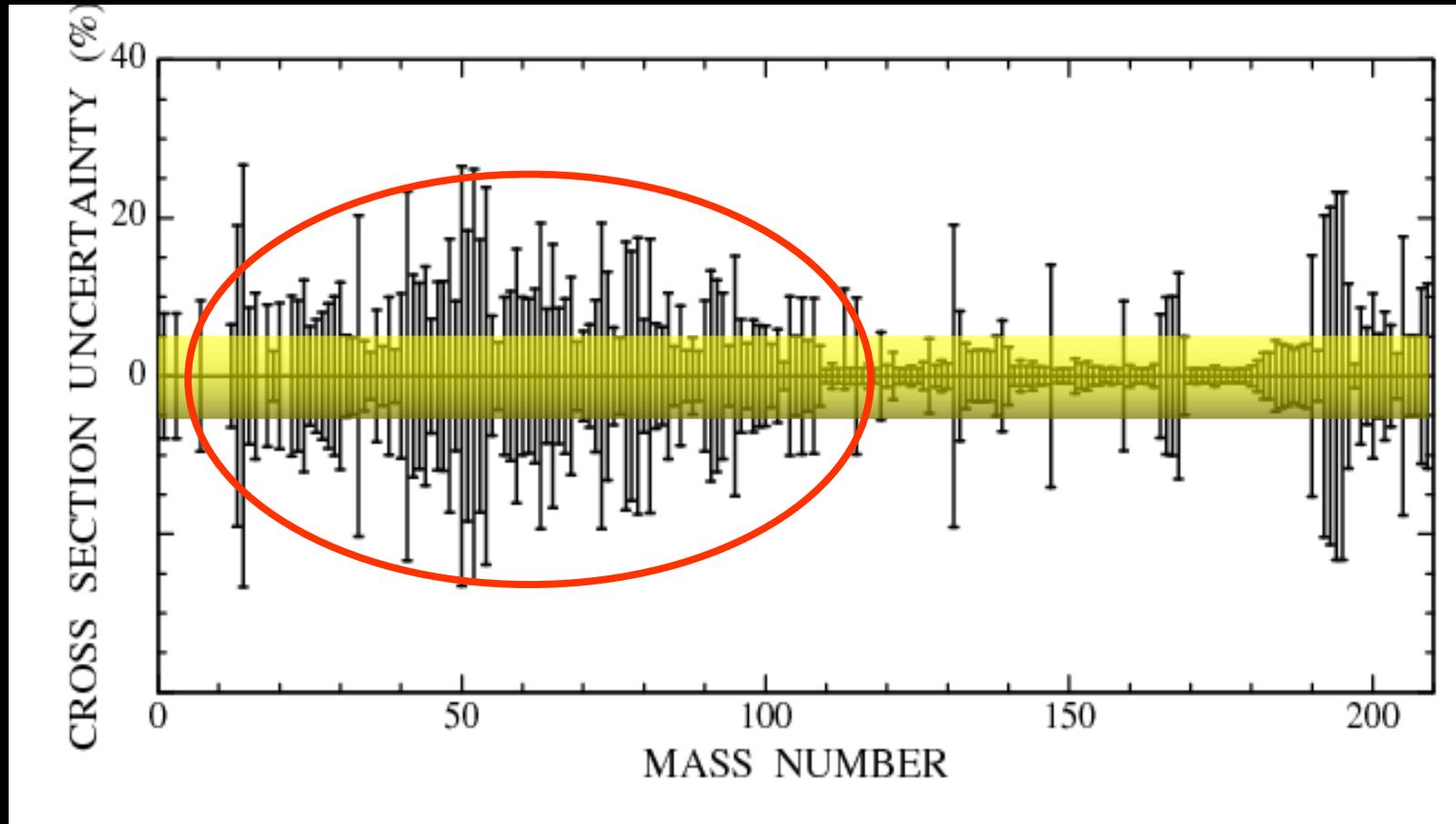
## Parallel Plate Avalanche Counters

- Frammenti di fissione rivelati in coincidenza
- Ottima discriminazione delle  $\alpha$  emesse
- Poco sensibile ai  $\gamma$





Per dirimere tra i modelli stellari proposti serve una conoscenza delle sezioni d'urto di cattura con una accuratezza tra l'1 e il 5% per tutti gli isotopi che vanno dal  $^{12}\text{C}$  al  $^{210}\text{Po}$  !

