

Estrellas de neutrones, ondas gravitatorias y kilonovas: la producción de oro en el Universo

Gabriel Martínez-Pinedo

Arquitectura Cósmica VI, FVEA, 29 Octubre 2018, Valencia



GW170817: una gran revelación del cosmos

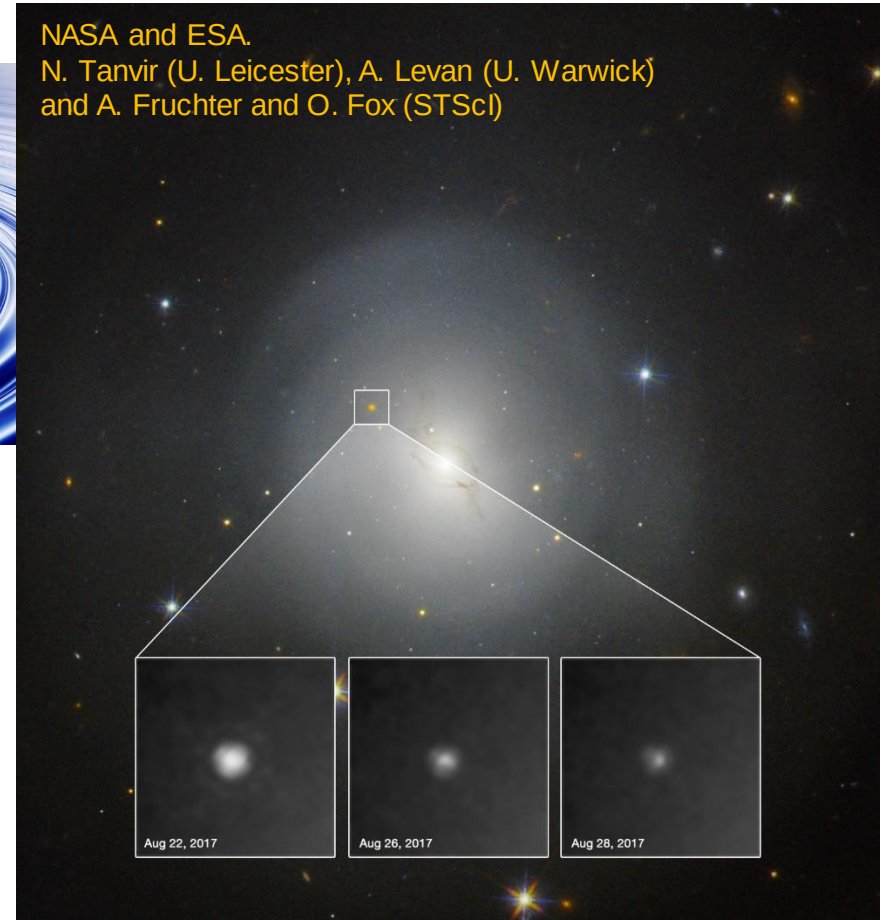
Primera detección de ondas gravitatorias
procedentes de una colisión de estrellas
de neutrones



Primera evidencia de la producción
de oro en el Universo.

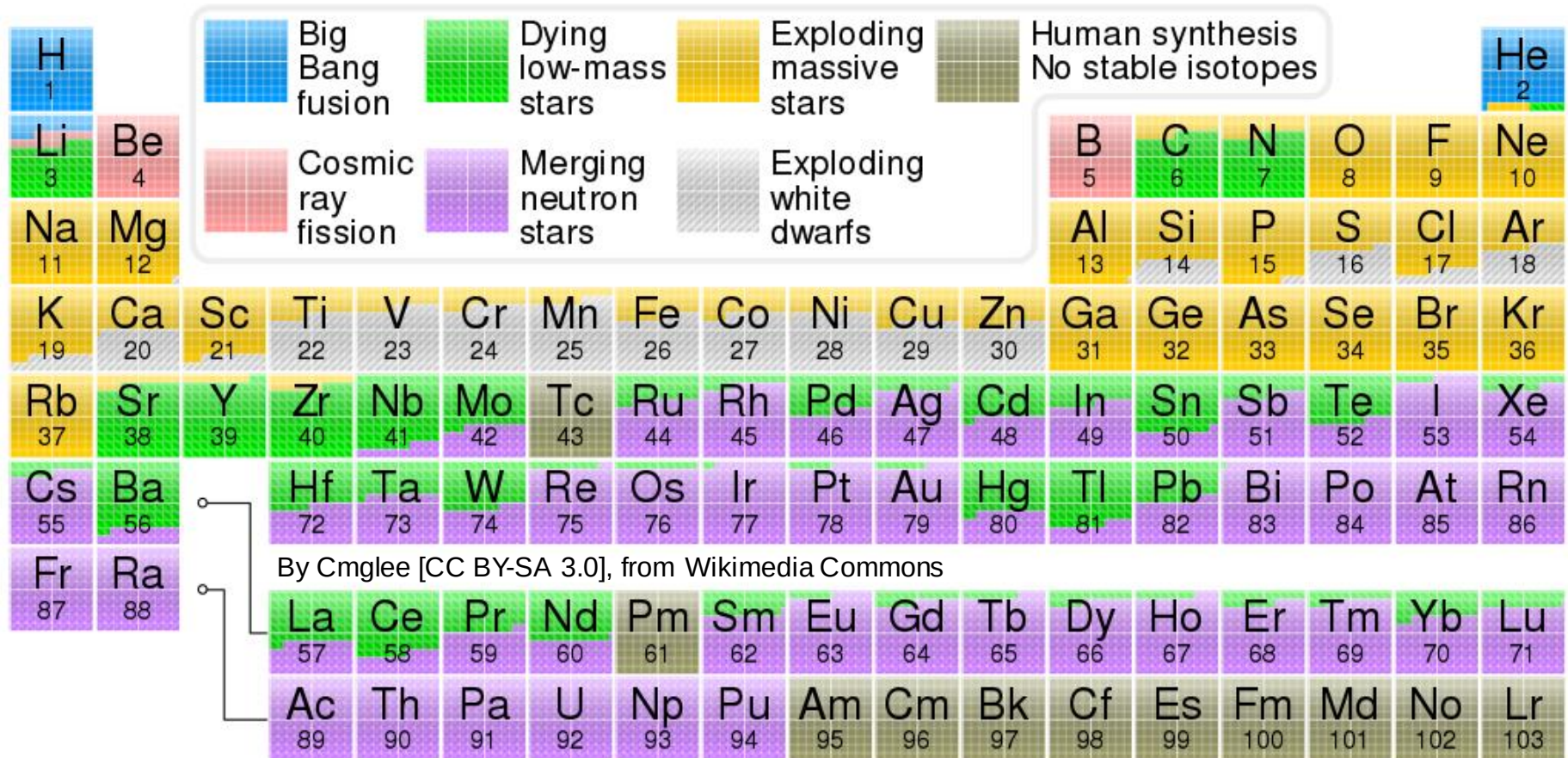
Primera observación de una kilonova

NASA and ESA.
N. Tanvir (U. Leicester), A. Levan (U. Warwick)
and A. Fruchter and O. Fox (STScI)



- Introducción a la nucleosíntesis
- Evolución estelar: formación de estrellas de neutrones
- Sistemas binarios: emisión de ondas gravitatorias
- Colisión de estrellas de neutrones:
 - Nucleosíntesis de elementos pesados
 - Señal electromagnética: kilonova
- Conclusiones

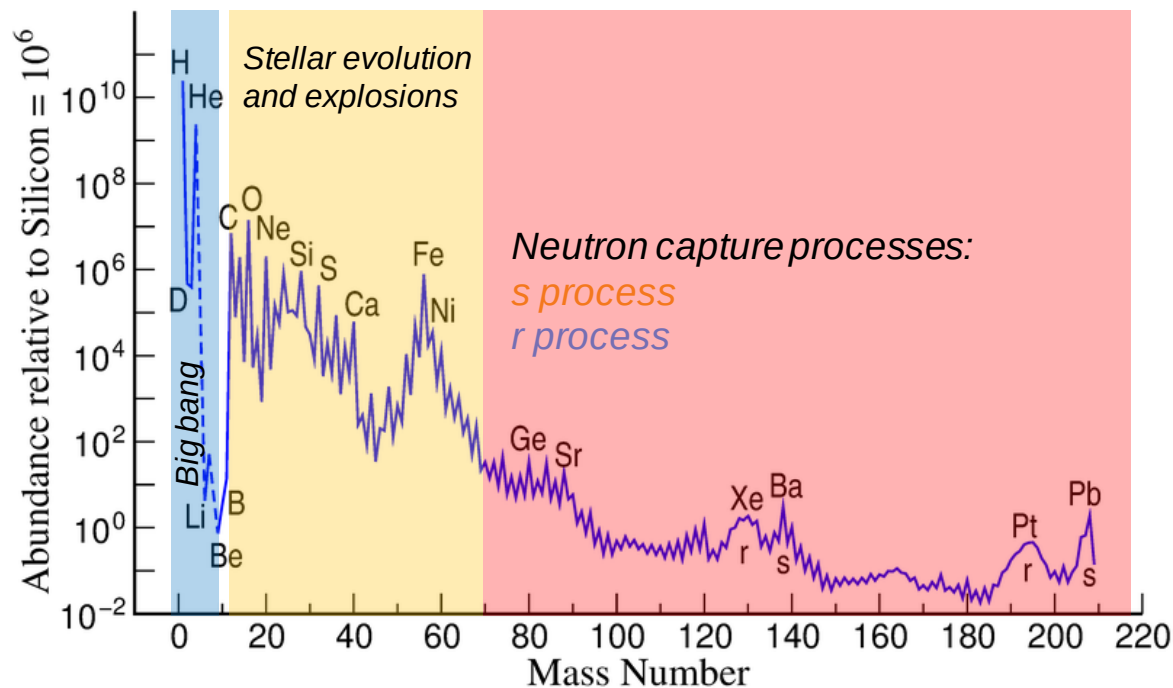
Los elementos según su origen



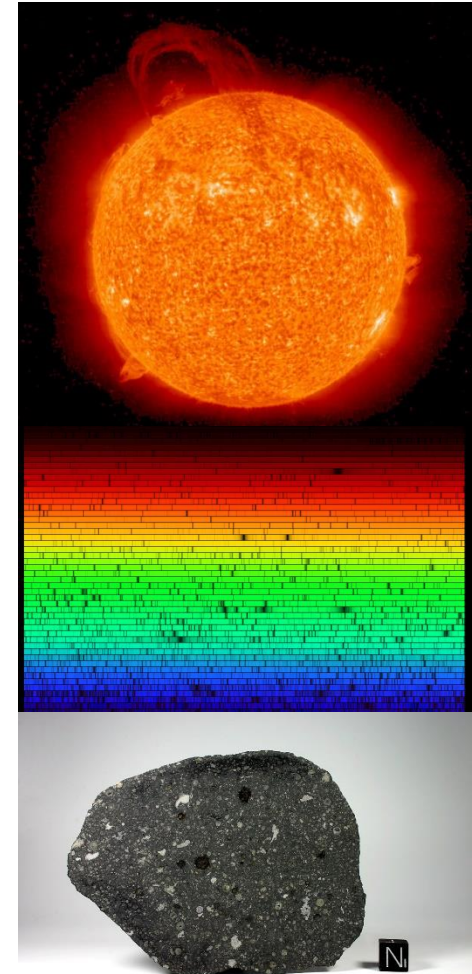
Elementos contienen varios isótopos: mismo número de protones diferente número de neutrones. Diferentes isótopos pueden tener distintos orígenes.

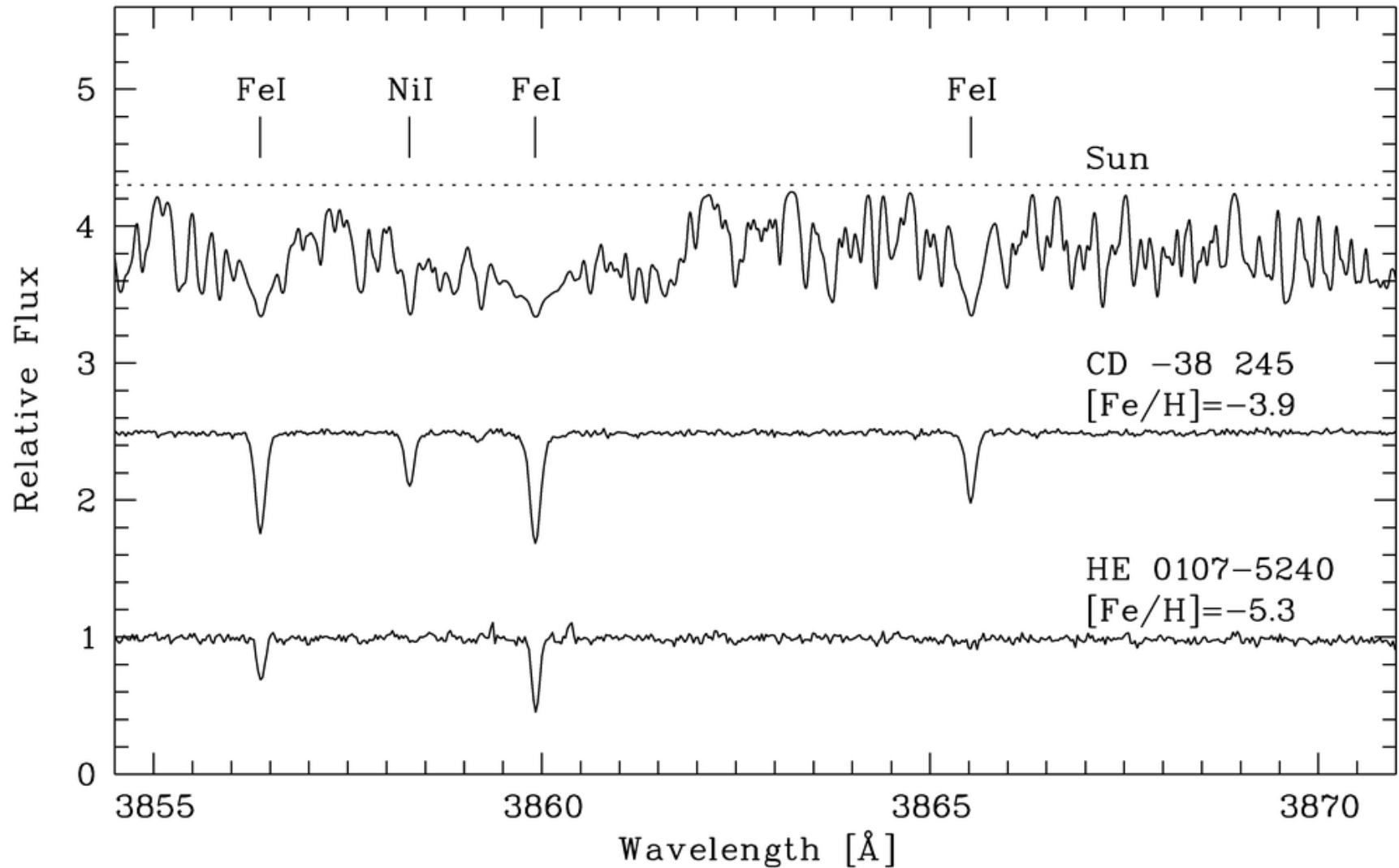
Abundancias Sistema solar

Fotosfera solar y meteoritos:
composición de la nube de gas donde se formó el Sol



