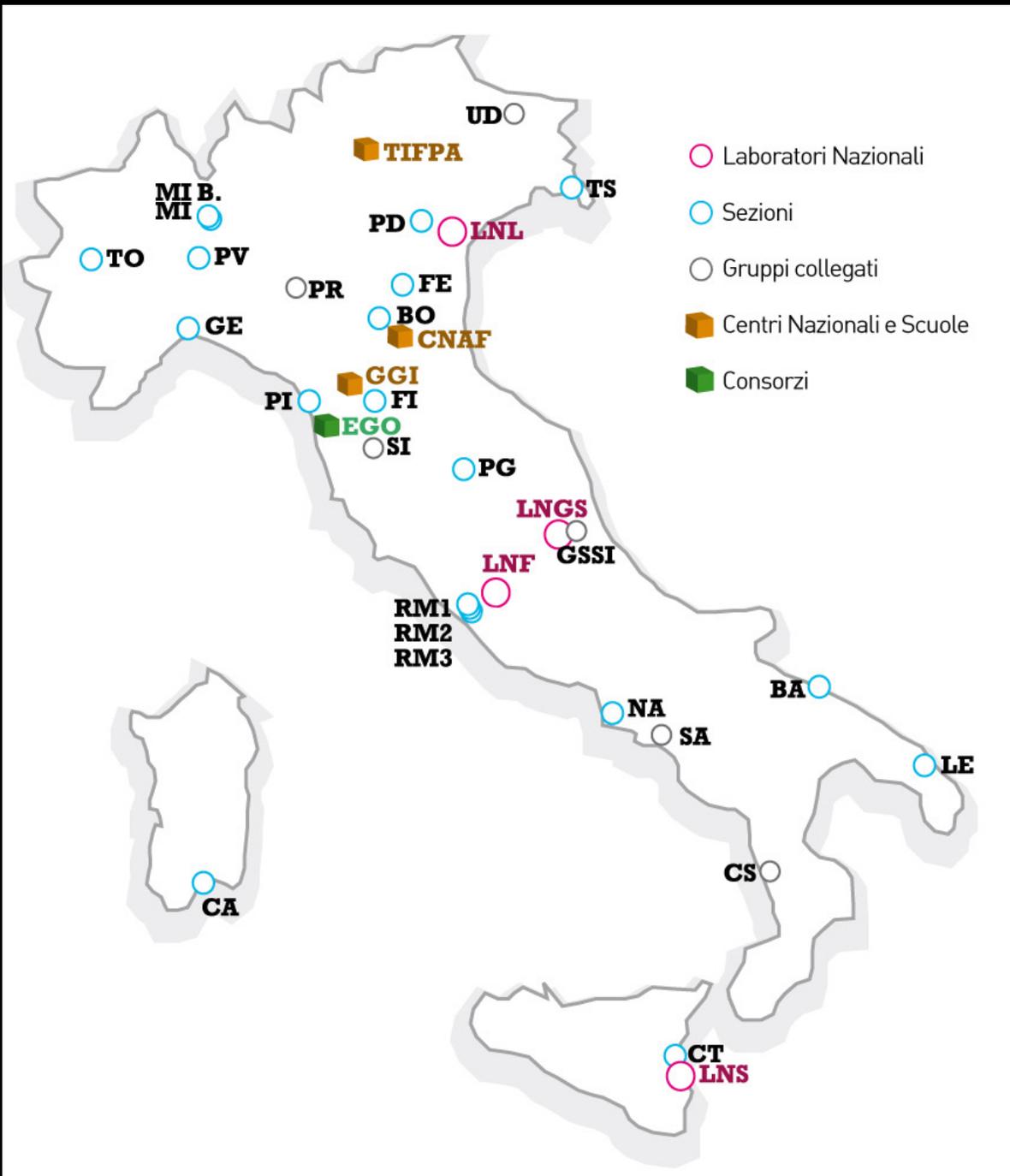


**L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare** è un ente pubblico nazionale di ricerca, istituito l'8 agosto 1951; si occupa dello **studio dei costituenti fondamentali della materia e delle leggi che li governano.**

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

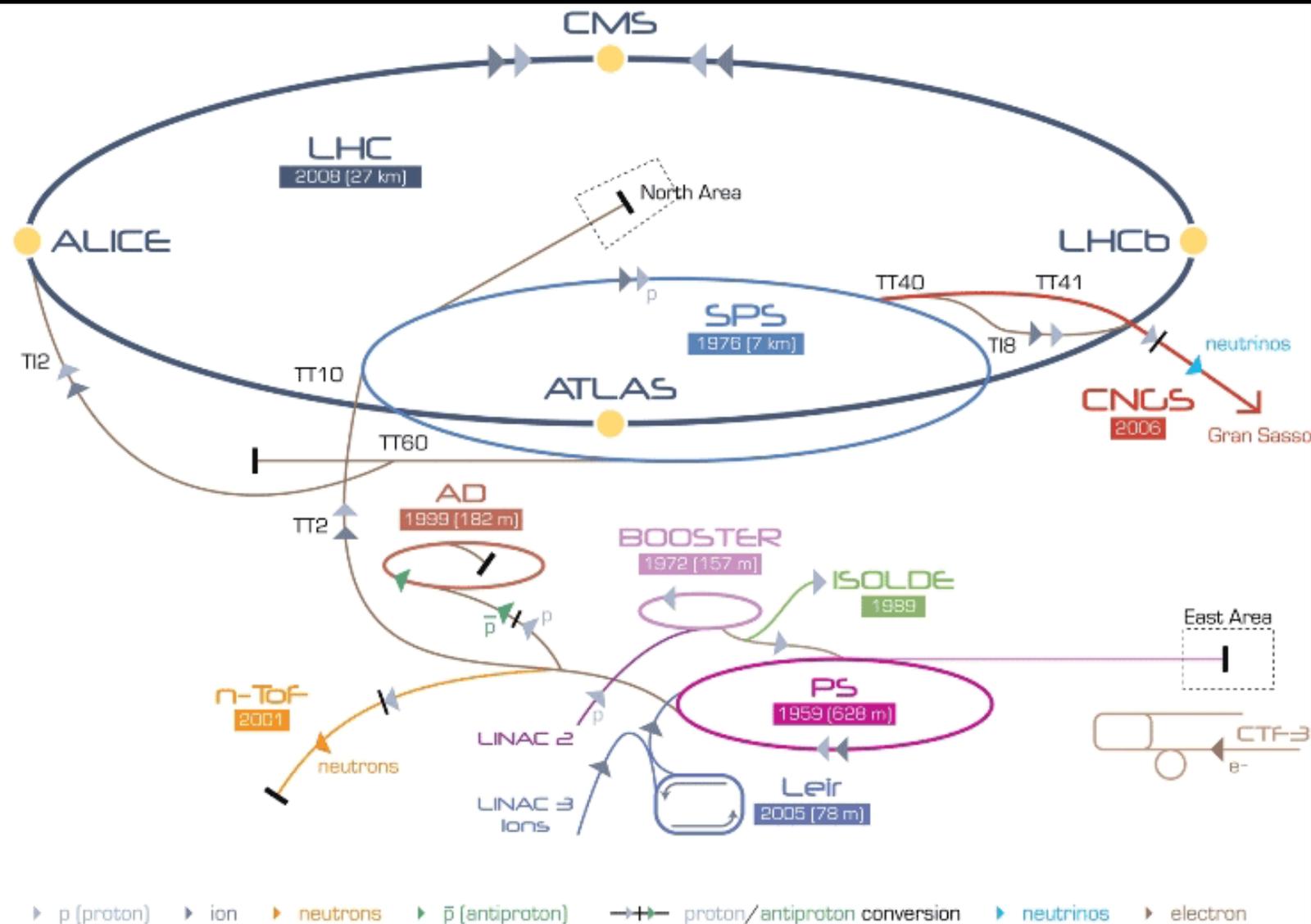
Le attività di ricerca dell'INFN si svolgono in un ambito di **competizione internazionale.**

