

**Luigi Cosentino**

*INFN - LNS*

***L'esperimento n\_TOF al CERN***

*La fisica con i fasci di neutroni permette di investigare reazioni di fondamentale importanza in svariati ambiti scientifici e tecnologici.  $n\_TOF$  è una facility che consente di misurare sezioni d'urto di reazioni indotte da neutroni, con elevata risoluzione, bassa incertezza e in un ampio intervallo di energia.*

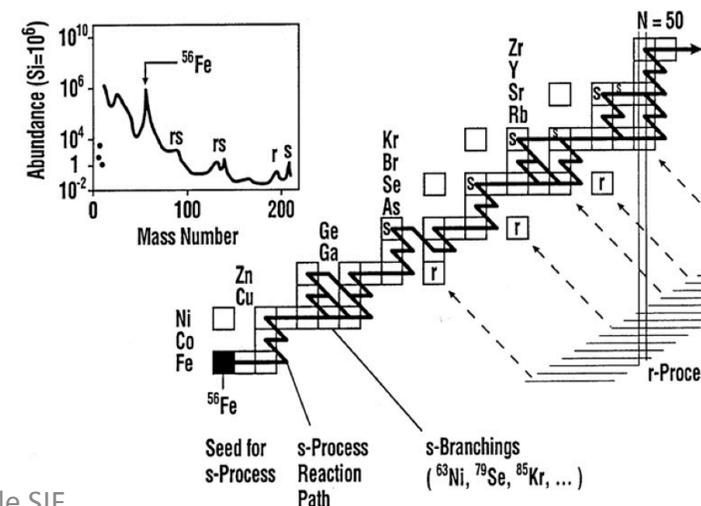
## Astrofisica Nucleare:

- Nucleosintesi degli elementi pesanti
- **Evoluzione stellare**
- Nucleosintesi del Big Bang



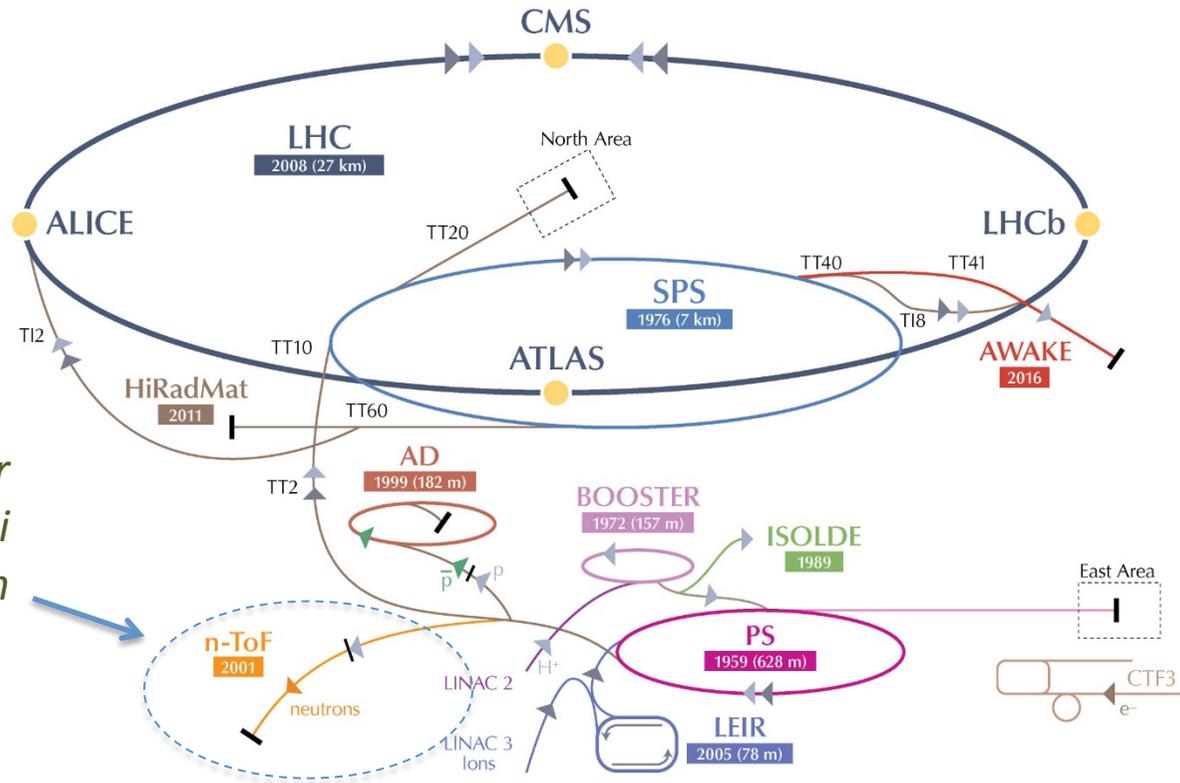
## Tecnologie nucleari emergenti:

- **Reattori di IV generazione**
- Fusione
- **Trasmutazione/ Incenerimento delle scorie**



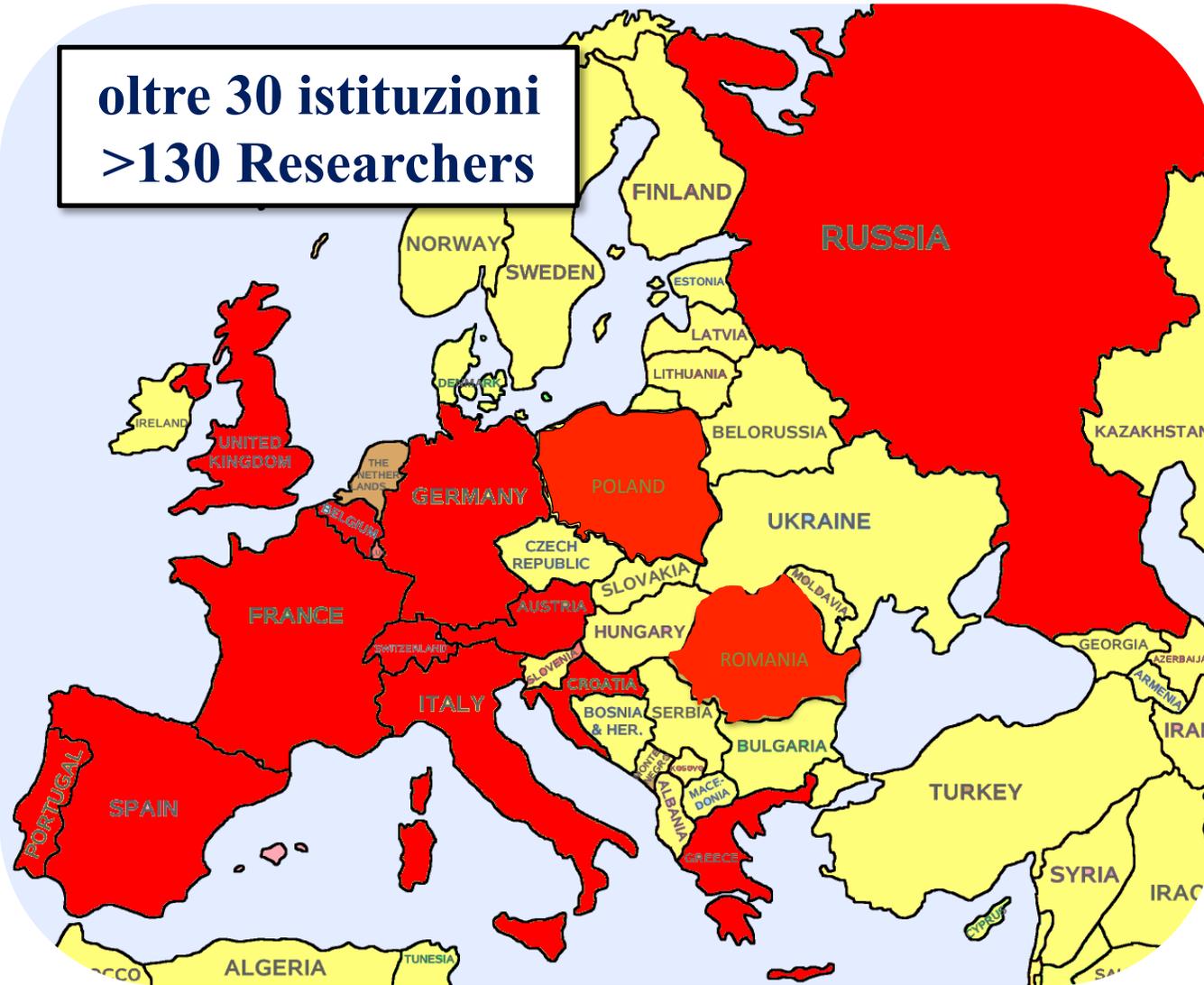
## neutron Time Of Flight

*Neutroni prodotti per spallazione, dall'interazione dei protoni da 20 GeV/c del PS con un bersaglio di piombo.*



***Elevato flusso istantaneo di neutroni in sala sperimentale con alta risoluzione energetica, in un ampio spettro dal termico fino al GeV.***

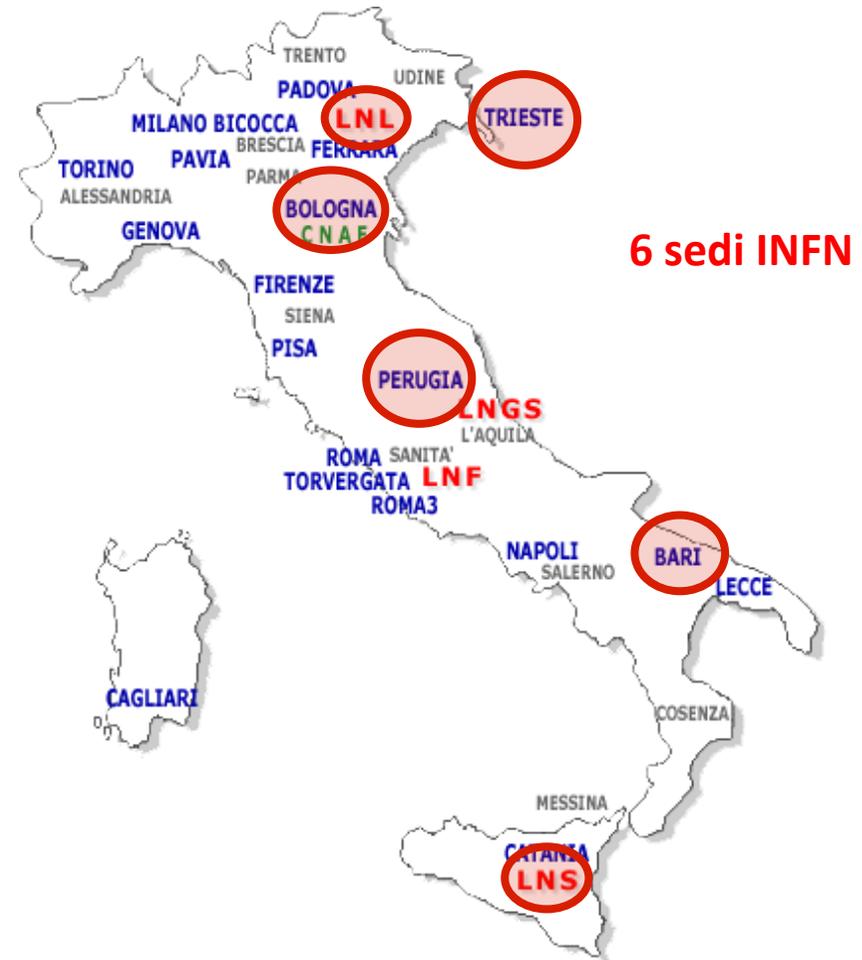
**oltre 30 istituzioni  
>130 Researchers**

