

Medidas de emisión de neutrones β -retardados

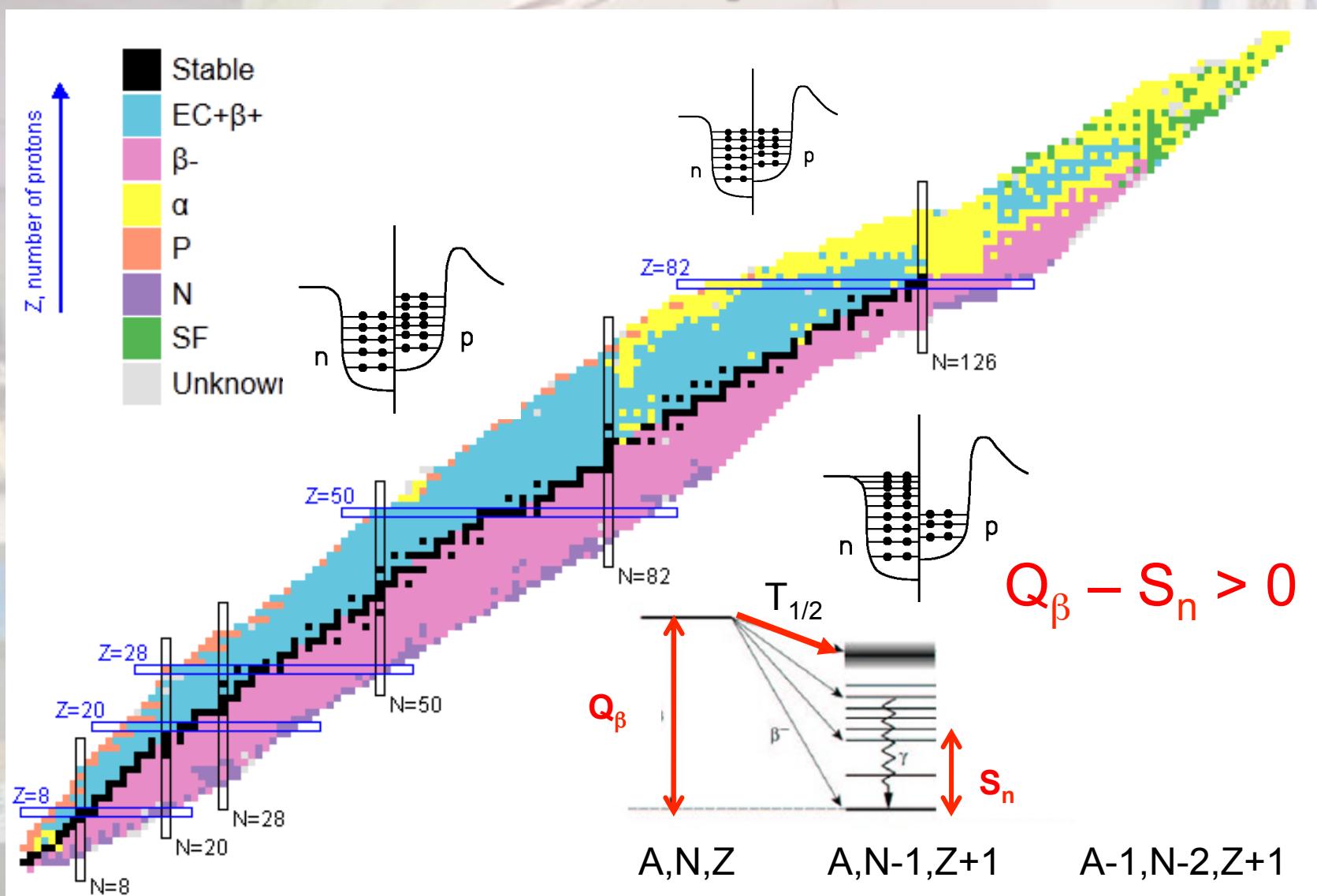
César Domingo Pardo

Instituto de Física Corpuscular
(CSIC-Universidad de Valencia)

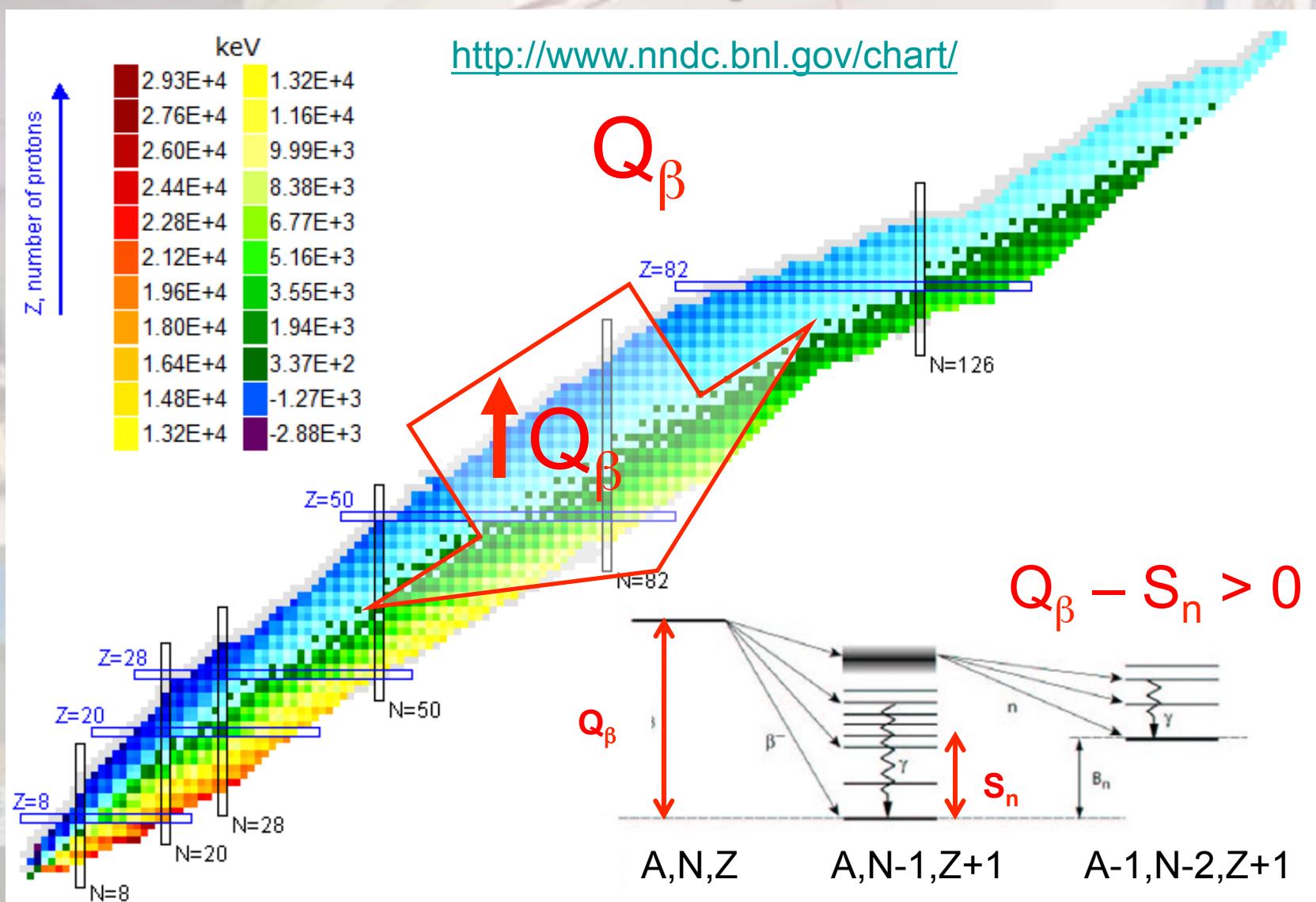
Contenidos

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

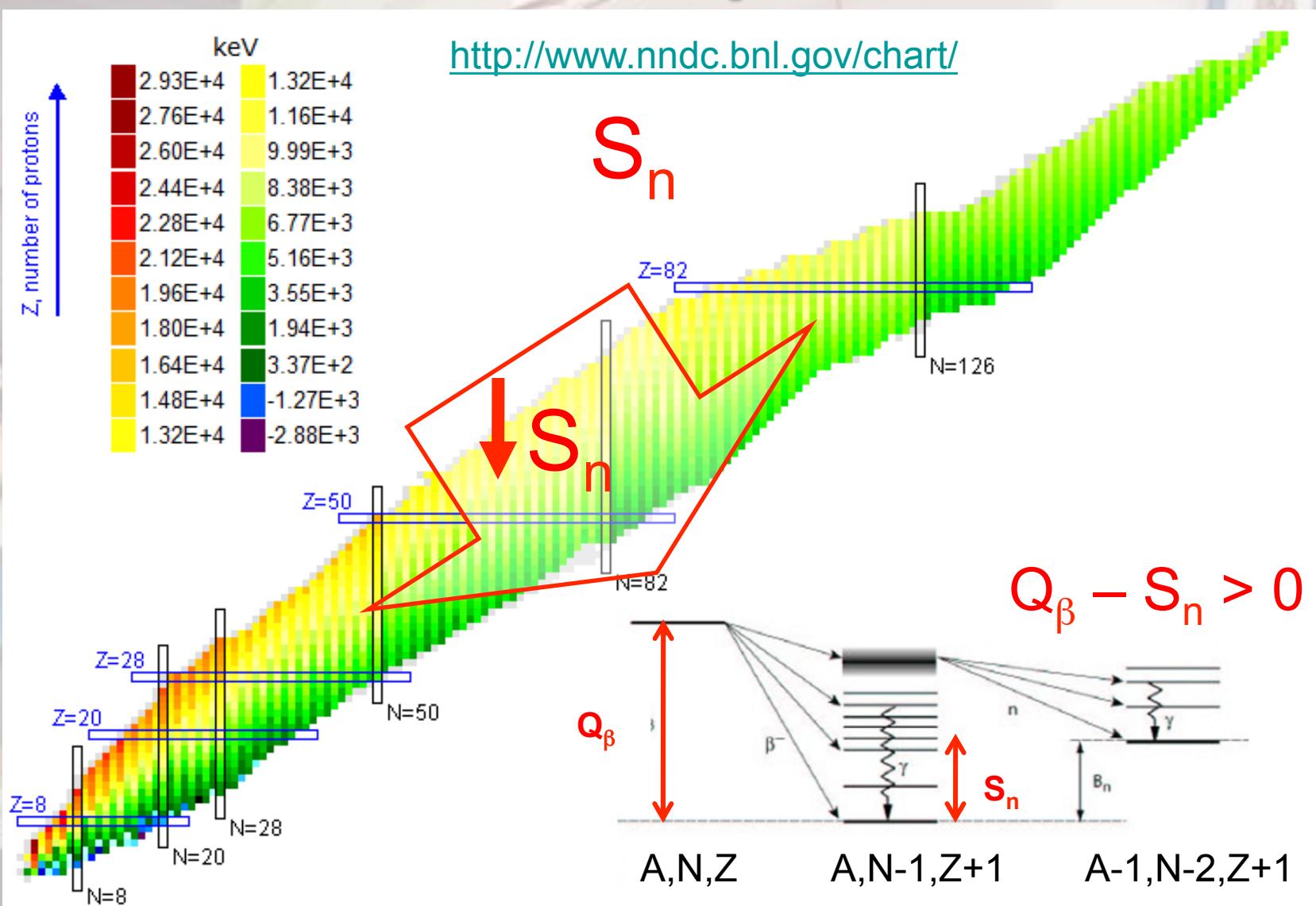
Concepto



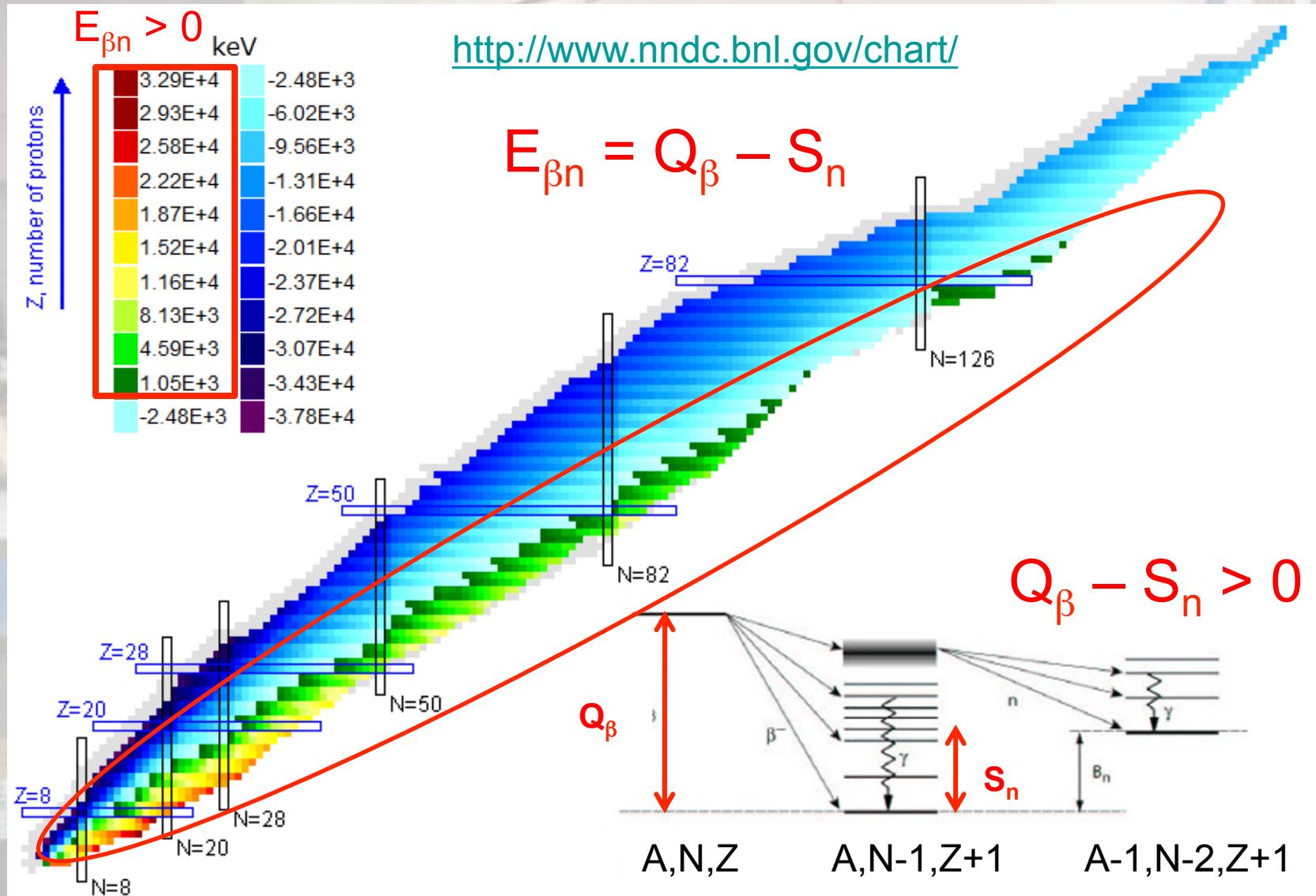
Concepto



Concepto

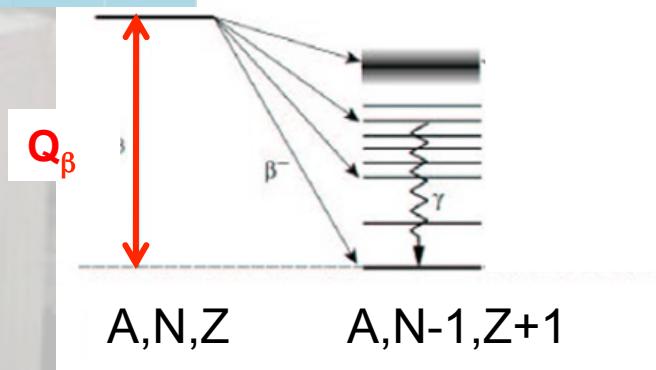
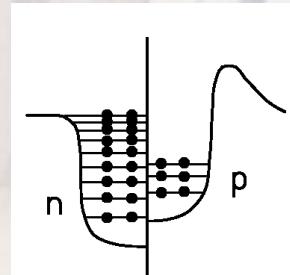
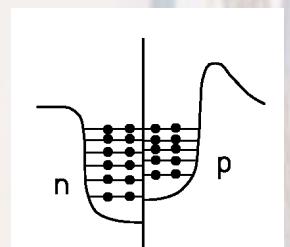


Concepto



Concepto

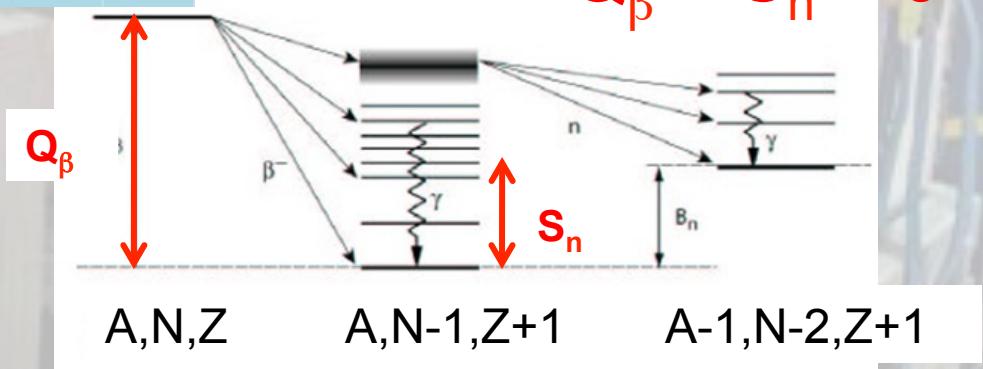
La	134La	135La	136La	137La	138La	139La	140La	141La	142La	143La	144La	145La	146La	147La	148La	149La
Ba	133Ba	134Ba	135Ba	136Ba	137Ba	138Ba	139Ba	140Ba	141Ba	142Ba	143Ba	144Ba	145Ba	146Ba	147Ba	148Ba
Cs	132Cs	133Cs	134Cs	135Cs	136Cs	137Cs	138Cs	139Cs	140Cs	141Cs	142Cs	143Cs	144Cs	145Cs	146Cs	147Cs
Xe	131Xe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



Concepto

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

$$Q_\beta - S_n > 0$$



Motivación e implicaciones de los NR

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

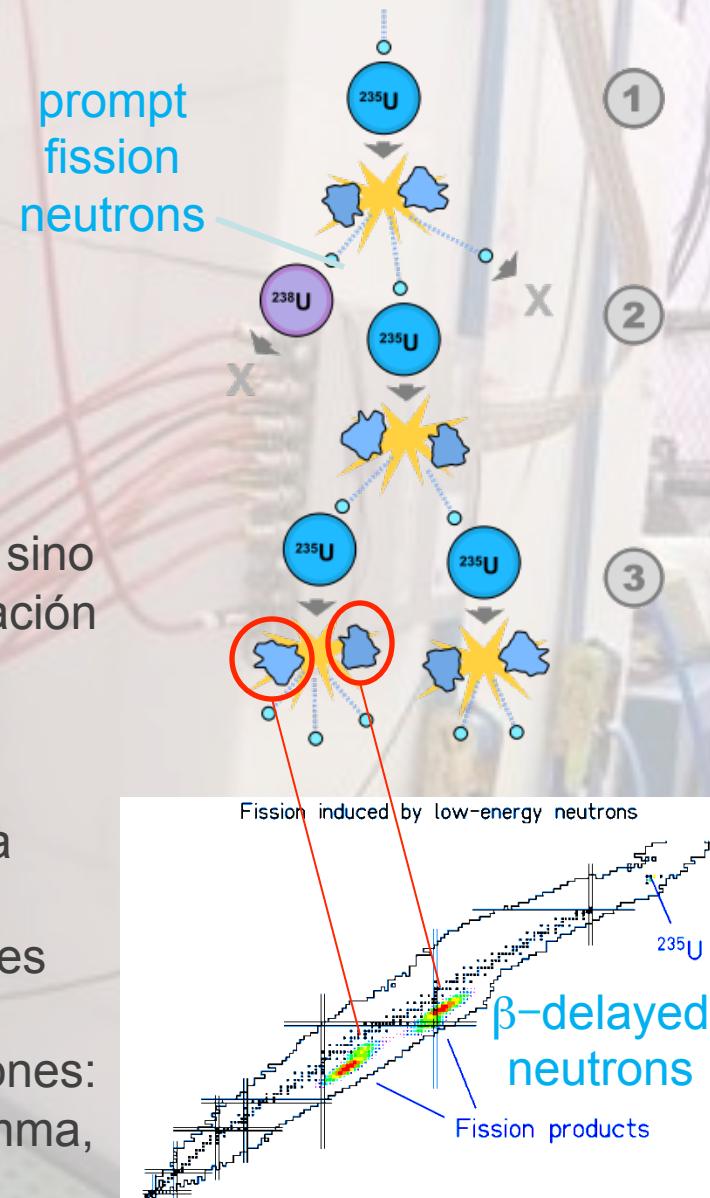
Producción de energía por fisión nuclear

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 (τ) de 1 ms (prompt fission n) a unos 100 ms (fission+ β n).

