

# Medidas de emisión de neutrones $\beta$ -retardados

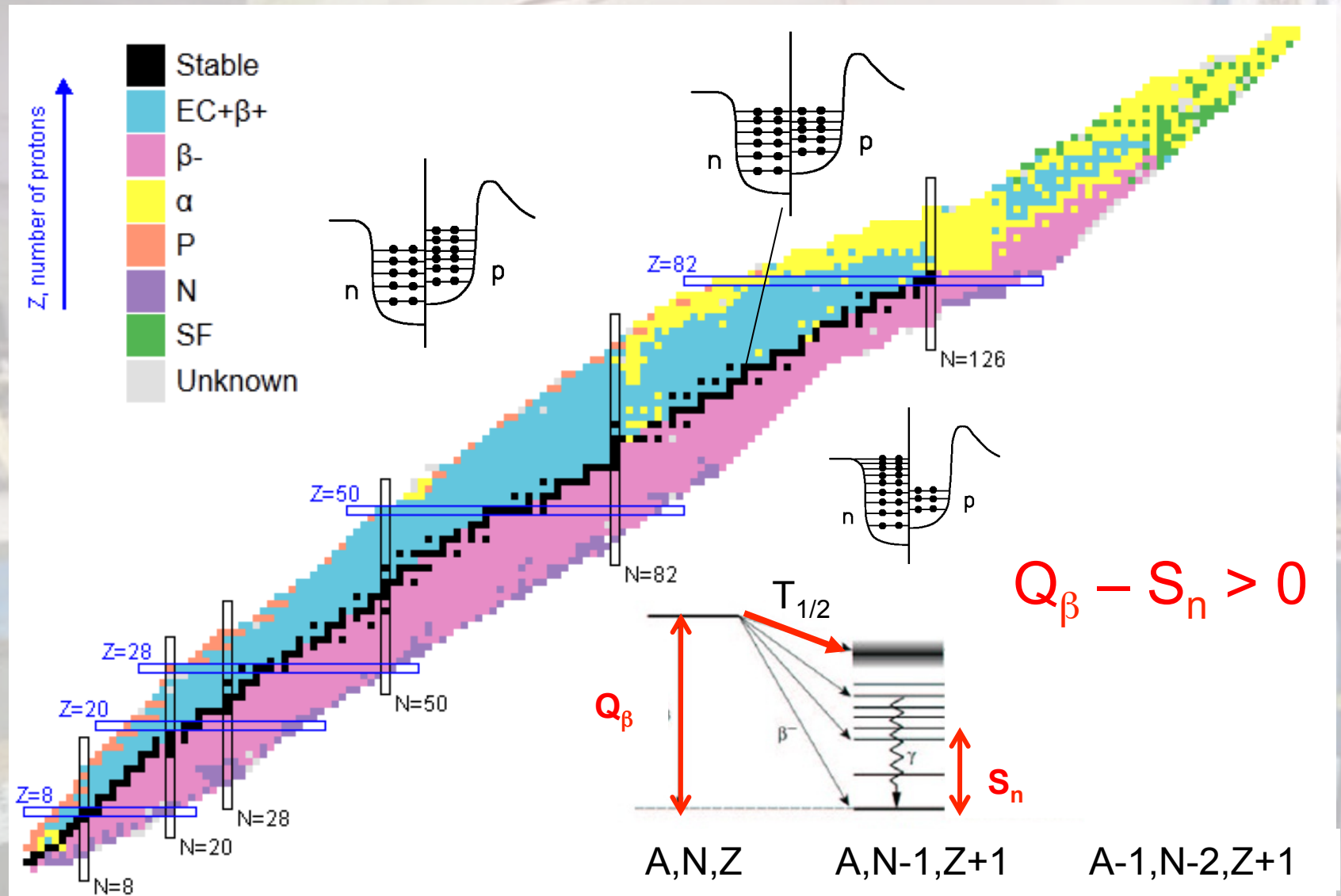
• César Domingo Pardo

Instituto de Física Corpuscular  
(CSIC-Universidad de Valencia)

# Contenidos

- Concepto de emisión retardada de neutrones
- Motivación e implicaciones de los neutrones retardados (NR)
  - Técnicas experimentales de medida
    - Ejemplos de experimentos
    - Perspectiva y resumen

# Concepto de emisión retardada de neutrones

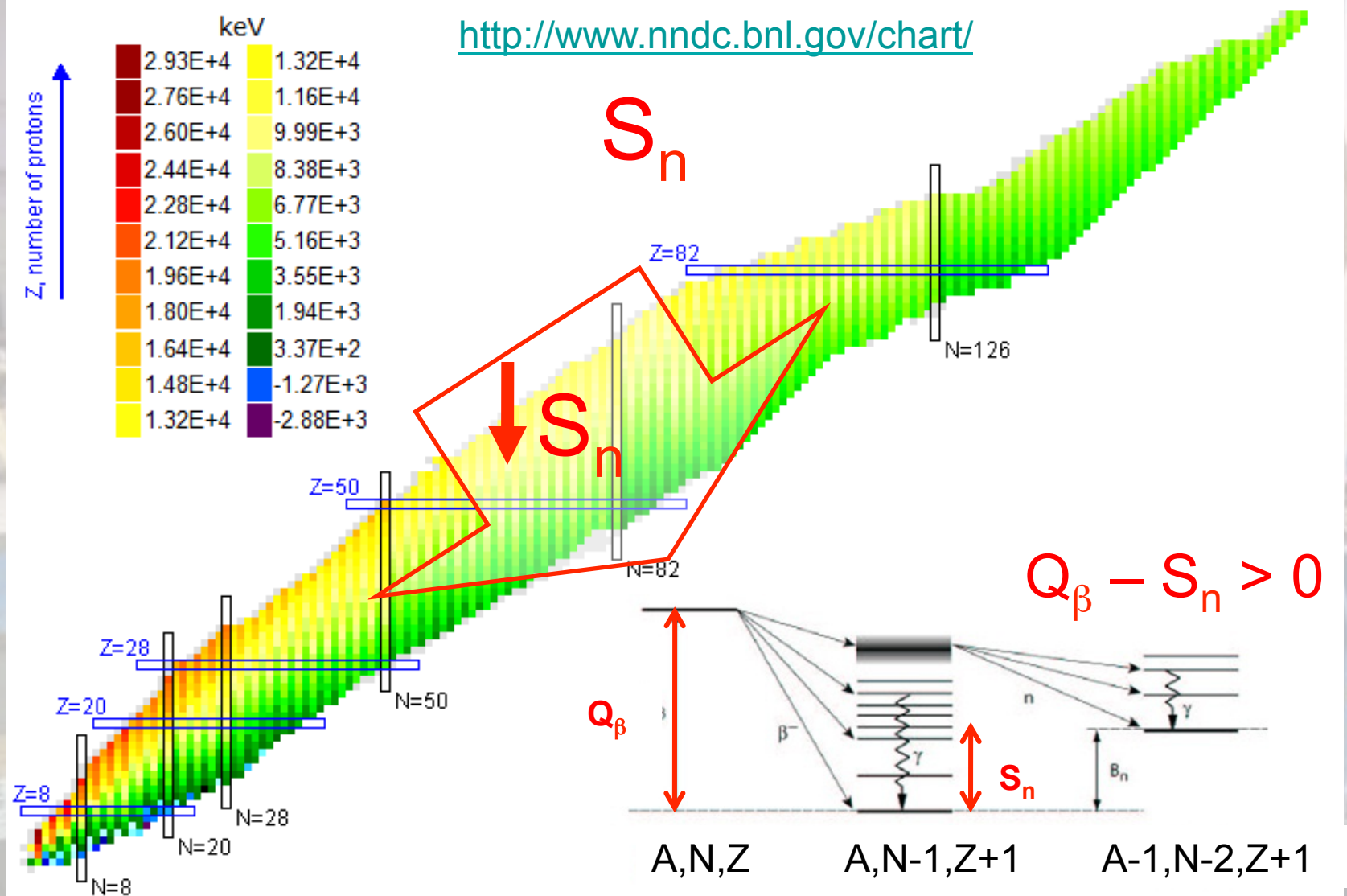




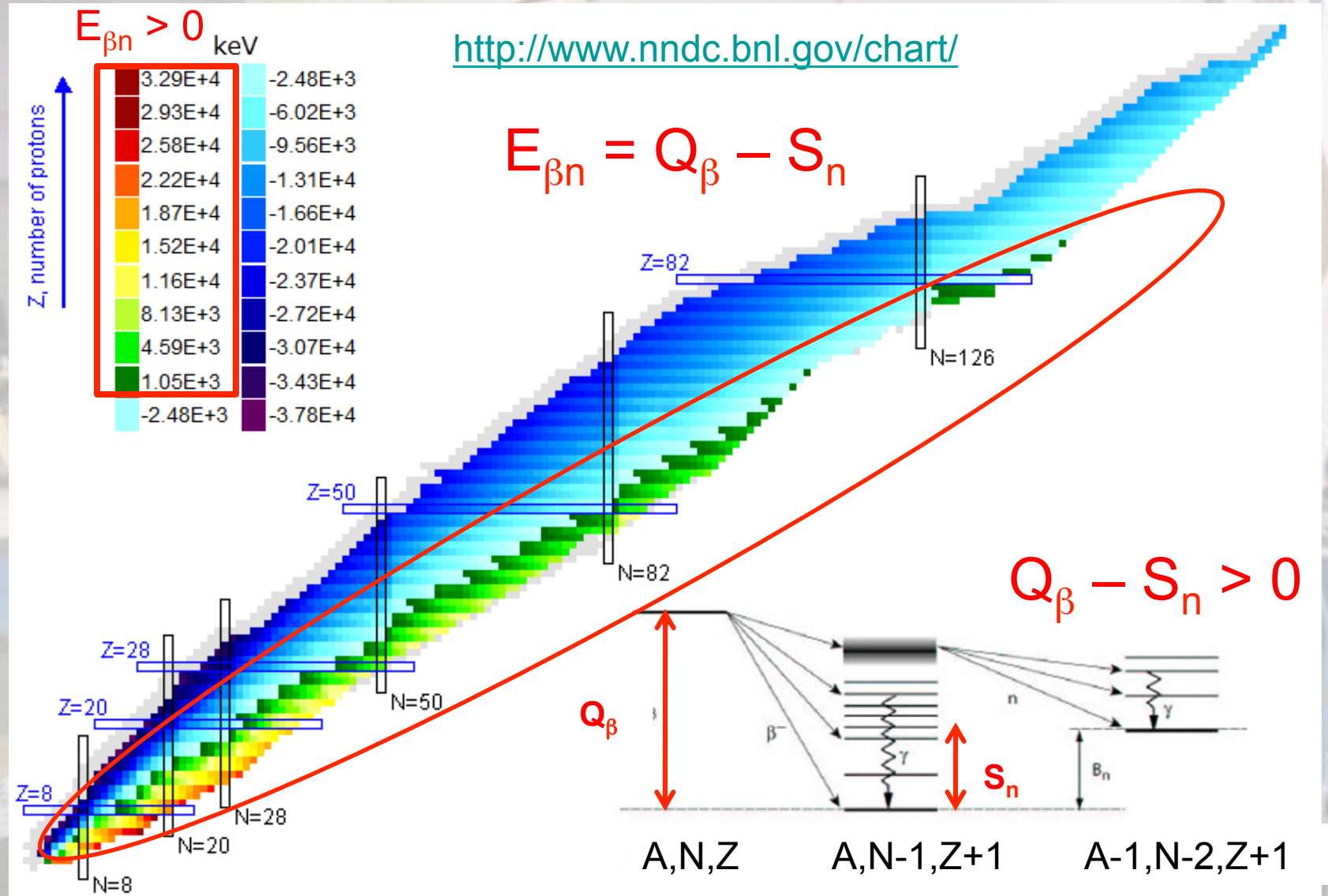
$$S_n > 0$$




# Concepto de emisión retardada de neutrones

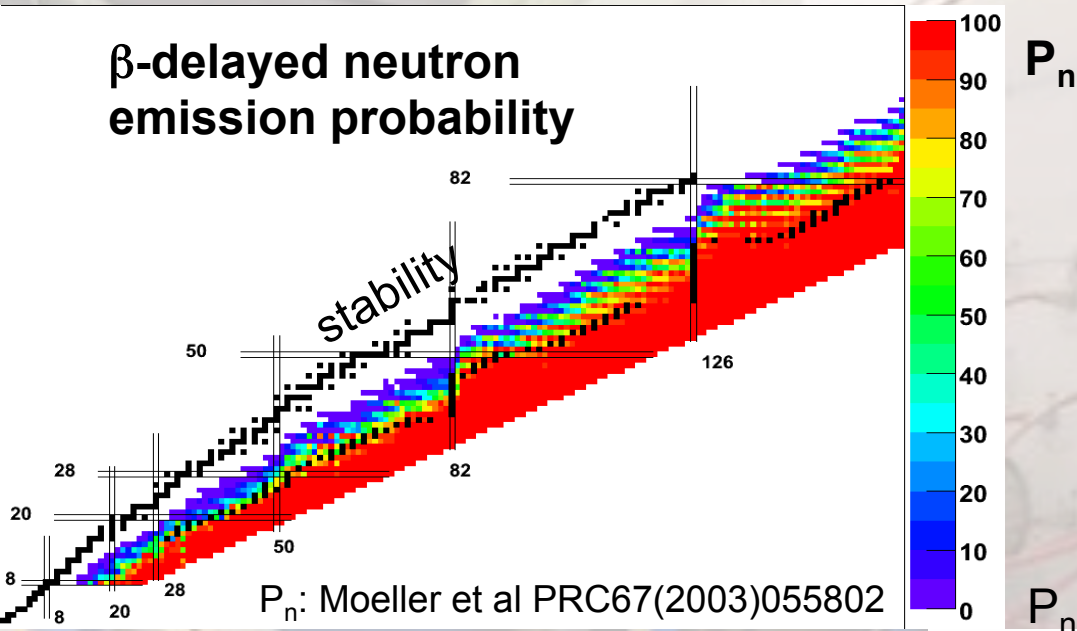


# Concepto de emisión retardada de neutrones

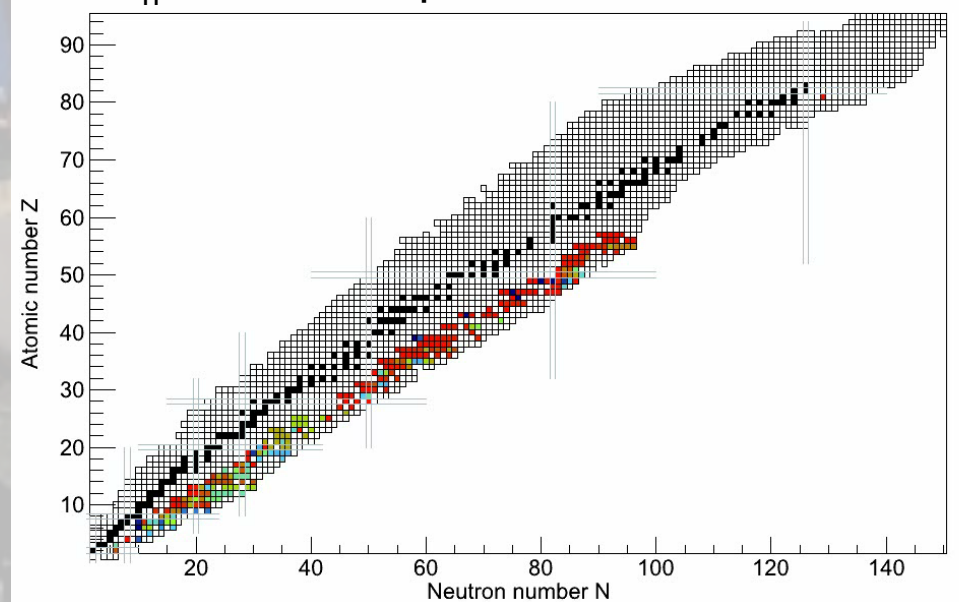


# Concepto de emisión retardada de neutrones

Predicción modelos teóricos



$P_n$  medidos experimentalmente:

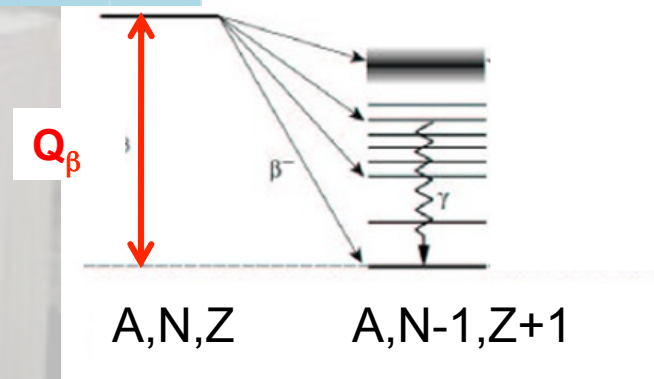
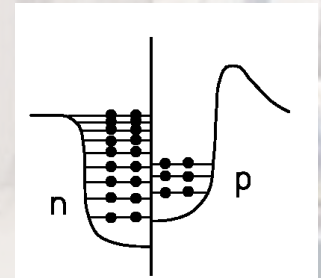
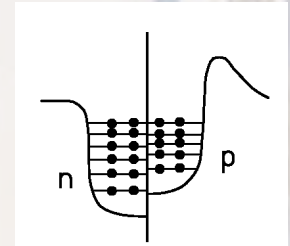


- Need of higher intensity RIBs
- Need of high-efficiency neutron detectors



# Concepto de emisión retardada de neutrones

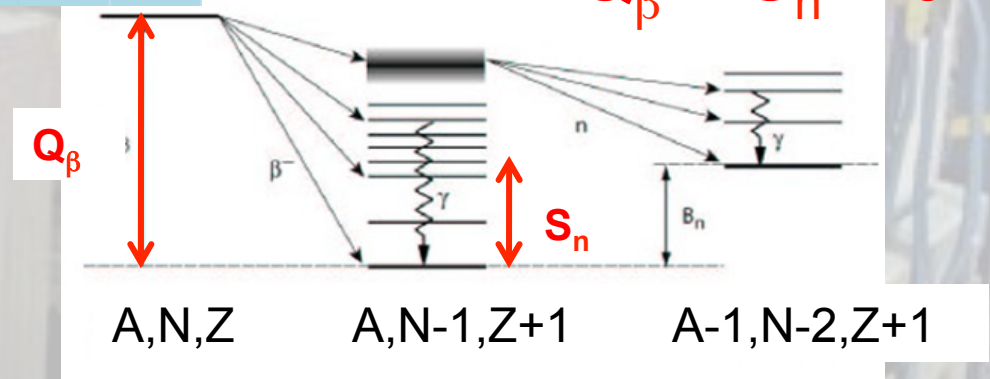
La	<sup>134</sup> La	<sup>135</sup> La	<sup>136</sup> La	<sup>137</sup> La	<sup>138</sup> La	<sup>139</sup> La	<sup>140</sup> La	<sup>141</sup> La	<sup>142</sup> La	<sup>143</sup> La	<sup>144</sup> La	<sup>145</sup> La	<sup>146</sup> La	<sup>147</sup> La	<sup>148</sup> La	<sup>149</sup> La
Ba	<sup>133</sup> Ba	<sup>134</sup> Ba	<sup>135</sup> Ba	<sup>136</sup> Ba	<sup>137</sup> Ba	<sup>138</sup> Ba	<sup>139</sup> Ba	<sup>140</sup> Ba	<sup>141</sup> Ba	<sup>142</sup> Ba	<sup>143</sup> Ba	<sup>144</sup> Ba	<sup>145</sup> Ba	<sup>146</sup> Ba	<sup>147</sup> Ba	<sup>148</sup> Ba
Cs	<sup>132</sup> Cs	<sup>133</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>135</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>138</sup> Cs	<sup>139</sup> Cs	<sup>140</sup> Cs	<sup>141</sup> Cs	<sup>142</sup> Cs	<sup>143</sup> Cs	<sup>144</sup> Cs	<sup>145</sup> Cs	<sup>146</sup> Cs	<sup>147</sup> Cs
Xe	<sup>131</sup> Xe	<sup>132</sup> Xe	<sup>133</sup> Xe	<sup>134</sup> Xe	<sup>135</sup> Xe	<sup>136</sup> Xe	<sup>137</sup> Xe	<sup>138</sup> Xe	<sup>139</sup> Xe	<sup>140</sup> Xe	<sup>141</sup> Xe	<sup>142</sup> Xe	<sup>143</sup> Xe	<sup>144</sup> Xe	<sup>145</sup> Xe	<sup>146</sup> Xe
I	<sup>130</sup> I	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>134</sup> I	<sup>135</sup> I	<sup>136</sup> I	<sup>137</sup> I	<sup>138</sup> I	<sup>139</sup> I	<sup>140</sup> I	<sup>141</sup> I	<sup>142</sup> I	<sup>143</sup> I	<sup>144</sup> I	
Te	<sup>129</sup> Te	<sup>130</sup> Te	<sup>131</sup> Te	<sup>132</sup> Te	<sup>133</sup> Te	<sup>134</sup> Te	<sup>135</sup> Te	<sup>136</sup> Te	<sup>137</sup> Te	<sup>138</sup> Te	<sup>139</sup> Te	<sup>140</sup> Te	<sup>141</sup> Te	<sup>142</sup> Te		
Sb	<sup>128</sup> Sb	<sup>129</sup> Sb	<sup>130</sup> Sb	<sup>131</sup> Sb	<sup>132</sup> Sb	<sup>133</sup> Sb	<sup>134</sup> Sb	<sup>135</sup> Sb	<sup>136</sup> Sb	<sup>137</sup> Sb	<sup>138</sup> Sb	<sup>139</sup> Sb				
Sn	<sup>127</sup> Sn	<sup>128</sup> Sn	<sup>129</sup> Sn	<sup>130</sup> Sn	<sup>131</sup> Sn	<sup>132</sup> Sn	<sup>133</sup> Sn	<sup>134</sup> Sn	<sup>135</sup> Sn	<sup>136</sup> Sn	<sup>137</sup> Sn					



# Concepto de emisión retardada de neutrones

La	<sup>134</sup> La	<sup>135</sup> La	<sup>136</sup> La	<sup>137</sup> La	<sup>138</sup> La	<sup>139</sup> La	<sup>140</sup> La	<sup>141</sup> La	<sup>142</sup> La	<sup>143</sup> La	<sup>144</sup> La	<sup>145</sup> La	<sup>146</sup> La	<sup>147</sup> La	<sup>148</sup> La	<sup>149</sup> La
Ba	<sup>133</sup> Ba	<sup>134</sup> Ba	<sup>135</sup> Ba	<sup>136</sup> Ba	<sup>137</sup> Ba	<sup>138</sup> Ba	<sup>139</sup> Ba	<sup>140</sup> Ba	<sup>141</sup> Ba	<sup>142</sup> Ba	<sup>143</sup> Ba	<sup>144</sup> Ba	<sup>145</sup> Ba	<sup>146</sup> Ba	<sup>147</sup> Ba	<sup>148</sup> Ba
Cs	<sup>132</sup> Cs	<sup>133</sup> Cs	<sup>134</sup> Cs	<sup>135</sup> Cs	<sup>136</sup> Cs	<sup>137</sup> Cs	<sup>138</sup> Cs	<sup>139</sup> Cs	<sup>140</sup> Cs	<sup>141</sup> Cs	<sup>142</sup> Cs	<sup>143</sup> Cs	<sup>144</sup> Cs	<sup>145</sup> Cs	<sup>146</sup> Cs	<sup>147</sup> Cs
Xe	<sup>131</sup> Xe	<sup>132</sup> Xe	<sup>133</sup> Xe	<sup>134</sup> Xe	<sup>135</sup> Xe	<sup>136</sup> Xe	<sup>137</sup> Xe	<sup>138</sup> Xe	<sup>139</sup> Xe	<sup>140</sup> Xe	<sup>141</sup> Xe	<sup>142</sup> Xe	<sup>143</sup> Xe	<sup>144</sup> Xe	<sup>145</sup> Xe	<sup>146</sup> Xe
I	<sup>130</sup> I	<sup>131</sup> I	<sup>132</sup> I	<sup>133</sup> I	<sup>134</sup> I	<sup>135</sup> I	<sup>136</sup> I	<sup>137</sup> I	<sup>138</sup> I	<sup>139</sup> I	<sup>140</sup> I	<sup>141</sup> I	<sup>142</sup> I	<sup>143</sup> I	<sup>144</sup> I	<sup>145</sup> I
Te	<sup>129</sup> Te	<sup>130</sup> Te	<sup>131</sup> Te	<sup>132</sup> Te	<sup>133</sup> Te	<sup>134</sup> Te	<sup>135</sup> Te	<sup>136</sup> Te	<sup>137</sup> Te	<sup>138</sup> Te	<sup>139</sup> Te	<sup>140</sup> Te	<sup>141</sup> Te	<sup>142</sup> Te	<sup>143</sup> Te	<sup>144</sup> Te
Sb	<sup>128</sup> Sb	<sup>129</sup> Sb	<sup>130</sup> Sb	<sup>131</sup> Sb	<sup>132</sup> Sb	<sup>133</sup> Sb	<sup>134</sup> Sb	<sup>135</sup> Sb	<sup>136</sup> Sb	<sup>137</sup> Sb	<sup>138</sup> Sb	<sup>139</sup> Sb	<sup>140</sup> Sb	<sup>141</sup> Sb	<sup>142</sup> Sb	<sup>143</sup> Sb
Sn	<sup>127</sup> Sn	<sup>128</sup> Sn	<sup>129</sup> Sn	<sup>130</sup> Sn	<sup>131</sup> Sn	<sup>132</sup> Sn	<sup>133</sup> Sn	<sup>134</sup> Sn	<sup>135</sup> Sn	<sup>136</sup> Sn	<sup>137</sup> Sn	<sup>138</sup> Sn	<sup>139</sup> Sn	<sup>140</sup> Sn	<sup>141</sup> Sn	<sup>142</sup> Sn

$$Q_{\beta} - S_n > 0$$



# Motivación e implicaciones de los NR

- Aplicaciones tecnológicas: producción de energía en reactores
- Aplicaciones en astrofísica: nucleosíntesis de elementos pesados



# Producción de energía por fisión nuclear

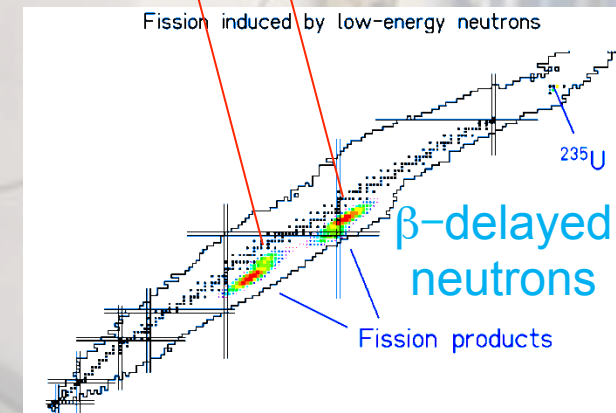
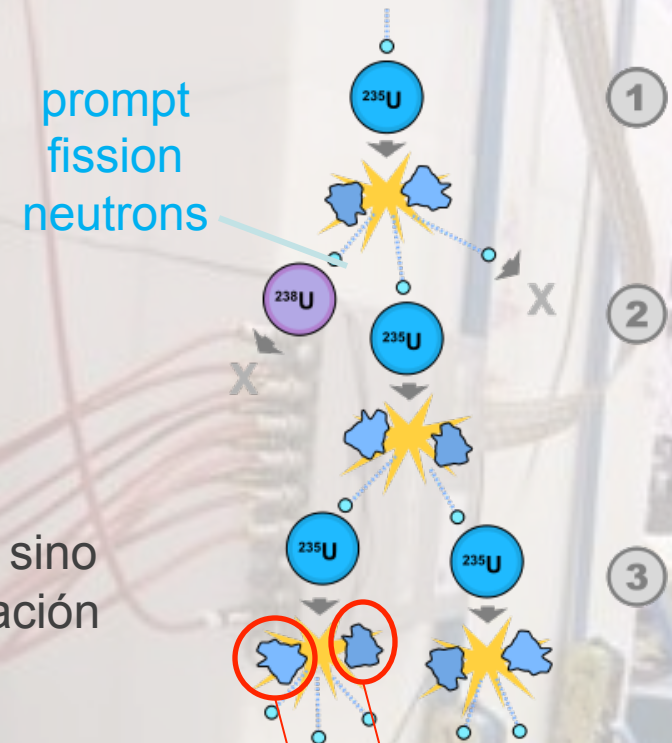
En un reactor nuclear, el objetivo es producir calor (energía) por medio de una reacción en cadena auto-sostenida ( $k = 1$ , sistema crítico).