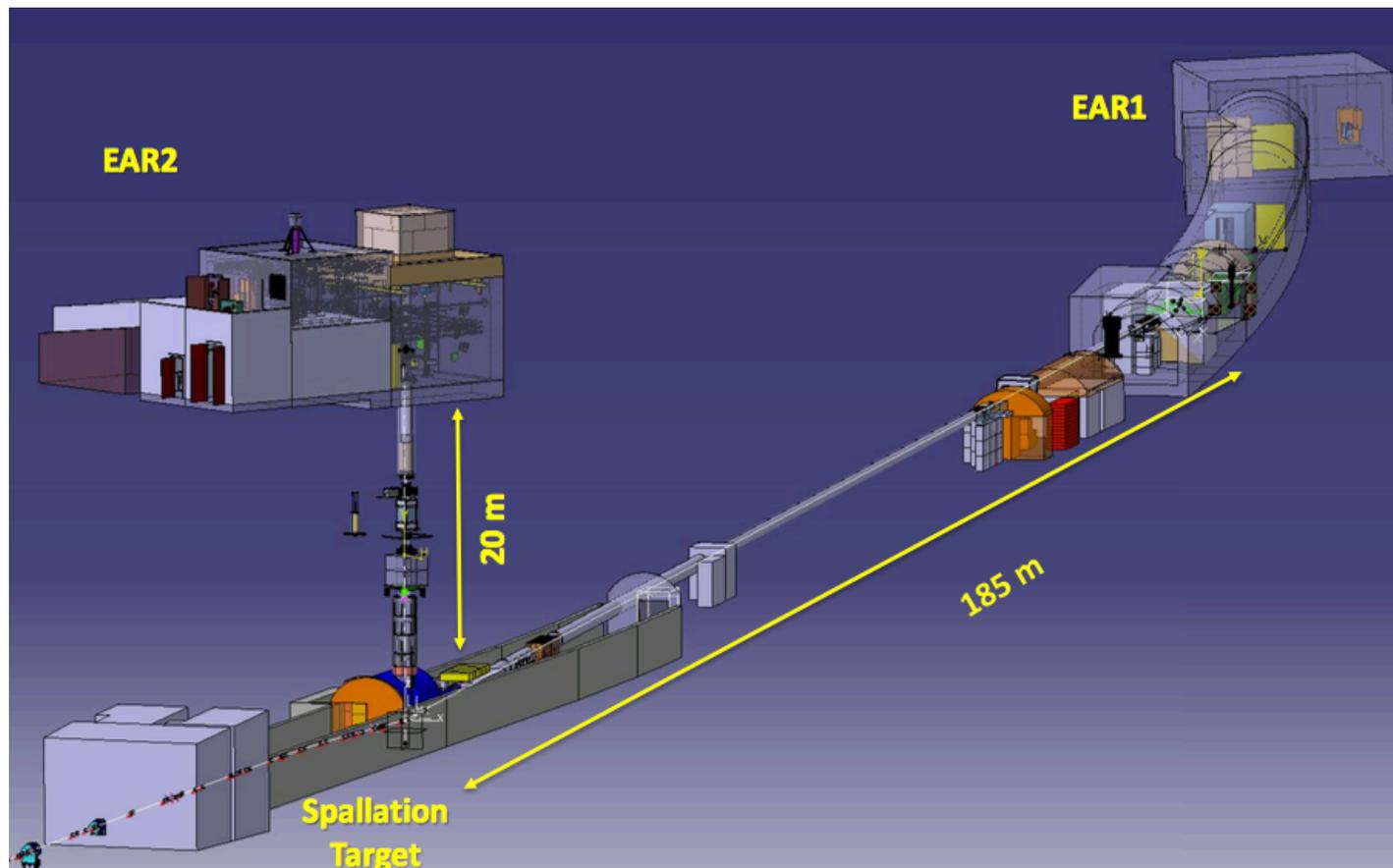


INFN ~ 19% ricercatori  
 INFN ~ 55% pubblicazioni  
 INFN ~ 11% contributo economico