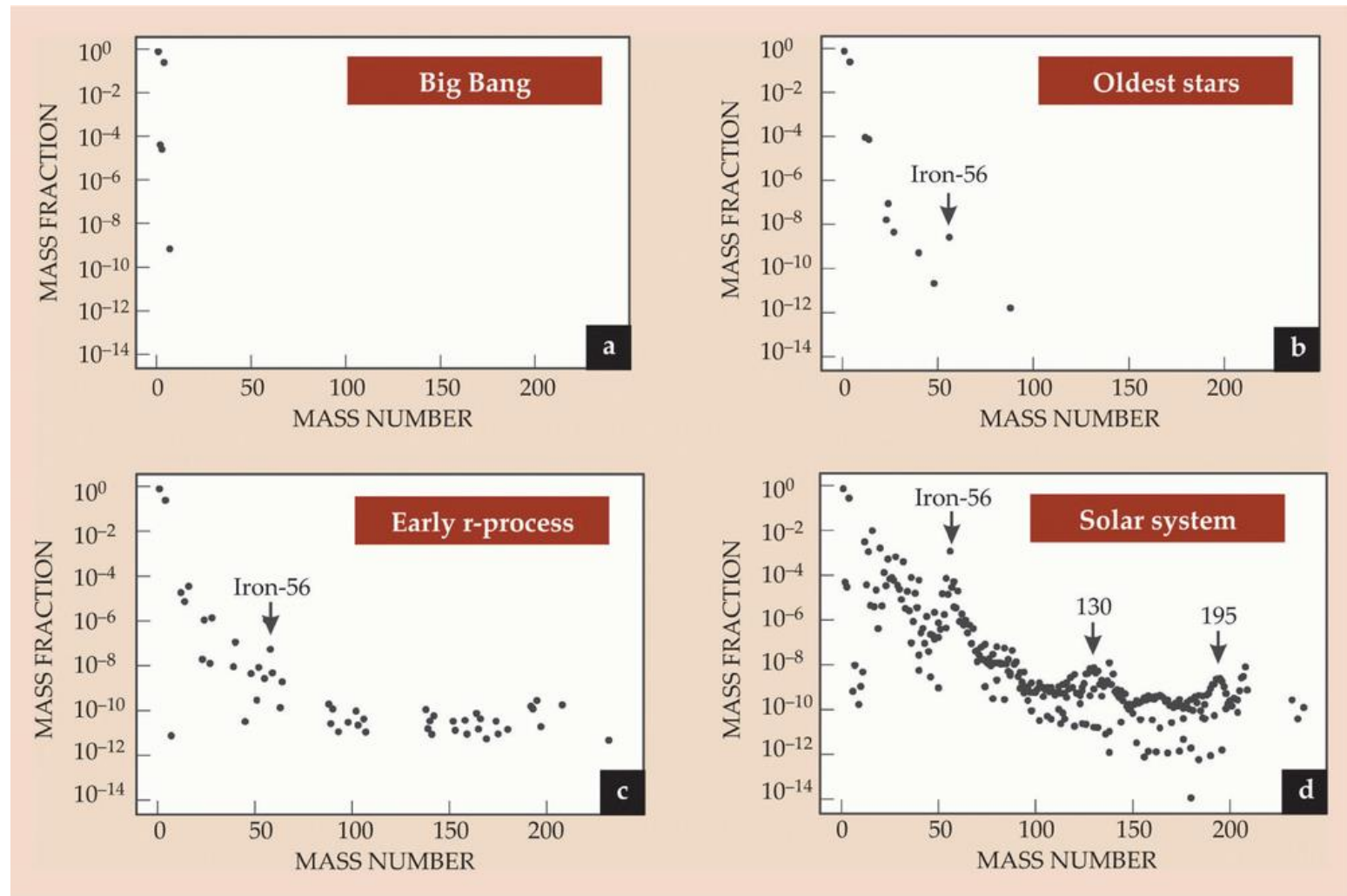
Señales de estructura y estabilidad nuclear.
Contribuciones de diferentes procesos de nucleosíntesis





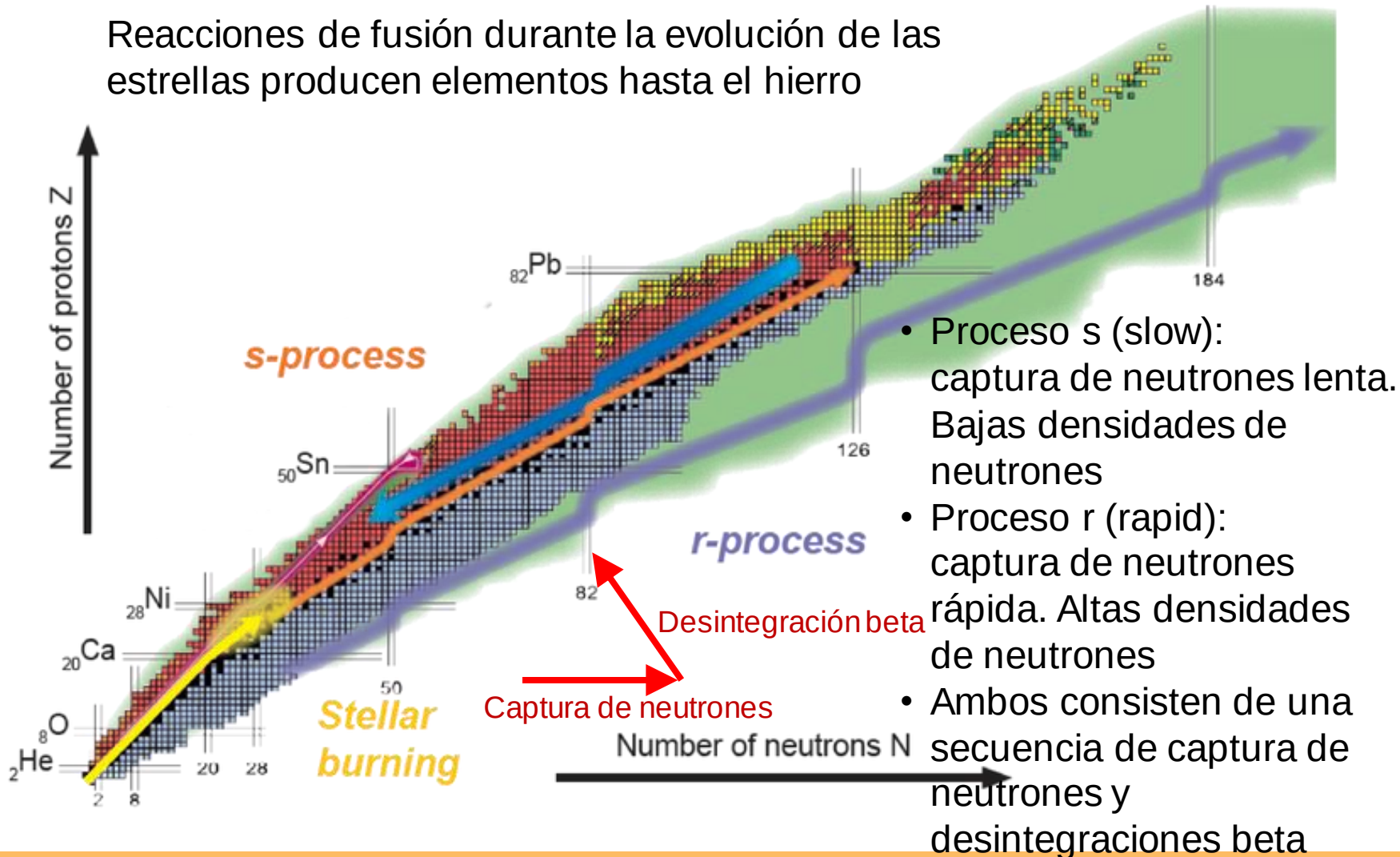
Evolución con el tiempo

La composición depende del momento en que se formó la estrella



Estrellas mas viejas tienen un menor contenido de metales

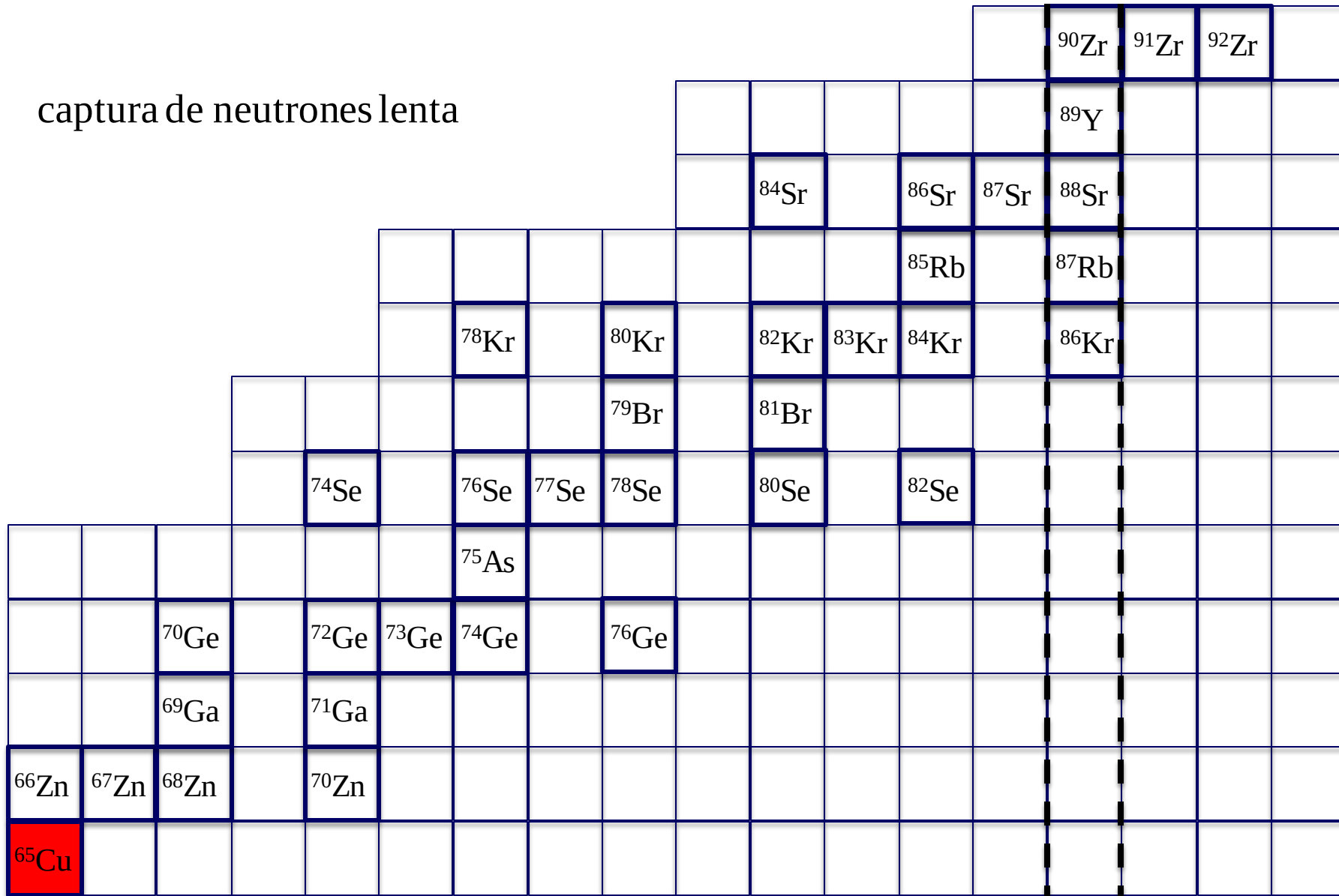
Reacciones de fusión durante la evolución de las estrellas producen elementos hasta el hierro