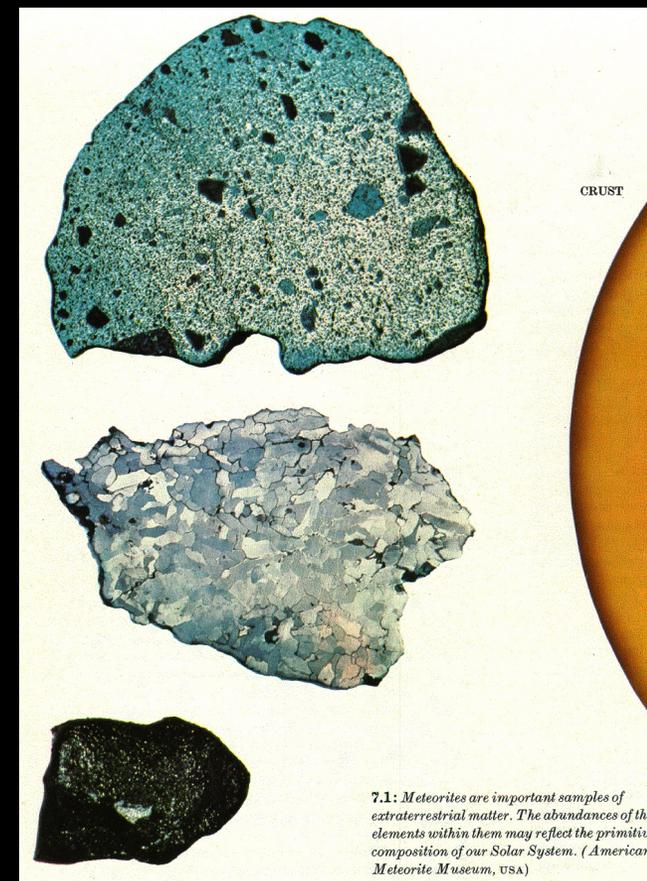
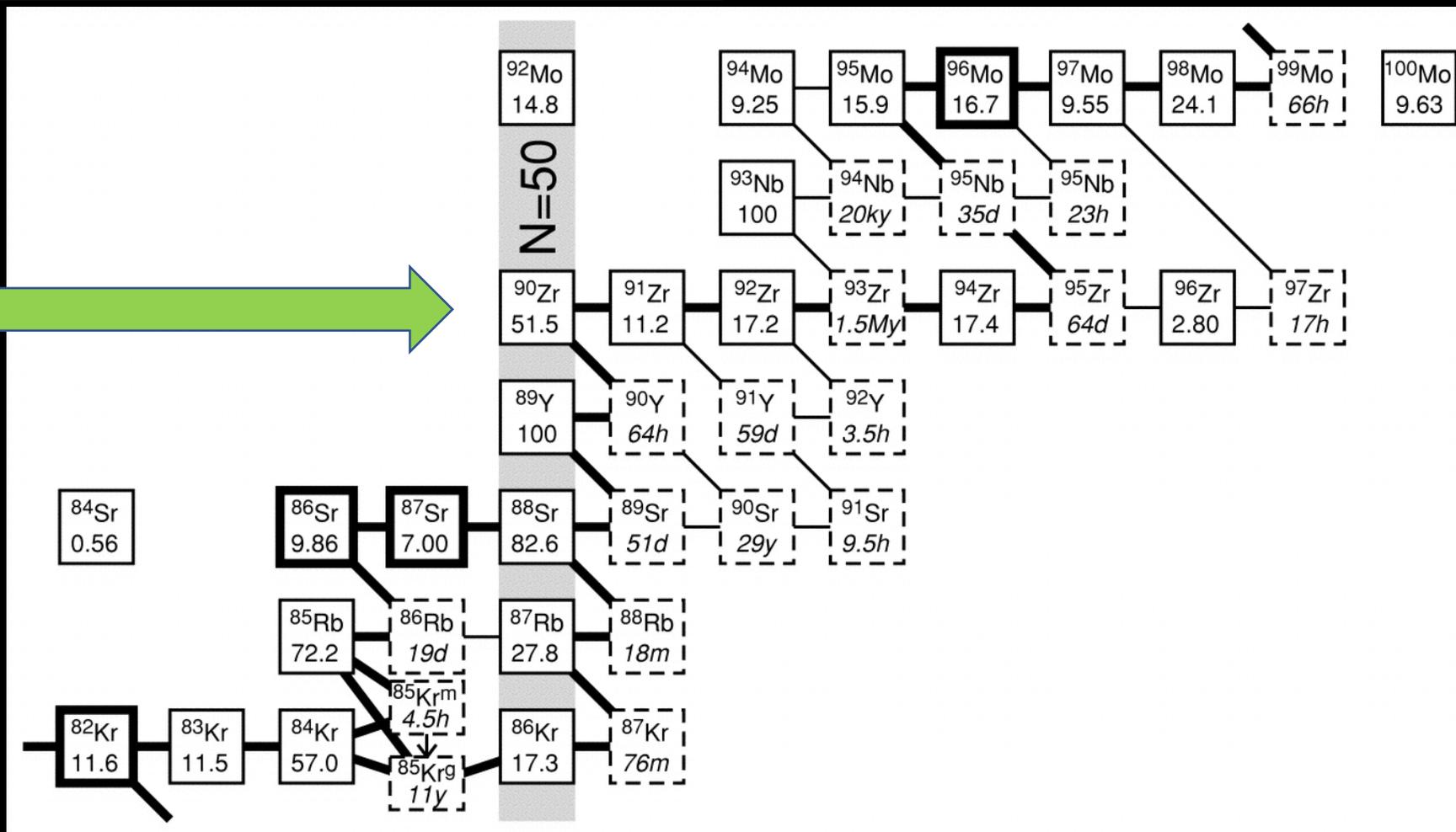


# Maxwellian Averaged Cross Section (MACS)

$$\langle \sigma \rangle_{kT} = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \frac{\int_0^{\infty} \sigma(E_n) \times E_n \times \exp(-E_n/kT) dE_n}{\int_0^{\infty} E_n \times \exp(-E_n/kT) dE_n}$$

# Studio delle Condizioni stellari

## 90,91,92,93,94,96Zr(n, γ)

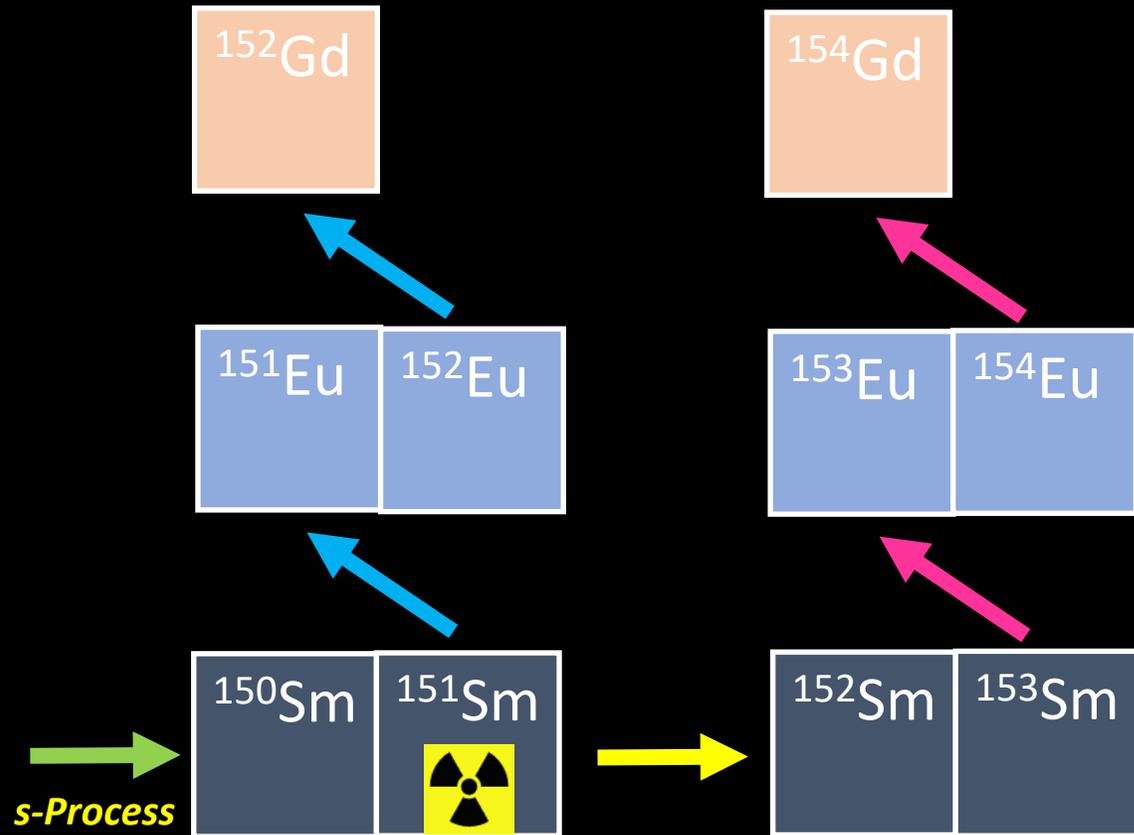


## Polveri interstellari

L'isotopo <sup>93</sup>Nb è l'unico Nb stabile, la sua abbondanza dipende strettamente da <sup>93</sup>Zr(n, γ)