## *Intense collaborazioni con:*

- **ENEA-Bologna**
- **INAF-Teramo**
- **CNR-Bari**





**Proton Synchrotron beam: high energy, high peak current, low duty cycle**

***Fascio di protoni pulsato con frequenza di  $\approx 0.8$  Hz***

**$7 \cdot 10^{12}$  protoni/impulso       $\sim 300$  neutroni prodotti per protone incidente**

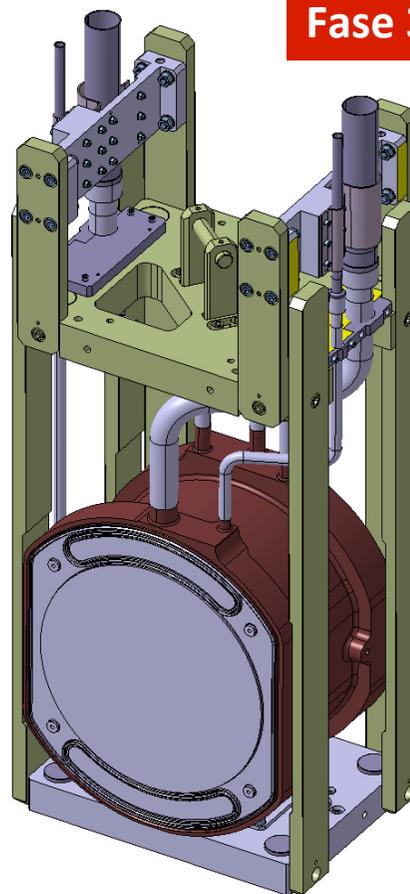
# Il bersaglio di spallazione

**Fase 1: 2001 – 2004 (EAR1)**



**Fase 2: 2009– 2012 (EAR1)**

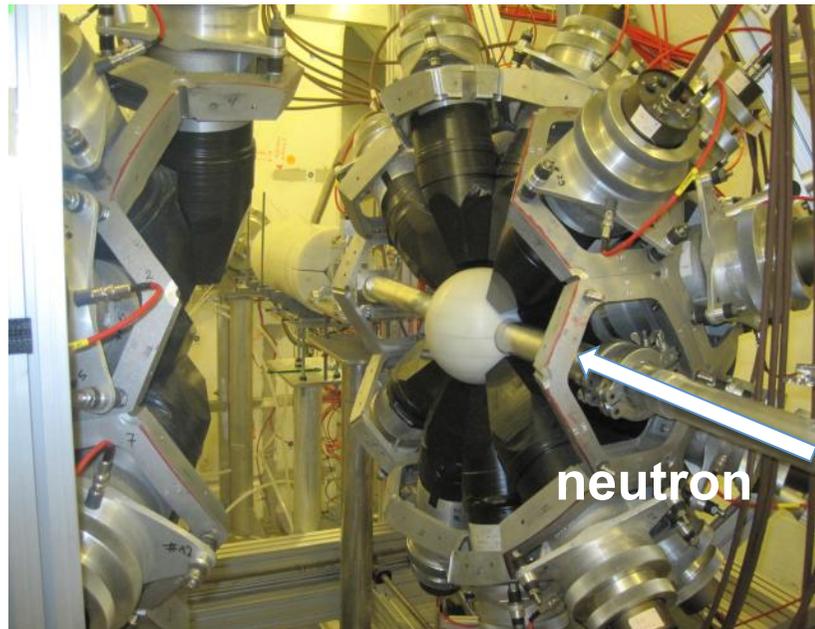
**Fase 3: 2014-2018 (EAR1 + EAR2)**



# EAR1: Tour virtuale

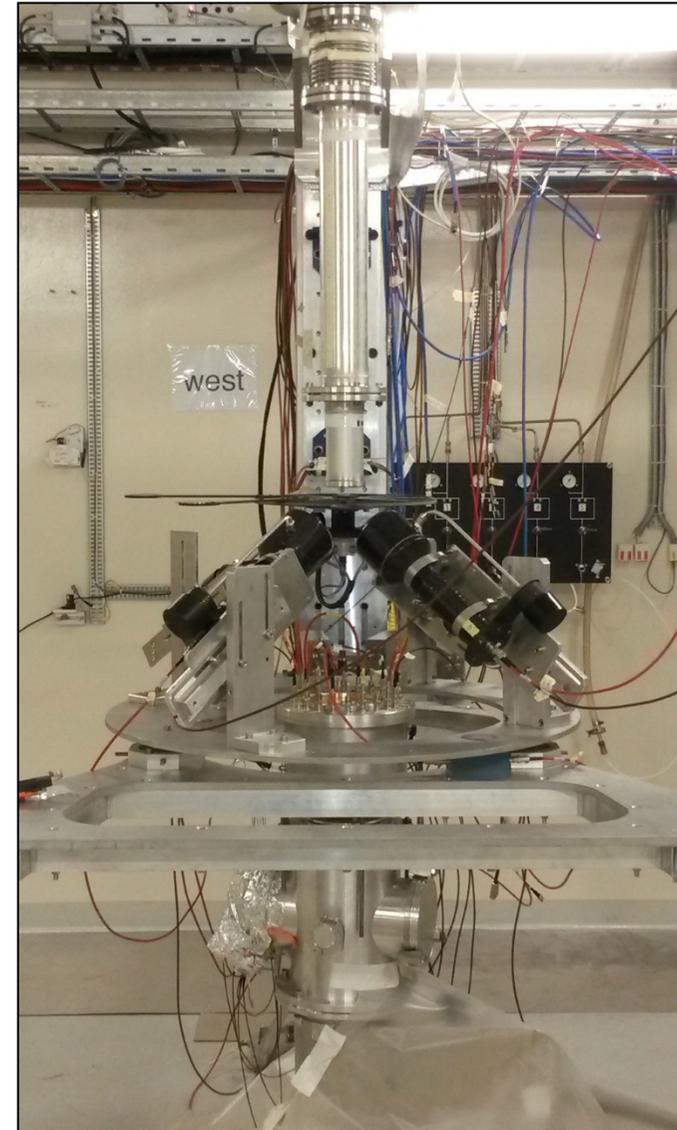


# EAR1: Tour virtuale

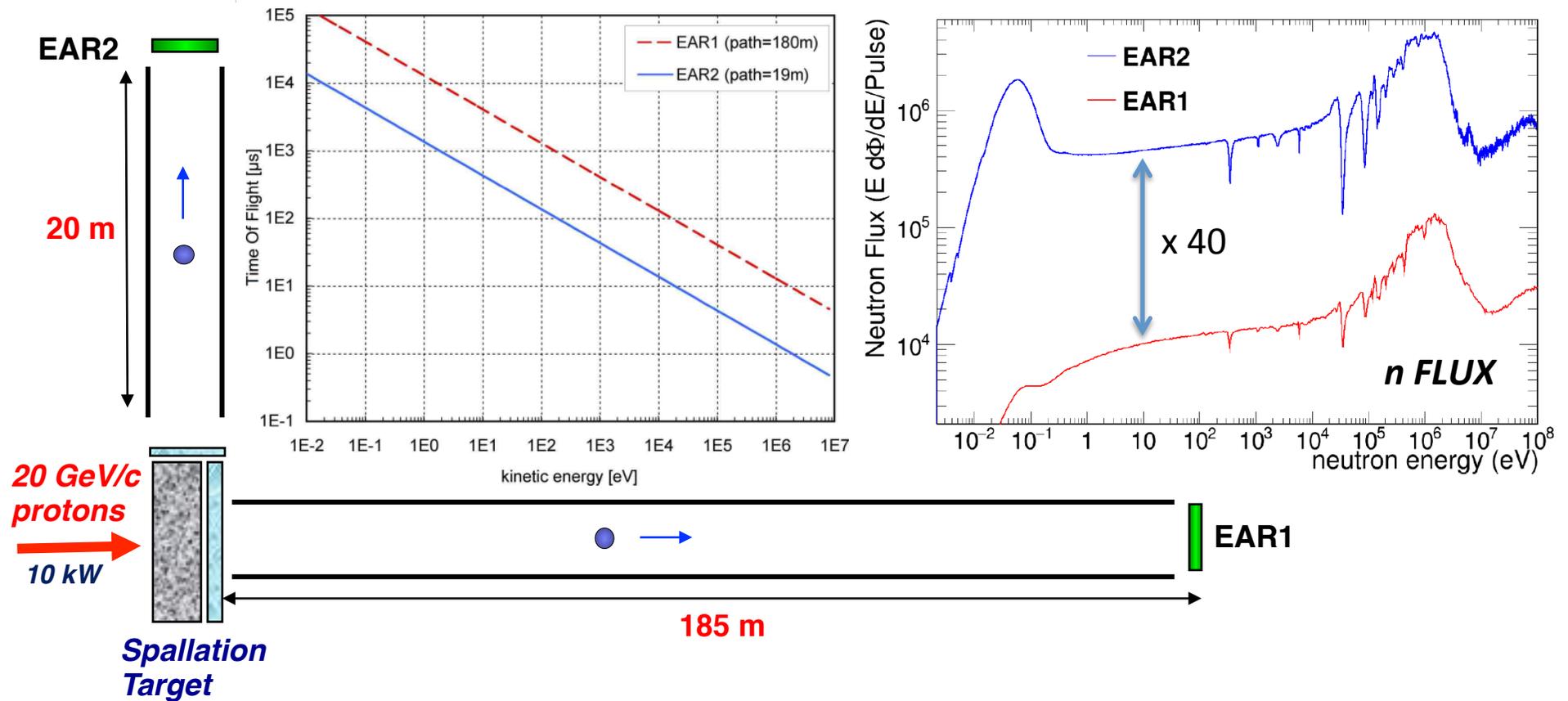




**neutroni**



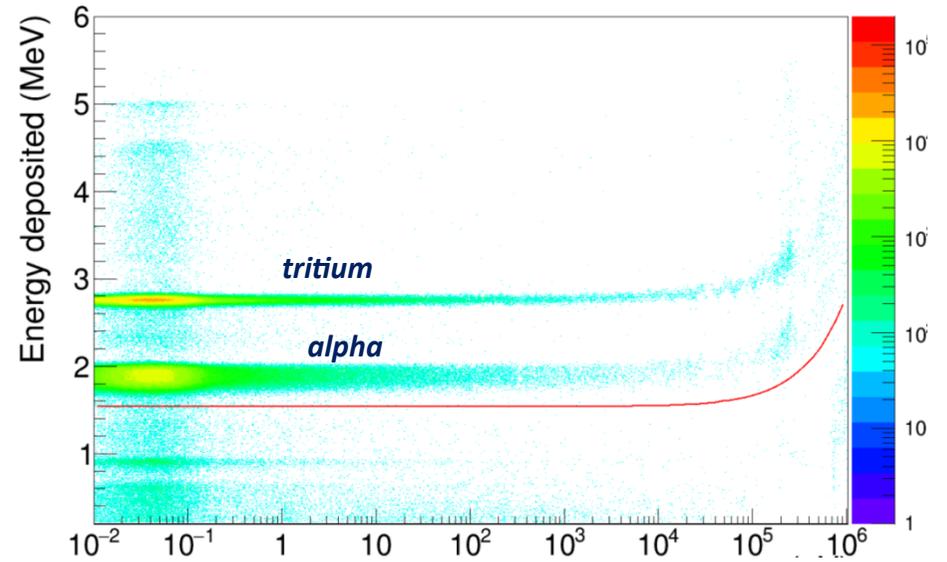
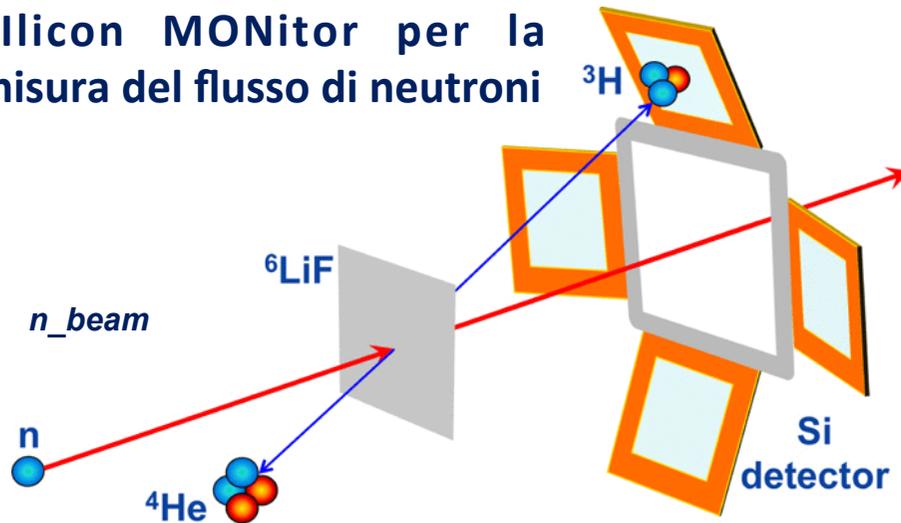
# Proprietà dei fasci di neutroni



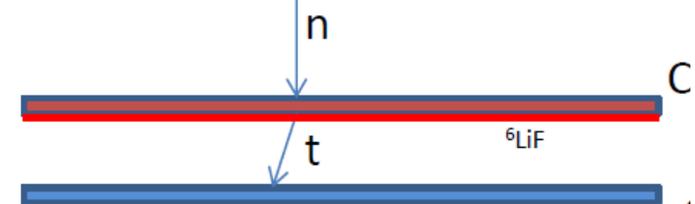
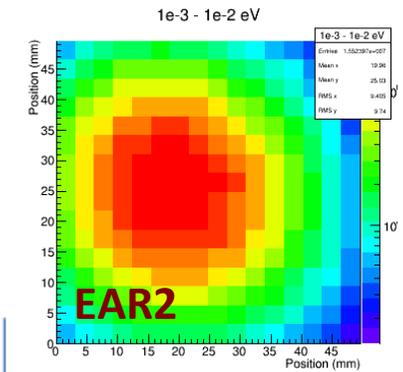
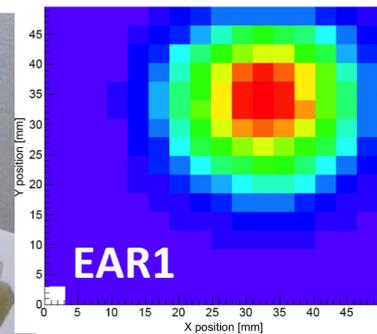
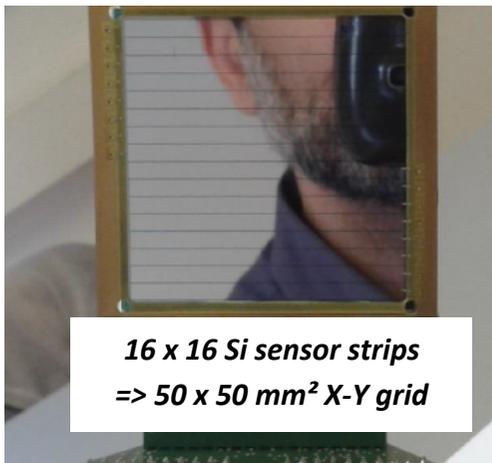
- **Elevato flusso di neutroni in EAR1 e EAR2** ( $10^5$  n/cm<sup>2</sup>/pulse and  $10^6$ - $10^7$  n/cm<sup>2</sup>/pulse)
- **Energia**  $25\text{meV} < E_n < 1\text{GeV}$
- **Risoluzione**  $\Delta E/E \sim 10^{-4}$  @ EAR1
- **misure con isotopi radioattivi** ad elevata attività (EAR2)
- **misure di reazioni con basse sezioni d'urto**

## *Alcuni contributi strumentali dell'INFN*

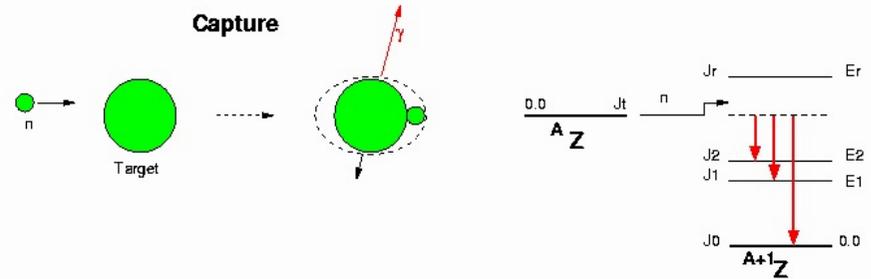
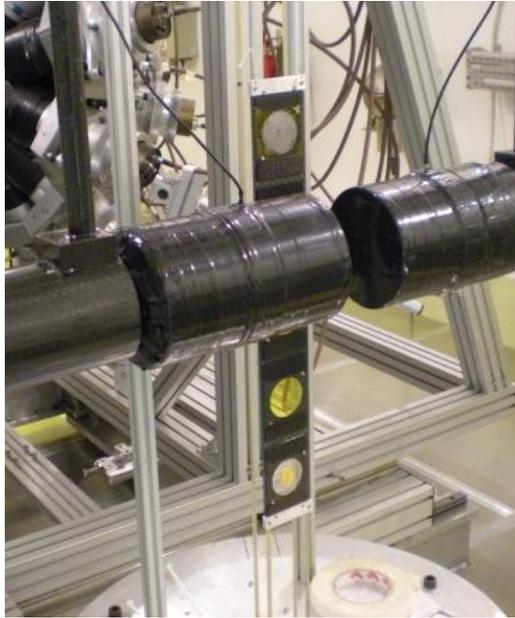
## Silicon MONitor per la misura del flusso di neutroni



## Misura del profilo 2D del fascio di n



## Cambia-campioni per EAR1 & EAR2



*Rivelatore per cattura basato su scintillatore liquido deuterato  $C_6D_6$  a ridotta neutron sensitivity*

*Un elevato flusso istantaneo di neutroni implica un alto numero di eventi per ogni bunch, entro un intervallo di tempo di 100ms.*

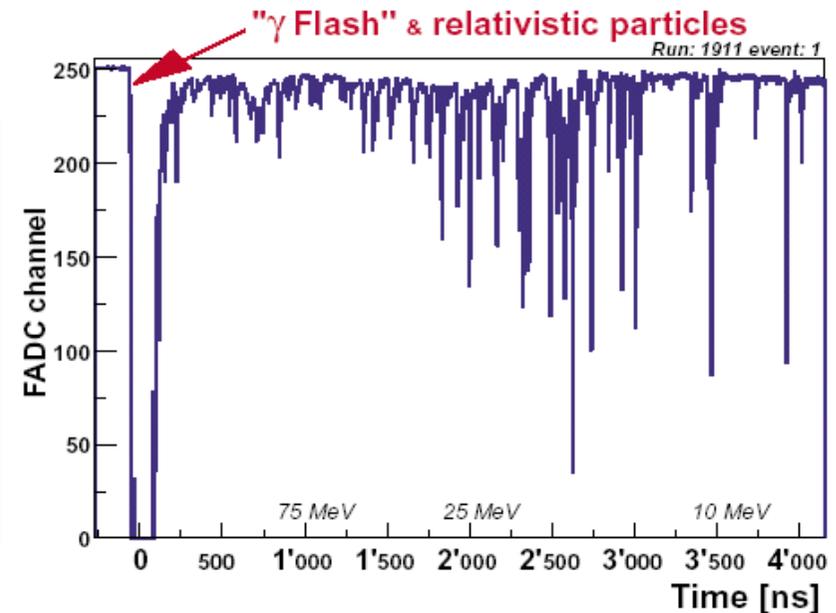
*Il DAQ è basato su Flash ADC, che campionano e registrano i segnali come in un'oscilloscopio digitale*

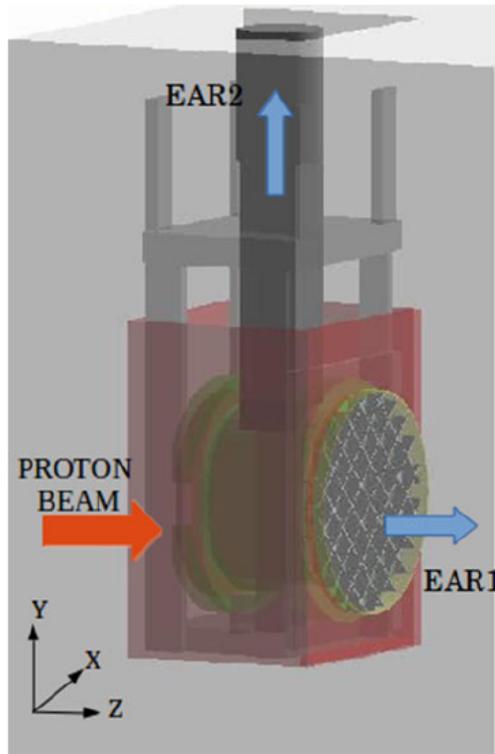
**Frequenza di campionamento max. 1.8 GS/s**

**Soppressione degli zeri**

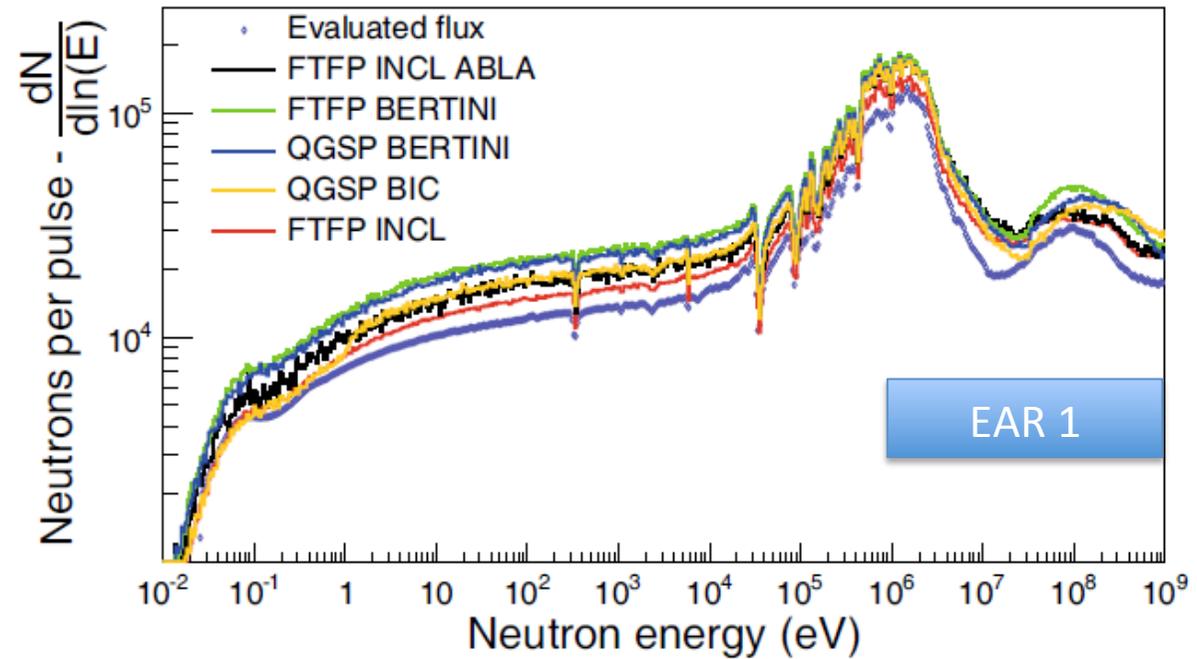
### Ricostruzione offline del segnale

- Procedure di fitting per la misura di tempo e carica
- permette di riconoscere e risolvere eventi di pile-up
- no dead-time