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)

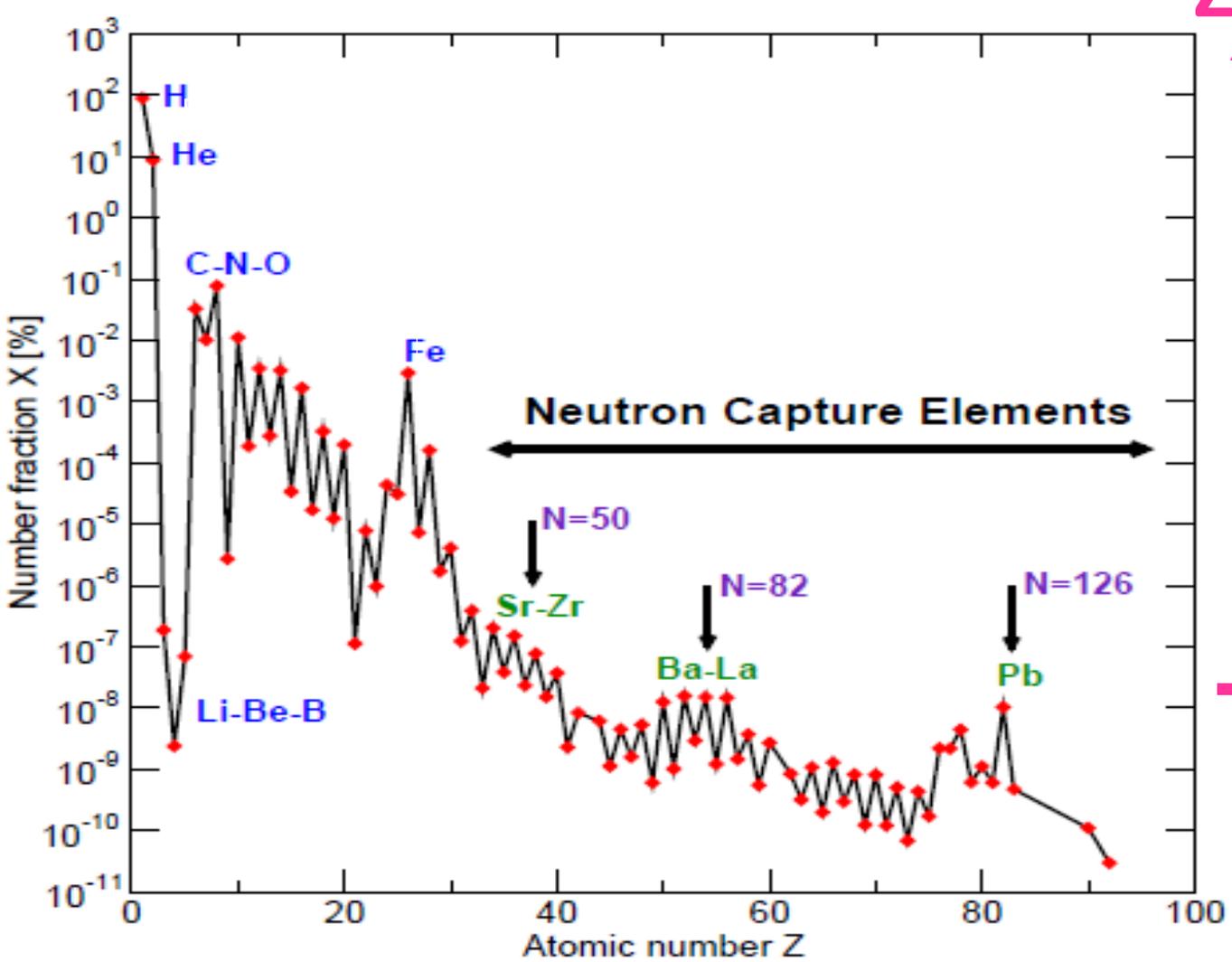
(n,  $\alpha$ )

# Astrofisica nucleare

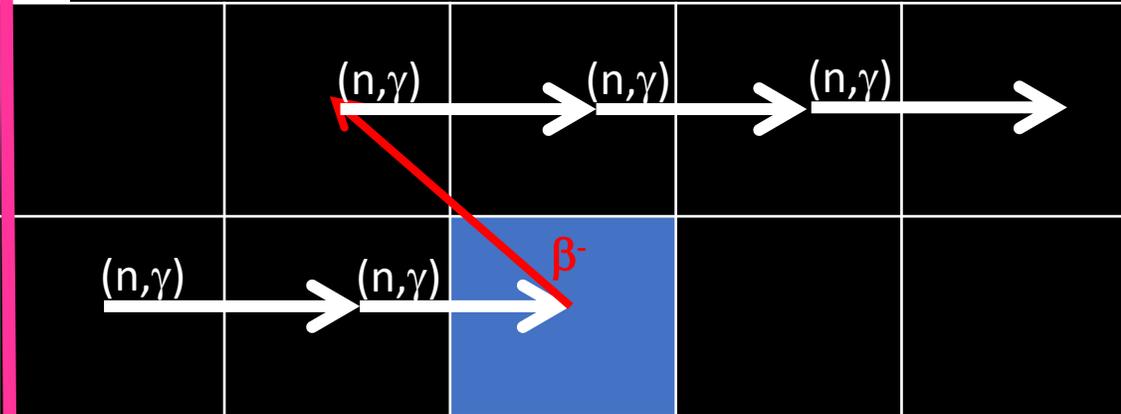
*Siamo figli delle stelle !*



# 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 | <sup>12</sup> 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)

