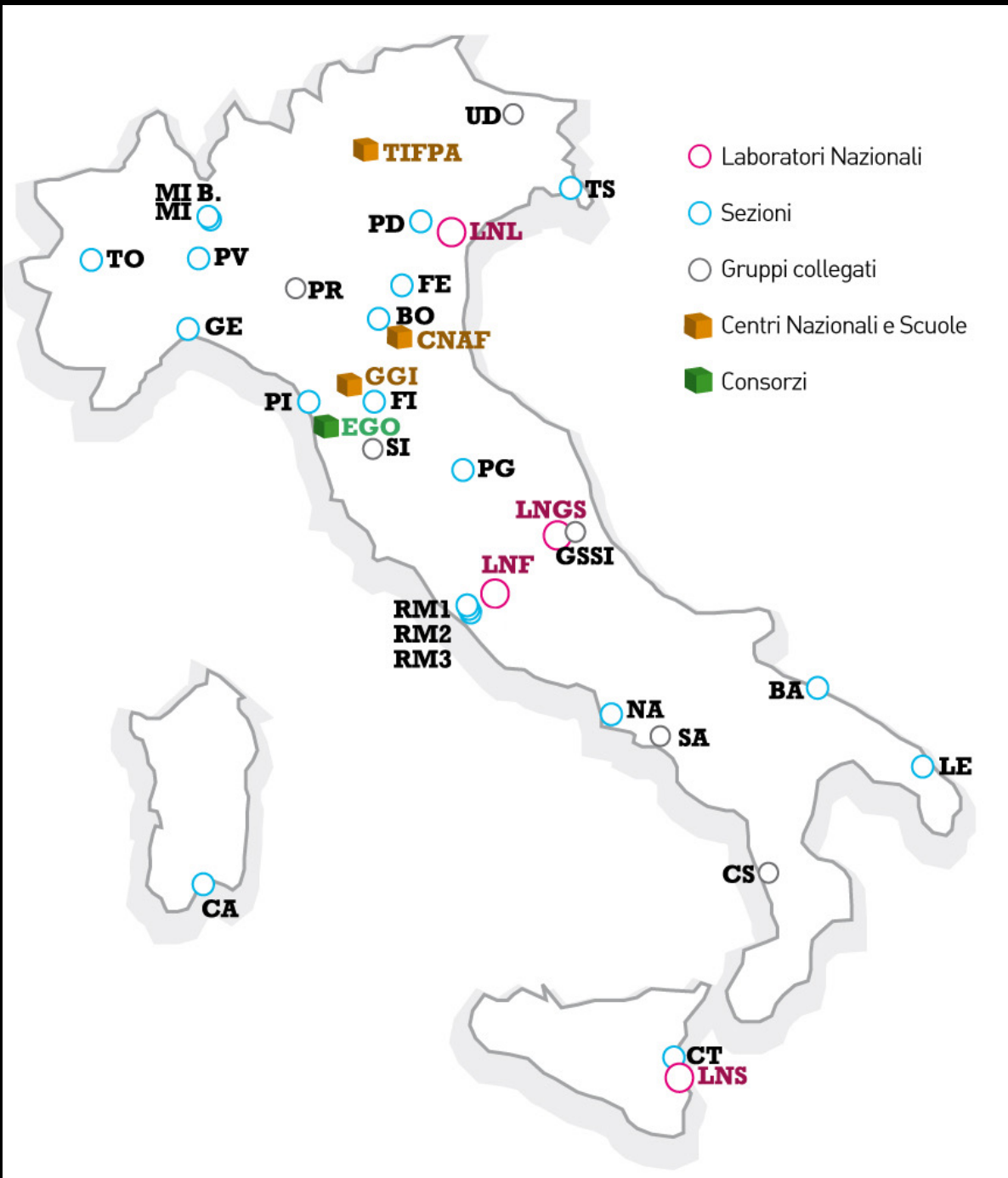


**L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare** è un ente pubblico nazionale di ricerca, istituito l'8 agosto 1951; si occupa dello **studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano.**

Svolge attività di ricerca, teorica e sperimentale, nei campi della **fisica subnucleare, nucleare e astroparticellare.**

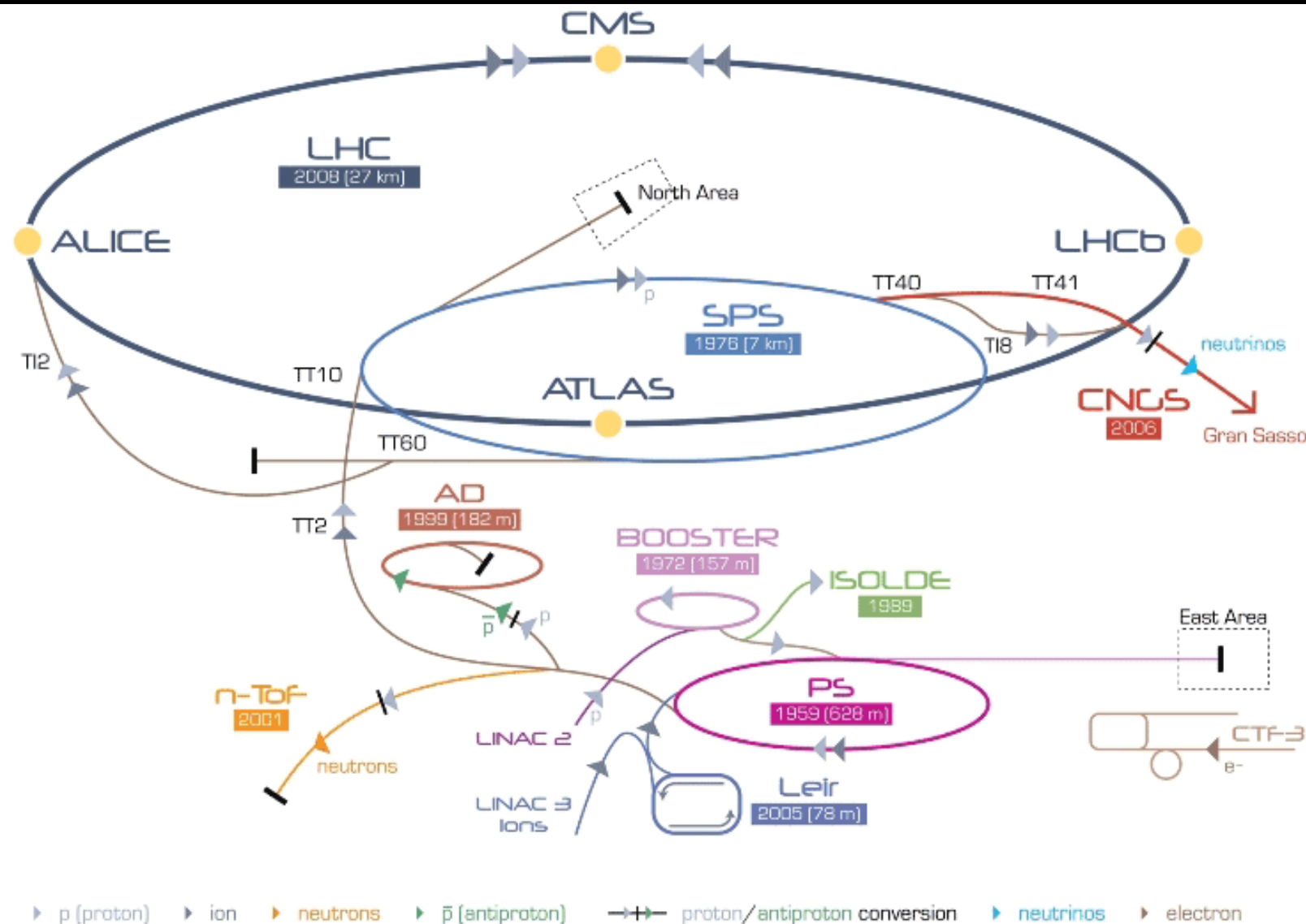
Le attività di ricerca dell'INFN si svolgono in un ambito di **competizione internazionale.**

La ricerca fondamentale in questi settori richiede l'uso di **tecnologie e strumenti di ricerca d'avanguardia** che l'INFN sviluppa sia nei propri laboratori sia in collaborazione con il mondo dell'industria.



4 Laboratori Nazionali  
20 Sezioni collegate





LHC Large Hadron Collider   SPS Super Proton Synchrotron   PS Proton Synchrotron

AD Antiproton Decelerator   CTF-3 Clic Test Facility   CNCS Cern Neutrinos to Gran Sasso   ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice  
 LEIR Low Energy Ion Ring   LINAC LInear ACcelerator   n-ToF Neutrons Time Of Flight

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

[n\_TOF @ CERN]

*Caratterizzazione delle  
condizioni stellari*

*Nucleosintesi degli elementi  
più pesanti del Ferro*

# Astrofisica nucleare

*Nucleosintesi primordiale*

*Cosmocronologia*

*Reattori di IV Generazione*

*Smaltimento delle scorie  
radioattive*

# Tecnologia nucleare

*Fusione*

*Fisica medica*

*Materiali*

**...e ancora**

*...e Fisica di base !!!*



# Reazioni indotte da neutroni

Cattura

(n,  $\gamma$ )

Fissione

(n, f)

Produzione di particelle cariche

(n, cp)

(n, p)

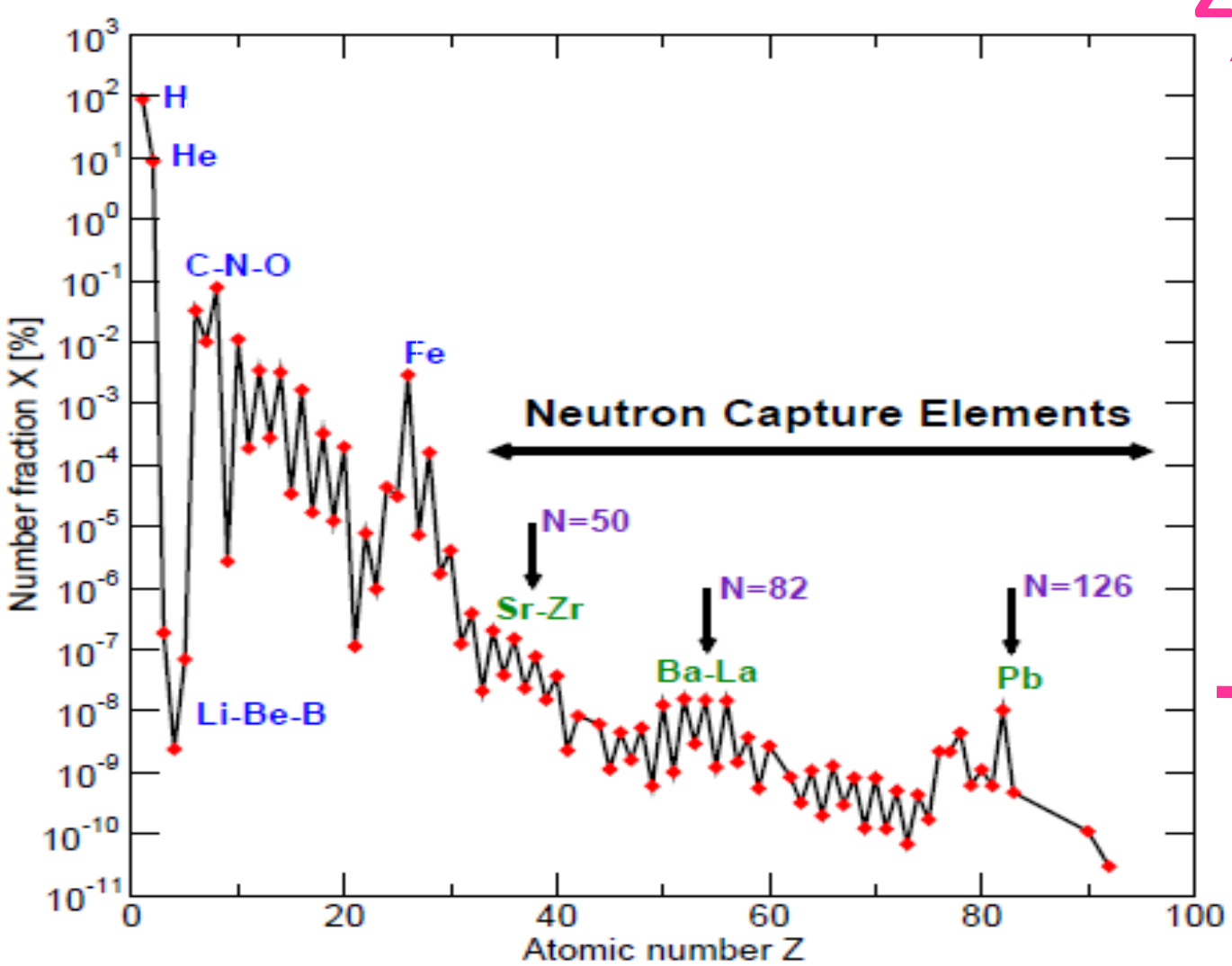
(n,  $\alpha$ )

# Astrofisica nucleare

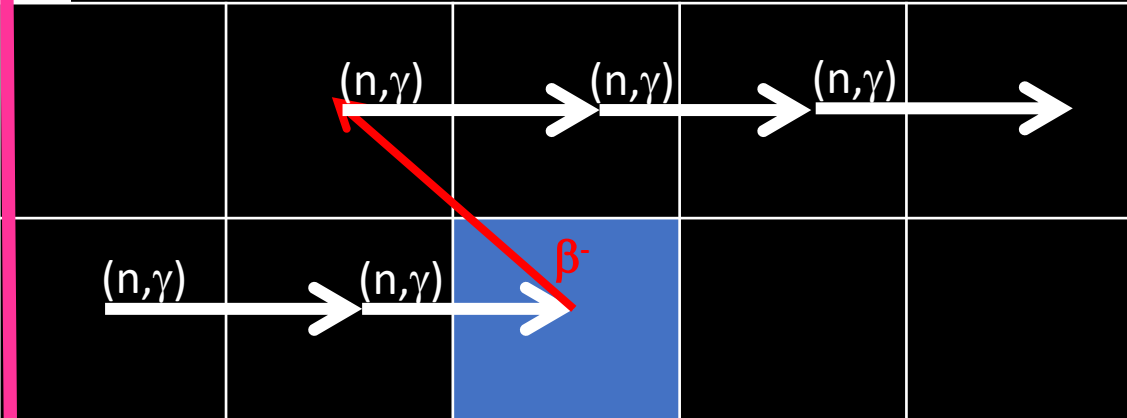
*Siamo figli delle stelle !*



# Solar system elemental abundances



# Nucleosintesi degli elementi più pesanti del Ferro



Abbondanze relative	
H	0.739
He	0.249
Li-Fe	0.012
Elementi più pesanti del Ferro	$12 \times 4E-6$

# REVIEWS OF MODERN PHYSICS

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

## Synthesis of the Elements in Stars\*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and  
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,  
California Institute of Technology, Pasadena, California*

"It is the stars, The stars above us, govern our conditions";  
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

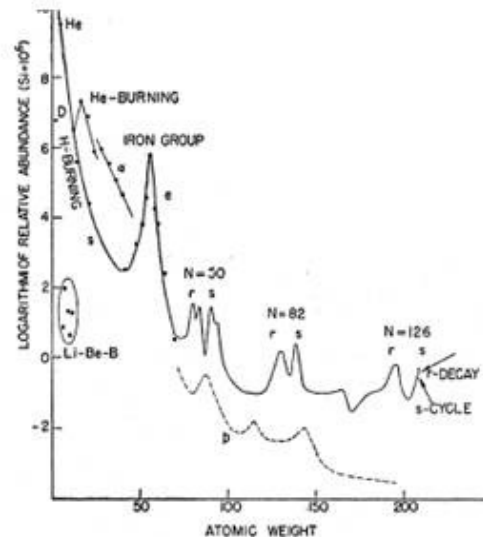
but perhaps

"The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,"  
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)

### TABLE OF CONTENTS

	<i>Page</i>
I. Introduction.....	548
A. Element Abundances and Nuclear Structure.....	548
B. Four Theories of the Origin of the Elements.....	550
C. General Features of Stellar Synthesis.....	550
II. Physical Processes Involved in Stellar Synthesis, Their Place of Occurrence, and the Time-Scales Associated with Them.....	551
A. Modes of Element Synthesis.....	551
B. Method of Assignment of Isotopes among Processes (i) to (viii).....	553
C. Abundances and Synthesis Assignments Given in the Appendix.....	555
D. Time-Scales for Different Modes of Synthesis.....	556
III. Hydrogen Burning, Helium Burning, the $\alpha$ Process, and Neutron Production.....	559
A. Cross-Section Factor and Reaction Rates.....	559
B. Pure Hydrogen Burning.....	562
C. Pure Helium Burning.....	565
D. $\alpha$ Process.....	567
E. Succession of Nuclear Fuels in an Evolving Star.....	568
F. Burning of Hydrogen and Helium with Mixtures of Other Elements; Stellar Neutron Sources.....	569
IV. $\epsilon$ Process.....	577
V. $s$ and $r$ Processes: General Considerations.....	580
A. "Shielded" and "Shielding" Isobars and the $s$ , $r$ , $p$ Processes.....	580
B. Neutron-Capture Cross Sections.....	581
C. General Dynamics of the $s$ and $r$ Processes.....	583
VI. Details of the $s$ Process.....	583

\* Supported in part by the joint program of the Office of Naval Research and the U. S. Atomic Energy Commission.



"Man inhibits a universe composed of a great variety of elements and their isotopes ..."