El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

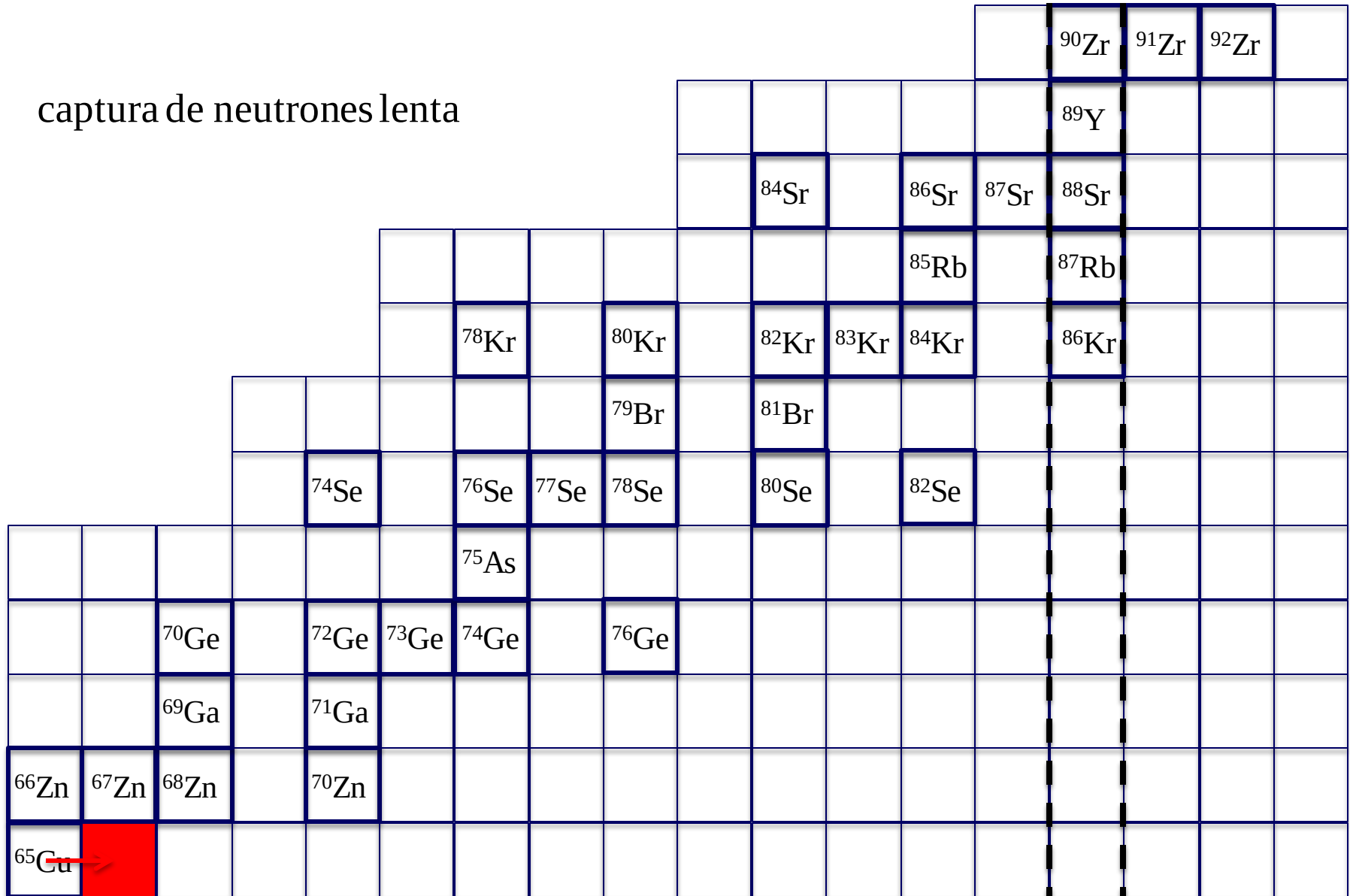


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

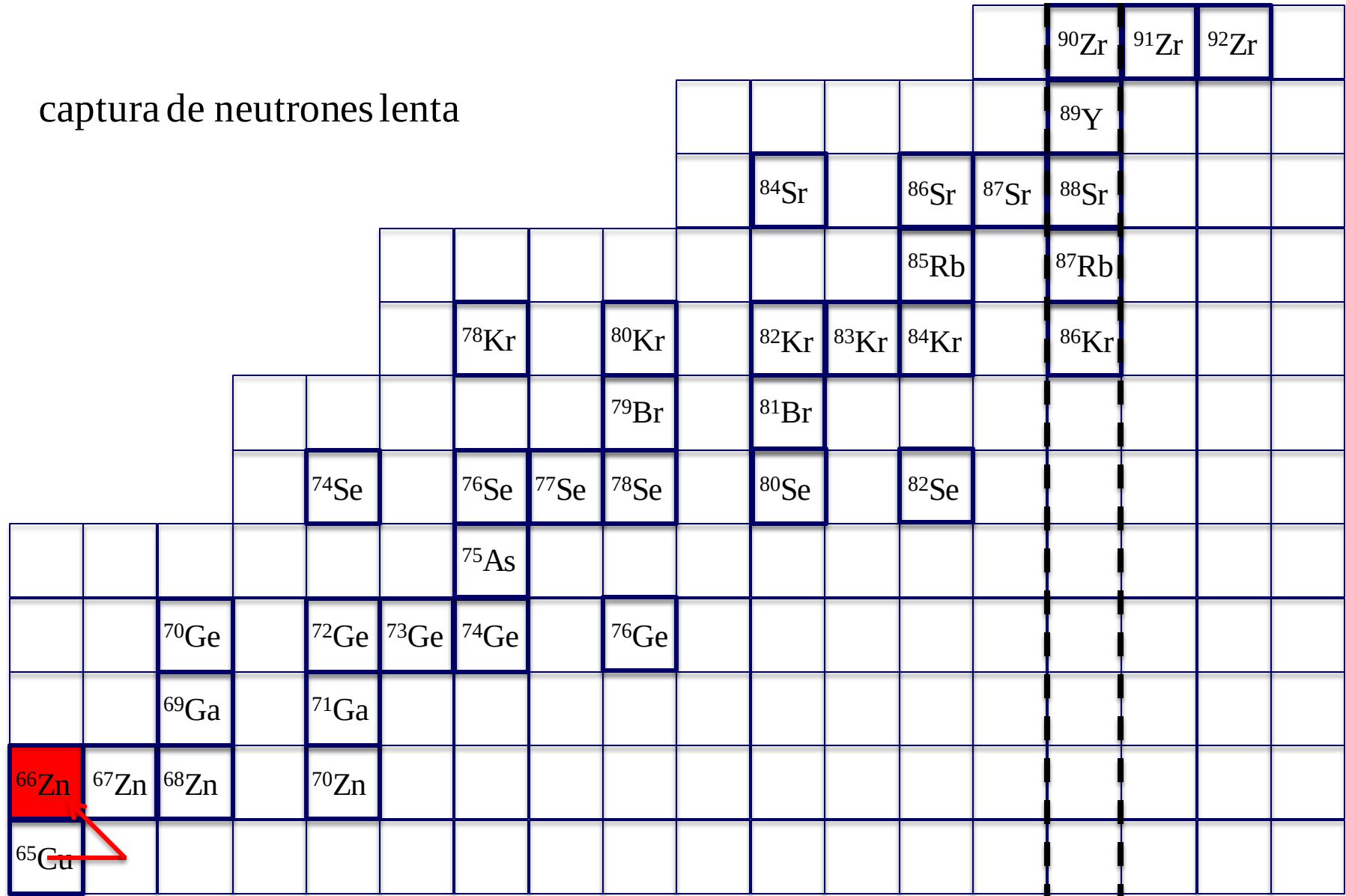
captura de neutrones lenta



capa cerrada de neutrones

El proceso s

captura de neutrones lenta

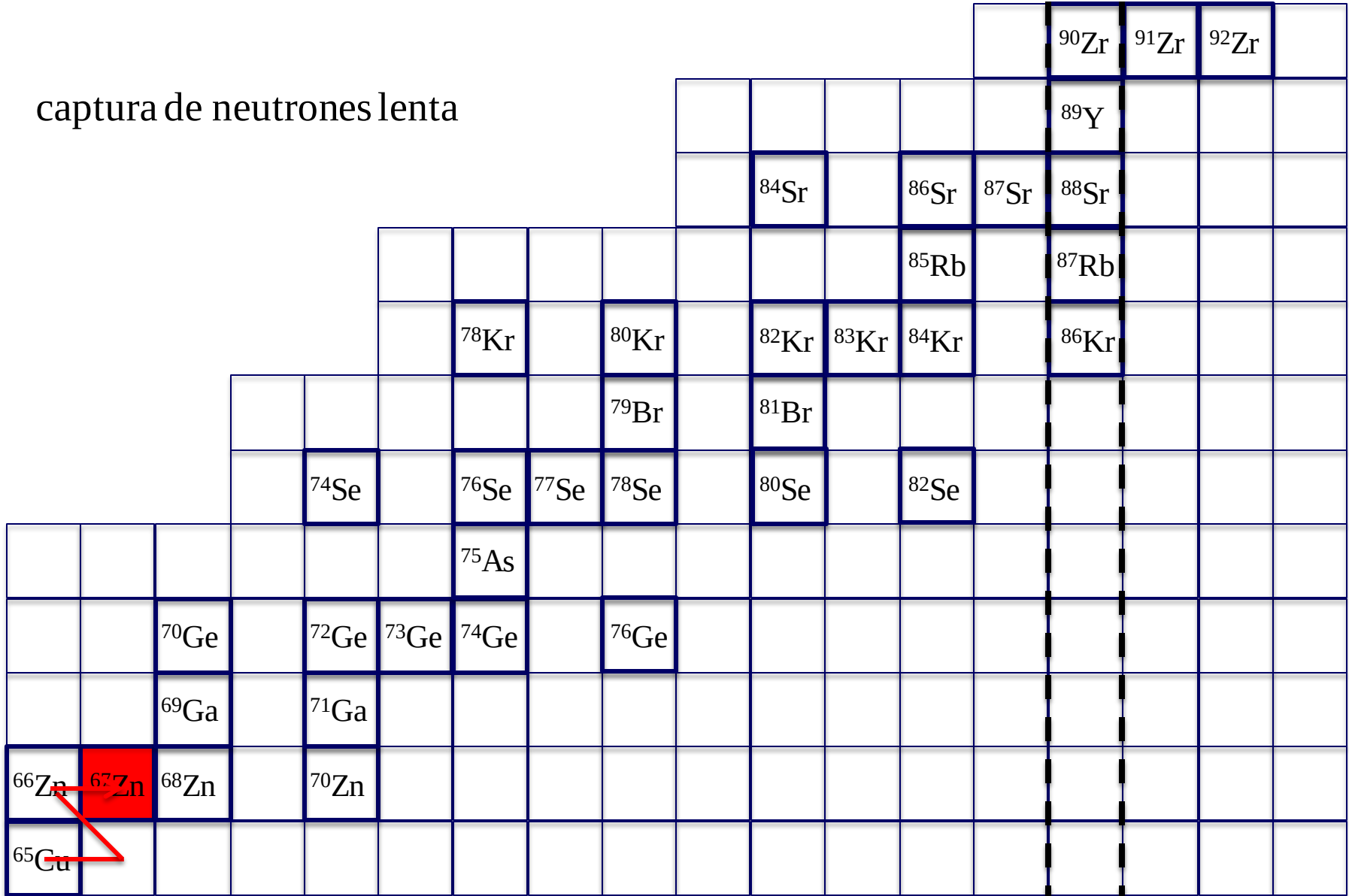


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