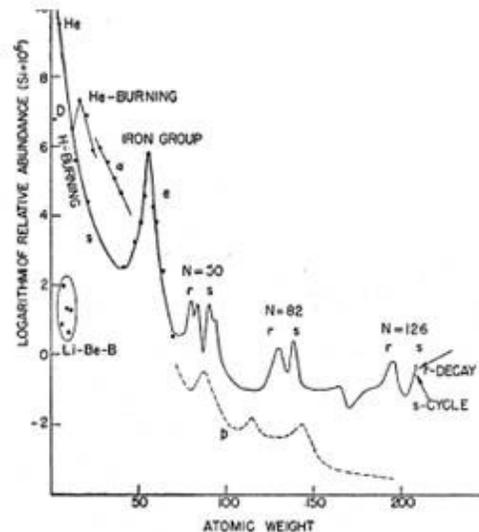
but perhaps

"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*

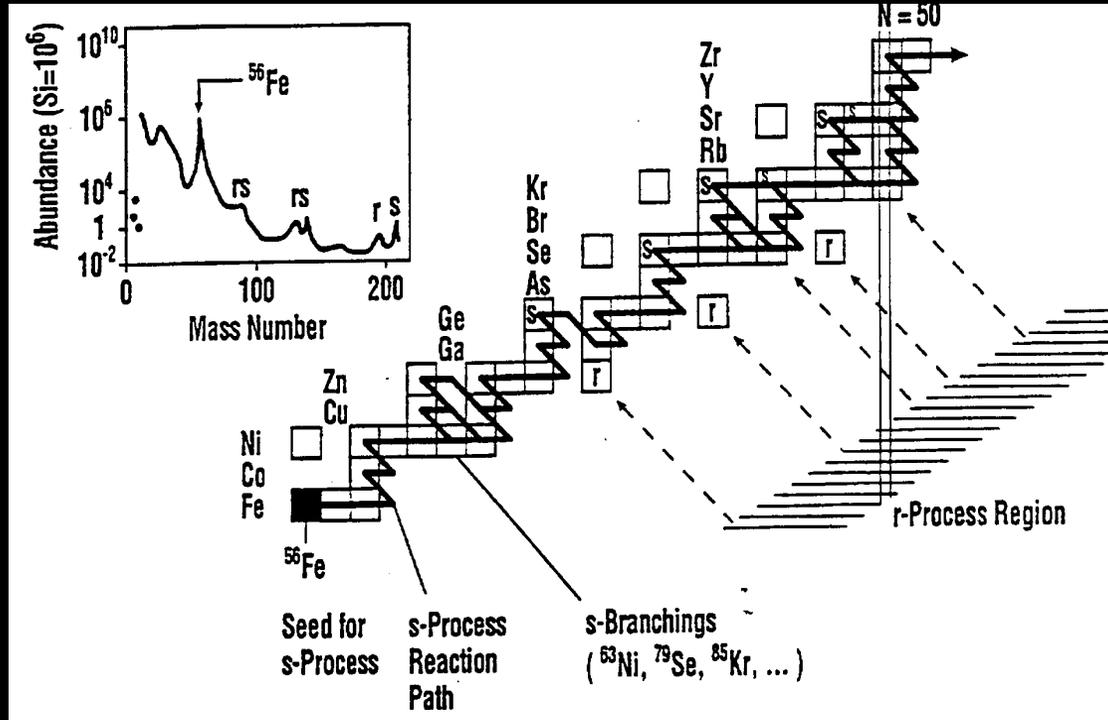
Morte  
(Supernova)