# REVIEWS OF MODERN PHYSICS

---

VOLUME 29, NUMBER 4

OCTOBER, 1957

---

## Synthesis of the Elements in Stars\*

E. MARGARET BURBIDGE, G. R. BURBIDGE, WILLIAM A. FOWLER, AND F. HOYLE

*Kellogg Radiation Laboratory, California Institute of Technology, and  
Mount Wilson and Palomar Observatories, Carnegie Institution of Washington,  
California Institute of Technology, Pasadena, California*

“It is the stars, The stars above us, govern our conditions”;  
(*King Lear*, Act IV, Scene 3)

but perhaps

“The fault, dear Brutus, is not in our stars, But in ourselves,”  
(*Julius Caesar*, Act I, Scene 2)

# *Nucleosintesi*

*degli elementi più pesanti del Ferro*

**50-50**

**s process [SLOW]**

$T \approx 10^8 \text{ K}$

$n_n \approx 10^8 \text{ neutroni/cm}^3$

Tempi di cattura  $\approx 1 \text{ anno}$

**r process [RAPID]**

$T > 10^9 \text{ K}$

$n_n \approx 10^{20} \text{ neutroni/cm}^3$

Tempo di esposizione  $\approx \text{secondi}$

*Nucleosintesi  
degli elementi più pesanti del Ferro*

Big Bang

H, He, Li

Formazione

Espulsione di materia  
nel mezzo interstellare

Vita

*Nucleosintesi*

Morte  
(Supernova)

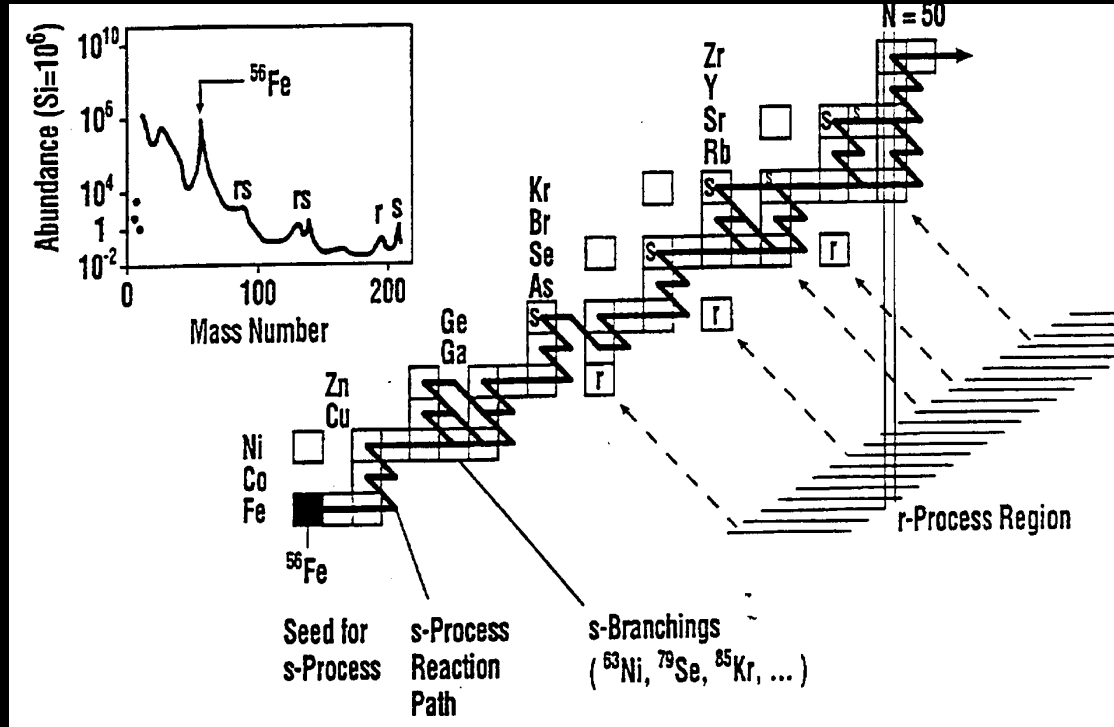
*Nucleosintesi*

Residui

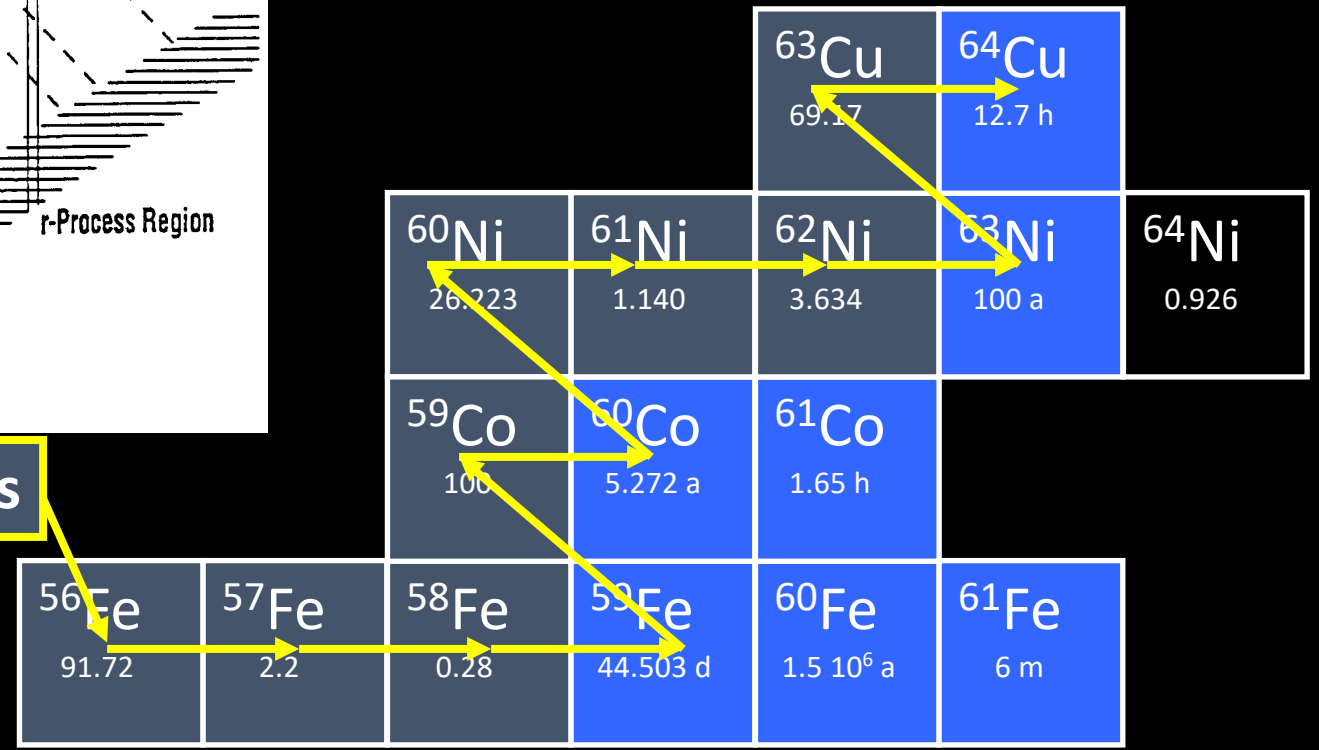
Black Hole  
Neutron Star  
White Dwarf



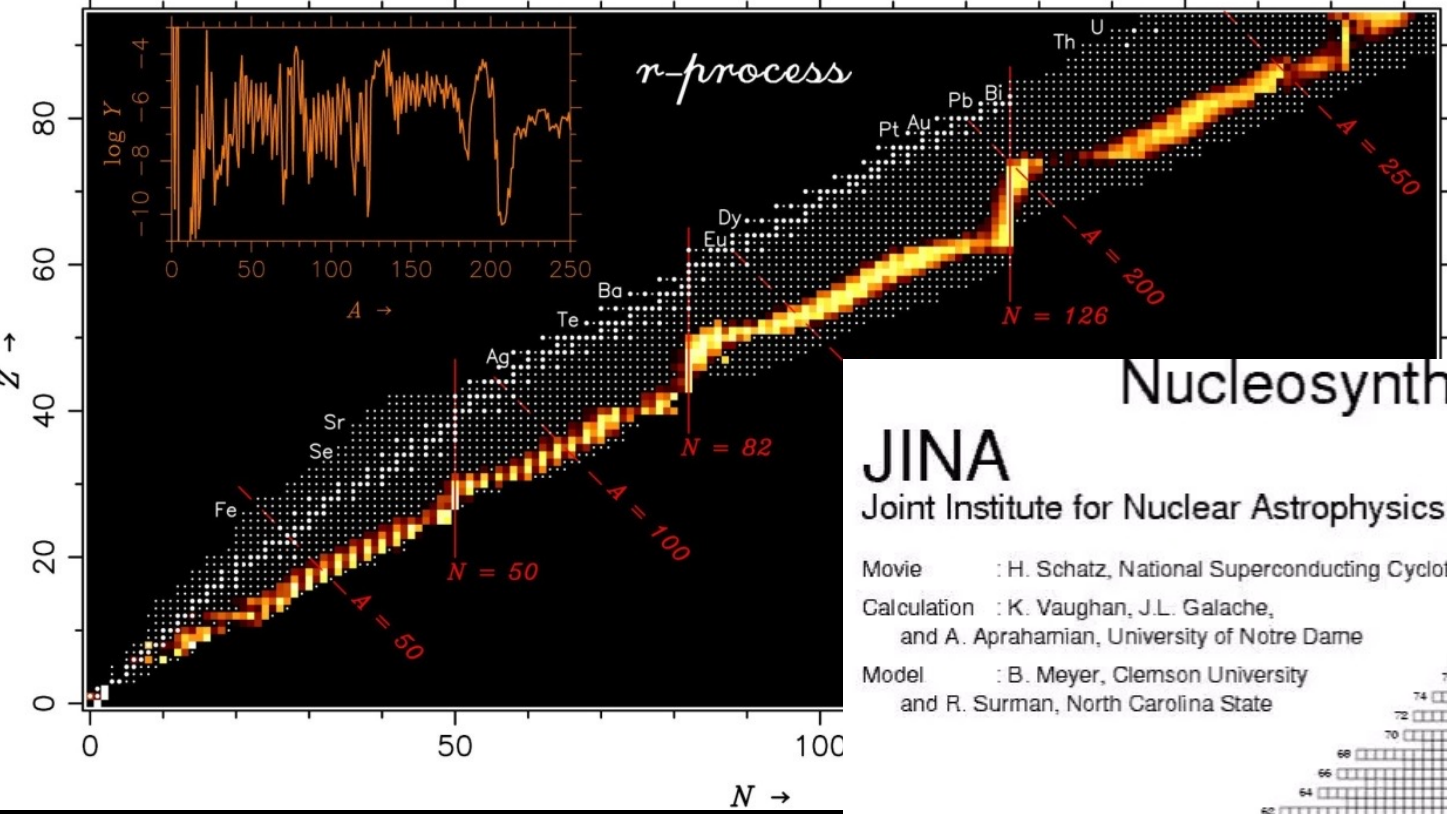
# Il processo S procede lungo la valle di stabilità $\beta$



**s-process**



Il processo **r** procede *per via esotica*  *nuclei ricchi di neutroni*

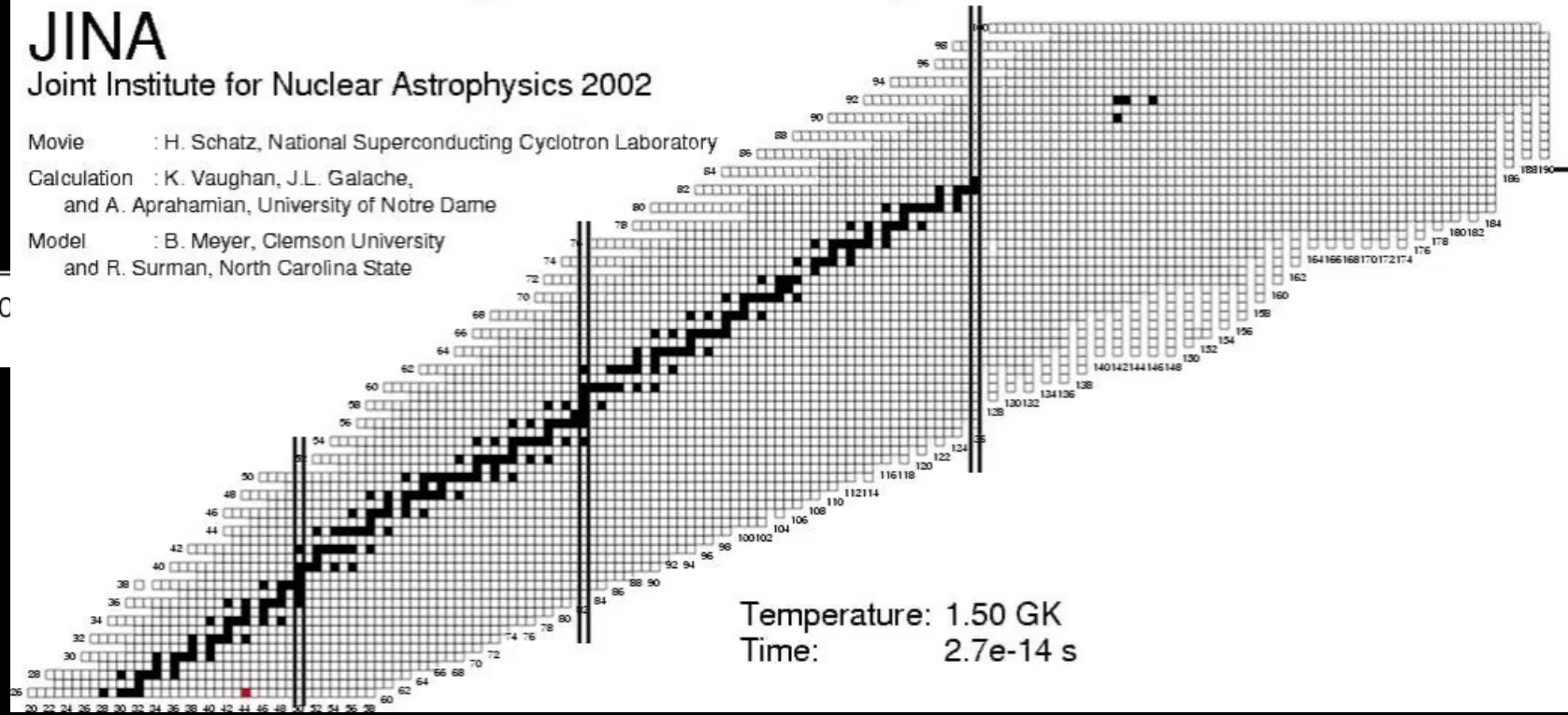


## Nucleosynthesis in the r-process

JINA

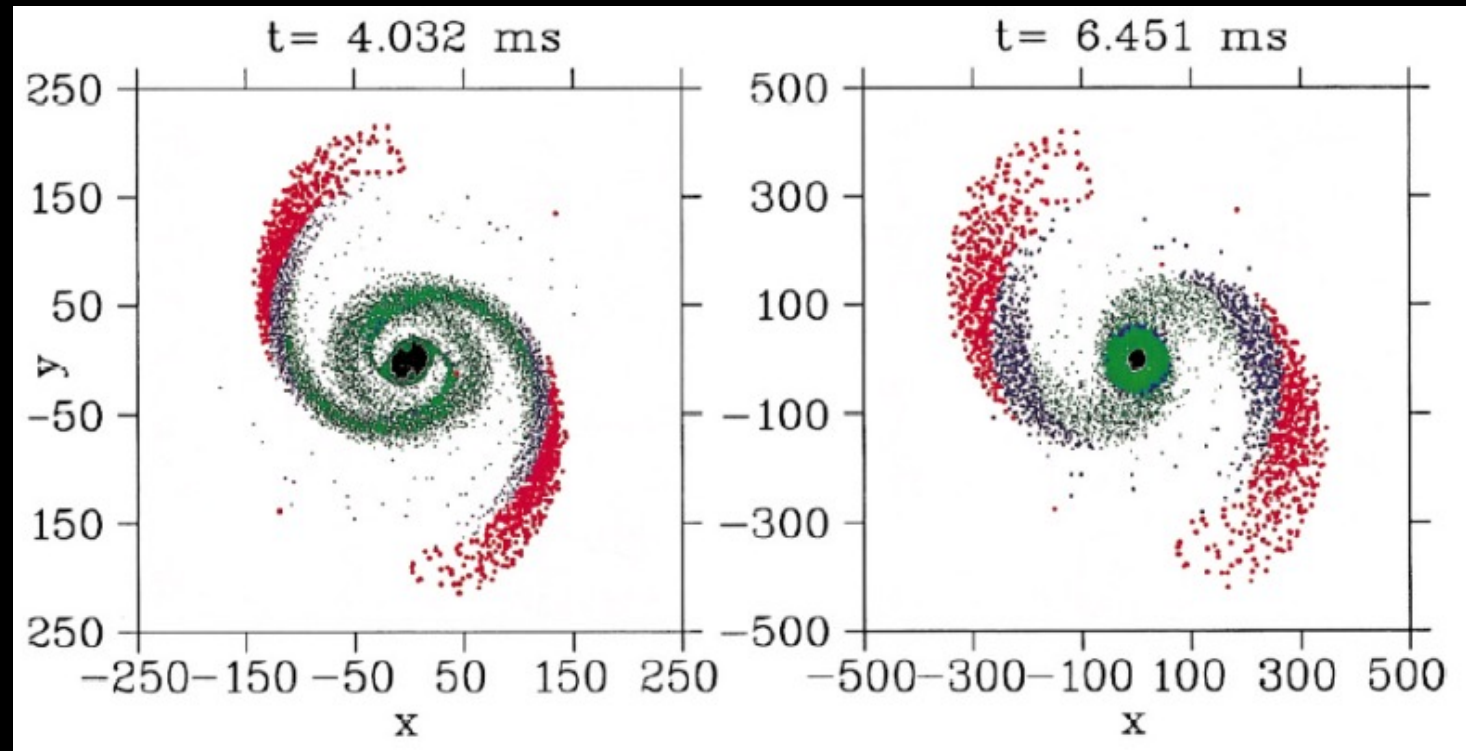
Joint Institute for Nuclear Astrophysics 2002

Movie : H. Schatz, National Superconducting Cyclotron Laboratory  
 Calculation : K. Vaughan, J.L. Galache, and A. Arahamian, University of Notre Dame  
 Model : B. Meyer, Clemson University and R. Surman, North Carolina State