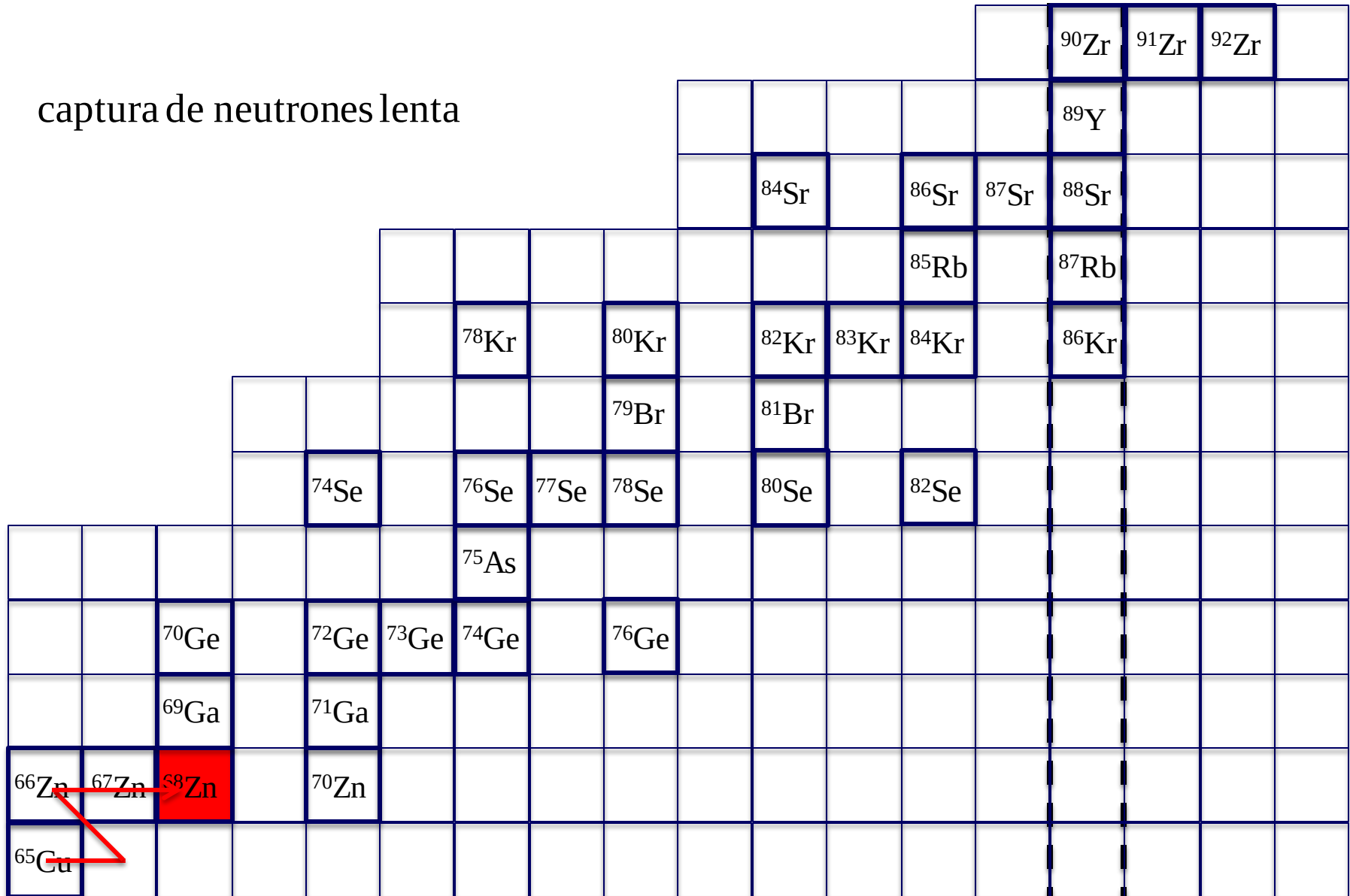


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

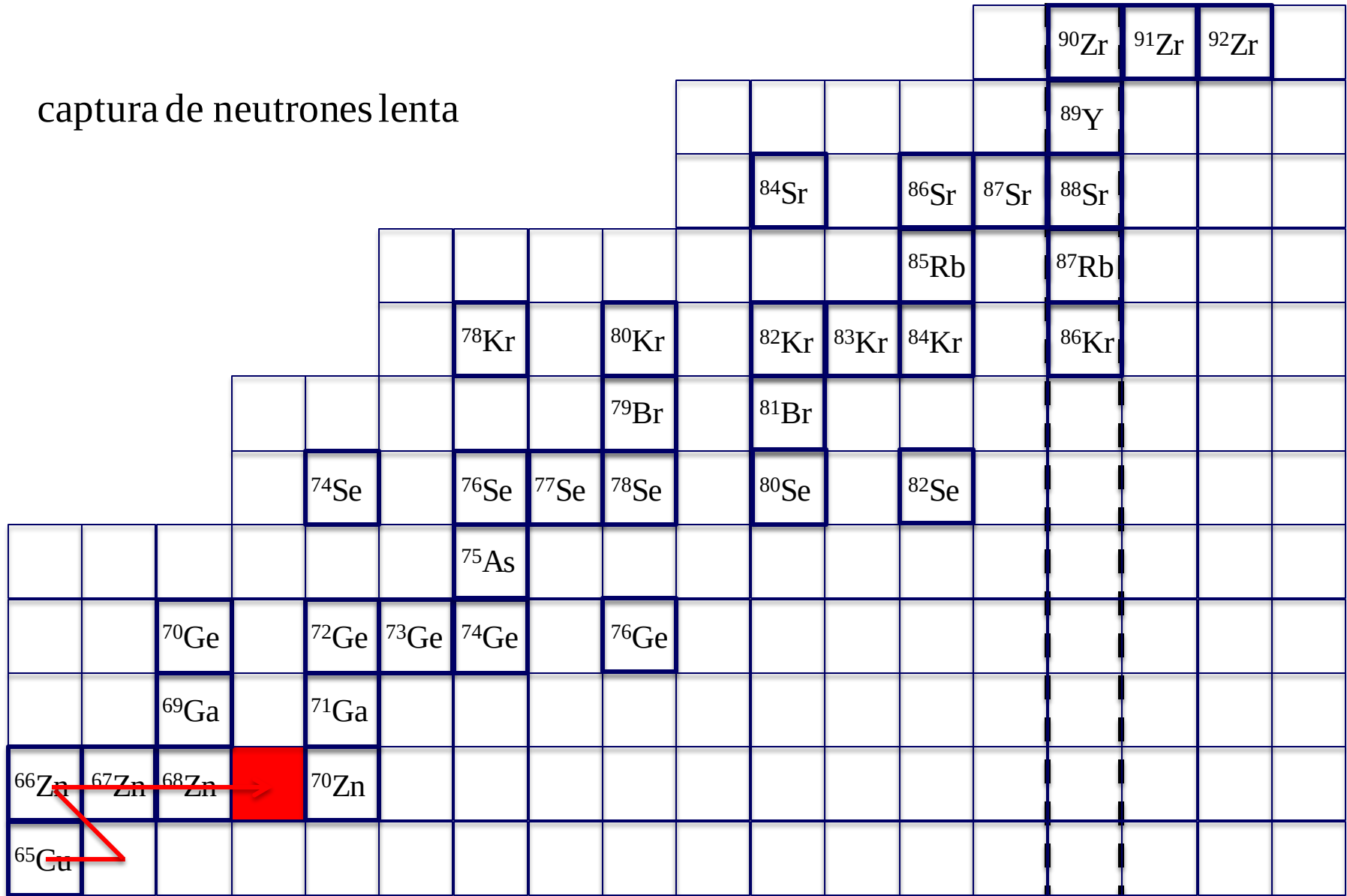


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

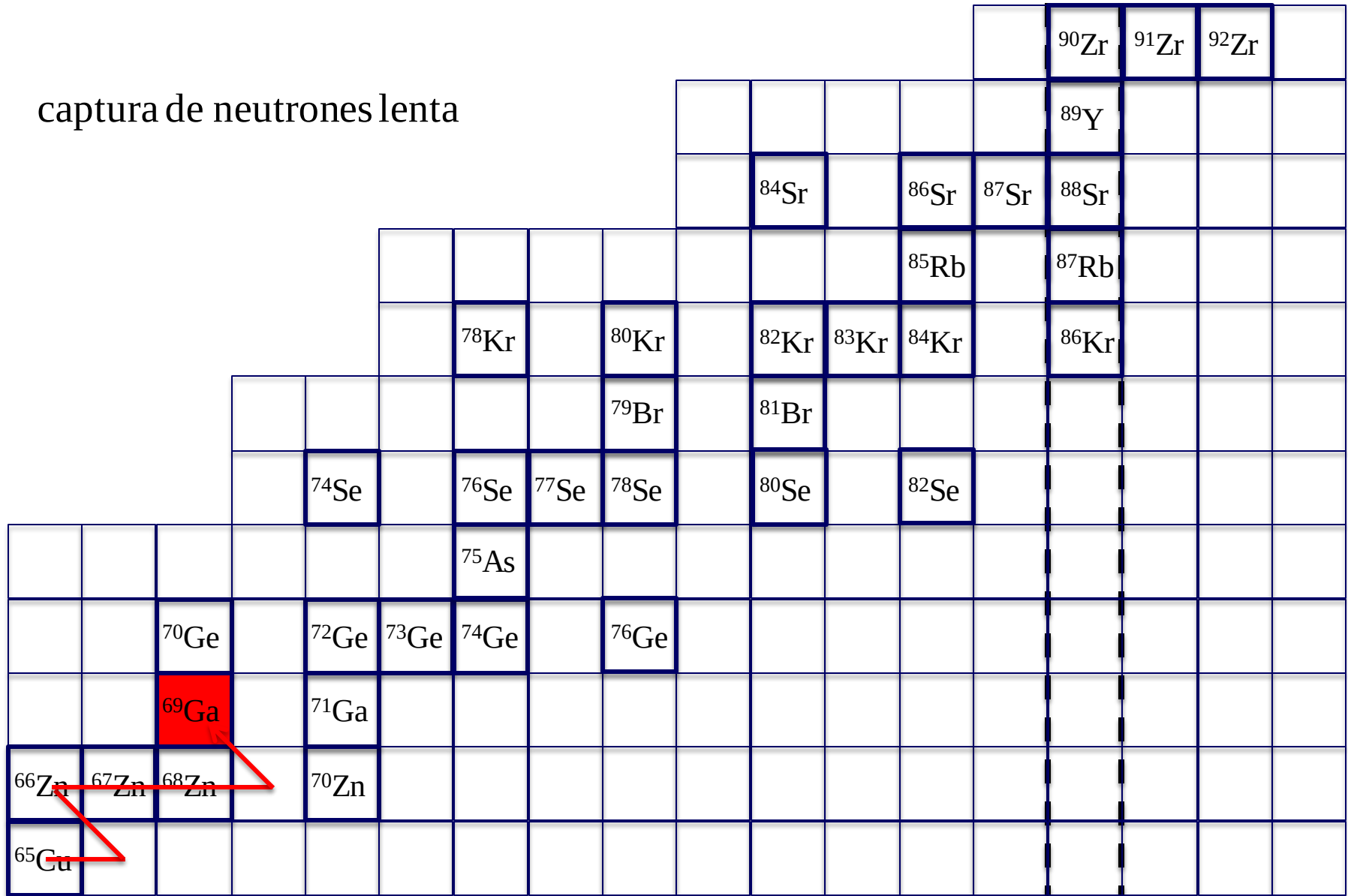


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

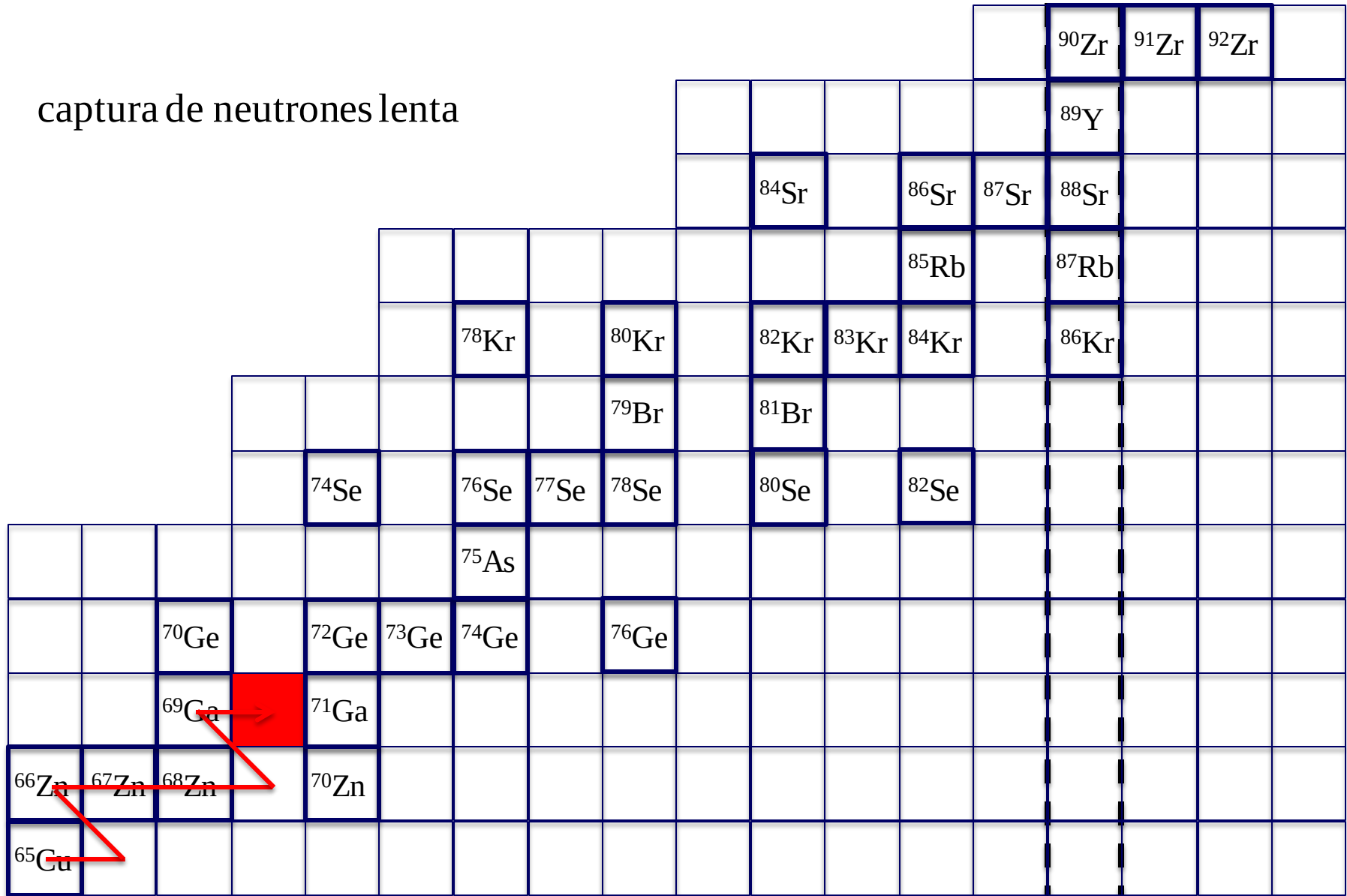


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