[ $k$  := factor efectivo de multiplicación neutrónica]

En este sentido el equilibrio o balance de neutrones es muy importante. Un cálculo preciso del balance de neutrones debe incluir, no solo los neutrones “prompt” emitidos en cada fisión (2-3) sino también los neutrones provenientes de la desintegración beta de los productos de fisión (NR) (0.6% del total).

Son necesarias librerías “precisas” de:

- Secciones eficaces de reacciones: fisión, captura neutrónica, dispersión elástica, etc
- Productos residuales producidos en las reacciones de fisión, “minor actinides”.
- Partículas secundarias producidas en las reacciones: numero de neutrones “prompt” por fisión, radiación gamma, **emisión retardada de neutrones** y rayos gamma.



# Producción de energía por fisión nuclear

En un reactor, los NR tienen el efecto de **prolongar la vida media efectiva** de los neutrones libres ( $\tau$ ) de **1 ms** (prompt fission n) a unos **100 ms** (fission+ $\beta$ n).

Ejemplo para ilustrar la **relevancia de los NR** en el control de un reactor nuclear:

N:= Numero de neutrones libres en un reactor

$\tau$  := vida media efectiva promedio de un neutrón libre

La evolución del balance de neutrones en un reactor viene descrita por la siguiente ecuación diferencial:

$$dN/dt = \alpha N/\tau$$

$\alpha$ := constante de proporcionalidad:

$\alpha > 0 \rightarrow$  Supercrítico: tasa de aumento de n aumenta exponencialmente

$\alpha = 0 \rightarrow$  Crítico: equilibrio, numero de neutrones libres permanece constante.

$\alpha < 0 \rightarrow$  Subcrítico: número de neutrones decae exponencialmente

Imaginemos un sistema (reactor nuclear) en el que  $\alpha = 0 \rightarrow \alpha = 0.01$ .

1) Asumiendo que **no existen los NR:  $\tau := 1$  ms** (neutrones de fisión)

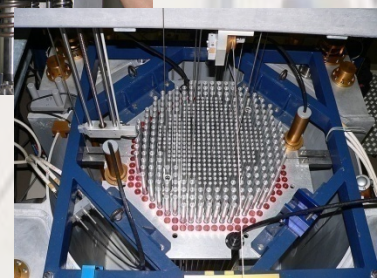
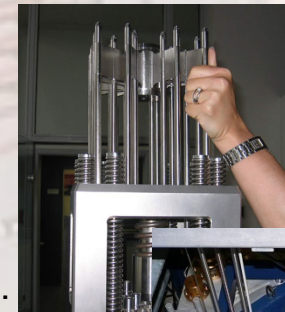
En 1 s la variación de potencia en el reactor sería:

$$\Delta P = (1 + \alpha)^{1/\tau} = (1 + 0.01)^{1000} = 2.09 \times 10^4, \text{ cuatro o.d.m.!!!}$$

2) **Incluyendo los NR:  $\tau := 100$  ms** (dominada por los NR)

En 1 s la variación de potencia en el reactor sería:

$$\Delta P = (1 + \alpha)^{1/\tau} = (1 + 0.01)^{10} = 1.1046, \text{ es decir, solo un 10\%}.$$





# Producción de energía por fisión nuclear

La mayoría de reactores nucleares se operan en modo *prompt subcritical, delayed critical*, es decir, los neutrones prompt de la fisión no son suficientes para sostener una reacción en cadena. Mediante los neutrones retardados se llega a la condición de criticidad.

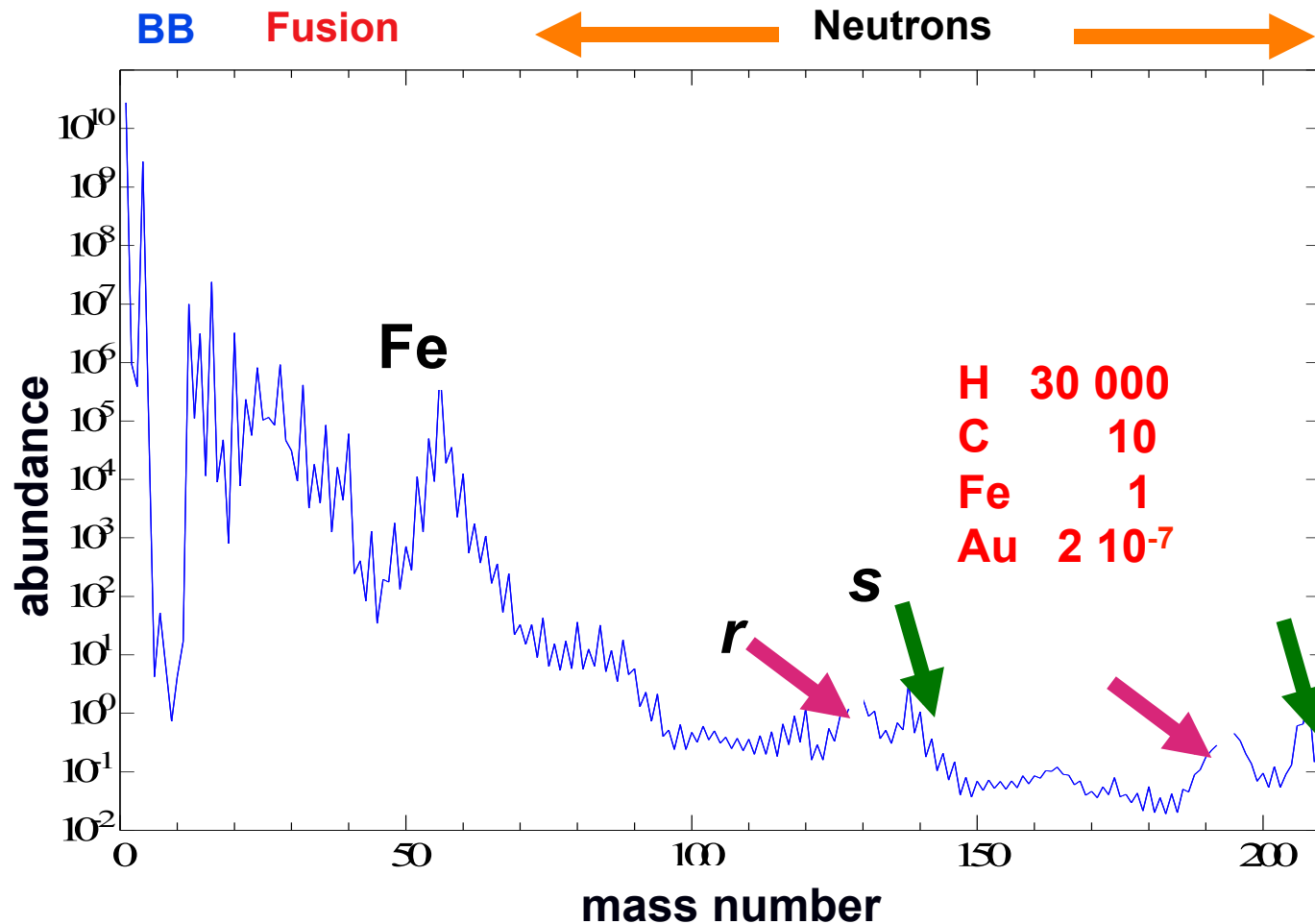
Cuando una pequeña porción de “barra de control” se inserta en el núcleo del reactor, al principio la potencia cambia muy rápido (por los neutrones de fisión), y posteriormente más gradualmente (exponencialmente) debido a los neutrones retardados.

## **Conclusión:**

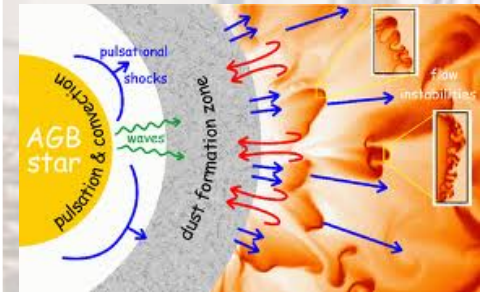
Sin los neutrones retardados, las centrales nucleares tal y como están concebidas actualmente, serían inoperables.



# Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos (r-process)

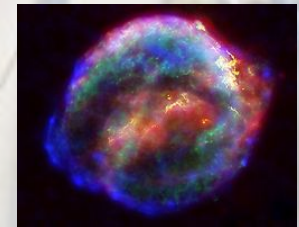


s-process: slow n-capture in stellar envelopes



r-process: unknown site

SNe?

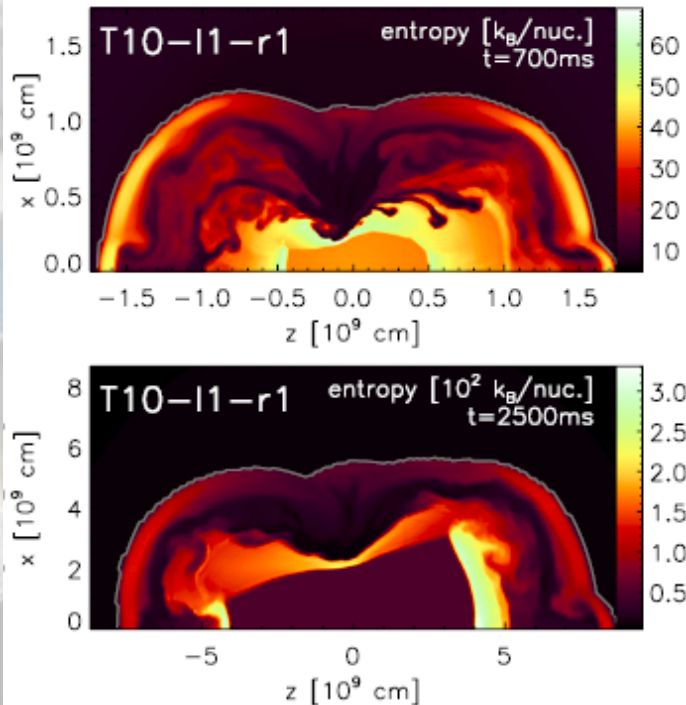
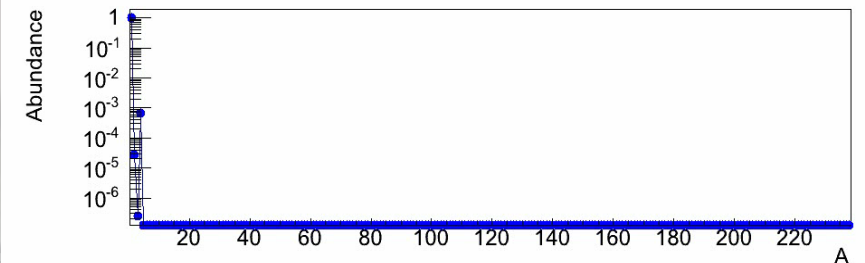
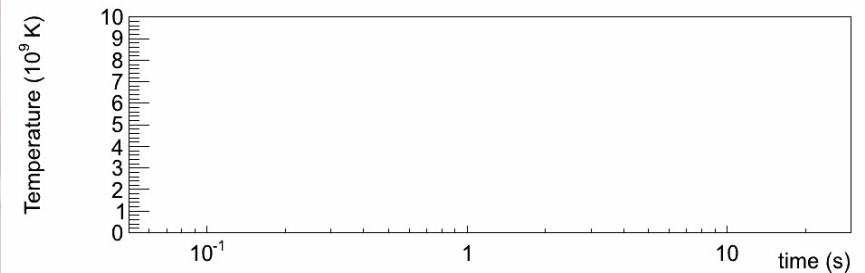
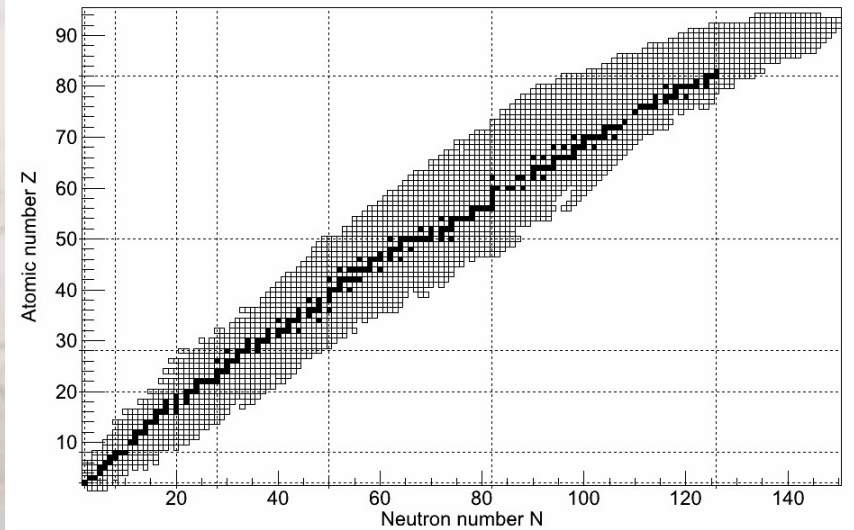
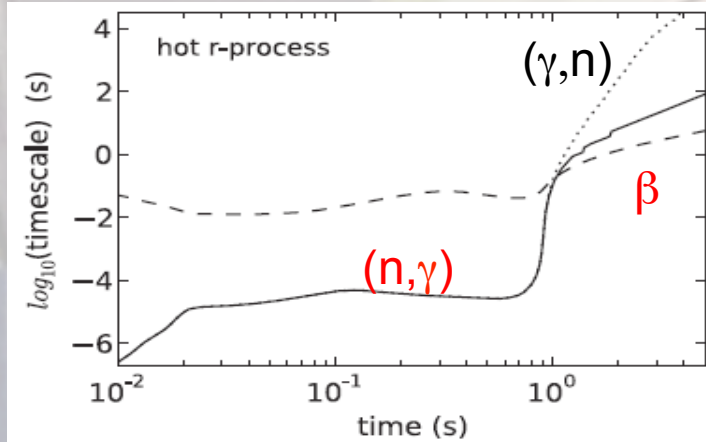


NS-Mergers

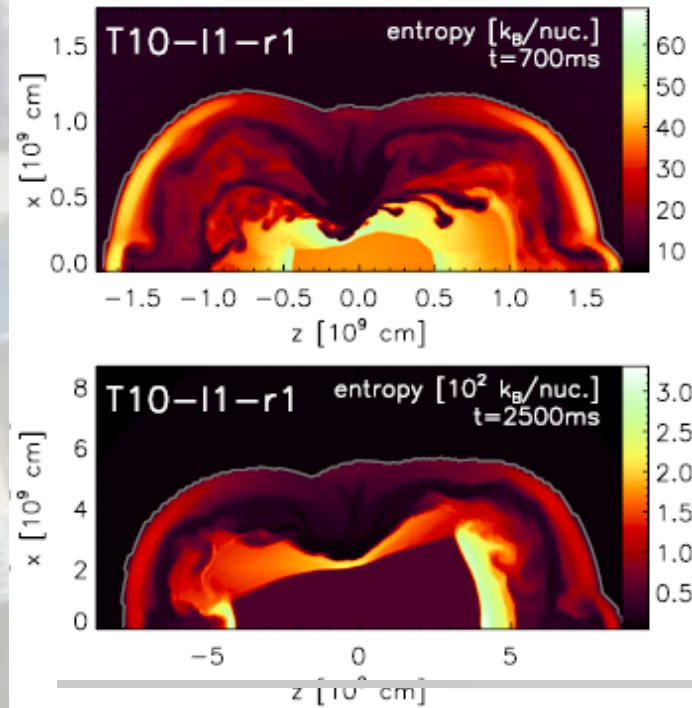
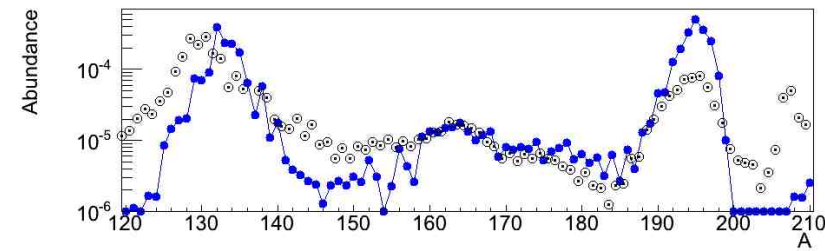
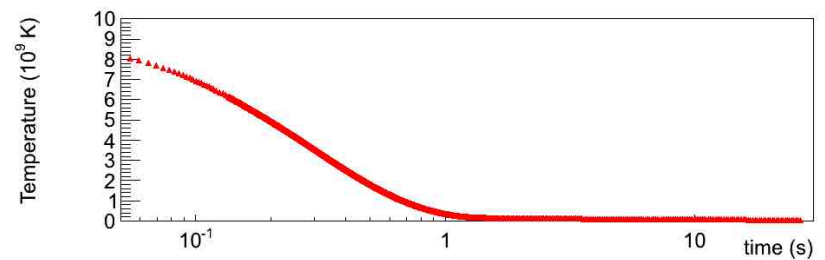
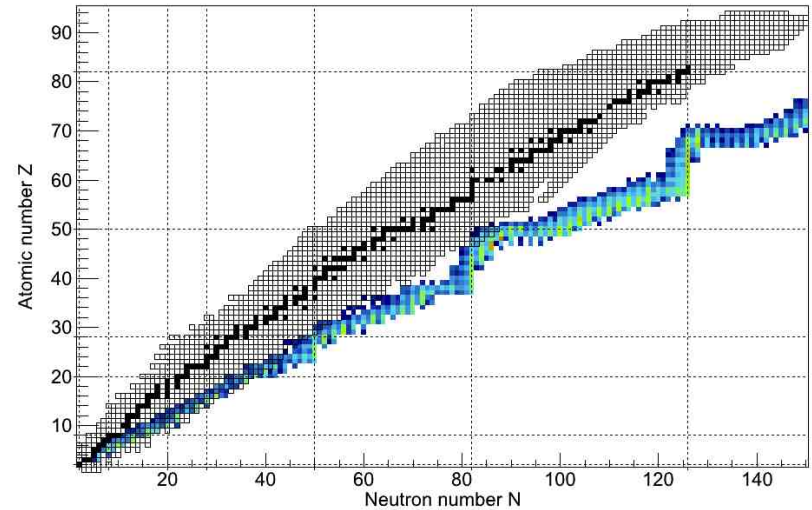
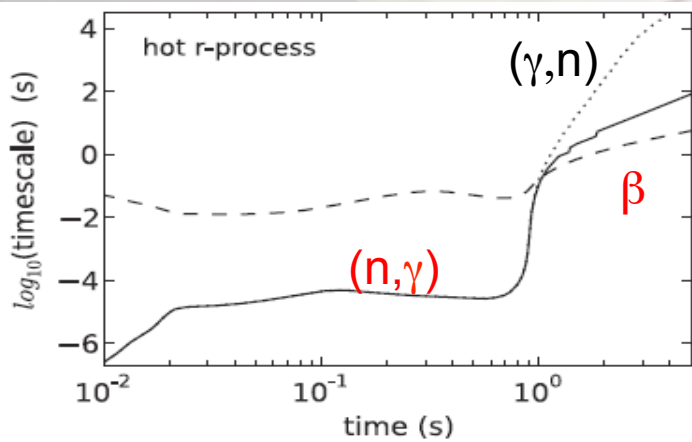


Neutrons produce 75% of the stable isotopes, but only 0.005% of total abundances

# Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos



# Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos

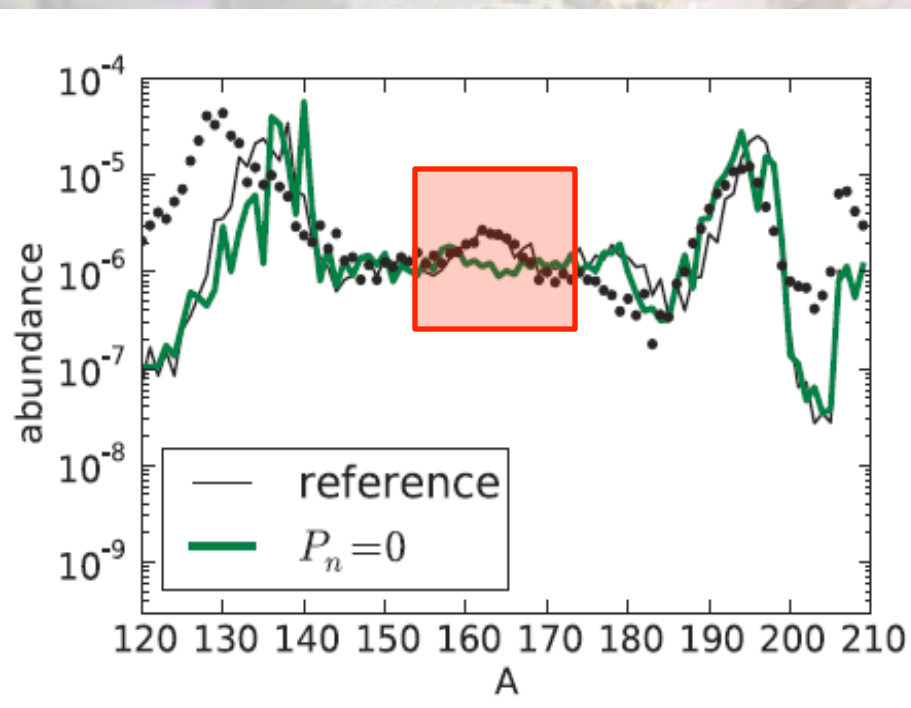




**Los Elementos de las Tierras Raras son tan abundantes gracias a los NR**

Tierras Raras: Sc, Y, La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb, etc.

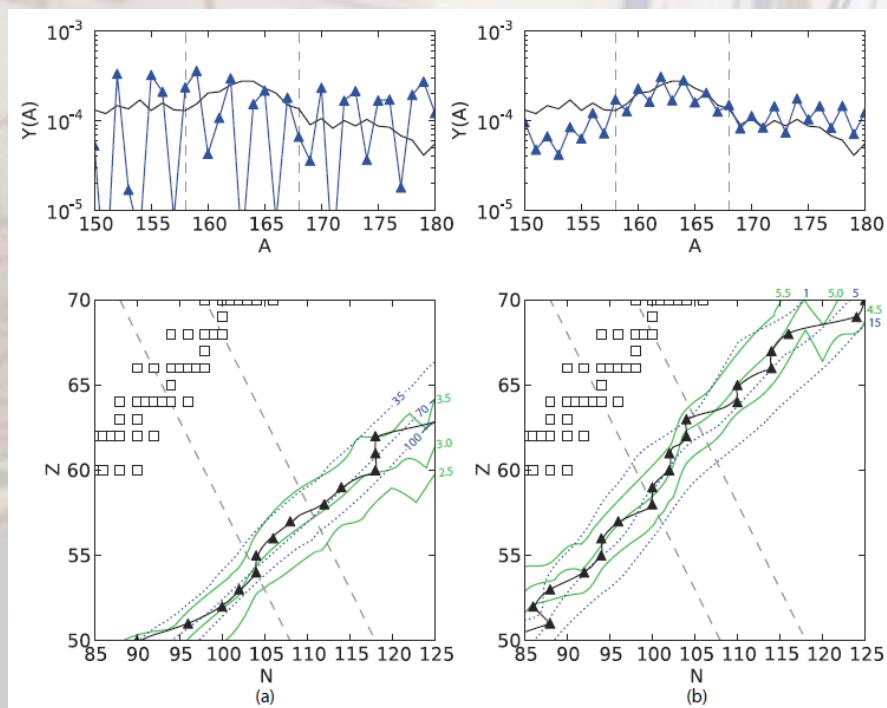
The periodic table is color-coded by groups. The groups are: Group 1 (H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr) in green; Group 2 (Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra) in red; Groups 3-10 (Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Y, Zr, Nb, Mo, Tc, Ru, Rh, Pd, Ag, Cd, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Hf, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn) in yellow; Groups 11-18 (Ga, Ge, As, Se, Br, Kr, In, Sn, Sb, Te, I, Xe, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn) in various colors (light blue, light green, light purple, light pink, light orange, light yellow). The lanthanide and actinide series are shown at the bottom, with the lanthanide series (La to Lu) circled in red.