# Studio delle Condizioni stellari

## La diramazione ad A=151 (AGB)



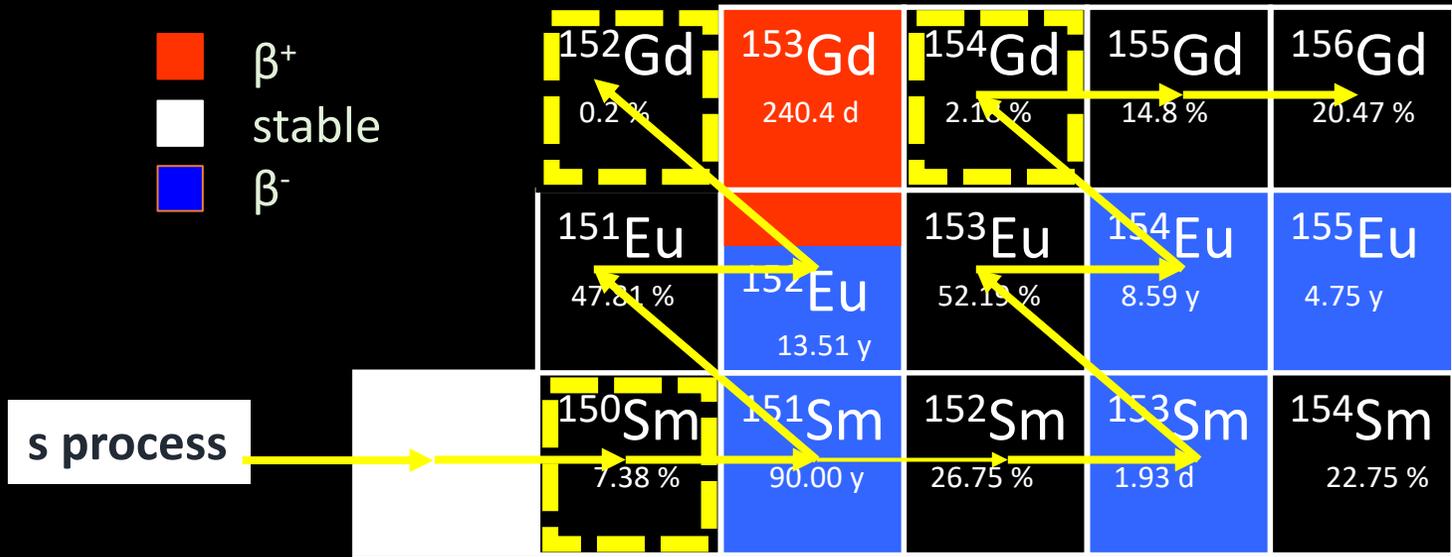
Il branching ratio al  $^{151}\text{Sm}$  dipende da:

- condizioni **termodinamiche** dei siti stellari (temperatura, densità neutronica, ...)
- sezione d'urto  $^{151}\text{Sm}(n,\gamma)$

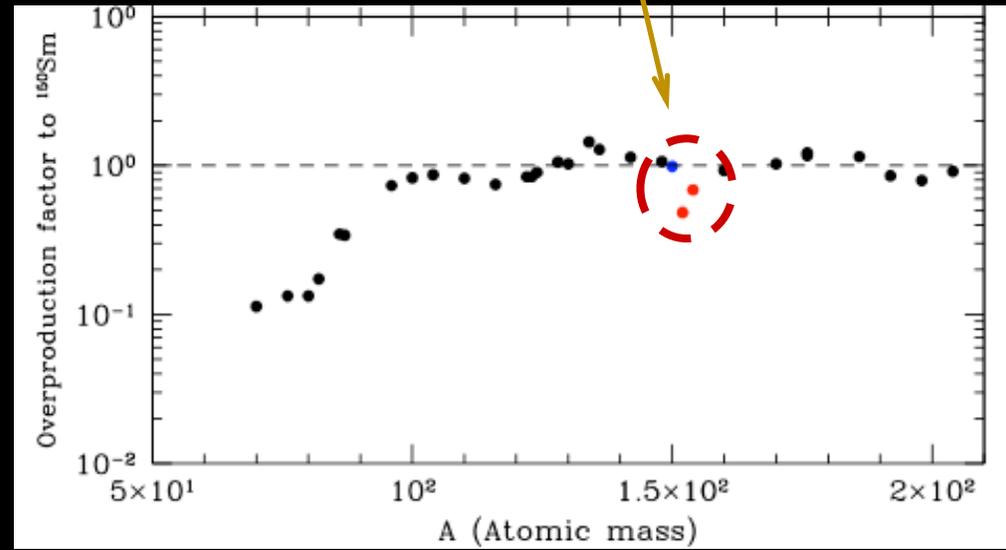
*Il  $^{151}\text{Sm}$  ha un tempo di dimezzamento di 93 anni, che si riduce a 3 in condizioni stellari*

### Misura delle condizioni termodinamiche presso il sito di nucleosintesi

$^{152}\text{Gd}$  e  $^{154}\text{Gd}$  sono isotopi detti **s-only**: possono essere prodotti solo dal processo s, poiché gli isobari stabili del Sm li schermano dalla catena di decadimenti  $\beta$  dovuta al processo r



Disaccordo tra osservazioni e modelli (GCE)



E' necessario risolvere le discrepanze nei dati nucleari

# TECNOLOGIA NUCLEARE

Applicazioni al campo della

## Reattori Gen-IV

Utilizzo di *burnable neutron poisons* nei reattori nucleari.

Per aumentare l'efficienza e ridurre i costi risulta utile il poter aumentare l'arricchimento di  $^{235}\text{U}$  nel combustibile nucleare.

Questa opzione pone forti limitazioni per questioni di sicurezza data l'alta reattività nella fase di accensione.