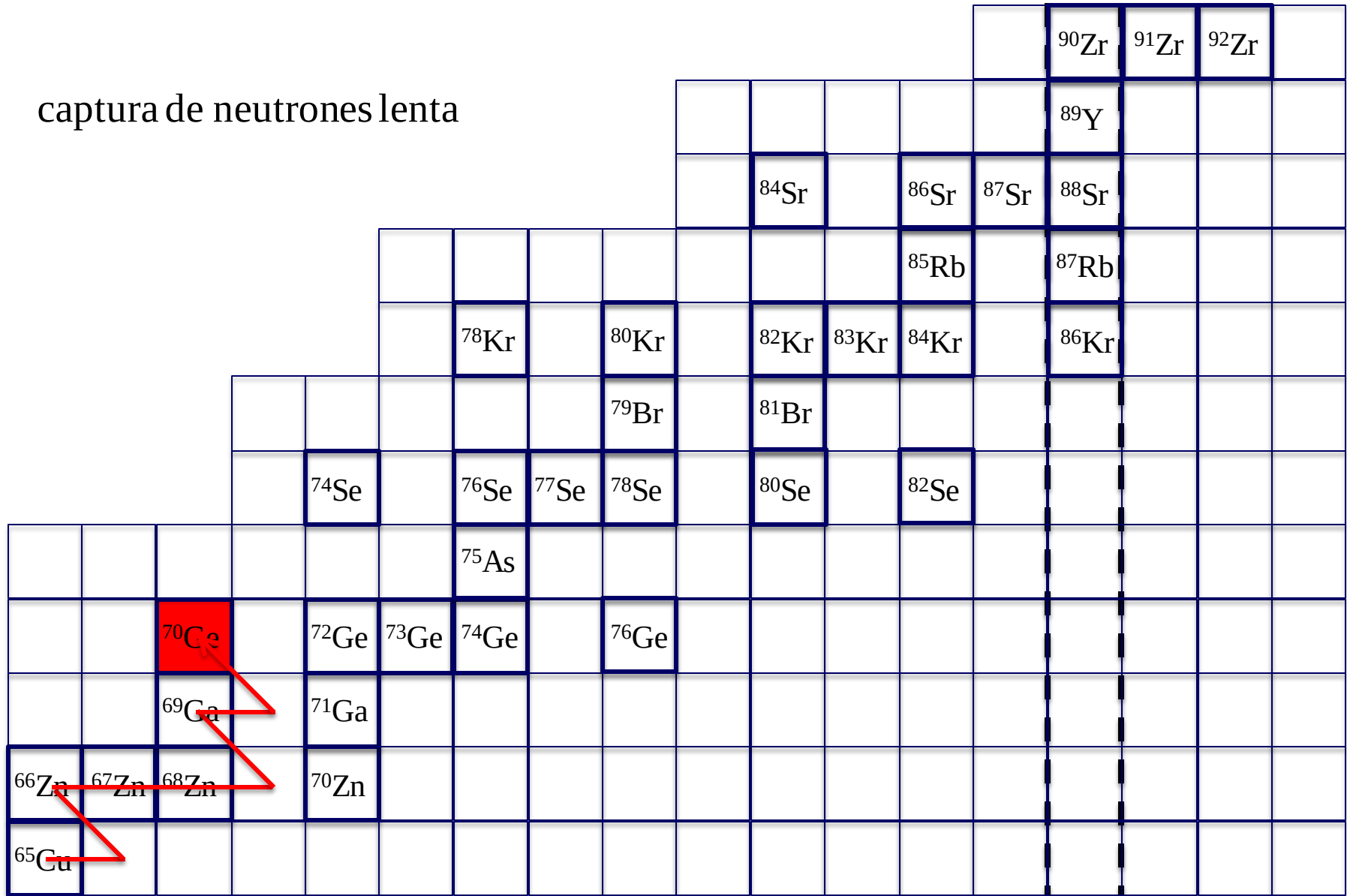


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

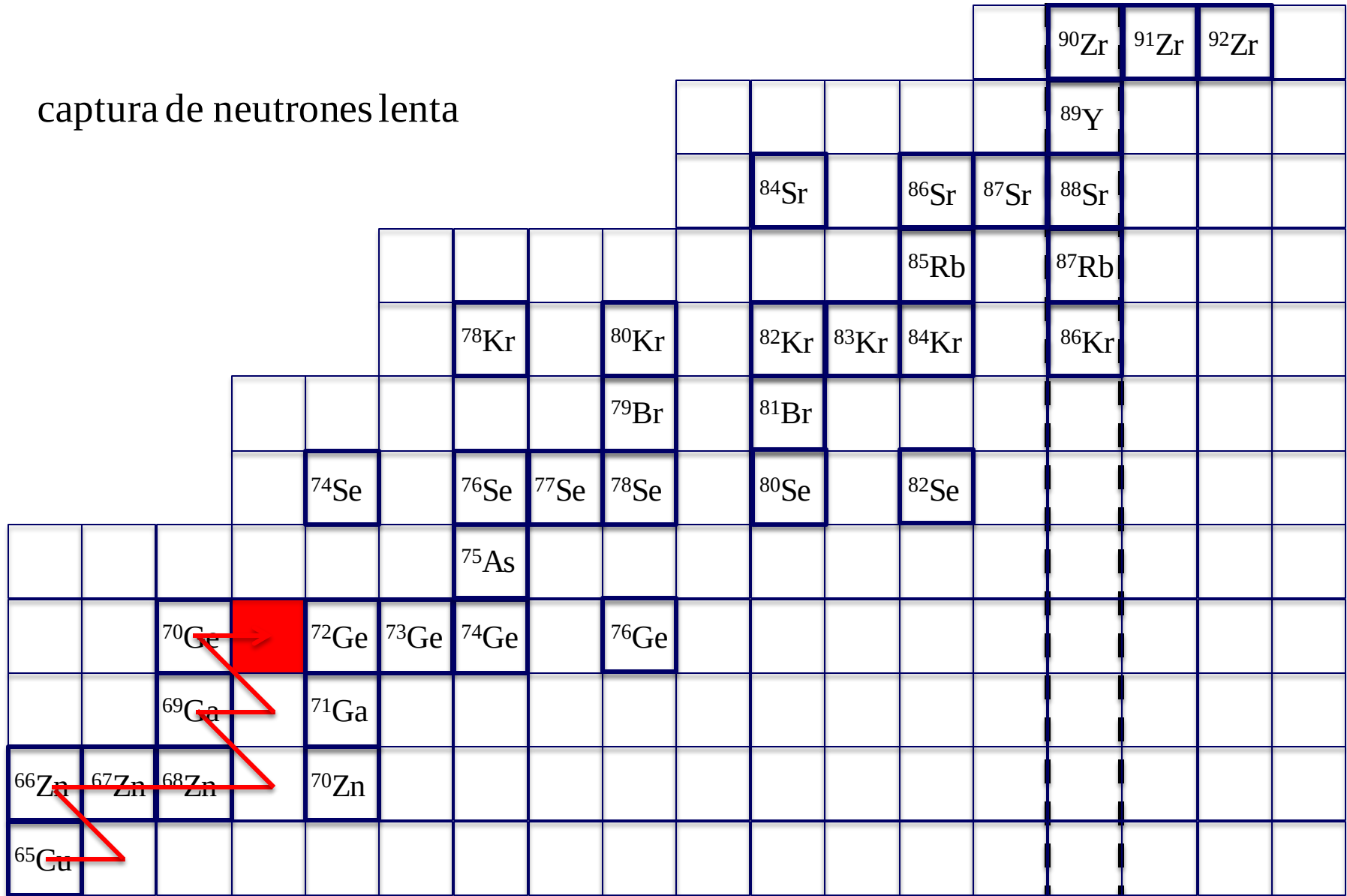


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

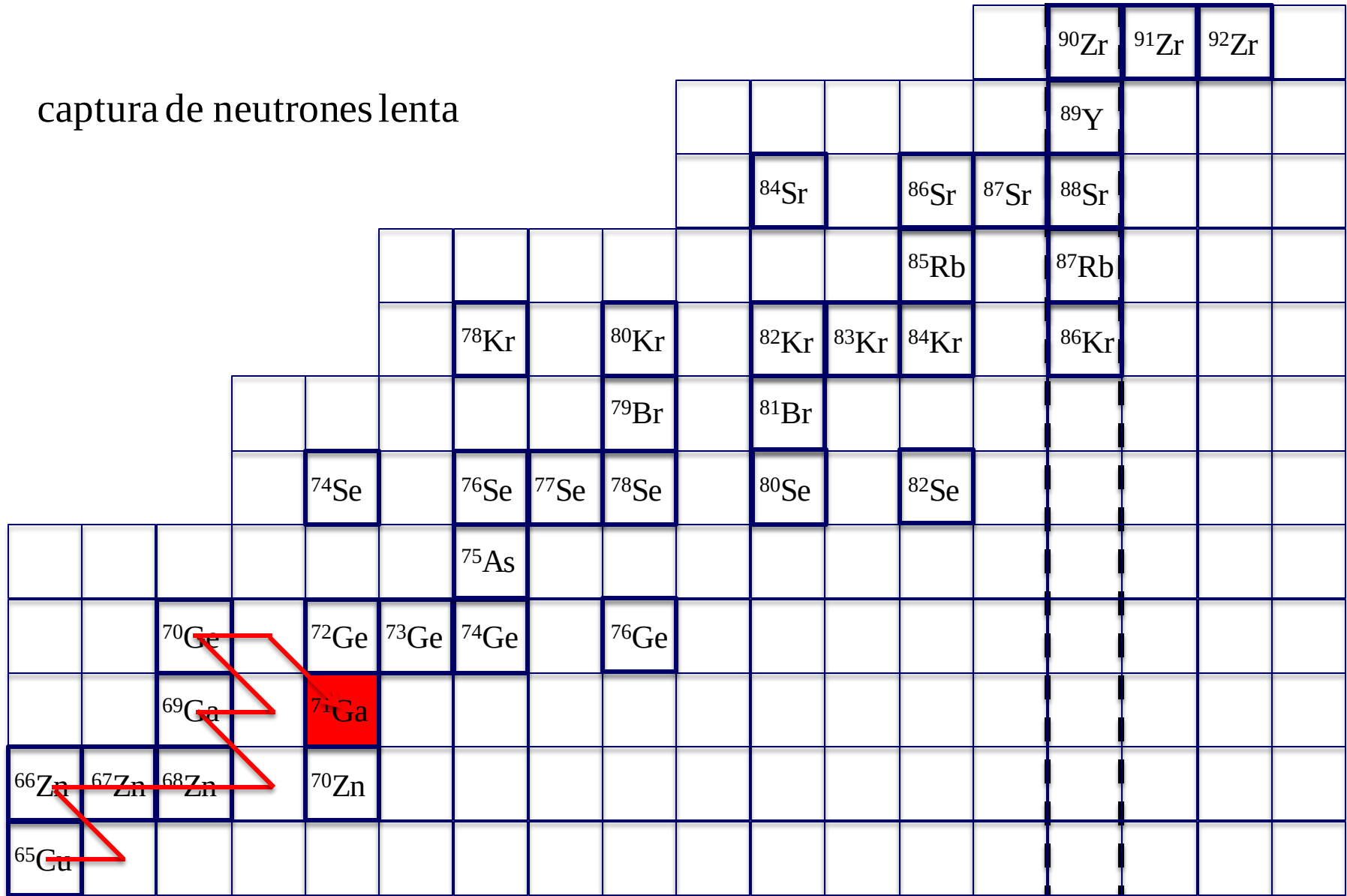


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

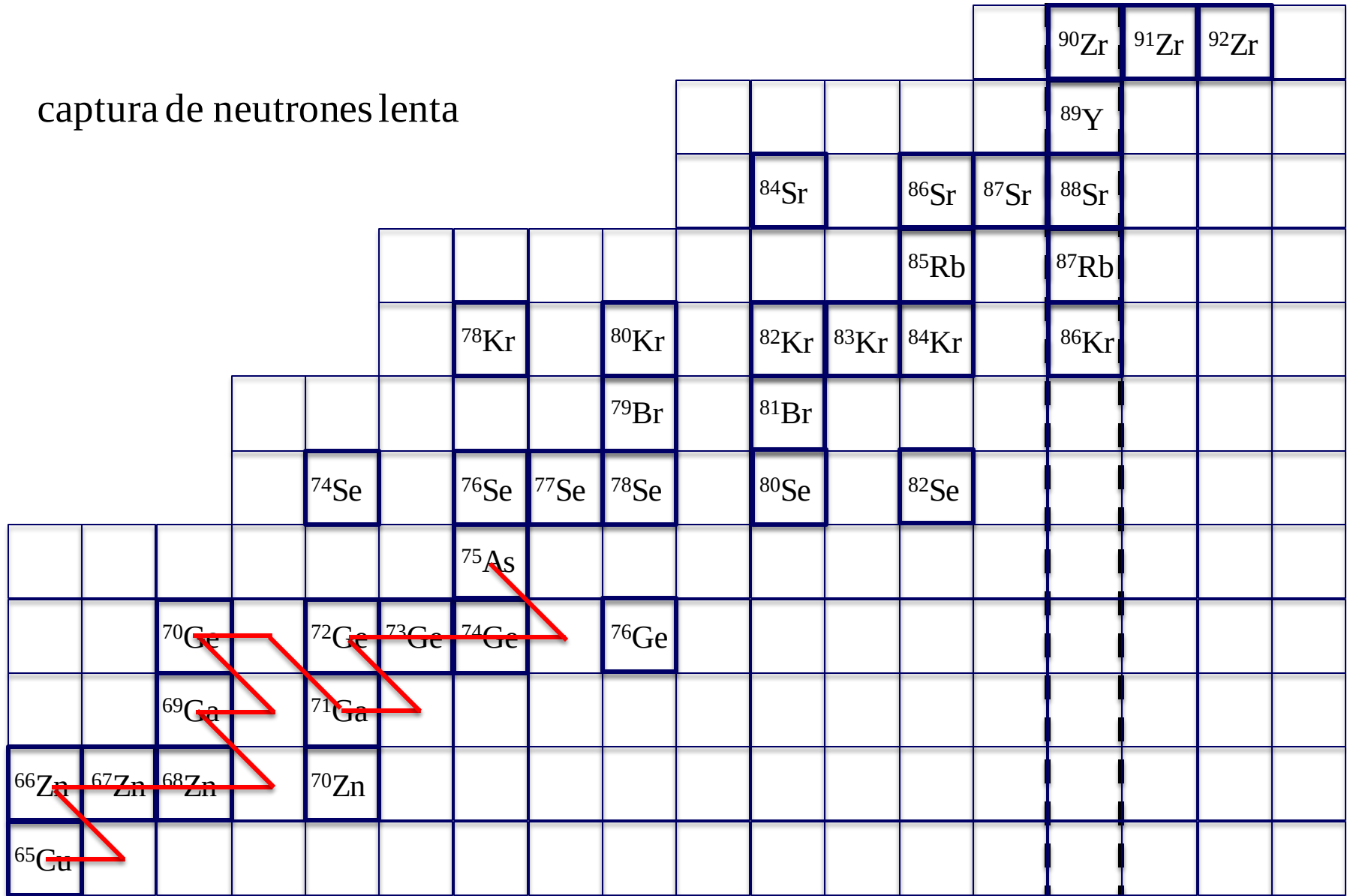


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