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

N := Número de neutrones libres en un reactor

τ := vida media efectiva promedio de un neutrón libre

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

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

α := constante de proporcionalidad:

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

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

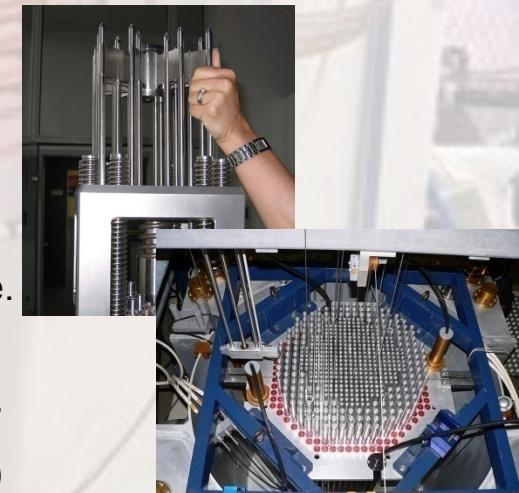
$\alpha < 0 \rightarrow$ Subcrítico: número de neutrones decae exponencialmente

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

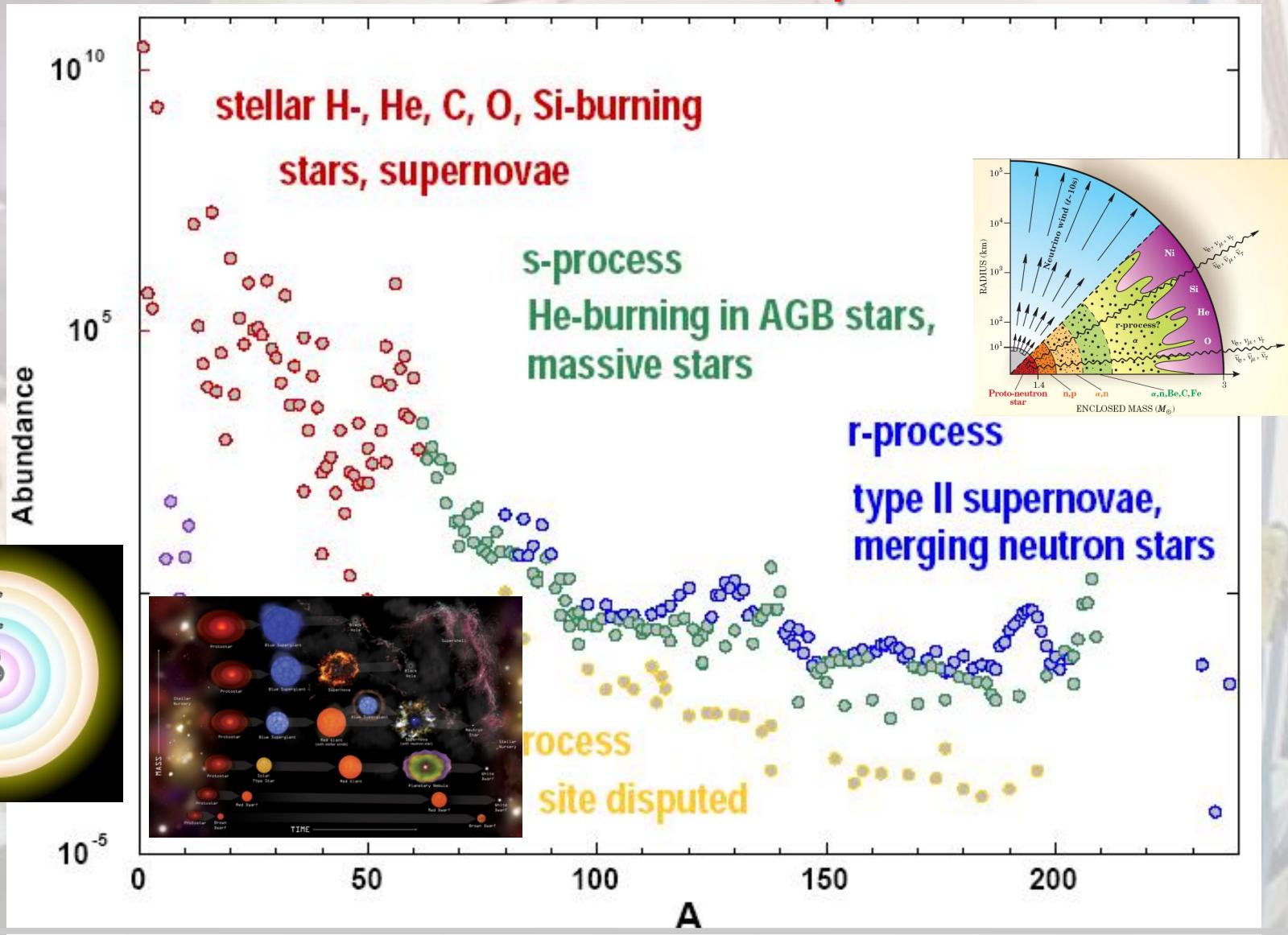
La mayoría de reactores nucleares se operan en modo *prompt subcritical, delayed critical*, es decir, los neutrones prompt de la fisión no son suficientes para sostener una reacción en cadena. Mediante los neutrones retardados se llega a la condición de criticalidad.

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.

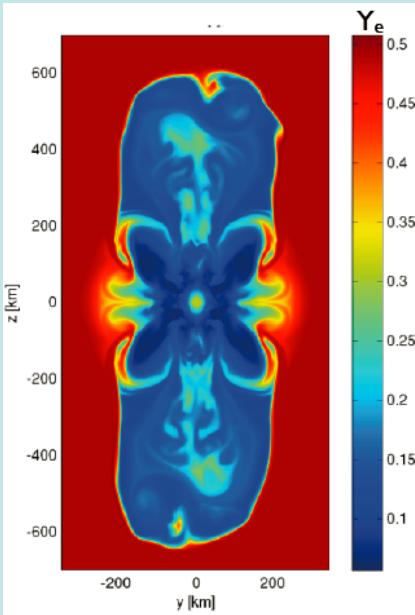
Conclusión:

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

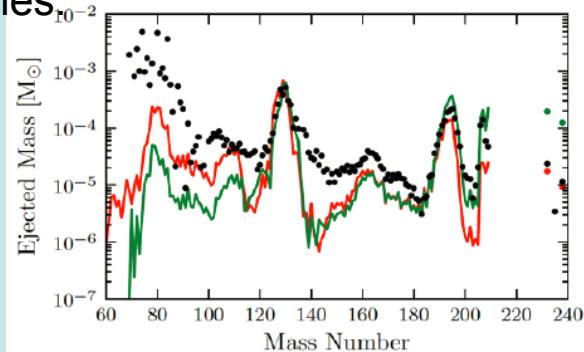
Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos



Supernova con explosión en chorro (jet-like explosion)

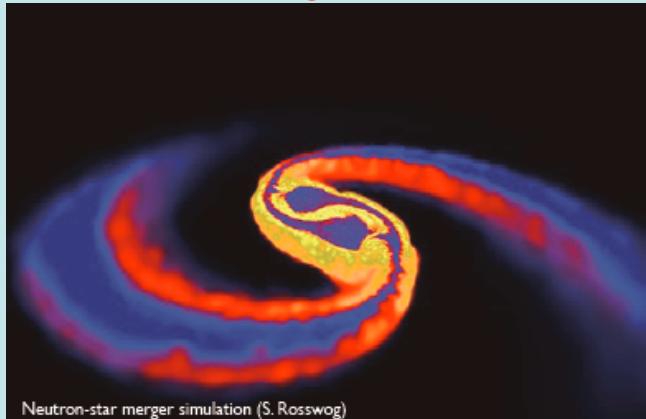


- Simulaciones magneto-HD en 3D: rápida rotación y campos magnéticos intensos.
- Colimación de materia: jets ricos en neutrones



Winteler, Käppeli, Perego et al. 2012

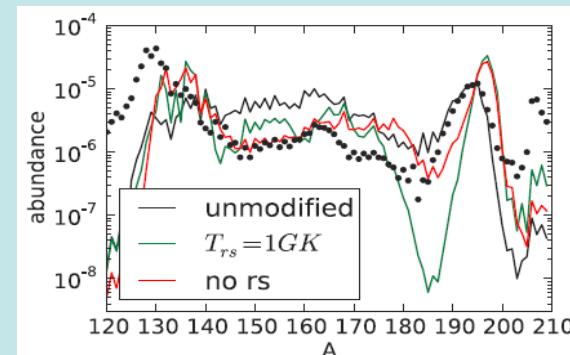
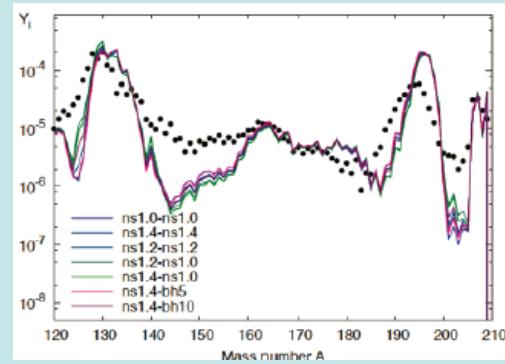
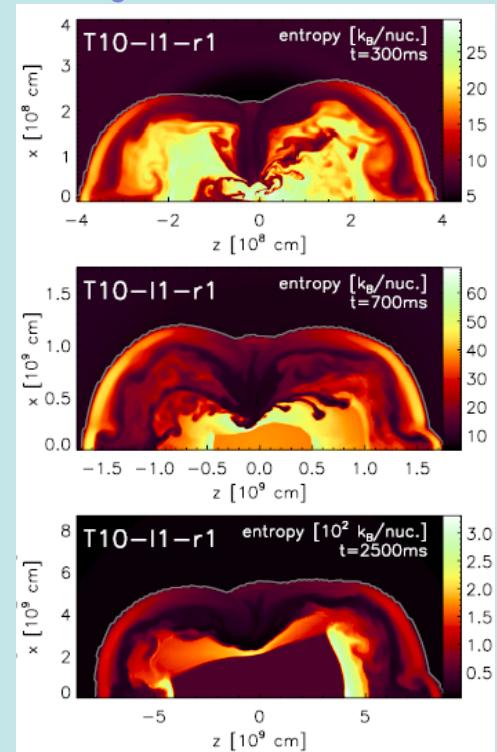
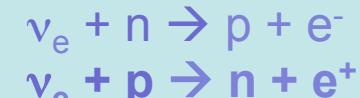
Sistemas binarios de estrellas de neutrones (neutron mergers)



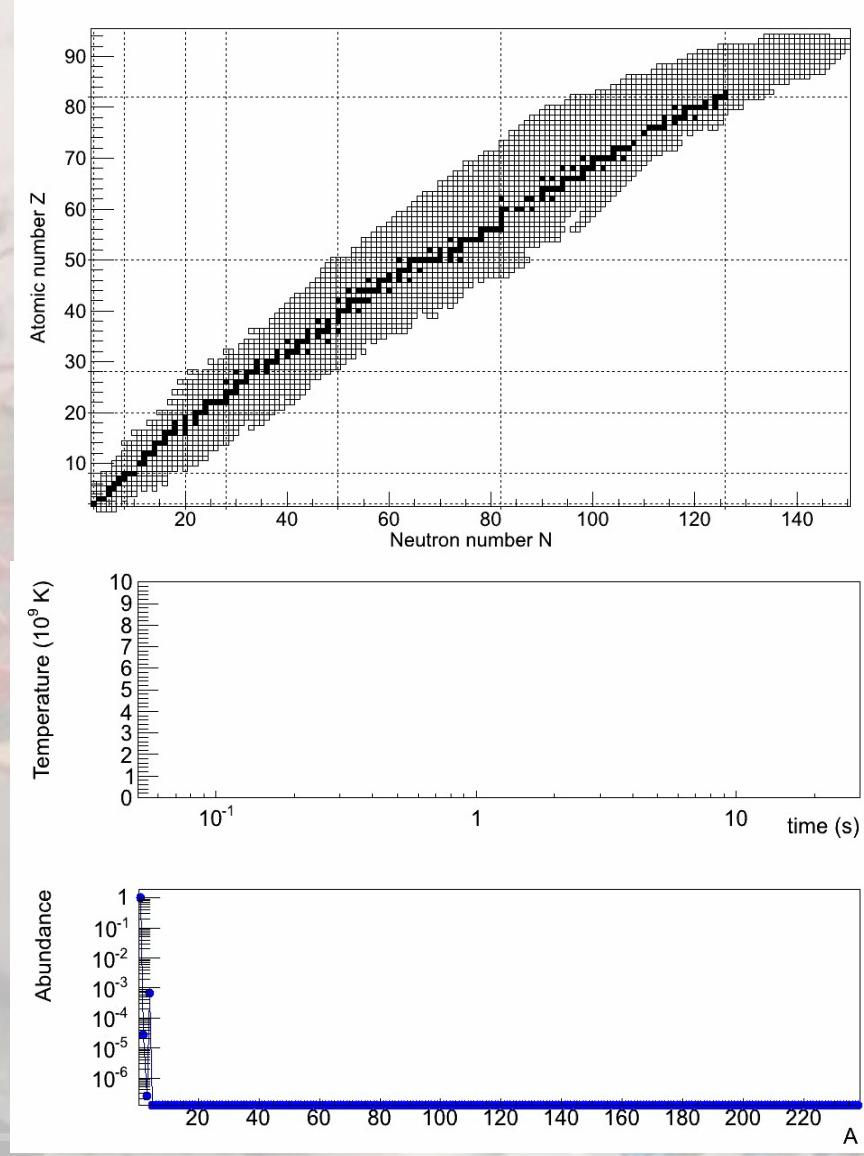
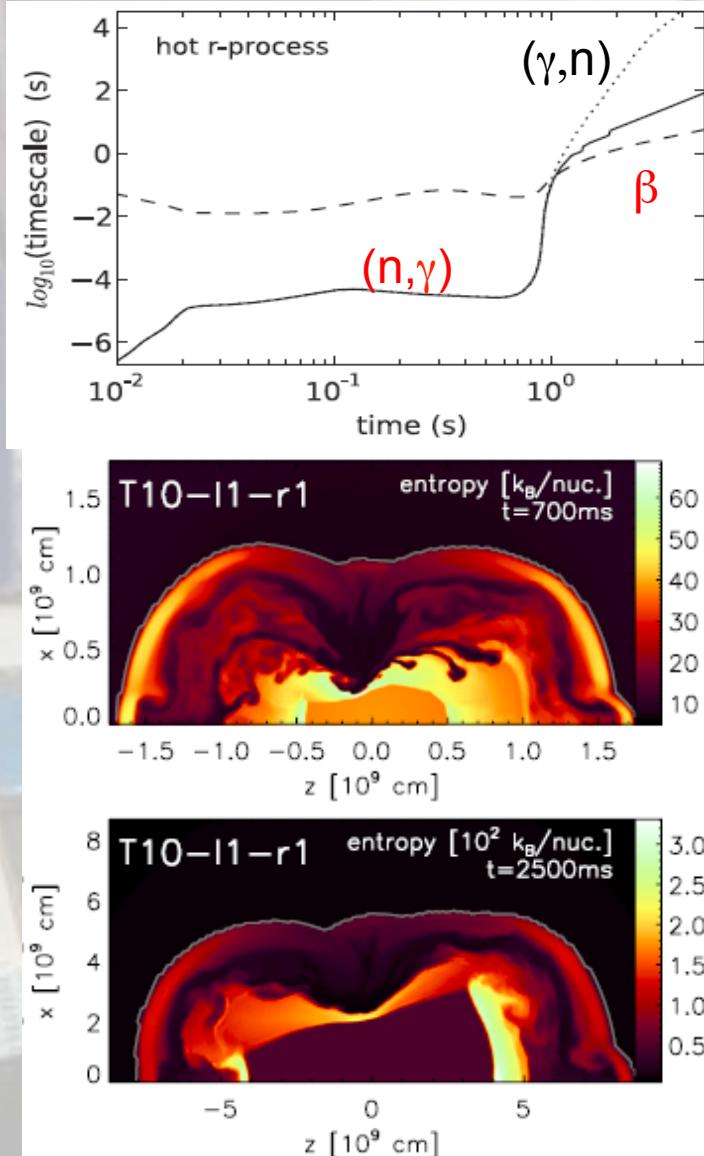
Neutron-star merger simulation (S. Rosswog)

Korobkin, Rosswog, Arcones, Winteler et al. 2012

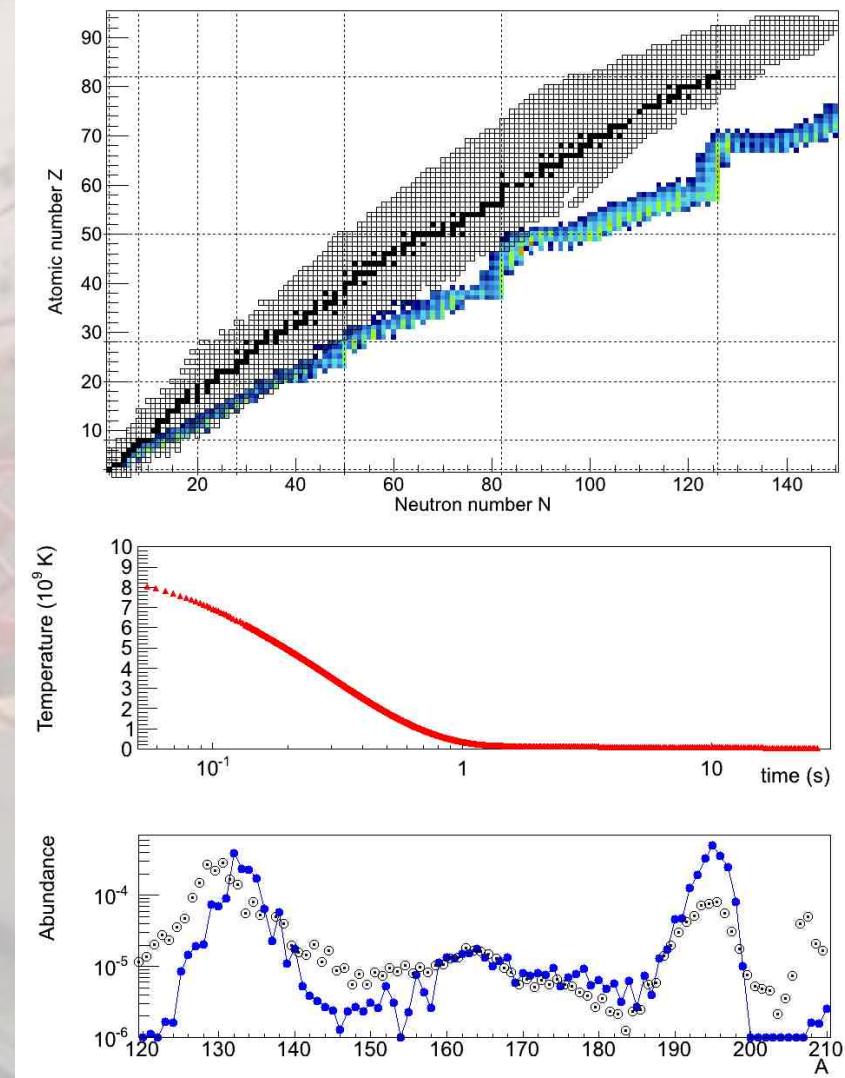
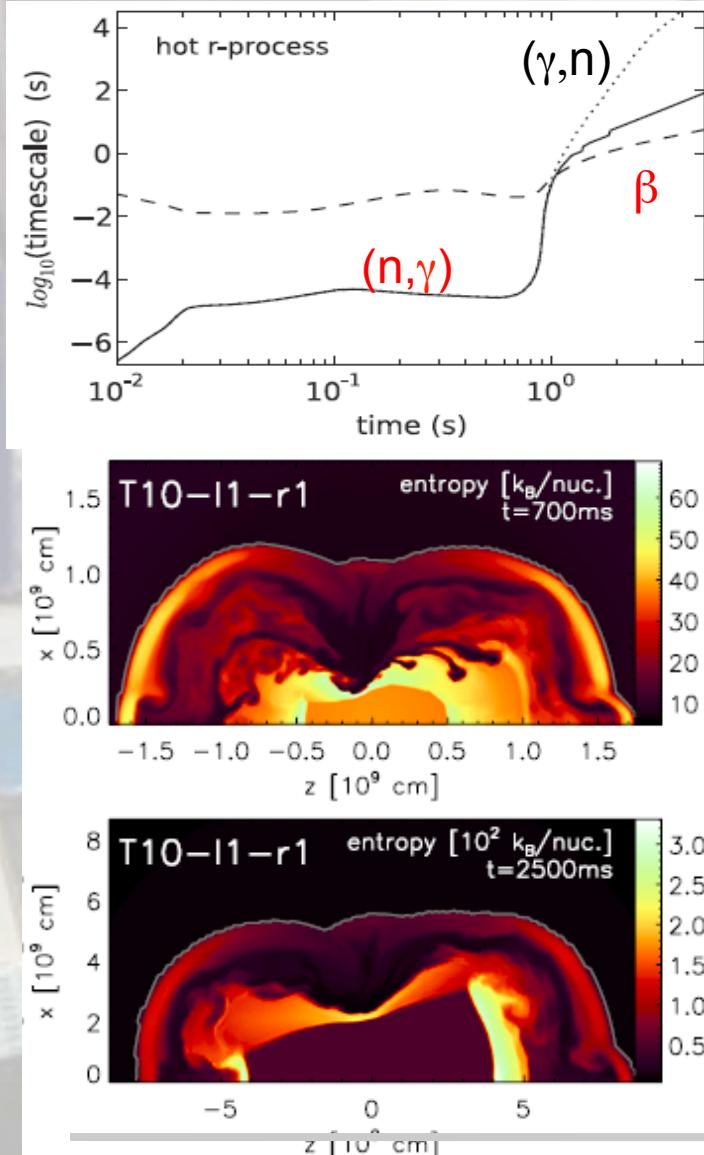
SN + ν -driven wind



Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos

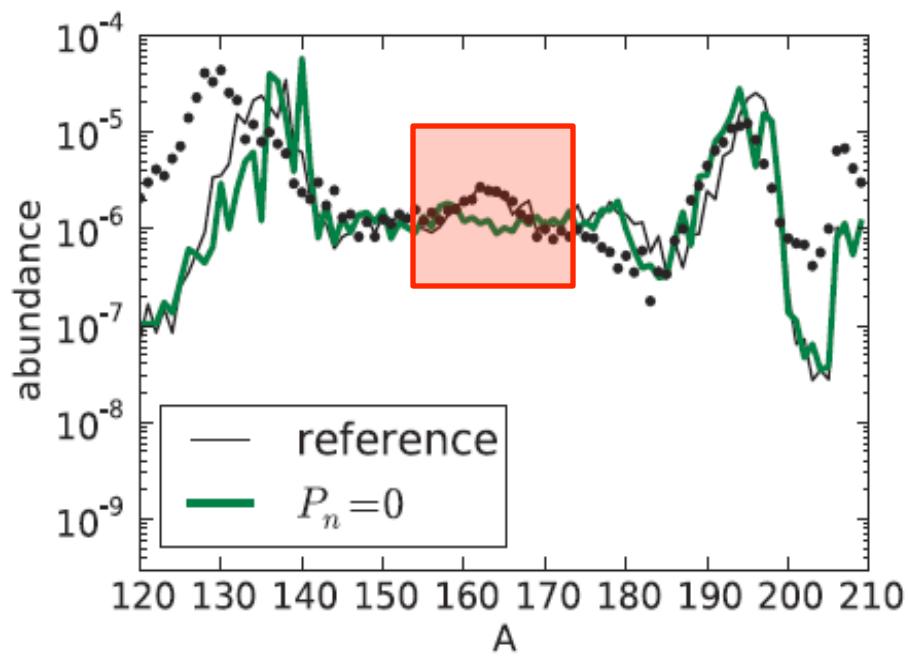


Nucleosíntesis de elementos pesados en entornos estelares explosivos



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.



PHYSICAL REVIEW C 83, 045809 (2011)

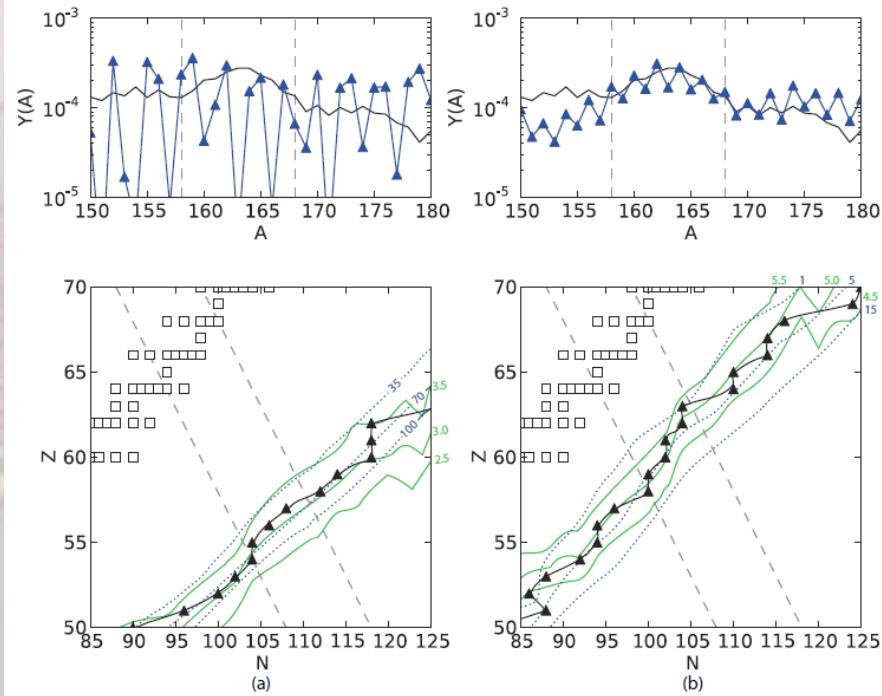
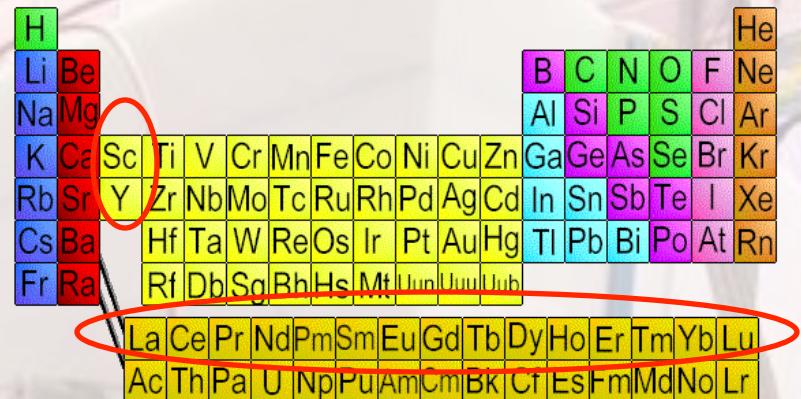
Dynamical r -process studies within the neutrino-driven wind scenario and its sensitivity to the nuclear physics input

A. Arcones^{1,2,*} and G. Martínez-Pinedo²

¹Institut für Kernphysik, Technische Universität Darmstadt, D-64289 Darmstadt, Germany

²GSI 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[‡]

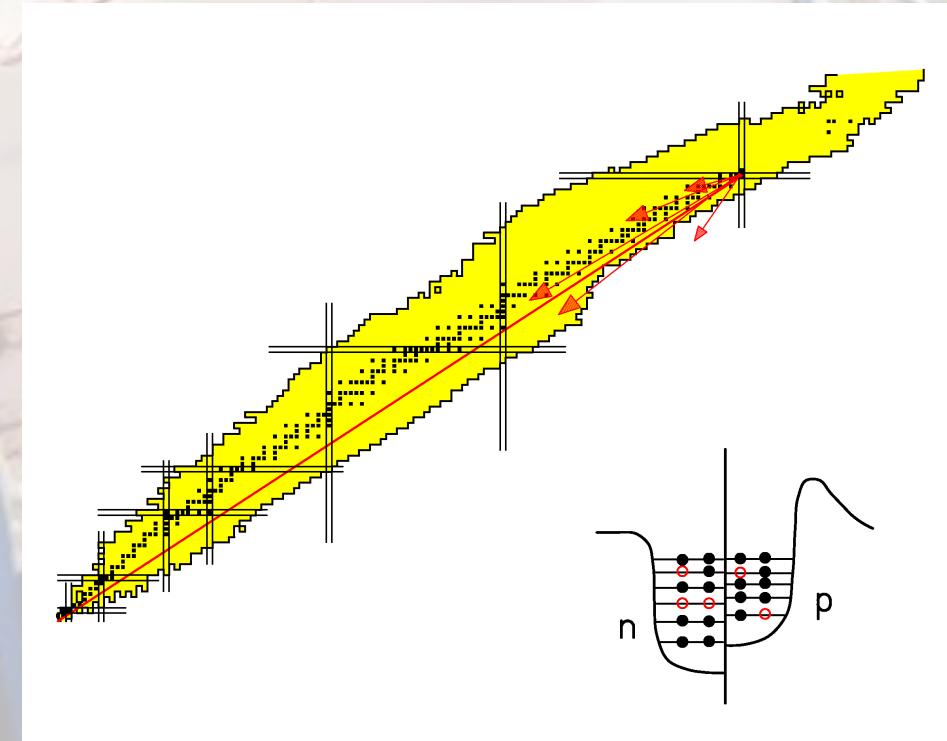
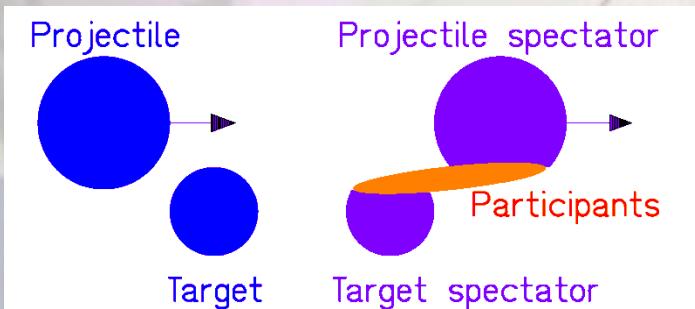
Department of Physics and Astronomy, Union College, Schenectady, New York 12308, USA

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

Técnicas experimentales de medida de NR

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



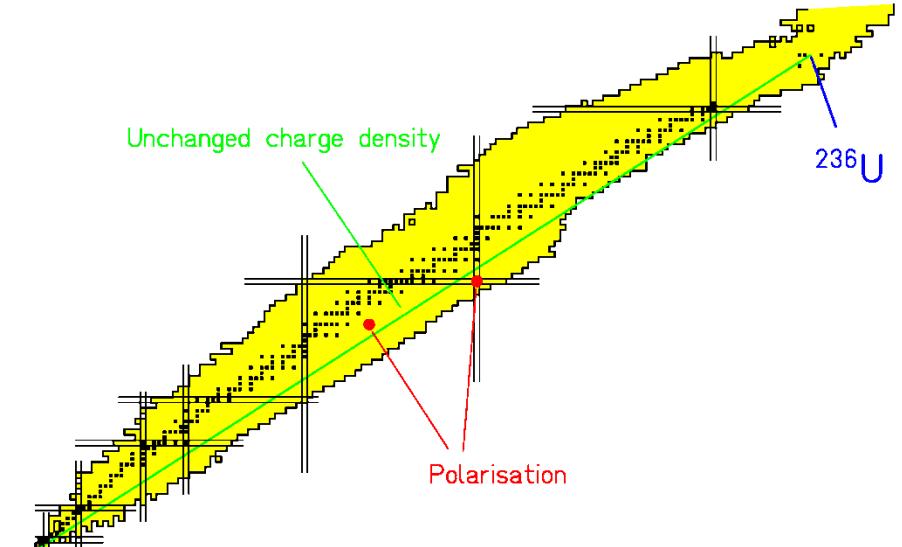
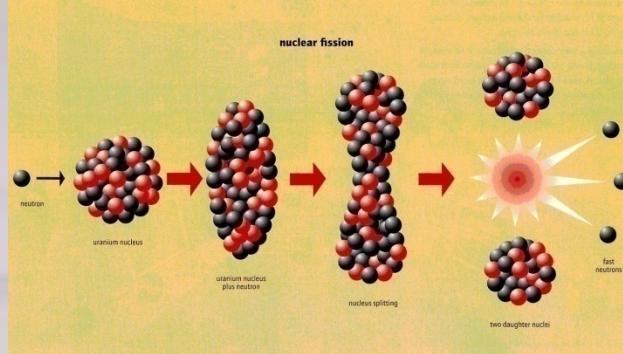
Removal of nucleons in quasi-free nucleon-nucleon collisions.

Basic characteristics:

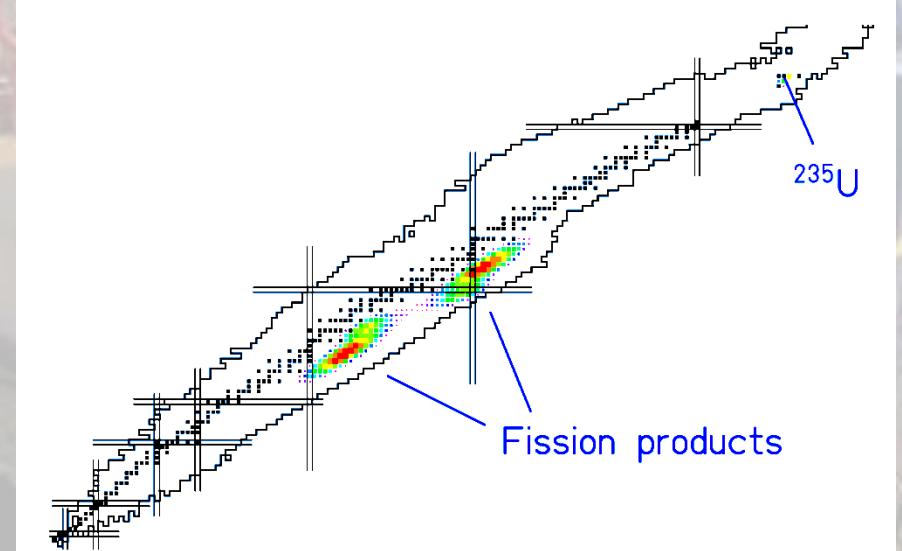
- Large fluctuations in N/Z.
- Large fluctuations in excitation energy.

Highly excited fragments loose additional nucleons by evaporation.