*Nucleosintesi*

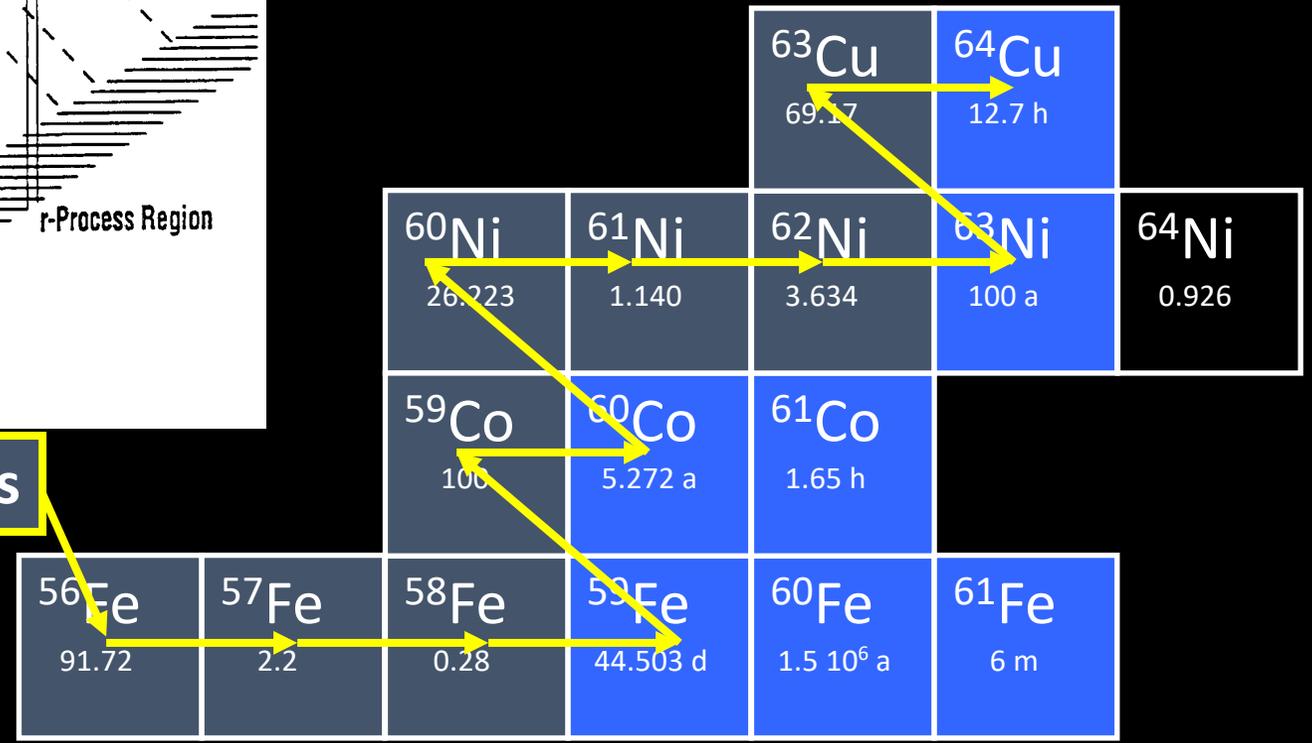
Residui

Black Hole  
Neutron Star  
White Dwarf

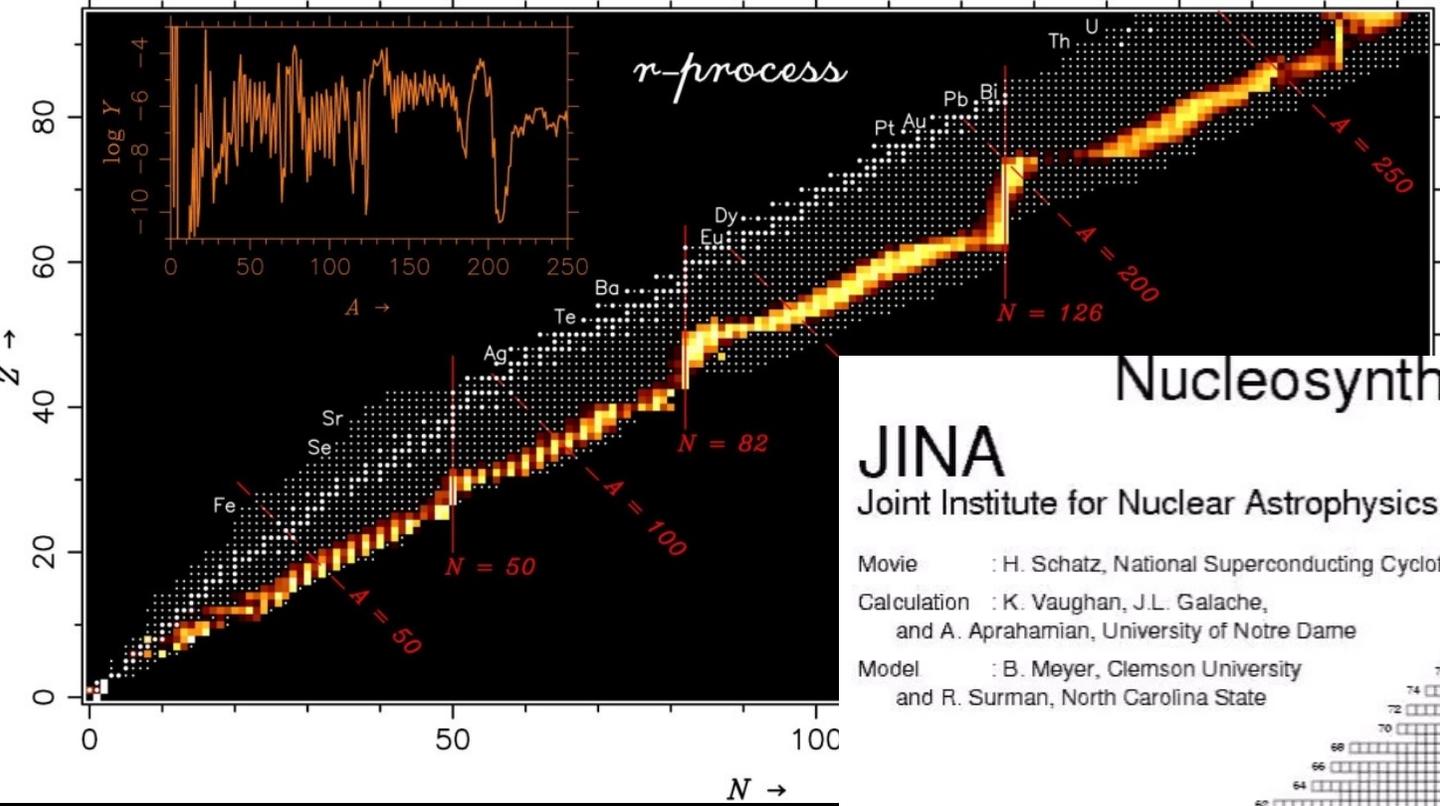
# Il processo S procede lungo la valle di stabilità $\beta$



**s-process**



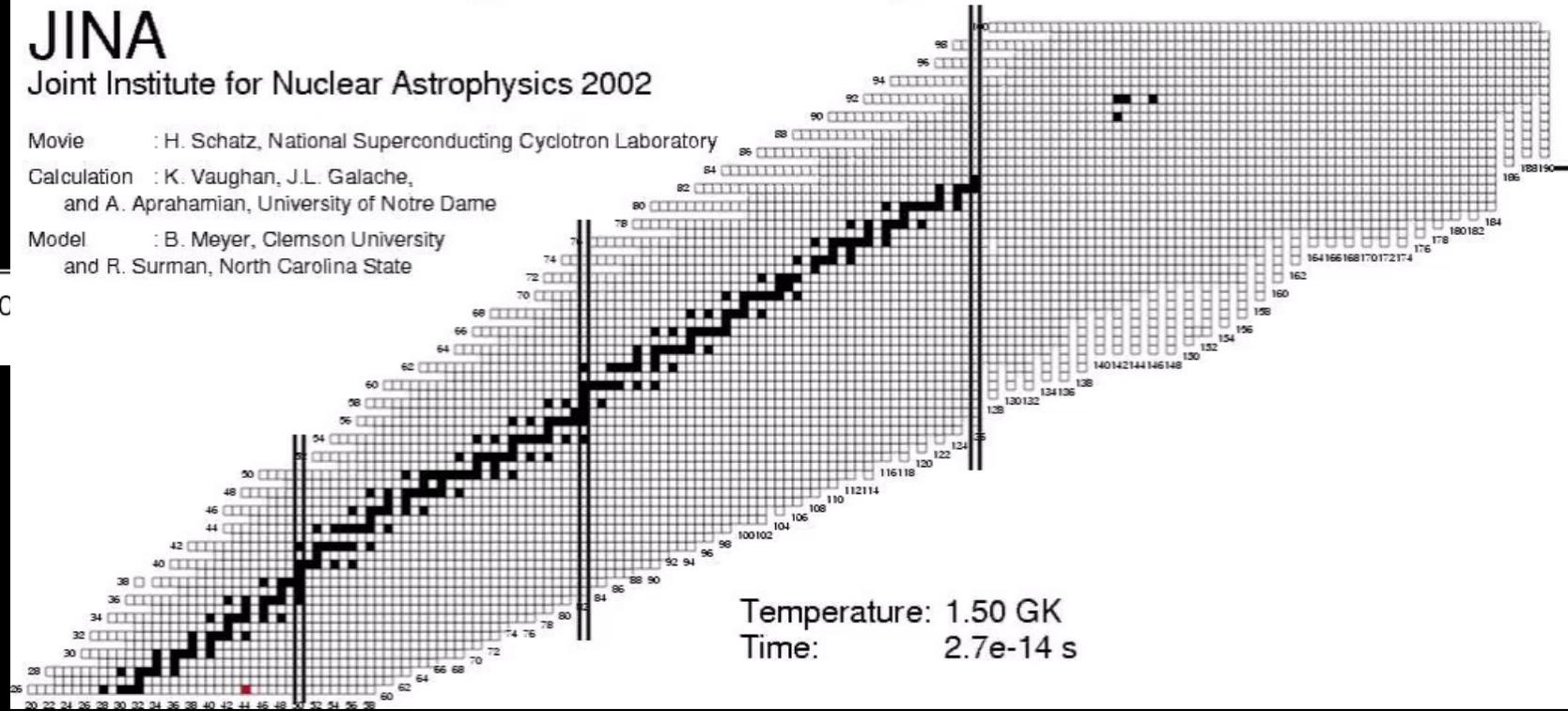
Il processo **r** procede *per via esotica*  *nuclei ricchi di neutroni*