PHYSICAL REVIEW C **83**, 045809 (2011)Dynamical  $r$ -process studies within the neutrino-driven wind scenario and its sensitivity to the nuclear physics inputA. Arcones<sup>1,2,\*</sup> and G. Martínez-Pinedo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, D-64289 Darmstadt, Germany*

<sup>2</sup>GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstraße 1, D-64291 Darmstadt, Germany

(Received 23 August 2010; revised manuscript received 22 December 2010; published 27 April 2011)



PHYSICAL REVIEW C 85, 045801 (2012)

### Formation of the rare-earth peak: Gaining insight into late-time *r*-process dynamics

Matthew R. Mumpower\* and G. C. McLaughlin†

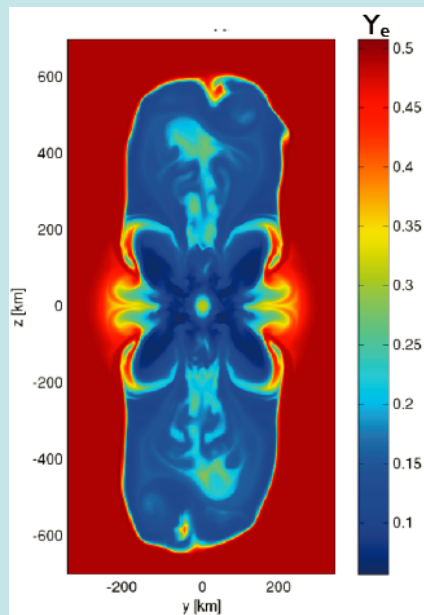
Department of Physics, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina 27695-8202, USA

Rebecca Surman<sup>†</sup>

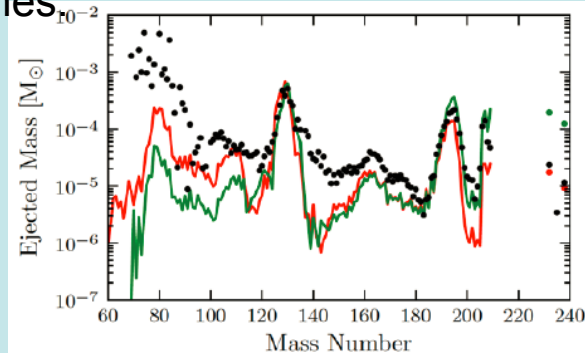
*Department of Physics and Astronomy, Union College, Schenectady, New York 12308, USA*

(Received 21 September 2011; revised manuscript received 21 November 2011; published 2 April 2012)

## Supernova con explosión en chorro (jet-like explosion)

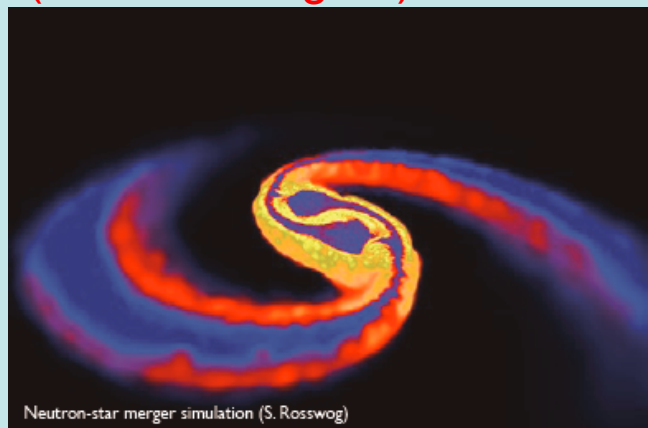


- Simulaciones magneto-HD en 3D: rápida rotación y campos magnéticos intensos.
- Colimación de materia: jets ricos en neutrones.

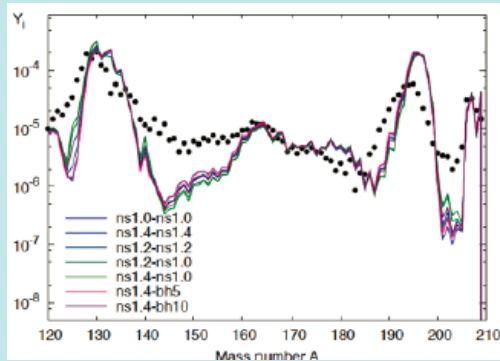


Winteler, Käppeli, Perego et al. 2012

## Sistemas binarios de estrellas de neutrones (neutron mergers)

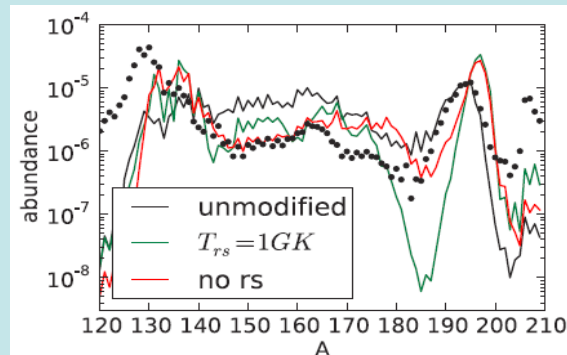
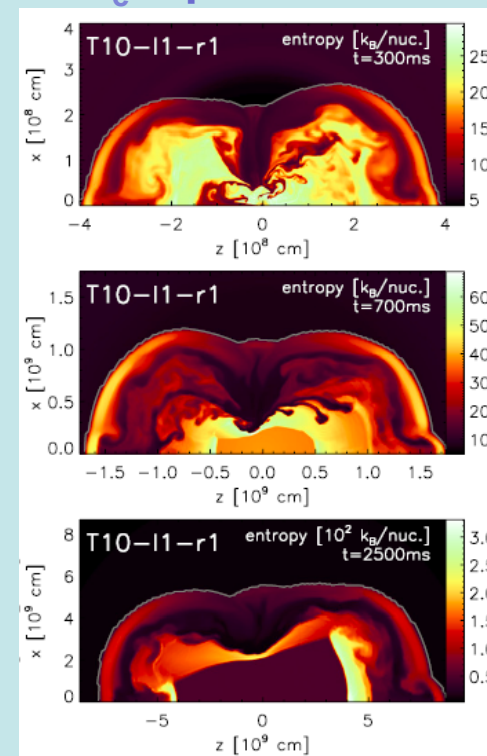
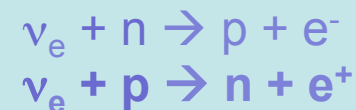


Neutron-star merger simulation (S. Rosswog)



Korobkin, Rosswog, Arcones, Winteler et al. 2012

## SN + $\nu$ -driven wind



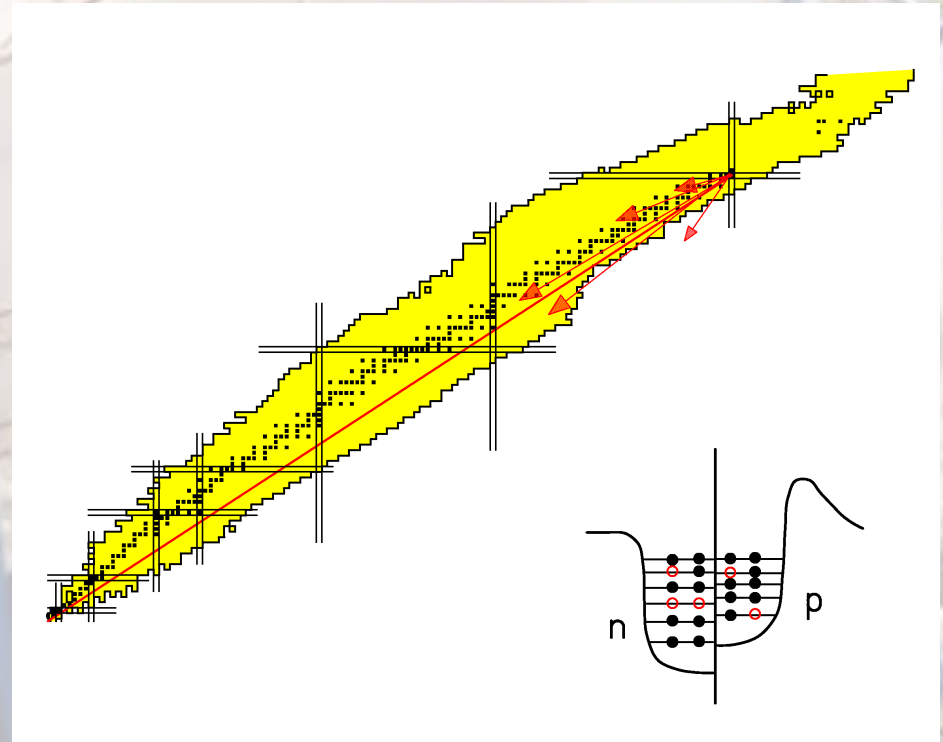
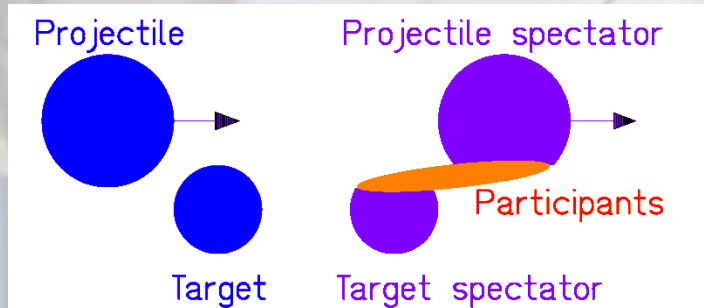
# TÉCNICAS EXPERIMENTALES DE MEDIDA



1. Producción de los núcleos ricos en neutrones (por fisión y/o fragmentación)
2. Implantación en un blanco (activo)
3. Medida de la desintegración beta
4. Medida de los neutrones
5. Evaluación del “neutron branching”



# Fragmentación



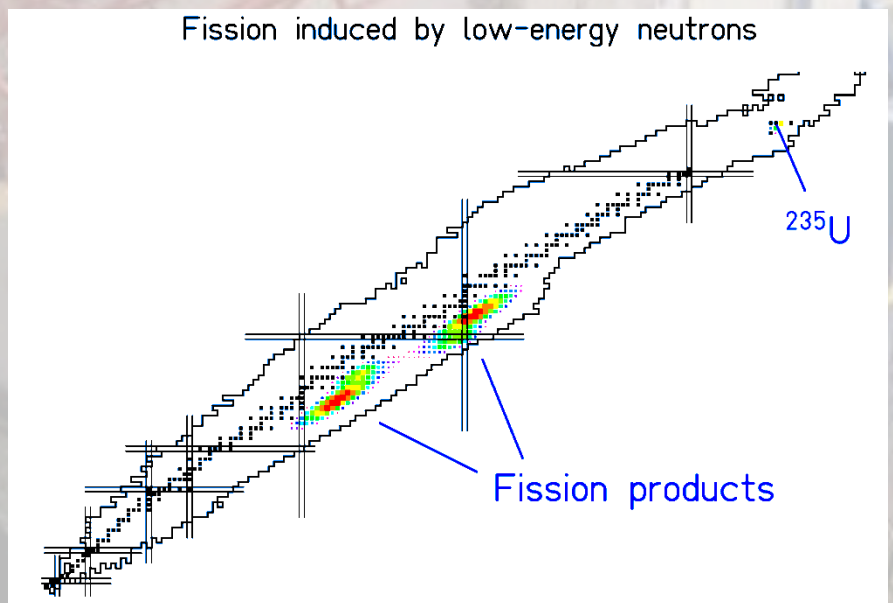
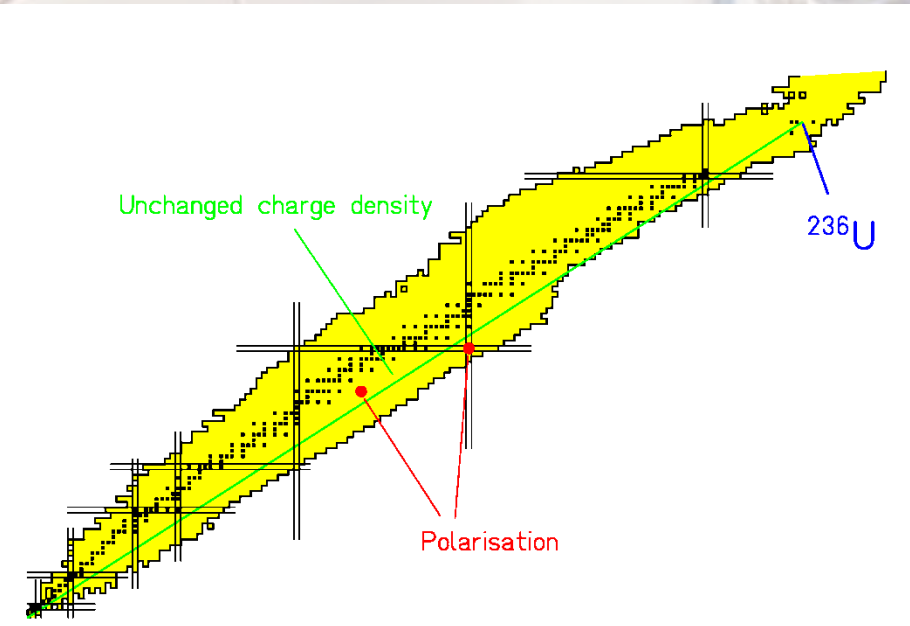
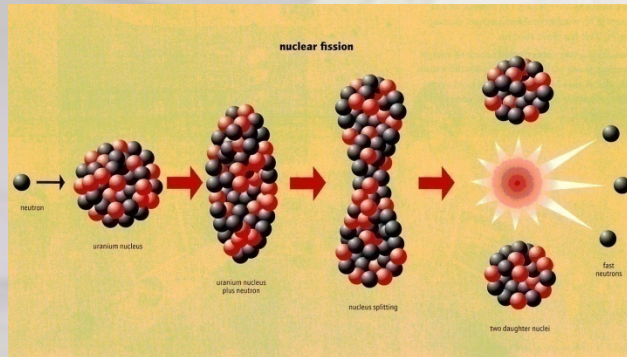
**Removal of nucleons in quasi-free nucleon-nucleon collisions.**

**Basic characteristics:**

- Large fluctuations in  $N/Z$ .
- Large fluctuations in excitation energy.

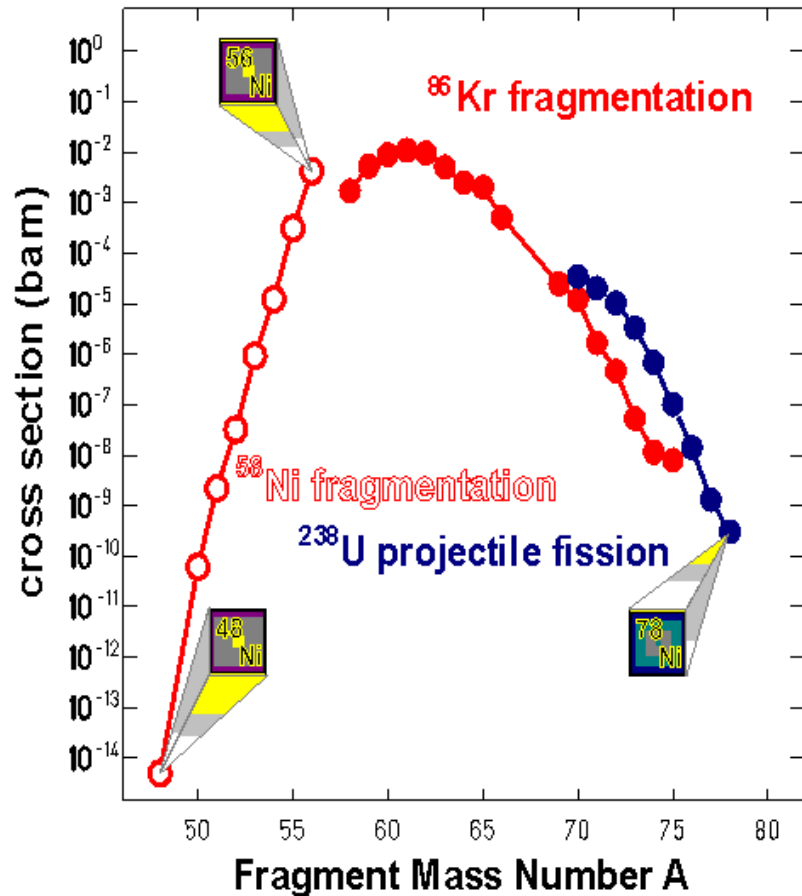
**Highly excited fragments loose additional nucleons by evaporation.**

# Fisión



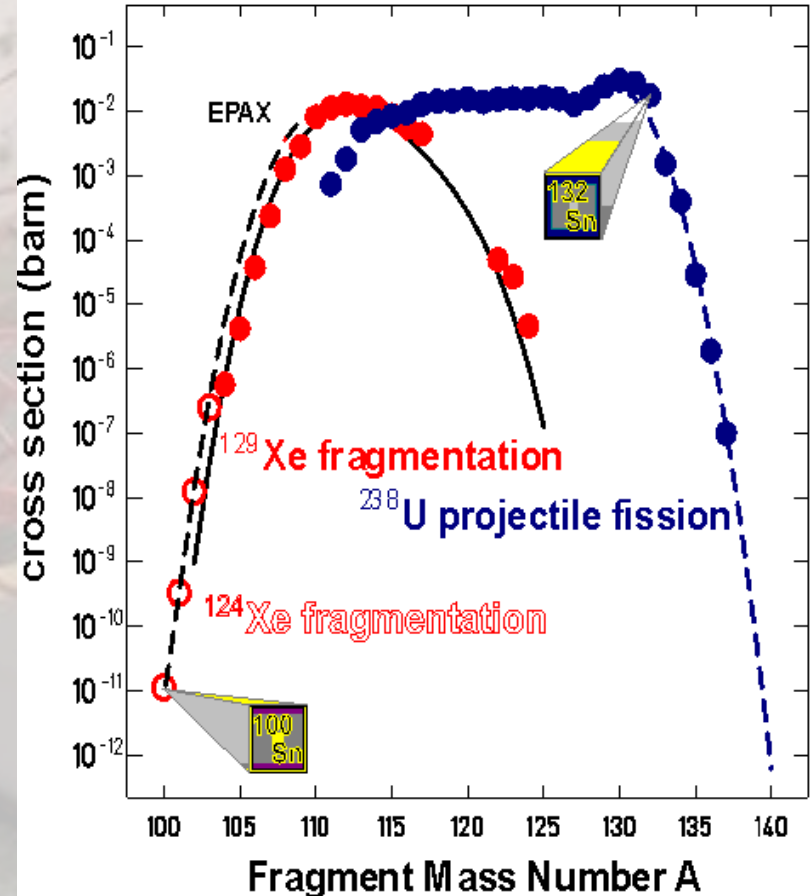
# Producción de iones exóticos

Ni isotopes from projectile fragmentation and projectile fission



K. Sümmerner

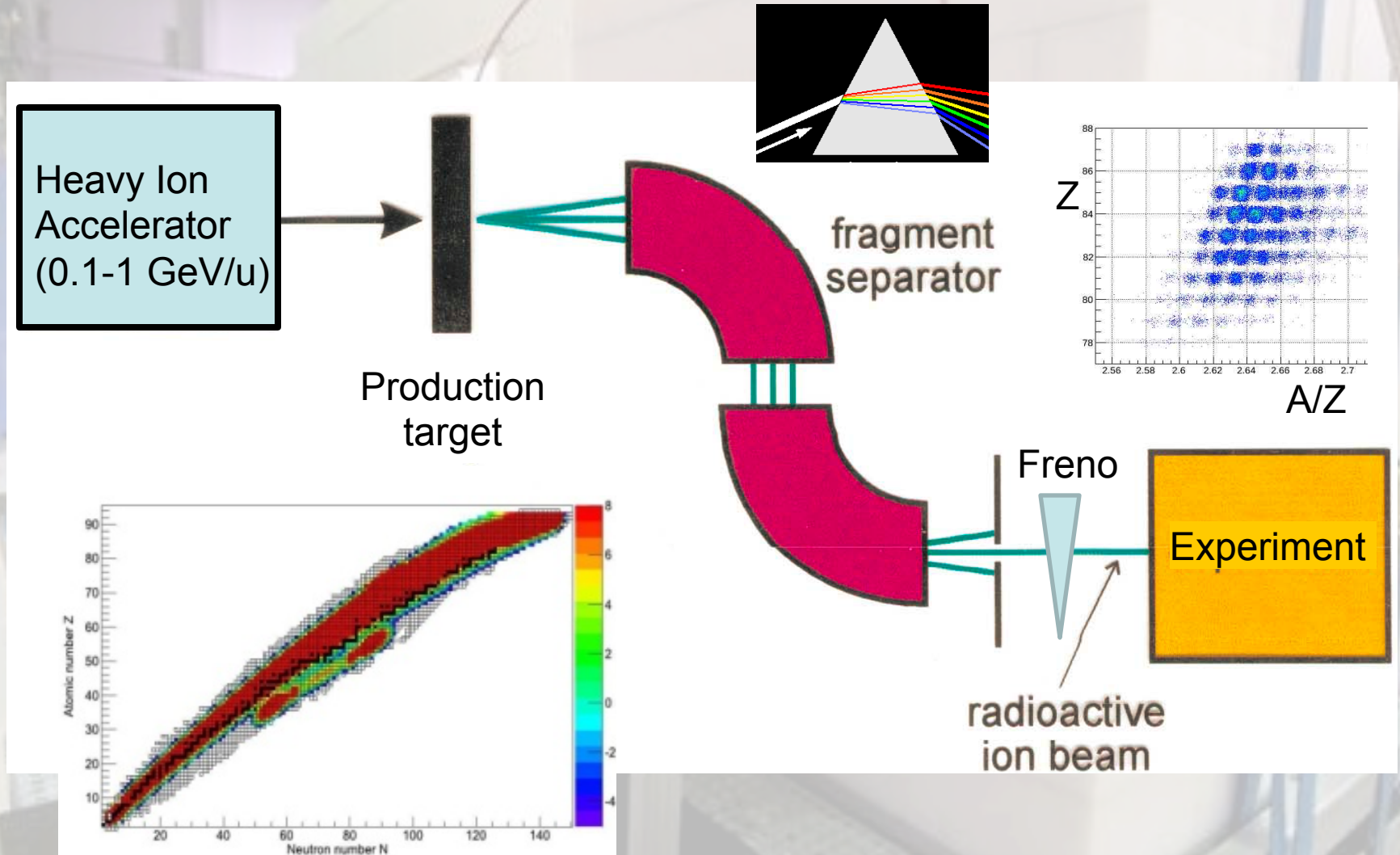
Sn isotopes from projectile fragmentation and projectile fission



K. Sümmerner

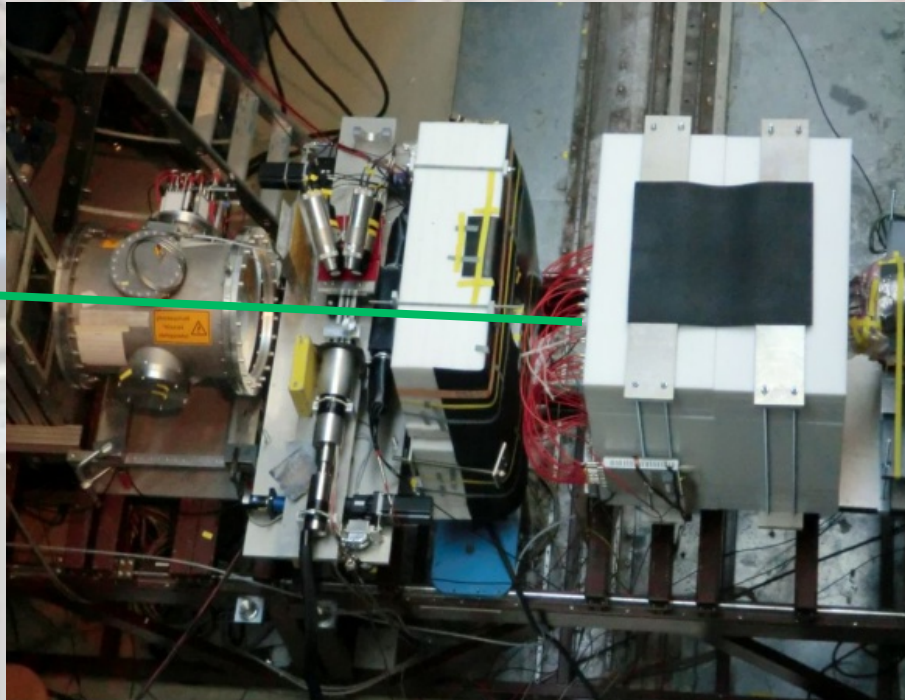


# Identificación y separación de los núcleos exóticos de interés



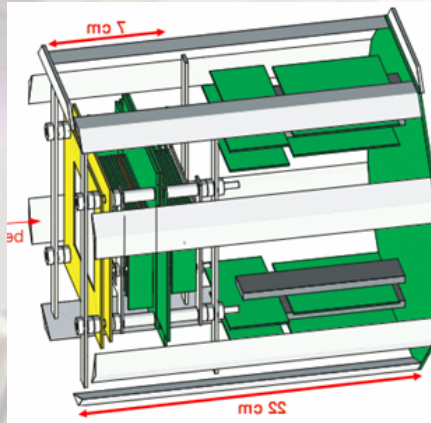
# Implantación en un blanco

Experiment

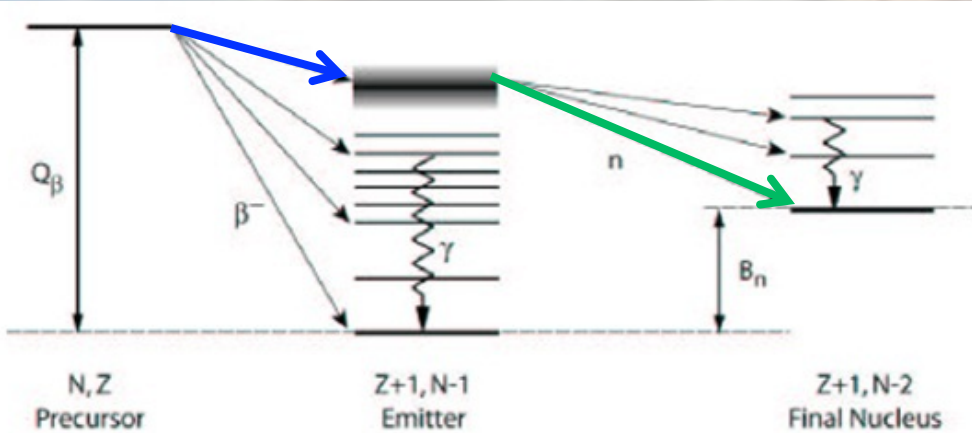




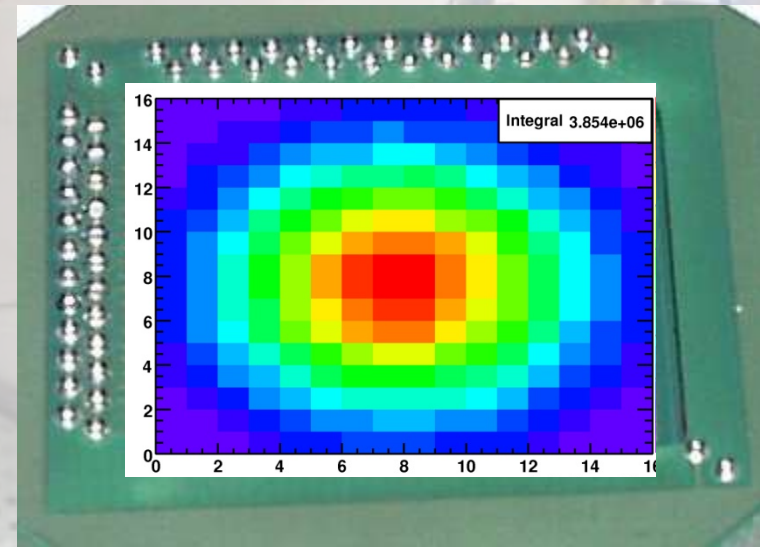
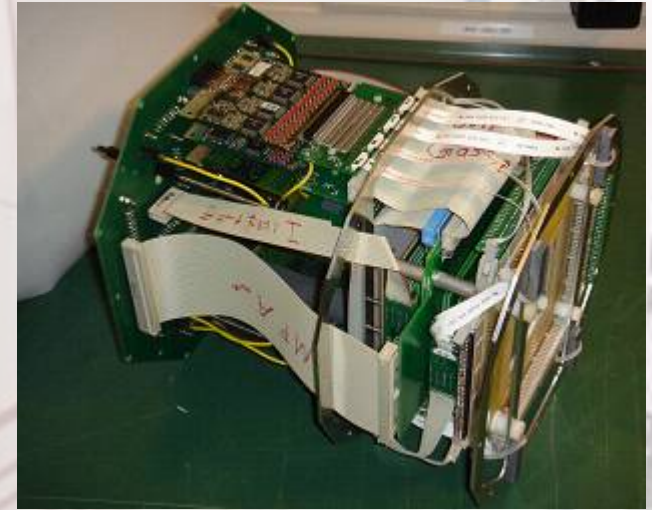
# Implantación y decay en un blanco activo