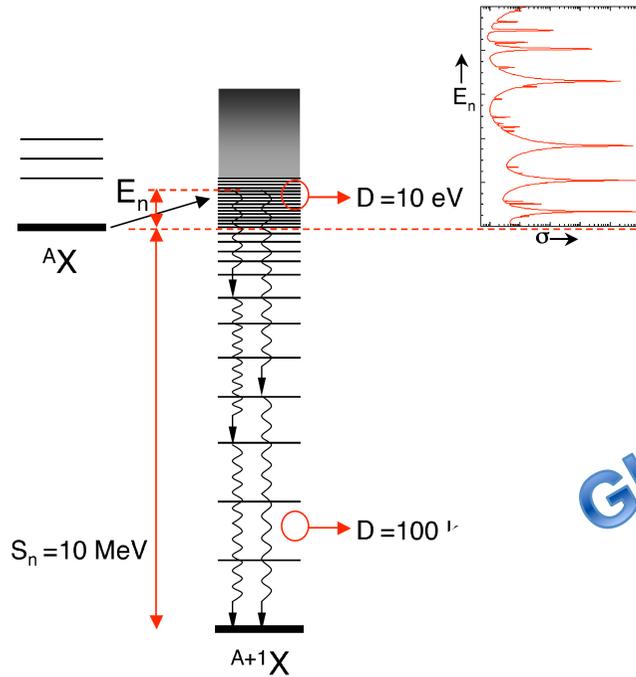




Diversi modelli di cascata intra-nucleare prevedono flussi diversi



## cattura - (n,γ)



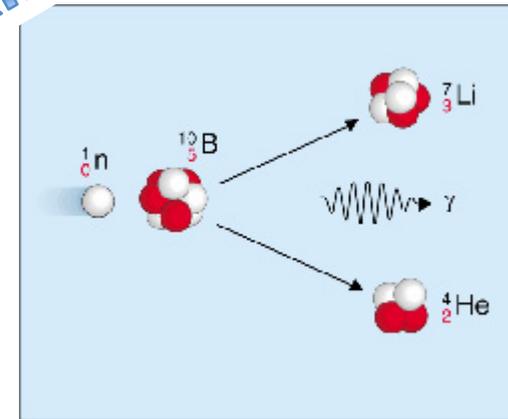
gamma rays

## fissione - (n,f)



frammenti di fissione

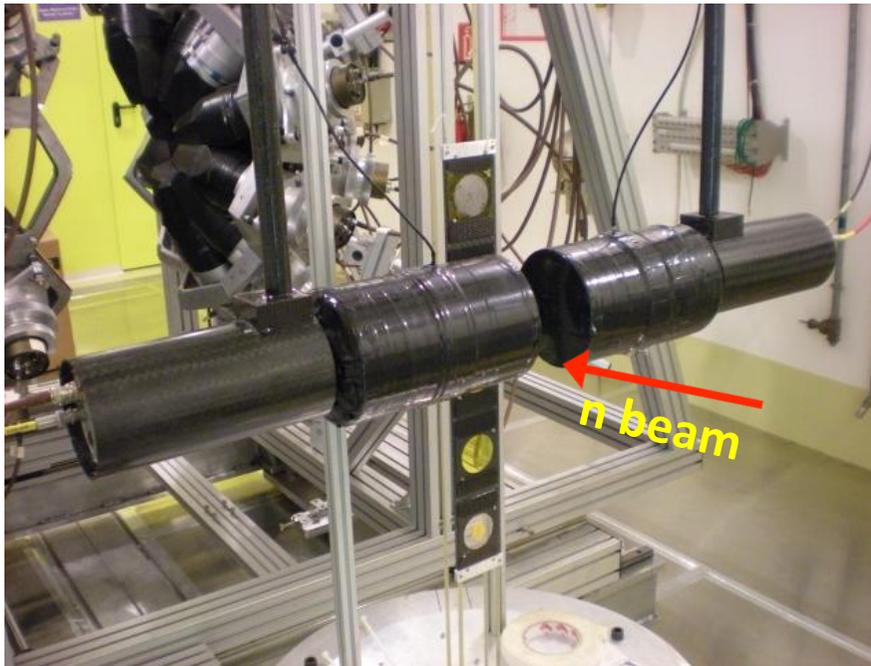
## (n,cp)



particelle cariche

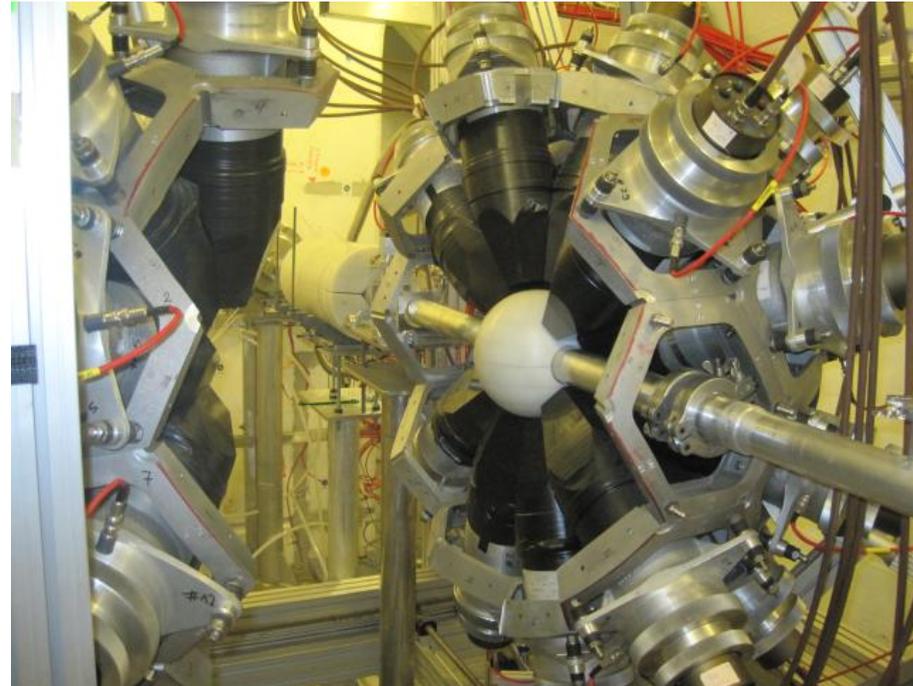
Gli apparati sperimentali

La misura nelle reazioni di cattura consiste nel rivelare la radiazione  $\gamma$  emessa nei processi di diseccitazione.



## $C_6D_6$ (Scintillatore liquido benzene deuterato)

- low neutron sensitivity device

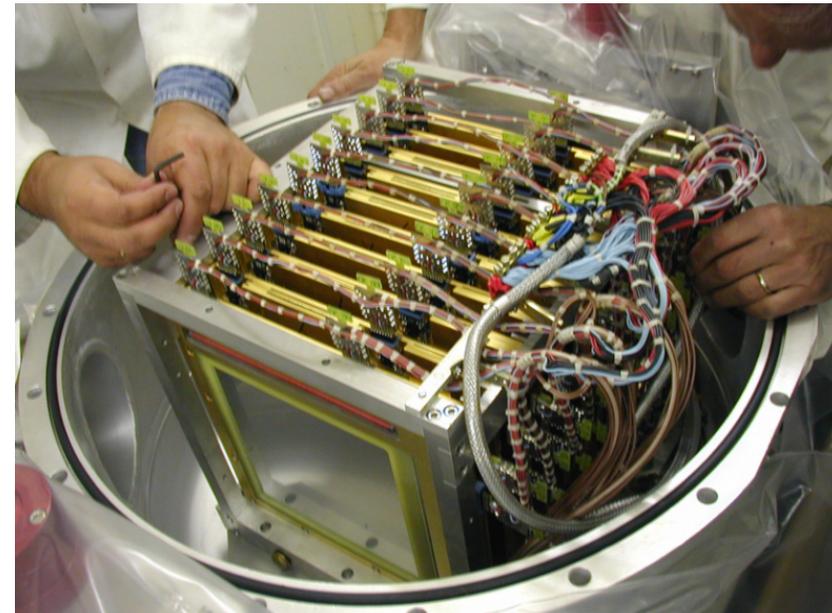
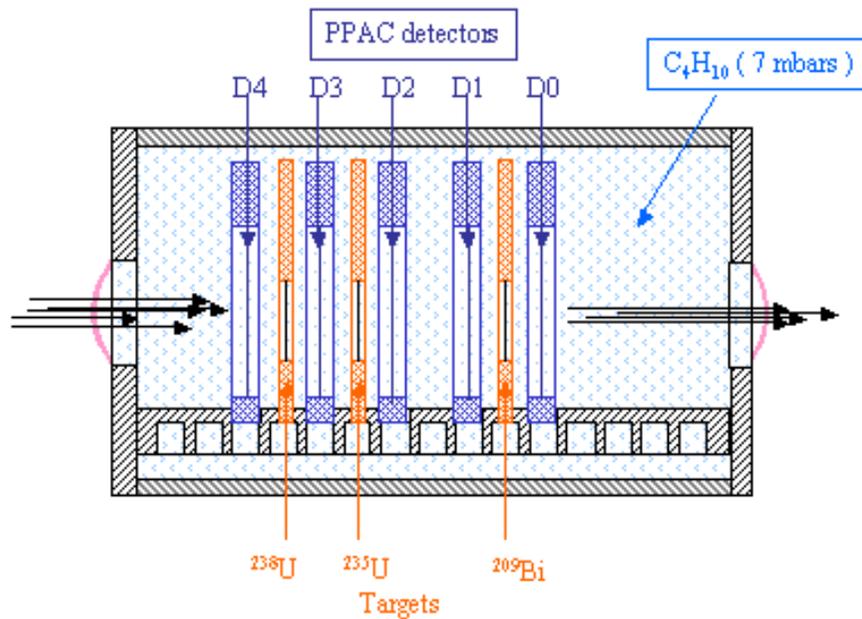


## Total Absorption Calorimeter (TAC)

- ✓ Rivelatore  $4\pi$  ad alta efficienza (40 scintillatori  $BaF_2$  incapsulati in fibra di carbonio caricata con  $^{10}B$ ). Neutron sensitivity < 1%
- ✓ Buona risoluzione in energia (16% a 662 keV e 6% a 6.1 MeV)
- ✓ Discriminazione di eventi spuri e background

## Parallel Plate Fission Chamber e Avalanche Counters

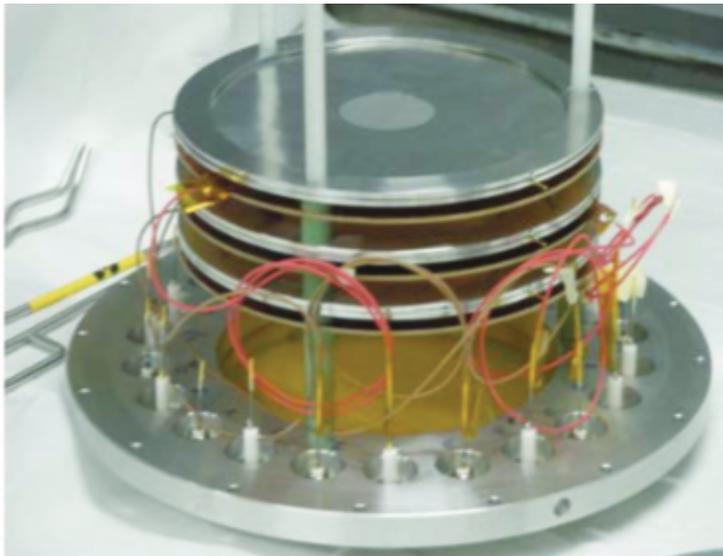
- Misura di frammenti di fissione, anche in coincidenza
- discriminazione  $\alpha$  da decadimento radioattivo del campione di misura
- bassa sensibilità ai  $\gamma$



## MicroMegas

(anche per prodotti di fissione)

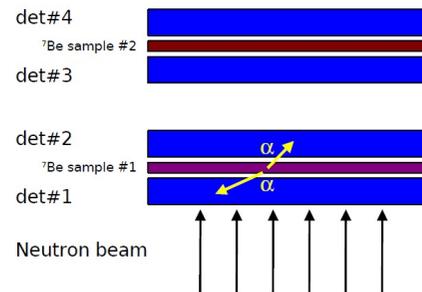
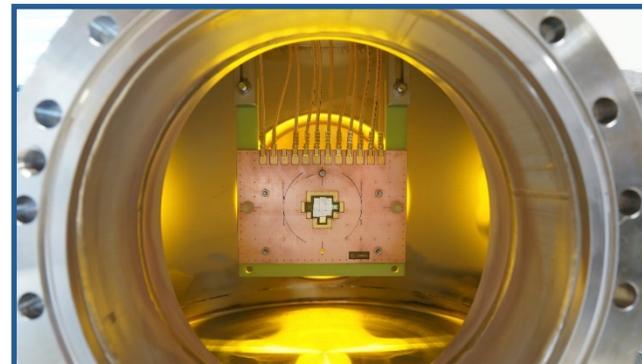
- Alto guadagno, basso rumore
- Più campioni misurabili in parallelo