## Nucleosynthesis in the r-process

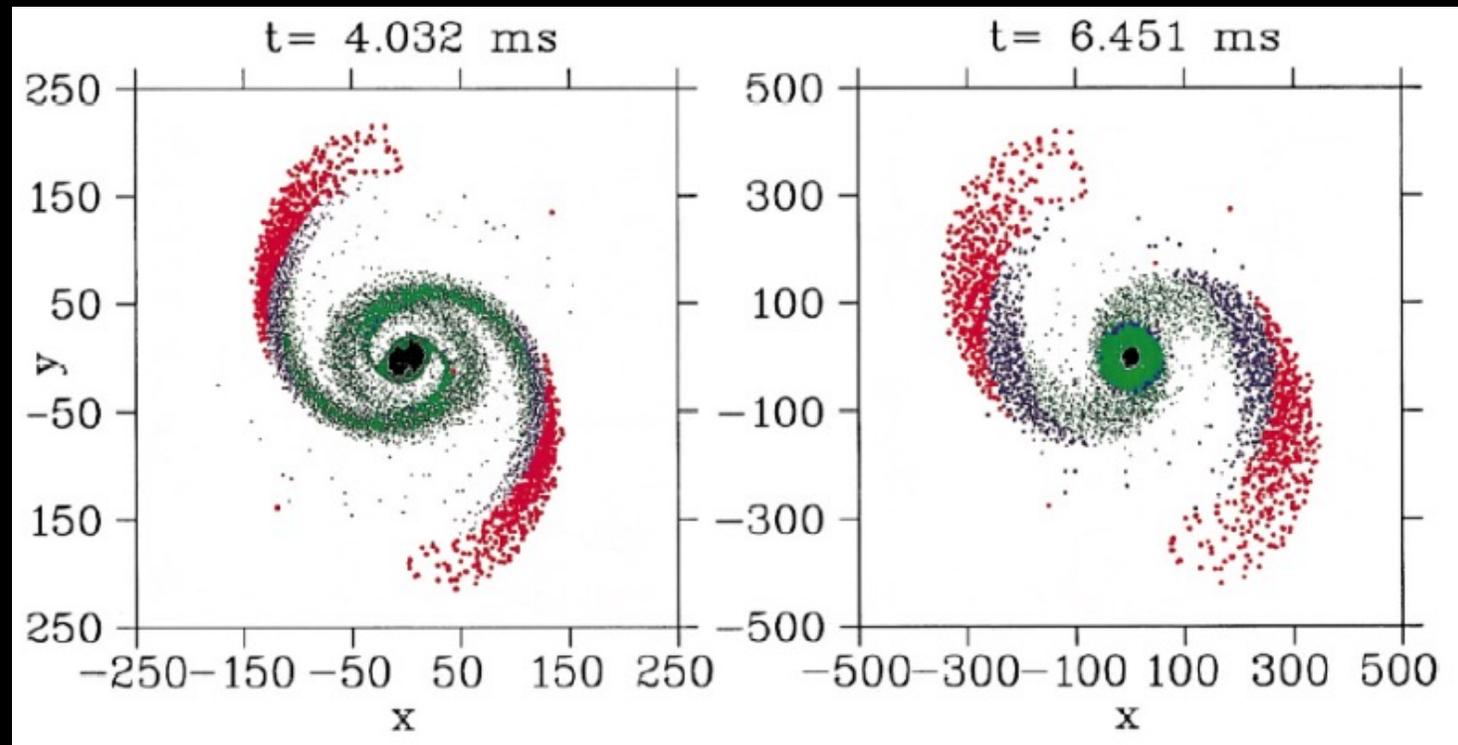
**JINA**  
 Joint Institute for Nuclear Astrophysics 2002