Una possibile compensazione la si ottiene caricando il combustibile con *burnable neutron poisons*, cioè con isotopi la cui sezione d'urto di cattura neutronica sia elevata;

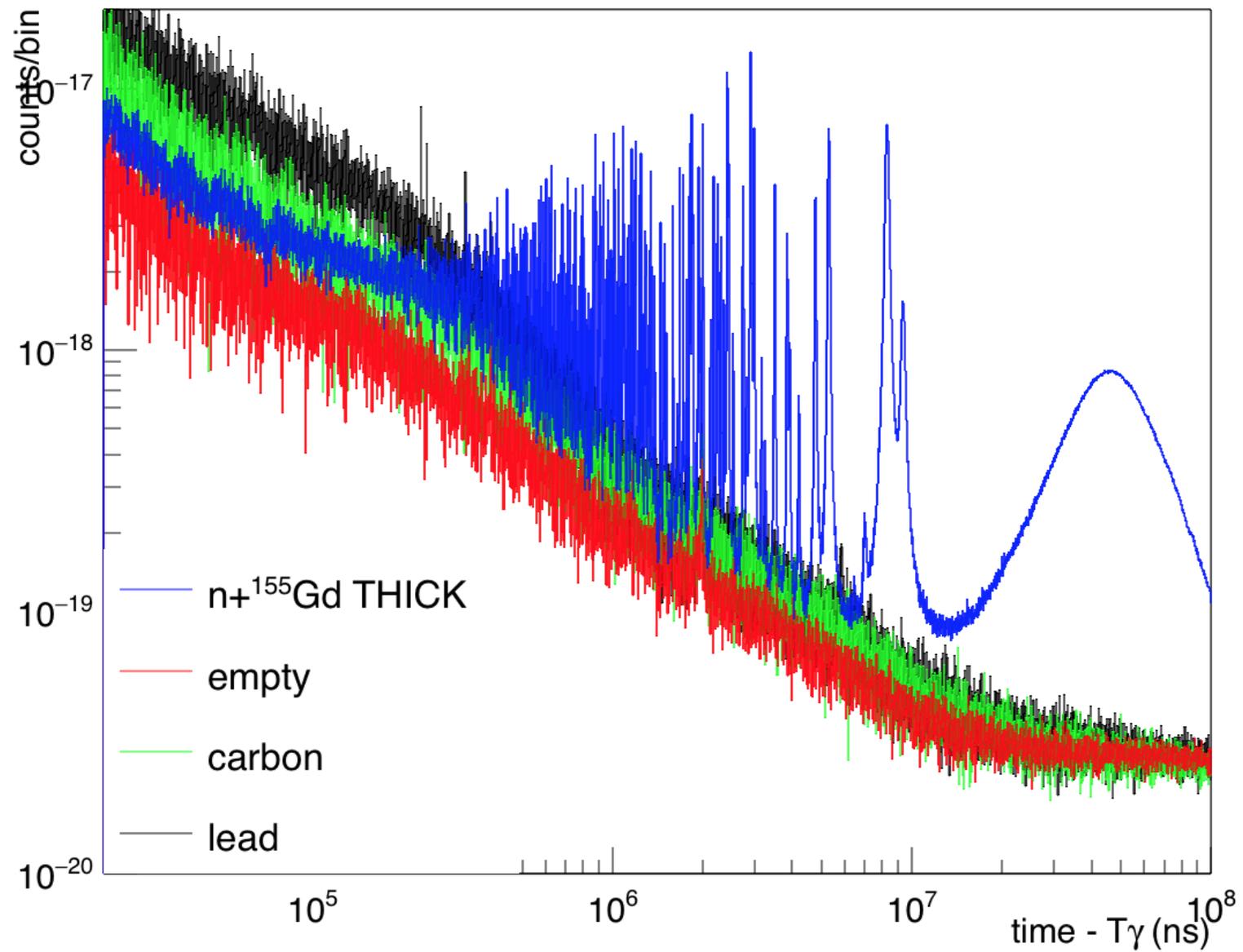
*burnable neutron poisons* e isotopi fissili vengono così consumati insieme.

Gli isotopi dispari del Gd ( $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ ) presentano una elevatissima sezione d'urto di cattura per neutron di bassa energia (dal termico a  $\approx 10$  eV).

Nonostante la loro importanza le sezioni d'urto di cattura neutronica non sono state studiate approfonditamente e non sono note con l'accuratezza richiesta dall'industria nucleare.

Referenza	Anno	Thermal xs (b)	Rispetto a ENDF
Pattenden <i>2<sup>nd</sup> At. En. Conf. Geneva, 16</i>	1958	264000	+3.9%
Tattersall <i>Jour. Nucl. Ener. A 12, 32</i>	1960	213000	-20%
Moller <i>Nucl. Sci. Eng. 8, 183</i>	1960	254000	=
Groshev <i>Izv. Akad. Nauk, SSSR, 26, 1118</i>	1962	240000	-6%
Sun <i>J. Radioanal. Nucl. Chem. 256, 541</i>	2003	232000	-9%
Leinweber <i>Nucl. Sci. Eng. 154, 261</i>	2006	226000	-12%
<b>Mughabghab</b> <i>Evaluation (adopted in ENDF/B-VII)</i>	<b>2006</b>	<b>254000 ± 0.3%</b>	<b>=</b>
Choi <i>Nucl. Sci. Eng. 177, 219</i>	2014	239000	-6% <sub>5</sub>

# Detector 1



Prima misura sperimentale assoluta



Isotopi stabili irradiati  
a ILL/Grenoble  
per 60 giorni  
a  $1.5 \times 10^{15}$  n/cm<sup>2</sup>/s

Bersaglio di <sup>170</sup>Er  
arricchito al 1.8% di <sup>171</sup>Tm  
3.6 mg  
(vita media 1.9 anni)

Bersaglio di <sup>203</sup>Tl  
arricchito al 5.3% di <sup>204</sup>Tl  
11 mg  
(vita media 3.8 anni)



# Cosmocronologia



s-only

$$\sigma N_s(^{186}\text{Os}) = \sigma N_s(^{187}\text{Os})$$

Os	Os 184 0.02	Os 185 94 d	Os 186 1.58	Os 187 1.6	Os 188 13.3	Os 189 16.1	Os 190 26.4	Os 191 15.4 d	Os 192 41.0
Re	Re 183 71 d	Re 184 38 d	Re 185 37.4	Re 186 87.64 h	Re 187 42.3x10 <sup>9</sup> a	Re 188 10.98 h	Re 189 24.3 h	Re 190 3.1 m	
W	W 182 26.3	W 183 14.3	W 184 30.67	W 185 15.1 d	W 186 28.6	W 187 23.8 h	W 188 65 d		

s-process

r-only

r-process

-decay half-life of <sup>187</sup>Re (42.3 Gyr)