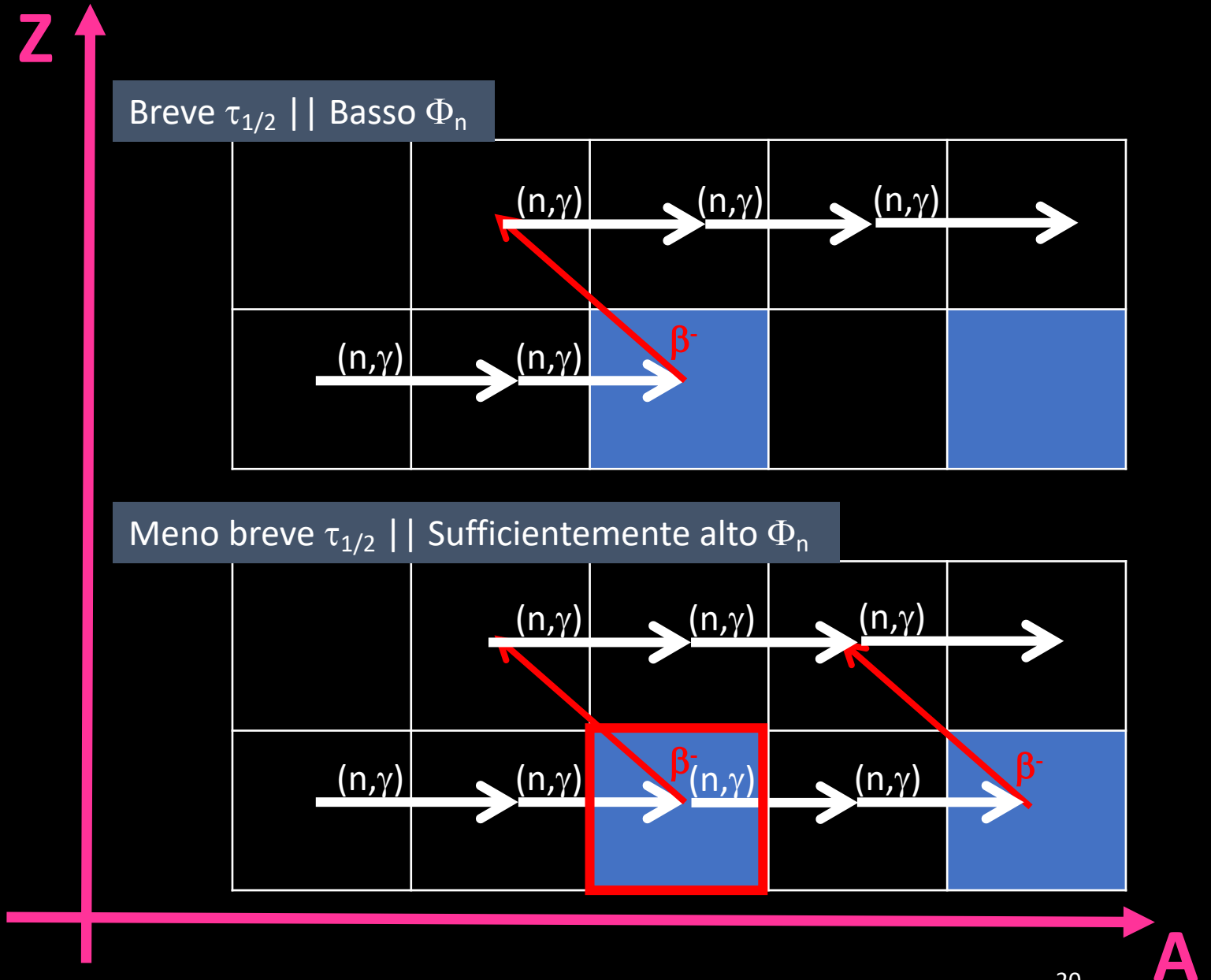
## Eventi di supernova

## Emissione di materia da *neutron star mergers*



*Studio delle  
Condizioni stellari*

*Punti di diramazione  
lungo il processo s*



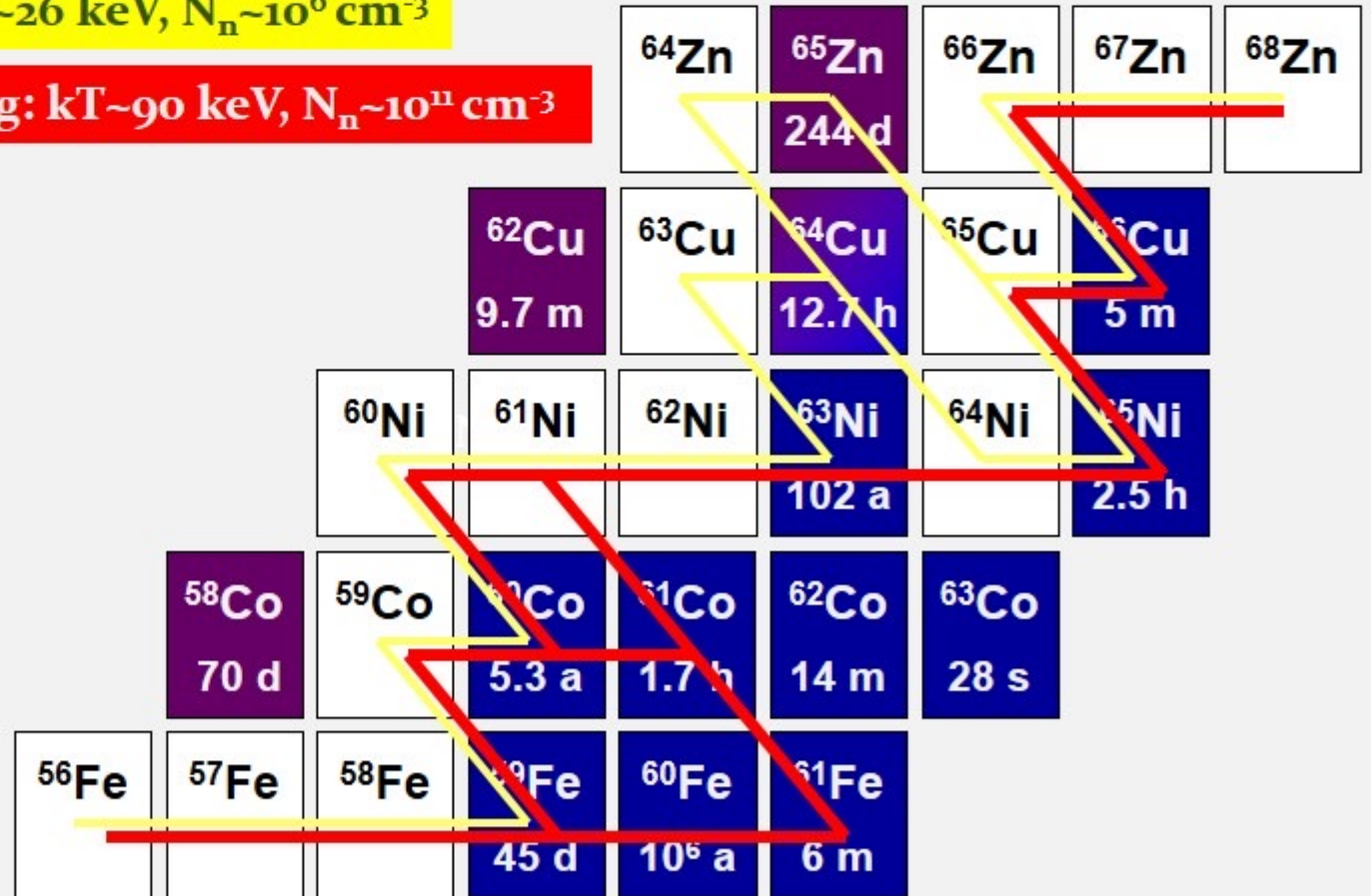
# Studio delle Condizioni stellari

Possibili scenari  
(in stelle massive)

He core burning:  $kT \sim 26 \text{ keV}$ ,  $N_n \sim 10^6 \text{ cm}^{-3}$

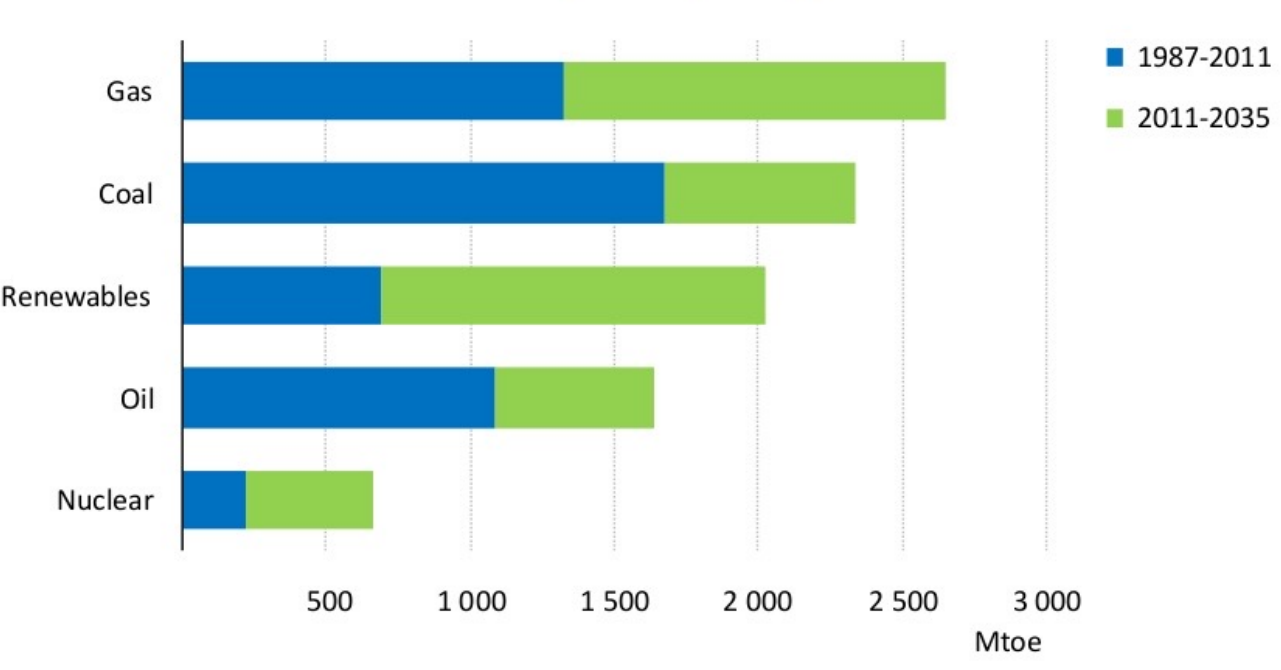
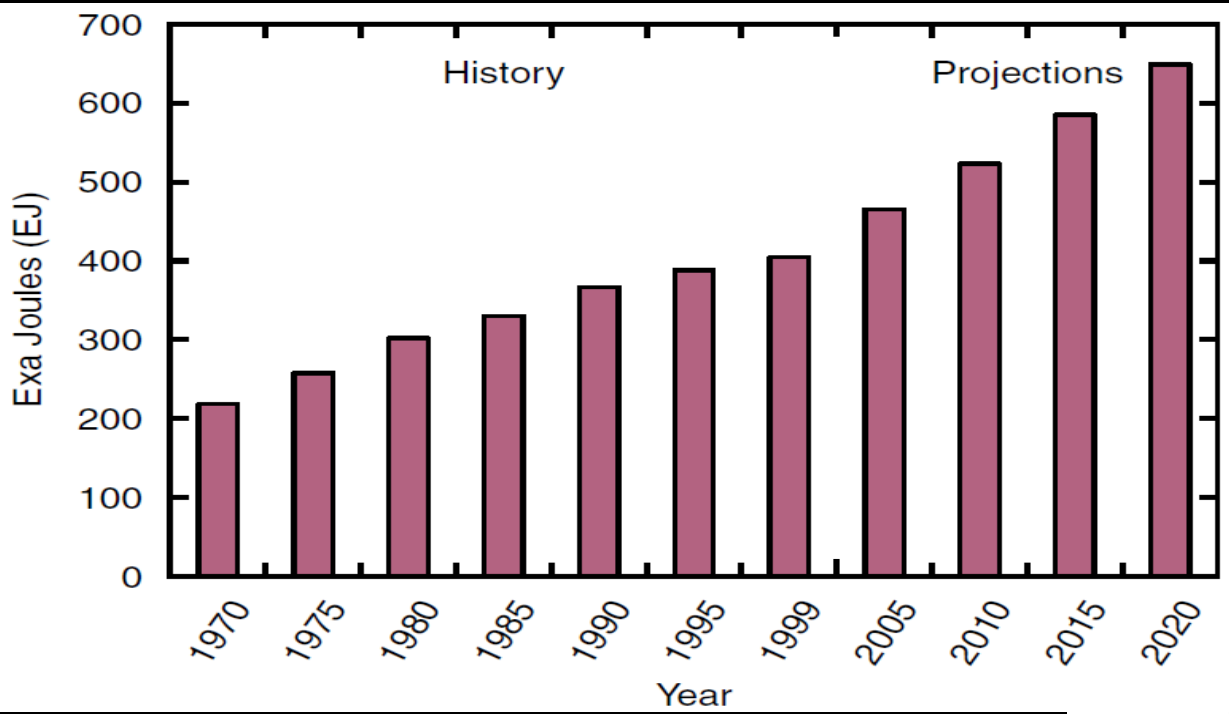
Carbon shell burning:  $kT \sim 90 \text{ keV}$ ,  $N_n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

$^{63}\text{Ni}(n, \gamma)$



# Tecnologia nucleare

# La richiesta energetica mondiale cresce rapidamente e con essa i problemi collegati al riscaldamento globale



Fonte OECD/NEA

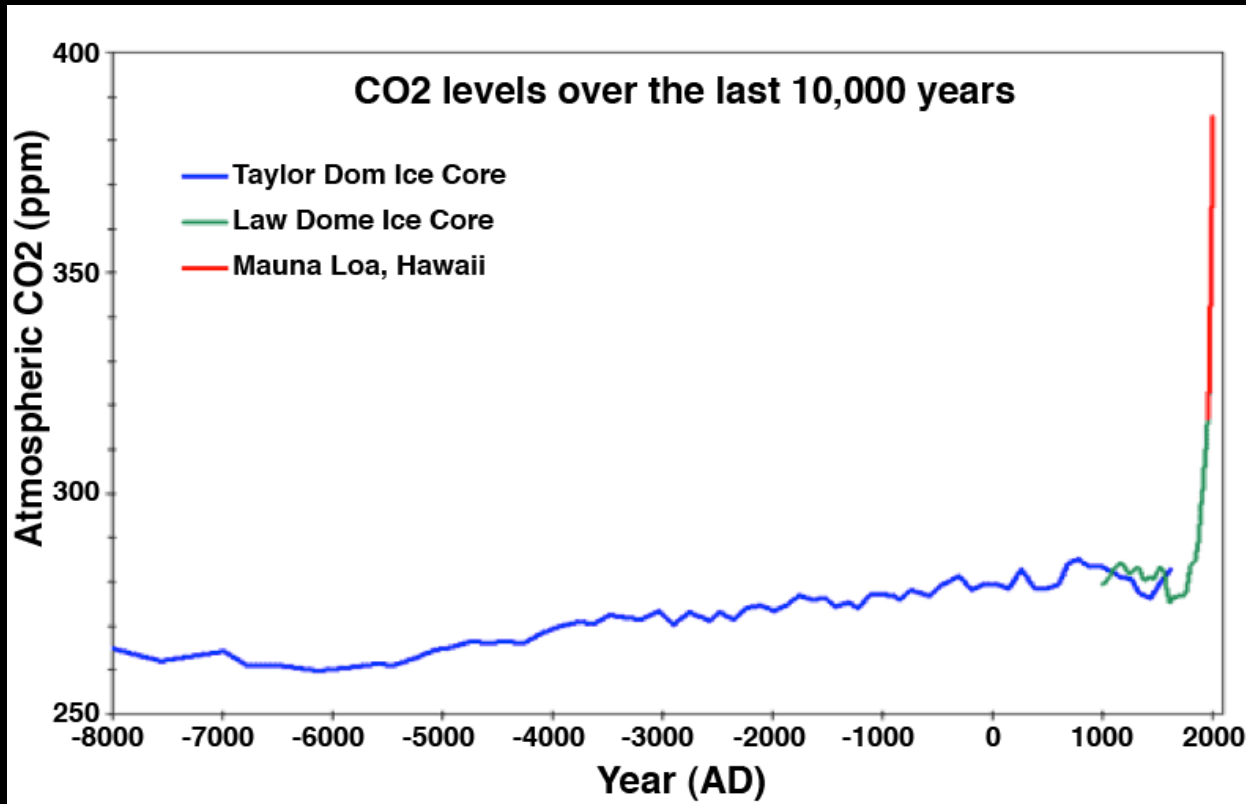
# L'utilizzo di fonti fossili ha un **IMPATTO FORTEMENTE NEGATIVO**

## **Riscaldamento globale**

Aumento dei livelli di CO<sub>2</sub> in atmosfera

## **Salute pubblica**

Si stima che l'inquinamento atmosferico uccida 13 persone ogni minuto, a causa di tumori al polmone, malattie cardiache ed ictus (World health day 2022, OMS)





# La chance del nucleare

## A sfavore

Incidenti gravi

(Three Mile Island, Chernobyl, Fukushima)

Gestione delle scorie nucleari

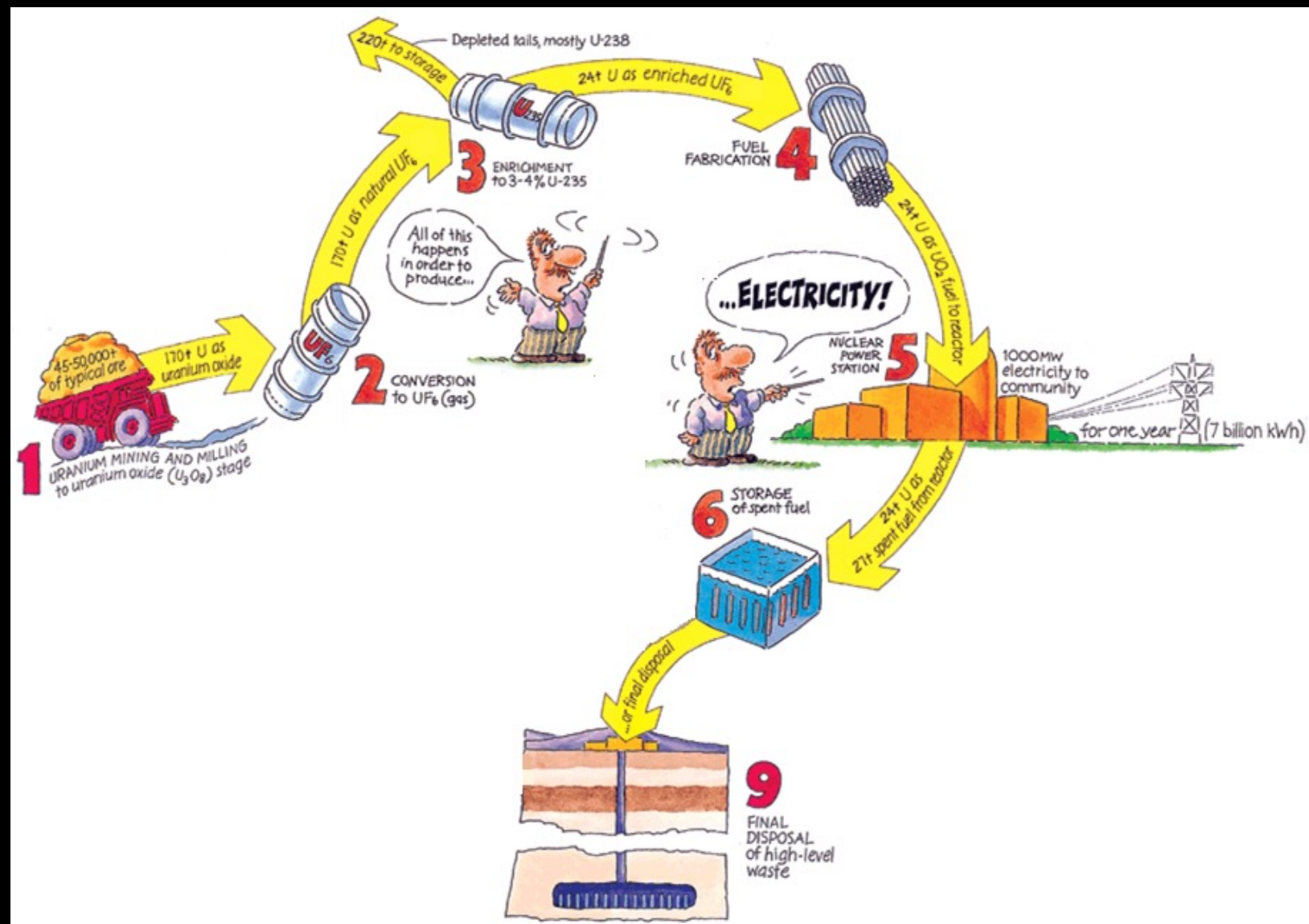
(immagazzinamento sicuro per milioni di anni)

Proliferazione nucleare

## A favore

Non produce gas serra

Tecnologia consolidata



	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 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 2,411 · 10 <sup>4</sup> a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 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 22,5 h 1,54 · 10 <sup>5</sup> a	Np 237 2,444 · 10 <sup>6</sup> a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m 65 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m 5,5 m	Np 243 1,85 m
U 233 1,592 · 10 <sup>5</sup> a	U 234 0,0055	U 235 0,7200	U 236 120 m 4,2 · 10 <sup>7</sup> a	U 237 175 d	U 238 99,2745	U 239 13,5 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 6,70 h	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 232 100	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, 245Cm  
1.5 Kg/yr

241Am: 11.6 Kg/yr  
243Am: 4.8 Kg/yr

239Pu: 125 Kg/yr

237Np: 16 Kg/yr

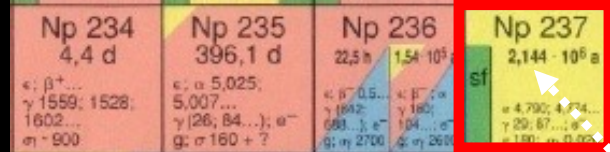
LLFP  
76.2 Kg/yr

**Scorie  
radioattive**  
quantità prodotte  
annualmente da un 1 GW  
LWR

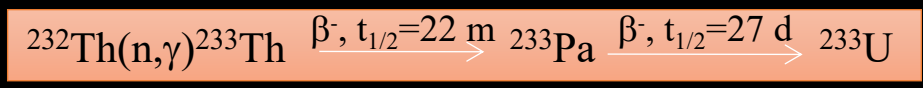
LLFP

# Alternative

	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   16 h	Am 243 7370 a	Am 244 26 m   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 2,411 · 10 <sup>4</sup> a	Pu 240 6563 a	Pu 241 14,35 a	Pu 242 3,750 · 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 22,5 h   1,54 · 10 <sup>5</sup> a	<b>Np 237</b> 2,144 · 10 <sup>6</sup> a	Np 238 2,117 d	Np 239 2,355 d	Np 240 7,22 m   65 m	Np 241 13,9 m	Np 242 2,2 m   3,5 m	Np 243 1,85 m
<b>U 233</b> 1,592 · 10 <sup>5</sup> a	U 234 0,0055 a	U 235 0,7200 a	U 236 120 ns   2,342 · 10 <sup>7</sup> a	U 237 6,75 d	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 2,0 d	Pa 234 1,17 m   6,70 h	Pa 235 24,2 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			



LLFP LLFP



## Reattori Gen-IV

I Reattori nucleari di nuova generazione **devono** soddisfare una serie di criteri di base:

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

## Trasmutazione delle scorie radioattive

Attraverso cattura neutronica (n,  $\gamma$ )

Per LLFF ( $^{79}\text{Se}$ ,  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{121}\text{I}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{151}\text{Sm}$ , ...)