Degradador  
(Freno)

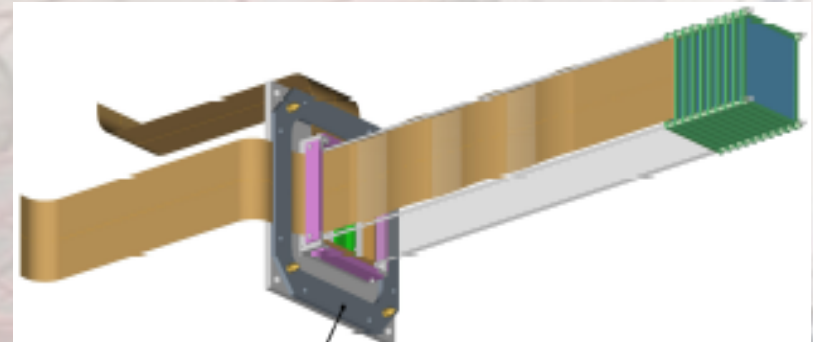
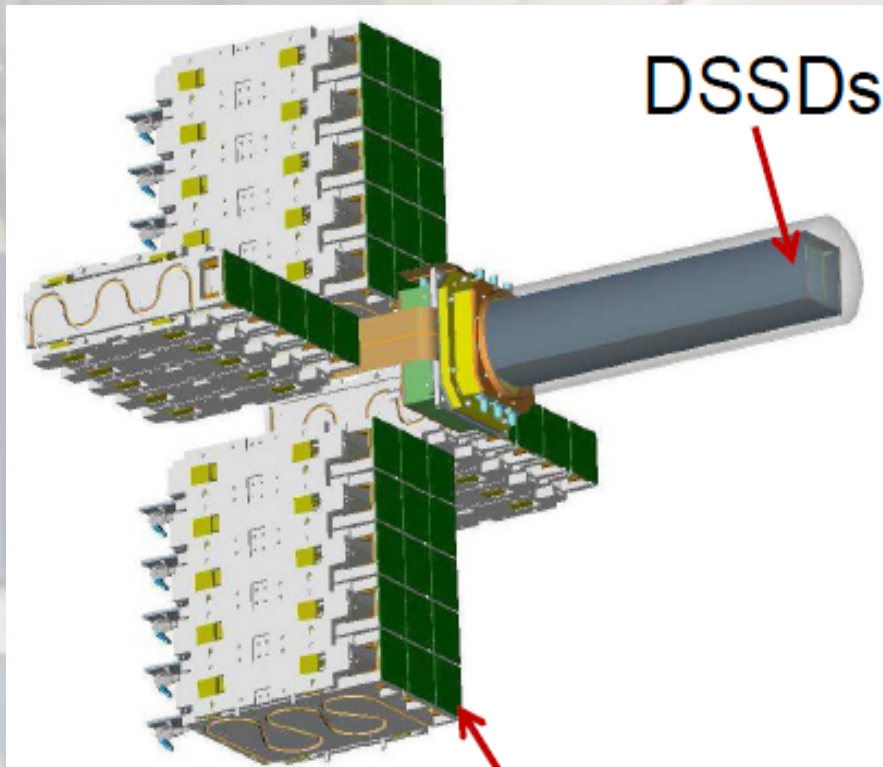


SIMBA (TUM, Germany)





# Implantación y decay en un blanco activo



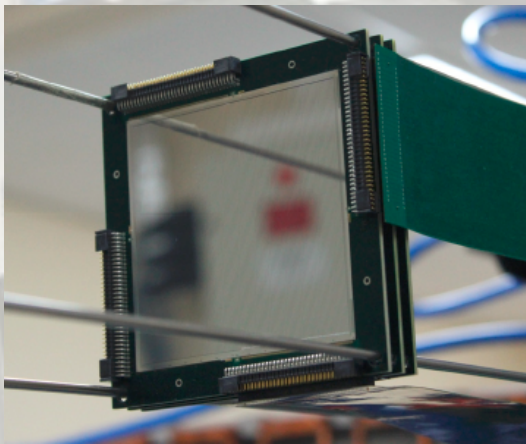
12xDSSDs, 8x8cm, 1mm Si, 625um,  
>5000 channels

Implant – decay correlations

- Multi-GeV implantation events
- Subsequent low-energy decays
- Tag events for gamma and neutron detector arrays

**Detector:** multi-plane Si DSSD array  
wafer thickness 1mm  
8cm x 8cm (128x128 strips)

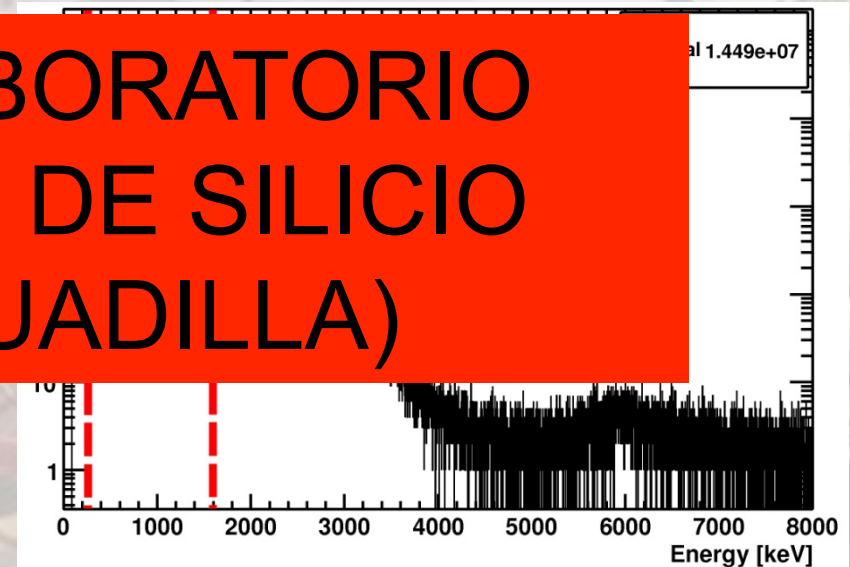
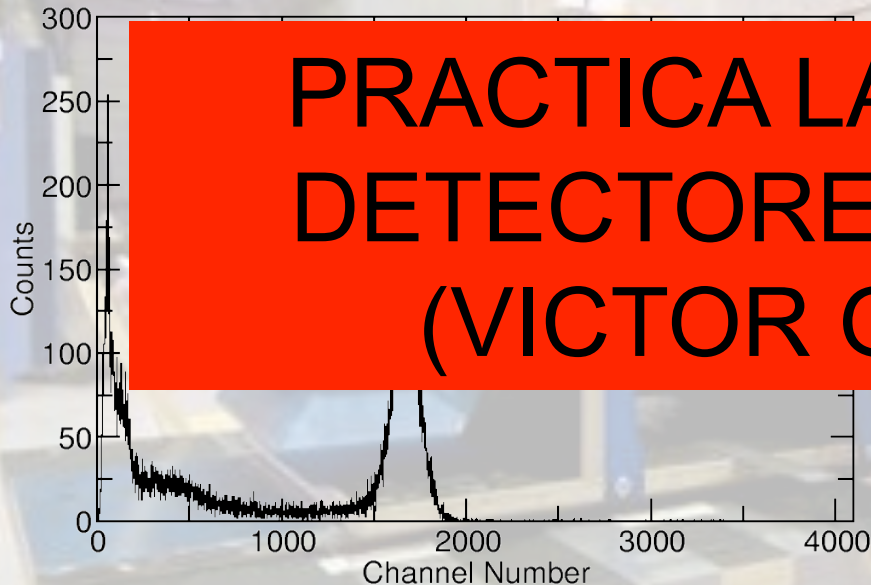
PJ Woods: PI of AIDA  
collaboration  
(Edinburgh – Liverpool – STFC  
DL & RAL)



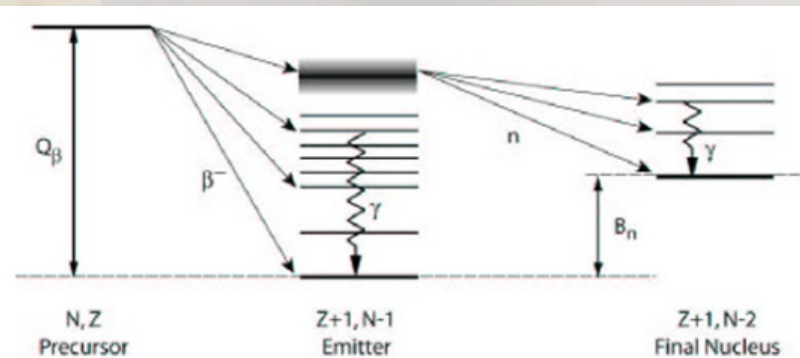
# Implantación y decay en un blanco activo

Implantes e.g.  $^{209}\text{Bi}$  a 40 MeV/u:

$\beta$ -decays:



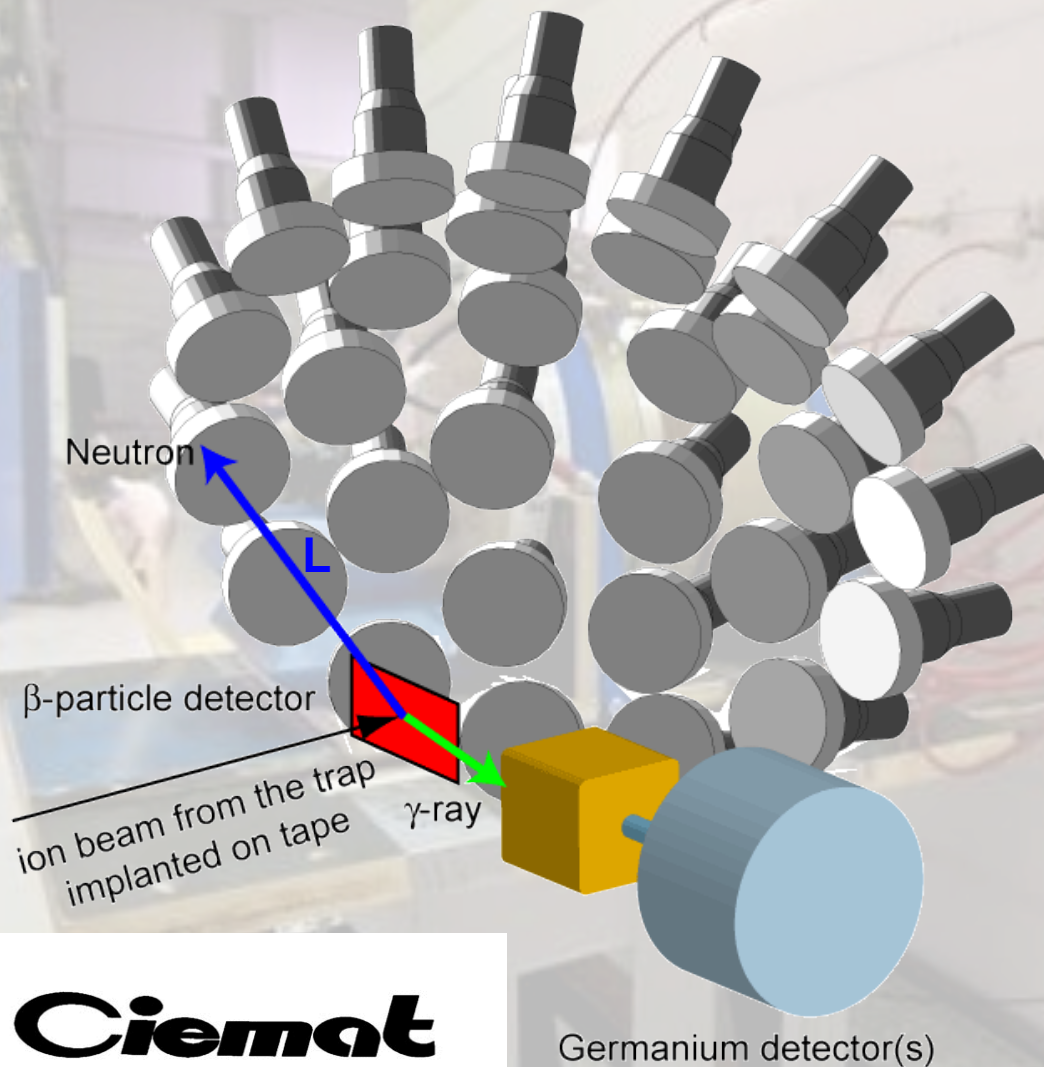
## PRACTICA LABORATORIO DETECTORES DE SILICIO (VICTOR GUADILLA)



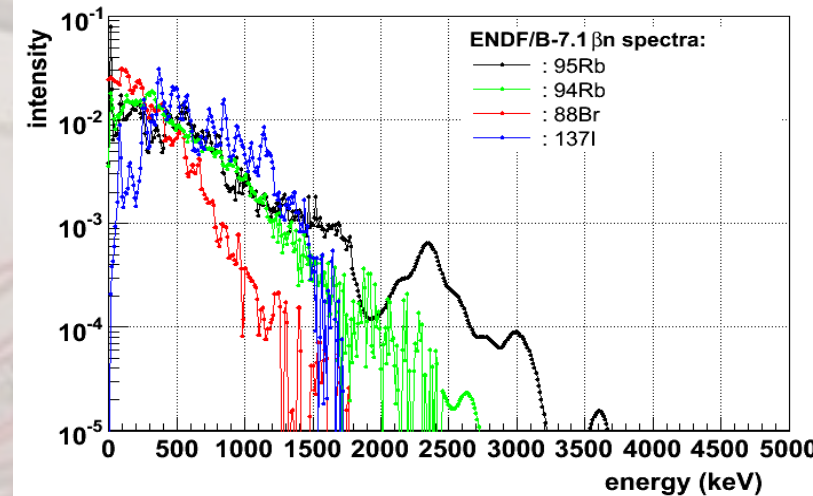


# Detección de los neutrones retardados-beta

MONSTER Detector:



$$\text{tof} \rightarrow E_n = \frac{1}{2} m_n (L/\text{tof})^2$$





# Detección de los neutrones retardados-beta

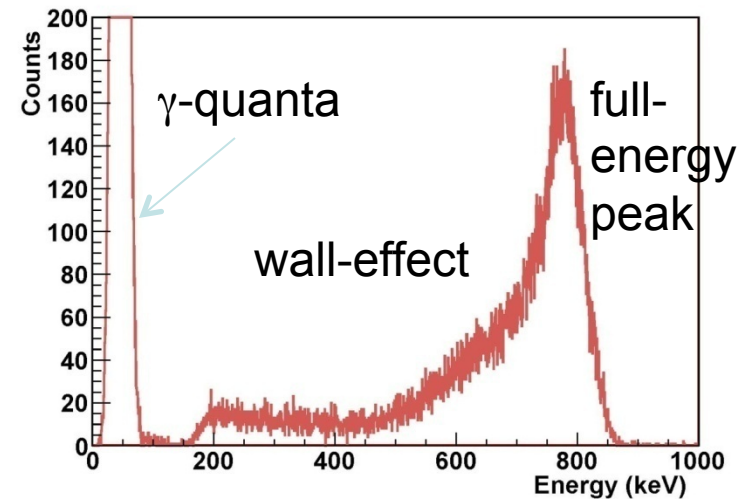
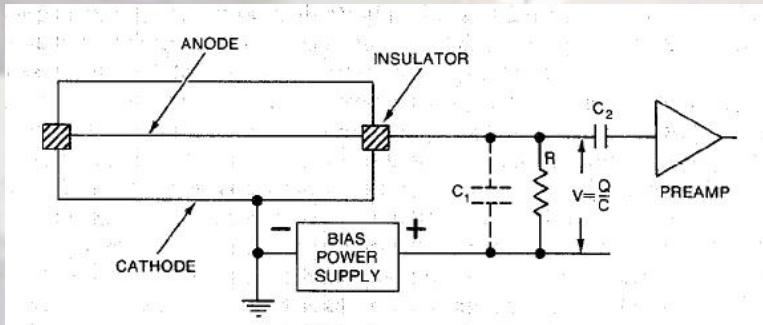
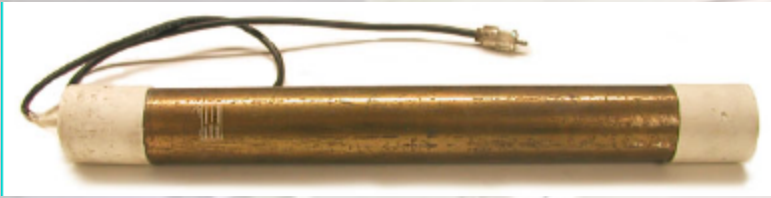
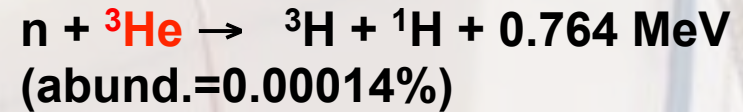
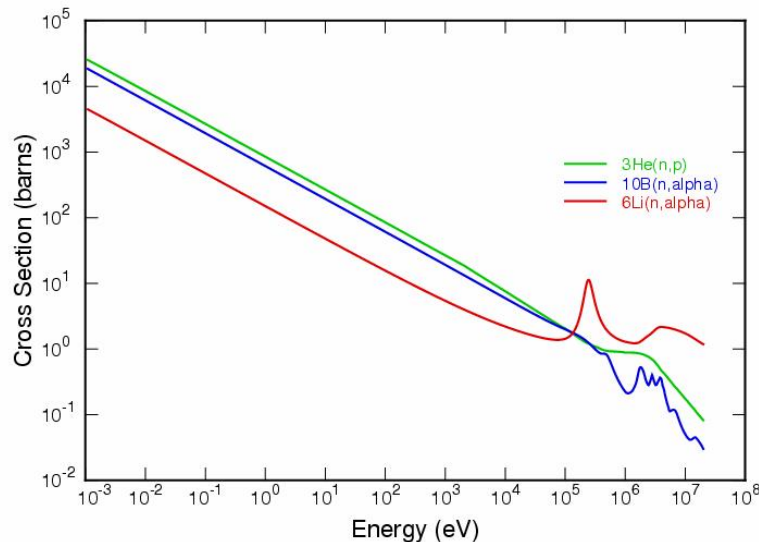


Figure 1: Expected pulse height spectrum from a  ${}^3\text{He}$  tube. The two steps in the spectrum are caused by one of the reaction products hitting the detector wall. In area (a), the triton energy is fully deposited, but the proton only deposited a fraction of its energy, and vice versa in area (b).



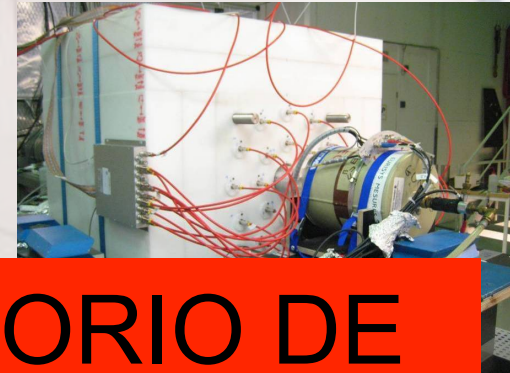
The lower the neutron energy, the better for detection!

“truco”

Termalizar/moderar los neutrones (reducir su E) !

# Moderar para detectar...

After many collisions:



## PRACTICA LABORATORIO DE CONTADORES DE NEUTRONES (SONJA ORRIGO)

Nucleus	$1-\alpha$	$\xi$	N
$^1\text{H}$			
$^2\text{H}$			
$^4\text{H}$			
$^{12}\text{C}$	0.284	0.158	111
$^{56}\text{Fe}$	0.069	0.035	500
$^{208}\text{Pb}$	0.019	0.010	1823

Number of collisions to reach an energy:

$$N = \frac{\ln E_0 / E_f}{\xi}$$

Slowing-down time:  $t = \sqrt{\frac{K}{E_f}} - t_0 : K(\xi, \sigma_{\text{ela}}); t_0(E_0, \xi, \sigma_{\text{ela}})$

eter:  
 $\ln \frac{A-1}{A+1}$

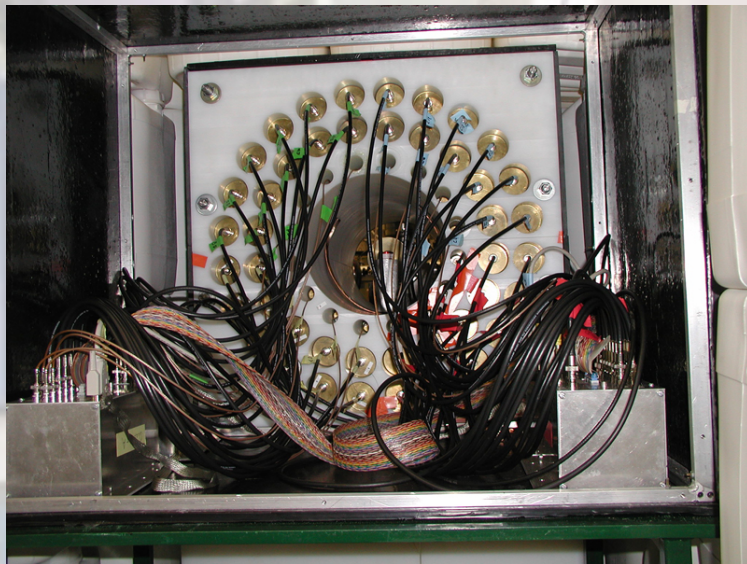


# Contadores $4\pi$ : NERO @ NSCL-MSU

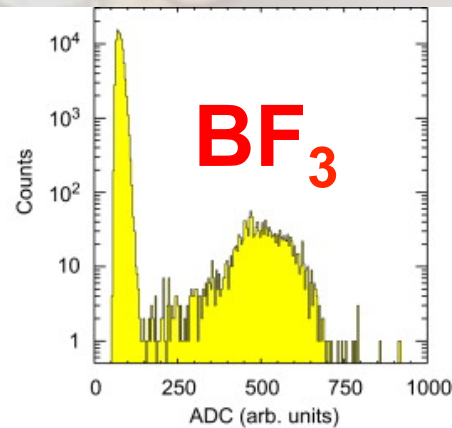
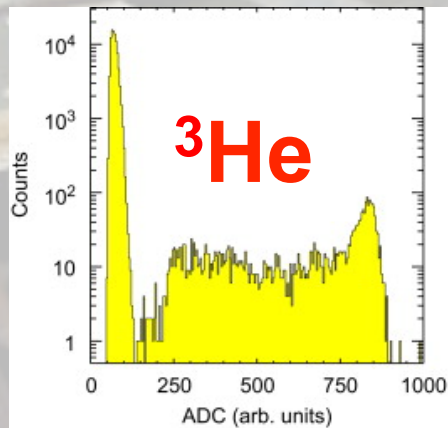
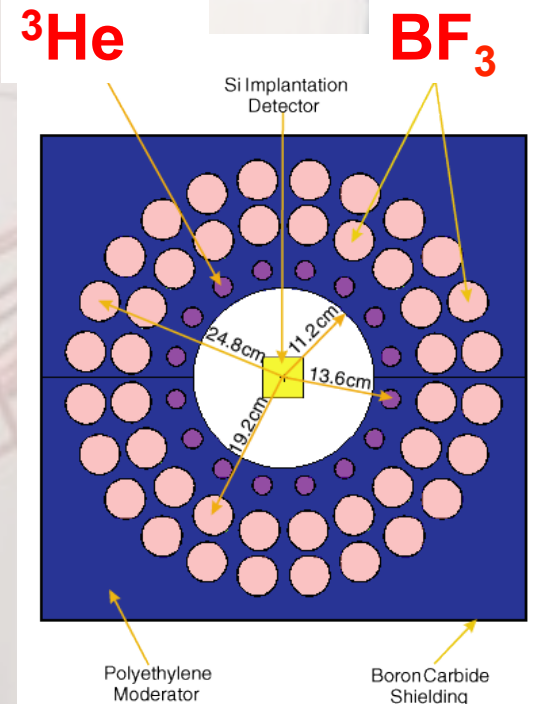


Polyethylene block (60x60x80cm<sup>3</sup>)

16  $^3\text{He}$  and 44  $\text{BF}_3$  proportional counters

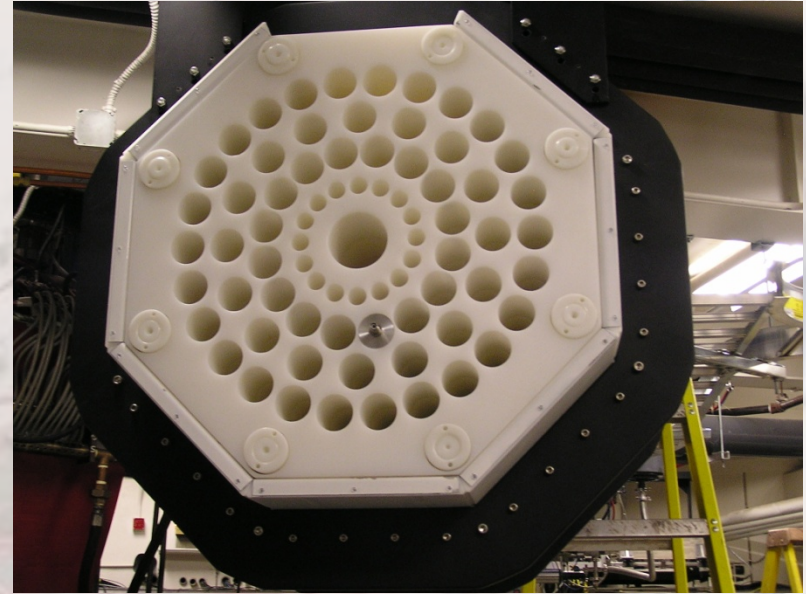
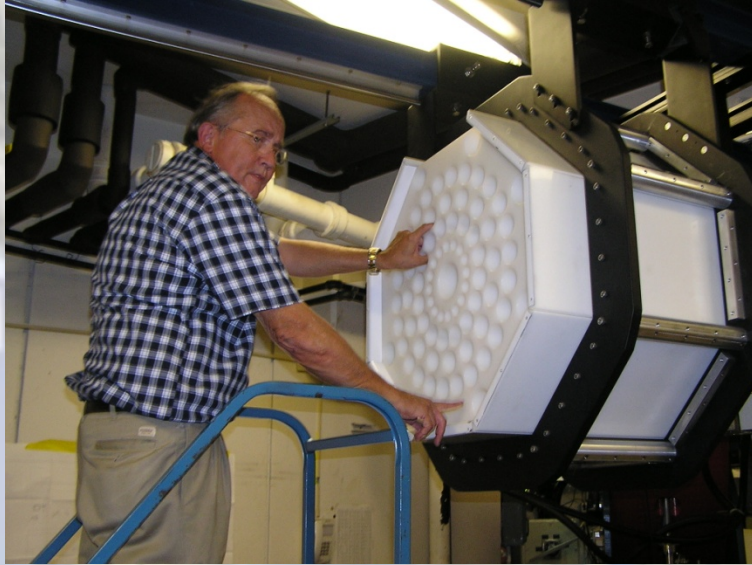


NERO (NSCL-MSU)