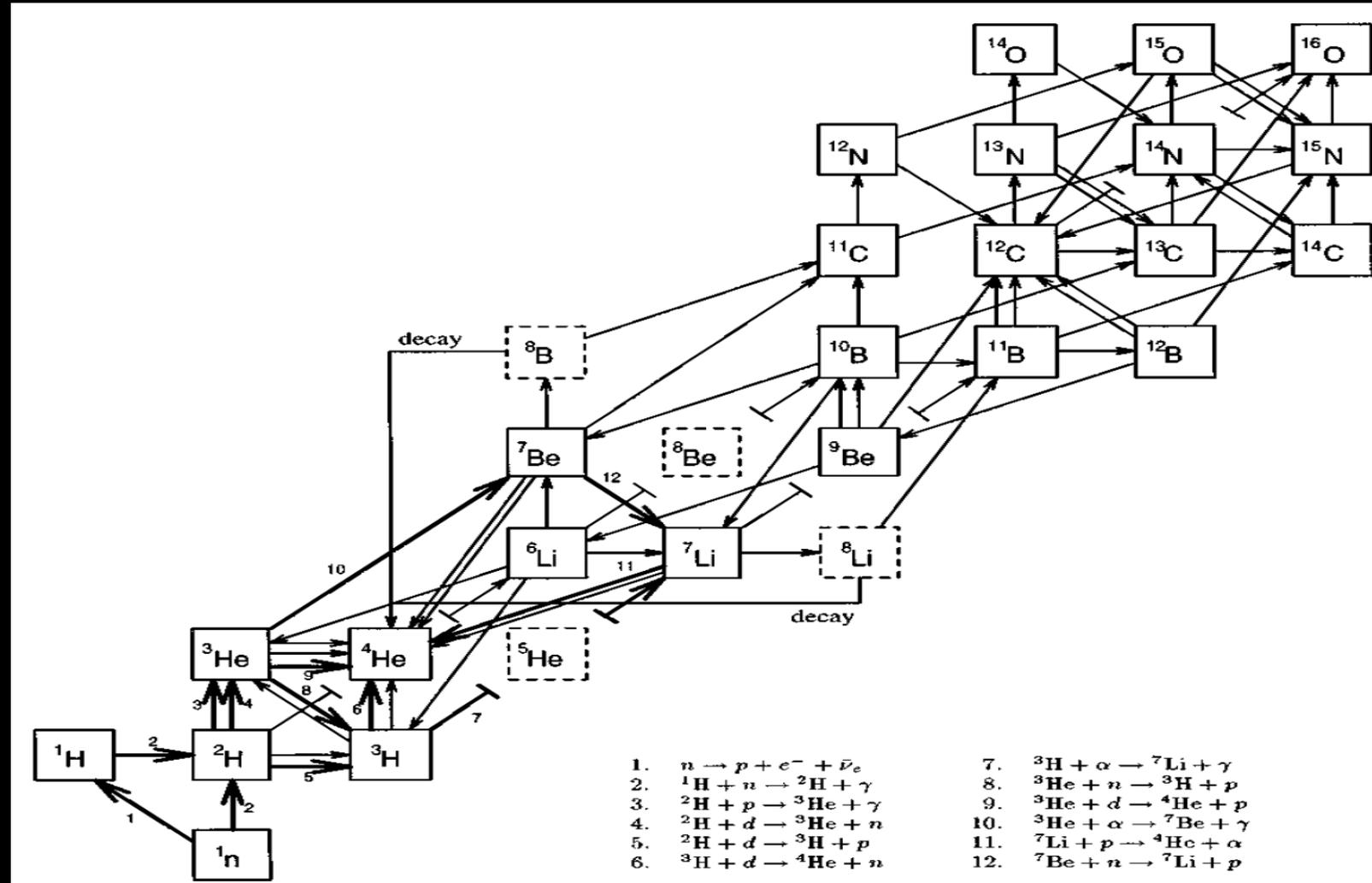
<sup>187</sup>Re contributes to the abundance of the daughter <sup>187</sup>Os

# ${}^7\text{Be}(n, p), (n, \alpha)$

LA Big Bang Nucleosynthesis (BBN) propone la sequenza delle reazioni nucleari che portano alla sintesi degli elementi leggeri, fino al Na nei primi istanti di vita dell'Universo (0.01-1000 sec).

BBN si affida a 3 parametri:

- the baryon-to-photon ratio,
- the number of species of neutrino,
- the lifetime of neutron.