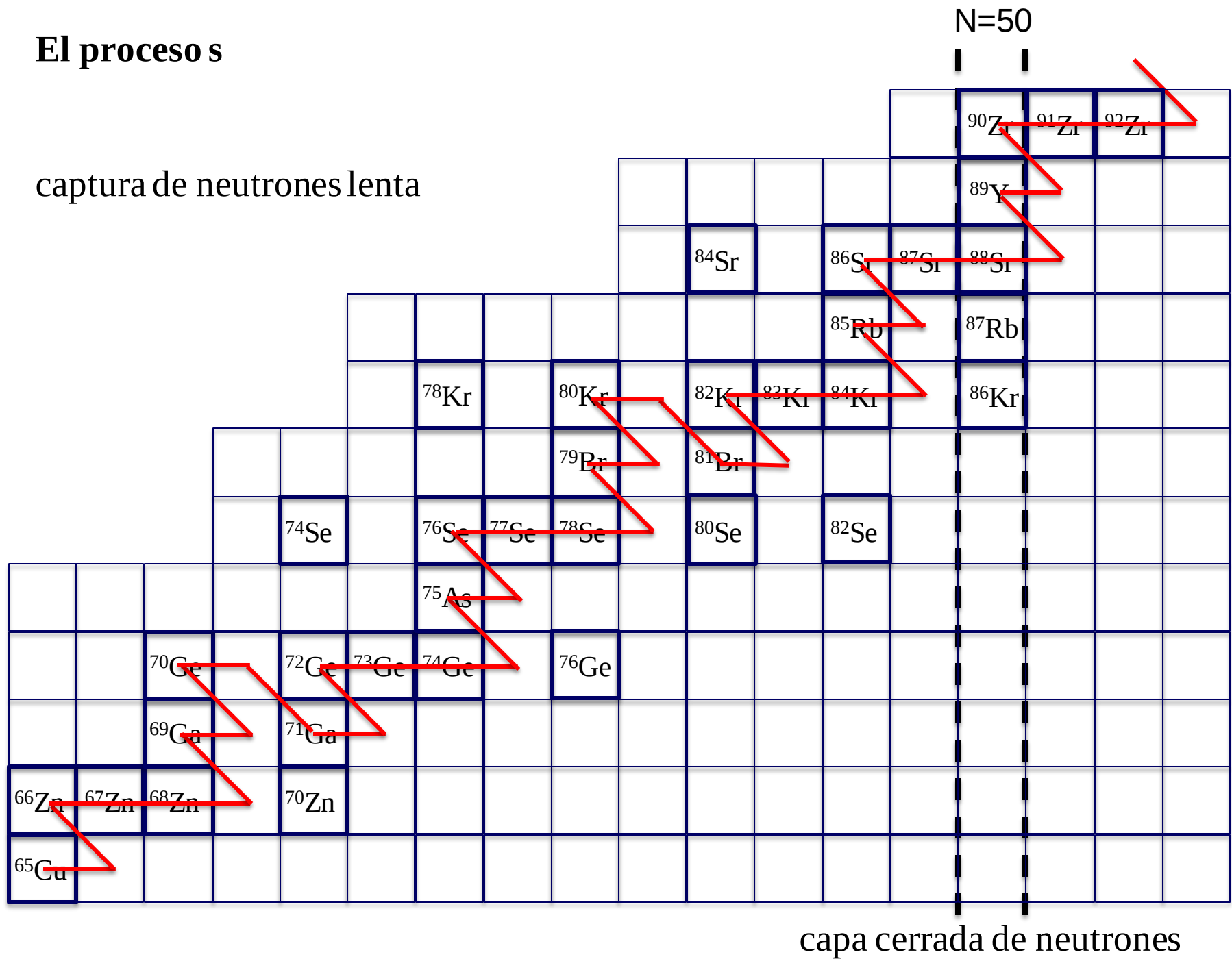
captura de neutrones lenta



capa cerrada de neutrones

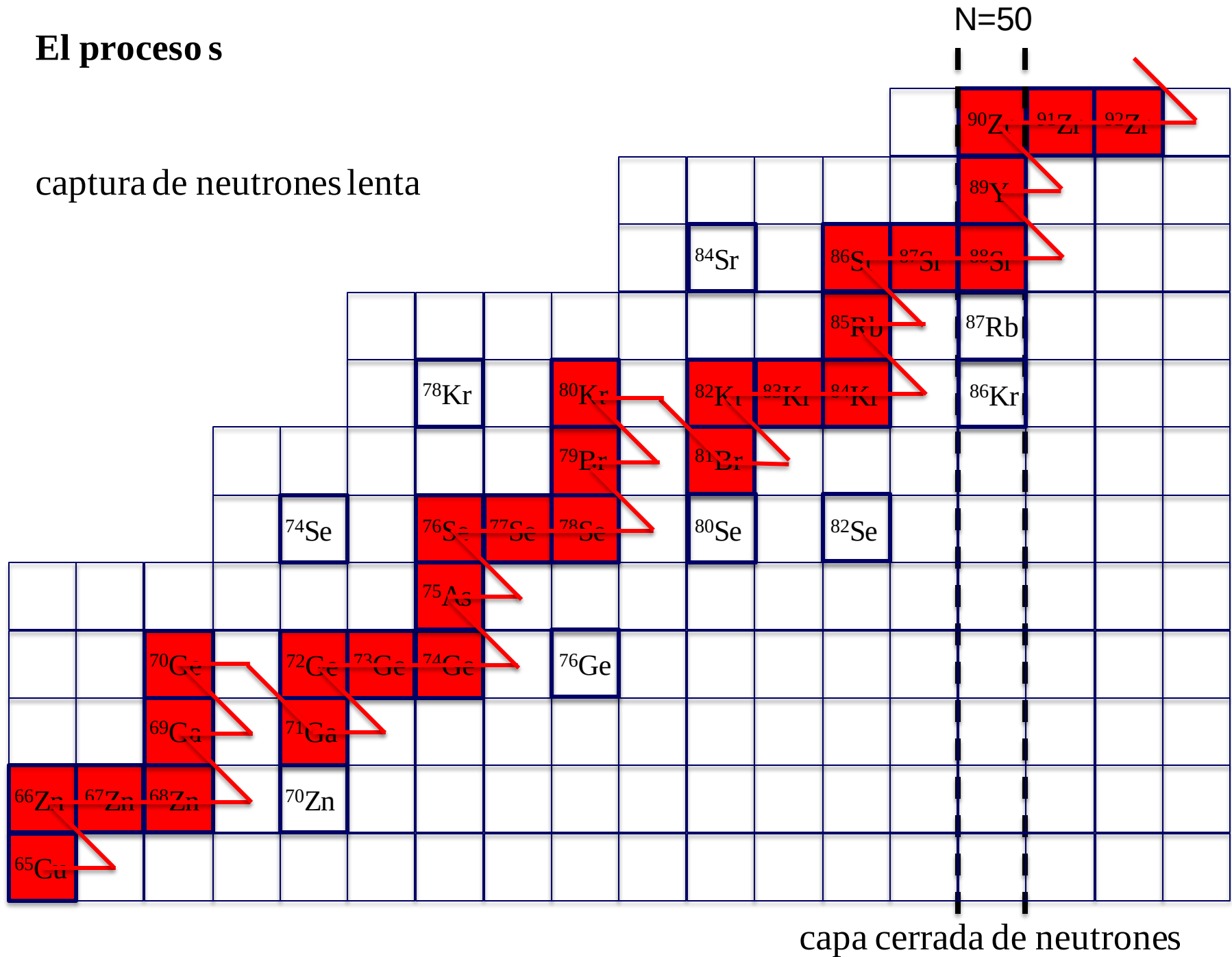
El proceso s

captura de neutrones lenta



El proceso s

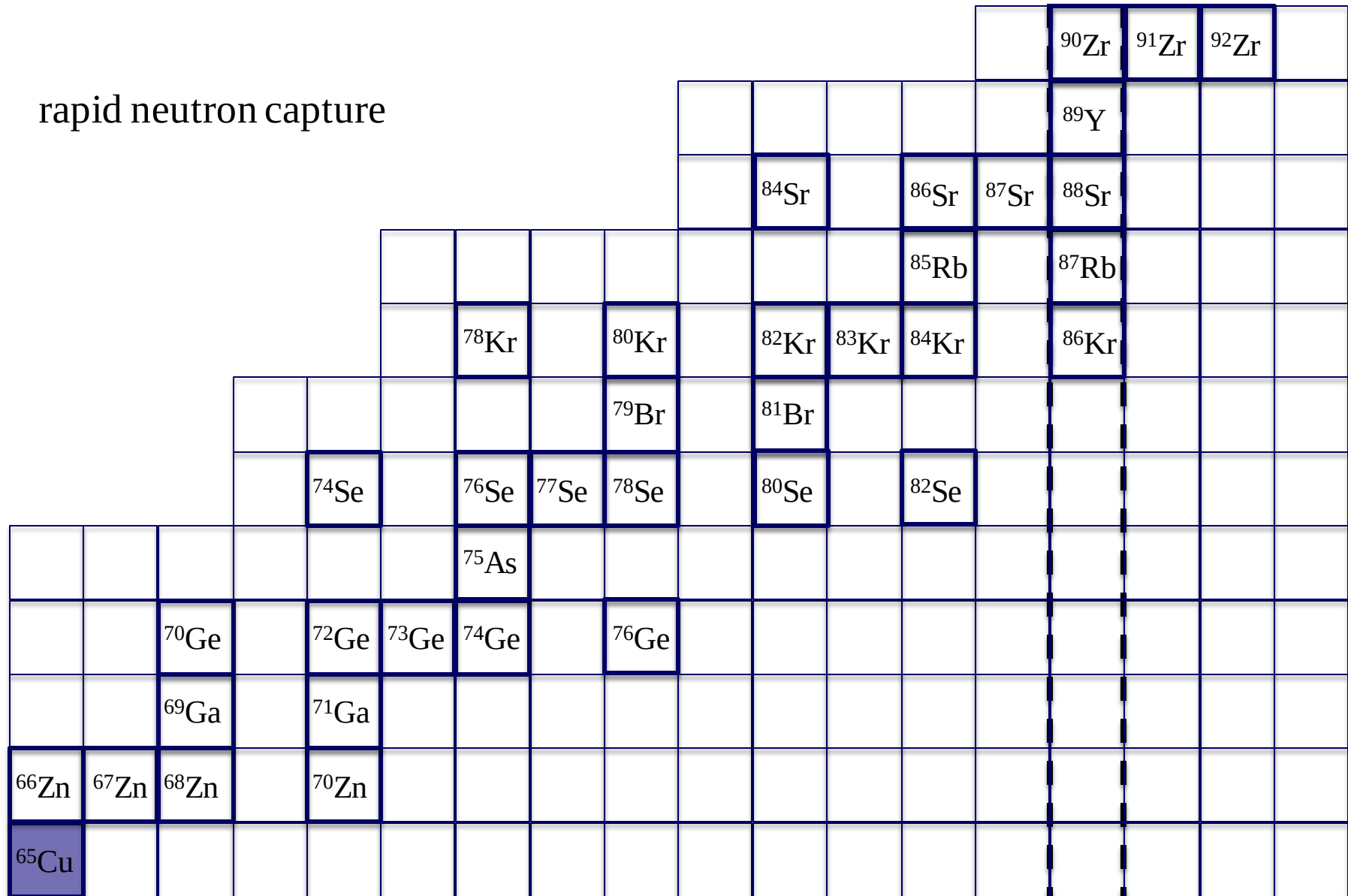
captura de neutrones lenta



El proceso r

N=50

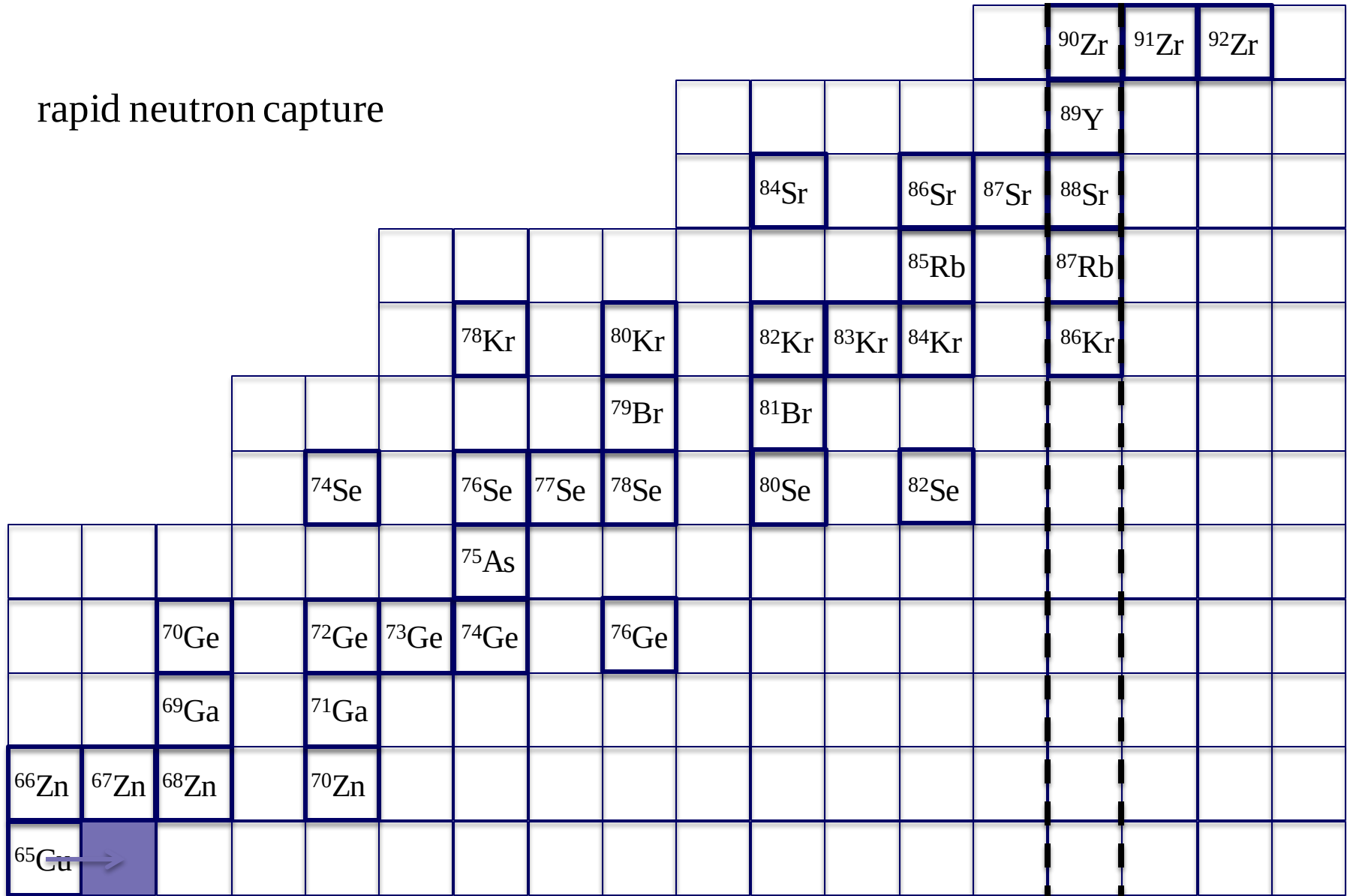
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