## Rivelatori a stato solido

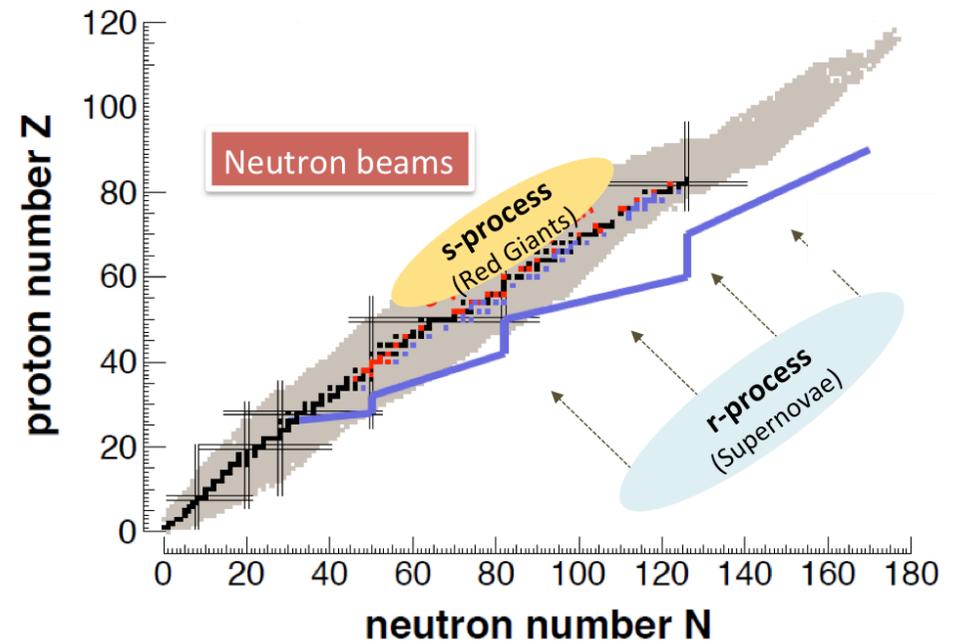
(anche per prodotti di fissione)

- Rivelatori al silicio (PAD, strip), diamante
- Telescopi  $\Delta E$ -E
- Sandwich di rivelatori direttamente sotto fascio



## *Principali campi di ricerca di n\_TOF*

- La nucleosintesi del processo s (low) procede per catture neutroniche e successivi decadimenti beta.
- Coinvolge **isotopi stabili** in quanto il flusso di neutroni associato è relativamente basso, cosicché il rate di cattura è significativamente inferiore rispetto al rate dei decadimenti beta.



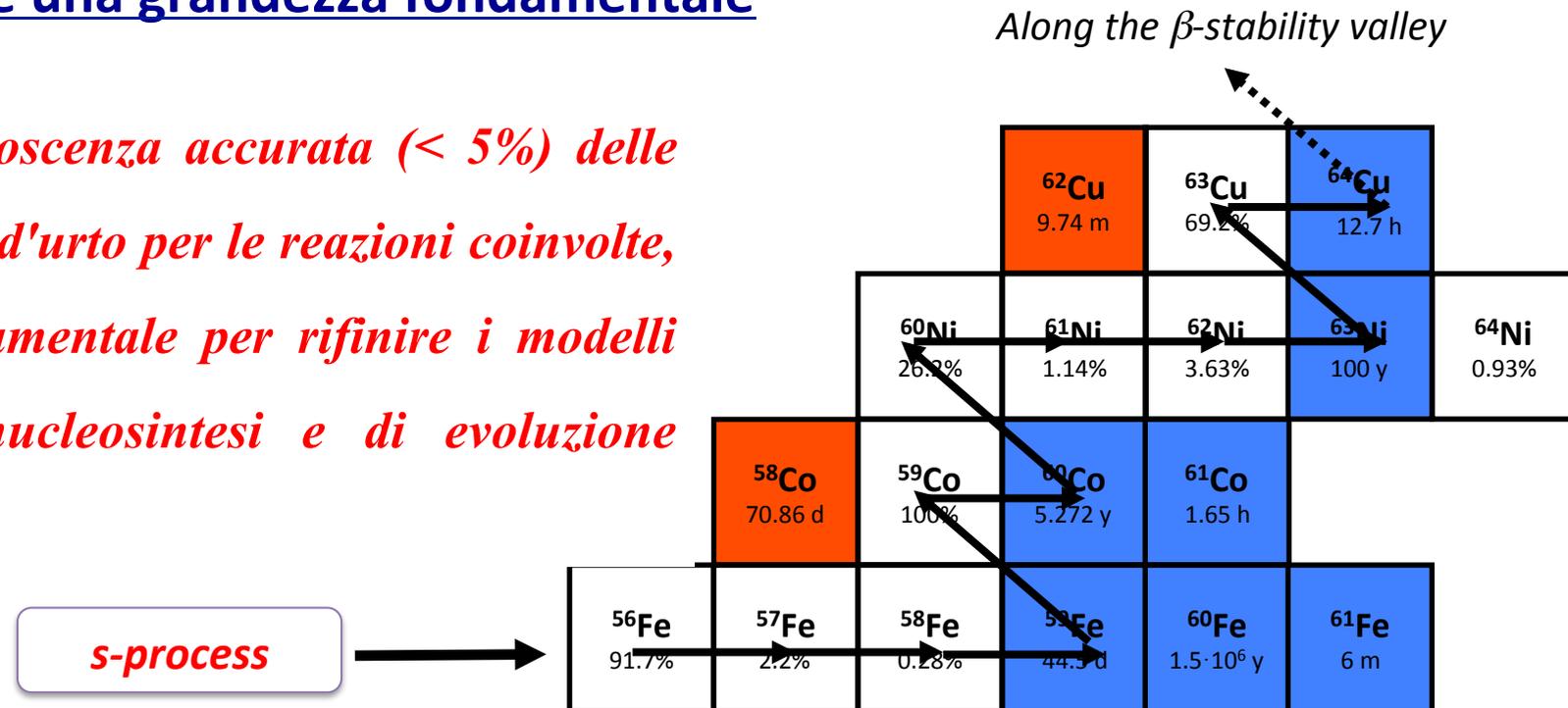
*L'abbondanza degli elementi presenti nell'universo dipende da condizioni termodinamiche, quali temperatura e densità di neutroni, e dalle sezioni d'urto di cattura.*

**s-process** (slow process):

- $N_n = 10^8 \text{ n/cm}^3$ ,  $kT = 0.3 - 300 \text{ keV}$

## $\sigma(n,\gamma)$ è una grandezza fondamentale

- *La conoscenza accurata (< 5%) delle sezioni d'urto per le reazioni coinvolte, è fondamentale per rifinire i modelli della nucleosintesi e di evoluzione stellare.*



*Vi sono molte reazioni nelle quali le incertezze rimangono alte, in particolare se raffrontate ai progressi nelle osservazioni.*

## Cattura ( $n, \gamma$ )

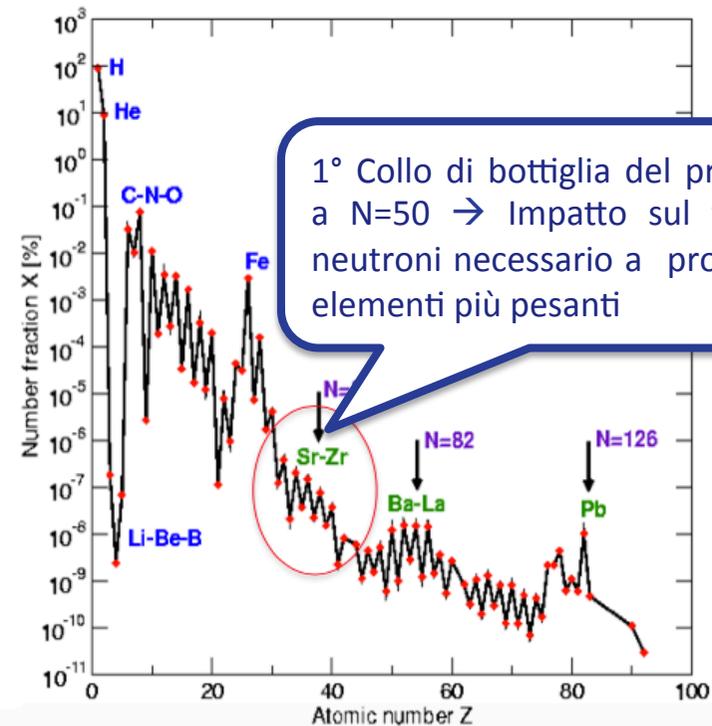
- $^{151}\text{Sm}$
- $^{204,206,207,208}\text{Pb}$
- $^{209}\text{Bi}$
- $^{24,25,26}\text{Mg}$
- $^{90,91,92, 93,94,96}\text{Zr}$
- $^{139}\text{La}$
- $^{186,187,188}\text{Os}$
- $^{58,62,63}\text{Ni}$
- $^{54,56,57}\text{Fe}$
- $^{25}\text{Mg}$
- $^{147}\text{Pm}, ^{171}\text{Tm}$
- $^{203,204}\text{Tl}$
- $^{70,72,74,76}\text{Ge}$
- $^{155,157}\text{Gd}$
- $^{69,71}\text{Ga}$

**$^{89}\text{Y}(n, \gamma) + ^{88}\text{Sr}(n, \gamma)$**   
Luglio 2017

**Grandi discrepanze in letteratura**

$^{89}\text{Y}$ : 13 - 21 mb @ 30 keV

$^{88}\text{Sr}$ : 5 - 9 mb @ 30 keV

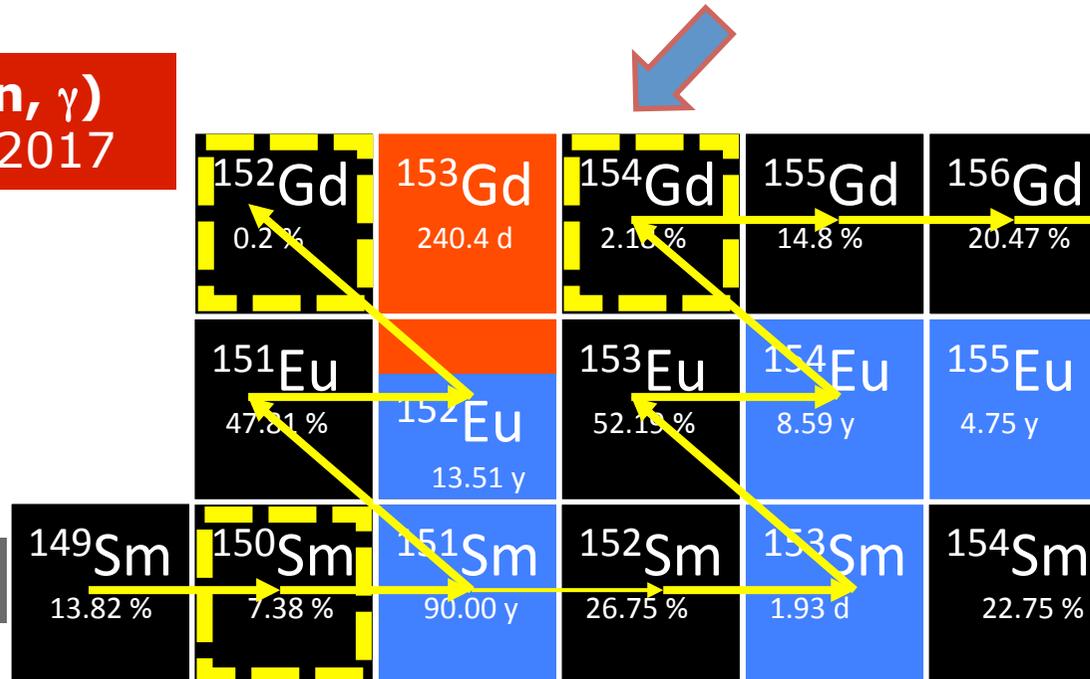


# Qualche reazione studiata di recente, di interesse per il processo s

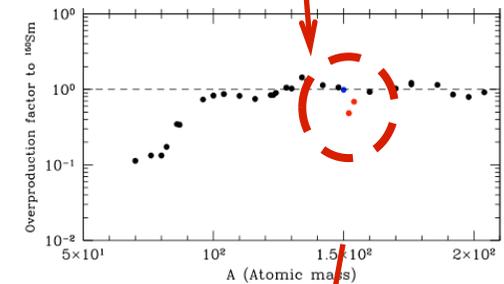
**$^{154}\text{Gd}(n, \gamma)$**   
Agosto 2017