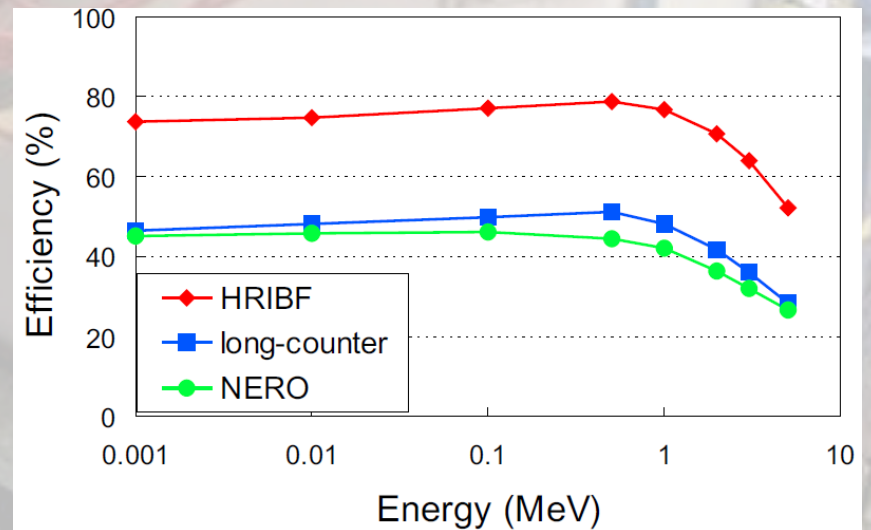
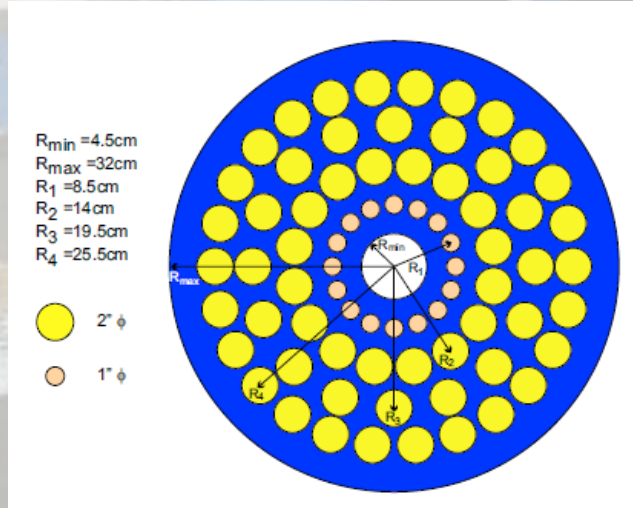




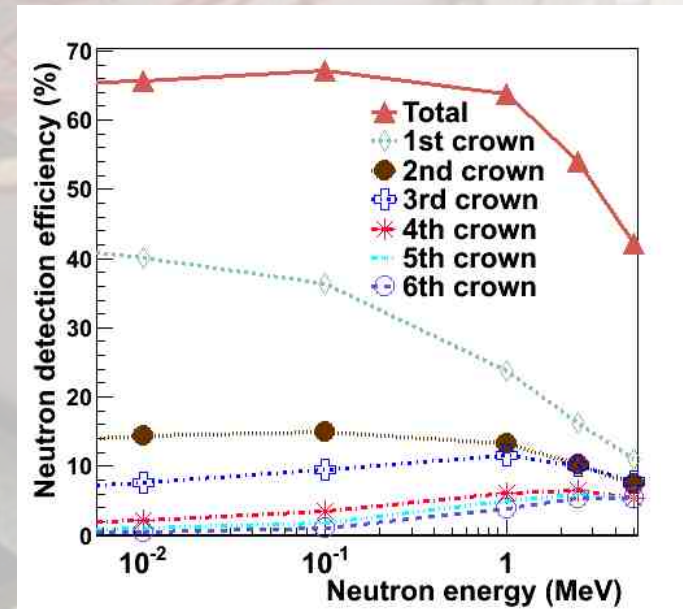
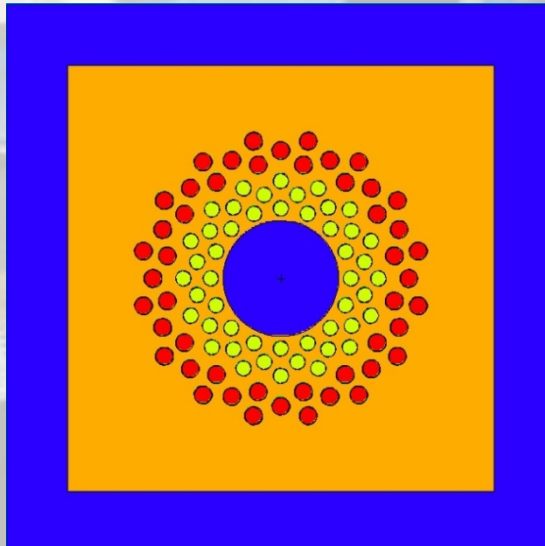
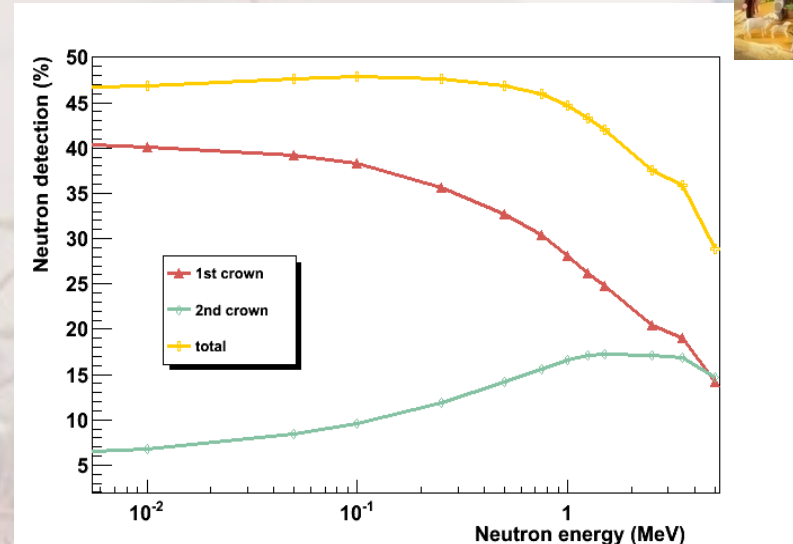
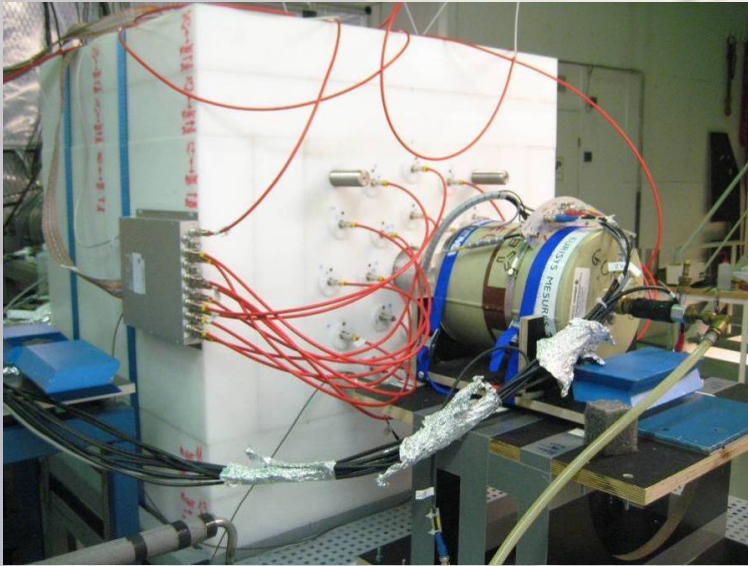
# Contadores $4\pi$ : 3Hen @ ORNL



74 Tubos de  $^3\text{He}$

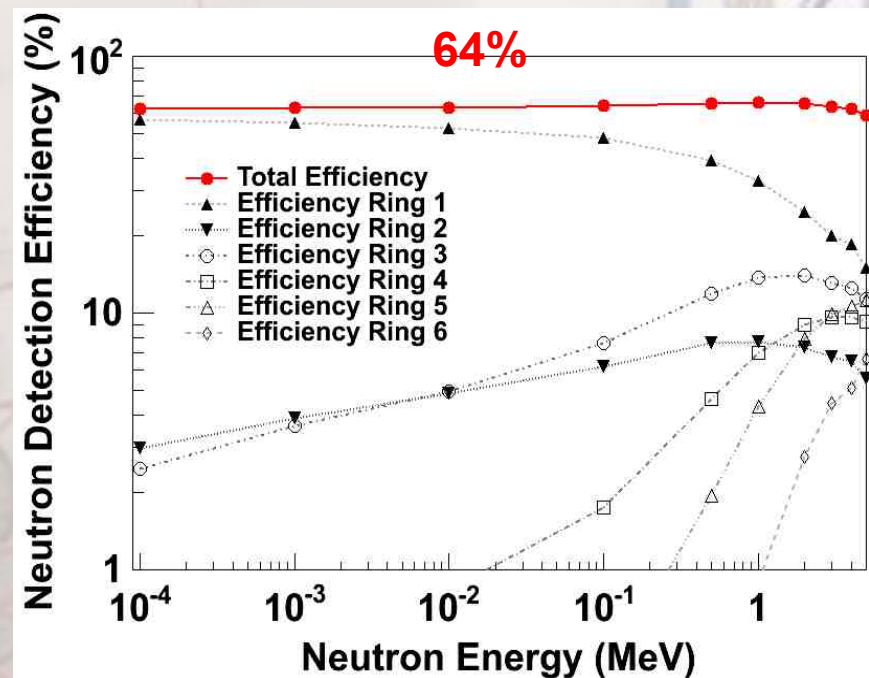
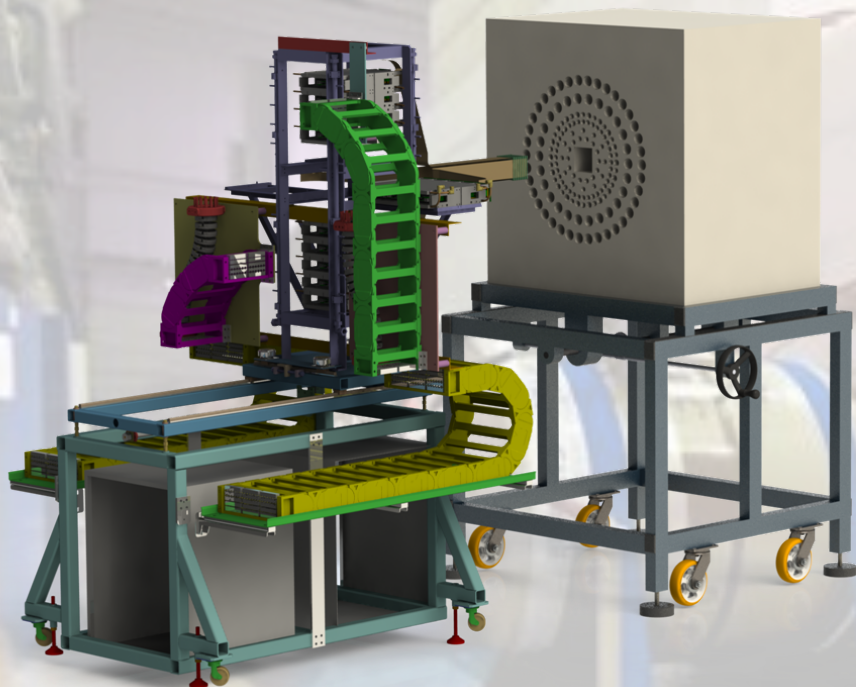


# Contadores $4\pi$ : BELEN @ JYFL, GSI, FAIR





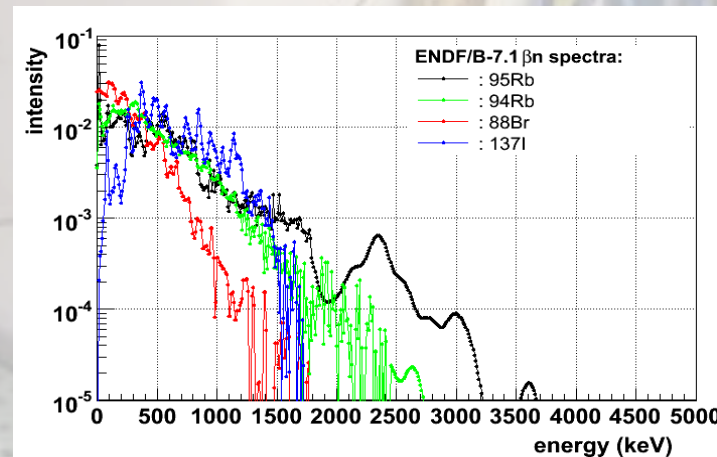
# Contadores $4\pi$ : BRIKEN



174 Tubos de  $^3\text{He}$

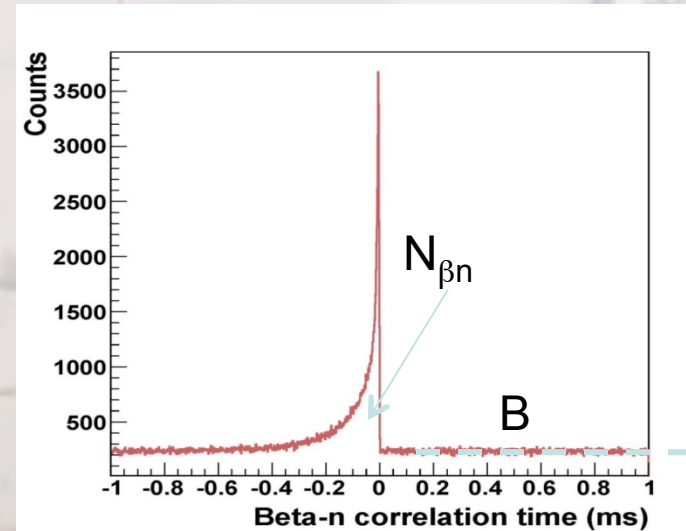
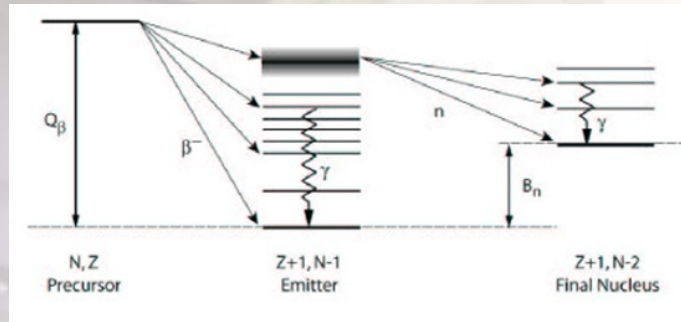
Ring	Radius (cm)	# $^3\text{He}$ Tubes	Pressure (atm)	Diameter (inch)	Institute
1	9.4	14	10	1	ORNL
2	13	12+12	5.13	1	RIKEN
3	16.8	10+26	10/8	1	GSI/UPC
4	20	18+18	5/8	1.18/1	JINR/UPC
5	27	26	10	2	ORNL
6	35	38	10	2	ORNL

Eficiencia constante para cualquier  $E_n$

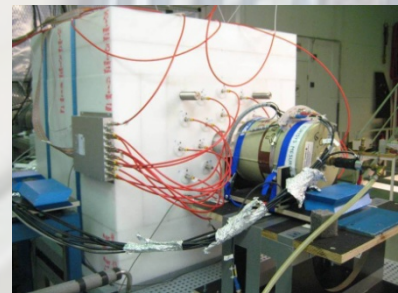
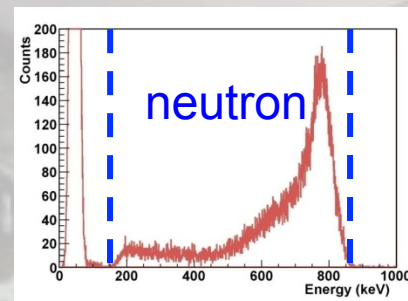
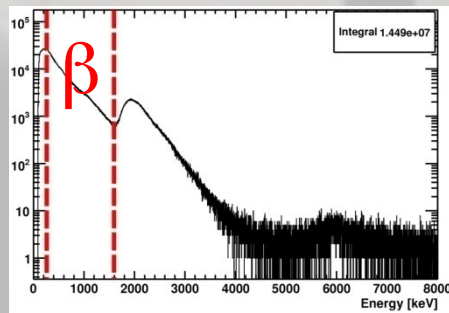
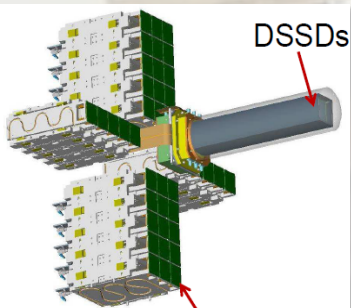
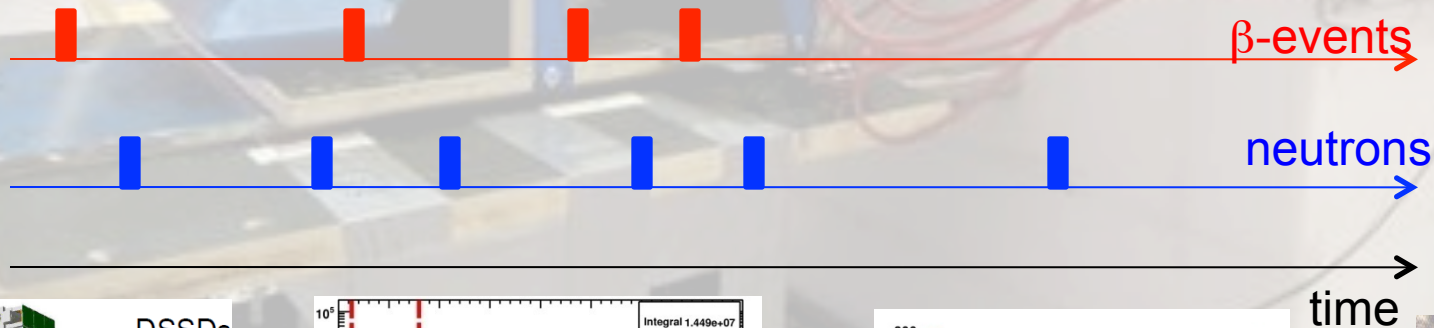




# Determinación del $P_n$



$$P_n = \frac{N_{\beta n} - B}{\epsilon_n \cdot N_\beta}$$

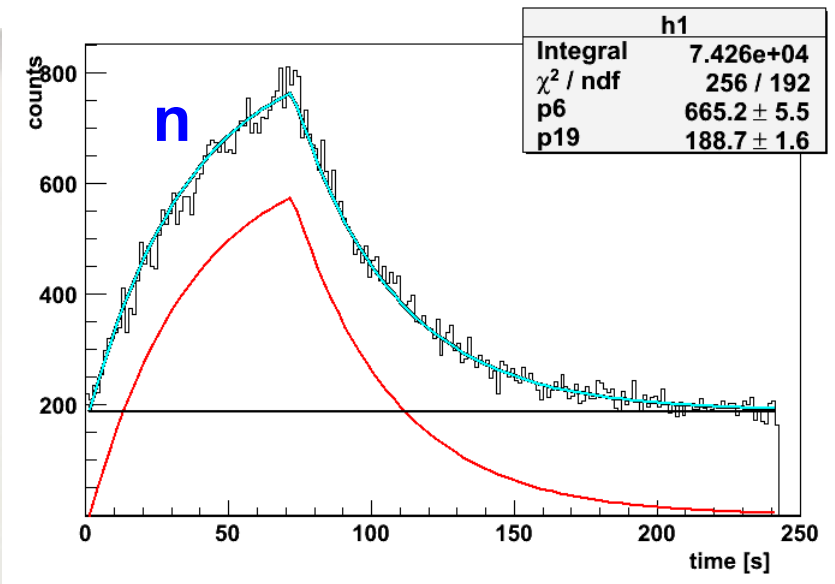
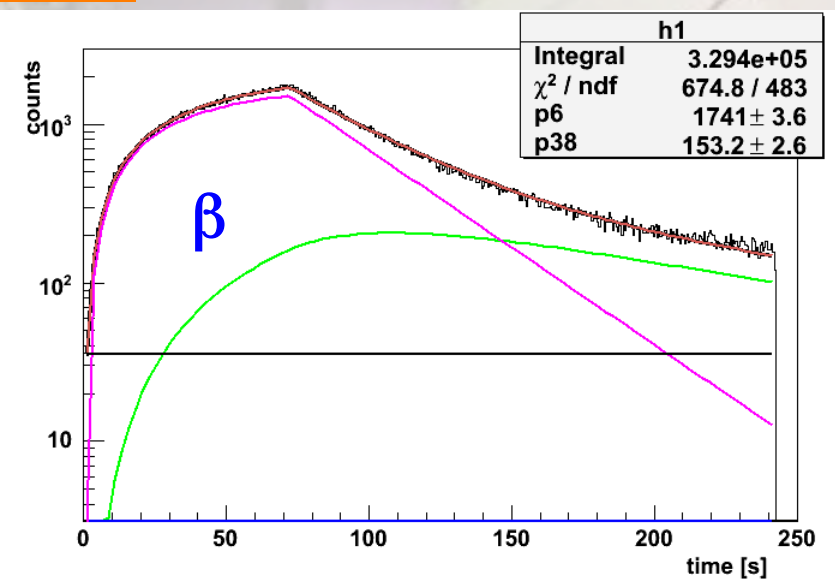


# Contenidos

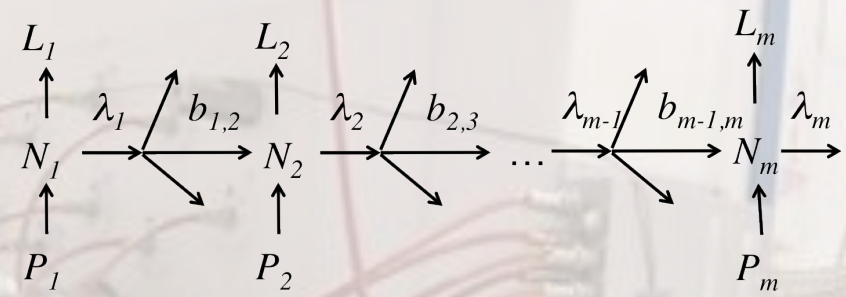
- Concepto de emisión retardada de neutrones
- Motivación e implicaciones de los neutrones retardados (NR)
- Técnicas experimentales de medida
- Ejemplos de experimentos
- Perspectiva y resumen

# B-delayed neutrons in the fission fragments region at JYFL

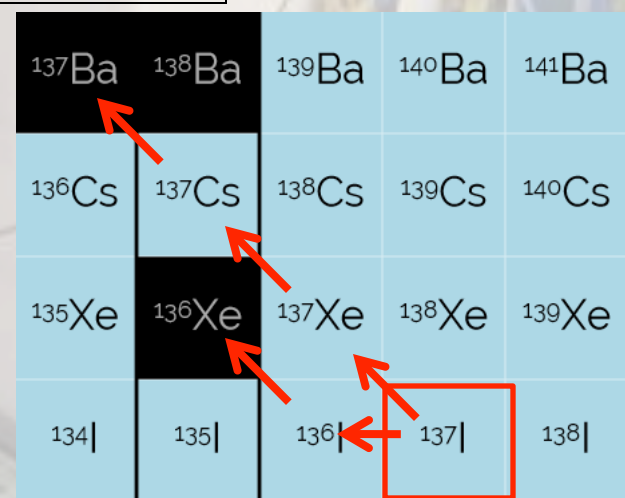
**137I**



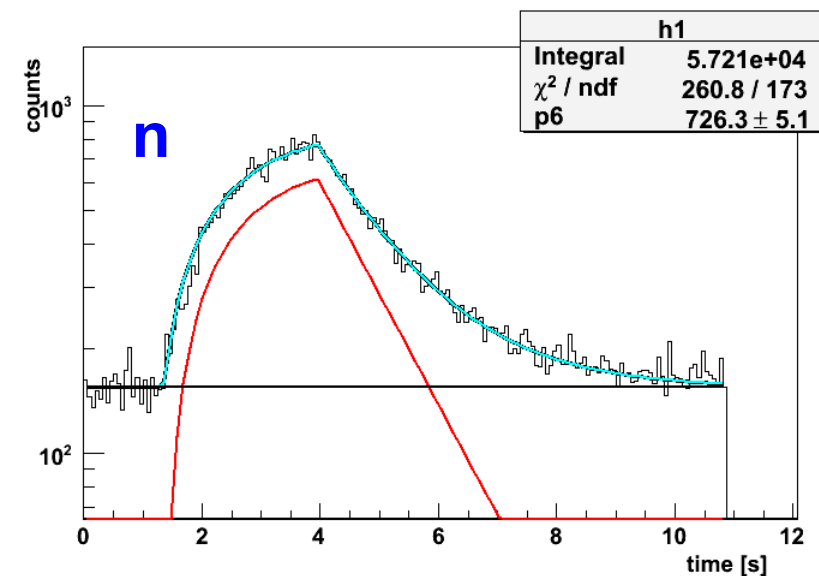
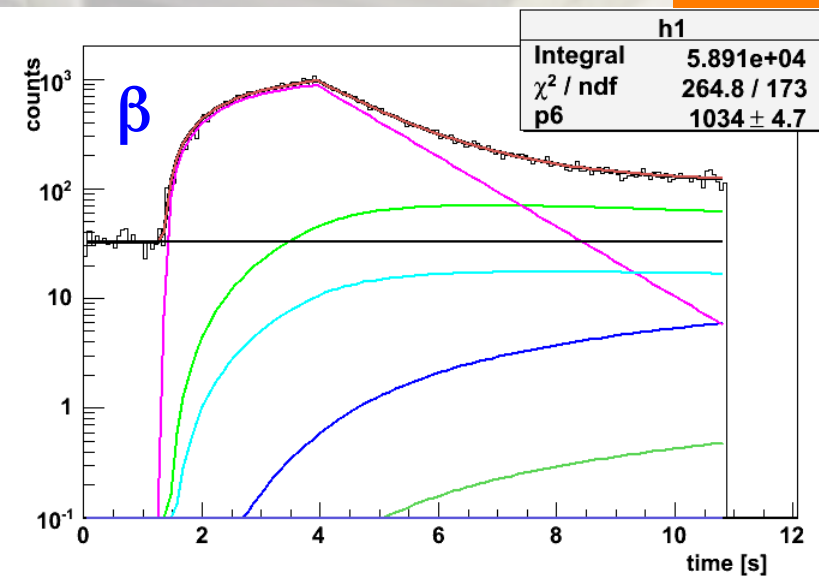
- Disentangle contributions fitting with solution of Bateman equations
- All parameters fixed except production