Attraverso cattura neutronica (n,  $\gamma$ ) e fissione indotta da neutroni (n, f)

Per Pu e Attinidi minori



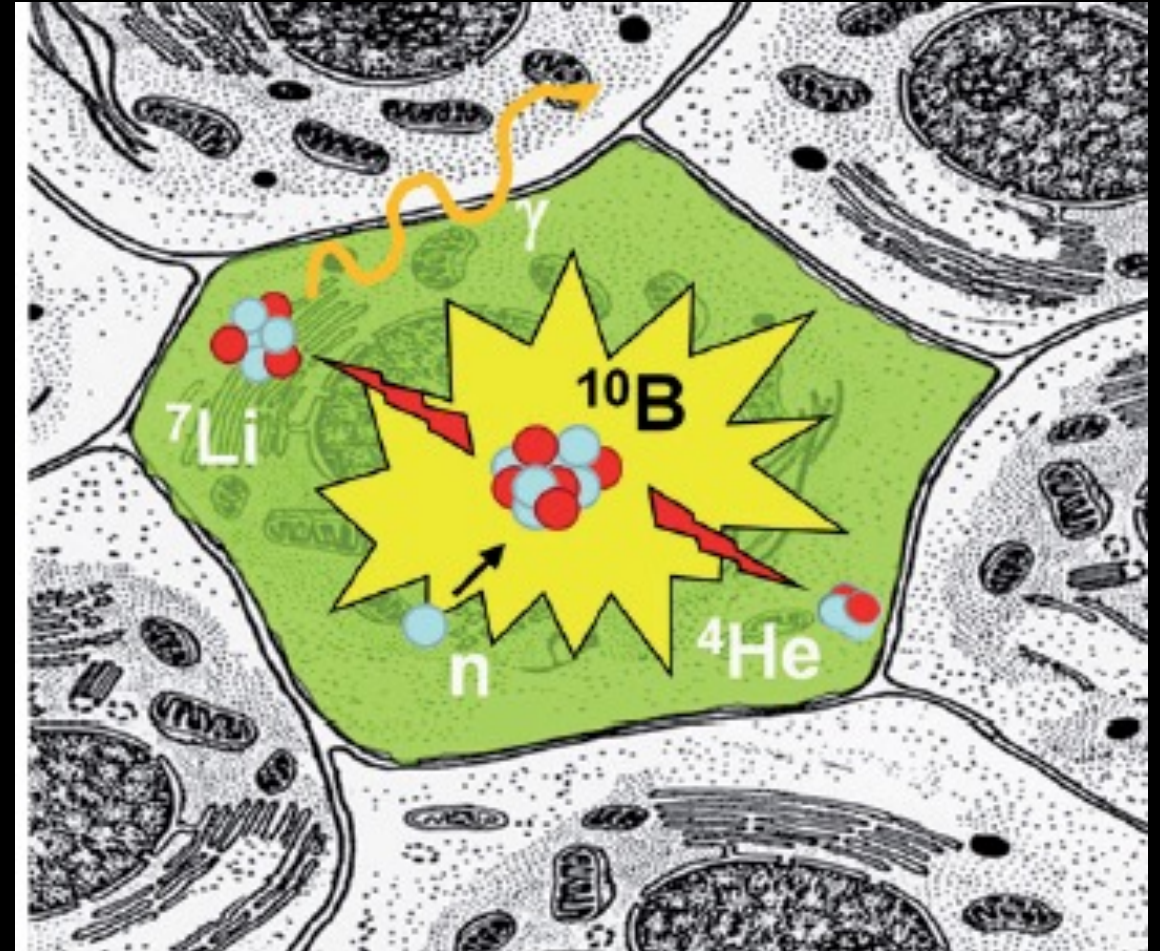
# Fisica medica

## Boron neutron capture therapy (BNCT)

E' una tecnica per il trattamento del cancro in cui le cellule cancerose vengono eliminate per mezzo di una reazione nucleare. La reazione indotta dai neutroni si concentra sul tessuto malato grazie all'immissione in esso di un farmaco contenente atomi di Boro.

BNCT si basa sull'elevata selettività di interazione del  $^{10}\text{B}$  con neutroni termici, a bassa energia, per dare  $^{11}\text{B}$ ; tale specie è instabile e la sua fissione produce due particelle molto energetiche:  $^7\text{Li}$  ed  $^4\text{He}$ .

Queste provocano la morte delle cellule intorno all'atomo di  $^{11}\text{B}$ .



**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

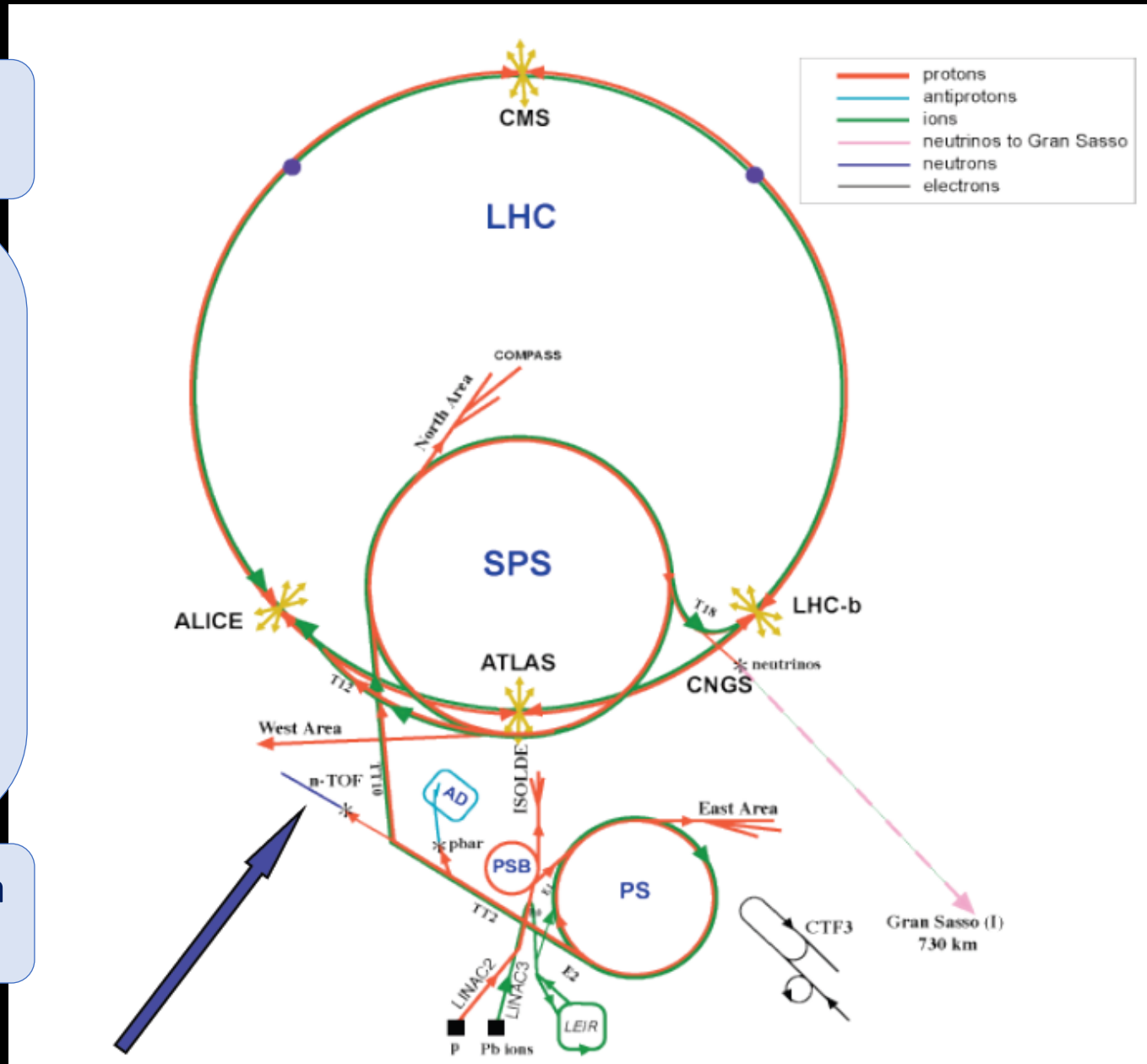
n\_TOF è una sorgente di **spallazione** che sfrutta un fascio di protoni da 20 GeV/c del PS

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

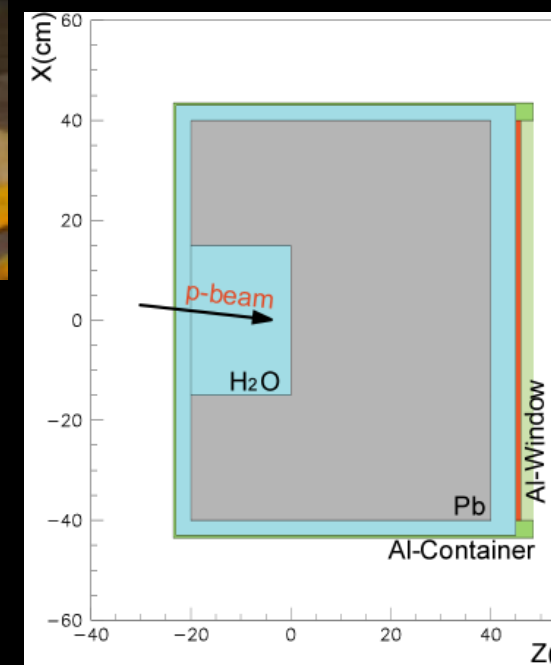
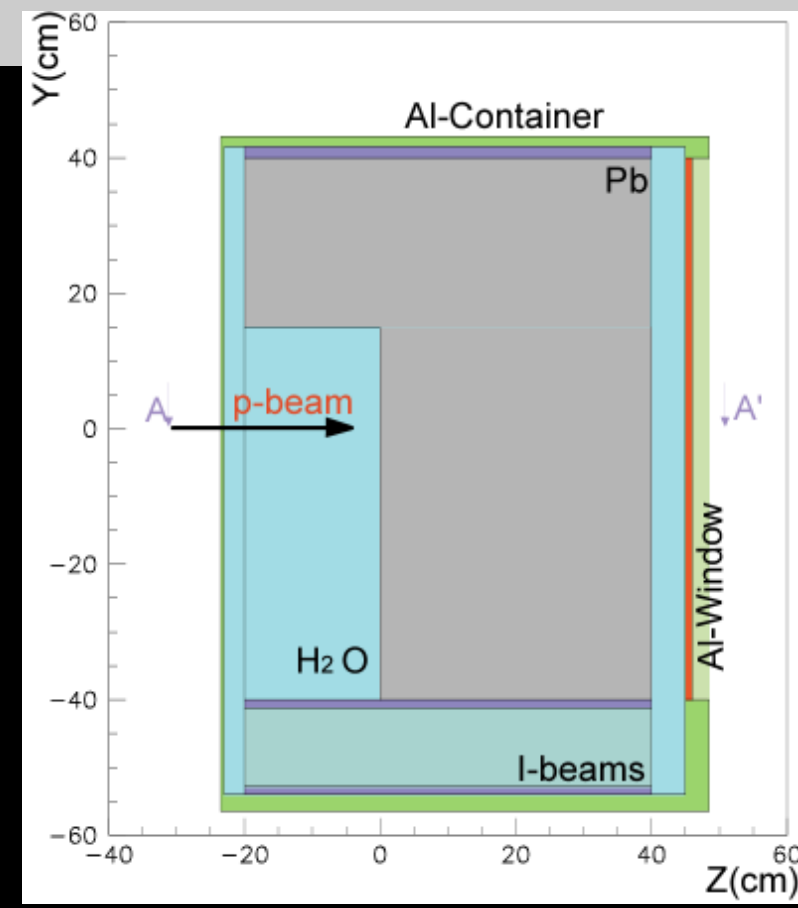
Dimensioni:  $80 \times 80 \times 40 \text{ cm}^3$

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**

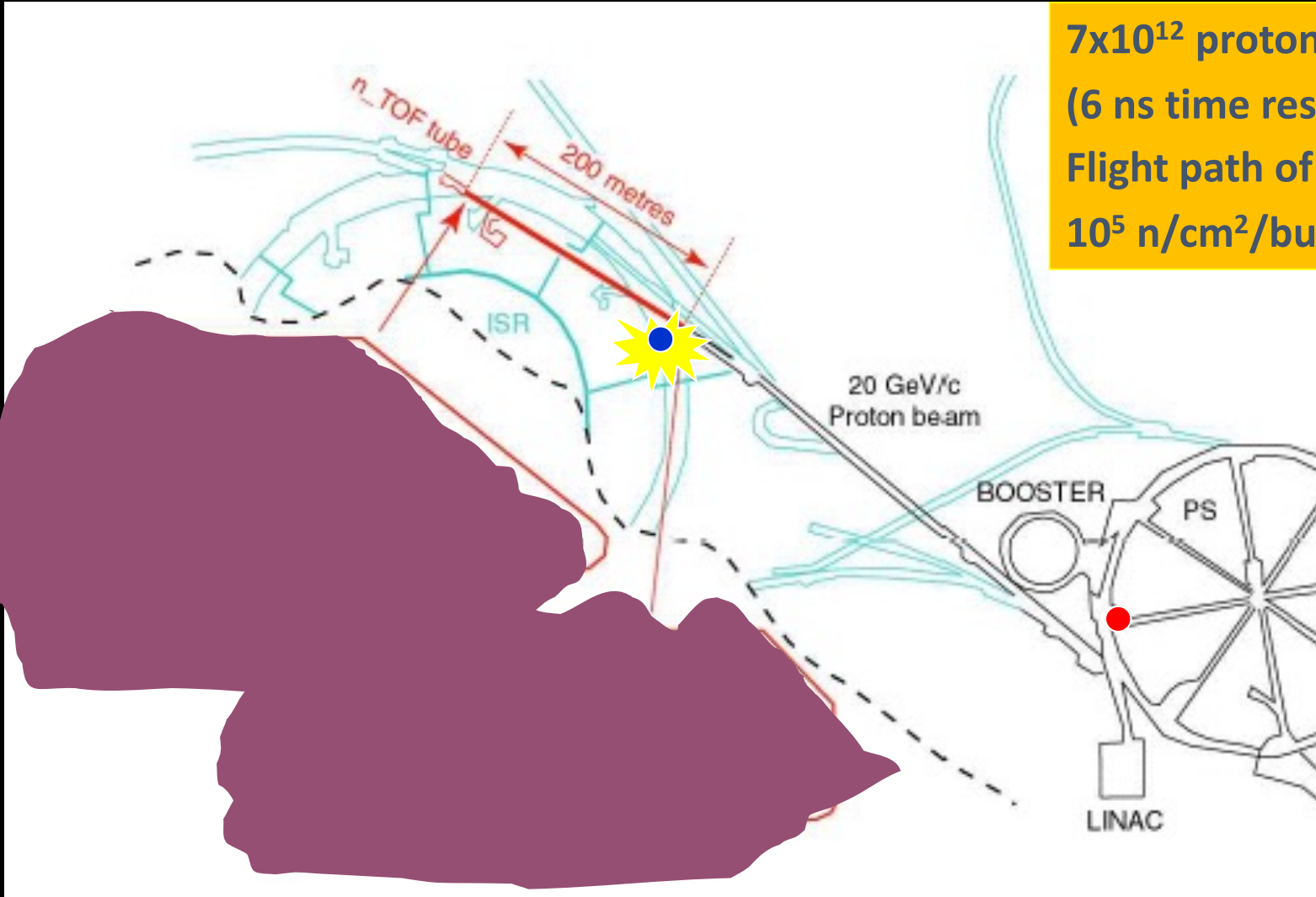
**Pulse width**

**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

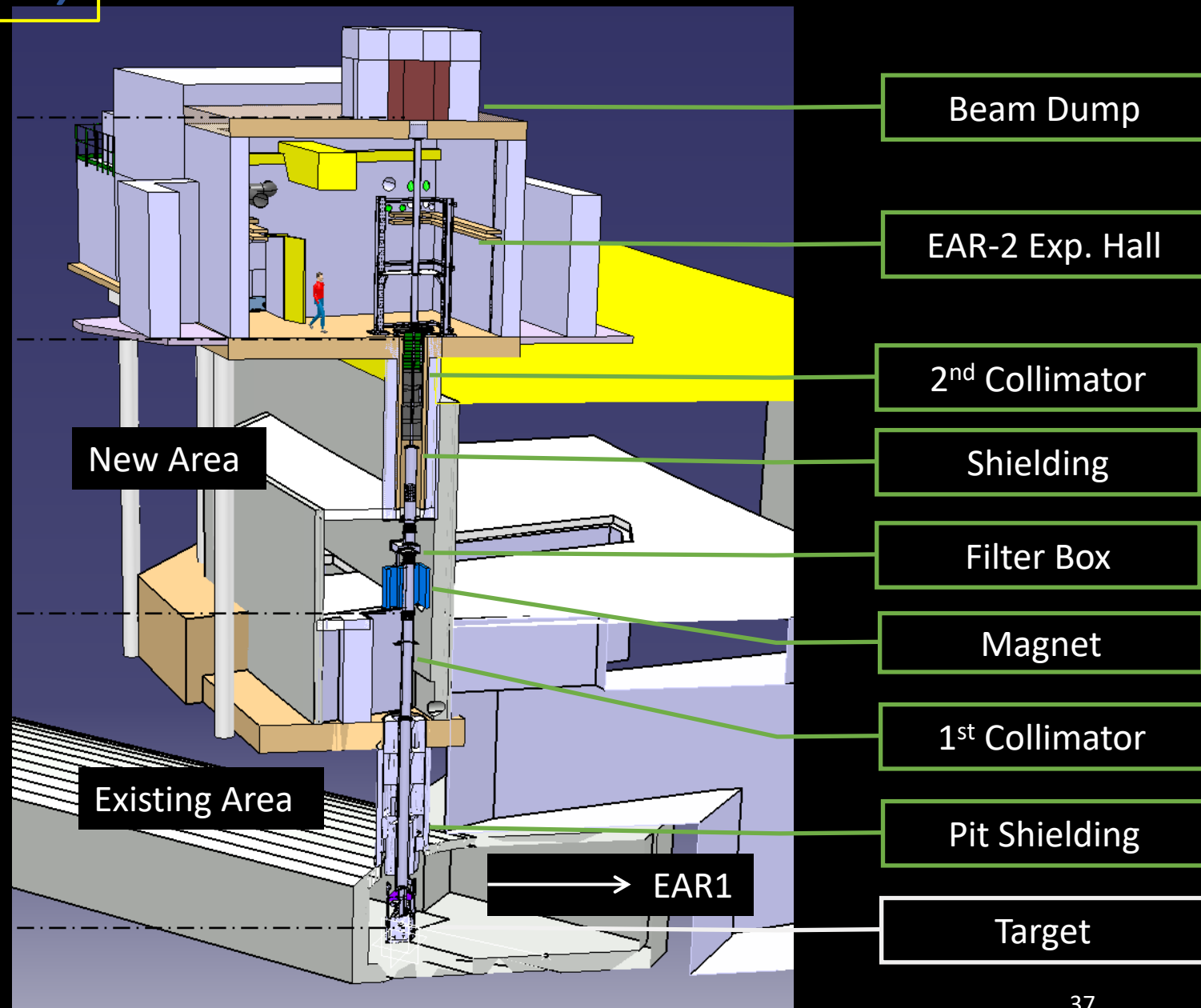
## Produzione e trasporto del fascio di neutroni