■  $\beta^+$   
■ stable  
■  $\beta^-$

**s process**



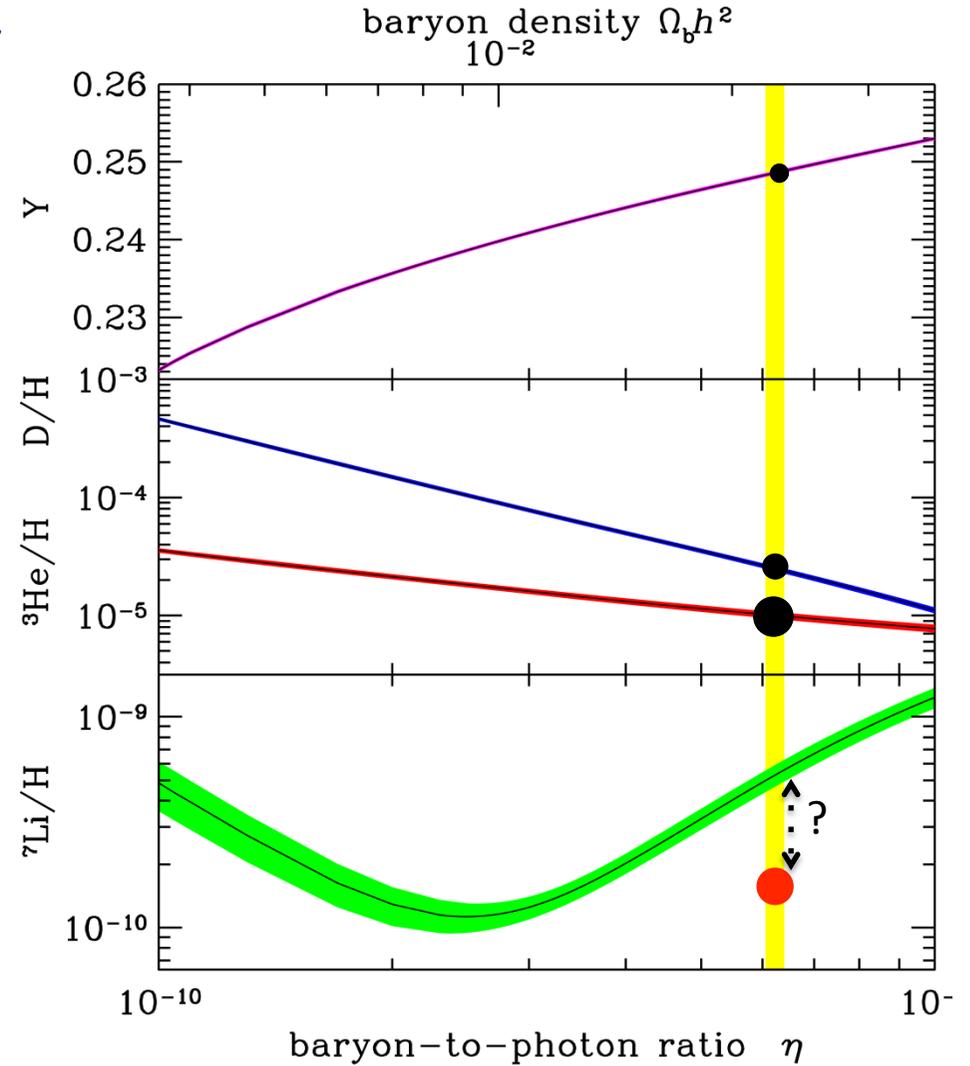
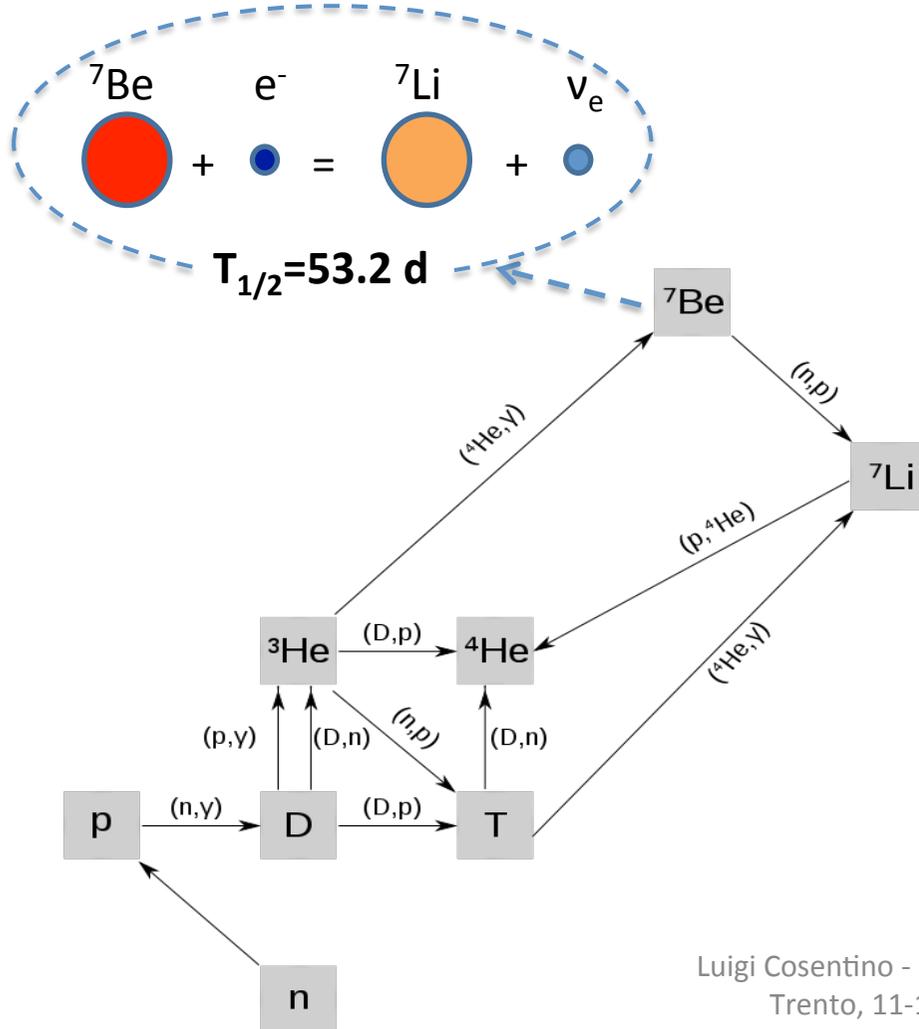
Discaccordo tra osservazioni e modelli



**$^{152}\text{Gd}$  e  $^{154}\text{Gd}$  sono isotopi detti s-only:** possono essere prodotti solo dal processo s.

Necessario risolvere le discrepanze nei dati nucleari

*Il modello BBN riproduce perfettamente le abbondanze osservate degli elementi leggeri prodotti nei primi minuti dopo il Big Bang, ma non del  ${}^7\text{Li}$  (Cosmological Lithium Problem).*



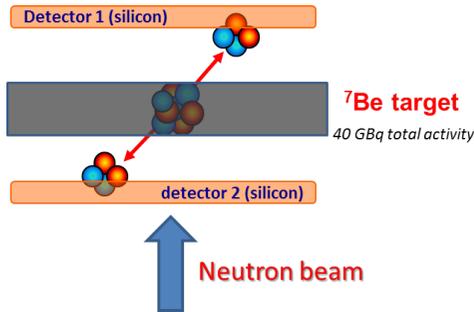
Ipotesi: Rate di distruzione del  ${}^7\text{Be}$  superiore al previsto.

Misura delle sezioni d'urto dei canali di distruzione indotti dai neutroni (n,p) e (n, $\alpha$ ).

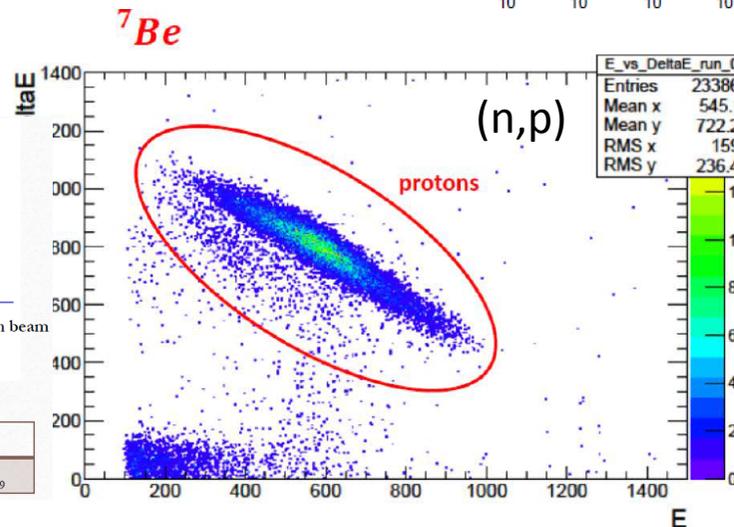
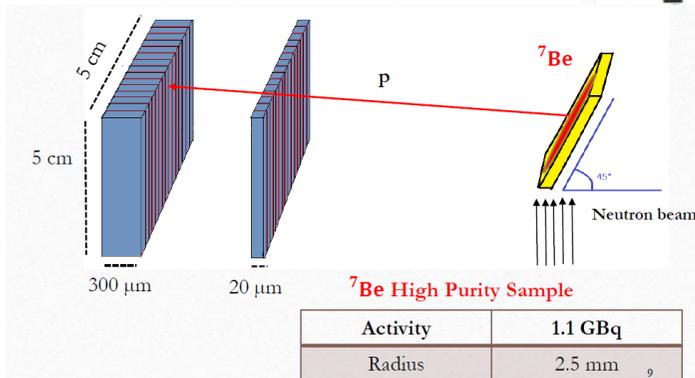
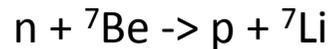
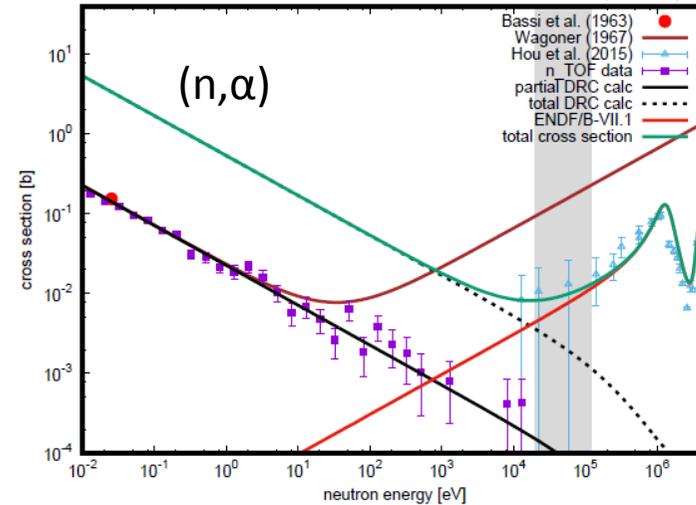
**Difficoltà legate all'elevata attività del bersaglio.**



$E_\alpha$  threshold > 2 MeV



PRL. 117, 152701 (2016)



Alla luce dei risultati delle nostre misure, non vi è al momento una soluzione nucleare al problema del Litio primordiale

	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 16 h	Am 243 7370 a	Am 244 10,1 h	Am 245 2,05 h
Pu 235 25,3 m	Pu 236 2,858 a	Pu 237 45,2 d	Pu 238 87,74 a	Pu 239 2411,10 <sup>6</sup> a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,760 · 10 <sup>5</sup> a	Pu 243 4,956 h	Pu 244 8,00 · 10 <sup>7</sup> a
Np 234 4,4 d	Np 235 396,1 d	Np 236 22,8 h	Np 237 2,44 · 10 <sup>6</sup> a	Np 238 2,117 d	Np 239 4,955 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 <sup>5</sup> a	U 234 0,0055 a	U 235 0,7200 a	U 236 2,34 · 10 <sup>6</sup> a	U 237 4,26 · 10 <sup>6</sup> a	U 238 99,2745 a	U 239 23,5 m	U 240 14,1 h		U 242 16,8 m
Pa 232 1,31 d	Pa 233 27,0 d	Pa 234 1,17 m	Pa 235 2,12 m	Pa 236 9,1 m	Pa 237 8,7 m	Pa 238 2,3 m		148	150
Th 231 25,5 h	Th 232 1,405 · 10 <sup>10</sup> 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			

$^{244}, ^{245}\text{Cm}$ : 1.5 Kg/yr

$^{241}\text{Am}$ : 11.6 Kg/yr

$^{243}\text{Am}$ : 4.8 Kg/yr

$^{239}\text{Pu}$ : 125 Kg/yr

$^{237}\text{Np}$ : 16 Kg/yr

LLFP: 76.2 Kg/yr

*Quantità di 'scorie' radioattive prodotte annualmente con un reattore da 1 GW<sub>e</sub> LW*

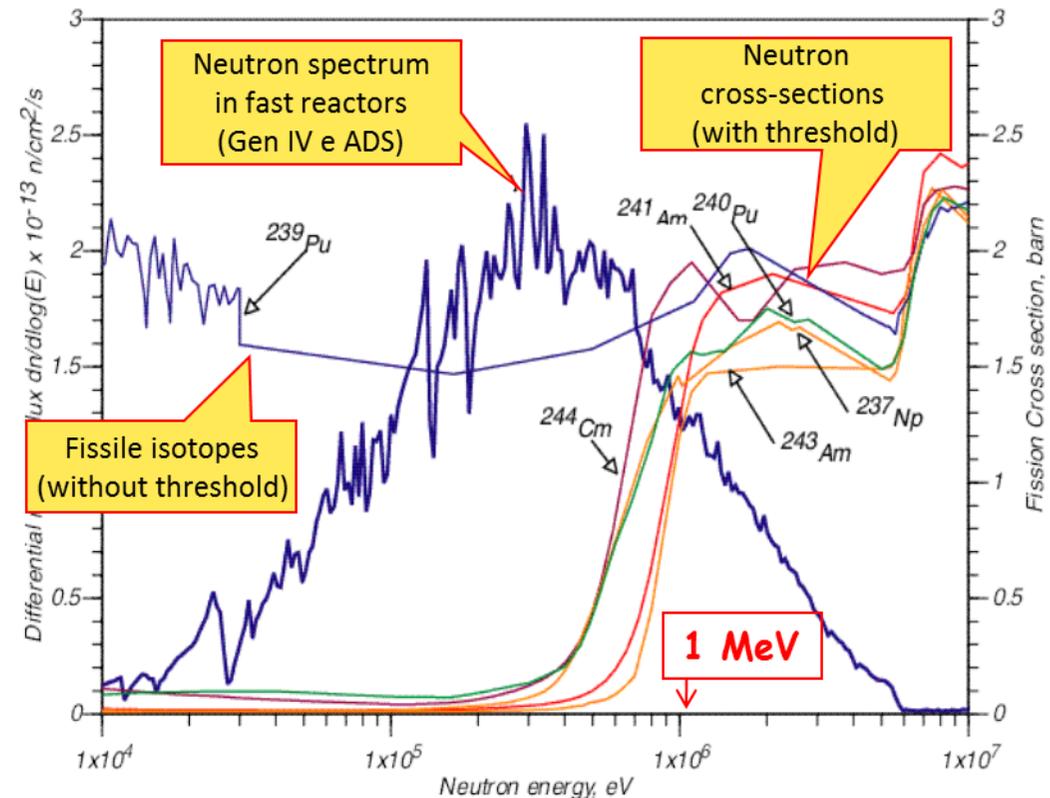
LLFP (Long-lived fission products)

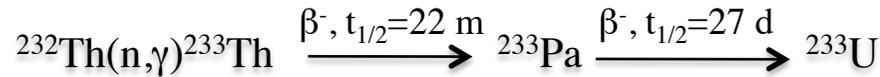
## Reattori nucleari di nuova generazione

- maggiore efficienza di burn-up → significativa riduzione delle scorie
- produzione di energia bruciando scorie ad alta radiotossicità (Np, Am, Cm);
- riutilizzo di parte del combustibile spento,
- presentare forme di sicurezza intrinseca;
- frenare la proliferazione nucleare;
- ridurre tempi e costi di costruzione.