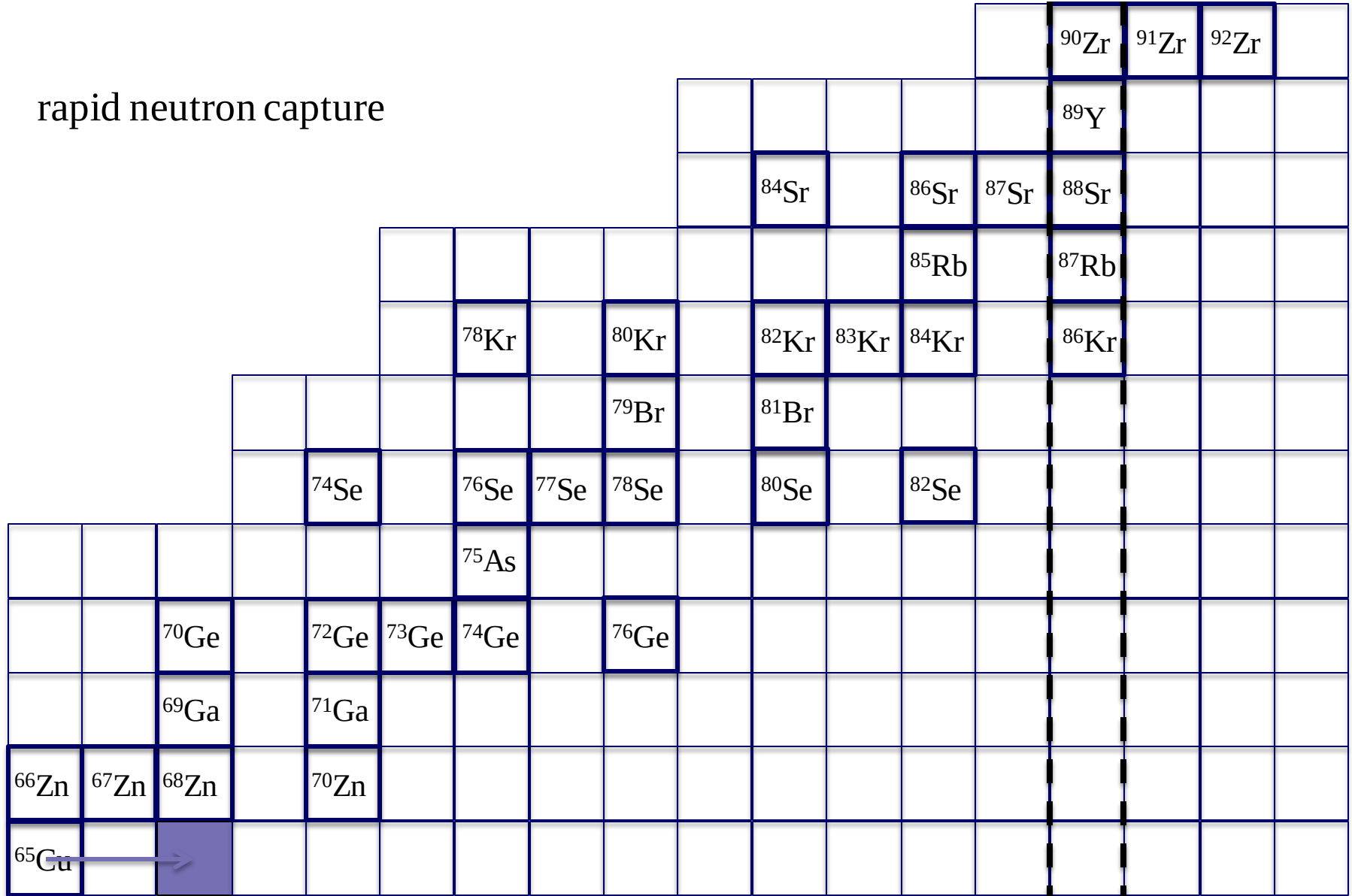
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

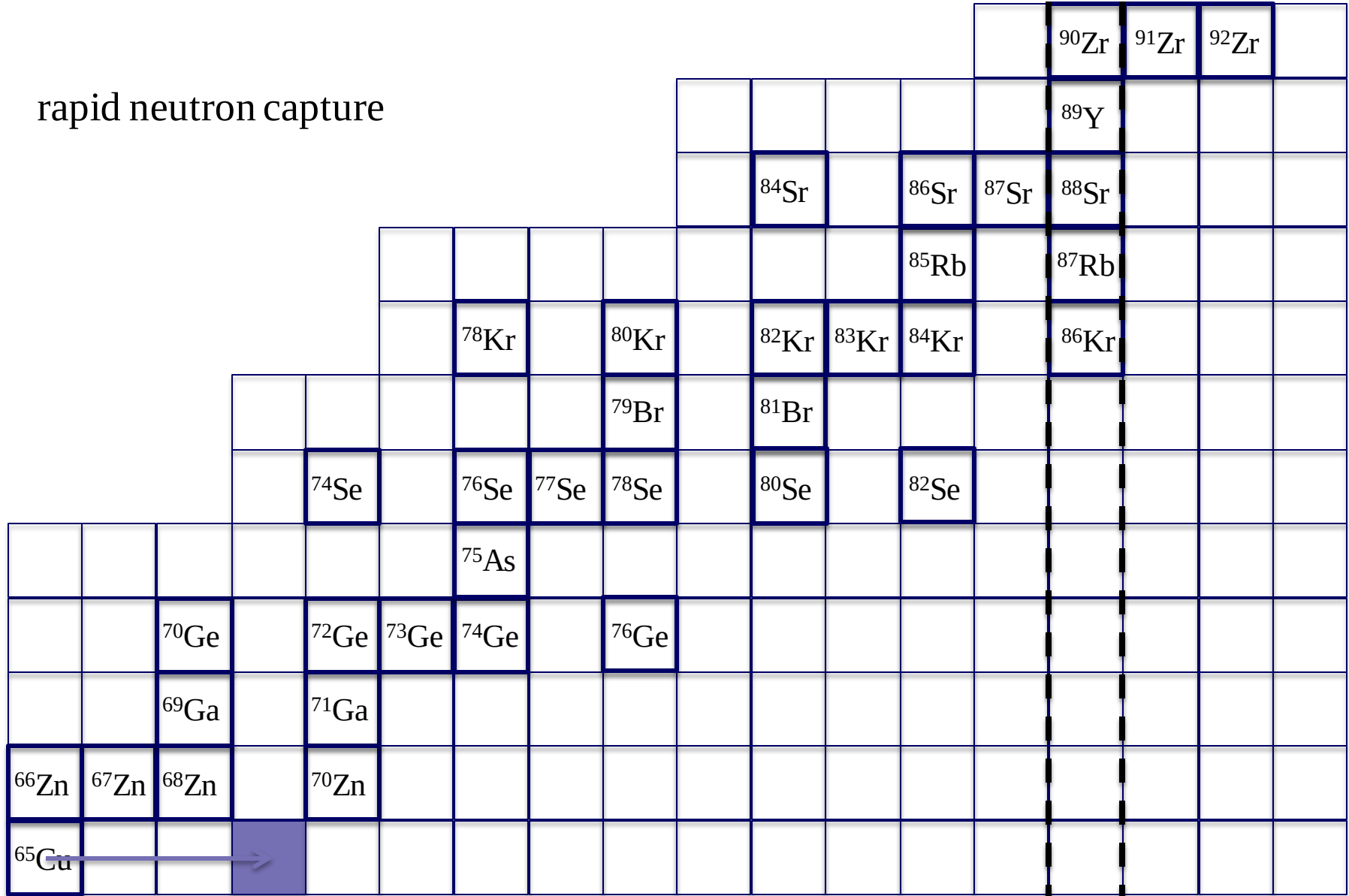
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

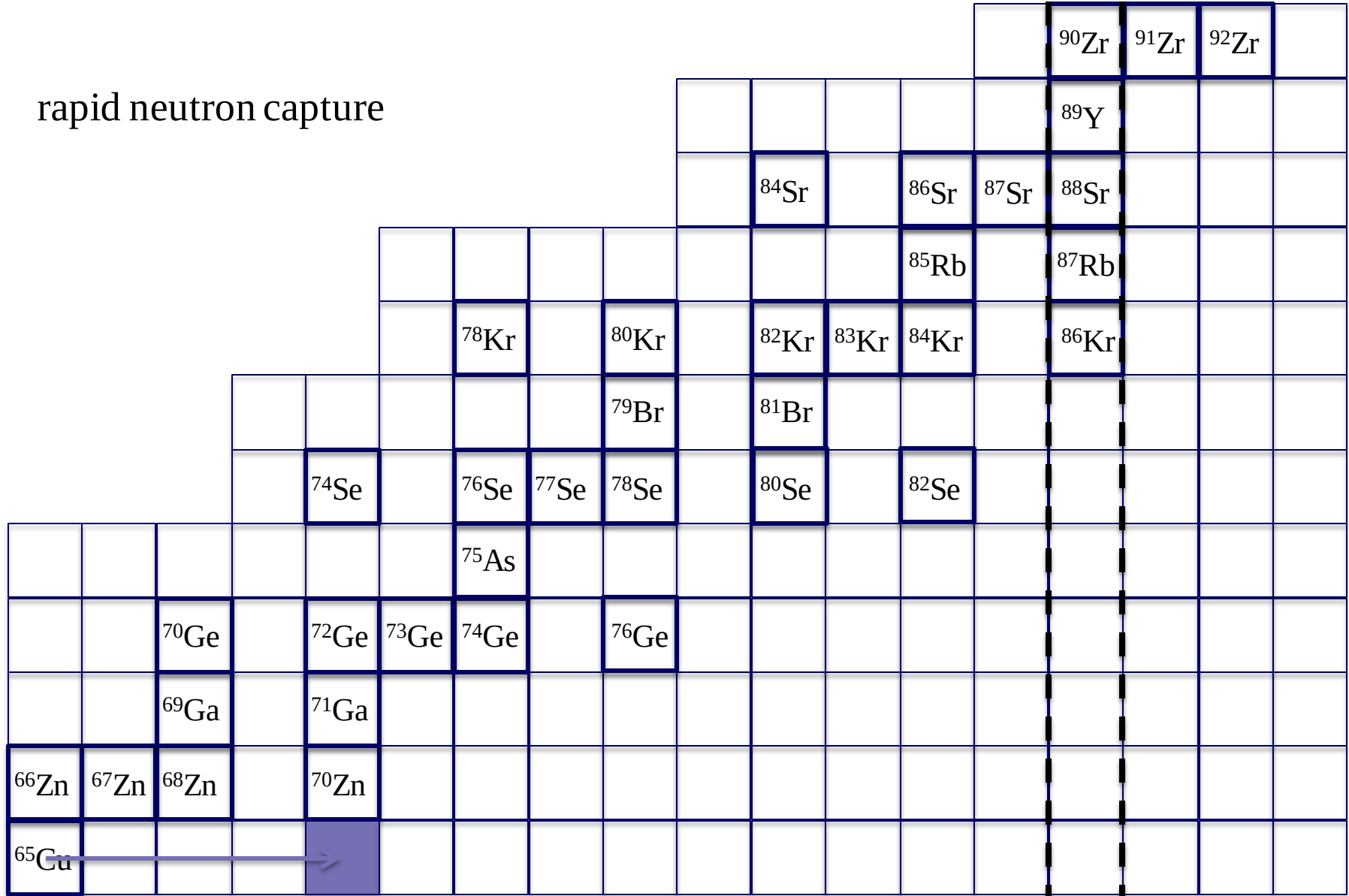
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