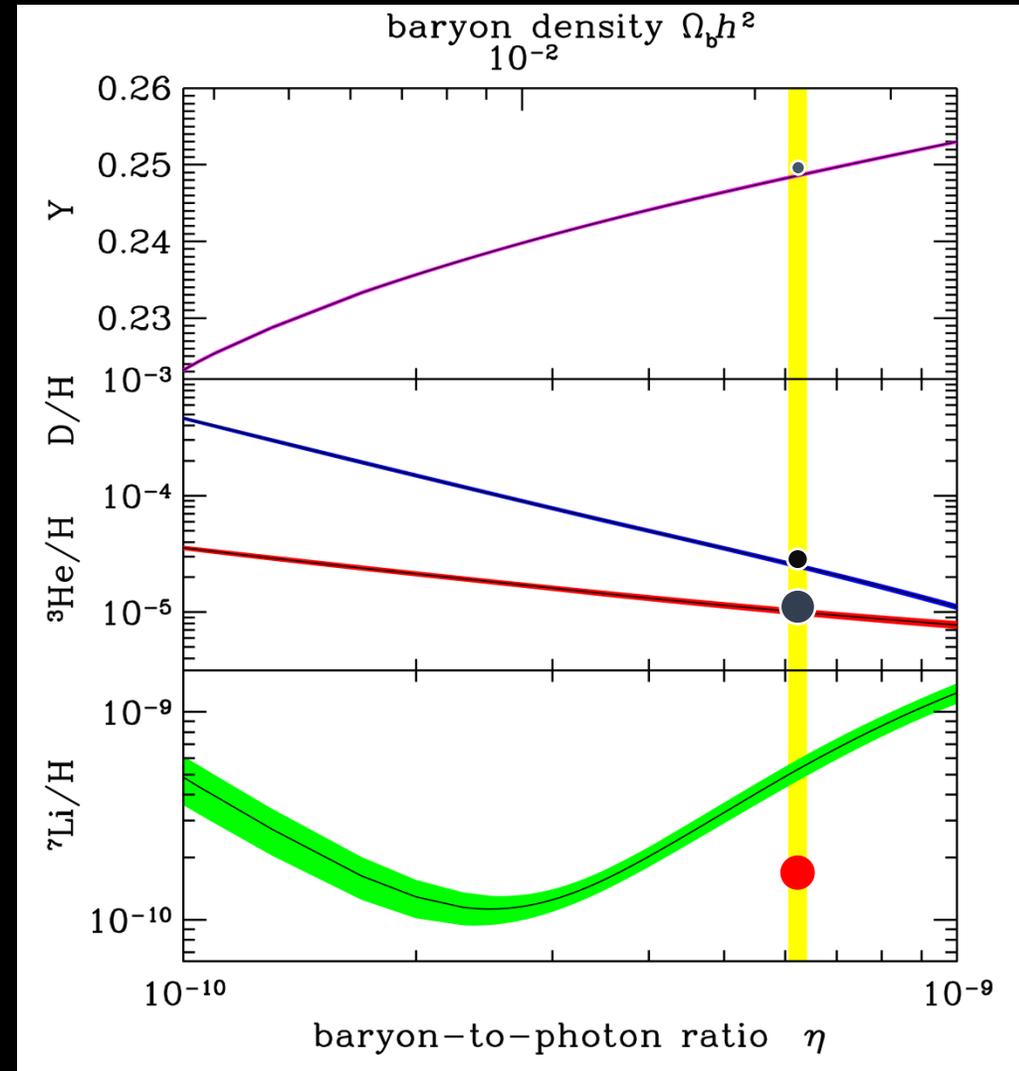
# ${}^7\text{Be}(n, p), (n, \alpha)$

BBN predice con successo l'abbondanza primordiale di elementi quali  ${}^4\text{He}$ , D ed  ${}^3\text{He}$ .

Una notevole discrepanza (fattore 2-4) si registra tra l'abbondanza predetta per il  ${}^7\text{Li}$  ed i valori ricavati da misure sperimentali.



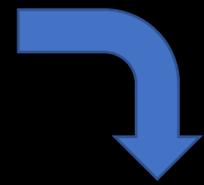
**Cosmological Lithium Problem**



# ${}^7\text{Be}(n, p), (n, \alpha)$

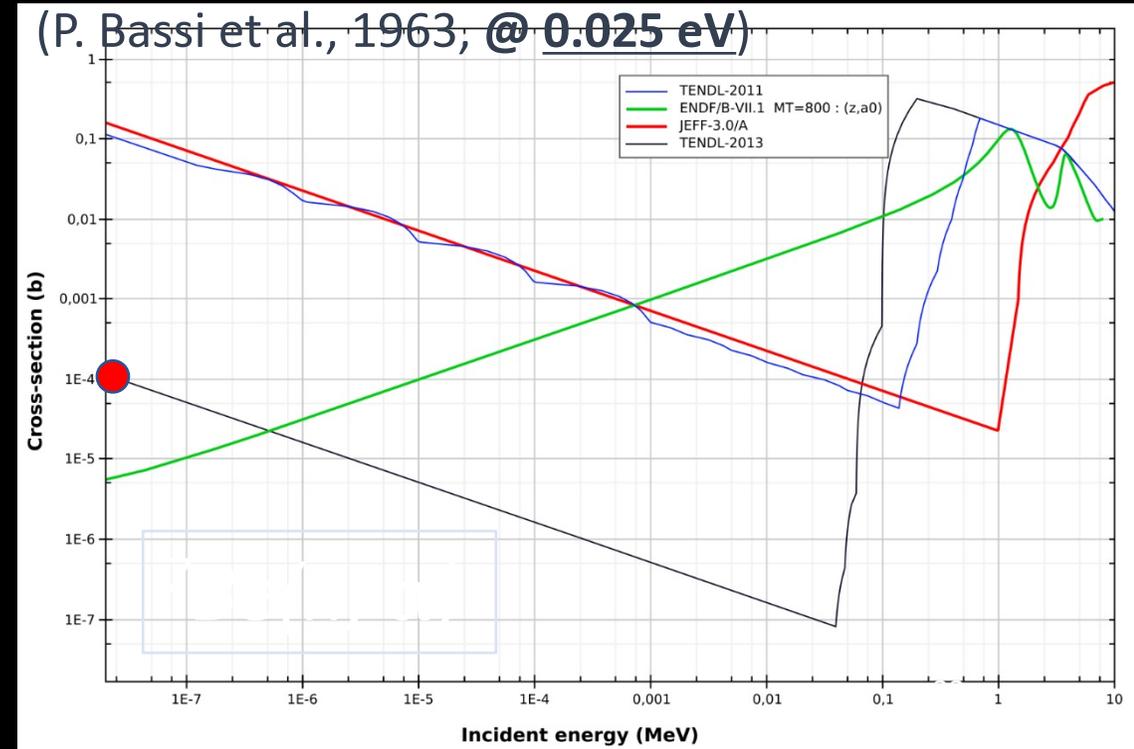
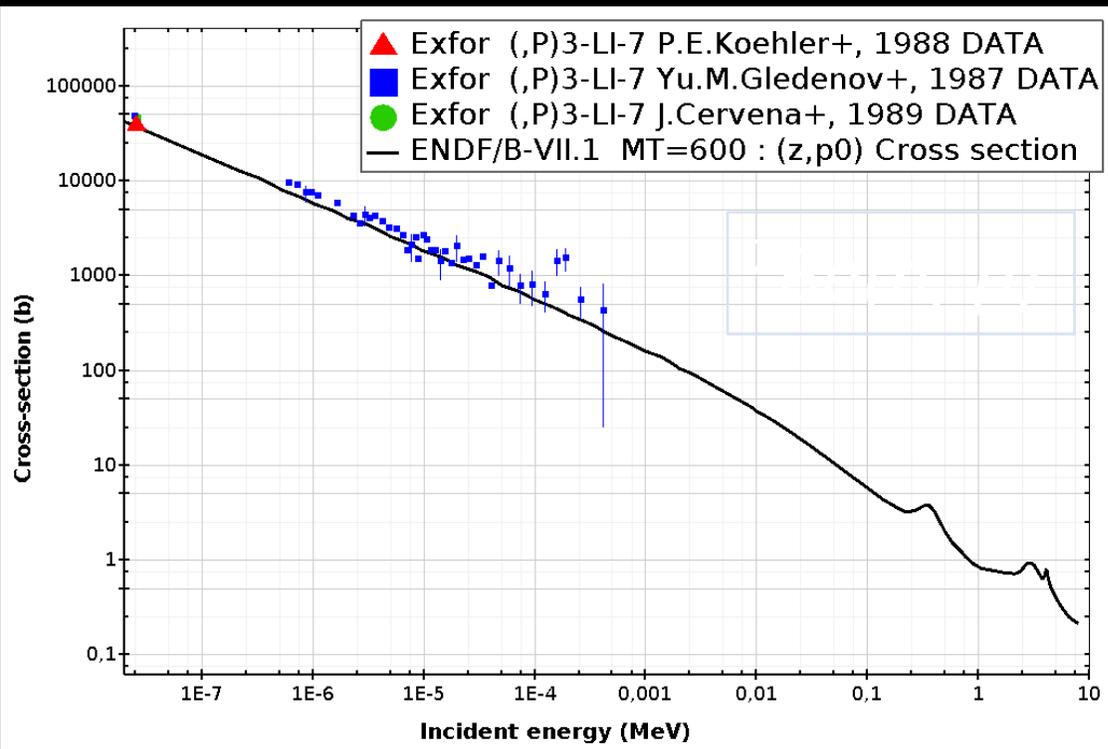
Il 95% di  ${}^7\text{Li}$  primordiale è prodotto attraverso la cattura elettronica del  ${}^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}=53.2$  d)