**A seguito della soglia di fissione a diverse centinaia di KeV, gli attinidi possono essere bruciati solo se sono presenti neutroni veloci.**

Lo sviluppo di reattori veloci di IV generazione, richiede la conoscenza accurata delle sezioni d'urto di tutte le reazioni indotte dai neutroni, sia per i transuranici presenti nel combustibile, che per i materiali adoperati nei reattori.





- Disponibilità di  $^{232}\text{Th}$  superiore rispetto all'Uranio
- L'assenza di  $^{238}\text{U}$  comporta una ridotta produzione di scorie ad elevata radiotossicità.

## Cattura ( $n, \gamma$ )

- $^{232}\text{Th}$
- $^{233,234}\text{U}$
- $^{237}\text{Np}, ^{240}\text{Pu}$
- $^{243}\text{Am}$

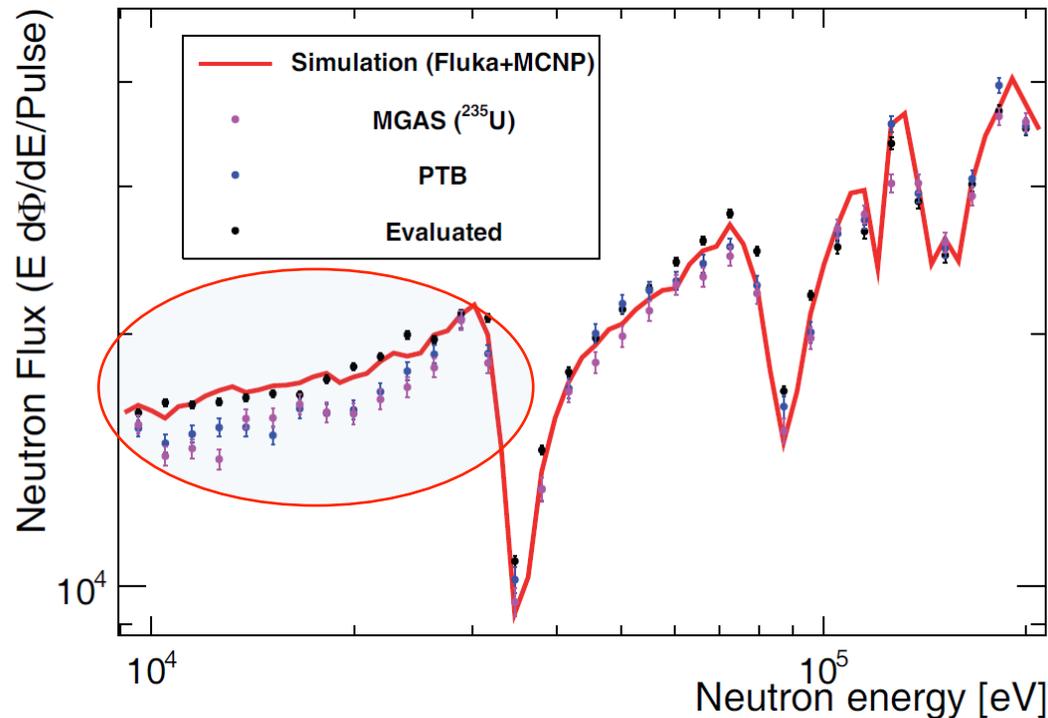
## Fissione ( $n, f$ )

- $^{233,234,235,236,238}\text{U}$
- $^{232}\text{Th}$
- $^{209}\text{Bi}$
- $^{237}\text{Np}$
- $^{241,243}\text{Am}, ^{245}\text{Cm}$
- $\text{natPb}$

## *Sul $^{235}\text{U}$ c'è ancora tanto lavoro da fare*

**$^{235}\text{U}$  è uno standard al termico e  
nel range tra 0.15 MeV e 200 MeV**

Il flusso di neutroni in nTOF fase2 è stato accuratamente determinato, usando **5 differenti rivelatori** e **3 differenti reazioni** di conversione

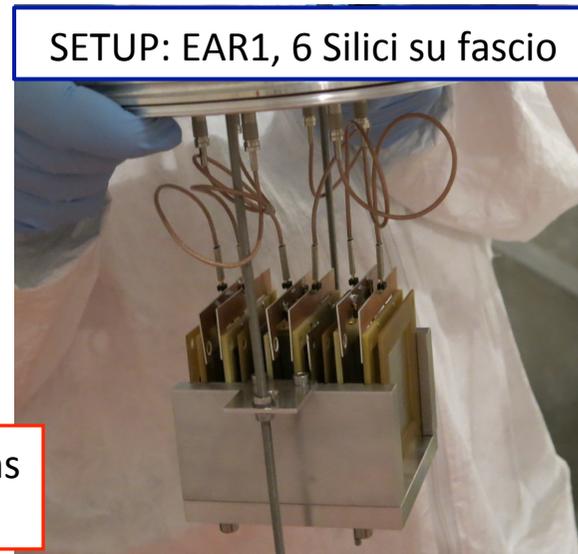
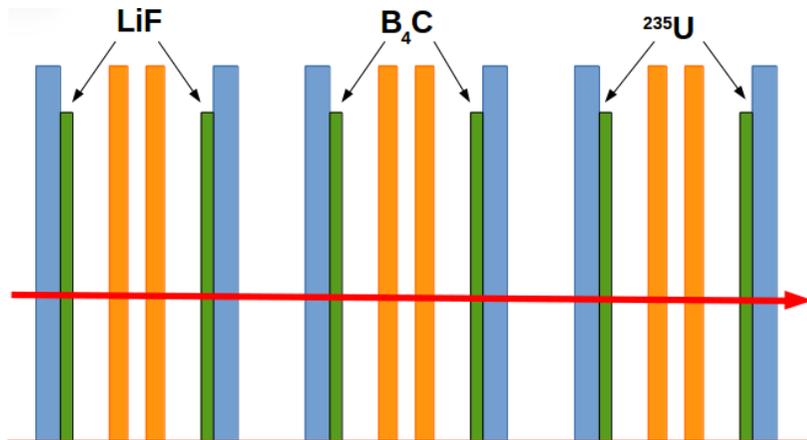


L'analisi del flusso di neutroni misurato, ha rilevato una discrepanza nella regione 10-30 keV, tra i risultati basati sulla reazione  $^{235}\text{U}(n,f)$  e quelli basati su  $^6\text{Li}(n,t)\alpha$  e  $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$ , a prescindere dal sistema di rivelazione utilizzato.

***Occorre misurare la sezione d'urto della  $^{235}\text{U}(n,f)$  in questa regione di energia***

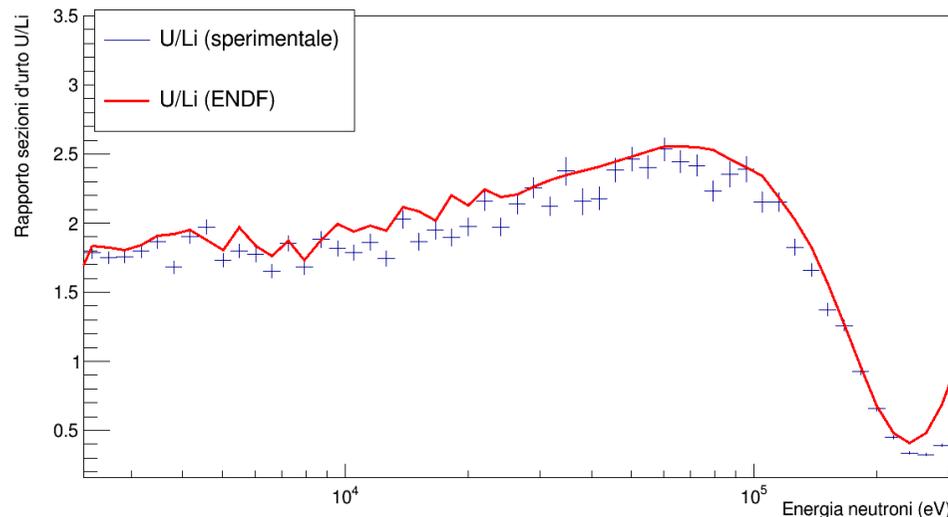
# Sezione d'urto del $^{235}\text{U}(n,f)$ @ 10-30 keV

Abbiamo misurato (Aug-Sept 2016) in **EAR1** la sezione d'urto della  $^{235}\text{U}(n,f)$ , insieme con le reazioni di riferimento  $^6\text{Li}(n,t)$  e  $^{10}\text{B}(n,\alpha)$ .

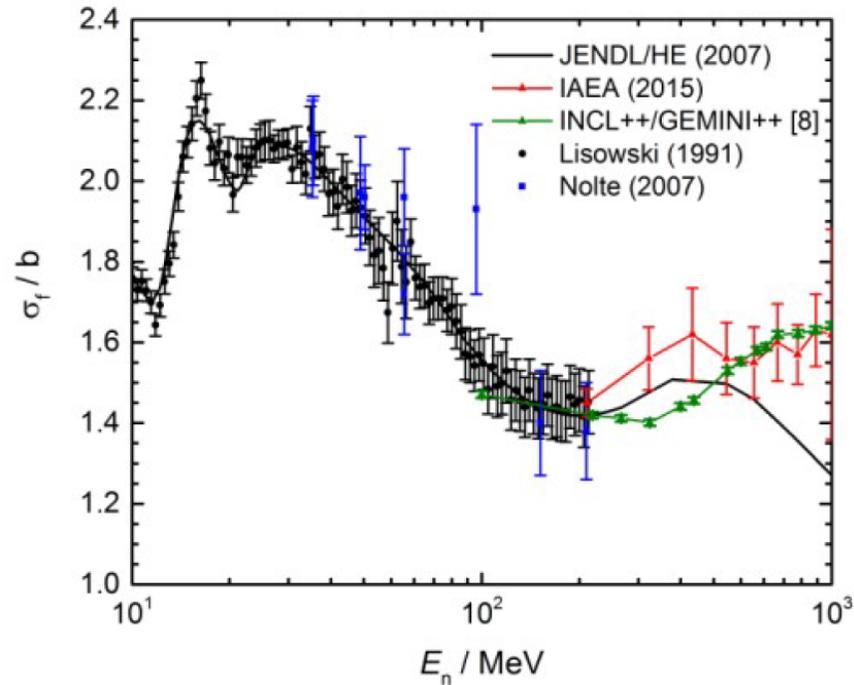


**Silicon detectors stack** ( $5 \times 5 \text{ cm}^2$  and  $200 \mu\text{m}$  thickness) in the beam (capture collimator)

- Detection at **forward and backward** directions
- Energy resolution



**Analisi Preliminare:  
conferma della discrepanza**

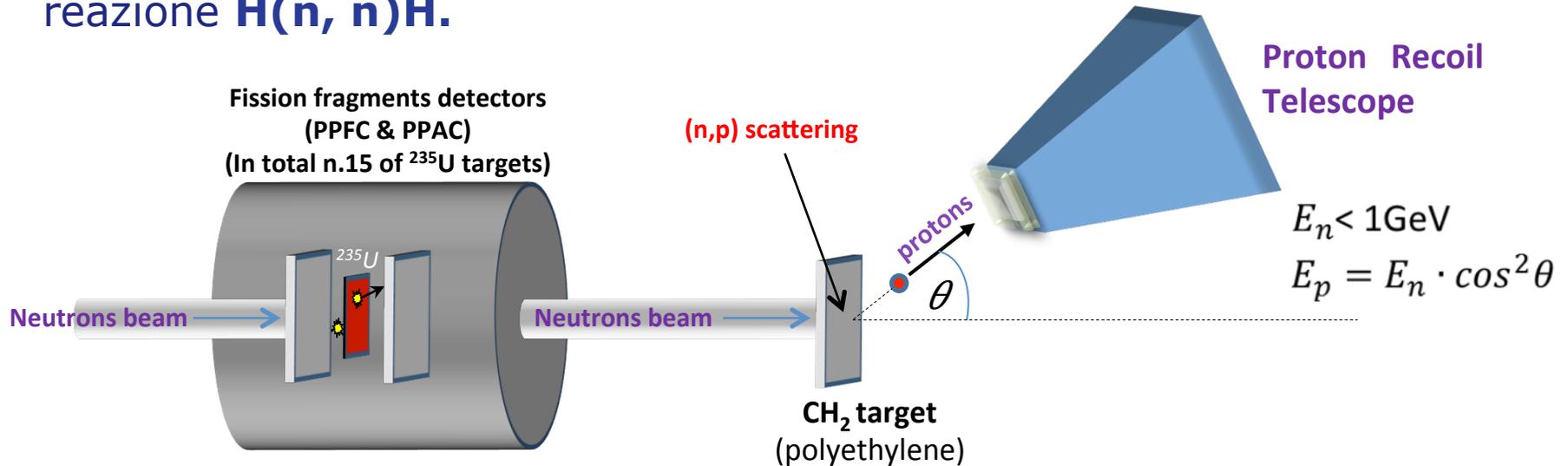


*Solo due set di dati sperimentali nel range 20 MeV – 200 MeV*

Non esistono dati per energie superiori a 200 MeV. I modelli utilizzati per i calcoli della sezione d'urto, restituiscono valori estremamente diversi.