- 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

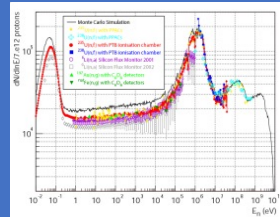
ENEA  
Bologna  
LNF

INAF  
Teramo  
Torino

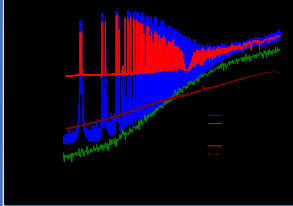
# Timeline

2000

Commissioning



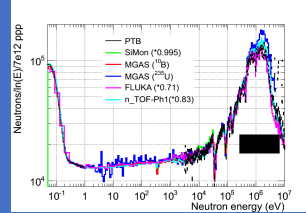
2001-2004



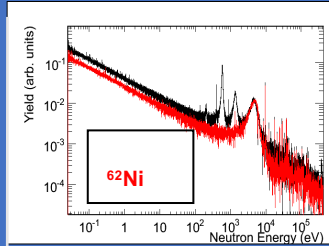
Prima  
campagna di  
misura

2009

Re-Commissioning

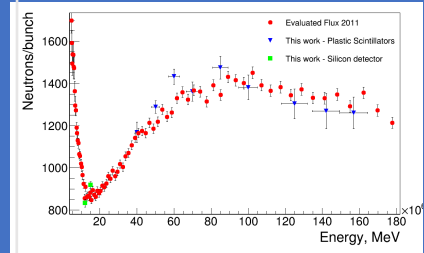


2009-2012



Seconda  
campagna di  
misura

2015-2018



Terza  
campagna di  
misura

Quarta  
campagna di  
misura

202X

1997

1999

Inizio  
realizzazione



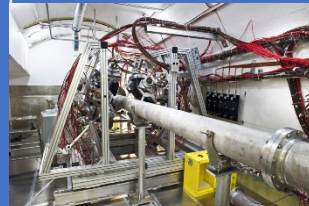
2008

Sostituzione  
bersaglio di  
spallazione

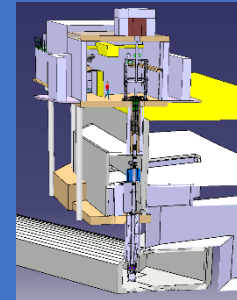


2010

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



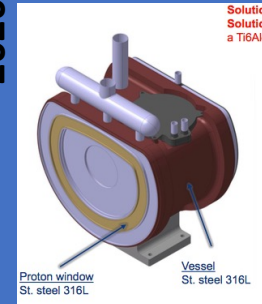
Seconda  
Area  
sperimentale



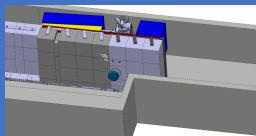
2014

2020

Nuovo  
bersaglio di  
spallazione

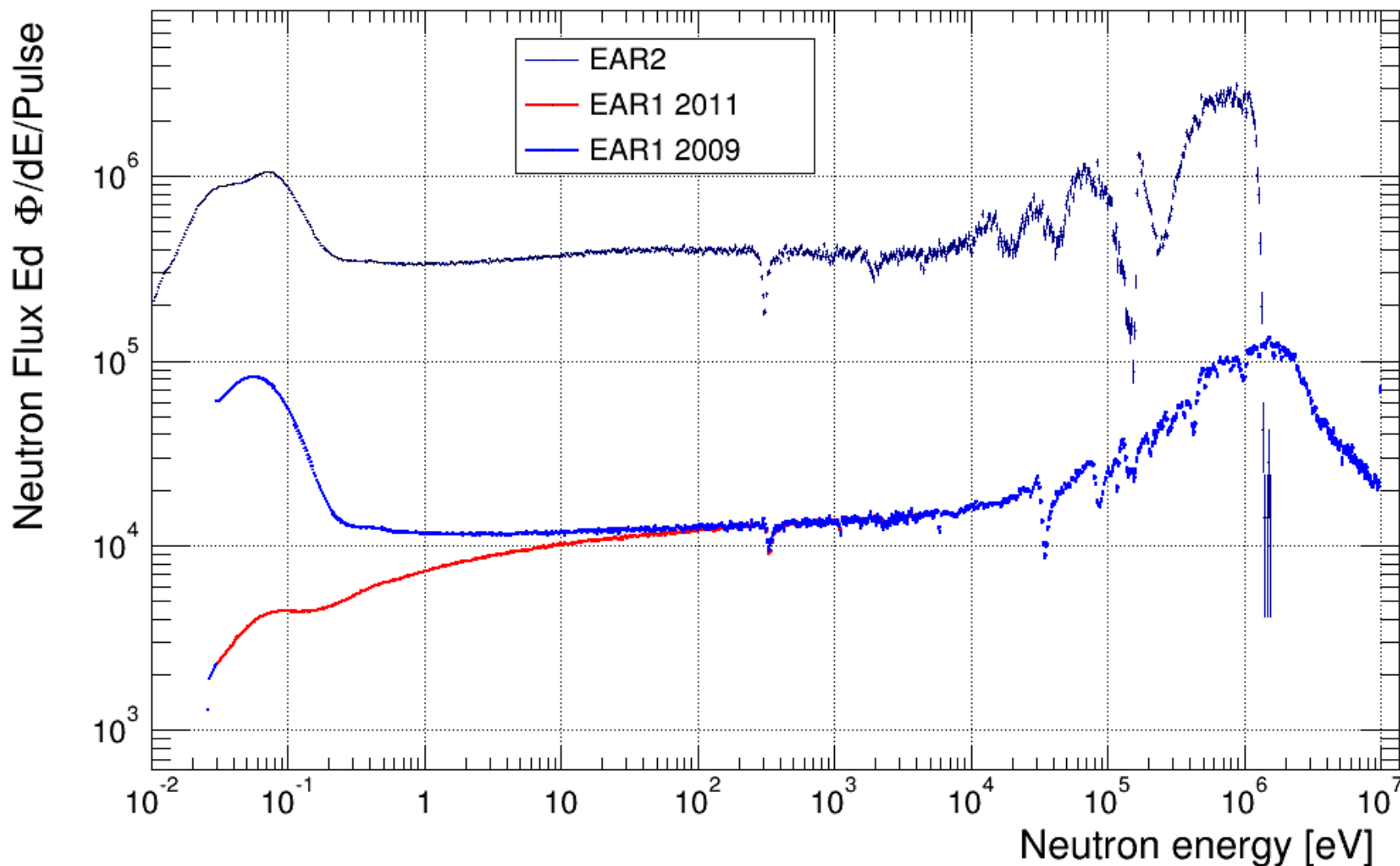


Costruzione  
NEAR station



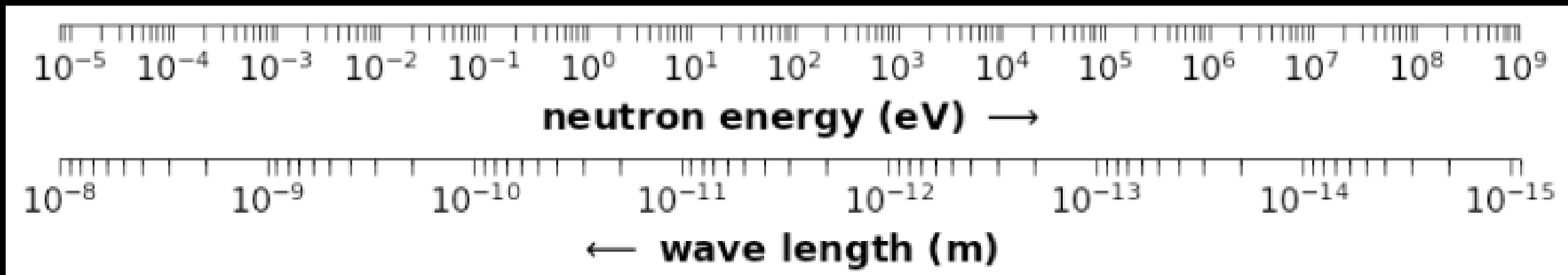
**Broad neutron energy range**

**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

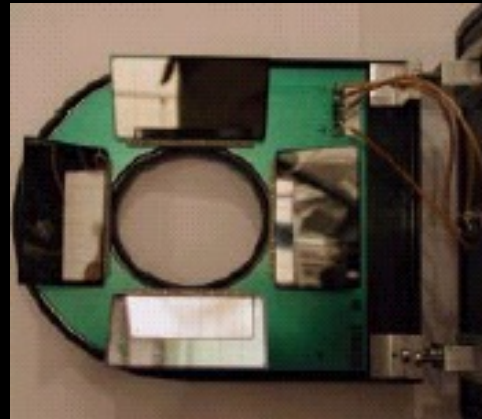
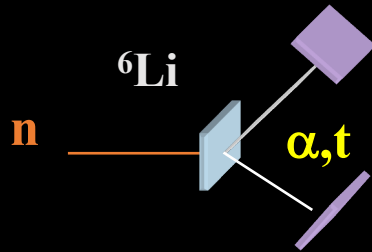
Misura di campioni radioattivi

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

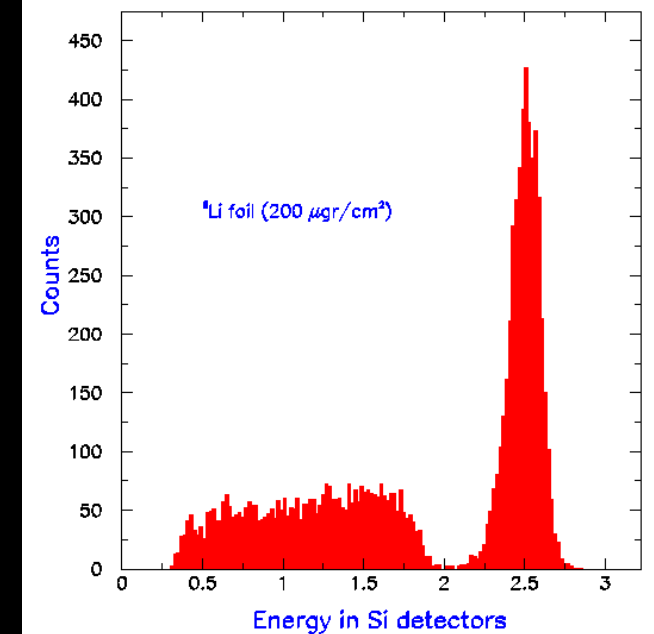
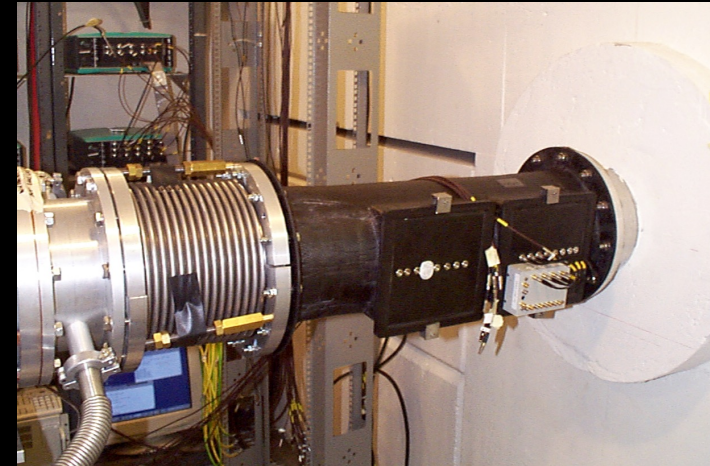
- ✗ Trasparenza al fascio
- ✗ Basso background indotto
- ✗ Semplicità d'uso



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 neutrone dia luogo ad una determinata 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:

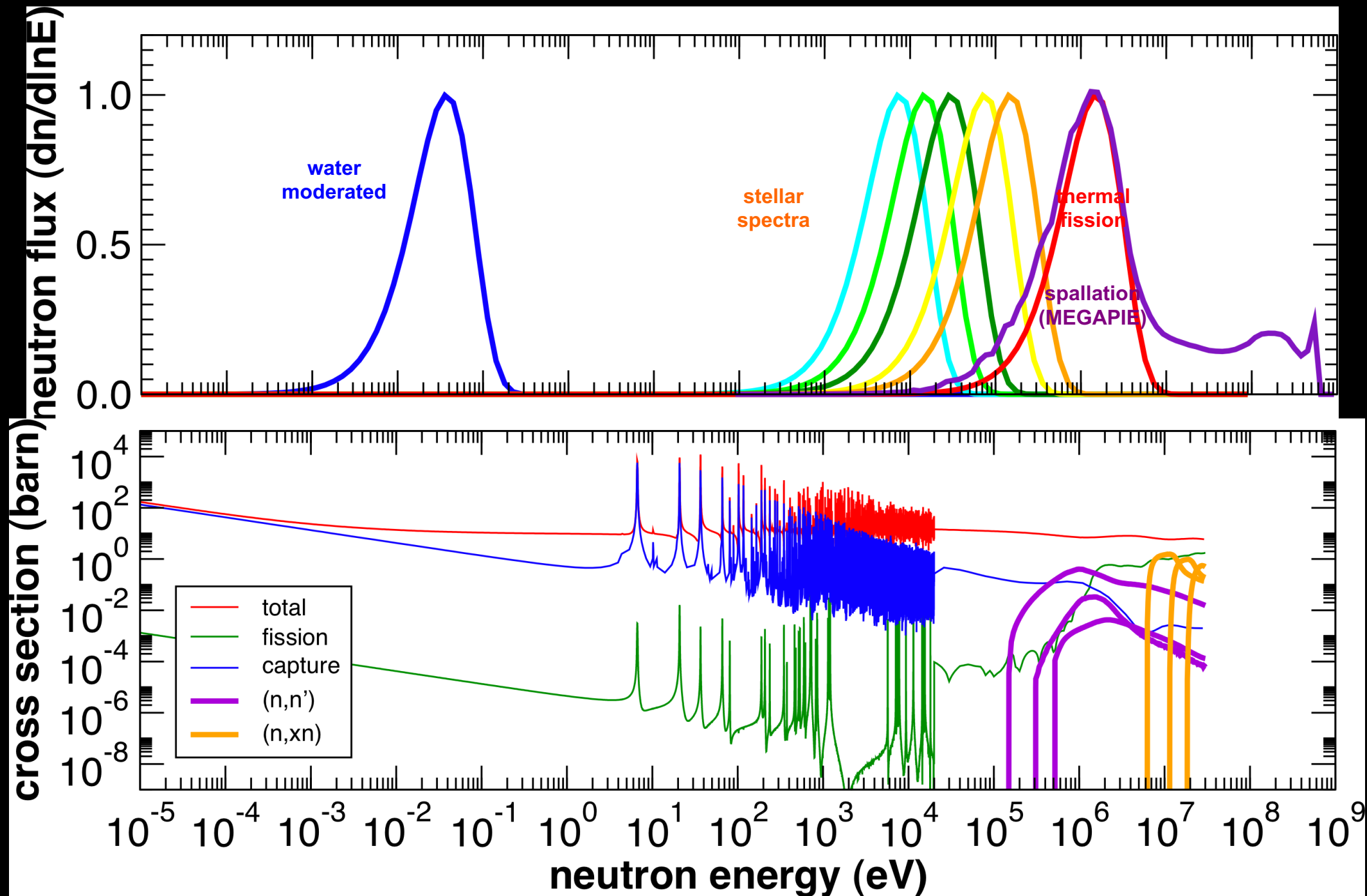
- time-of-flight (relativo ad un riferimento definito, i.e.  $\gamma$ -flash)
- L'energia depositata nel rivelatore
- L'identificazione del tipo di particella rivelata

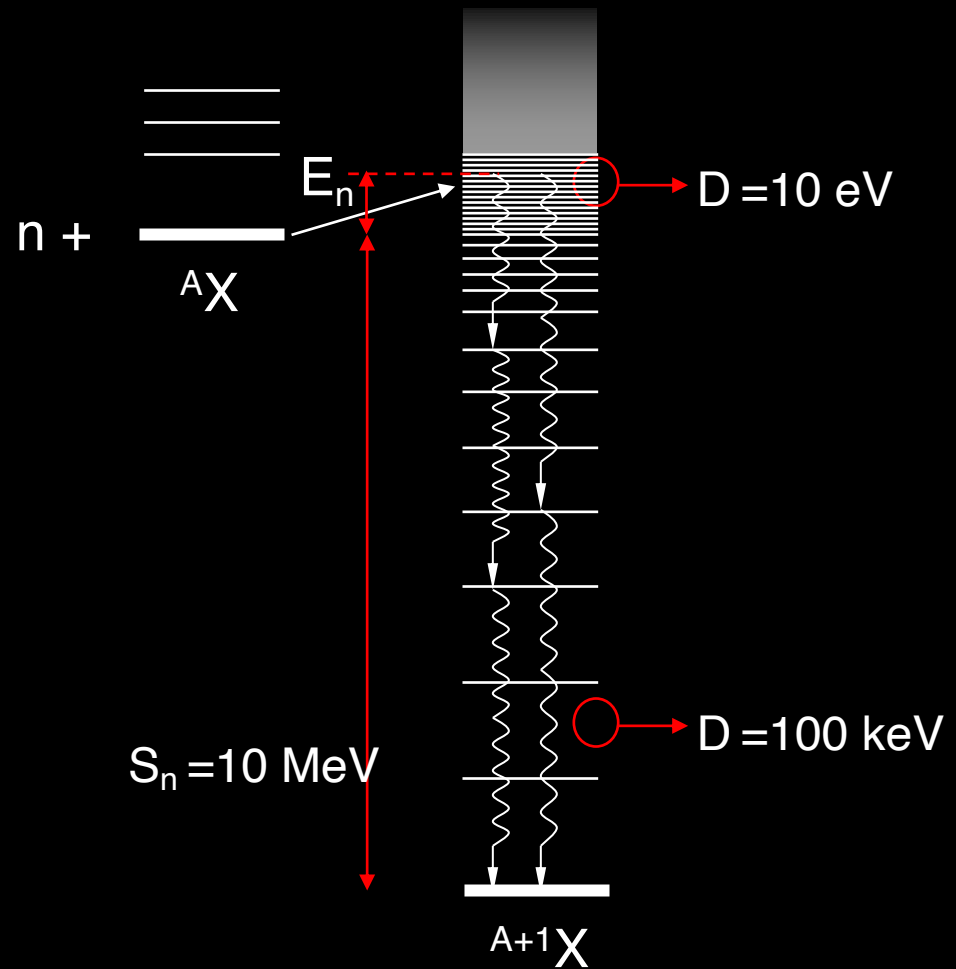
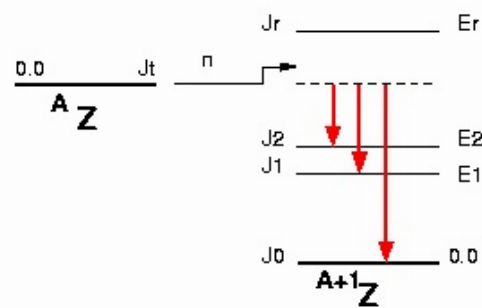
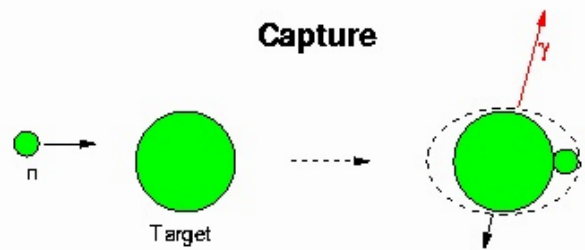
L'energia del neutrone che ha dato luogo alla reazione è ricavata dal ToF:

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

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

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

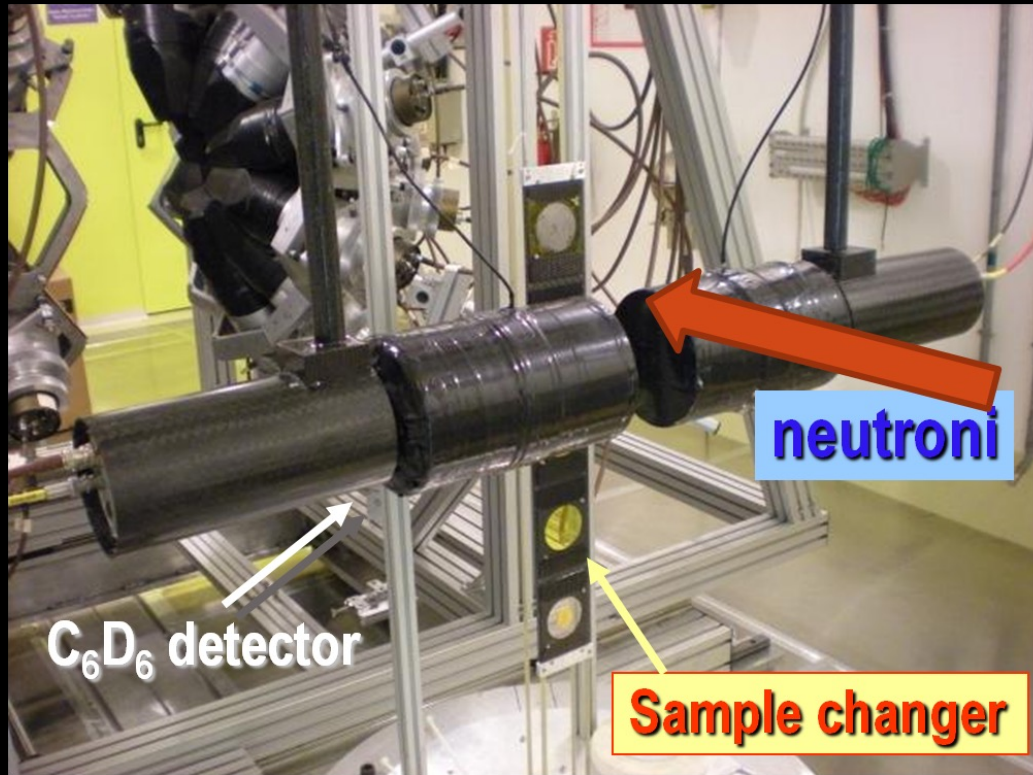




# Set-up di cattura

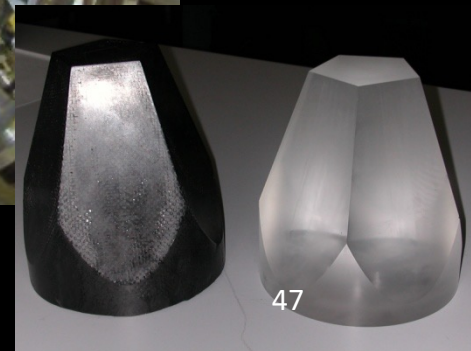
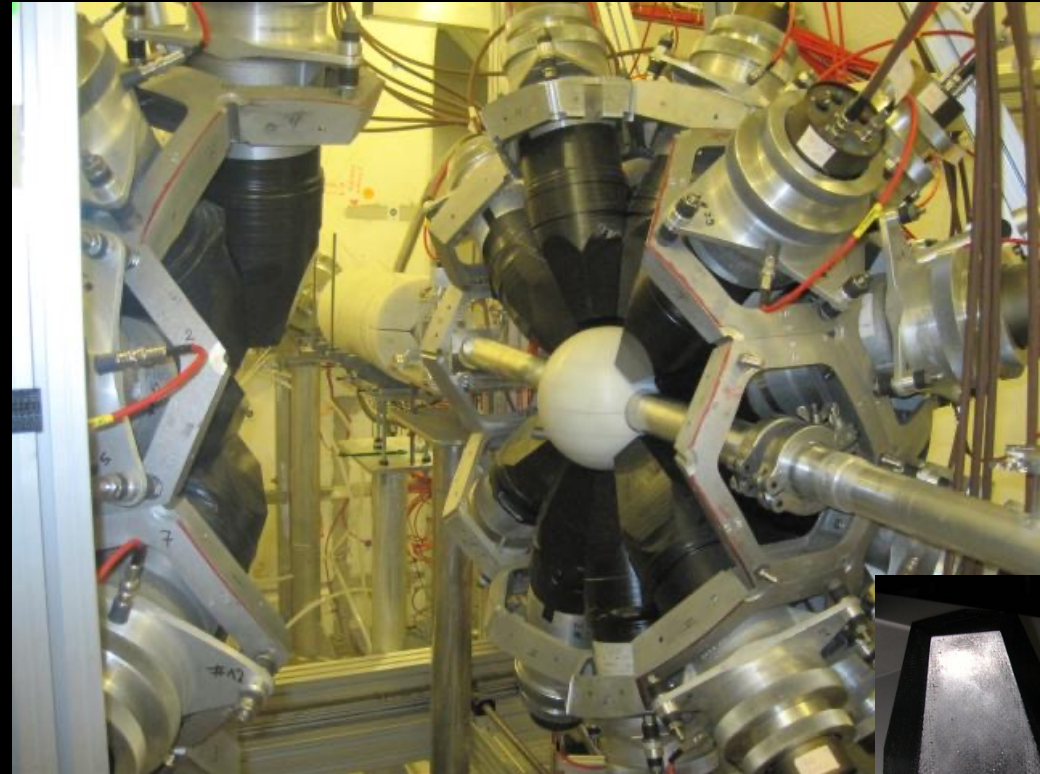
## Scintillatori liquidi

- per misure a bassa neutron sensitivity

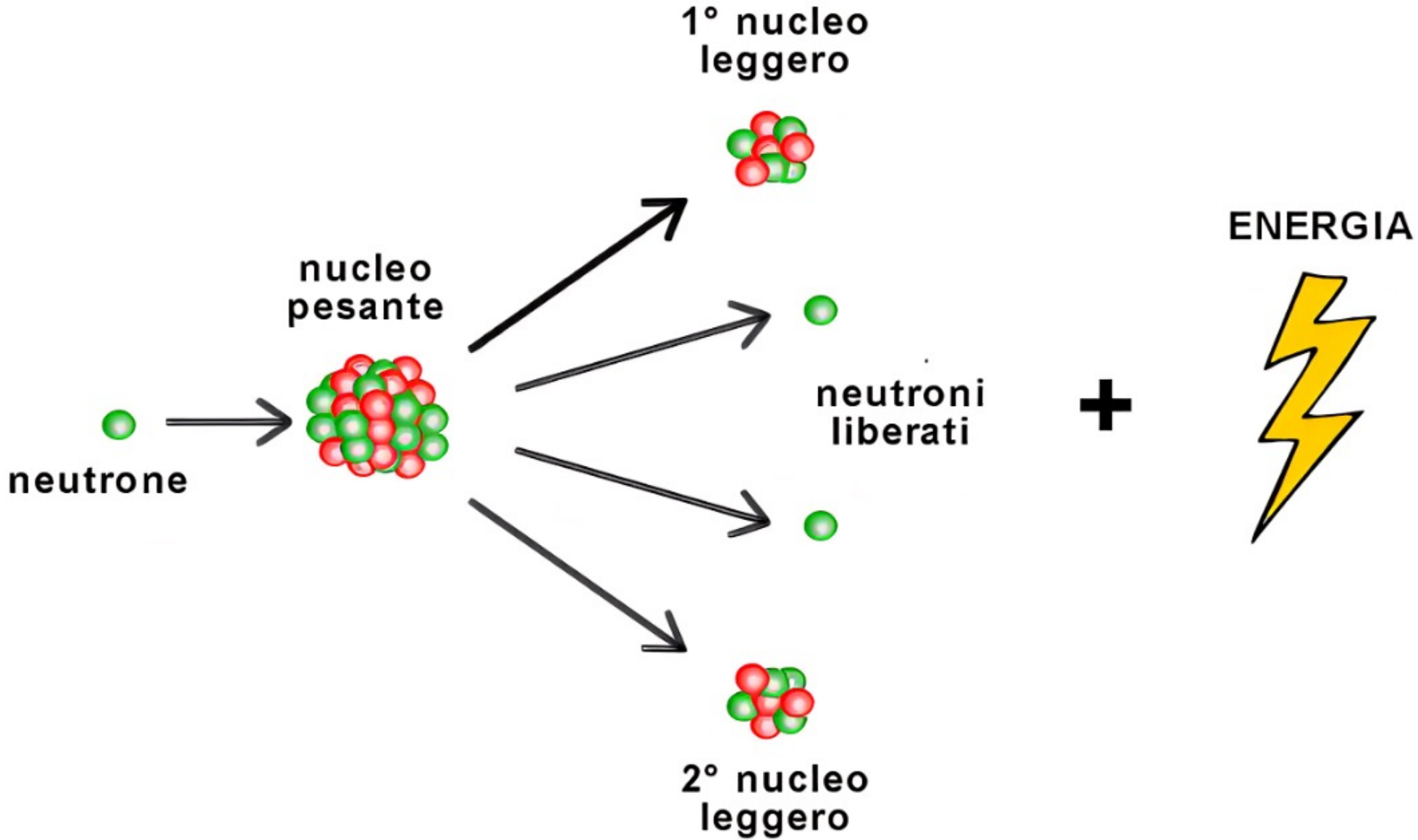


# Total Absorption Calorimeter

- 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



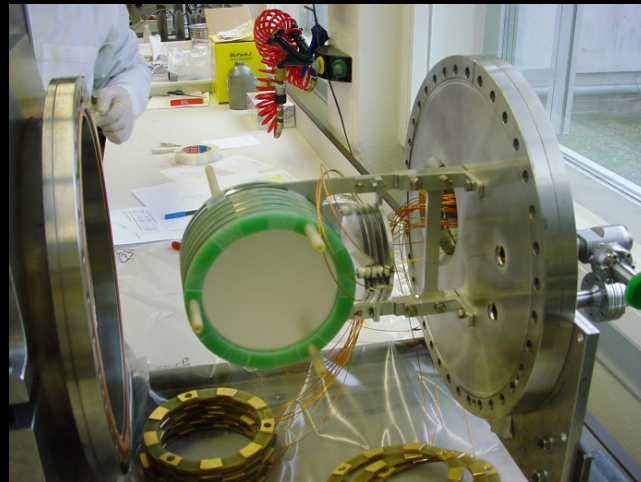
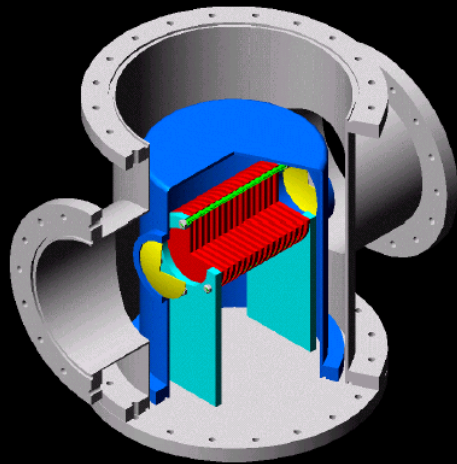
FISSIONE NUCLEARE





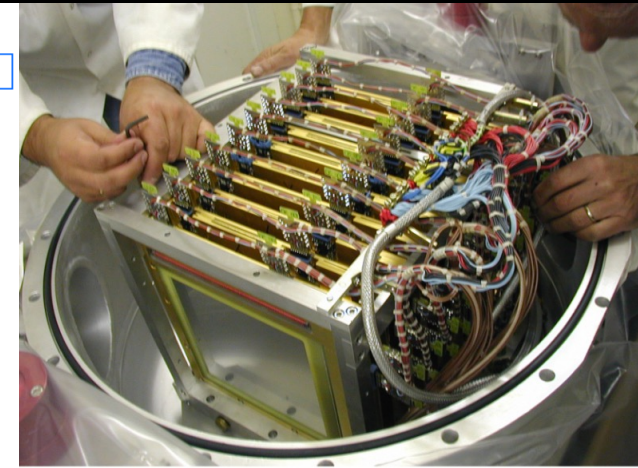
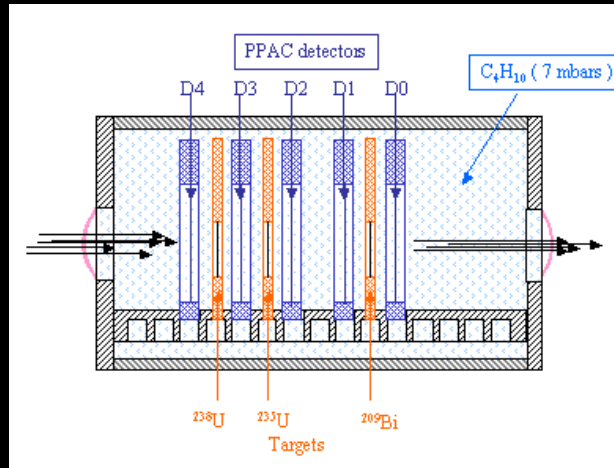
# Set-up di fissione

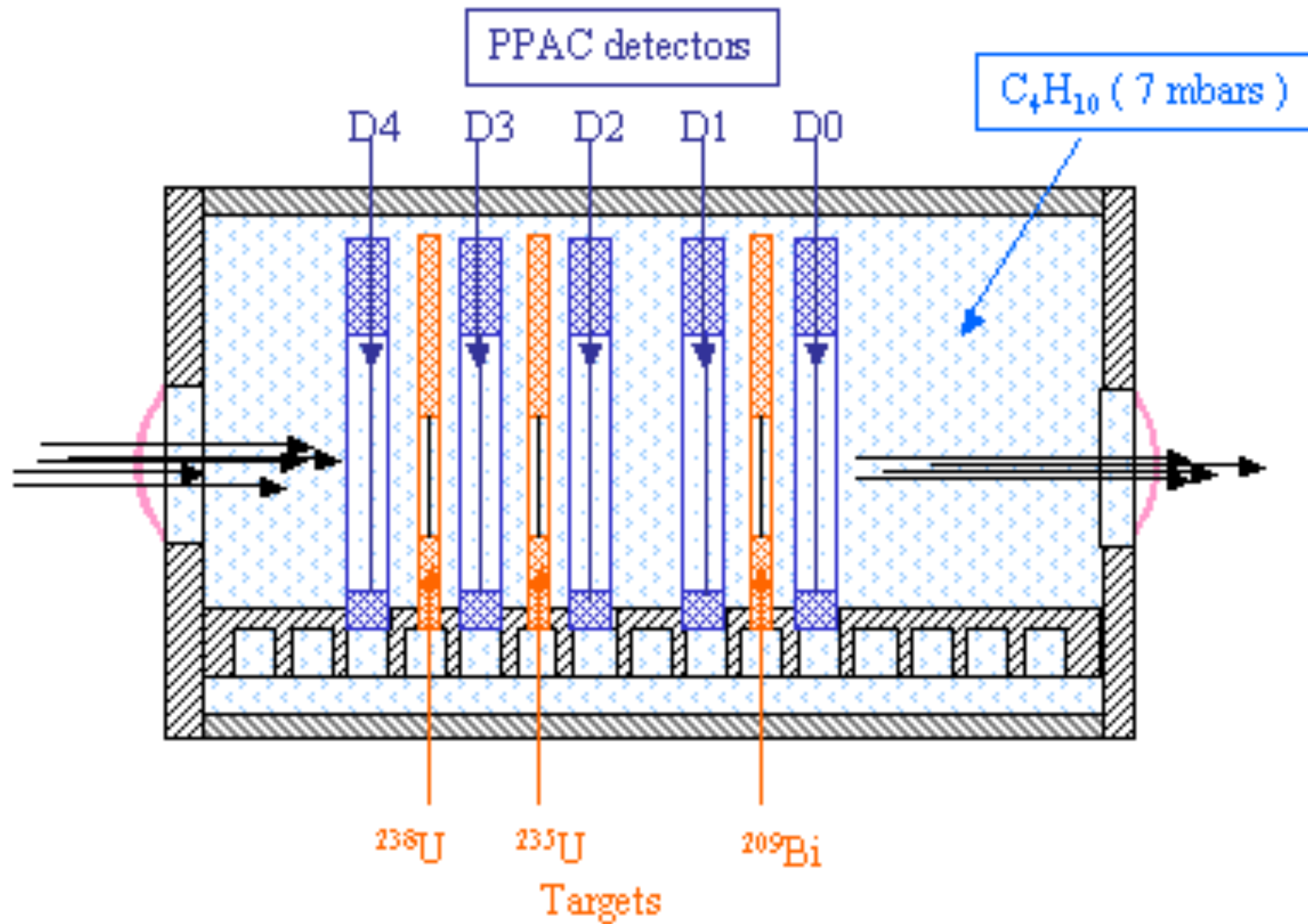
## Multi-sample Fission Ionization Chamber



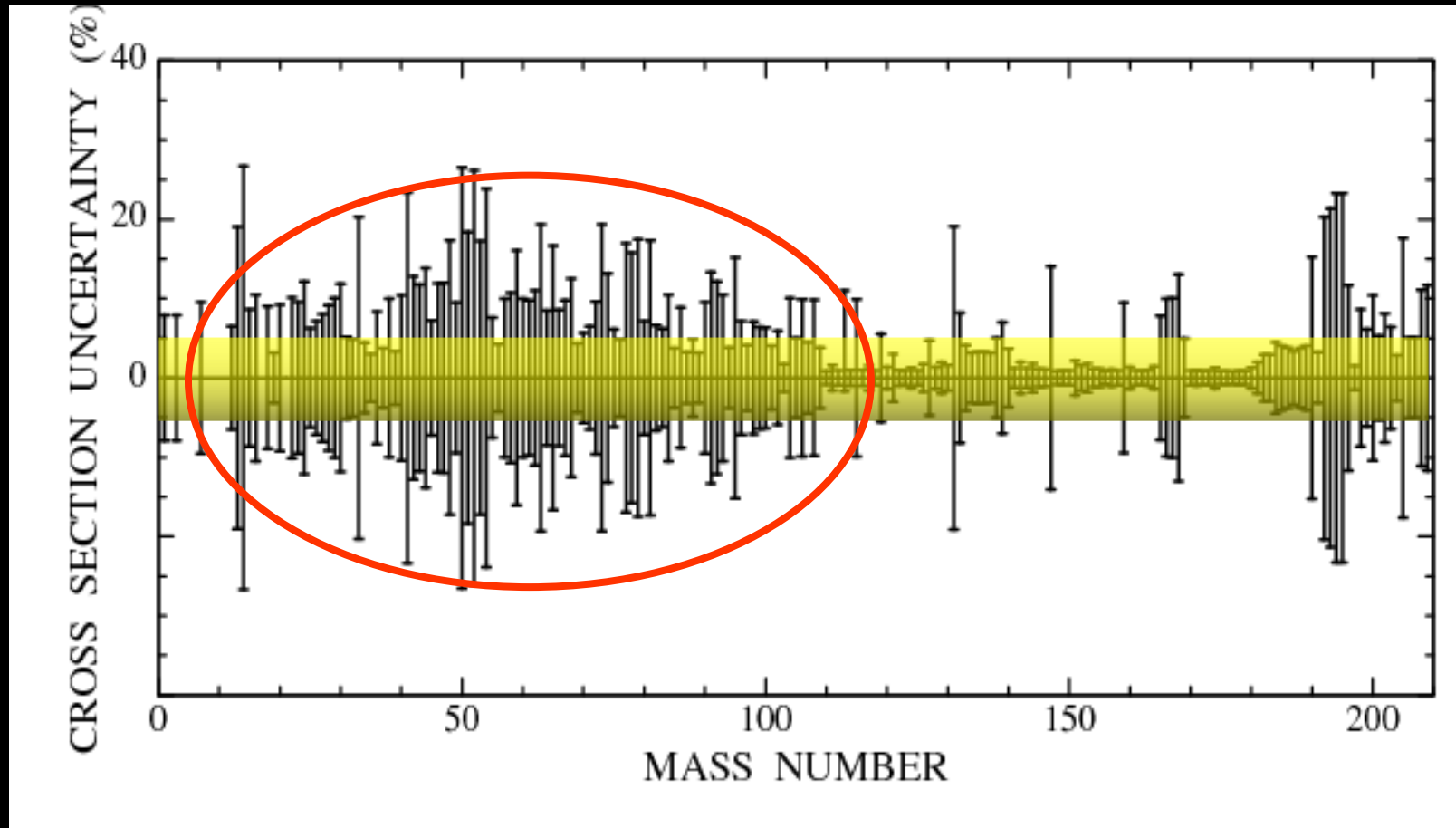
## Parallel Plate Avalanche Counters

- 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  $^{210}\text{Po}$  !