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



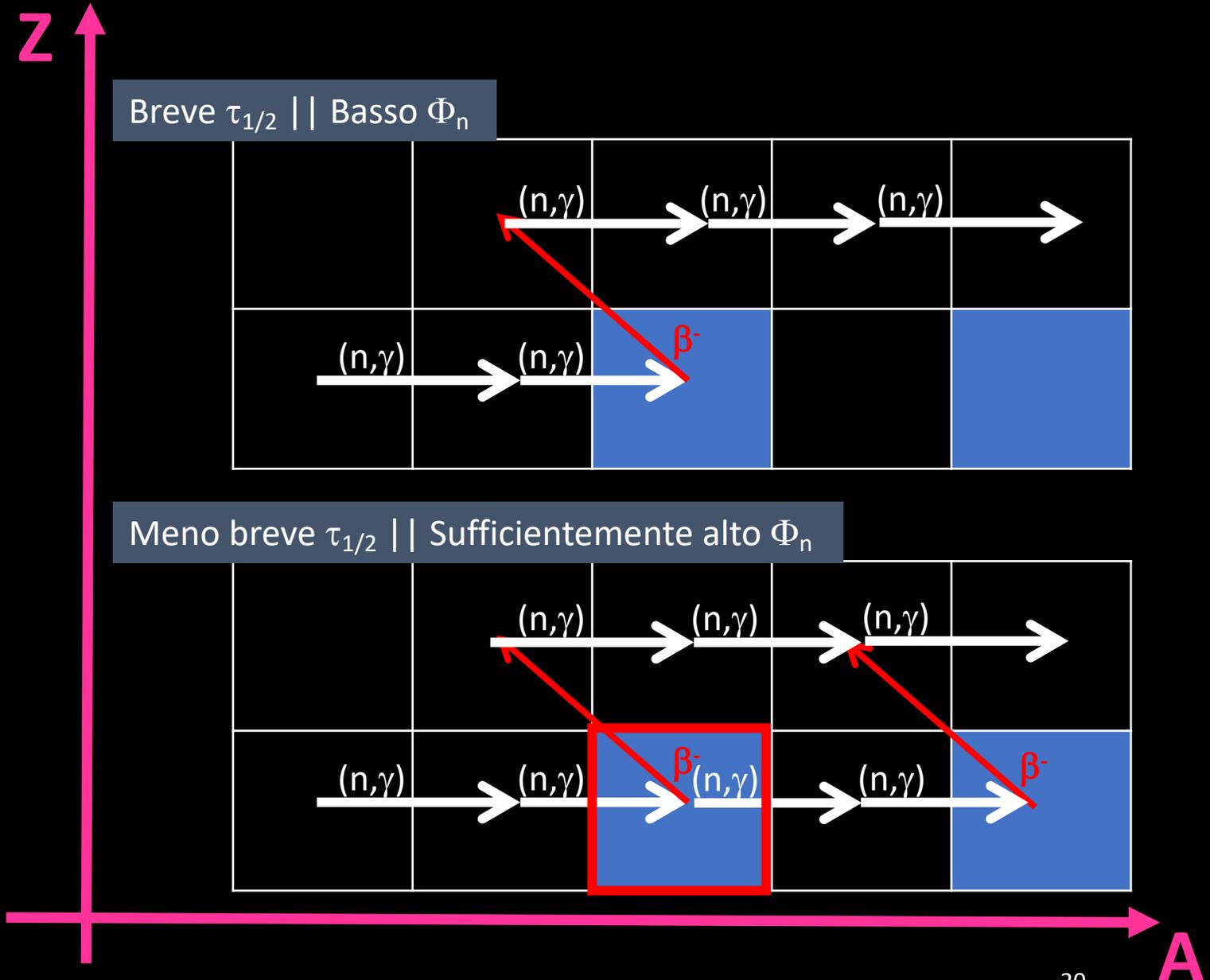
## Eventi di supernova

## Emissione di materia da *neutron star mergers*



*Studio delle  
Condizioni stellari*

*Punti di diramazione  
lungo il processo s*



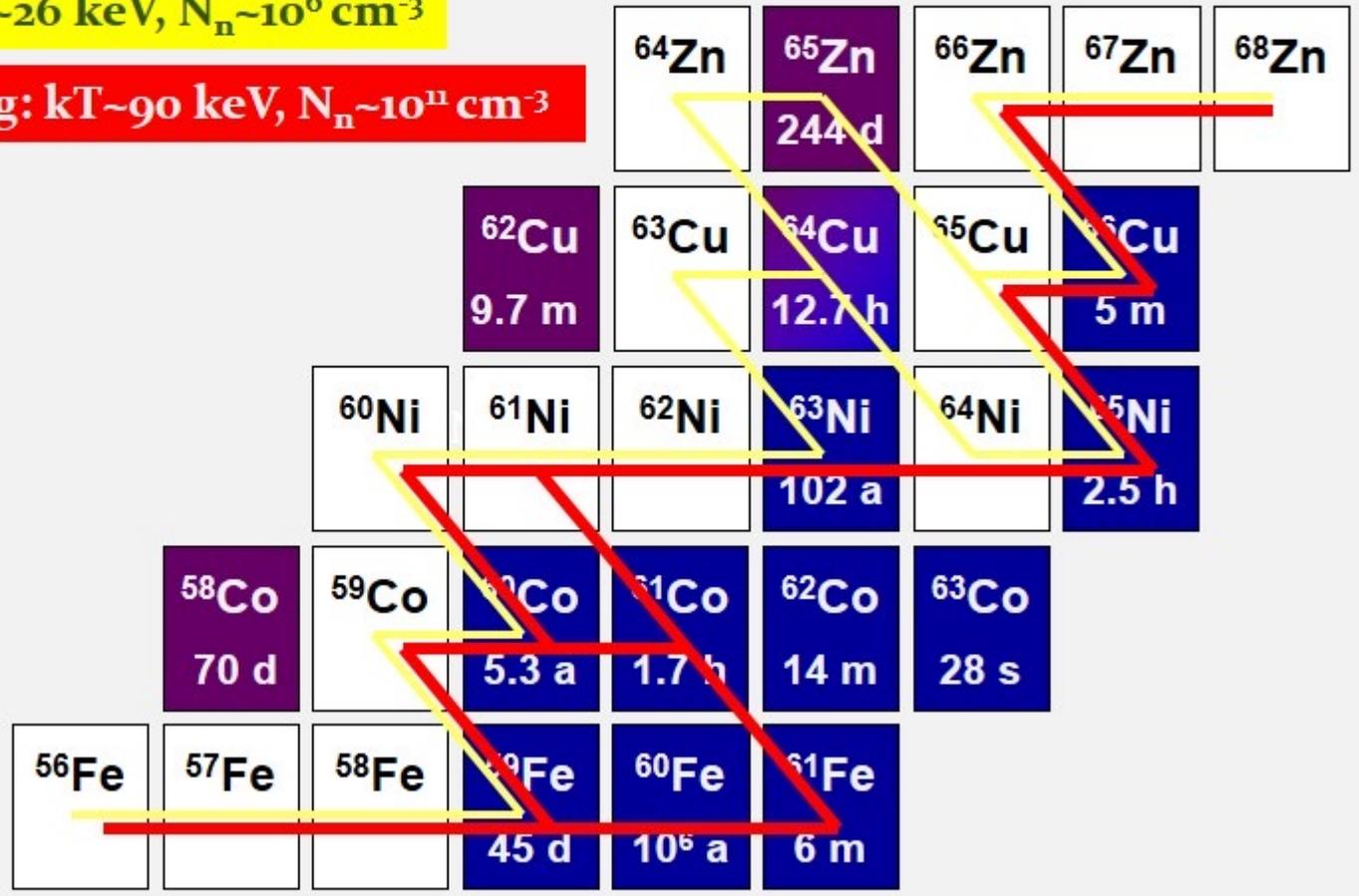
# Studio delle Condizioni stellari

Possibili scenari  
(in stelle massive)

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

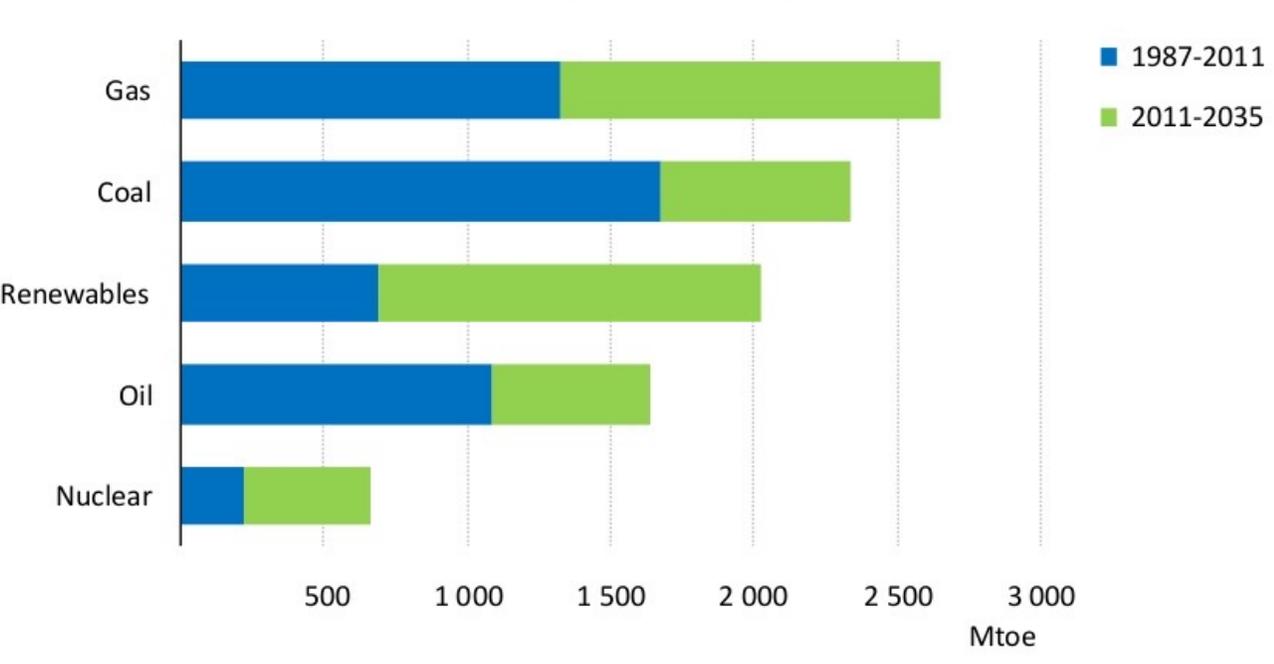
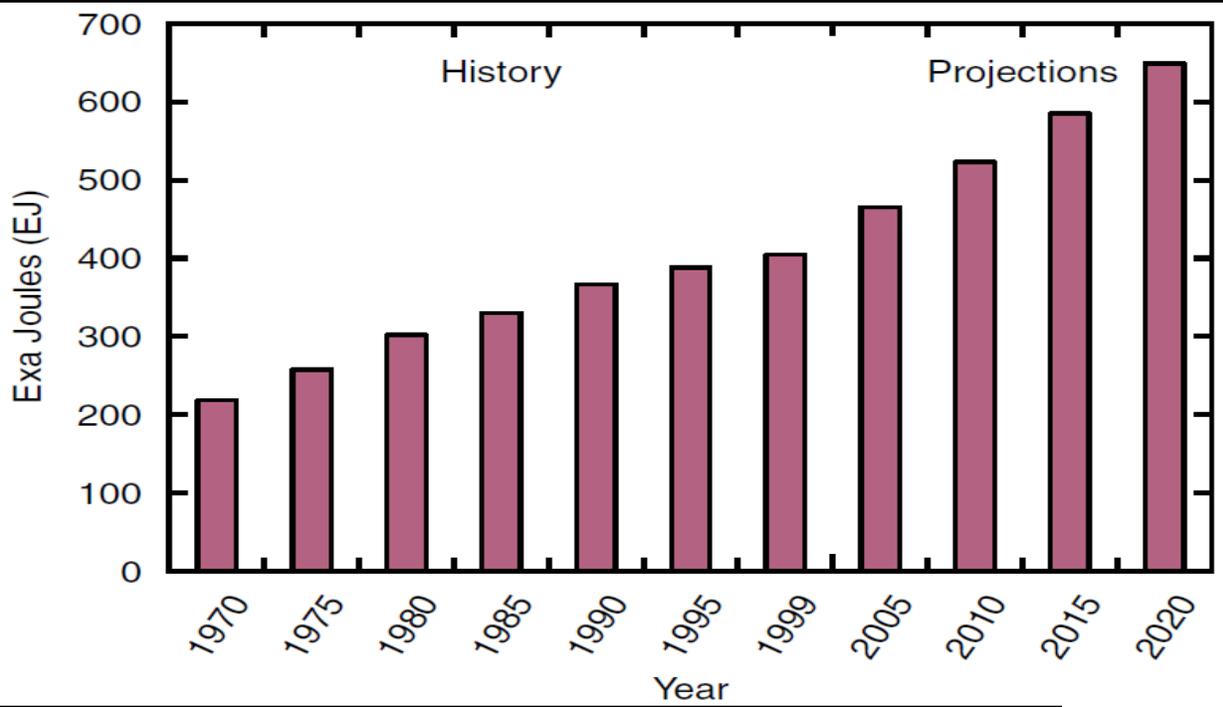
Carbon shell burning:  $kT \sim 90 \text{ keV}$ ,  $N_n \sim 10^{11} \text{ cm}^{-3}$