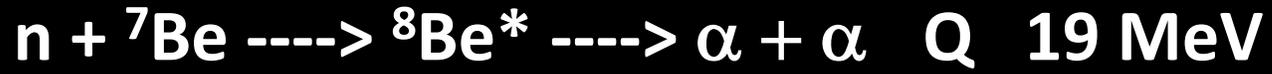
${}^7\text{Be}$  è distrutto via  $(n, p)$  ( $\approx 97\%$ ) e  $(n, \alpha)$  ( $\approx 2.5\%$ )



Un tasso più elevato di distruzione  ${}^7\text{Be}$  potrebbe risolvere o almeno in parte ridurre il Cosmological Lithium Problem

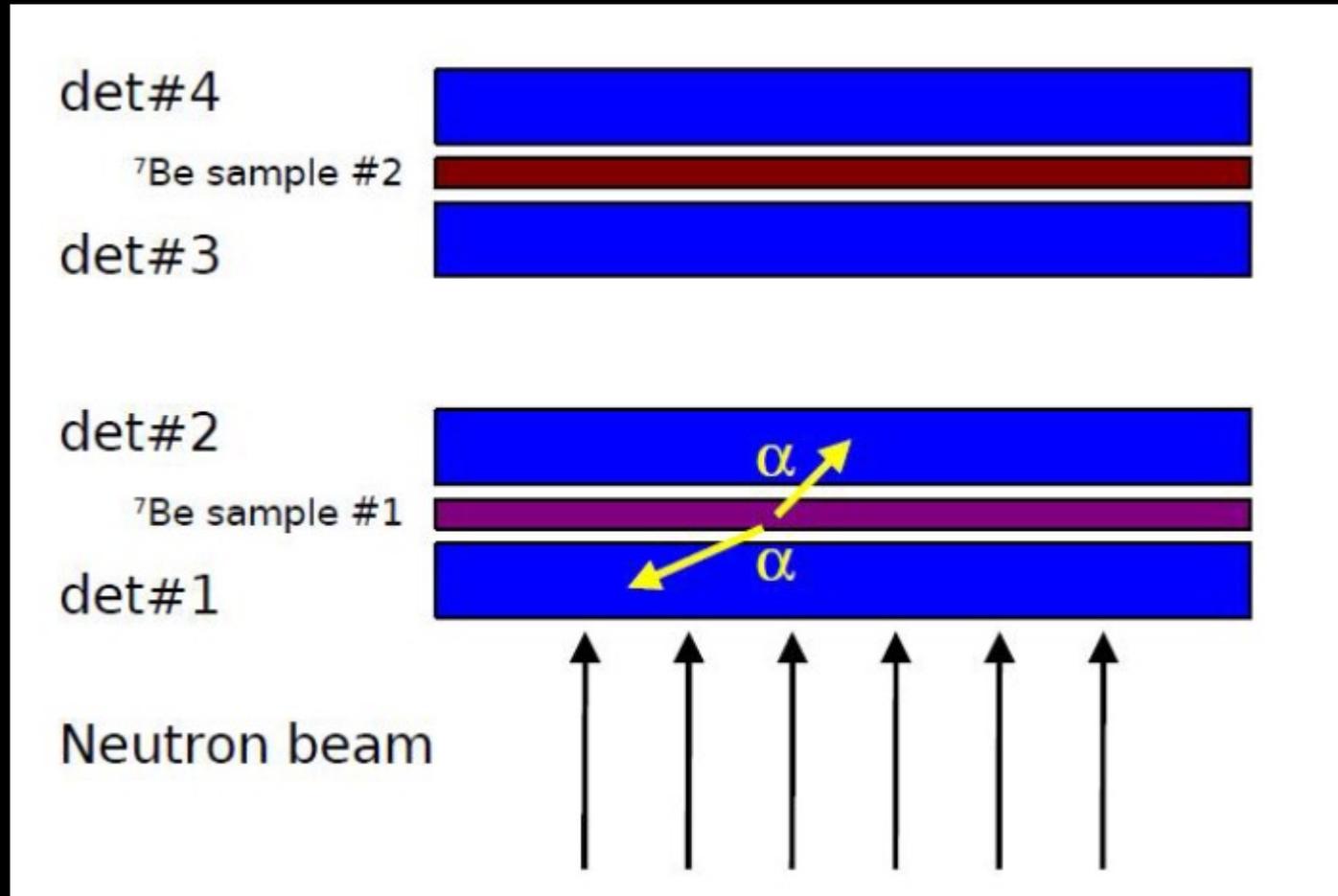
## Solo una misura diretta





Rivelatori al Silicio **direttamente sotto fascio**

Due campioni di misura, 40 GBq attività

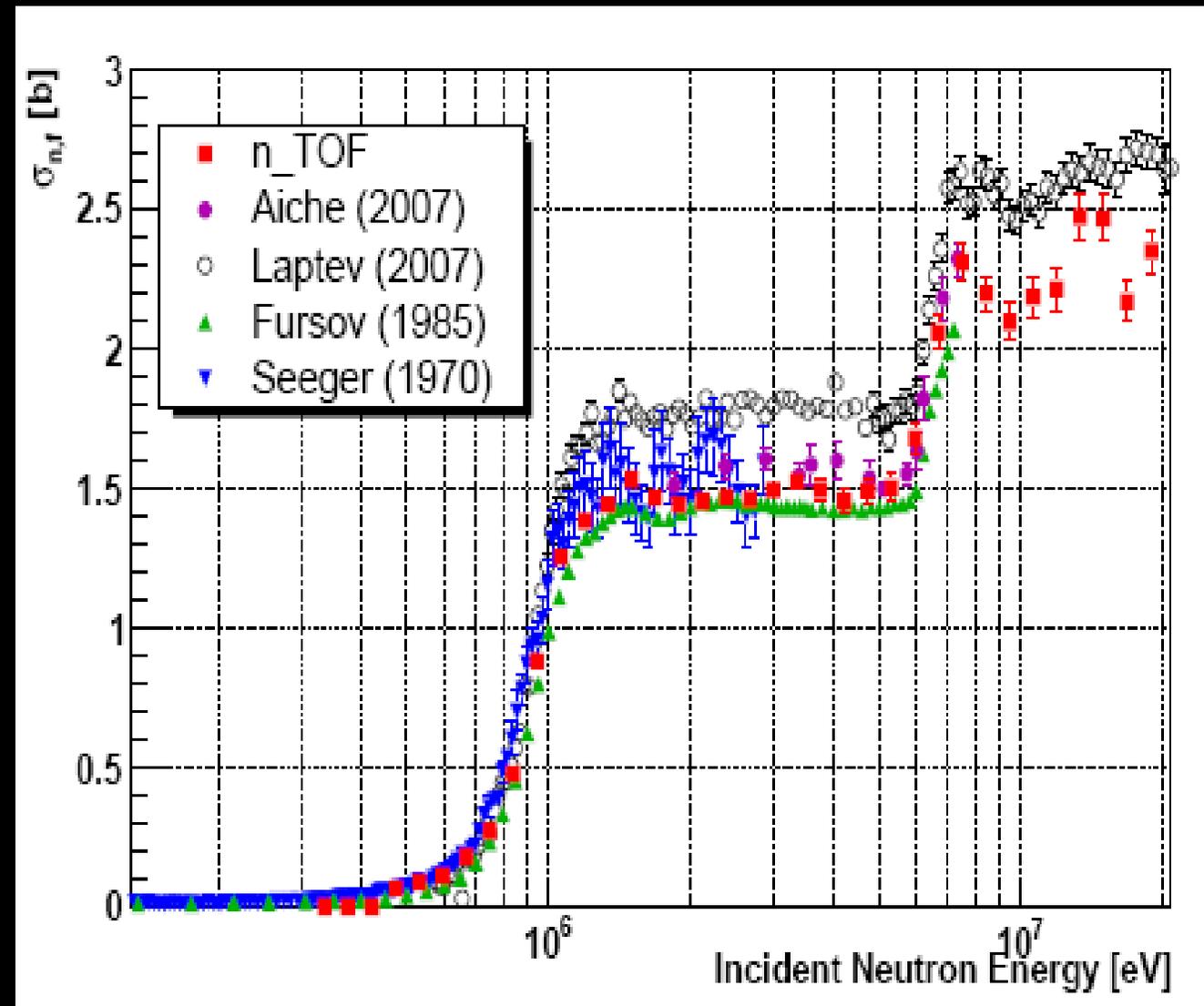


<b>Target Accuracies for Fast Reactors</b>		Energy Range	Current Accuracy (%)	Target Accuracy (%)
U238	inel	0.5 ÷ 6.1 MeV	10 ÷ 20	2 ÷ 3
	capt	2.04 ÷ 24.8 keV	3 ÷ 9	1.5 ÷ 2