La International Atomic Energy Agency (**IAEA**) richiede tra l'altro nuovi dati della sezione d'urto  $^{235}\text{U}(n,f)$  sino a 200 MeV, al fine di ridurre l'incertezza entro il 5%.

Misura della sezione d'urto  $^{235}\text{U}(n, f)$ , **relativa** alla sezione d'urto della reazione  **$\text{H}(n, n)\text{H}$** .



**Il Proton Recoil Telescope (PRT) rivela protoni di rinculo emessi dal bersaglio, per misurare il flusso di neutroni fino ad 1 GeV**

**Prima** misura per  $E_n > 200 \text{ MeV}$  (estensione dello standard)

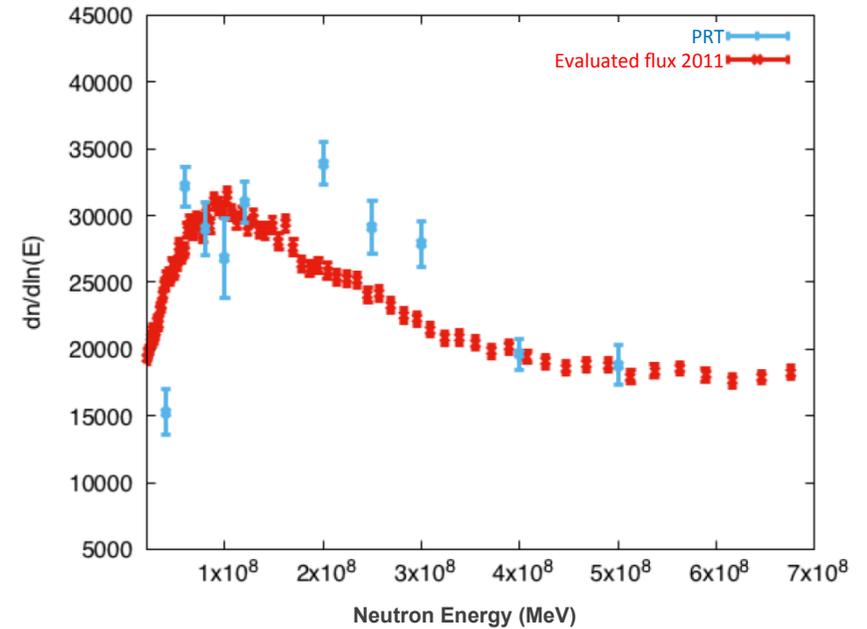
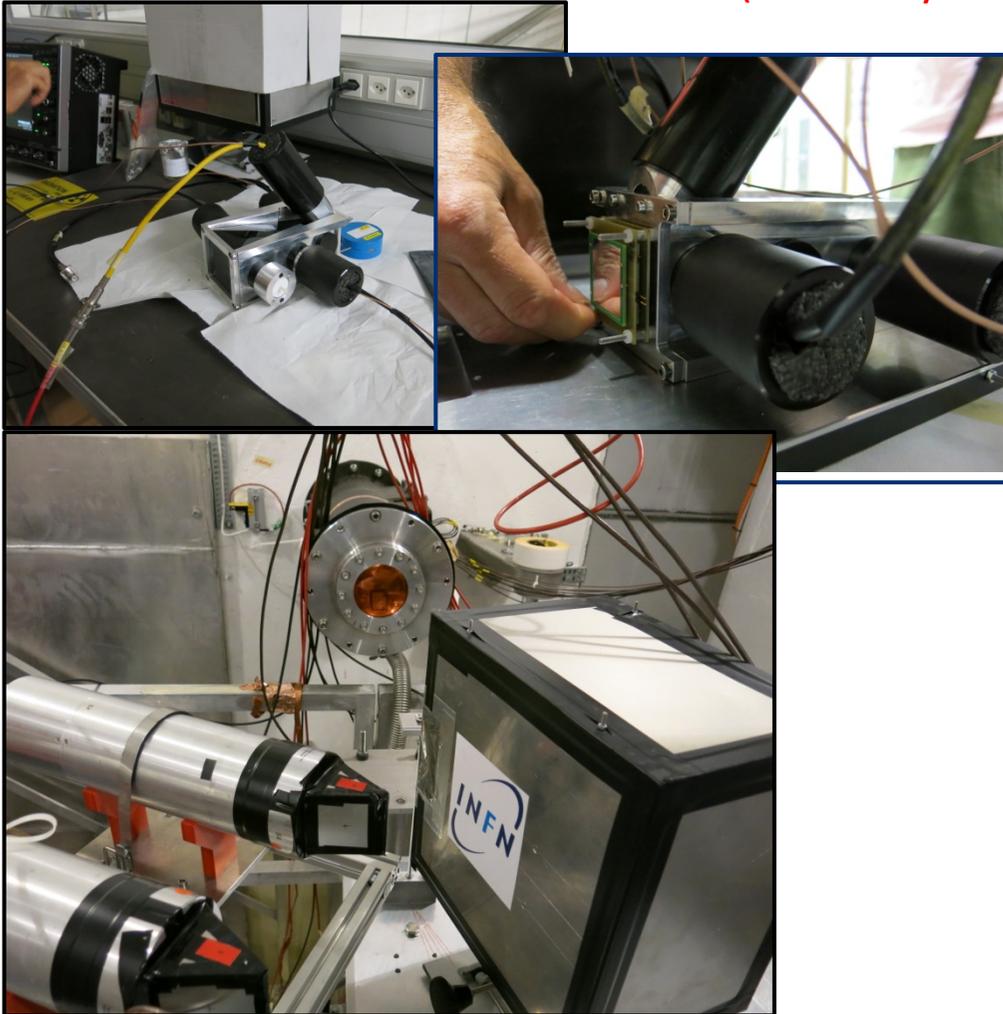
**Prima** determinazione sperimentale del flusso  $E_n > 200 \text{ MeV}$

$^{235}\text{U}$  cross section relative to  $(n,p)$

$$\frac{\sigma_{^{235}\text{U}(n,f)}}{(d\sigma_{np}/d\Omega)} = \frac{n_H \varepsilon_p \Omega_{\text{geo}} N_{\text{FF}}}{n_U \varepsilon_{\text{FF}} N_p}$$

**N:** detected events  
n: sample areal density  
 $\Omega$ : PRT solid angle  
 $\varepsilon$ : efficiency  
 $\sigma$ : cross section

# Test del PRT. Misura preliminare del flusso 10MeV – 500 MeV (a few days test beam)



$$\varphi_n = \frac{C}{n\Omega\varepsilon\sigma}$$

C: counts  
 n: sample areal density  
 Ω: solid angle  
 ε: efficiency  
 σ: (n,p) cross section

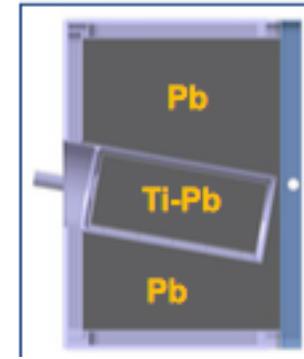
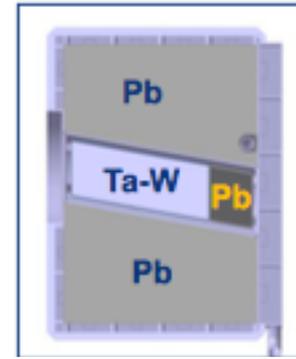
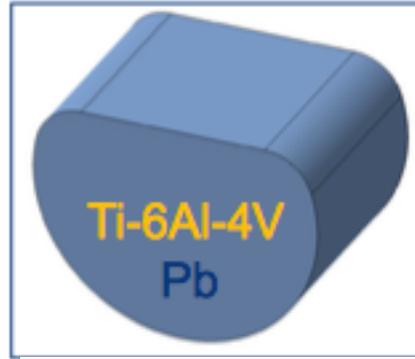
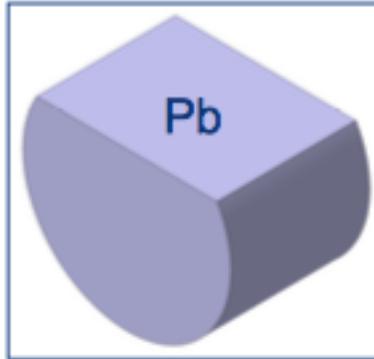
**Next test: October 2017**  
**Measurement: 2018**

# *Il Futuro*

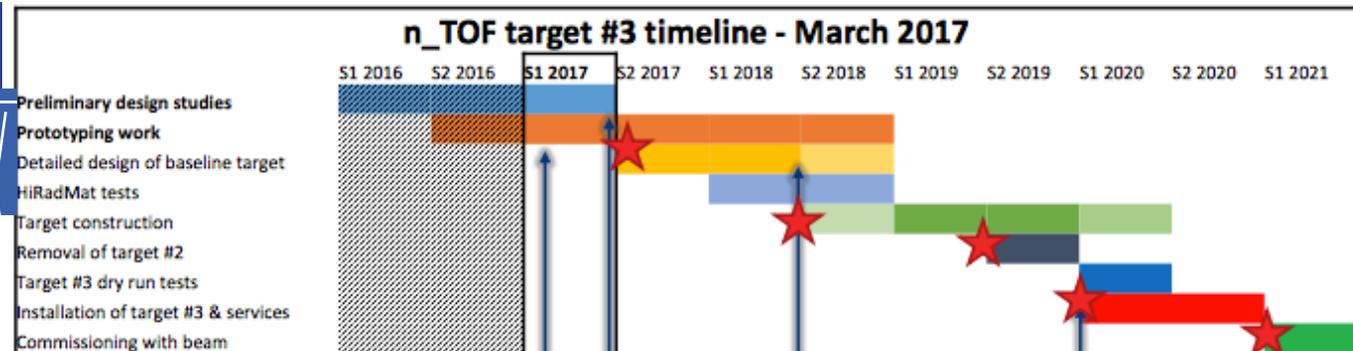
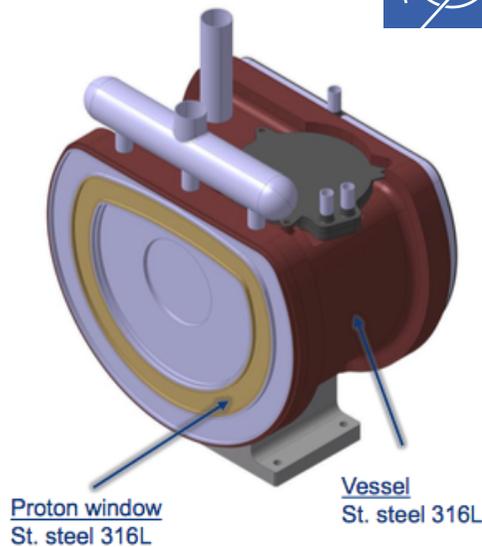
# nTOF fase 4

## Realizzazione di un nuovo bersaglio

Approvato e previsto per il 2020-2030



n\_TOF Target #3 Project  
Working Group



NOW

Target preliminary design review  
(June 2017)

Target installation review  
(Jan 2020)

Target production readiness review  
(June 2018)

## In conclusione

- **n\_TOF è una facility estremamente versatile e unica al mondo, in grado di effettuare misure di sezione d'urto di reazioni indotte da neutroni con elevata accuratezza e in un'intervallo di energia dal termico al GeV.**
- **Grazie alla nuova sala sperimentale, si è aperta la possibilità di effettuare misure challenging e con bersagli radioattivi ad elevata attività.**

***Grazie per l'attenzione***