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



# Tecnologia nucleare

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



Fonte OECD/NEA

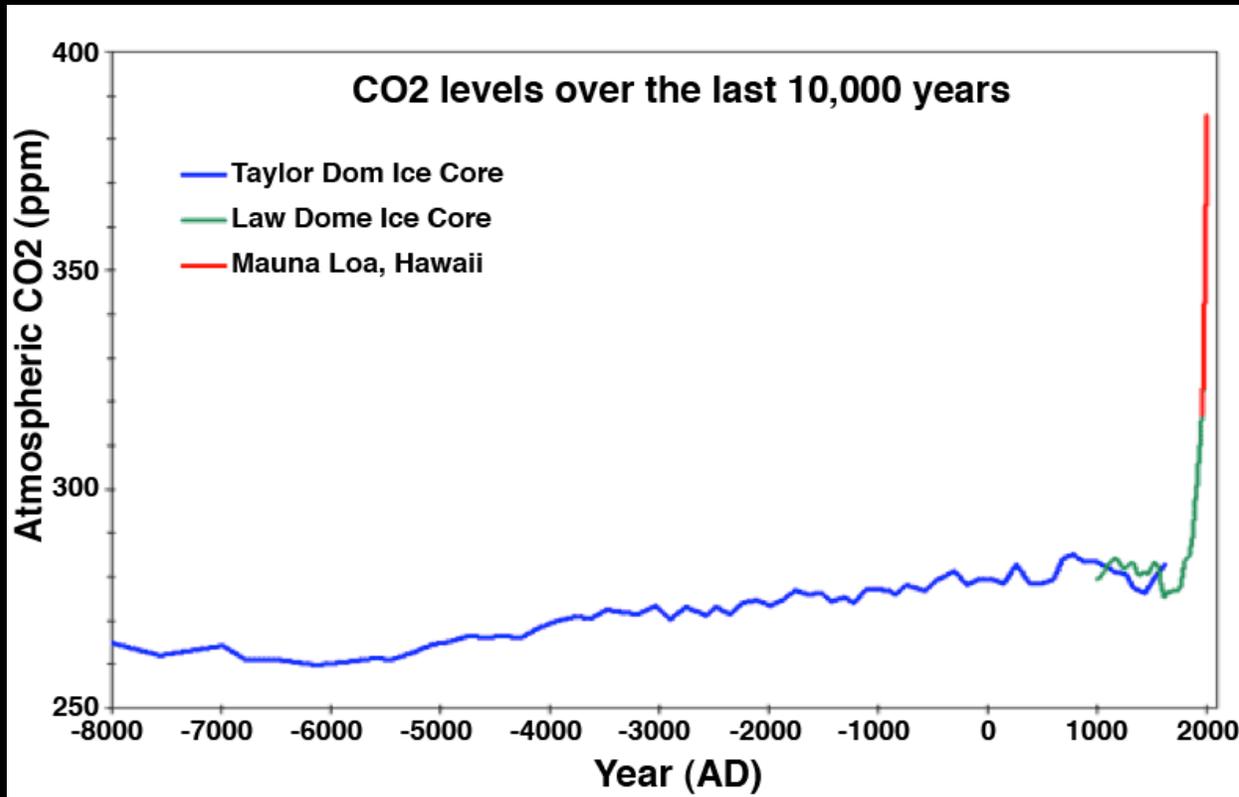
# L'utilizzo di fonti fossili ha un **IMPATTO FORTEMENTE NEGATIVO**

## **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

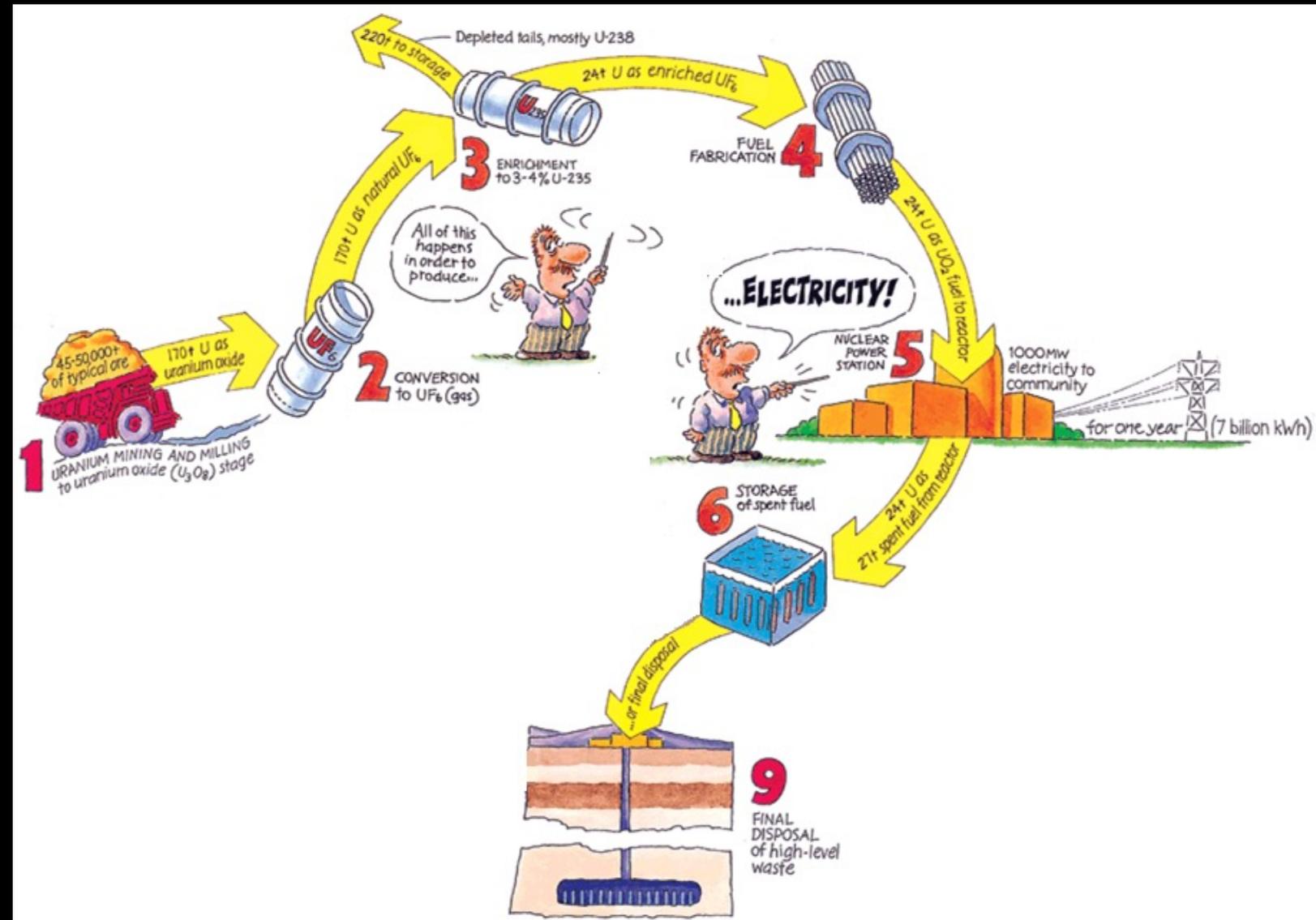
(immagazzinamento sicuro per milioni di anni)