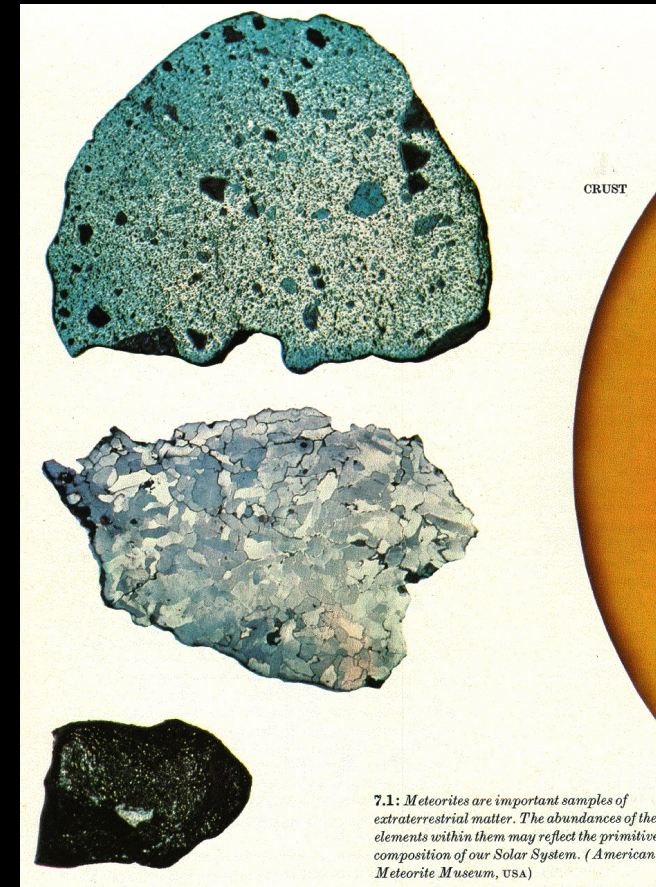
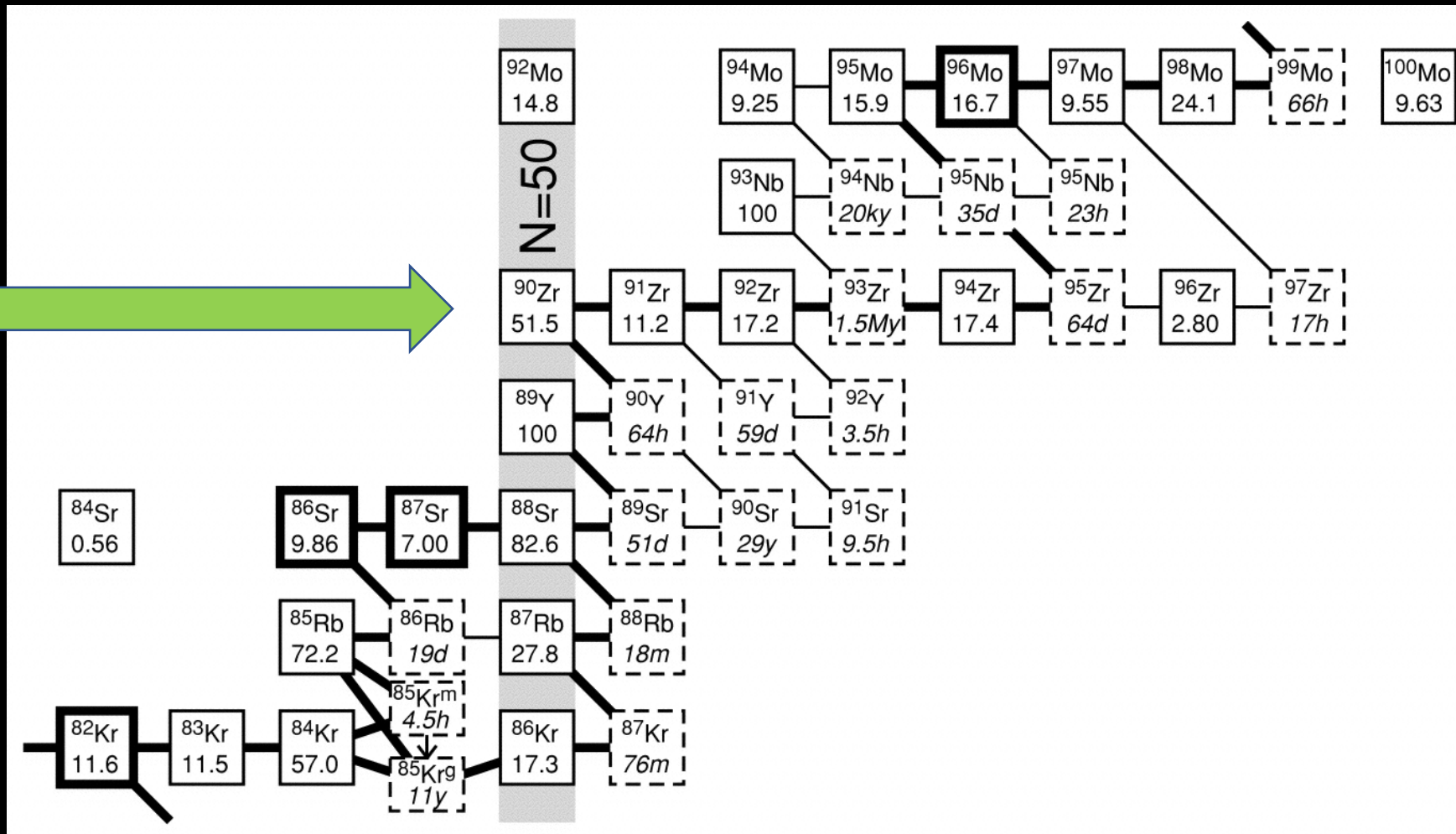


# Maxwellian Averaged Cross Section (MACS)

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

# Studio delle Condizioni stellari

## 90,91,92,93,94,96Zr(n, γ)

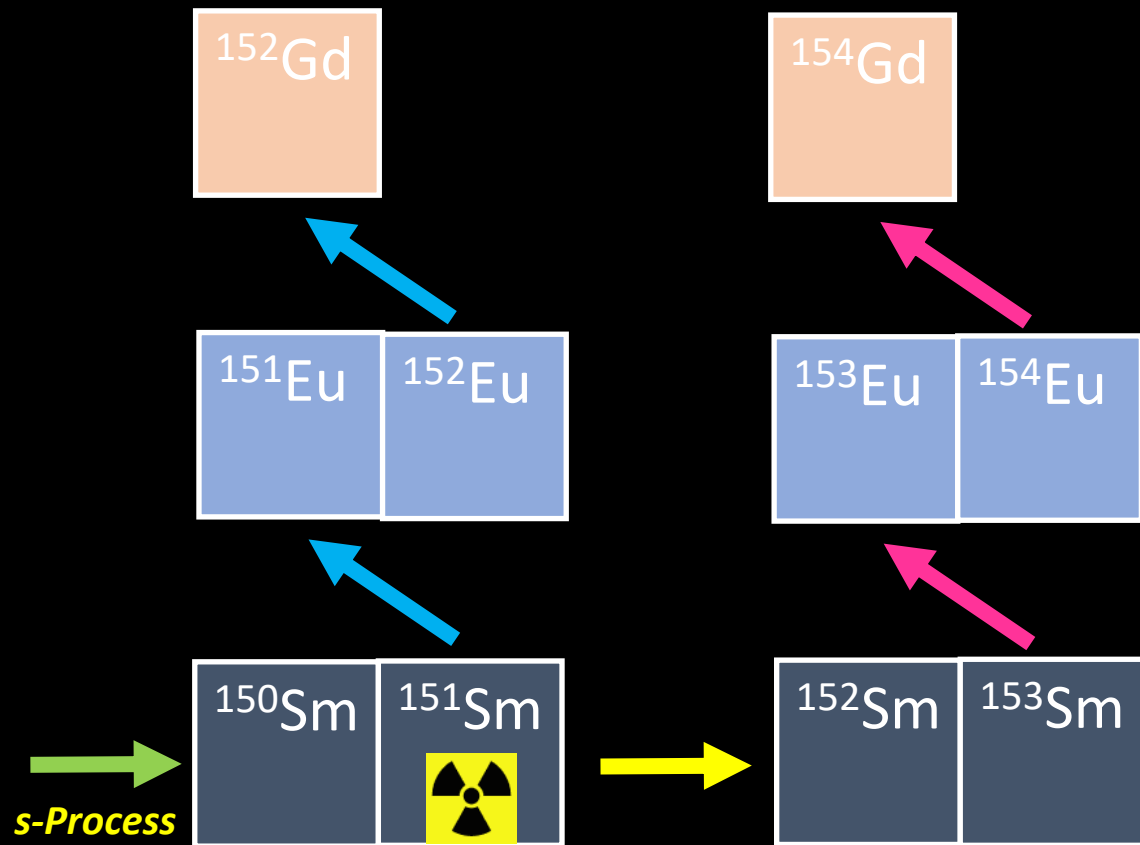


## Polveri interstellari

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)



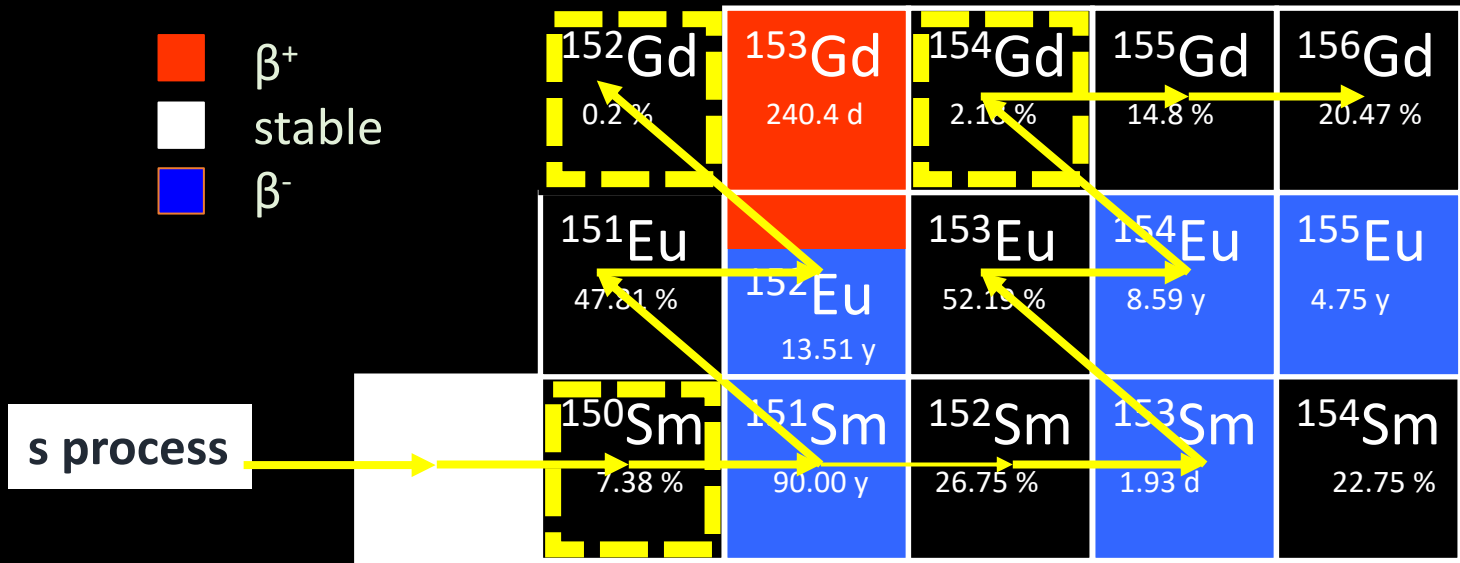
Il branching ratio al  $^{151}\text{Sm}$  dipende da:

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

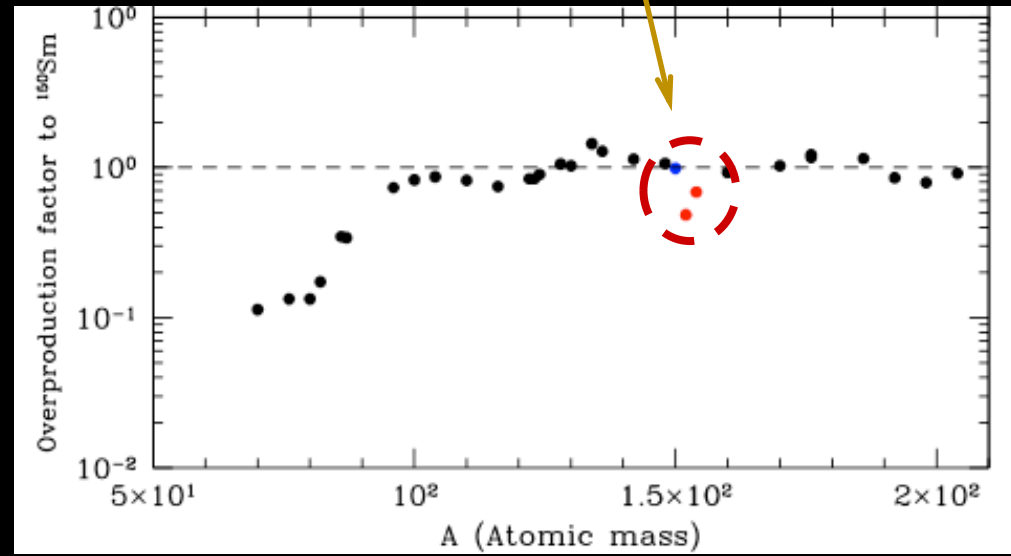
*Il  $^{151}\text{Sm}$  ha un tempo di dimezzamento di 93 anni, che si riduce a 3 in condizioni stellari*

### 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.

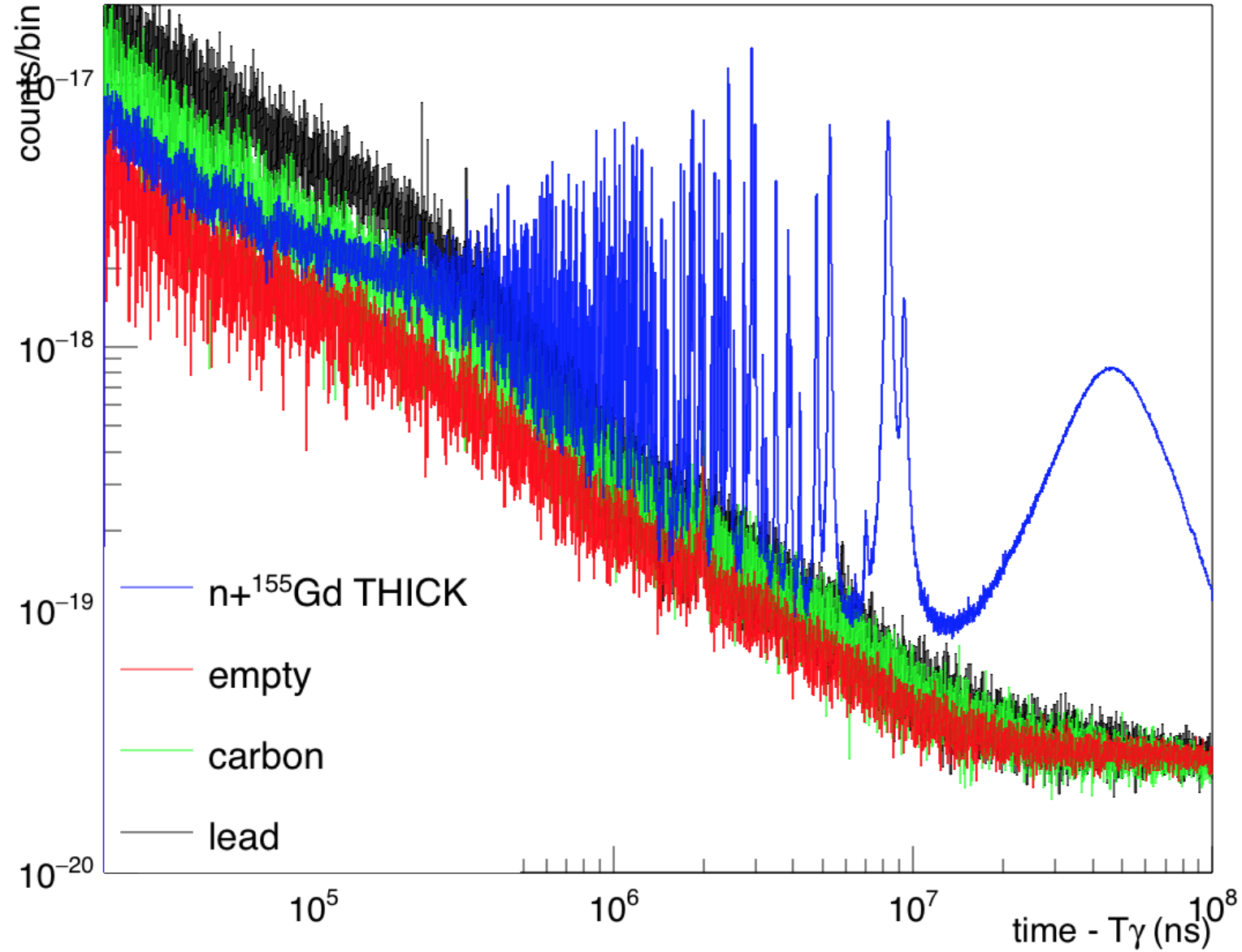
Gli isotopi dispari del Gd ( $^{155}\text{Gd}$  e  $^{157}\text{Gd}$ ) presentano una elevatissima sezione d'urto di cattura per neutron di bassa energia (dal termico a  $\approx 10$  eV).

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%



# Detector 1



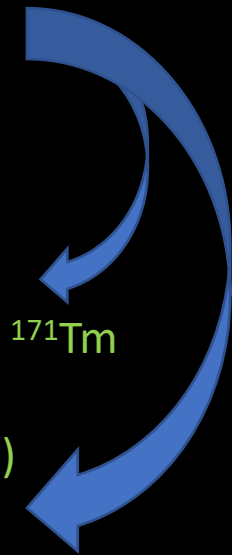
Prima misura sperimentale assoluta



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 97.64 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)

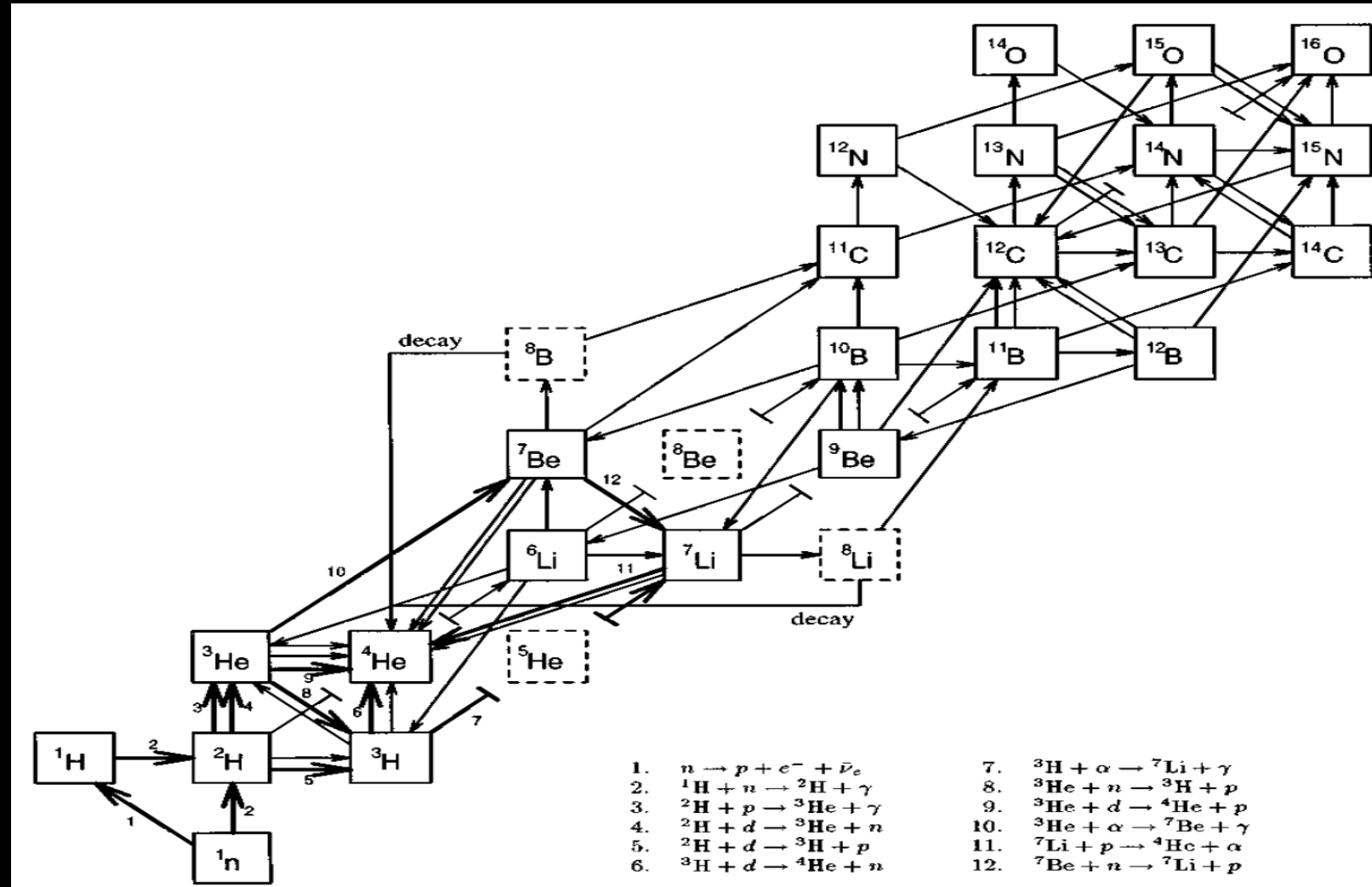
<sup>187</sup>Re contributes to the abundance of the daughter <sup>187</sup>Os

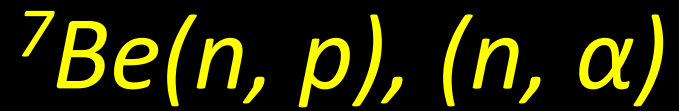
# ${}^7\text{Be}(n, p), (n, \alpha)$

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.