Pu241	fiss	454. eV ÷ 1.35 MeV	8 ÷ 20	2 ÷ 5
Pu239	capt	2.04 ÷ 498 keV	7 ÷ 15	4 ÷ 7
Pu240	fiss	0.498 ÷ 1.35 MeV	6	1 ÷ 3
Pu242	fiss	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

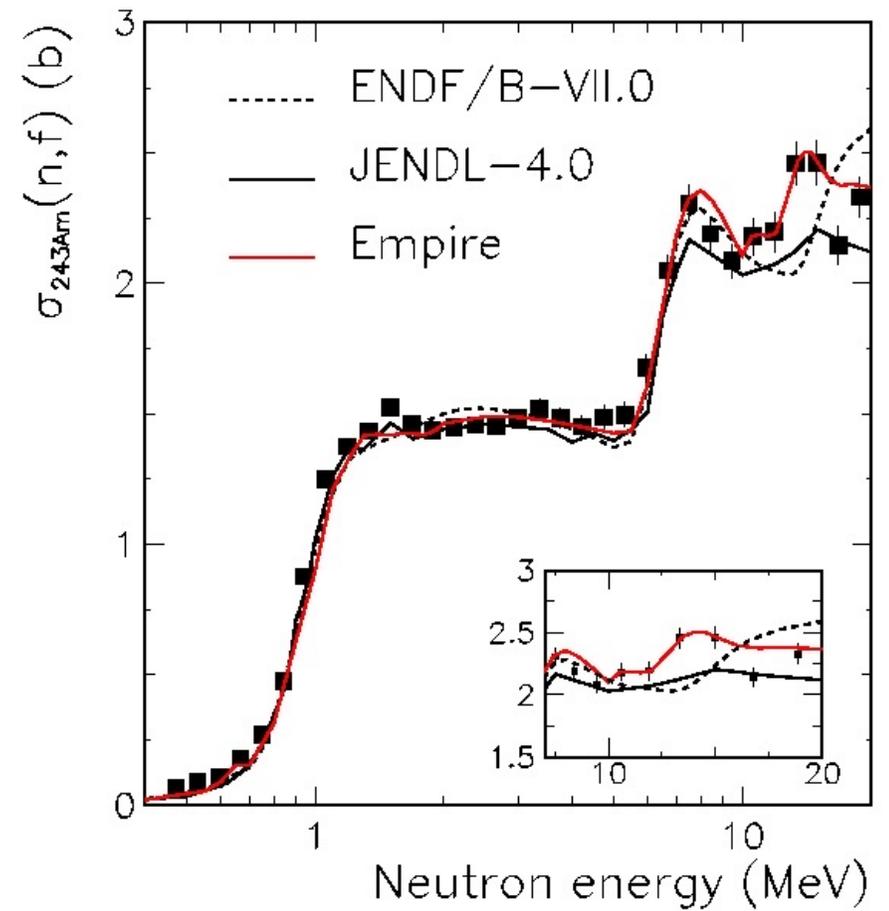
**M. Salvatores**, Uncertainty and target accuracy assessment for innovative systems using recent covariance data evaluations, Nucl. Sc. NEA/WPEC-26 (2008) ISBN 978-92-64-99053-1, [www.nea.fr/html/science/wpec/volume26/volume26.pdf](http://www.nea.fr/html/science/wpec/volume26/volume26.pdf)

@n\_TOF

e.g. il caso dell' $^{243}\text{Am}(n, f)$



F. Belloni, et al. EPJ A 110 022501 (2011)



*È stato bello, teniamoci in contatto.*