Fisión

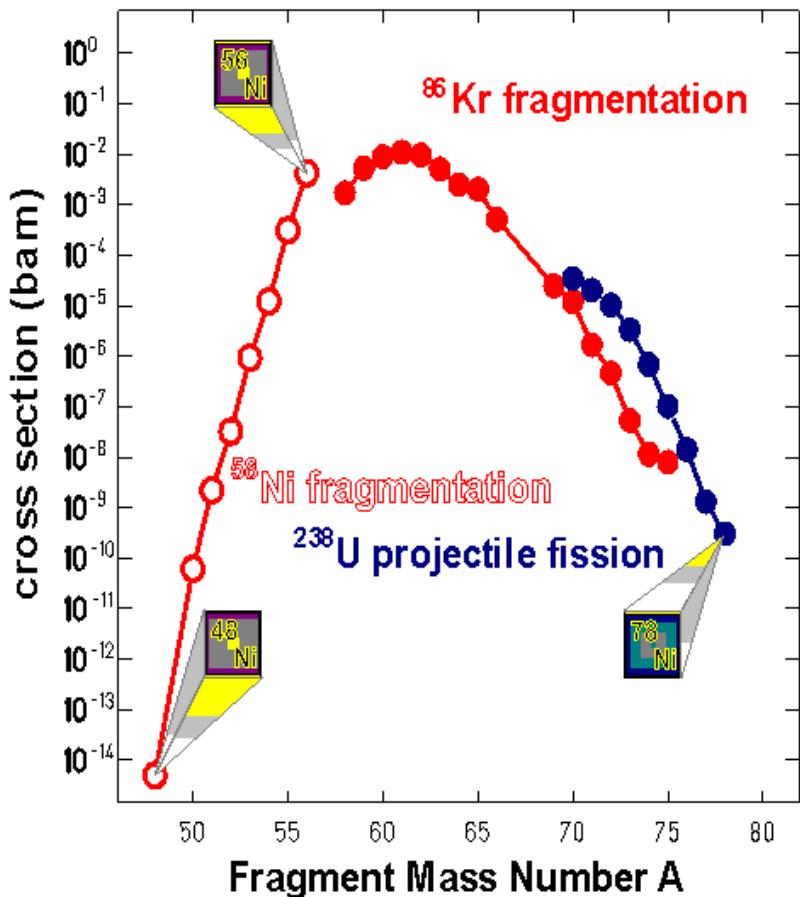


Fission induced by low-energy neutrons

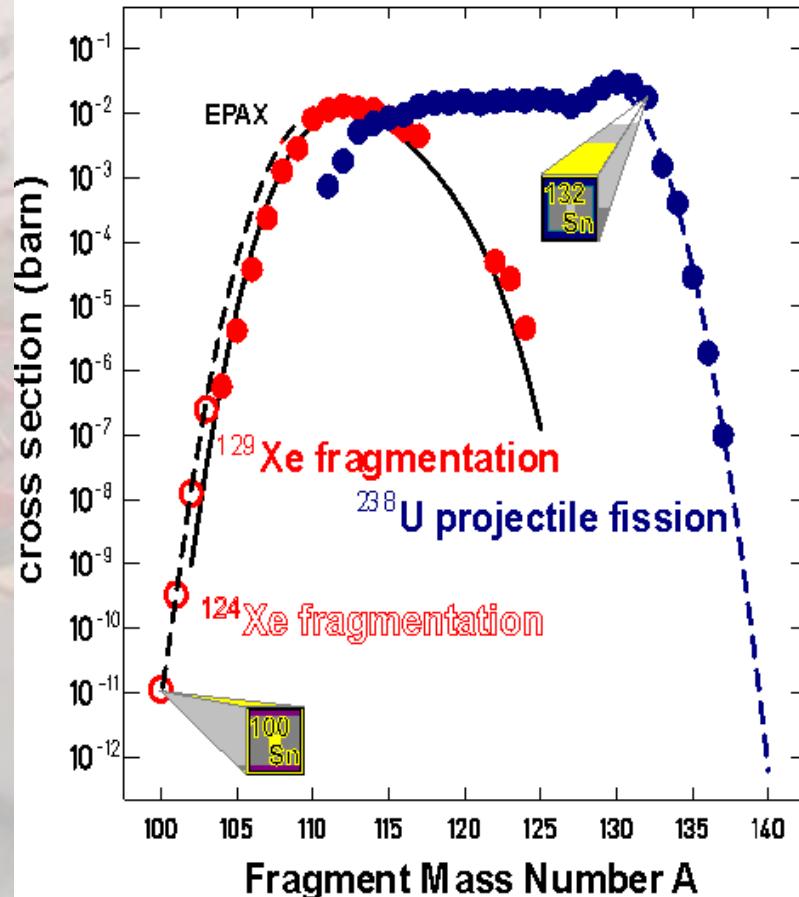


Producción de iones exóticos

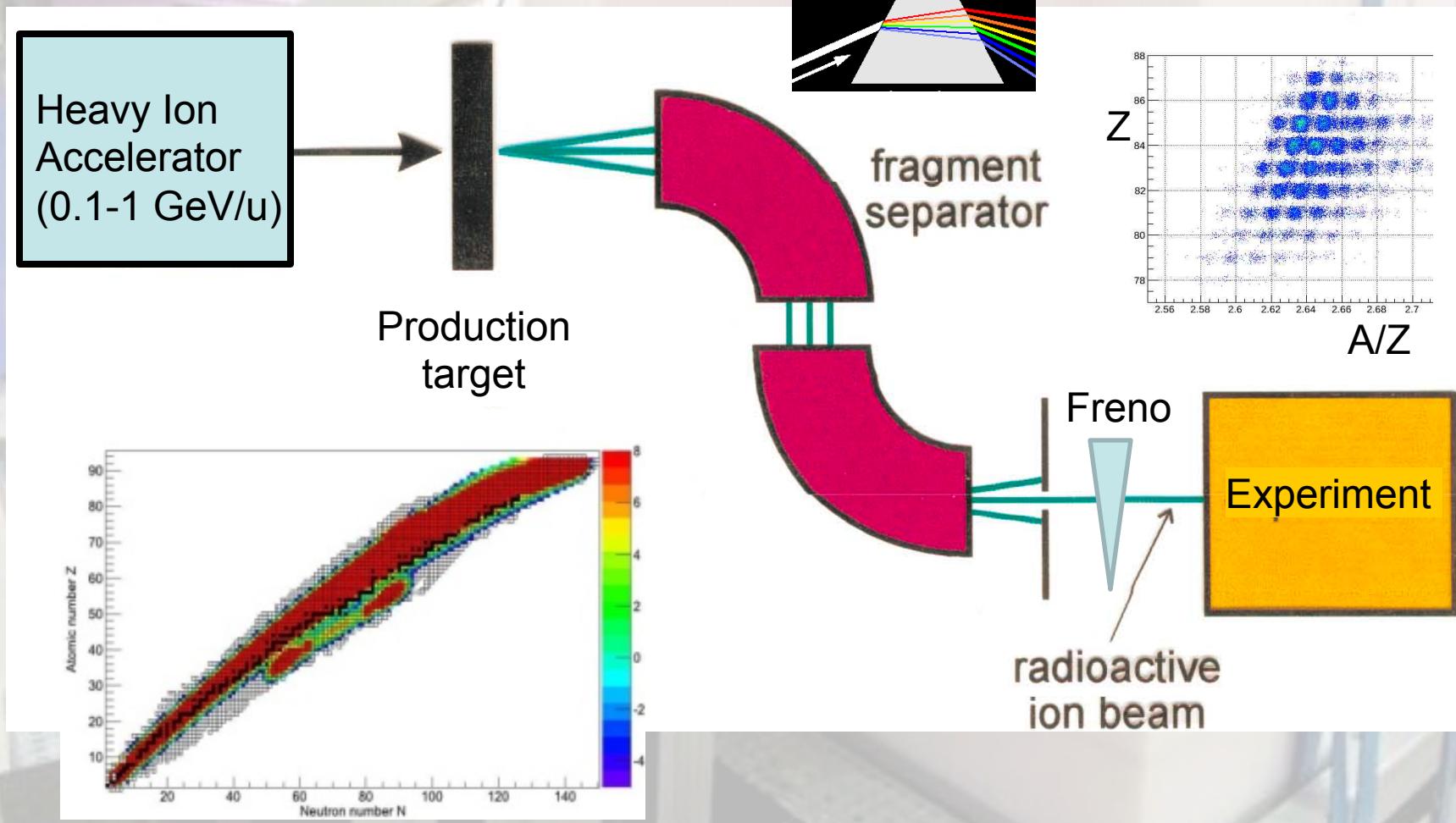
Ni isotopes from
projectile fragmentation and projectile fission



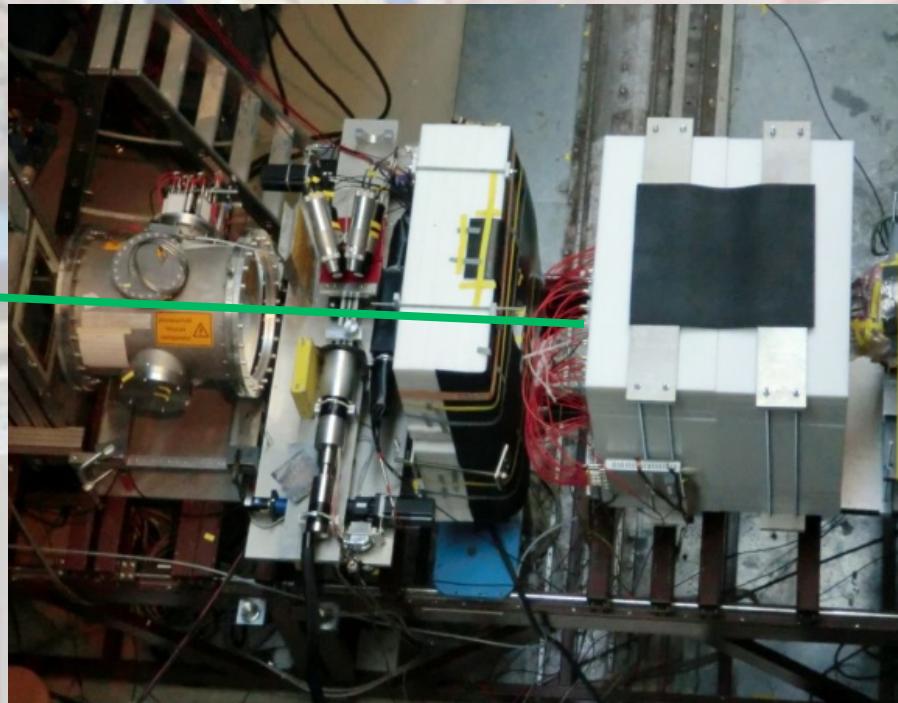
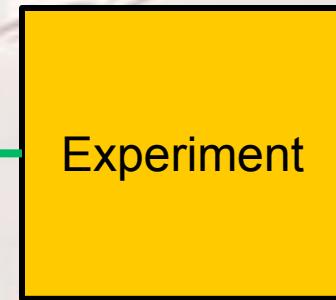
Sn isotopes from
projectile fragmentation and projectile fission



Identificación y separación de los núcleos exóticos de interés

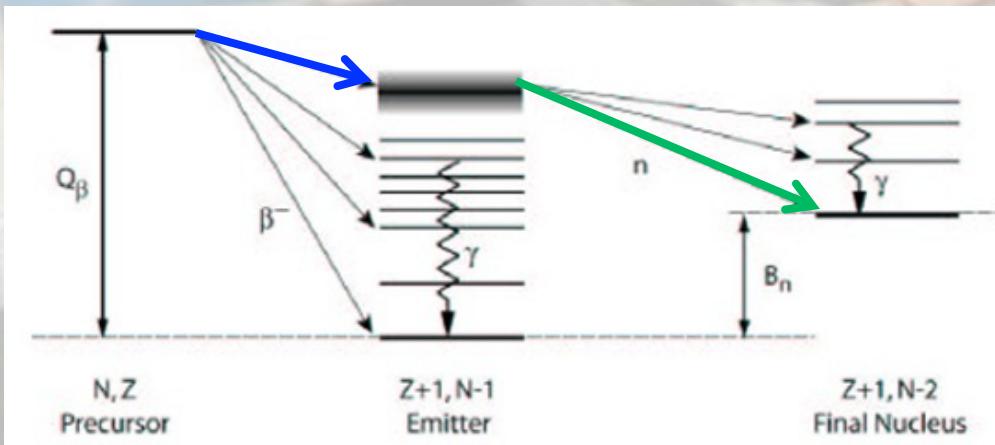


Implantación en un blanco



Implantación y decay en un blanco activo

Degrador
(Freno)



SIMBA
Constructed and developed at

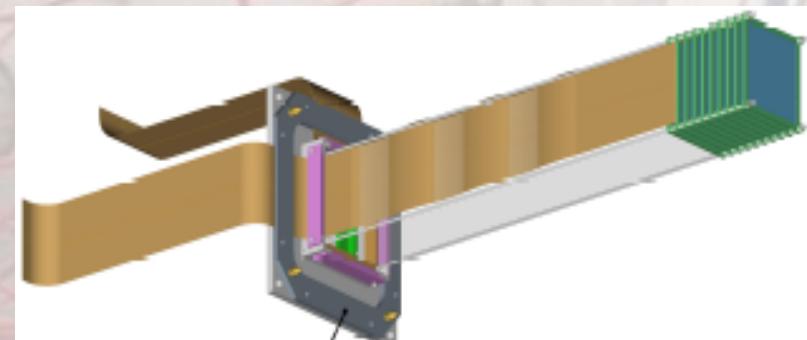
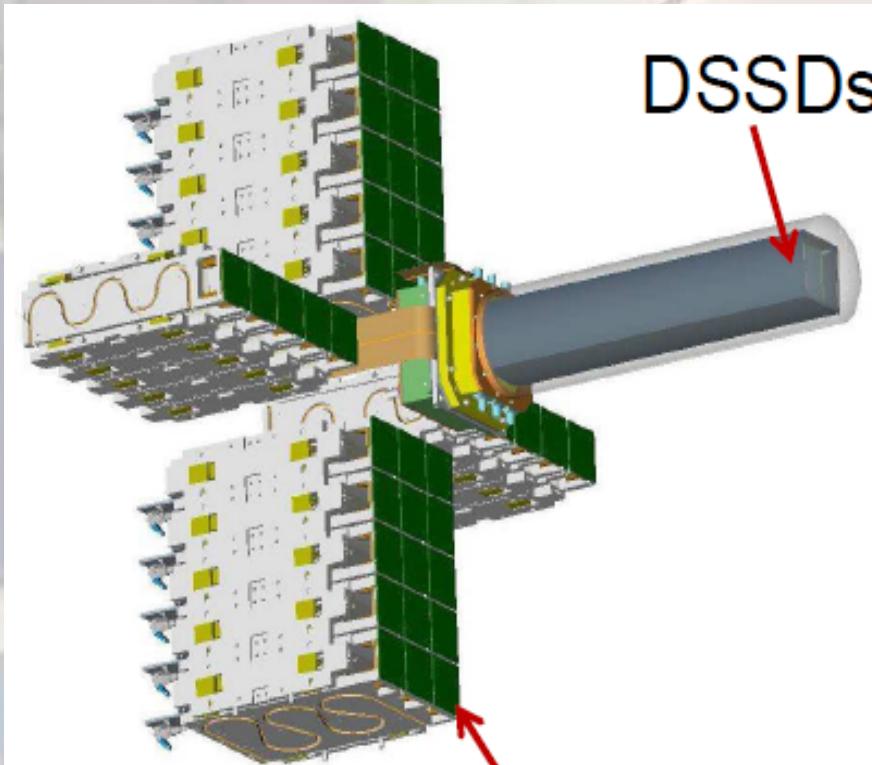


Technische Universität München



Pictures: K. Steiger

Implantación y decay en un blanco activo



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

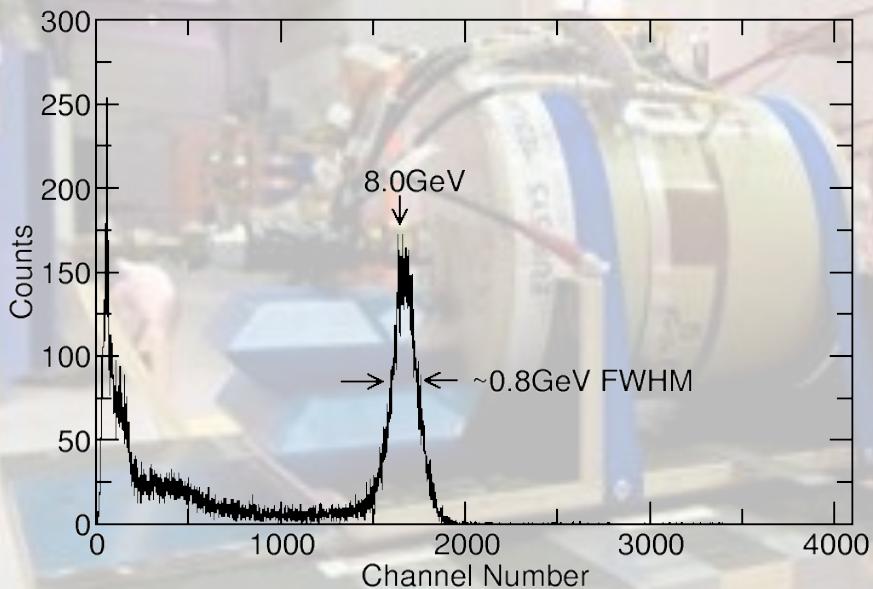
Mezzanine:
4x 16 channel ASICs
Cu cover
EMI/RFI/light screen
cooling



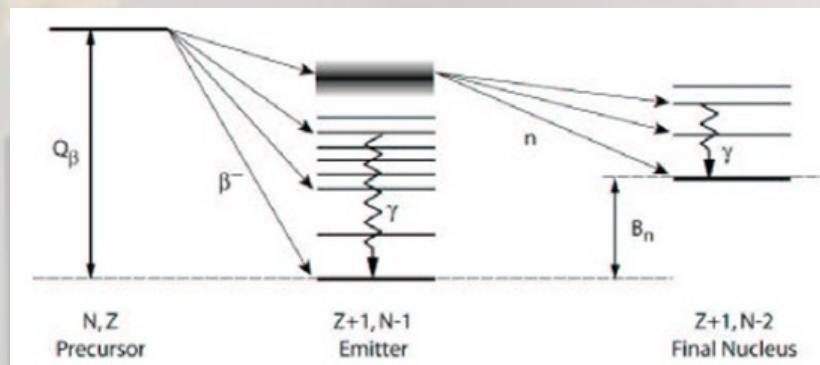
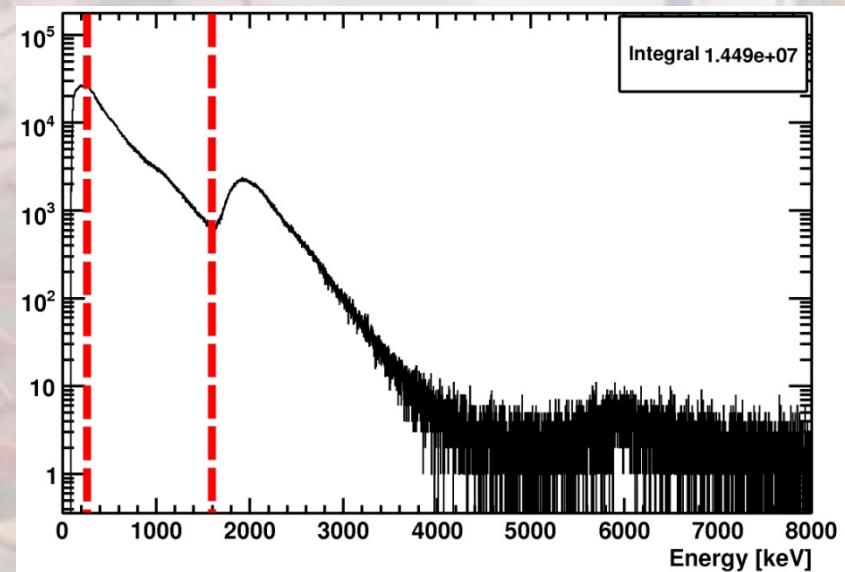
PJ Woods: PI of AIDA collaboration
(Edinburgh – Liverpool – STFC DL &
RAL)

Implantación y decay en un blanco activo

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



β -decays:



Detección de los neutrones retardados-beta

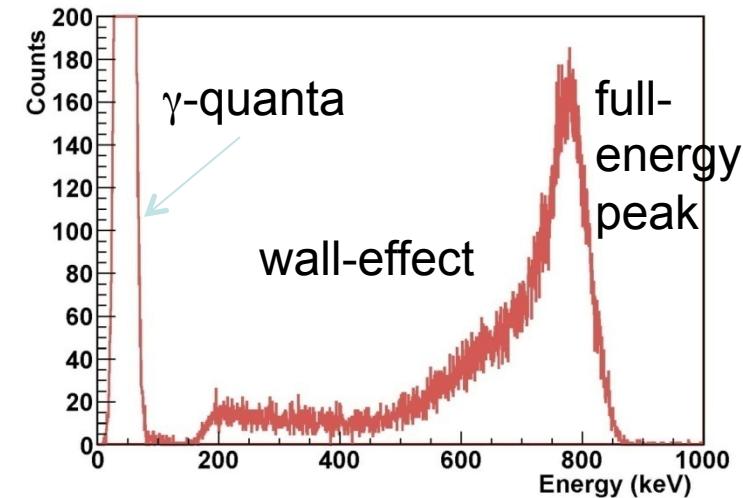
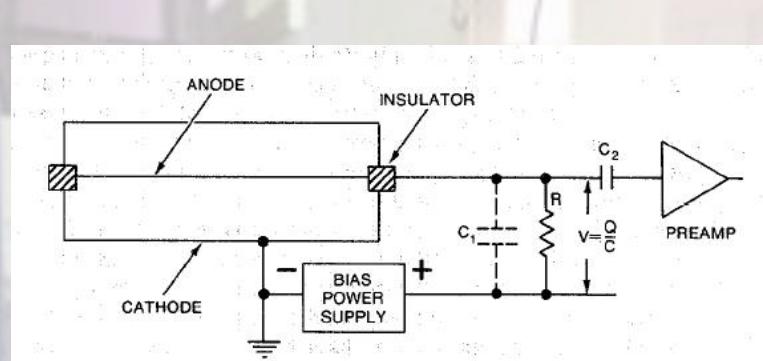
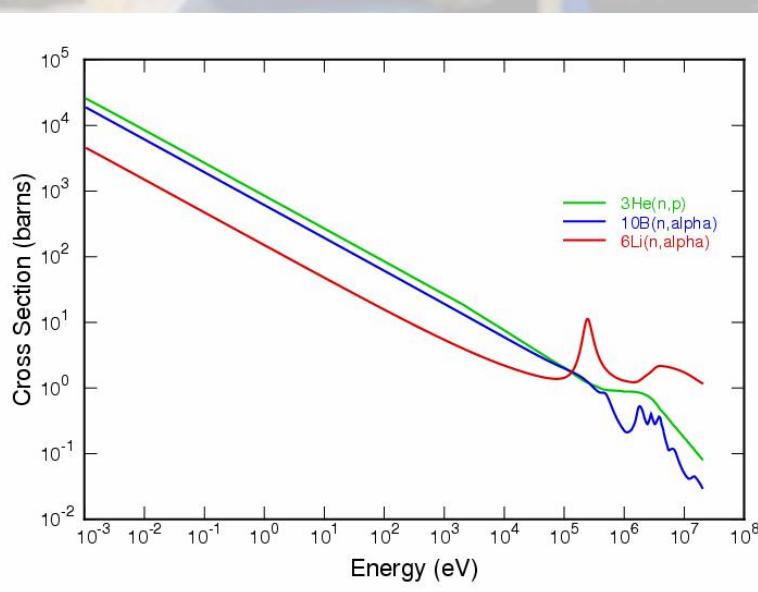


Figure 1: Expected pulse height spectrum from a ${}^3\text{He}$ tube. The two steps in the spectrum are caused by one of the reaction products hitting the detector wall. In area (a), the triton energy is fully deposited, but the proton only deposited a fraction of its energy, and vice versa in area (b).



The lower the neutron energy, the better for detection!



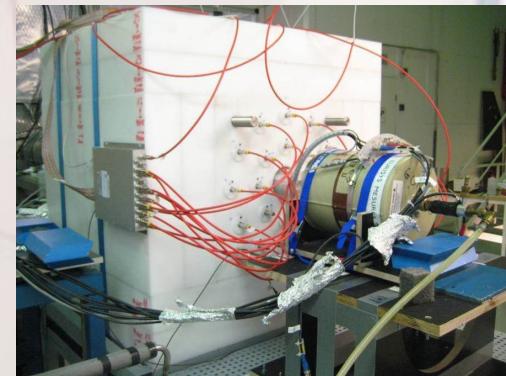
“truco”

Termalizar/moderar los neutrones (reducir su E) !

Moderar para detectar...