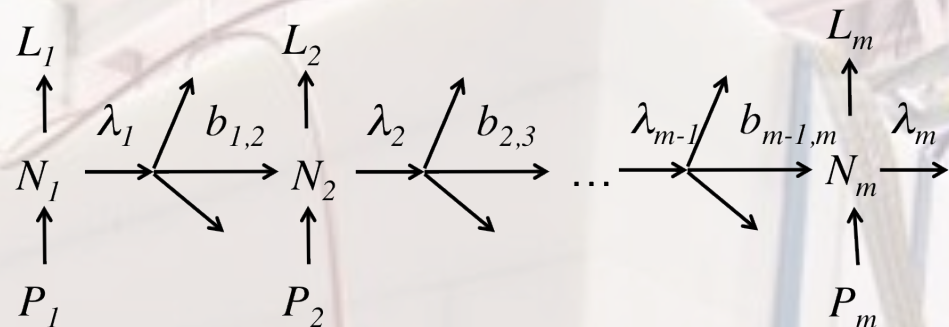
$$P_n = \frac{\epsilon_\beta}{\epsilon_n} \frac{N_n}{N_\beta} = 7.75(12)\%$$





**$^{86}\text{As}$** 

$$P_n = 35.5(6)\%$$



$$\frac{dN_1}{dt} = P_1 - (\lambda_1 + L_1)N_1$$

$$\frac{dN_2}{dt} = P_2 + \lambda_1 b_{1,2} N_1 - (\lambda_2 + L_2)N_2$$

...

$$\frac{dN_m}{dt} = P_m + \lambda_{m-1} b_{m-1,m} N_{m-1} - (\lambda_m + L_m)N_m$$

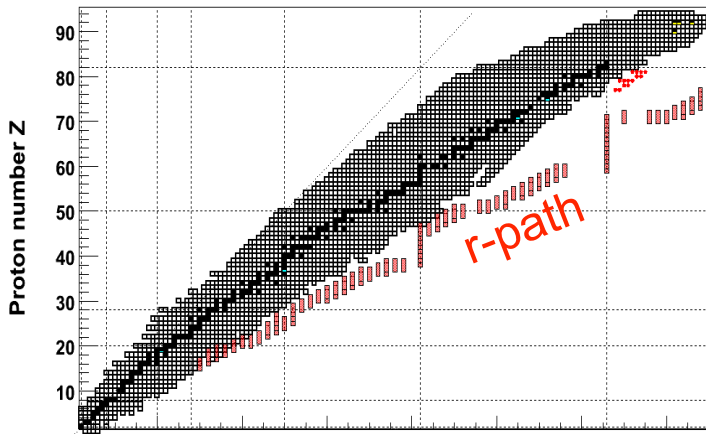
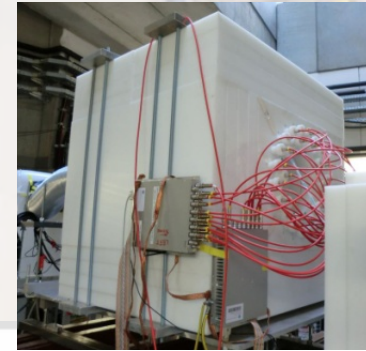
$$A_m^\beta(t) = \varepsilon_\beta \lambda_m N_m(t)$$

$$A_m^n(t) = \varepsilon_n P_n \lambda_m N_m(t)$$

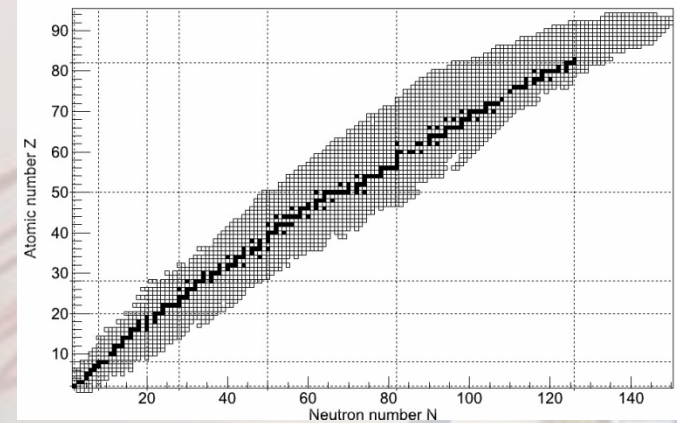
$$N_m(t) = \sum_{i=1}^m \left( \prod_{j=i}^{m-1} \lambda_j b_{j,j+1} \right) \times \sum_{j=i}^m \left( \frac{N_i^0 e^{-\tilde{\lambda}_j t}}{\prod_{k=i, k \neq j}^n (\tilde{\lambda}_k - \tilde{\lambda}_j)} + \frac{P_i (1 - e^{-\tilde{\lambda}_j t})}{\tilde{\lambda}_j \prod_{k=i, k \neq j}^n (\tilde{\lambda}_k - \tilde{\lambda}_j)} \right)$$

# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak

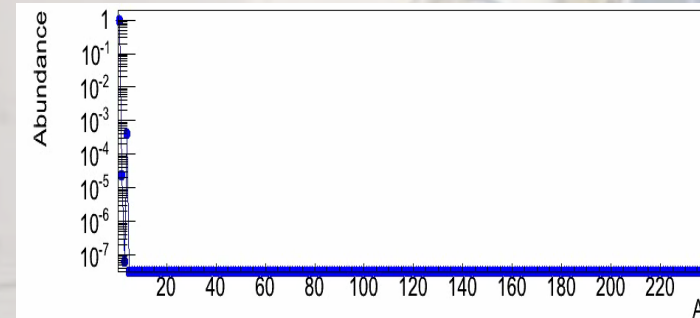
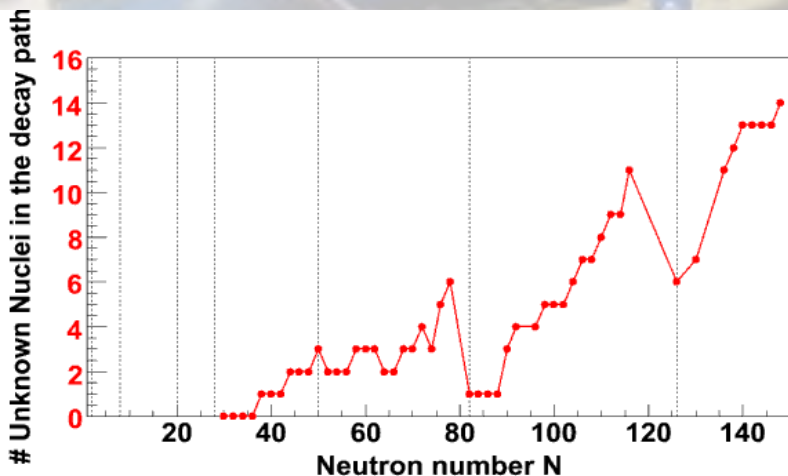
BELEN-30 @ GSI



State of the art SNe simulations do NOT yield the thermo-conditions (entropy) for the reproduction of the third r-process peak → SNe are not the r-process environment?

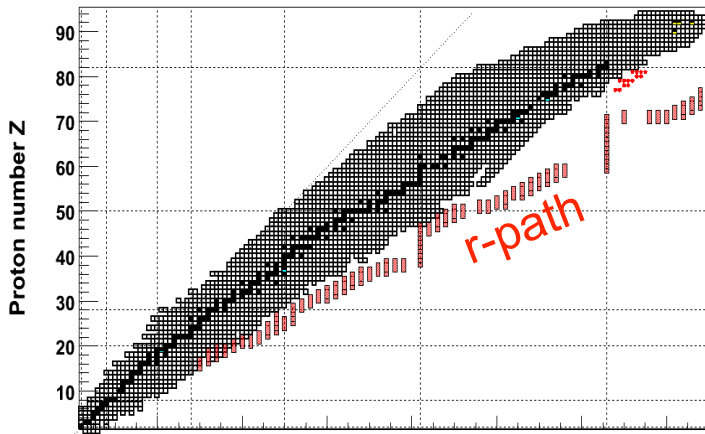
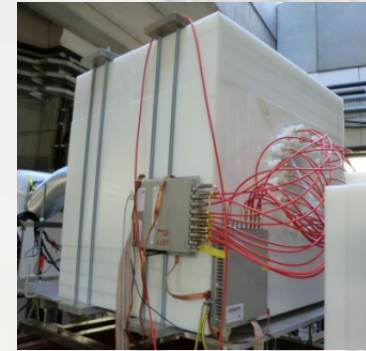


“Ignorance”-Curve

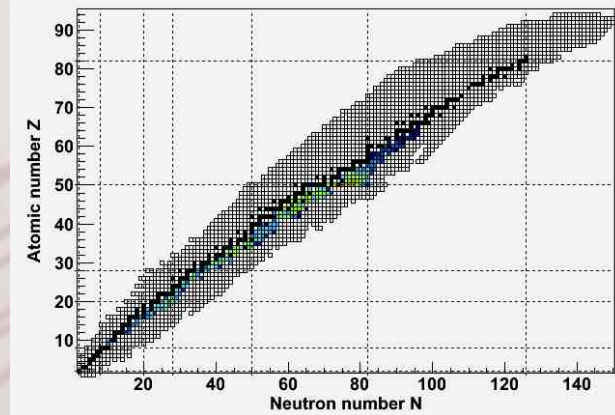


# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak

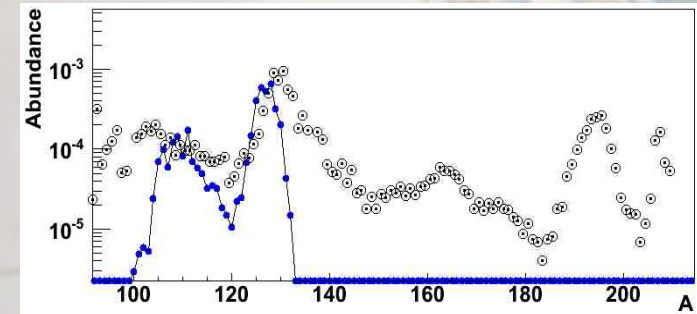
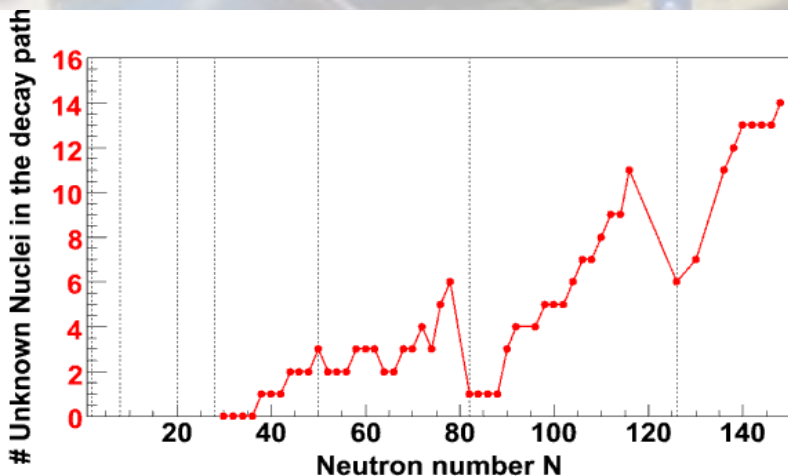
BELEN-30 @ GSI



State of the art SNe simulations do NOT yield the thermo-conditions (entropy) for the reproduction of the third r-process peak → SNe are not the r-process environment?

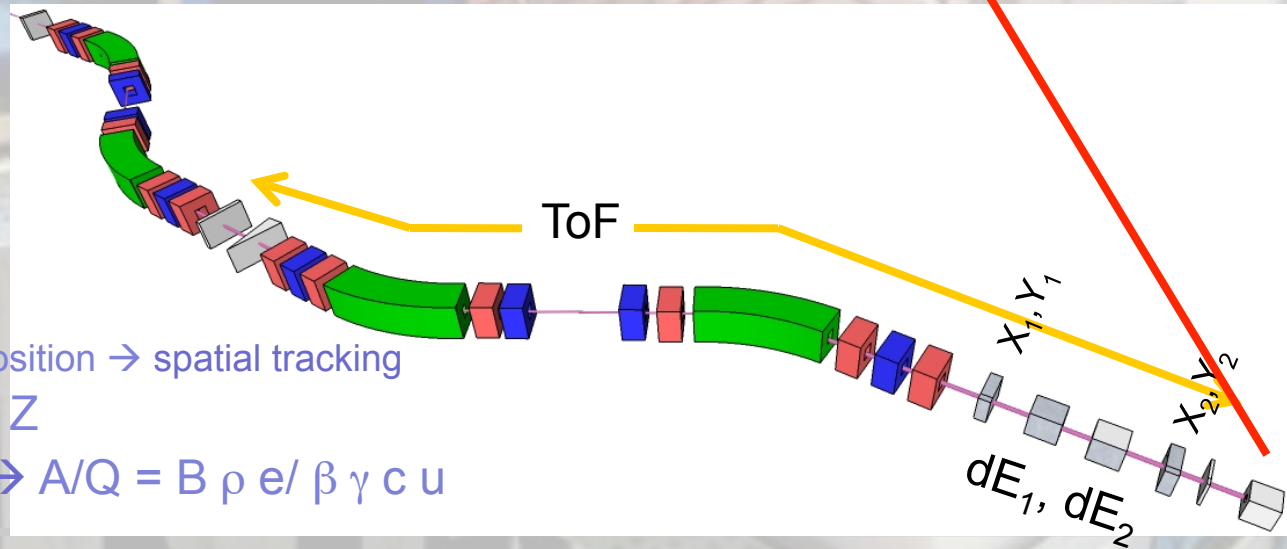
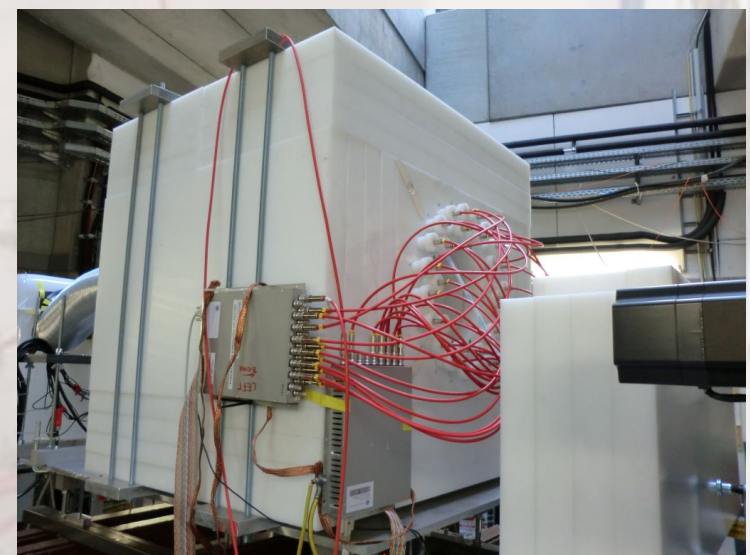
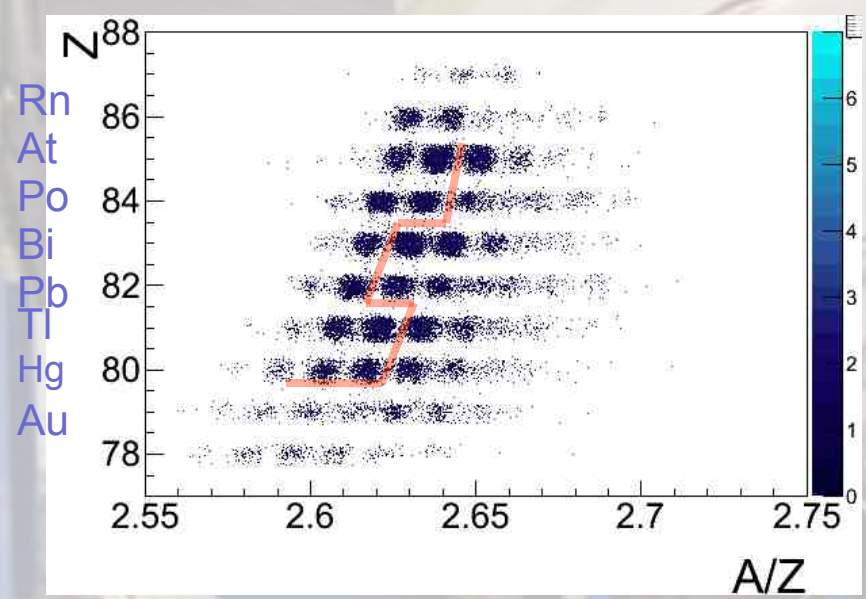


“Ignorance”-Curve



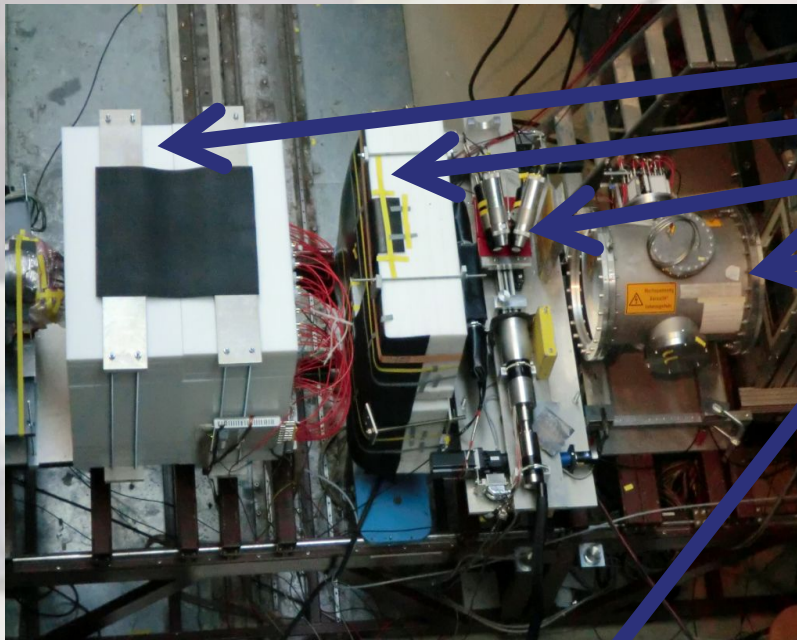


# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak



TPC21,22, 41, 42 x, y → position → spatial tracking  
 MUSIC41, 42 → dE } → Z  
 Sci21, Sci41 → ToF }  
 Dipole Magnet → B<sub>p</sub> } →  $A/Q = B \rho e / \beta \gamma c u$

# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak



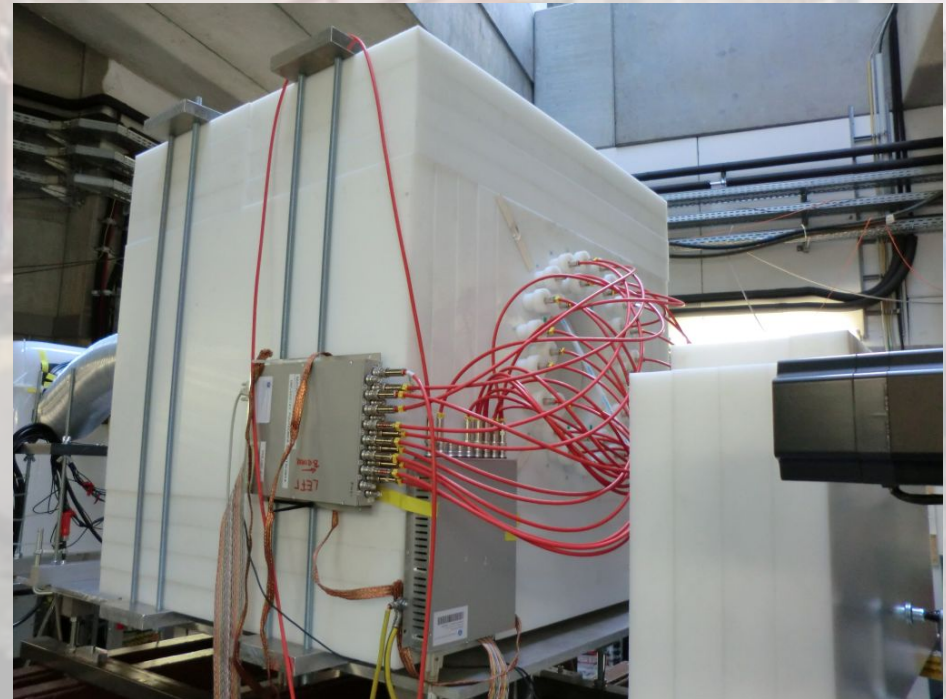
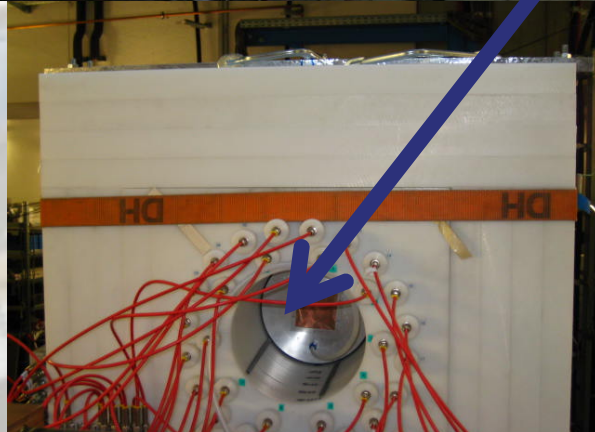
BELEN-30

Polyethylene shielding

Isomer tagger

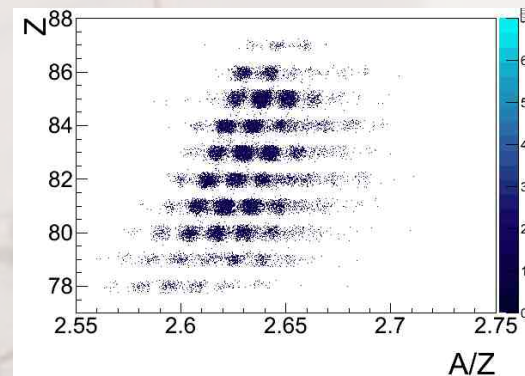
MUSIC

SIMBA implantation det

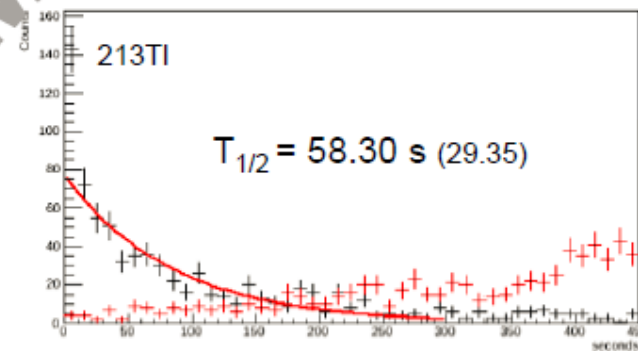
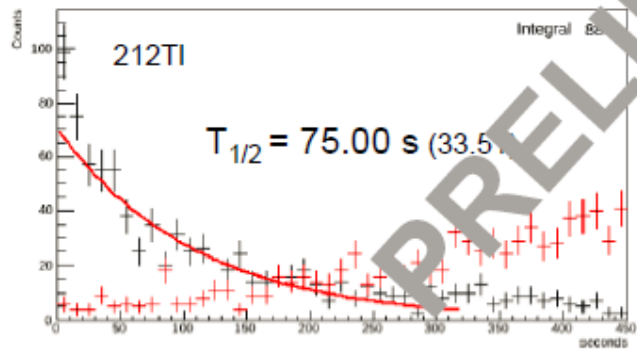
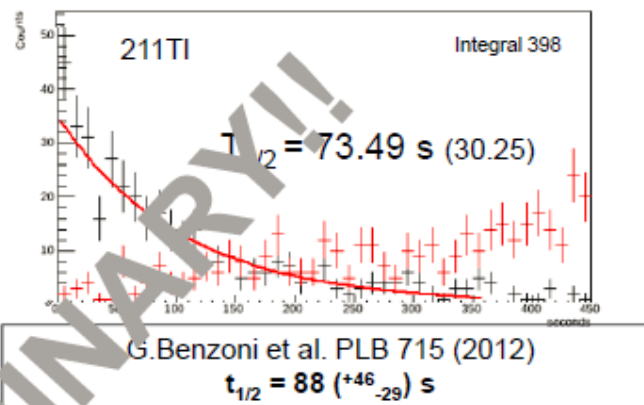
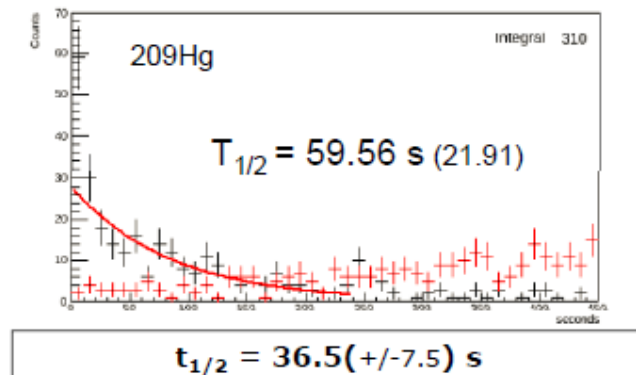




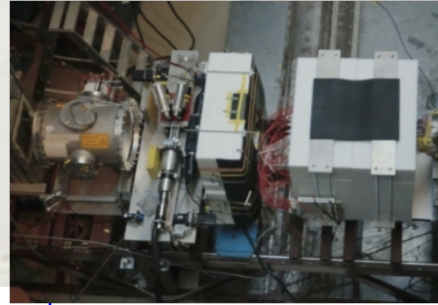
# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak



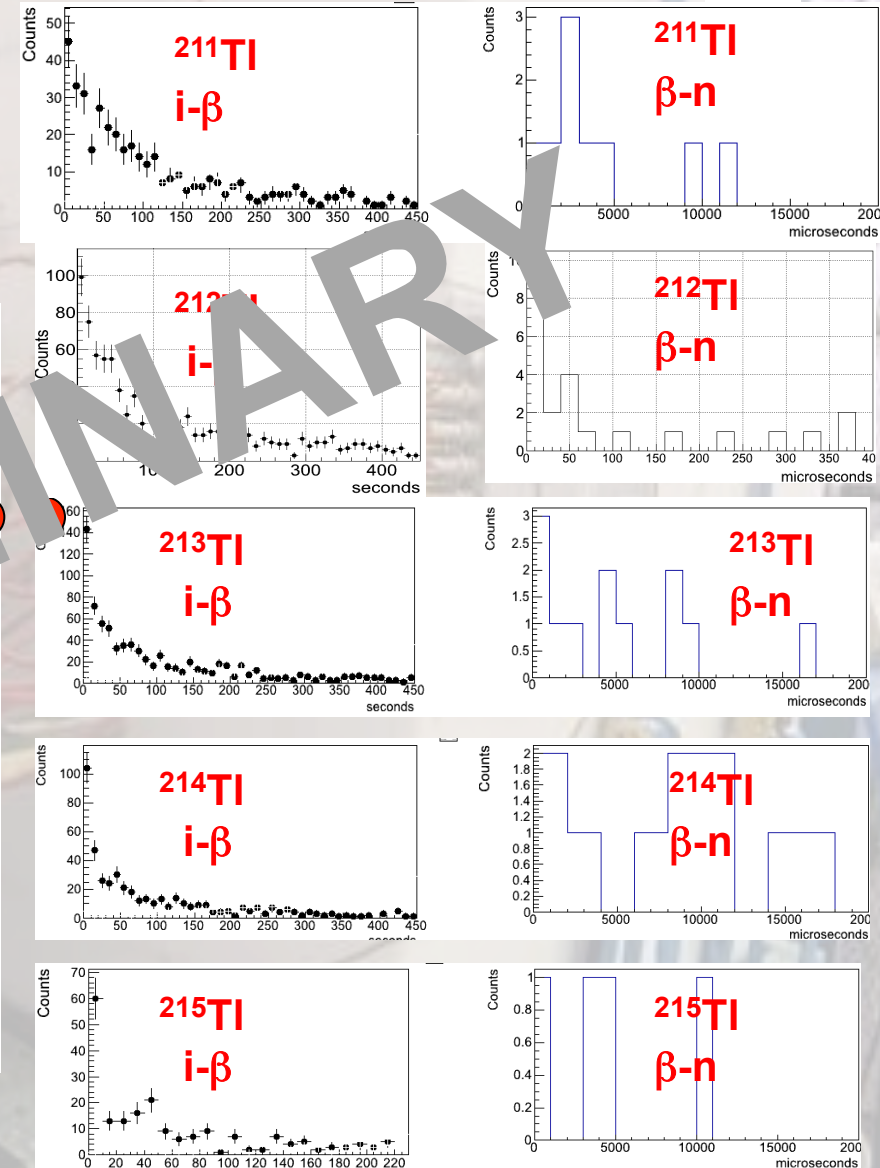
Implant-Beta Correlations  $\rightarrow t_{1/2}$