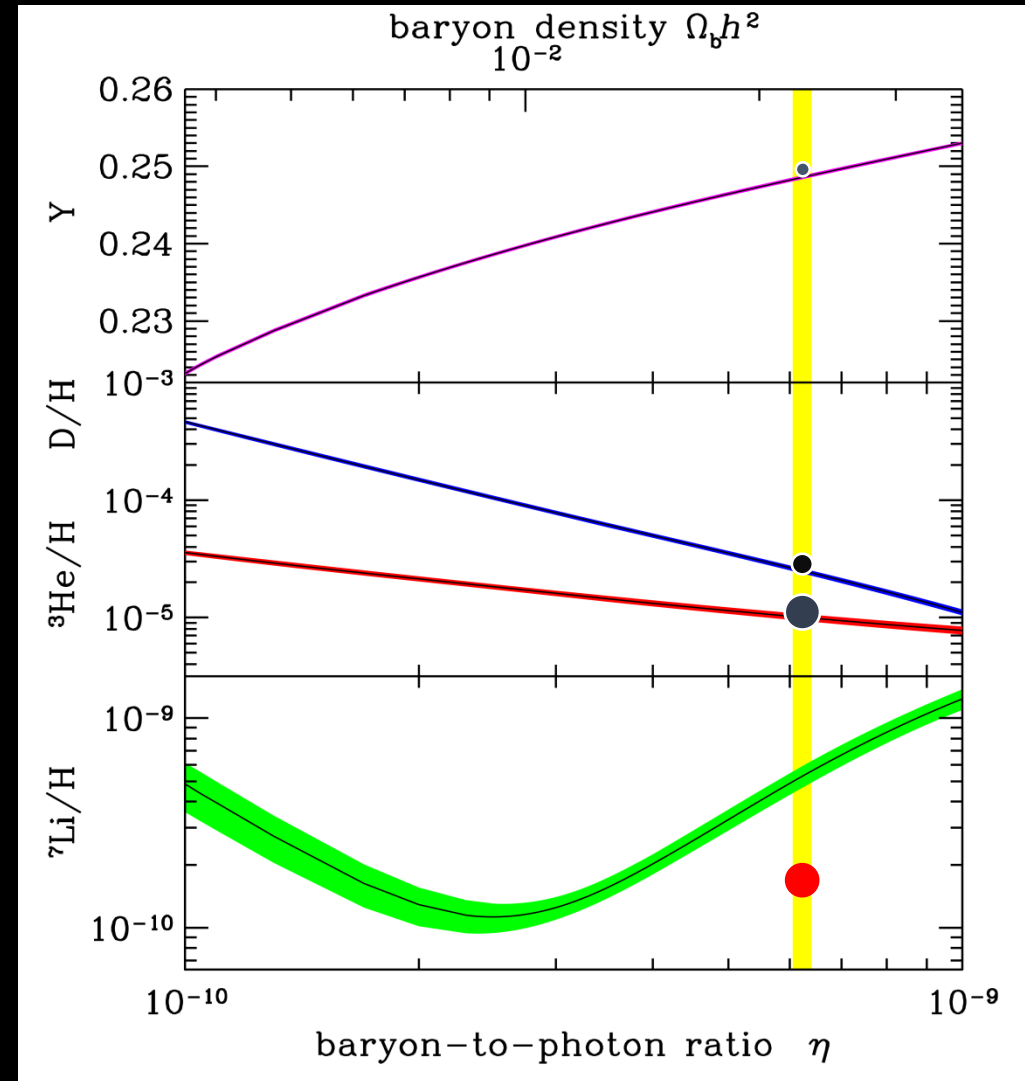


BBN predice con successo l'abbondanza  
primordiale di elementi quali  
 ${}^4\text{He}$ , D ed  ${}^3\text{He}$ .

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



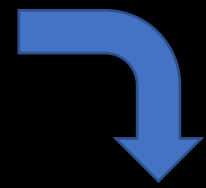
**Cosmological Lithium Problem**



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

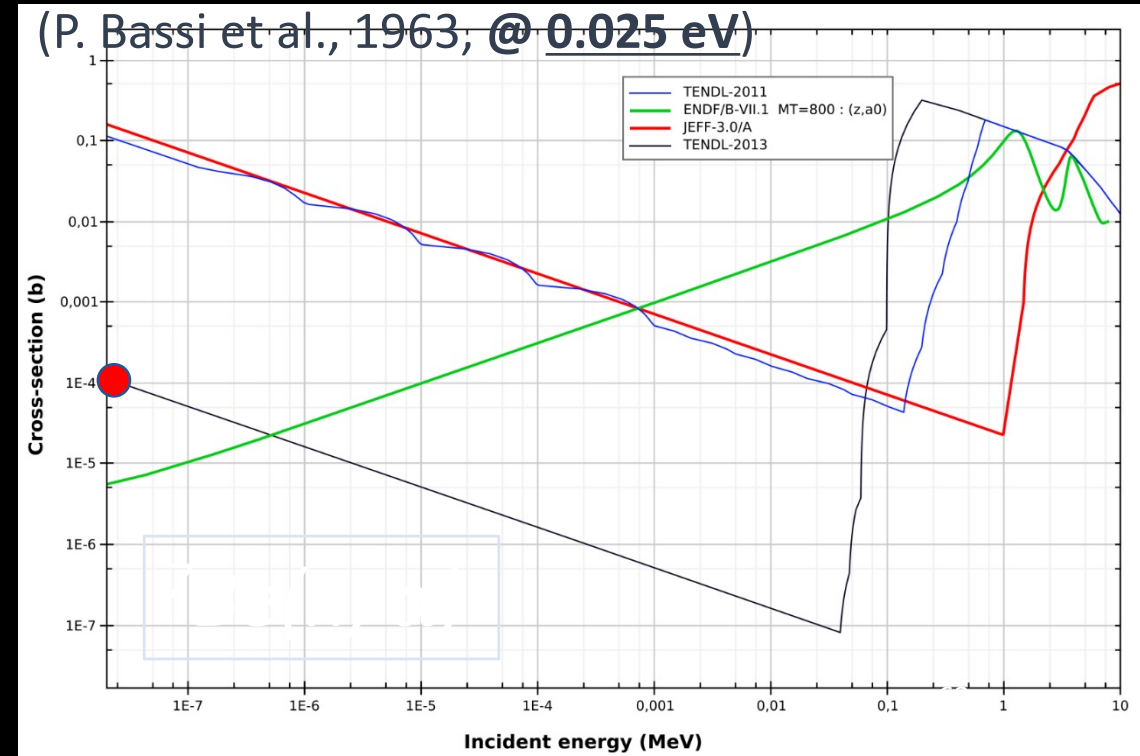
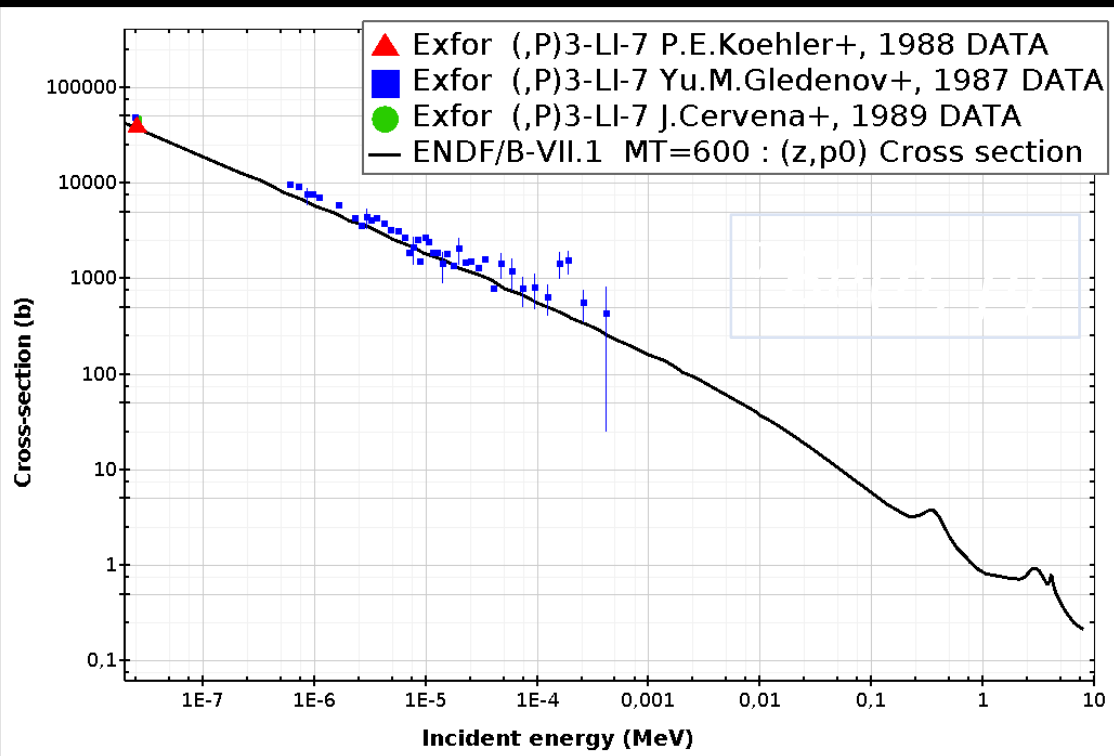
Il 95% di  ${}^7\text{Li}$  primordiale è prodotto attraverso la cattura elettronica del  ${}^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}=53.2$  d)

${}^7\text{Be}$  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

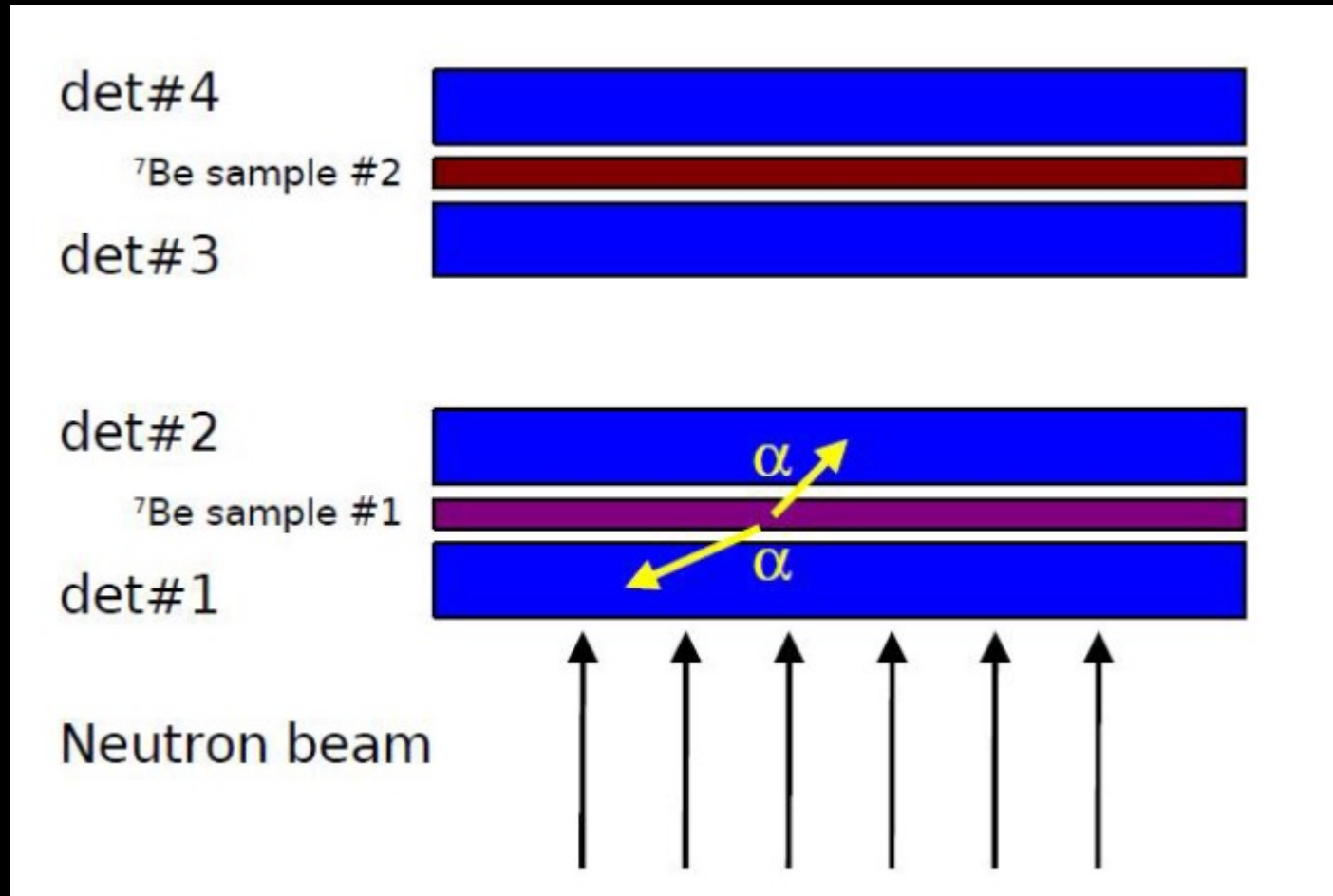
## Solo una misura diretta





Rivelatori al Silicio **direttamente sotto fascio**

Due campioni di misura, 40 GBq attività



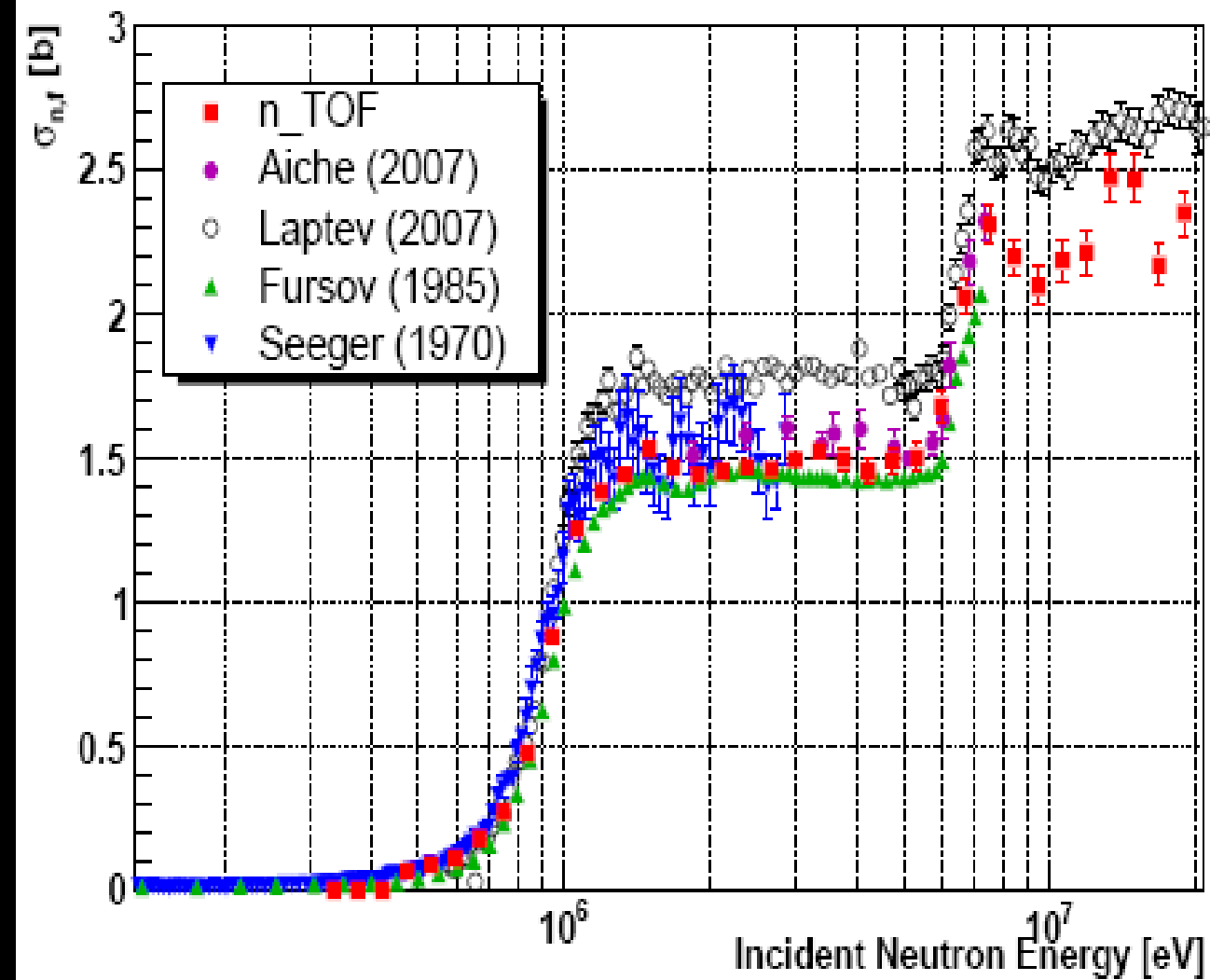
<b>Target Accuracies for Fast Reactors</b>		Energy Range	Current Accuracy (%)	Target Accuracy (%)
U238	inel	0.5 ÷ 6.1 MeV	10 ÷ 20	2 ÷ 3
	capt	2.04 ÷ 24.8 keV	3 ÷ 9	1.5 ÷ 2
Pu241	fiss	454. eV ÷ 1.35 MeV	8 ÷ 20	2 ÷ 5
Pu239	capt	2.04 ÷ 498 keV	7 ÷ 15	4 ÷ 7
Pu240	fiss	0.498 ÷ 1.35 MeV	6	1 ÷ 3
Pu242	fiss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

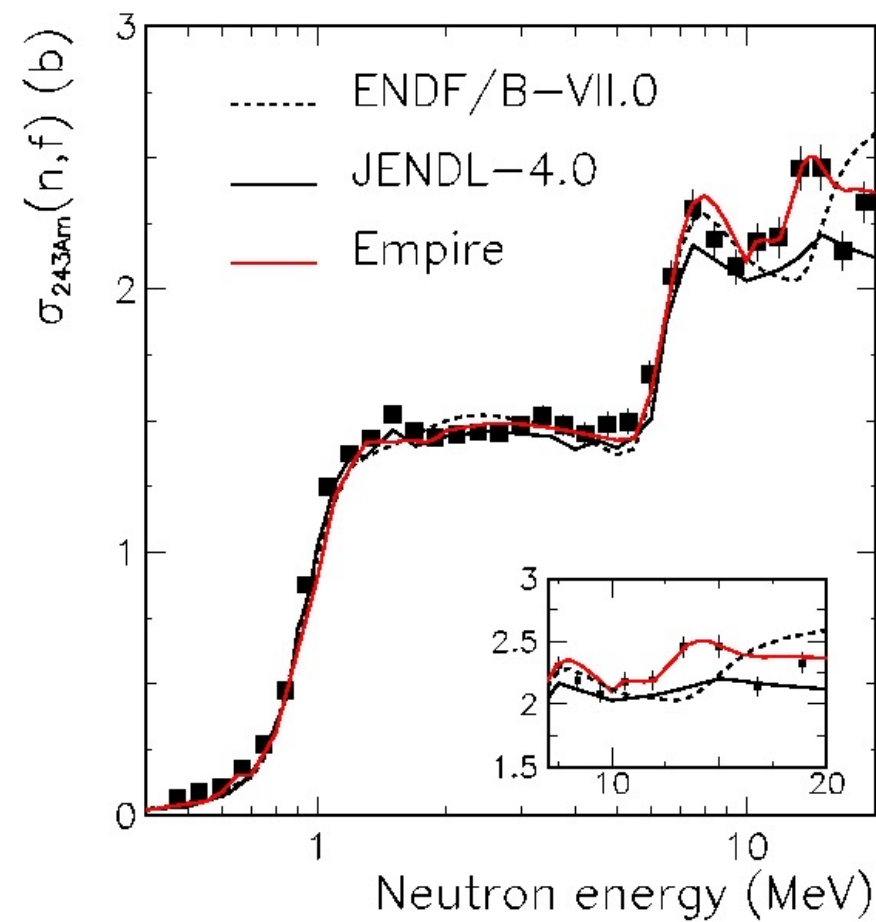


@n\_TOF

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.*