After many collisions:

Nucleus	1- α	ξ	N (1MeV \rightarrow 25 meV)
¹ H	1	1	18
² H	0.889	0.725	24
⁴ He	0.640	0.425	41
¹² C	0.284	0.158	111
⁵⁶ Fe	0.069	0.035	500
²⁰⁸ Pb	0.019	0.010	1823



Slowing-down parameter:

$$\xi = \left\langle \ln \frac{E_0}{E} \right\rangle = 1 + \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \frac{A-1}{A+1}$$

Number of collisions to reach an energy:

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

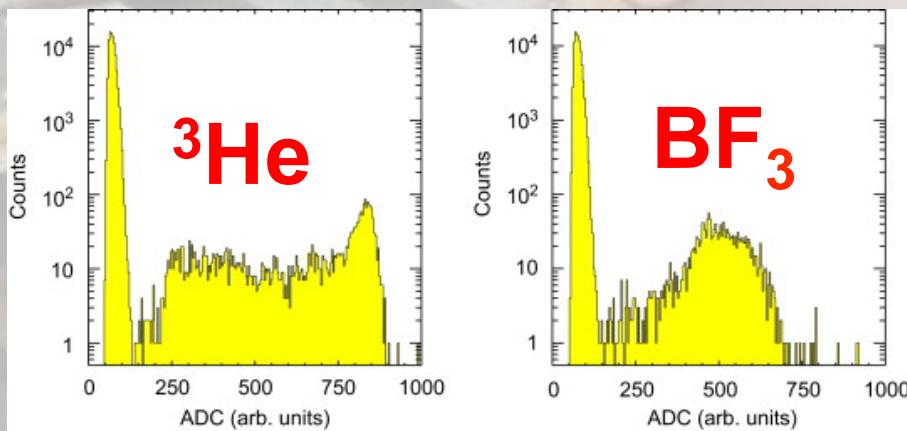
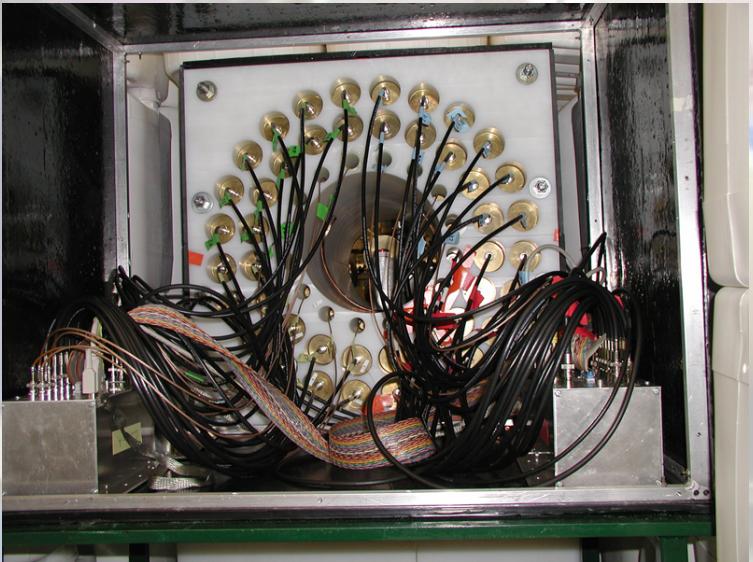
Slowing-down time: $t = \sqrt{\frac{K}{E_f}} - t_0 : K(\xi, \sigma_{ela}) ; t_0(E_0, \xi, \sigma_{ela})$

Contadores 4π : NERO @ NSCL-MSU



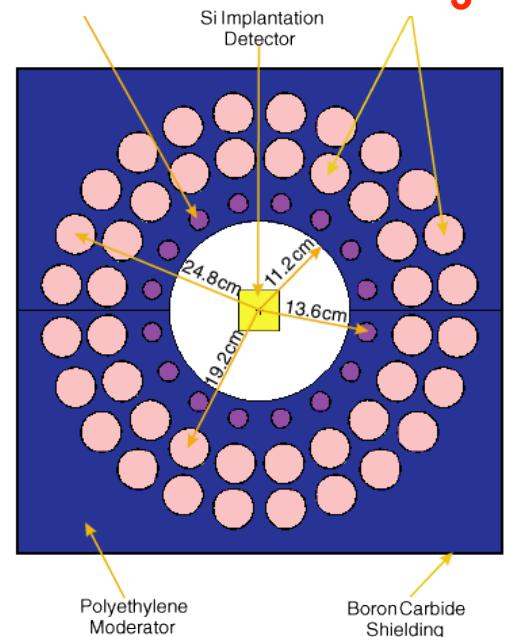
Polyethylene block (60x60x80cm³)

16 ^3He and 44 BF_3 proportional counters

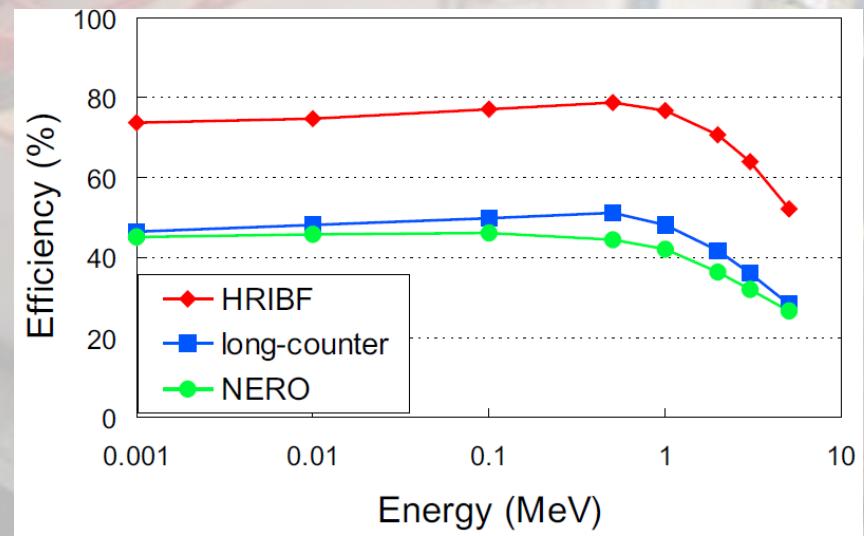
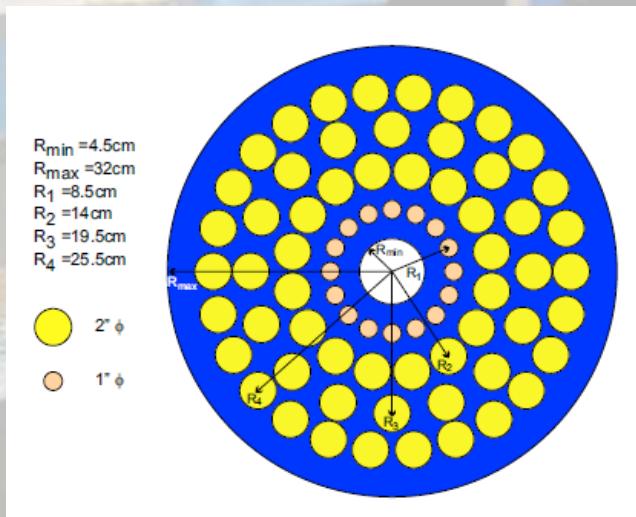
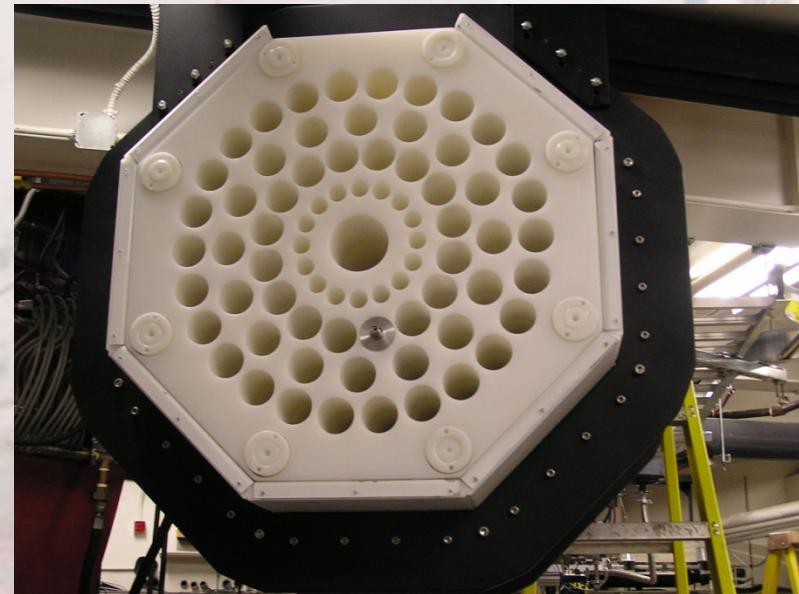


NERO (NSCL-MSU)

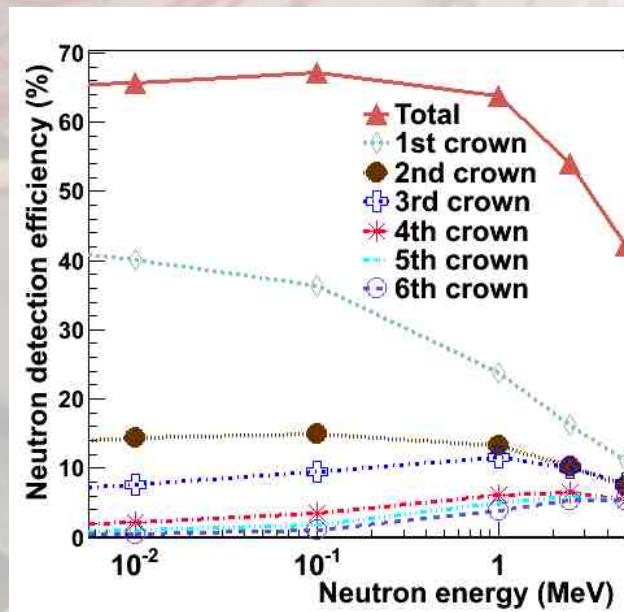
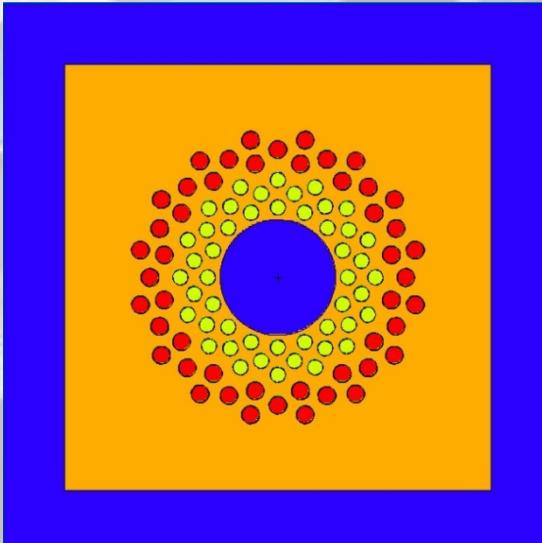
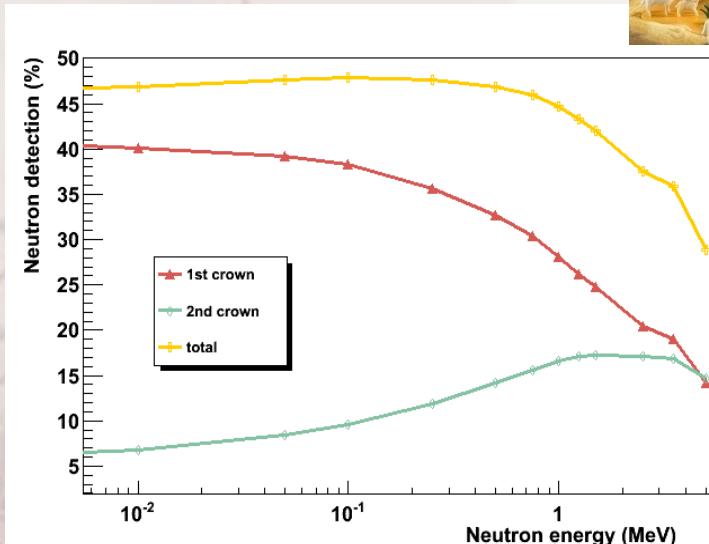
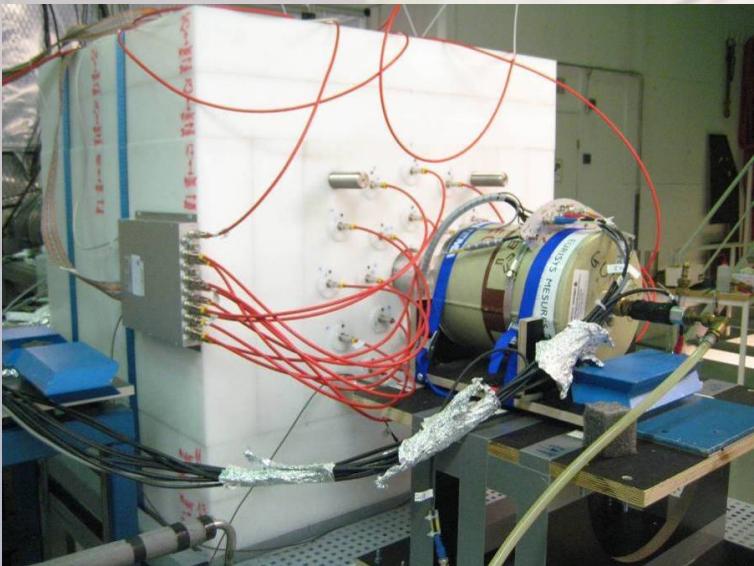
^3He BF_3



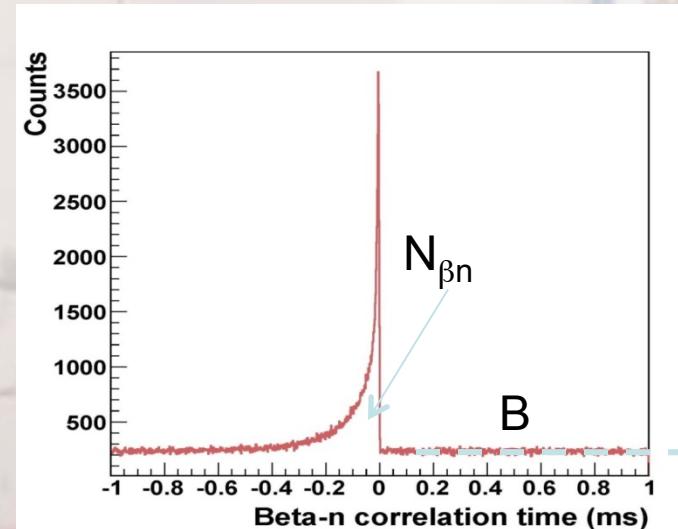
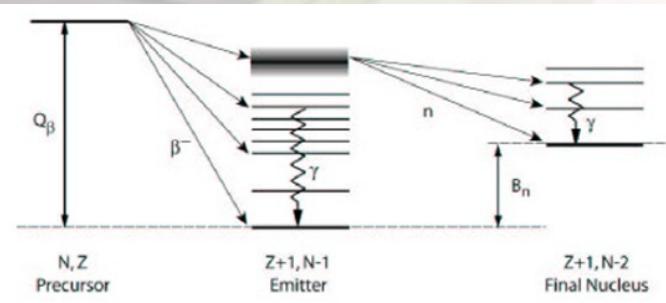
Contadores 4π : 3Hen @ ORNL



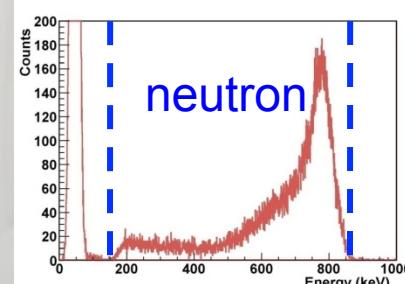
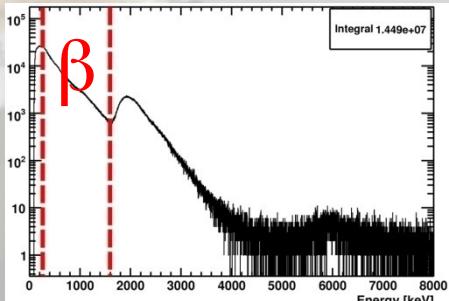
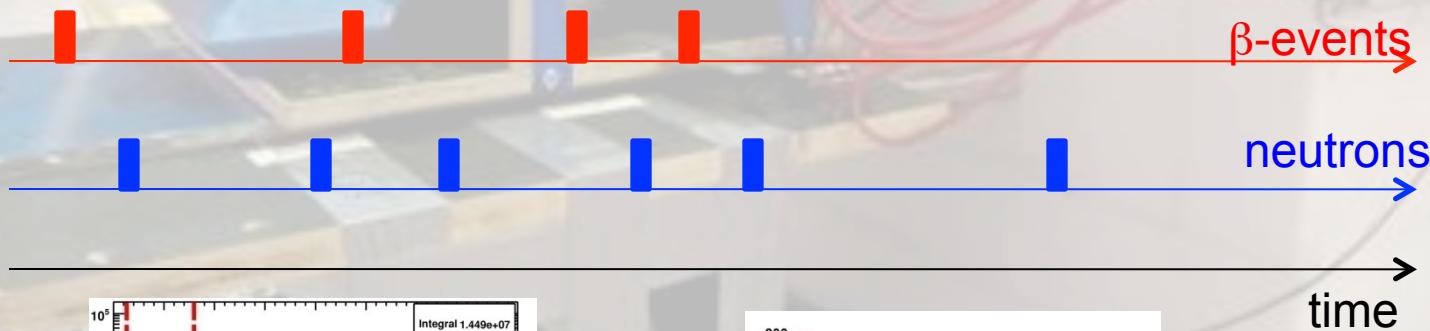
Contadores 4π : BELEN @ FAIR



Determinación del P_n



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



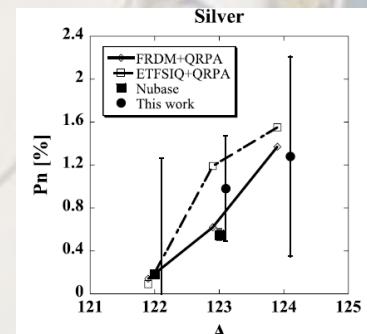
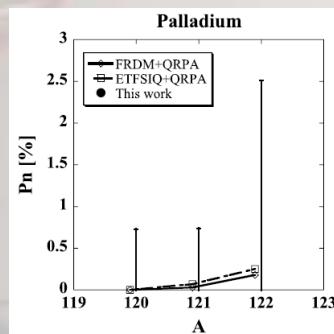
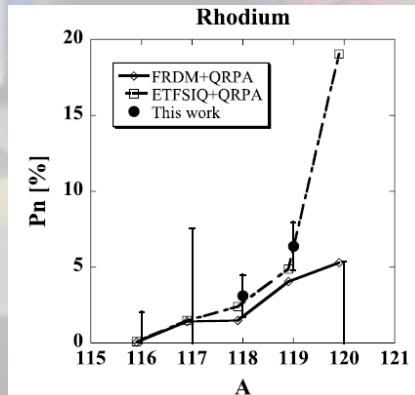
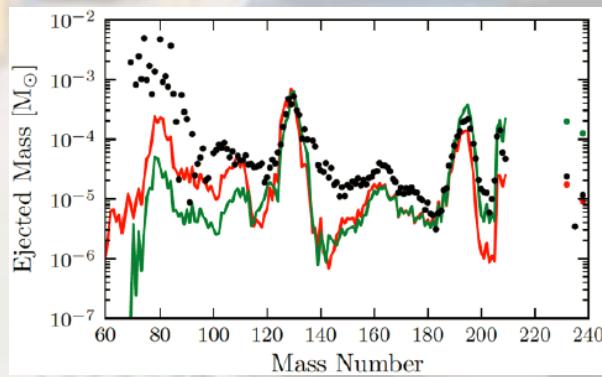
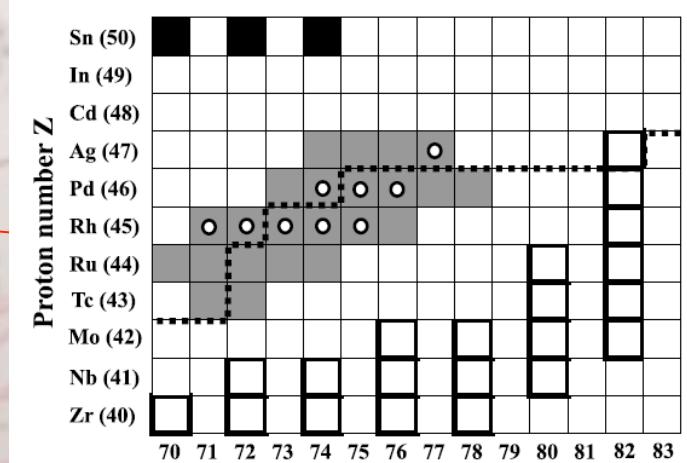
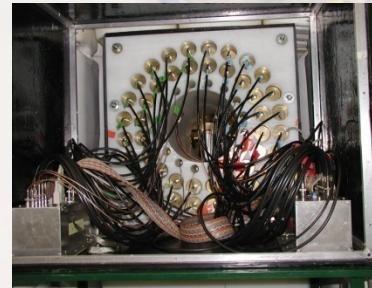
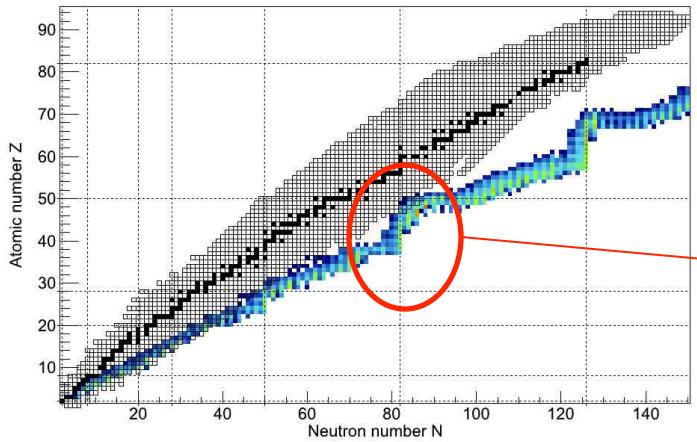
Ejemplos de experimentos