**BELEN**  
**Beta dELayed Neutron**  
**emission detector**



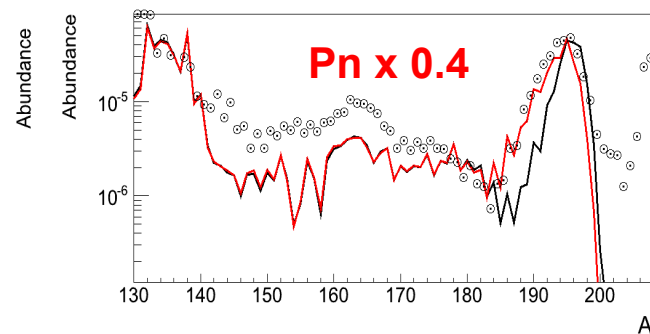
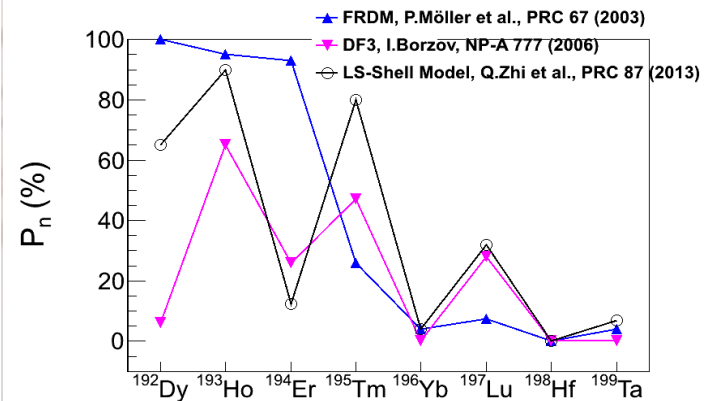
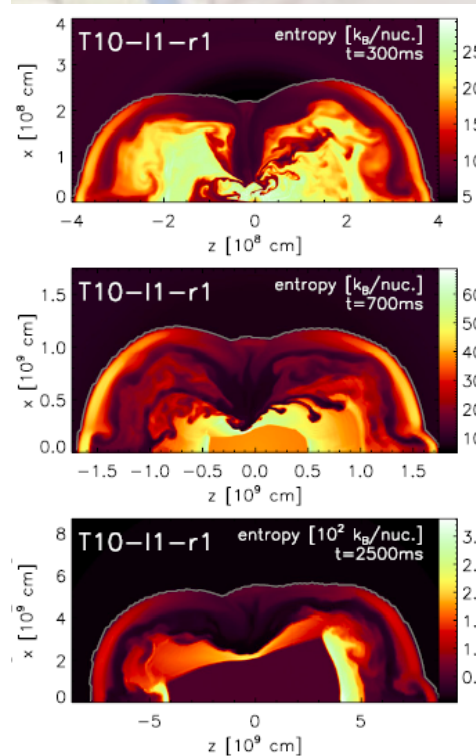
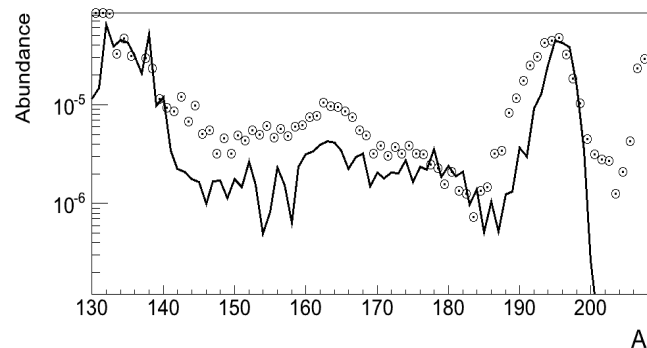
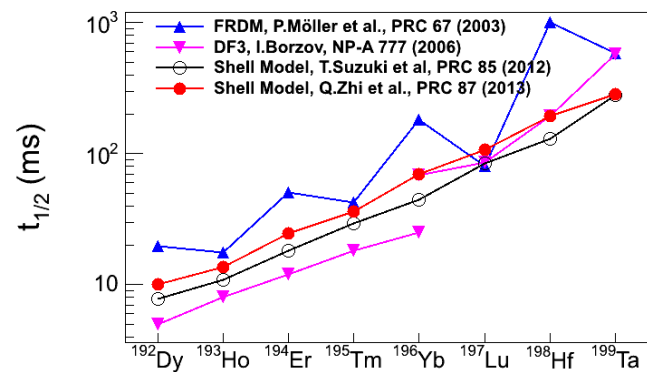
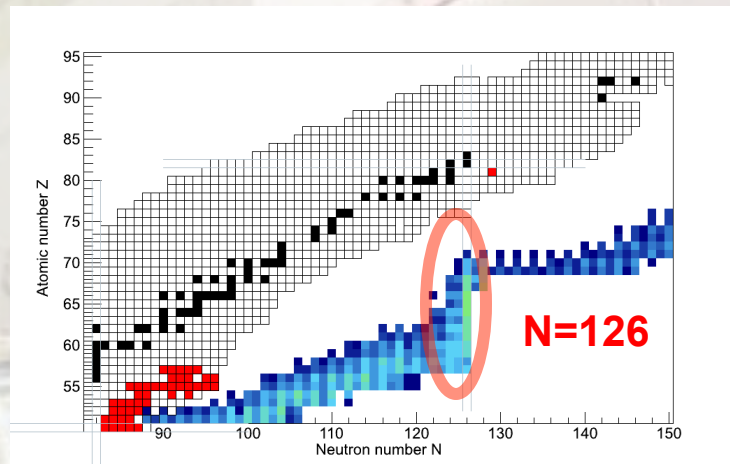
Mass Number ( $A$ )	$P_n$ (%)
211	~5.8
212	~6.8
213	~4.2
214	~5.2
215	~5.1





# Nucleosynthesis around the 3<sup>rd</sup> r-process peak

**N=126**



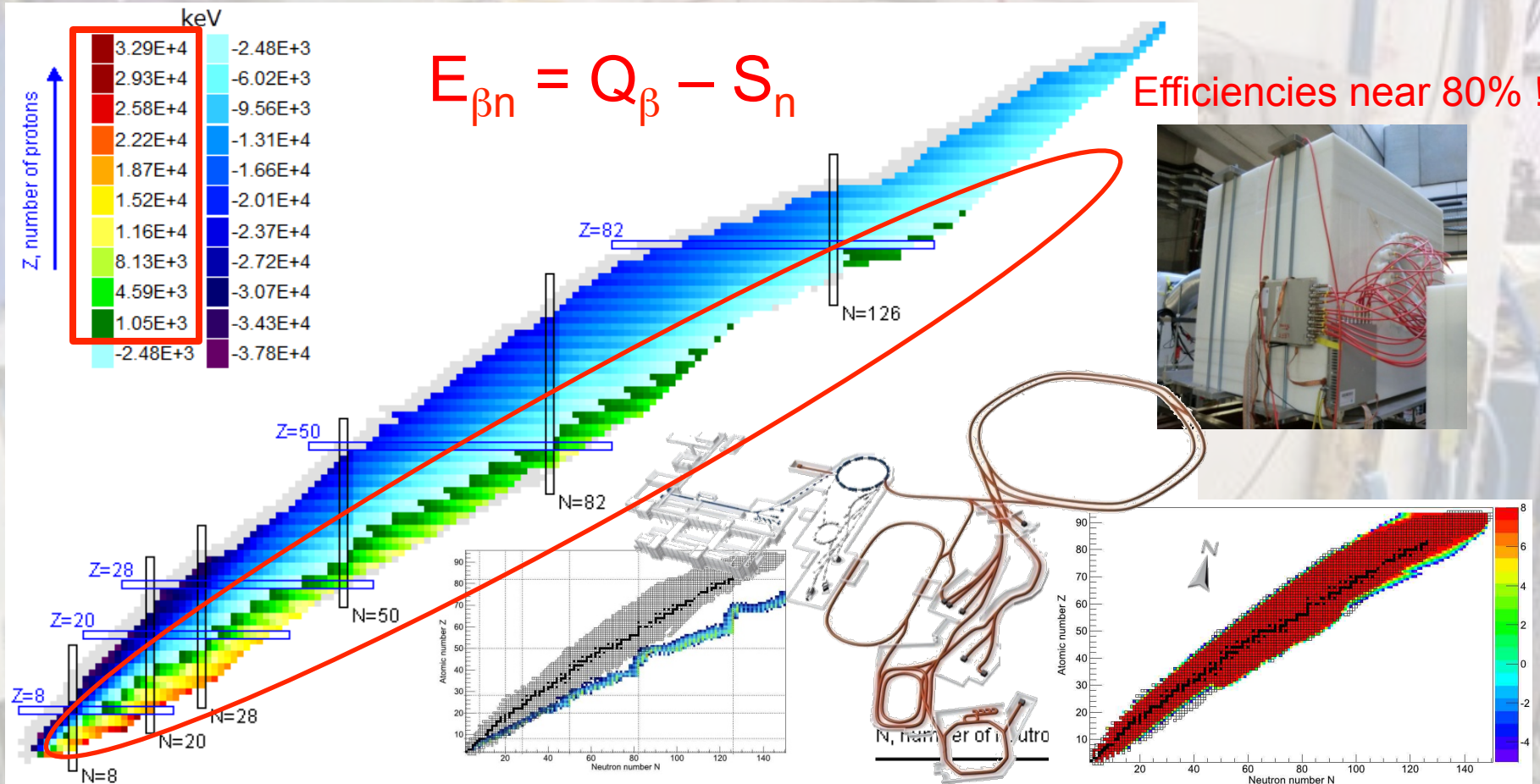
# Resumen

- El proceso de emisión de neutrones retardados, es un efecto que puede tener lugar siempre que esté energéticamente permitido, es decir, cuando  $Q_{\beta} - S_n > 0$ .
- En los casos en los que es energéticamente factible, la probabilidad emisión retardada de neutrones depende de la distribución energética del  $\beta$ -decay, y por lo tanto representa una herramienta muy útil para obtener información sobre la estructura y la desintegración nuclear, en los casos más exóticos donde las tasas de producción son generalmente débiles.
- La emisión retardada de neutrones juega un papel fundamental tanto en aplicaciones técnicas (funcionamiento de los reactores nucleares), como en estudios astrofísicos de nucleosíntesis estelar en entornos estelares explosivos (SN, Mergers, etc), donde se producen de modo natural estos emisores exóticos ricos en neutrones.
- Experimentalmente se pueden producir núcleos emisores de neutrones utilizando reacciones nucleares de fragmentación o de fisión.
- Para poder determinar la probabilidad de emisión retardada de neutrones, es necesario detectar tanto los electrones (las partículas  $\beta^-$  de la desintegración) como los neutrones.
- El método más común para la medida de NR consiste en el uso de contadores gaseosos ( $^3\text{He}$  y/o  $^{10}\text{B}$ ) integrados en una “matriz” de polietileno, que actúa como moderador para los NR, reduciendo su energía y aumentando así la probabilidad de detección. Una matriz con un gran número de contadores, permite alcanzar eficiencias de detección muy altas (entorno al 70-80%), lo cual es una ventaja fundamental para la medida de los núcleos más exóticos.

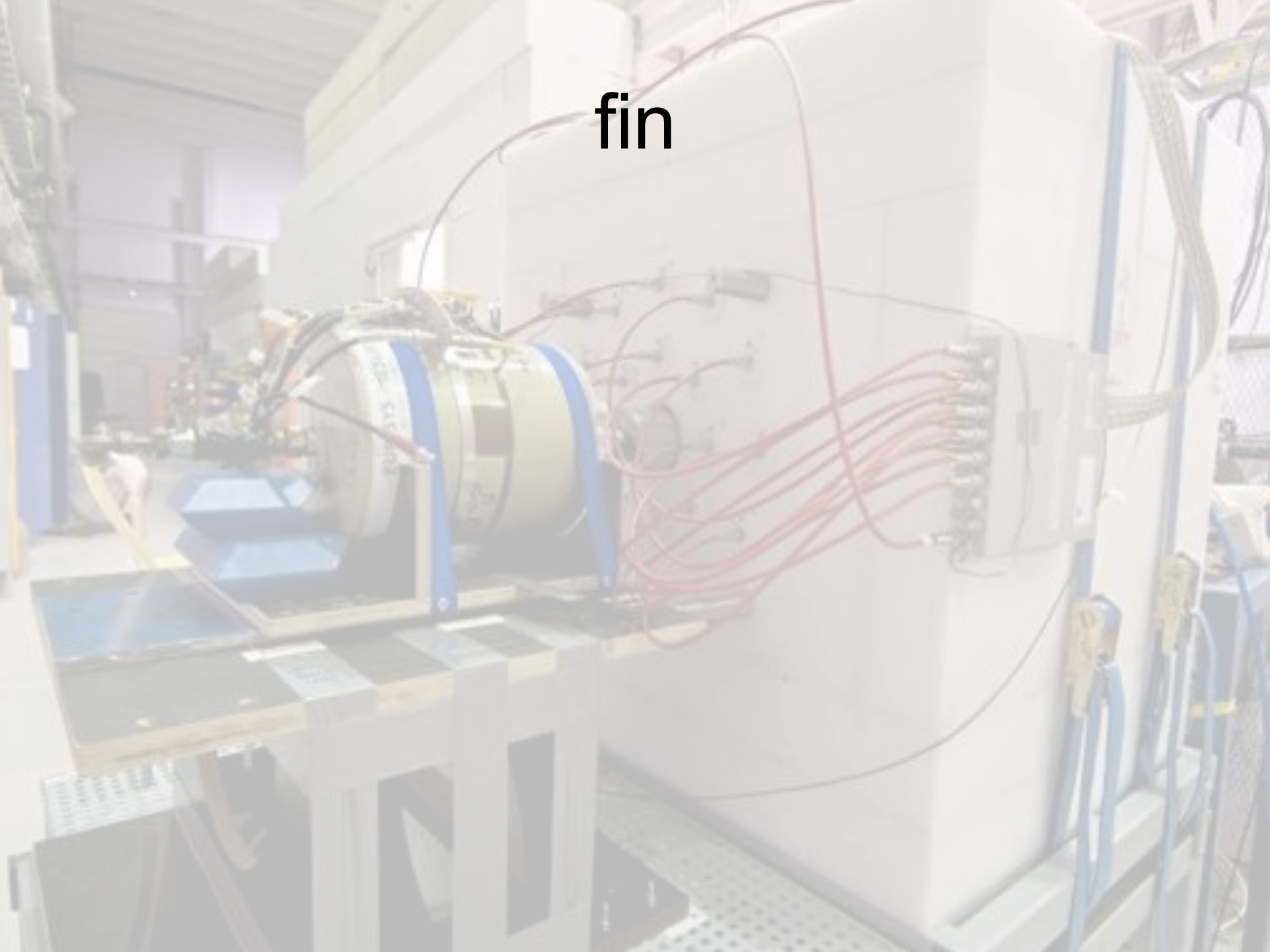


# Perspectiva:

- **La mayoría de los núcleos que quedan por descubrir son emisores de neutrones!**
- Hemos desarrollado detectores con eficiencias próximas al 70-80% (por desgracia no podremos pasar del 100% de eficiencia;-)).
- El siguiente paso es desarrollar nuevas instalaciones de RIB que permitan alejarnos más del valle de estabilidad beta: FAIR, SPIRAL2, FRIB, RIKEN, etc.

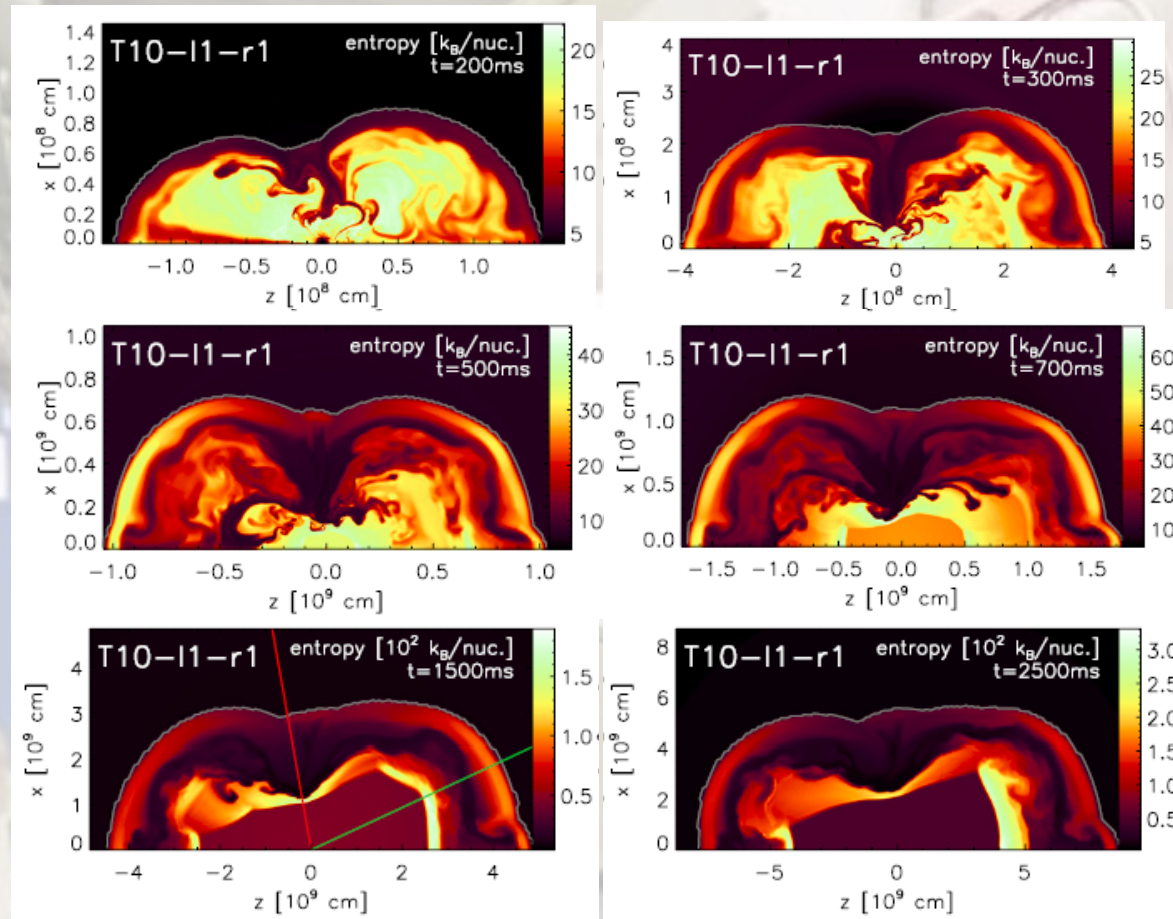
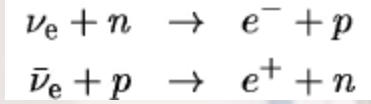


fin





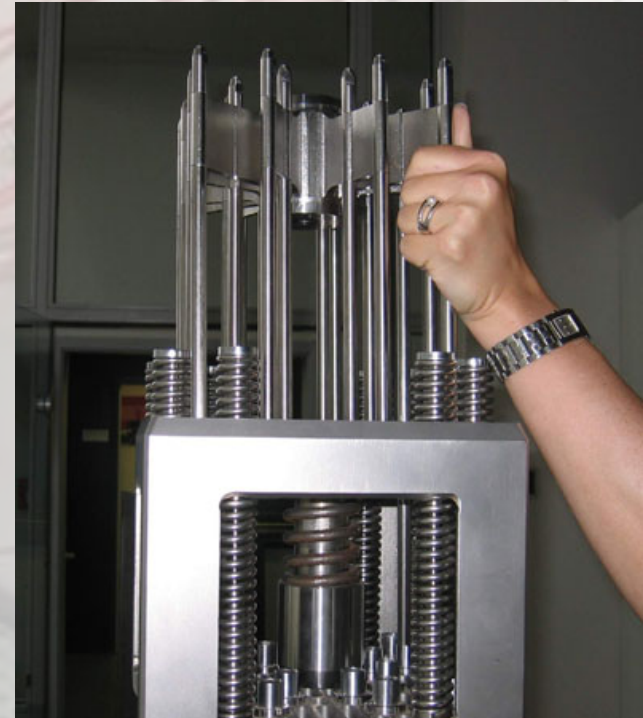
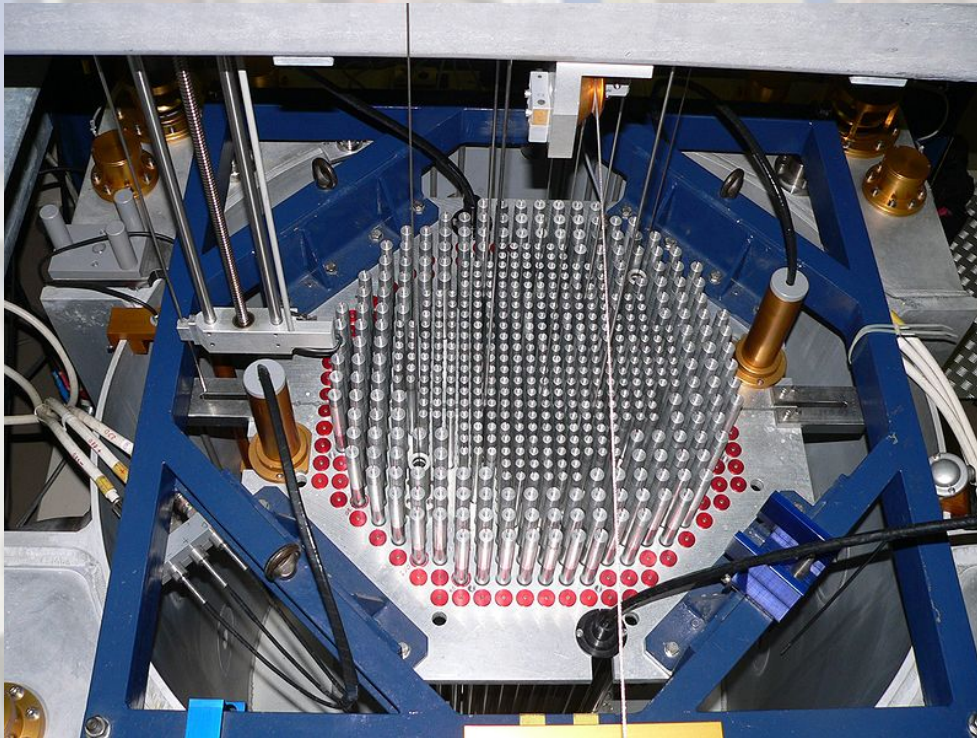
## SN con $\nu$ -driven Wind



# Producción de energía por fisión nuclear

La producción de energía en un reactor se ajusta controlando el número de neutrones disponibles para producir fisión.

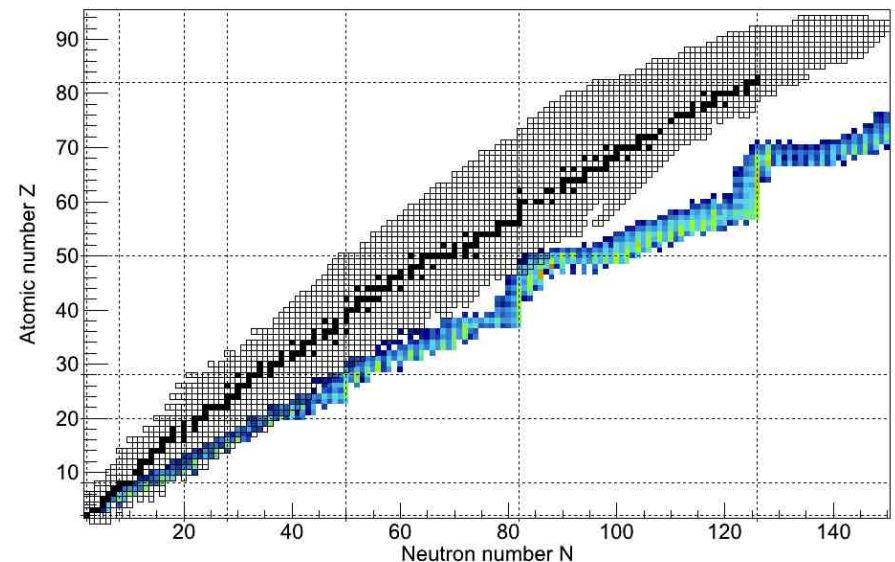
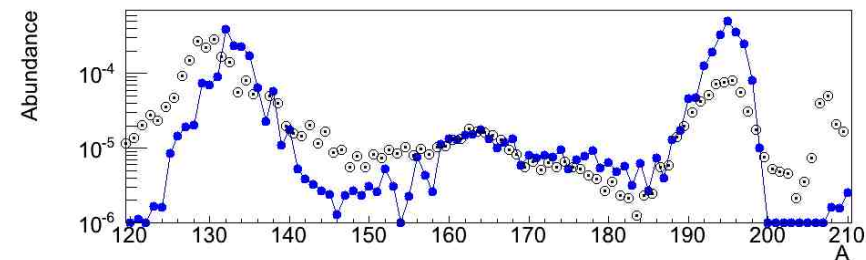
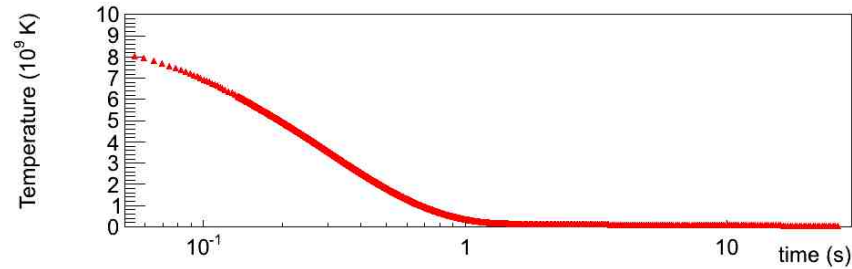
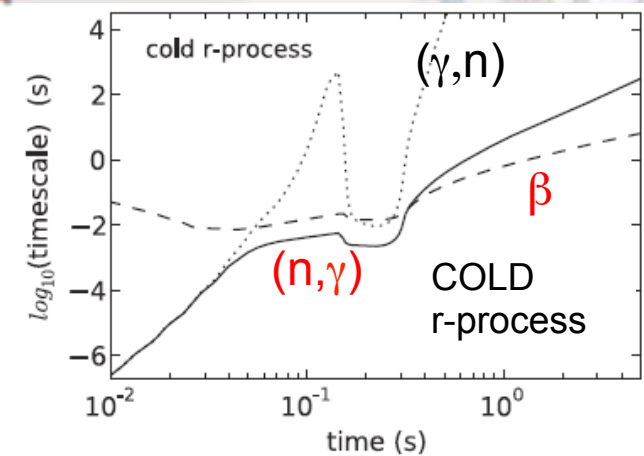
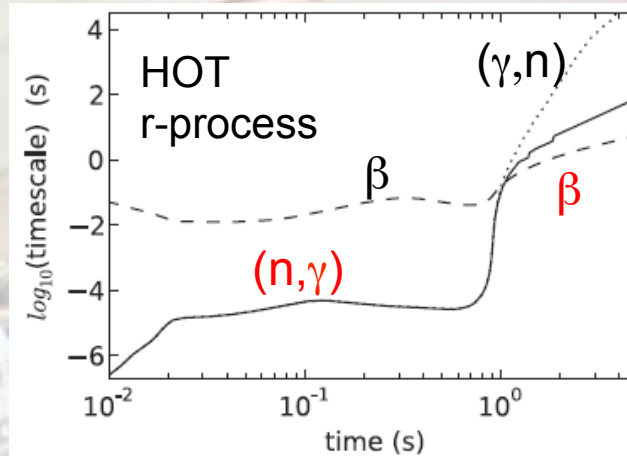
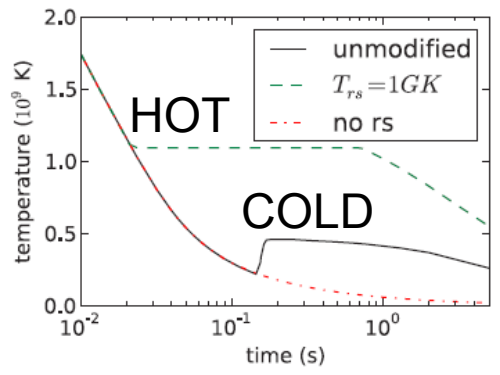
Para ello se utilizan “barras de control”, que están hechas de un material que absorbe neutrones (alta CS de captura). Cuanto más se introduce la barra de control en el reactor, más se suprimen los neutrones y por lo tanto la fisión y la producción de energía.