Proliferazione nucleare

## A favore

Non produce gas serra

Tecnologia consolidata



|                                    |                   |   |  |                                     |                    |                       |                                     |                       |                                    |
|------------------------------------|-------------------|---|--|-------------------------------------|--------------------|-----------------------|-------------------------------------|-----------------------|------------------------------------|
|                                    | Cm 238<br>2,4 h   | Cm 239<br>3 h                             | Cm 240<br>27 d                         | Cm 241<br>32,8 d                    | Cm 242<br>162,94 d | Cm 243<br>29,1 a      | Cm 244<br>18,10 a                   | Cm 245<br>8500 a      | Cm 246<br>4730 a                   |
| Am 236 ?<br>3,7 m                  | Am 237<br>73,0 m  | Am 238<br>1,63 h                          | Am 239<br>11,9 h                       | Am 240<br>50,8 h                    | Am 241<br>432,2 a  | Am 242<br>141 a 16 h  | Am 243<br>7370 a                    | Am 244<br>10,1 h      | Am 245<br>2,05 h                   |
| Pu 235<br>25,3 m                   | Pu 236<br>2,858 a | Pu 237<br>45,2 d                          | Pu 238<br>87,74 a                      | Pu 239<br>2,411 · 10 <sup>4</sup> a | Pu 240<br>6563 a   | Pu 241<br>14,35 a     | Pu 242<br>3,750 · 10 <sup>5</sup> a | Pu 243<br>4,956 h     | Pu 244<br>8,00 · 10 <sup>7</sup> a |
| Np 234<br>4,4 d                    | Np 235<br>396,1 d | Np 236<br>22,5 h 1,54 · 10 <sup>5</sup> a | Np 237<br>2,44 · 10 <sup>6</sup> a     | Np 238<br>2,117 d                   | Np 239<br>2,355 d  | Np 240<br>7,22 m 65 m | Np 241<br>13,9 m                    | Np 242<br>2,2 m 5,5 m | Np 243<br>1,85 m                   |
| U 233<br>1,592 · 10 <sup>5</sup> a | U 234<br>0,0055   | U 235<br>0,7200                           | U 236<br>120 m 4,2 · 10 <sup>7</sup> a | U 237<br>175 d                      | U 238<br>99,2745   | U 239<br>13,5 m       | U 240<br>14,1 h                     |                       | U 242<br>16,8 m                    |
| Pa 232<br>1,31 d                   | Pa 233<br>27,0 d  | Pa 234<br>1,17 m 6,70 h                   | Pa 235<br>24,2 m                       | Pa 236<br>9,1 m                     | Pa 237<br>8,7 m    | Pa 238<br>2,3 m       |                                     |                       |                                    |
| Th 231<br>25,5 h                   | Th 232<br>100     | Th 233<br>22,3 m                          | Th 234<br>24,10 d                      | Th 235<br>7,1 m                     | Th 236<br>37,5 m   | Th 237<br>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

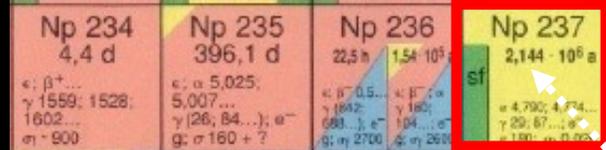
LLFP  
76.2 Kg/yr

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

**LLFP**

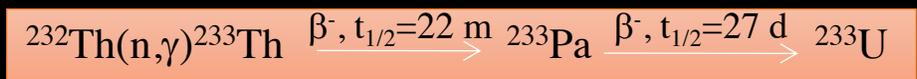
# Alternative

|   |                   |   |   |                                     |                    |                         |                                     |                         |                                    |
|---|-------------------|---|---|-------------------------------------|--------------------|-------------------------|-------------------------------------|-------------------------|------------------------------------|
|   | Cm 238<br>2,4 h   | Cm 239<br>3 h                               | Cm 240<br>27 d                              | Cm 241<br>32,8 d                    | Cm 242<br>162,94 d | Cm 243<br>29,1 a        | Cm 244<br>18,10 a                   | Cm 245<br>8500 a        | Cm 246<br>4730 a                   |
| Am 236 ?<br>3,7 m                         | Am 237<br>73,0 m  | Am 238<br>1,63 h                            | Am 239<br>11,9 h                            | Am 240<br>50,8 h                    | Am 241<br>432,2 a  | Am 242<br>141 a   16 h  | Am 243<br>7370 a                    | Am 244<br>26 m   10,1 h | Am 245<br>2,05 h                   |
| Pu 235<br>25,3 m                          | Pu 236<br>2,858 a | Pu 237<br>45,2 d                            | Pu 238<br>87,74 a                           | Pu 239<br>2,411 · 10 <sup>4</sup> a | Pu 240<br>6563 a   | Pu 241<br>14,35 a       | Pu 242<br>3,750 · 10 <sup>5</sup> a | Pu 243<br>4,956 h       | Pu 244<br>8,00 · 10 <sup>7</sup> a |
| Np 234<br>4,4 d                           | Np 235<br>396,1 d | Np 236<br>22,5 h   1,54 · 10 <sup>5</sup> a | <b>Np 237</b><br>2,144 · 10 <sup>6</sup> a  | Np 238<br>2,117 d                   | Np 239<br>2,355 d  | Np 240<br>7,22 m   65 m | Np 241<br>13,9 m                    | Np 242<br>2,2 m   3,5 m | Np 243<br>1,85 m                   |
| <b>U 233</b><br>1,592 · 10 <sup>5</sup> a | U 234<br>0,0055   | U 235<br>0,7200                             | U 236<br>120 ns   2,342 · 10 <sup>7</sup> a | U 237<br>6,75 d                     | U 238<br>99,2745   | U 239<br>23,5 m         | U 240<br>14,1 h                     |                         | U 242<br>16,8 m                    |
| Pa 232<br>1,31 d                          | Pa 233<br>2,43 d  | Pa 234<br>1,17 m   6,70 h                   | Pa 235<br>24,2 m                            | Pa 236<br>9,1 m                     | Pa 237<br>8,7 m    | Pa 238<br>2,3 m         | 148                                 |                         | 150                                |
| Th 231<br>25,5 h                          | Th 232<br>100     | Th 233<br>22,3 m                            | Th 234<br>24,10 d                           | Th 235<br>7,1 m                     | Th 236<br>37,5 m   | Th 237<br>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  $^{11}\text{B}$ .