NERO @ NSCL-MSU

PHYSICAL REVIEW C 73, 035801 (2006)

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

F. Montes,^{1,2,4} A. Estrade,^{1,2,4} P. T. Hosmer,^{1,2,4} S. N. Liddick,^{3,4,*} P. F. Mantica,^{3,4} A. C. Morton,^{4,†} W. F. Mueller,⁴ J. Ouellette,^{1,2,4} E. Pellegrini,^{2,4} P. Santi,^{4,‡} H. Schatz,^{1,2,4} A. Stoltz,⁴ B. E. Tomlin,^{3,4} O. Arndt,^{5,6} K.-L. Kratz,^{5,6} B. Pfeiffer,^{5,6} P. Reeder,⁷ W. B. Walters,⁸ A. Aprahamian,⁹ and A. Wöhr⁹



r -process model
calculation with
new Pn's:

$$N_n = 5 \cdot 10^{23} \text{ cm}^{-3}$$

$$T_9 = 1.35 \text{ K}$$

$$\tau = 2 \text{ s}$$

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

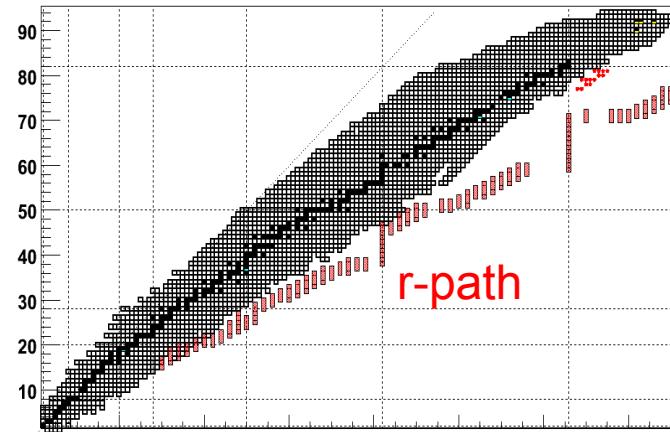
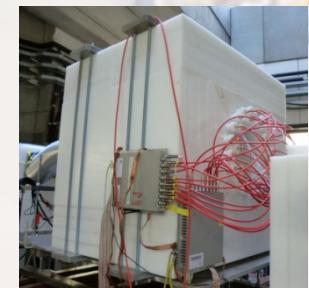
Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

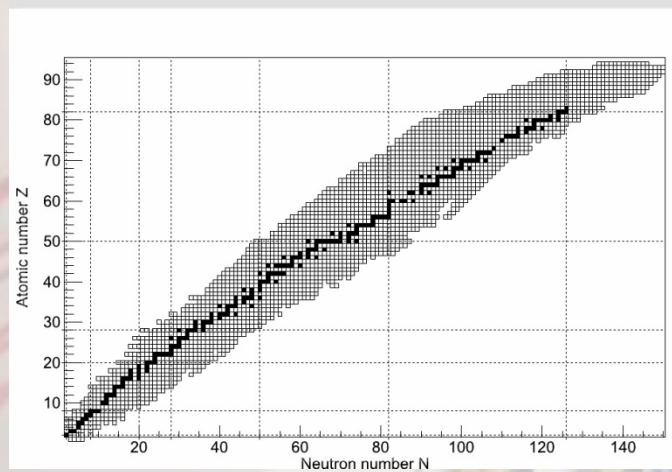
Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r

β -delayed neutron emission measurements around the third r-process abundance peak

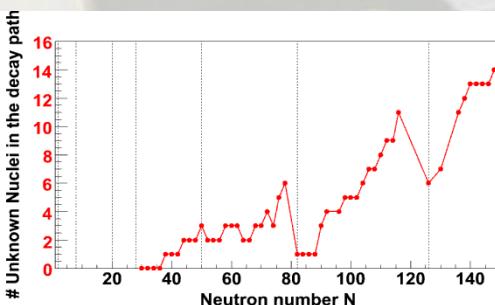
R. Caballero-Folch¹, C. Domingo-Pardo², J.L. Taín², G. Cortés¹,
J. Agramunt², A. Algora^{2,3}, F. Ameil⁴, Y. Ayyad⁵, J. Benlliure⁵,



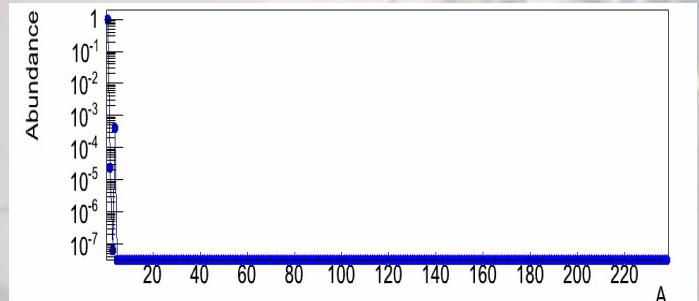
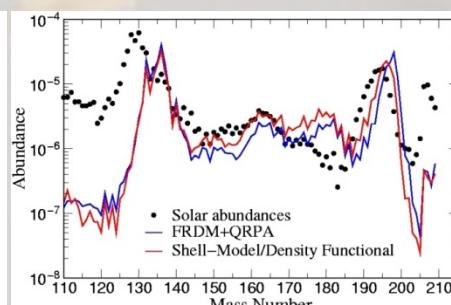
State of the art SNe simulations do NOT yield the thermo-conditions (entropy) for the reproduction of the third r-process peak \rightarrow SNe are not the r-process environment?



“Ignorance”-Curve



Effect of half-lives:



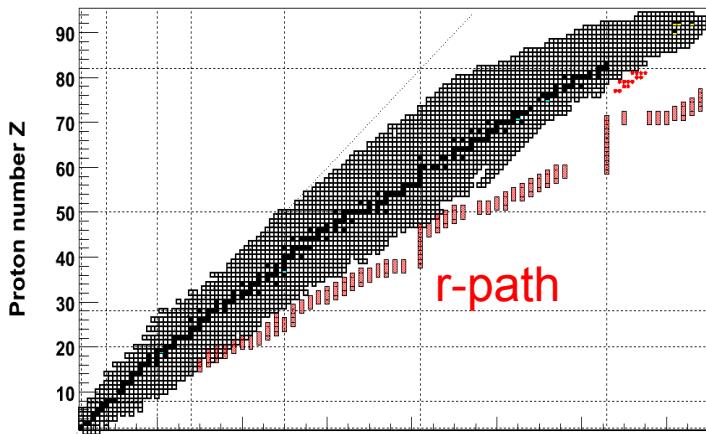
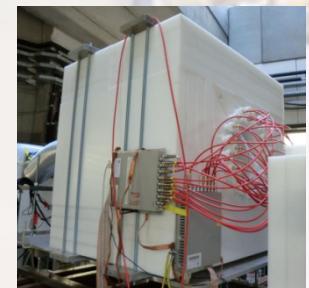
Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

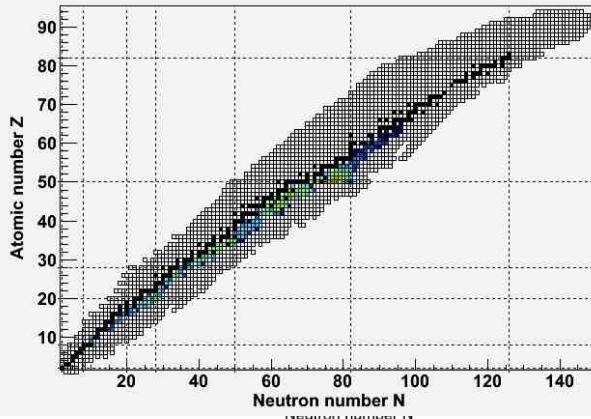
Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r

β -delayed neutron emission measurements around the third r-process abundance peak

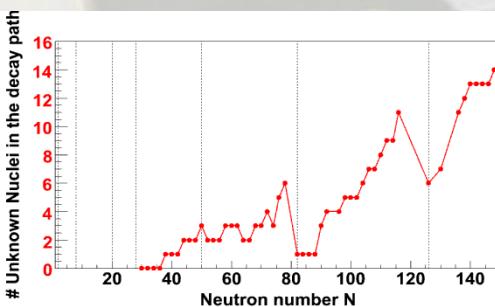
R. Caballero-Folch¹, C. Domingo-Pardo², J.L. Taín², G. Cortés¹,
J. Agramunt², A. Algora^{2,3}, F. Ameil⁴, Y. Ayyad⁵, J. Benlliure⁵,



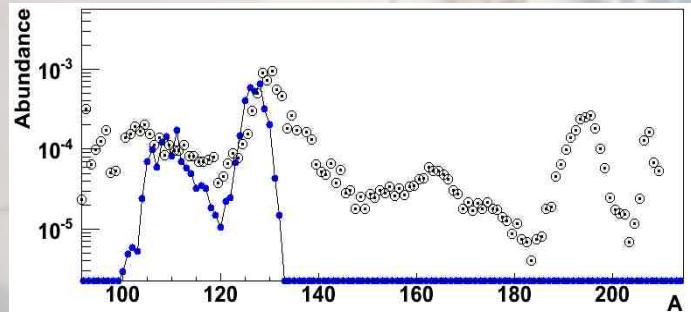
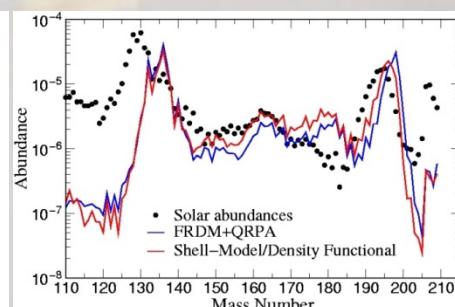
State of the art SNe simulations do NOT yield the thermo-conditions (entropy) for the reproduction of the third r-process peak \rightarrow SNe are not the r-process environment?



“Ignorance”-Curve



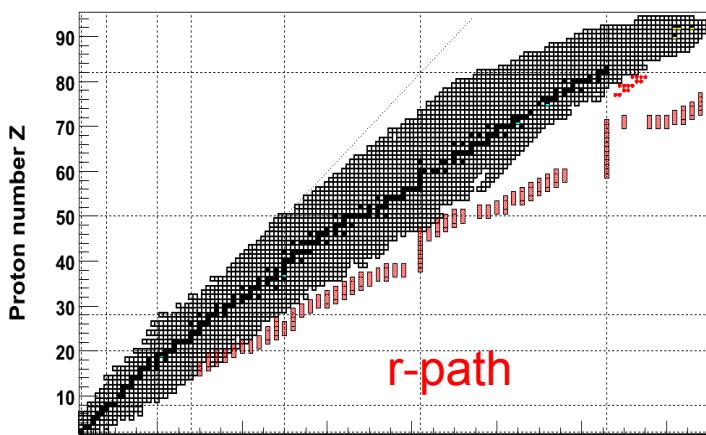
Effect of half-lives:



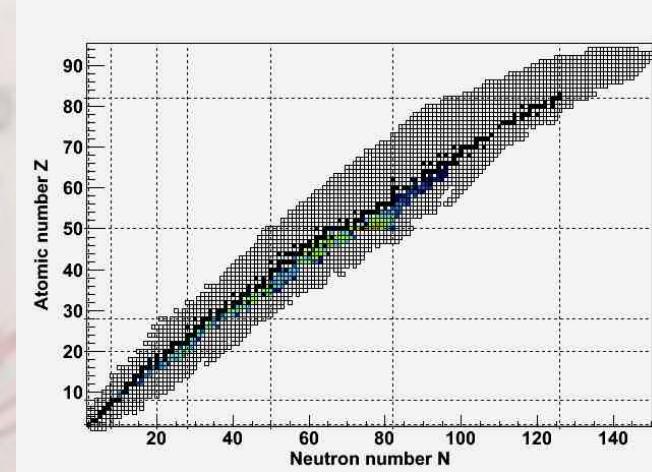
Ejemplos de experimentos:

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

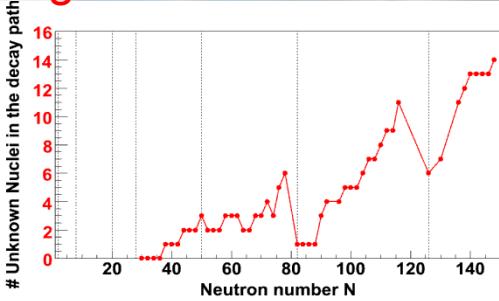
- Explosive nucleosynthesis and the r-process around the third abundance peak



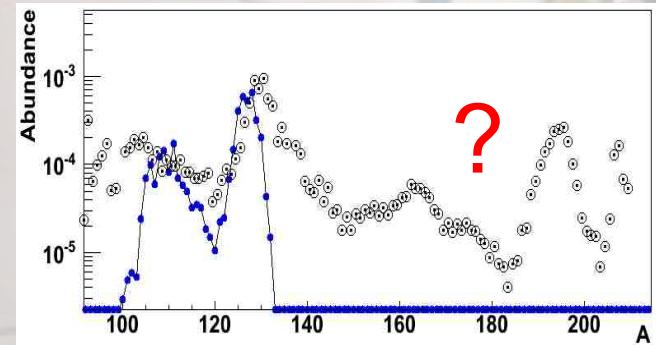
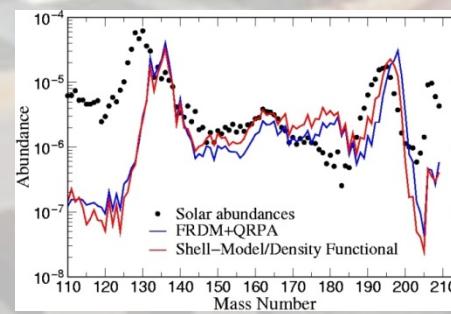
State of the art SNe simulations do NOT yield the thermo-conditions (entropy) for the reproduction of the third r-process peak → SNe are not the r-process environment?



“Ignorance”-Curve



Effect of half-lives:

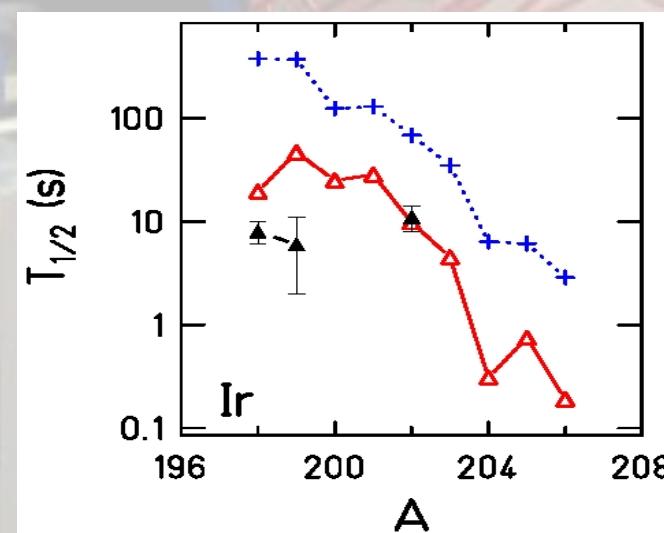
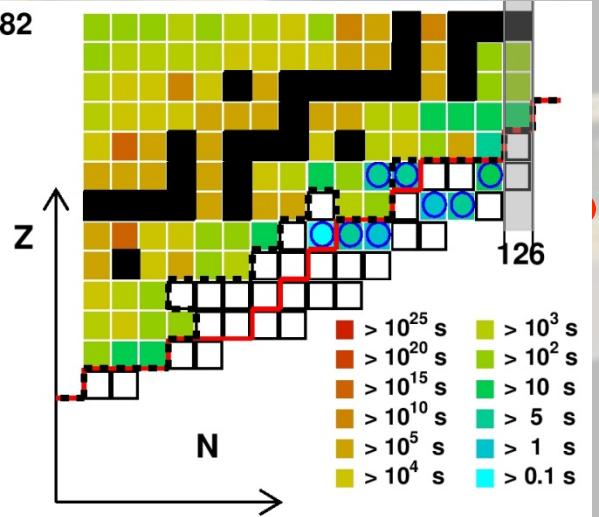
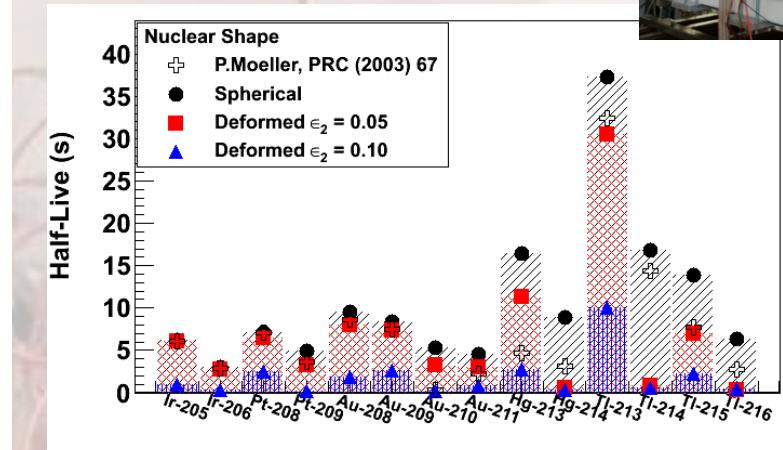
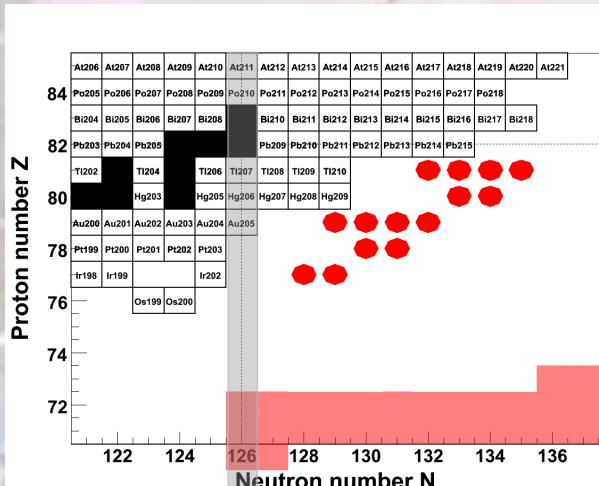
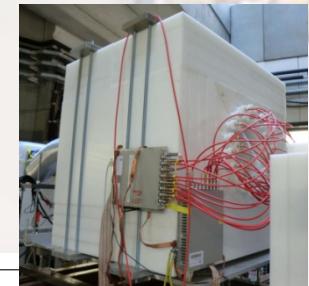


Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

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

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

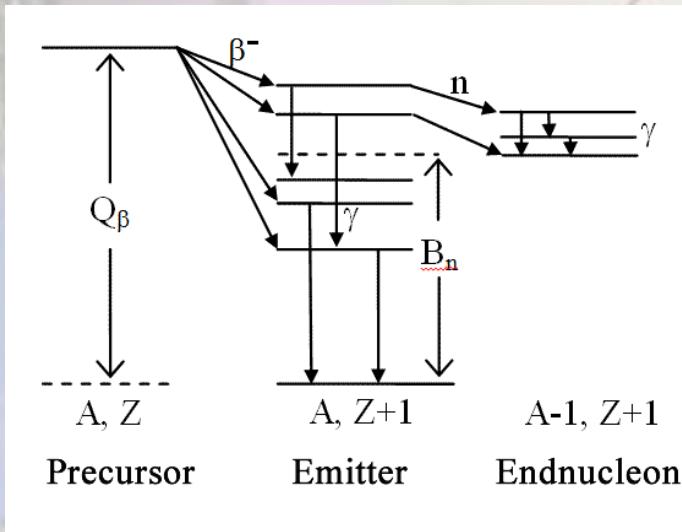


Ejemplos de experimentos:

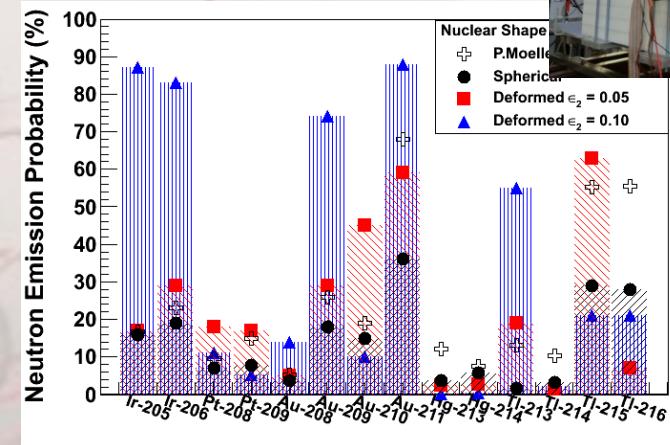
BELEN-30 @ GSI

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:



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

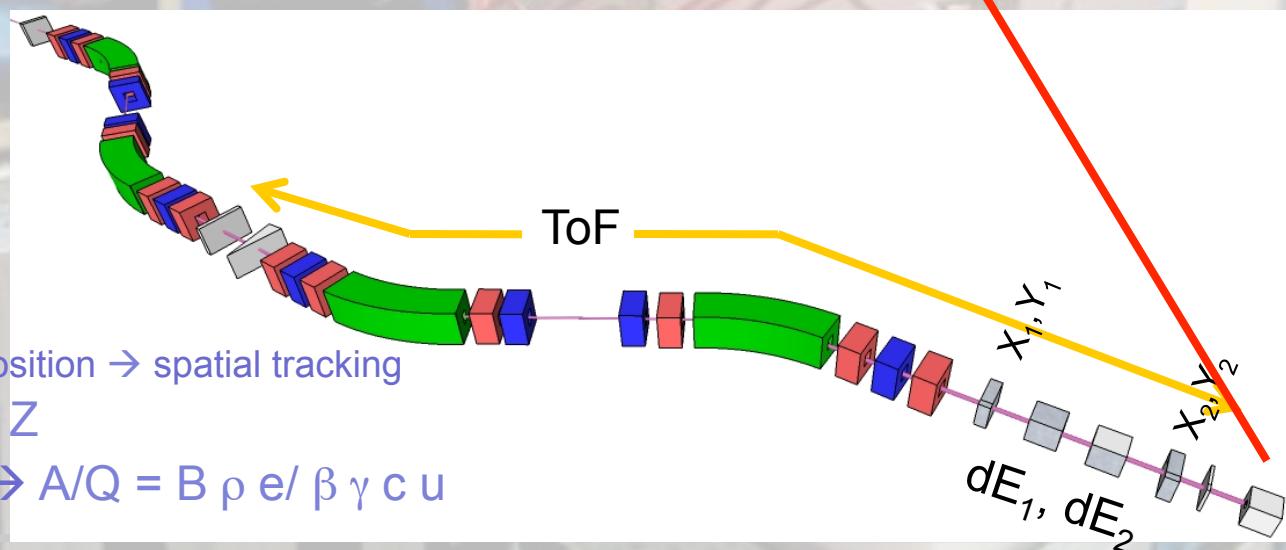
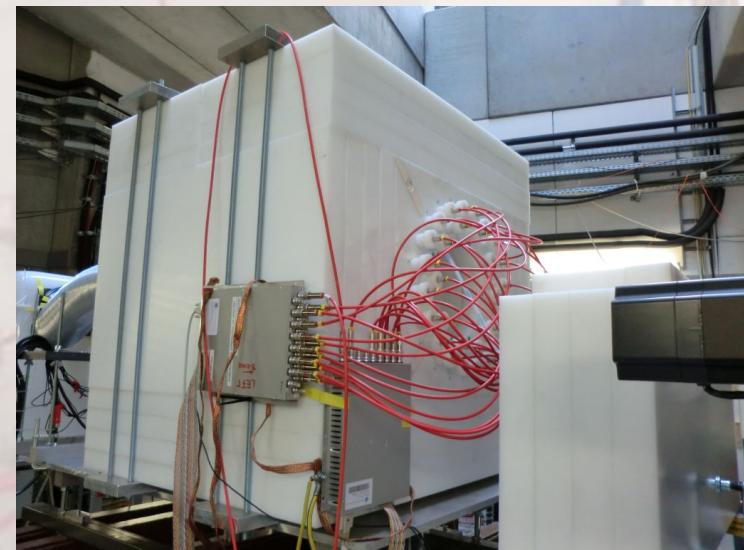
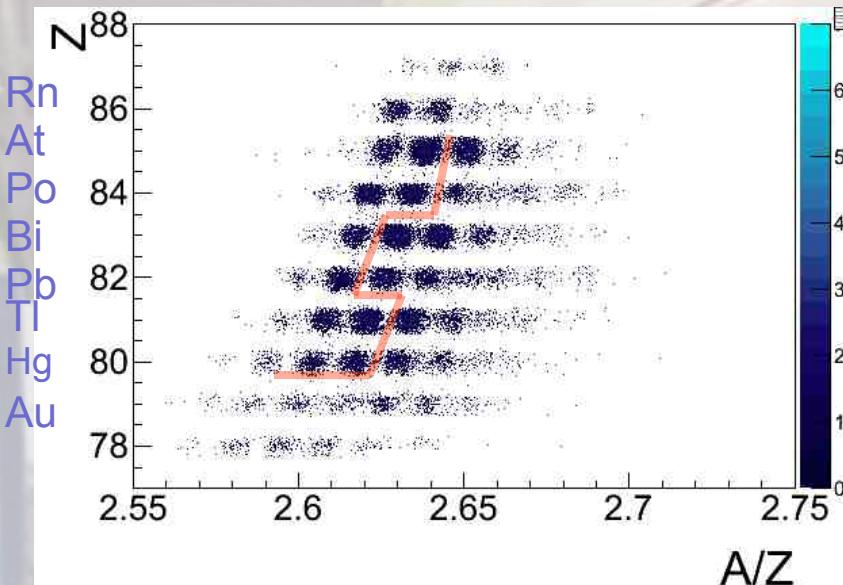


β -delayed neutron emission has a twofold effect on the r-process:

1. Increases the neutron density
2. Shifts the pattern towards lower A

Ejemplos de experimentos:

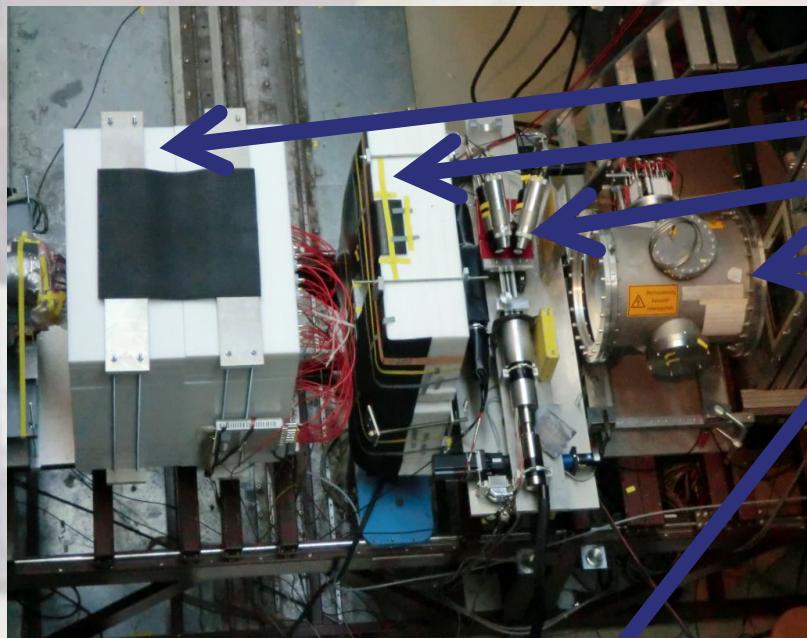
Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r



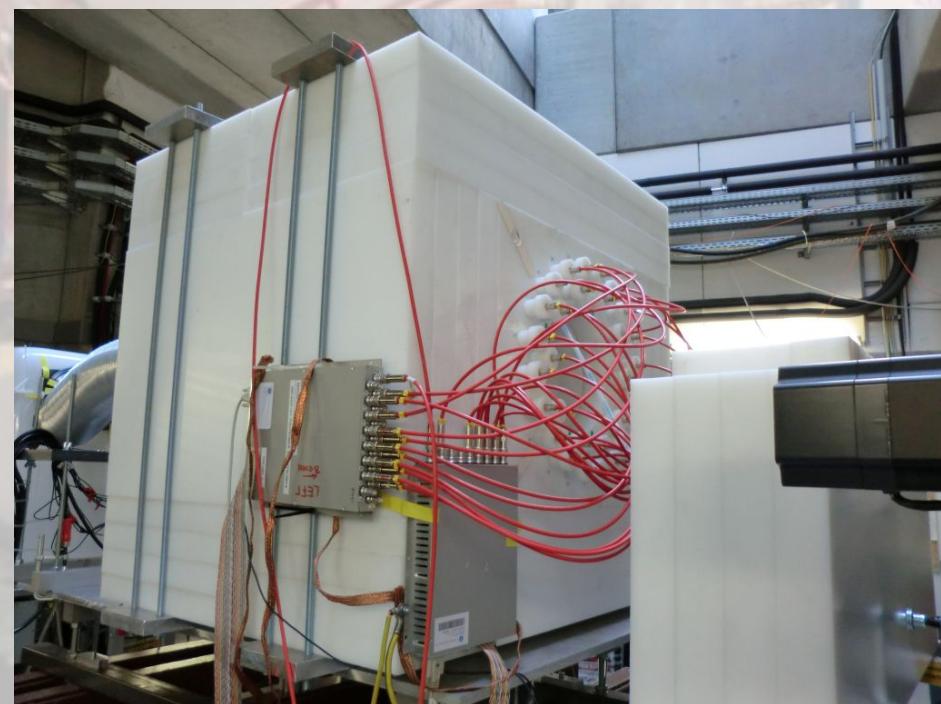
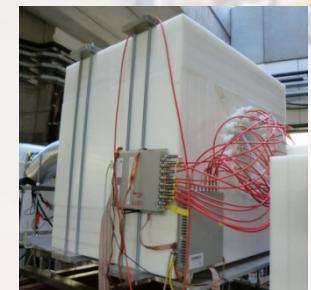
Ejemplos de experimentos:

BELEN-30 @ GSI

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

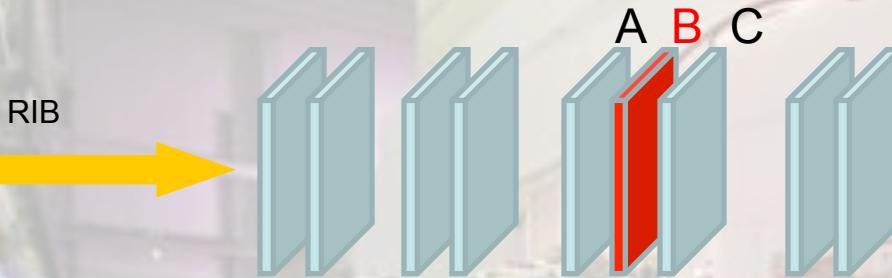


BELEN-30
Polyethylene shielding
Isomer tagger
MUSIC
SIMBA implantation det

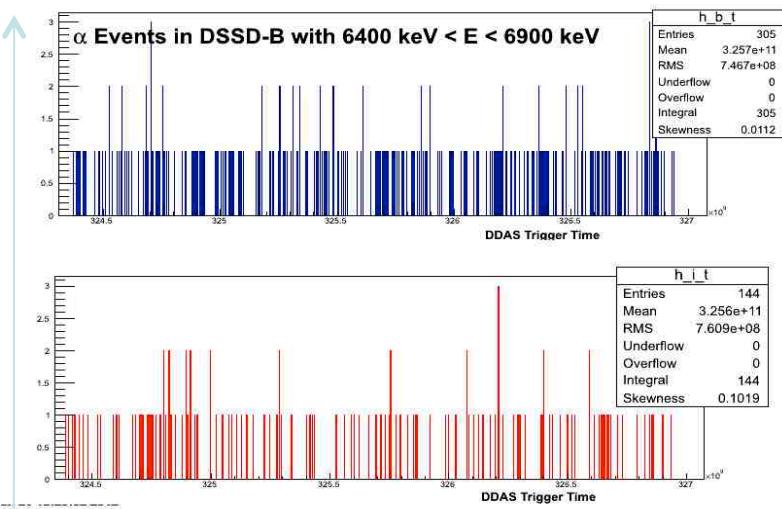


Ejemplos de experimentos:

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



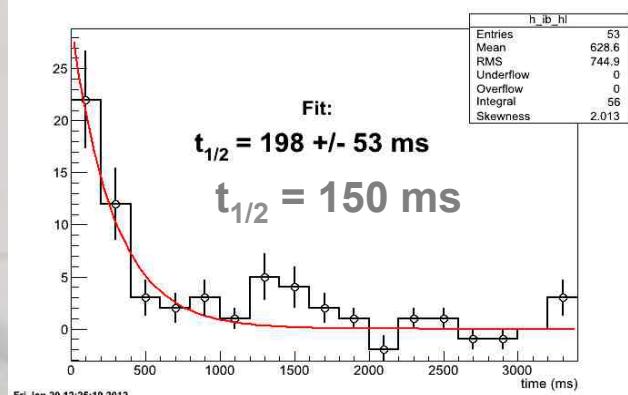
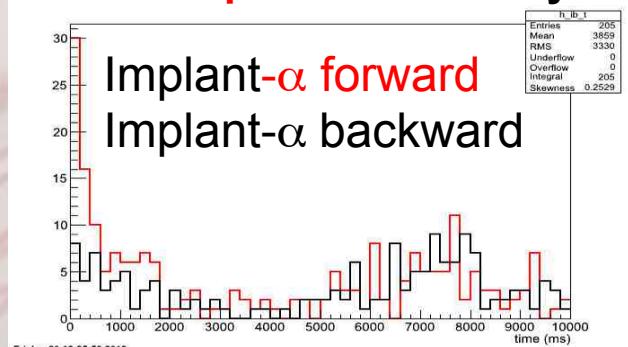
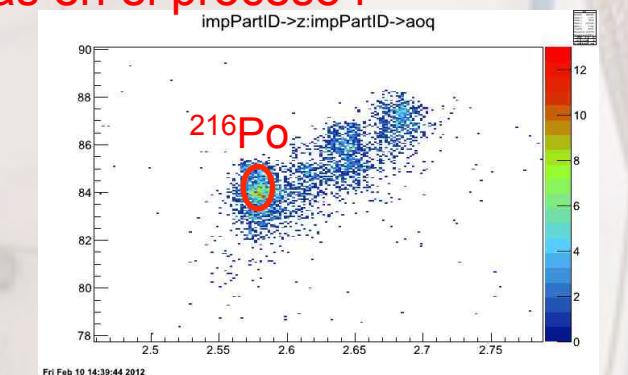
Time distributions of **implants** and decays:



- PID Confirmation
- Validation of time-correlation between implant and decay events
- Proper performance of SIMBA

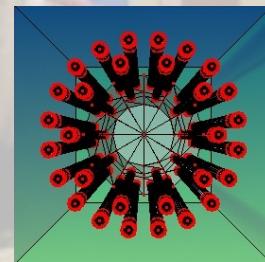
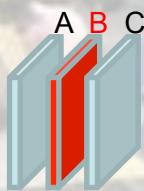
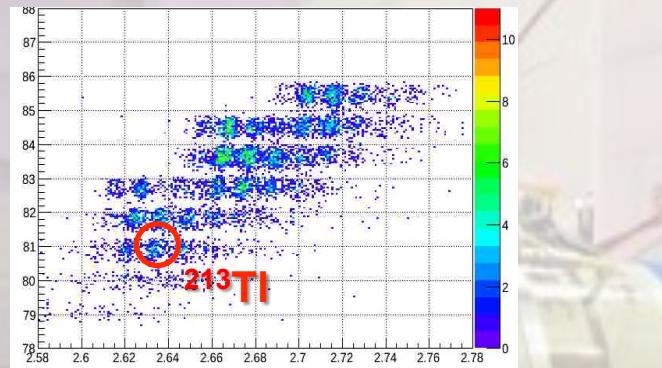
Time (a.u.)

Time correlations of **implants** and decays:

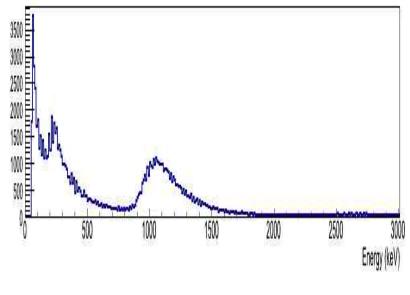


Ejemplos de experimentos:

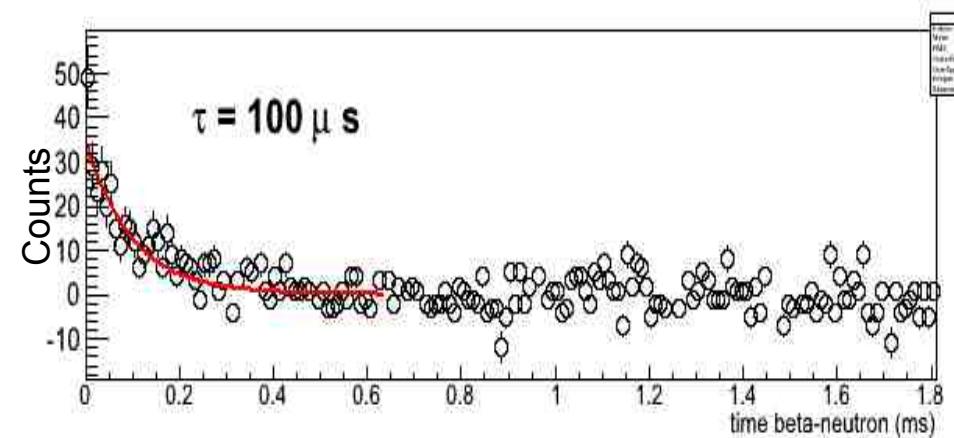
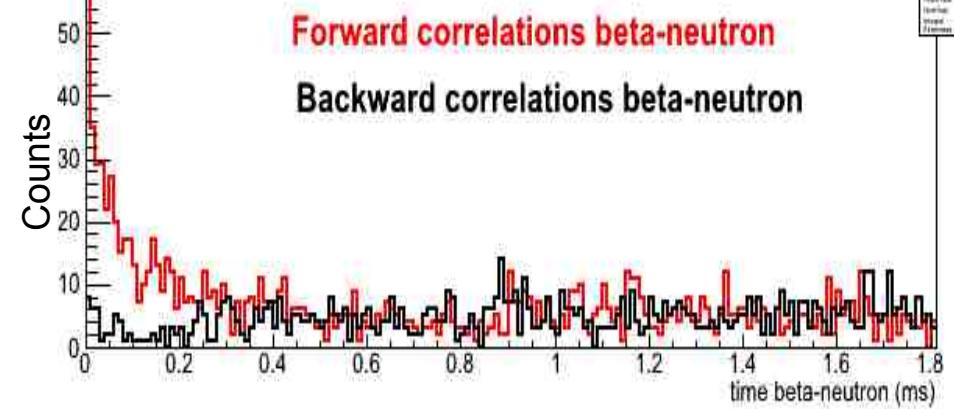
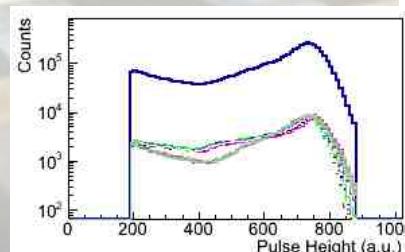
Estudio de la formación del tercer pico de abundancias en el proceso r