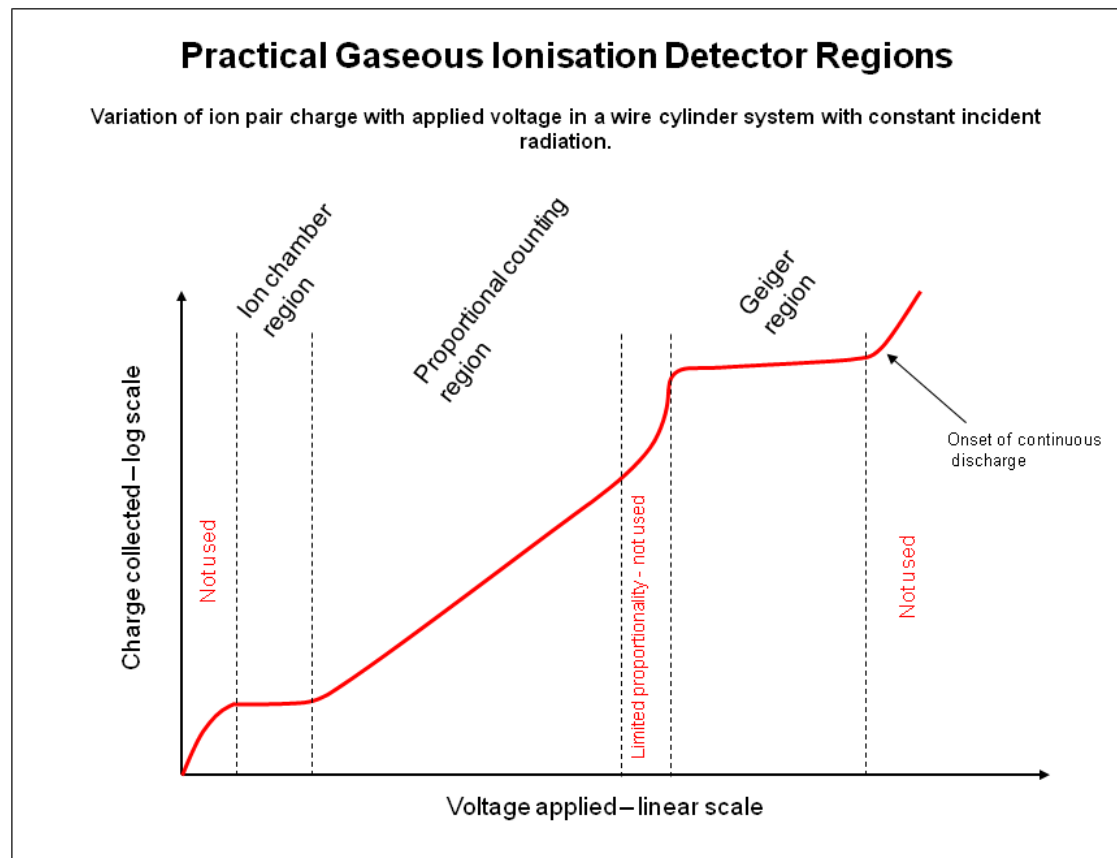
# Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos

Phys. Rev. C, 83, A.Arcones 2011



Network code from B.S. Meyer (Clemson University)

# Gas detector modes: ion-chamber, proportional counter, Geiger

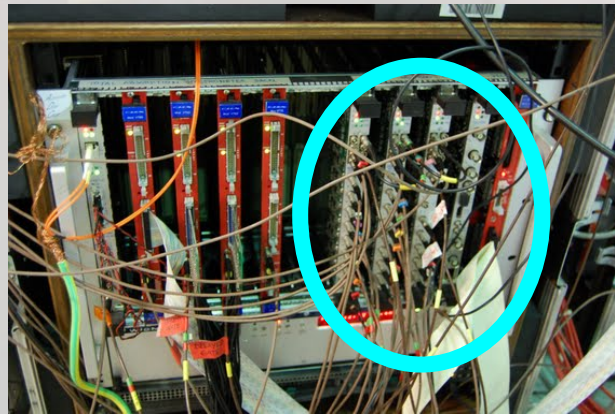
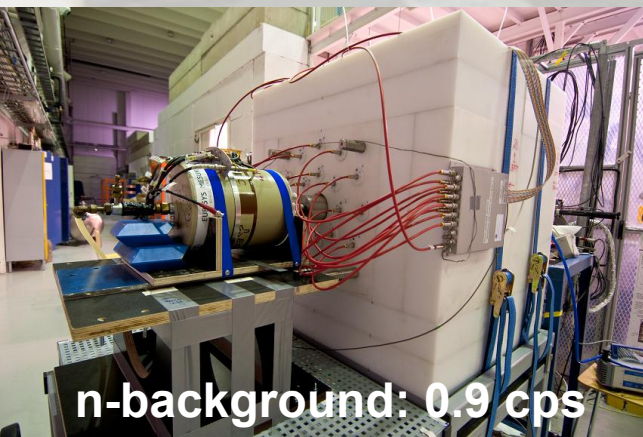
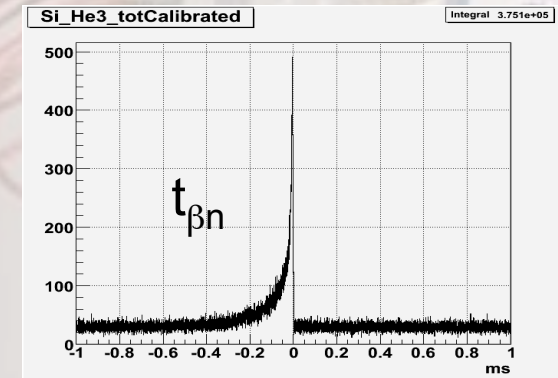
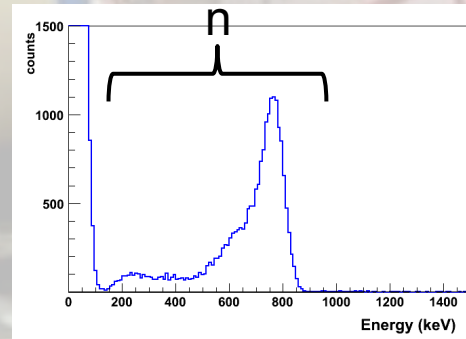
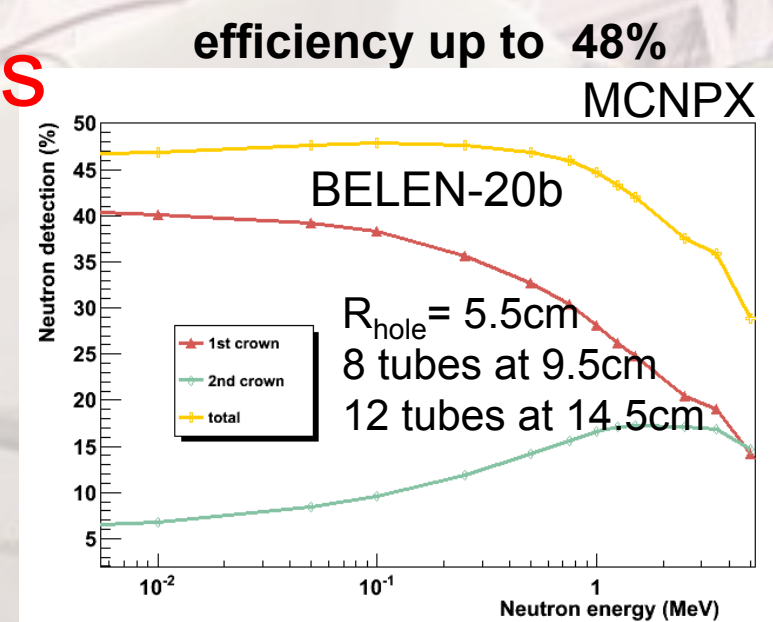
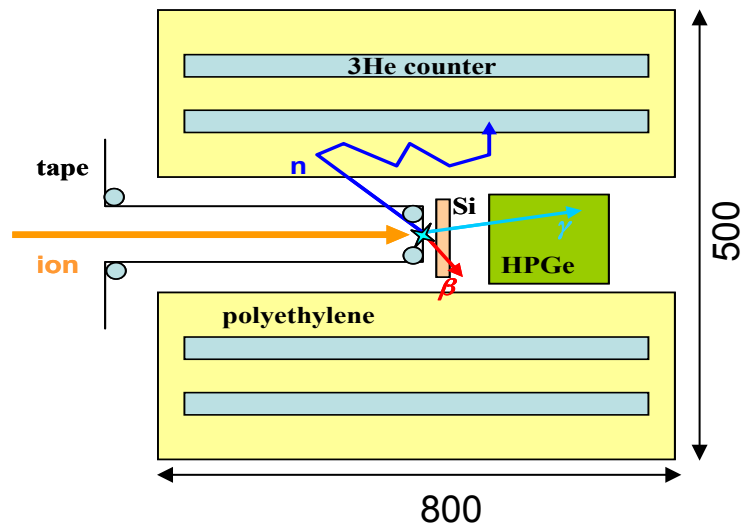




# Ejemplos de experimentos

## BELEN

20  $\varnothing 2.5\text{cm} \times 60\text{cm}$   $^3\text{He}$  tubes @20atm



**GasificTL:**  
**Self triggered DACQ:**

- Time-energy pairs for every neutron or  $\beta$
- Clean noise separation
- Minimum dead time: <0.5%

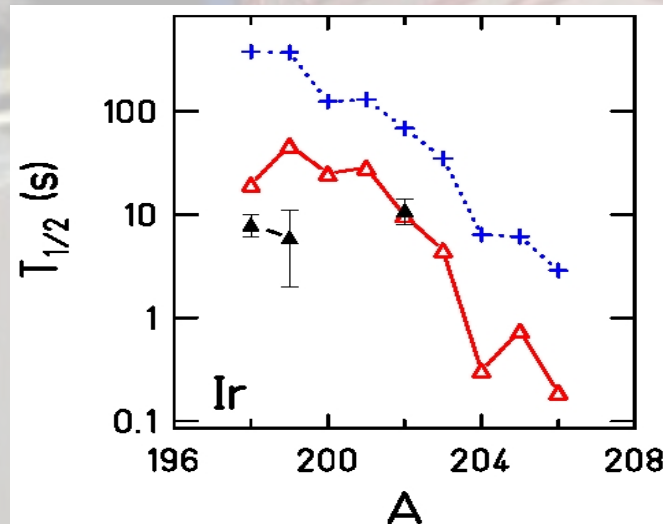
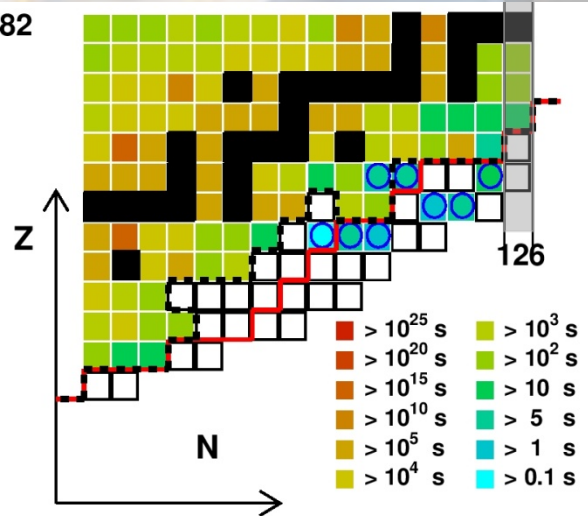
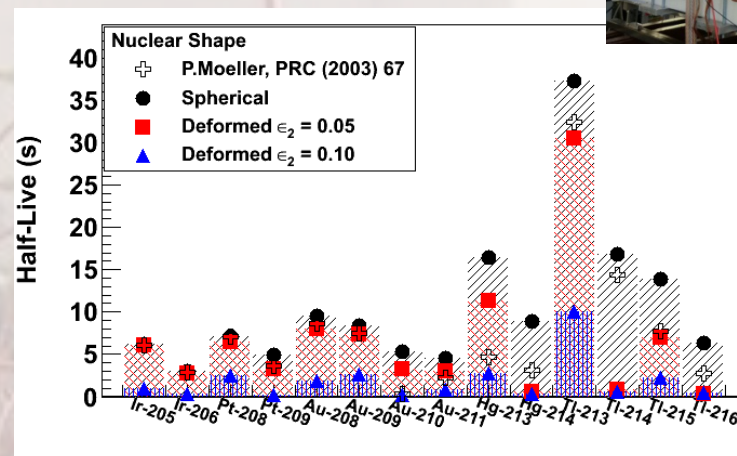
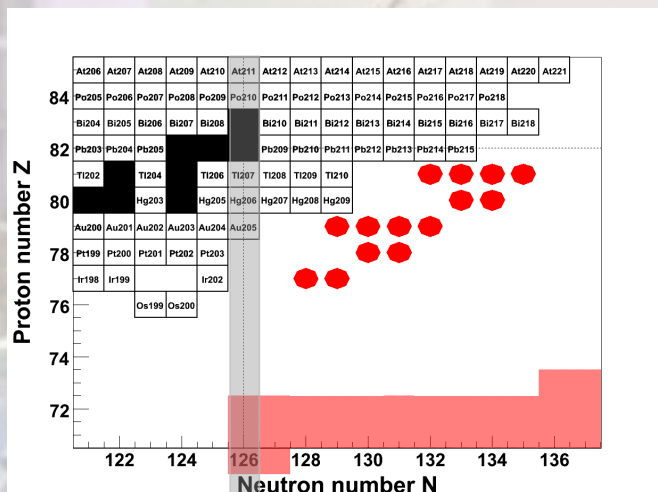
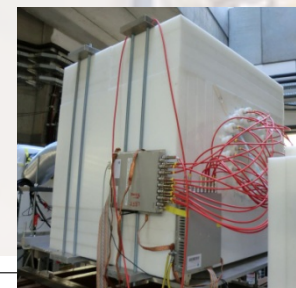
n-background: 0.9 cps

# Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r

- Difficult to calculate/predict half-life of the nuclei in this region:



- △ DF3 + QRPA (I. Borzov, et al. 2003)
- + FRDM + QRPA (P. Moeller, et al. 2003)
- ▲ Exp. T. Kurtukian et al.

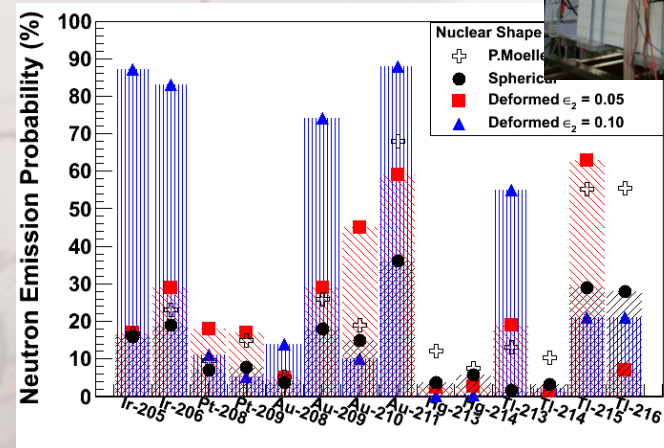
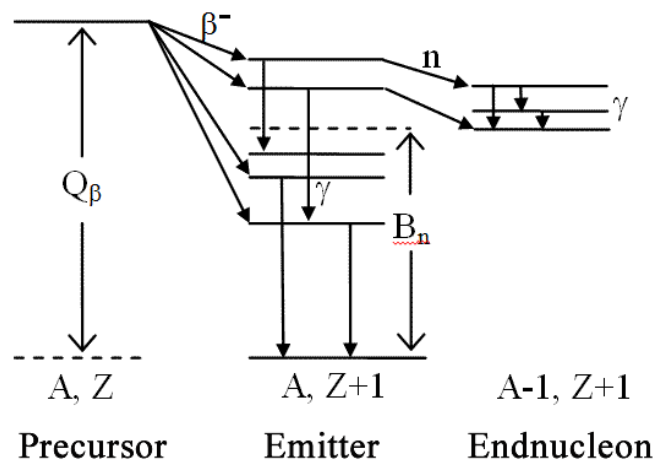
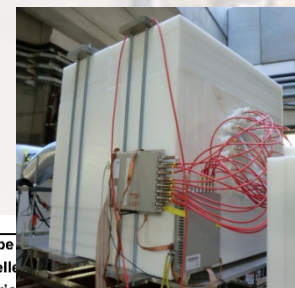


# Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r

- Difficult to calculate/predict Pn-values of the nuclei in this region:



197Bi	198Bi	199Bi	200Bi	201Bi	202Bi	203Bi	204Bi	205Bi	206Bi	207Bi	208Bi	209Bi	210Bi	211Bi	212Bi
196Pb	197Pb	198Pb	199Pb	200Pb	201Pb	202Pb	203Pb	204Pb	205Pb	206Pb	207Pb	208Pb	209Pb	210Pb	211Pb
195Tl	196Tl	197Tl	198Tl	199Tl	200Tl	201Tl	202Tl	203Tl	204Tl	205Tl	206Tl	207Tl	208Tl	209Tl	210Tl
194Hg	195Hg	196Hg	197Hg	198Hg	199Hg	200Hg	201Hg	202Hg	203Hg	204Hg	205Hg	206Hg	207Hg	208Hg	209Hg
193Au	194Au	195Au	196Au	197Au	198Au	199Au	200Au	201Au	202Au	203Au	204Au	205Au			
192Pt	193Pt	194Pt	195Pt	196Pt	197Pt	198Pt	199Pt	200Pt	201Pt	202Pt					
191Ir	192Ir	193Ir	194Ir	195Ir	196Ir	197Ir	198Ir	199Ir							
190Os	191Os	192Os	193Os	194Os	195Os	196Os	197Os								
189Re	190Re	191Re	192Re	193Re	194Re										
188W	189W	190W	191W	192W											
187Ta	188Ta	189Ta	190Ta												

$\beta$ -delayed neutron emission has a twofold effect on the r-process:

- Increases the neutron density
- Shifts the pattern towards lower  $A$

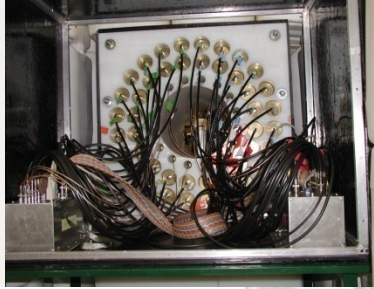
# Nucleosynthesis around the 2<sup>nd</sup> r-process peak

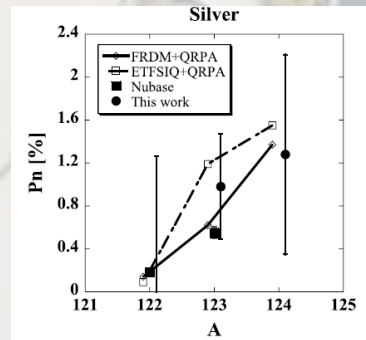
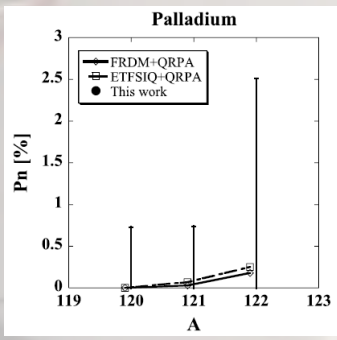
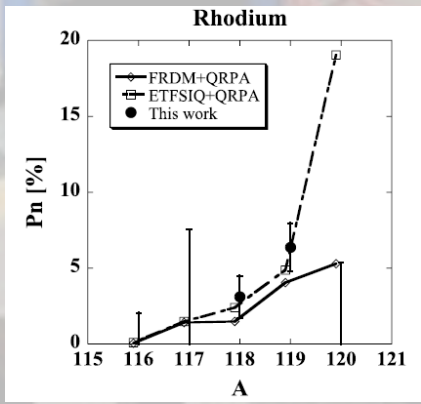
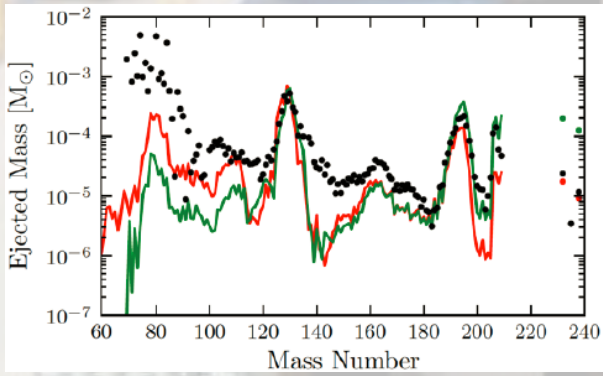
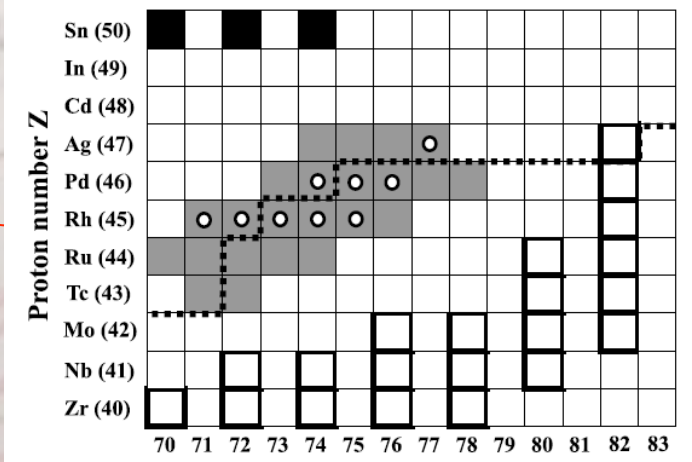
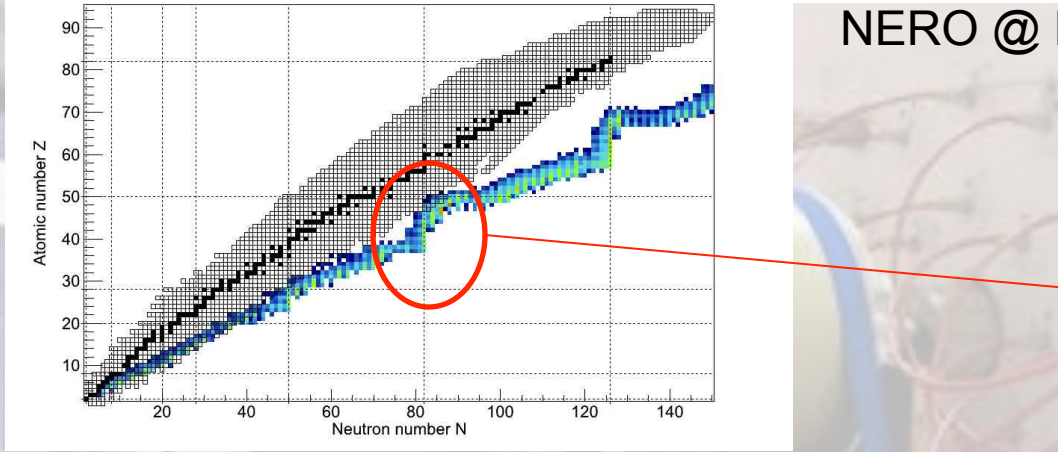
PHYSICAL REVIEW C 73, 035801 (2006)

$\beta$ -decay half-lives and  $\beta$ -delayed neutron emission probabilities for neutron rich nuclei close to the  $N = 82$   $r$ -process path

F. Montes,<sup>1,2,4</sup> A. Estrade,<sup>1,2,4</sup> P. T. Hosmer,<sup>1,2,4</sup> S. N. Liddick,<sup>3,4,\*</sup> P. F. Mantica,<sup>3,4</sup> A. C. Morton,<sup>4,†</sup> W. F. Mueller,<sup>4</sup>  
 . Ouellette,<sup>1,2,4</sup> E. Pellegrini,<sup>2,4</sup> P. Santi,<sup>4,‡</sup> H. Schatz,<sup>1,2,4</sup> A. Stolz,<sup>4</sup> B. E. Tomlin,<sup>3,4</sup> O. Arndt,<sup>5,6</sup> K.-L. Kratz,<sup>5,6</sup> B. Pfeiffer,<sup>5,6</sup>  
 P. Reeder,<sup>7</sup> W. B. Walters,<sup>8</sup> A. Aprahamian,<sup>9</sup> and A. Wöhr<sup>9</sup>

NERO @ NSCL-MSU





r-process model calculation with new Pn's:

$Nn = 5 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$   
 $T_9 = 1.35 \text{ K}$   
 $\tau = 2 \text{ s}$

$\rightarrow {}^{120}\text{Sn}/{}^{119}\text{Sn} = 1.66 \text{ instead of } 1.22 \text{ (40\% increase!)}$