β -spectrum



n -spectrum

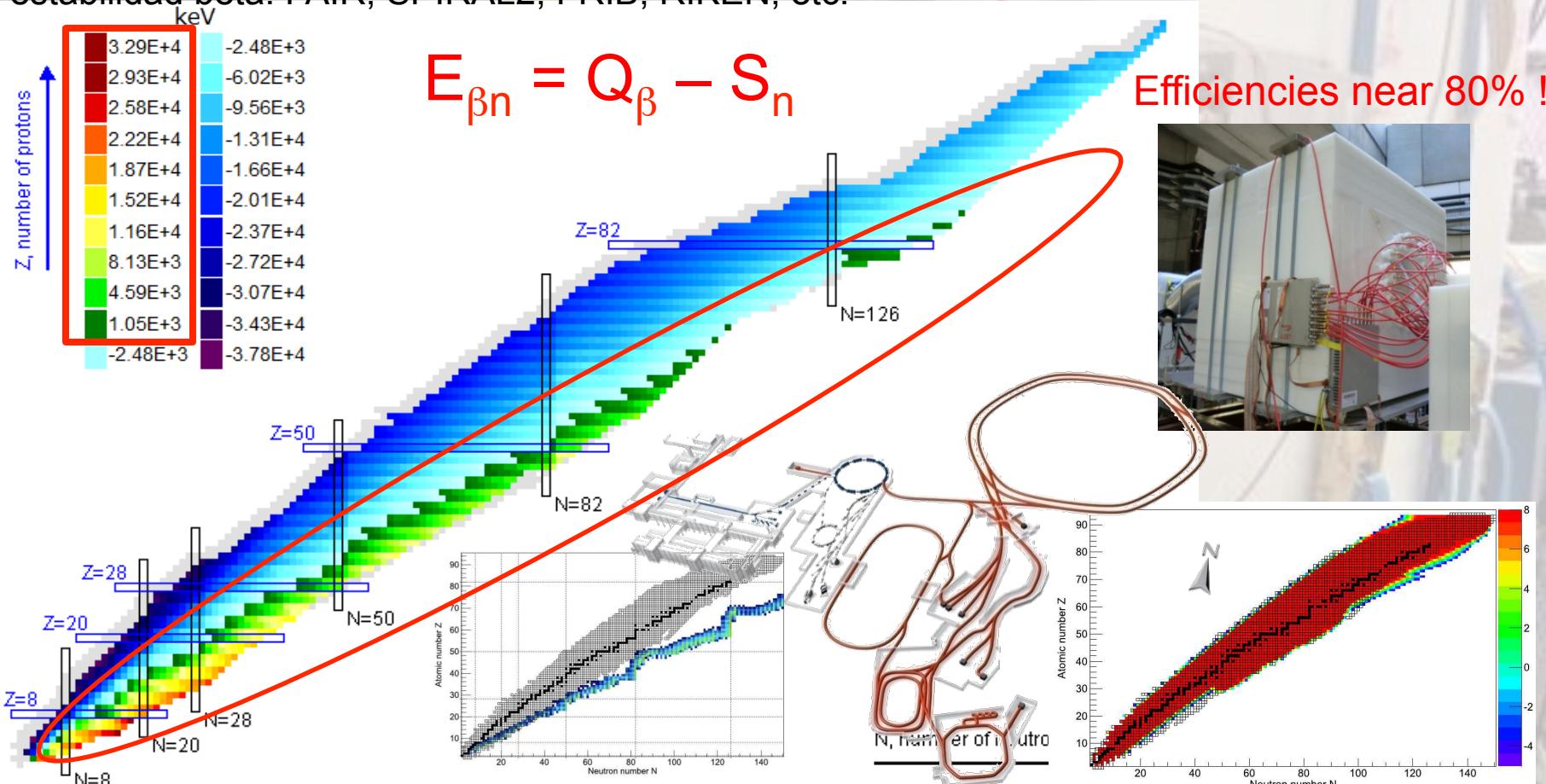


Resumen

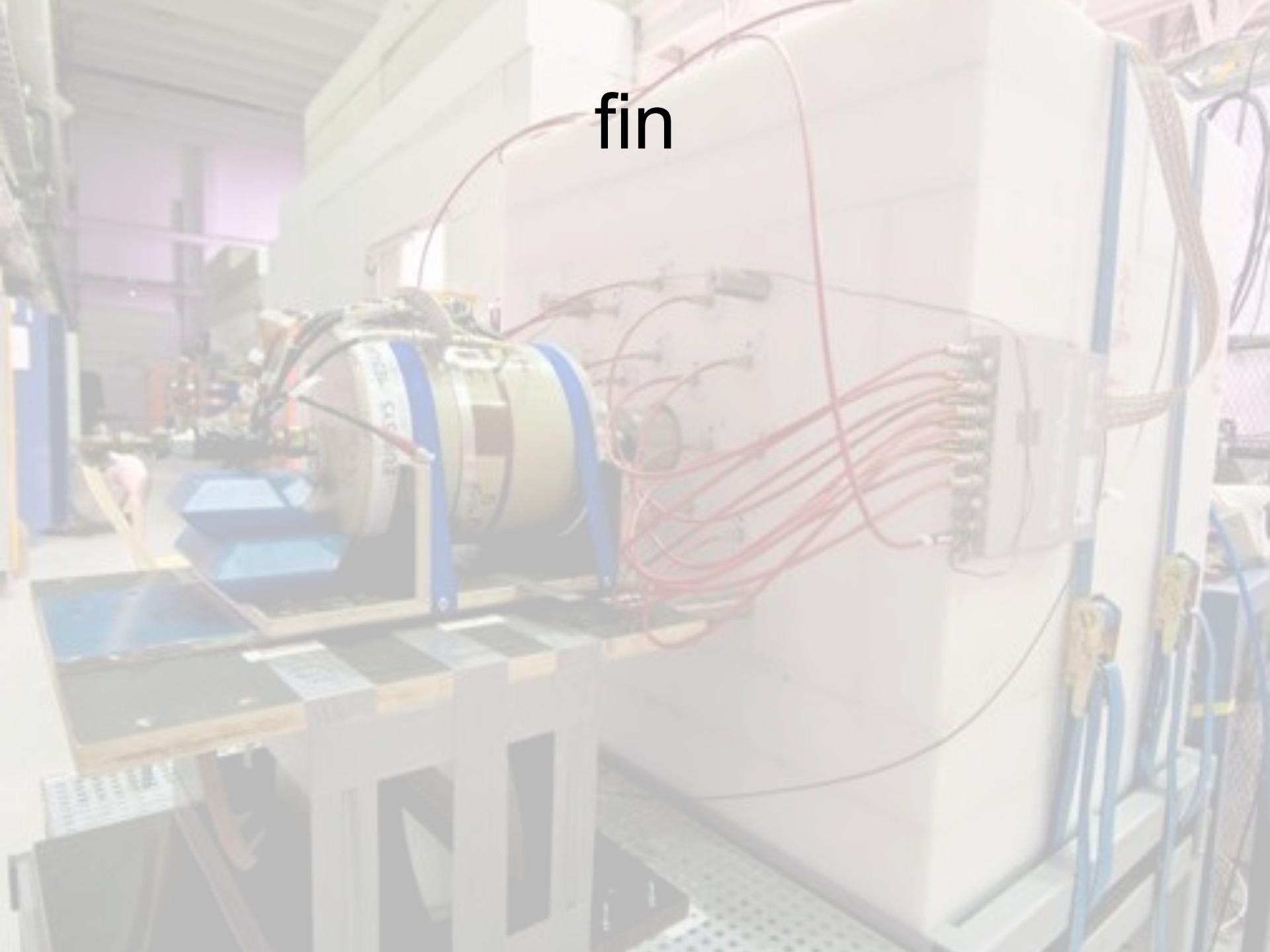
- El proceso de emisión de neutrones retardados, es un efecto que puede tener lugar siempre que esté energéticamente permitido, es decir, cuando $Q_\beta - S_n > 0$.
- En los casos en los que es energéticamente factible, la probabilidad emisión retardada de neutrones depende de la distribución energética del β -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 nucleo-síntesis 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 β - de la desintegración) como los neutrones.
- El método más común para la medida de NR consiste en el uso de contadores gaseosos (^3He y/o ^{10}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.

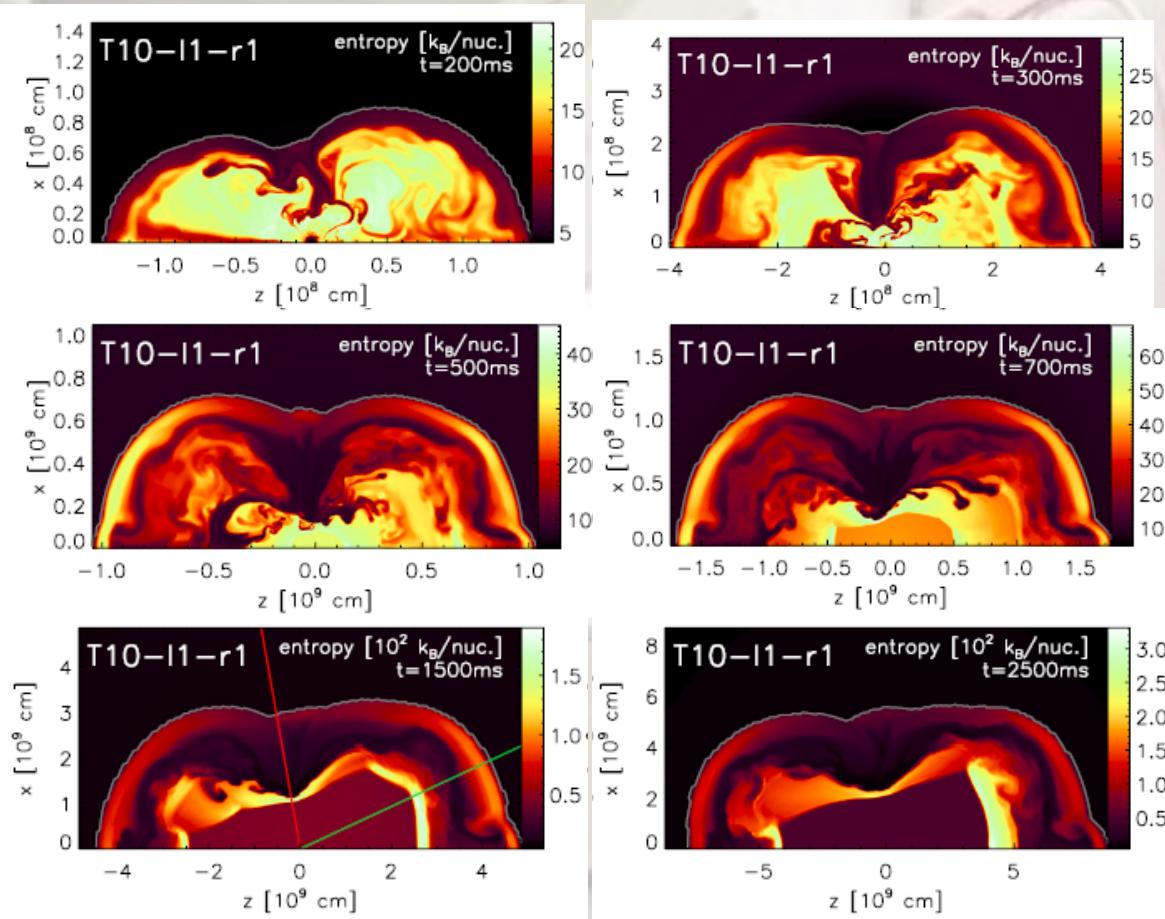
Perspectiva:

- La mayoría de los núcleos que quedan por descubrir son emisores de neutrones retardados !
- 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.

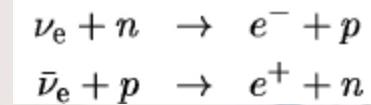


fin





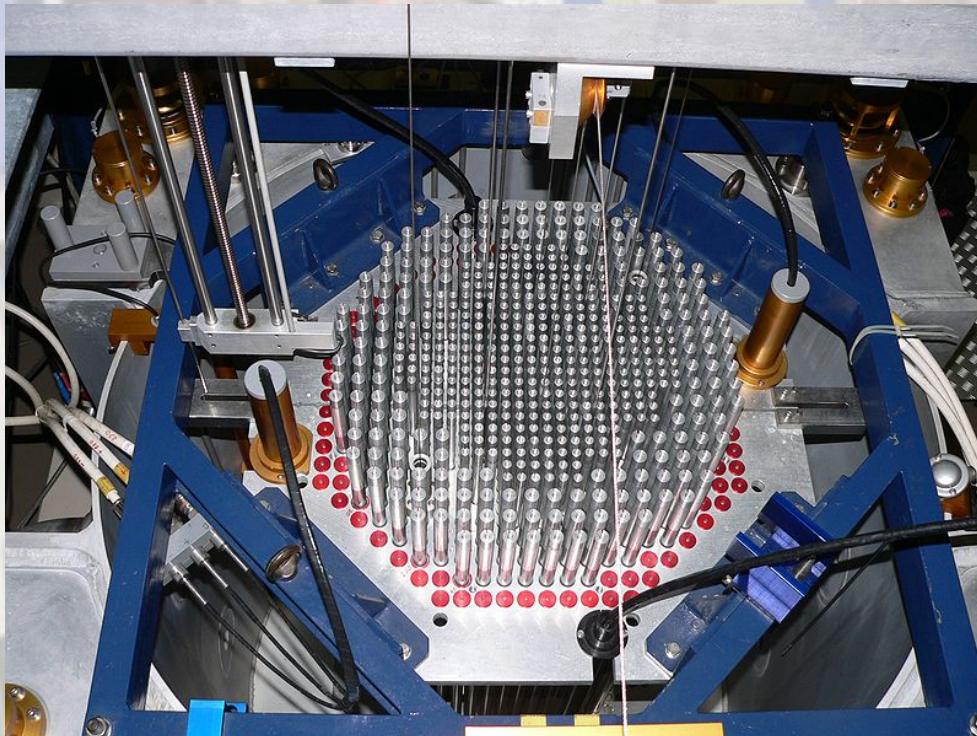
SN con ν -driven Wind



Producción de energía por fisión nuclear

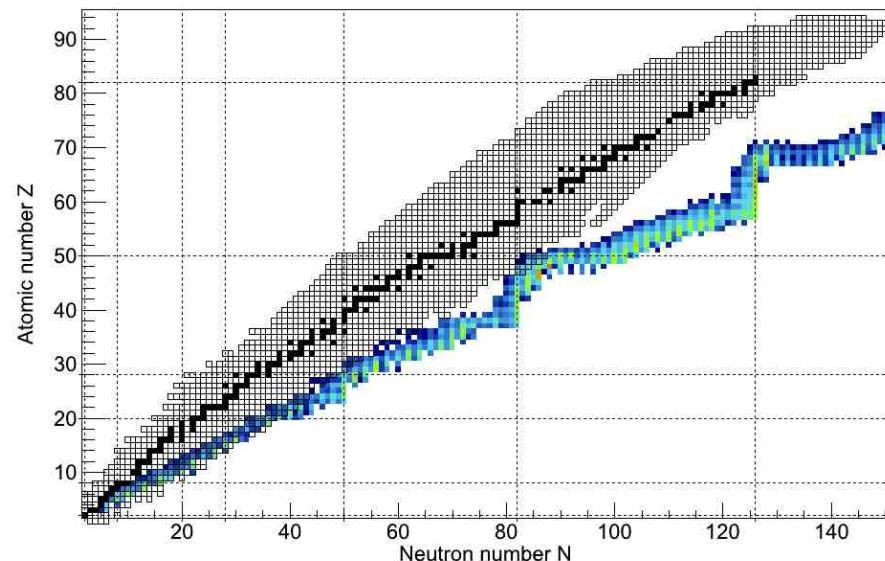
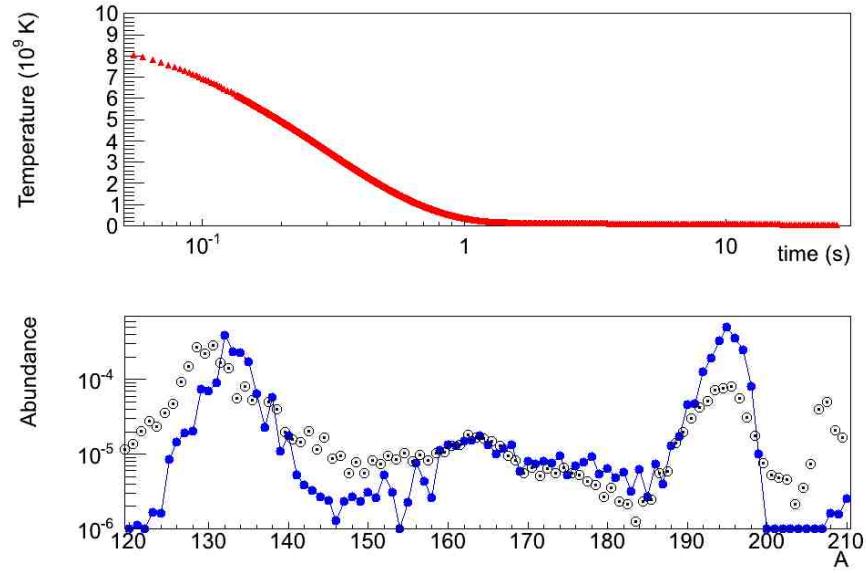
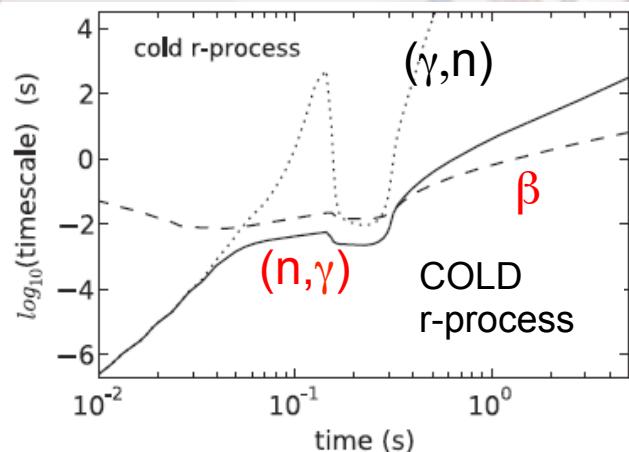
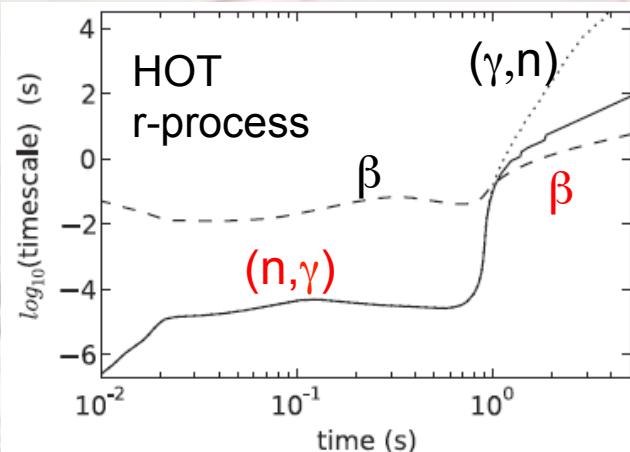
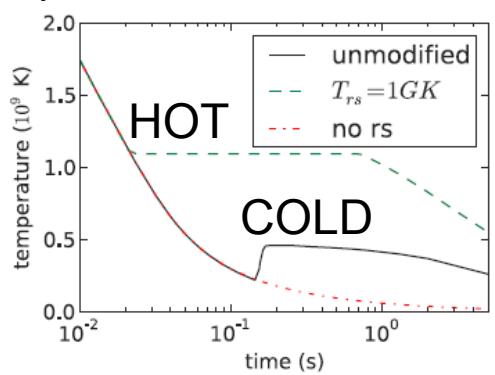
La producción de energía en un reactor se ajusta controlando el número de neutrones disponibles para producir fisión.

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 suprime 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



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