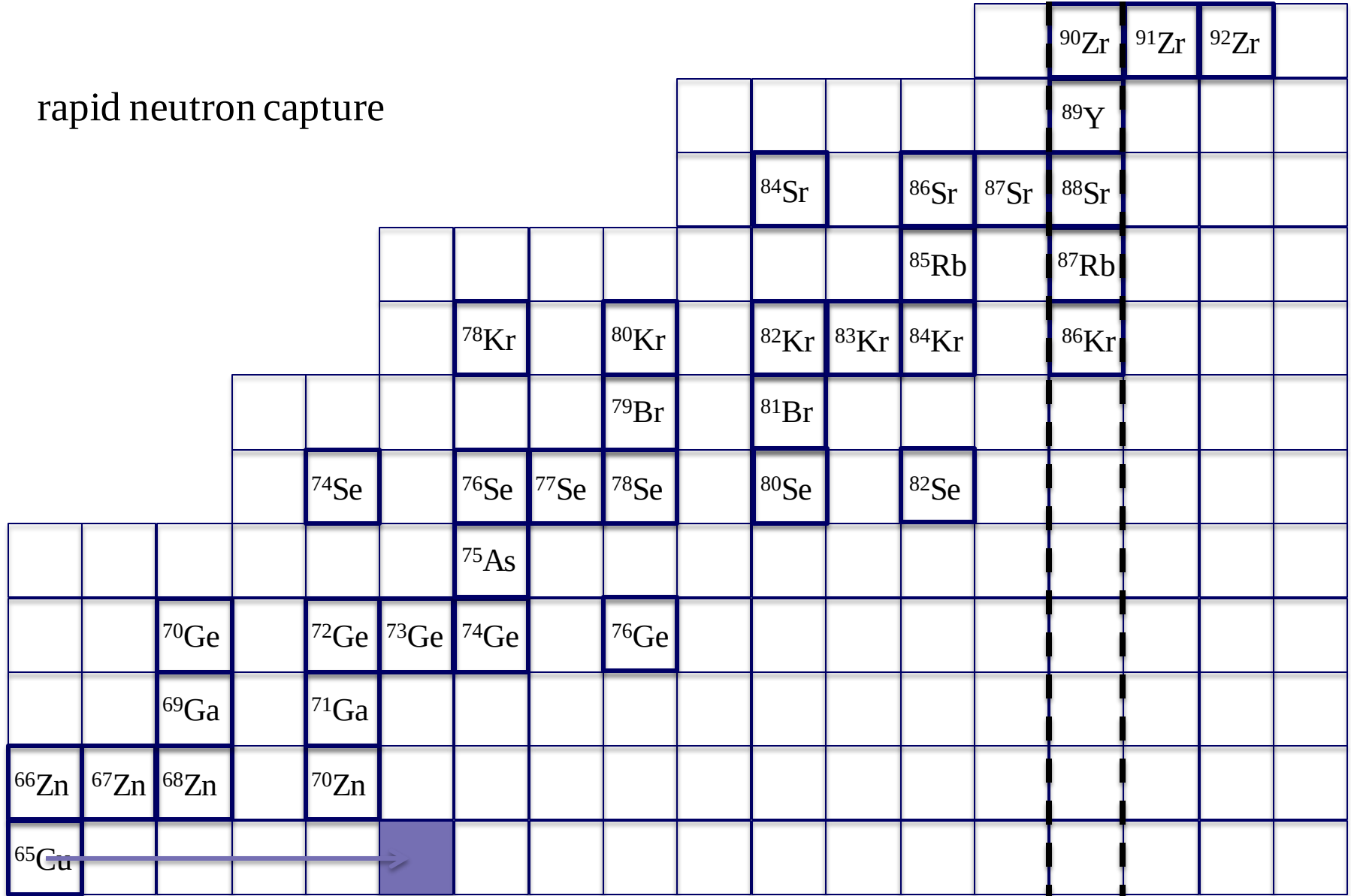
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

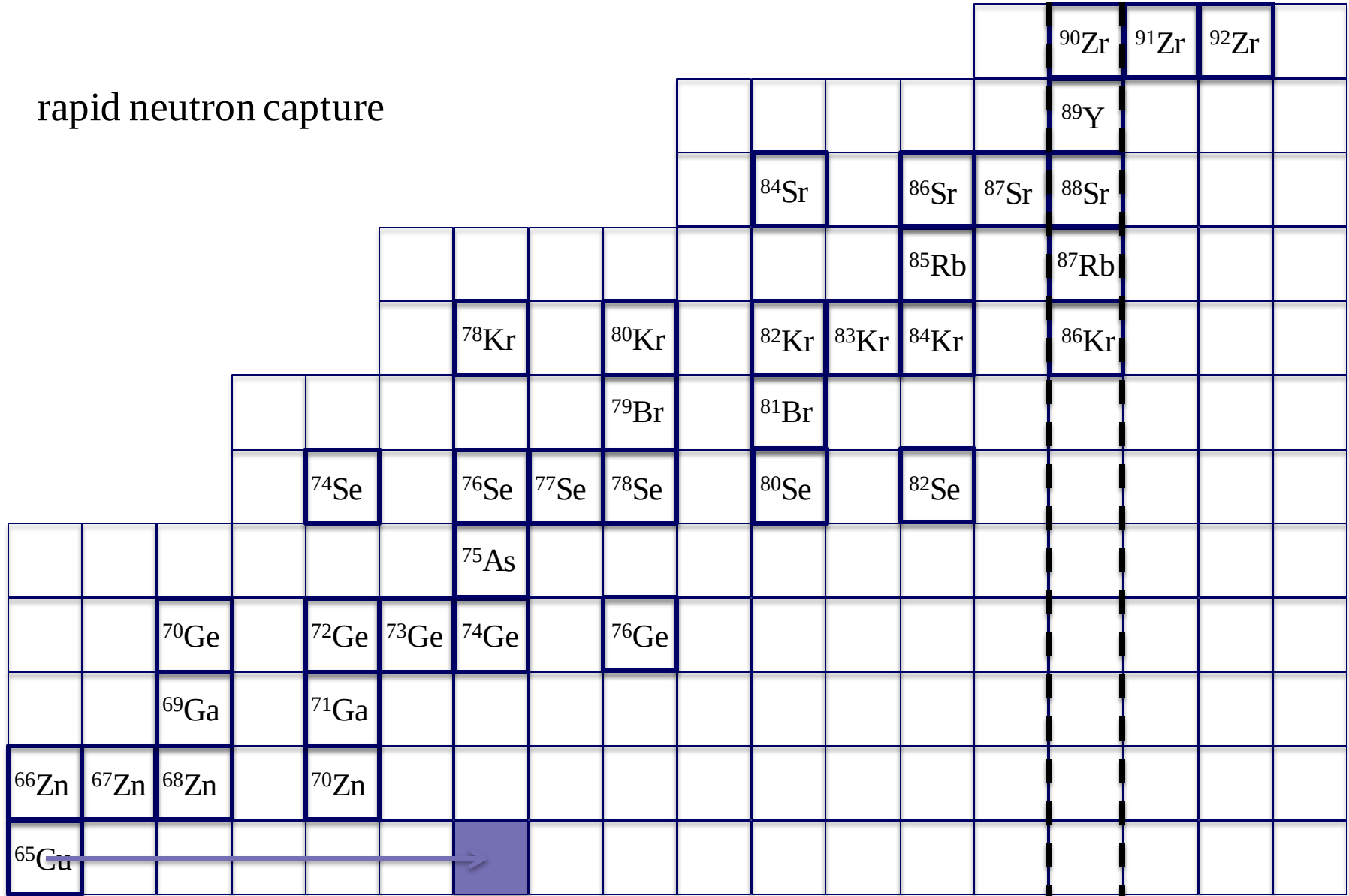
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

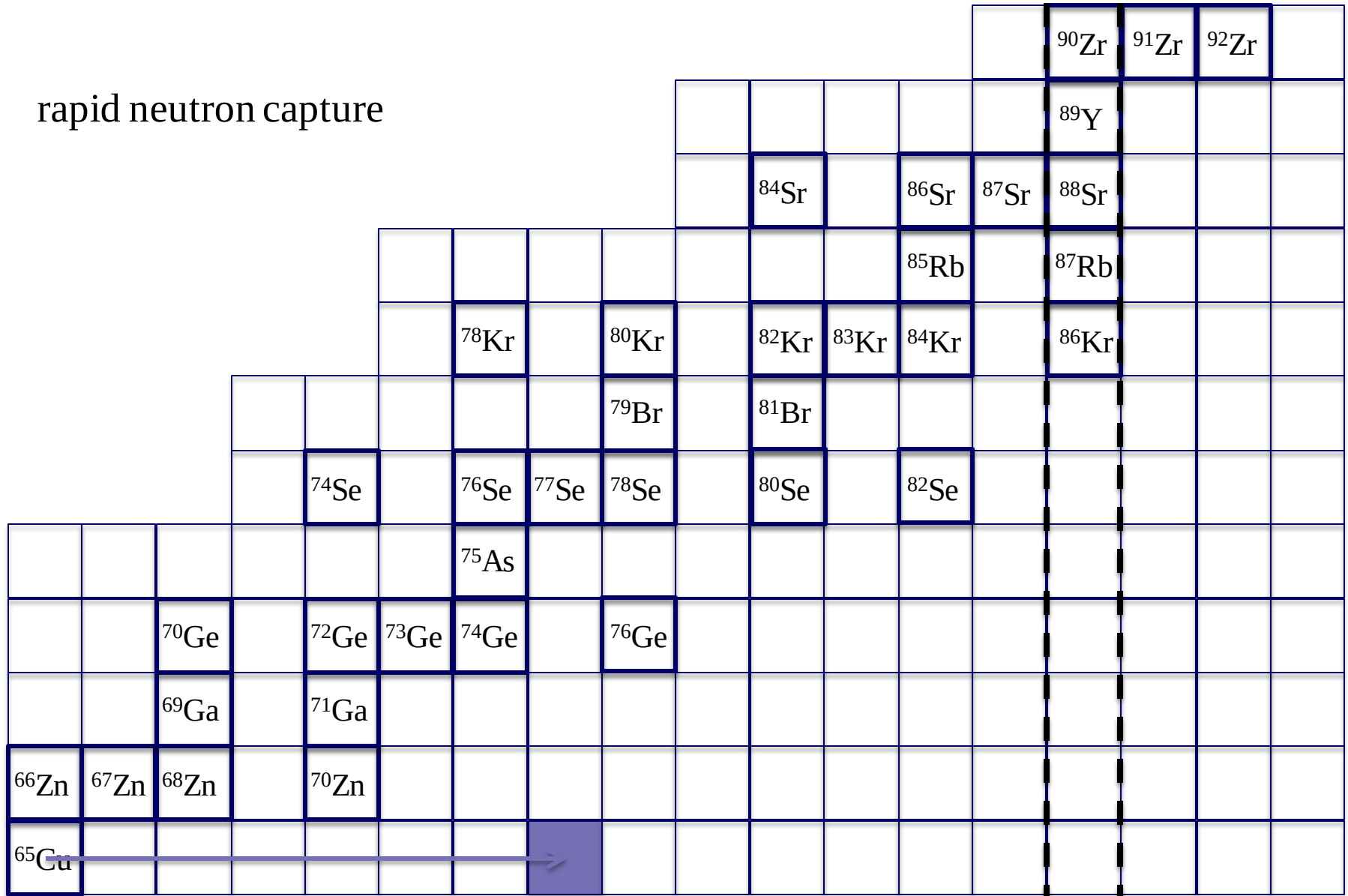
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

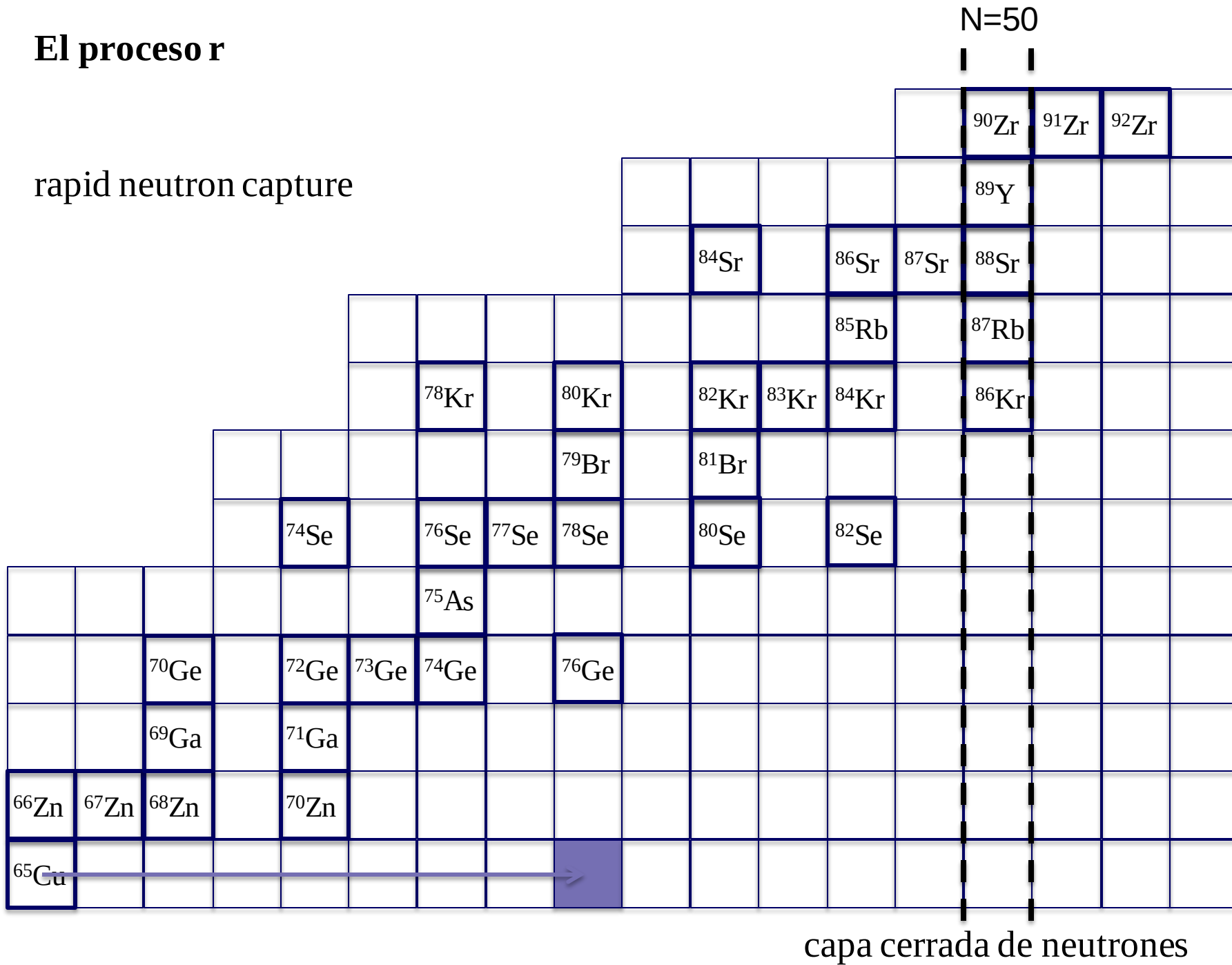
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

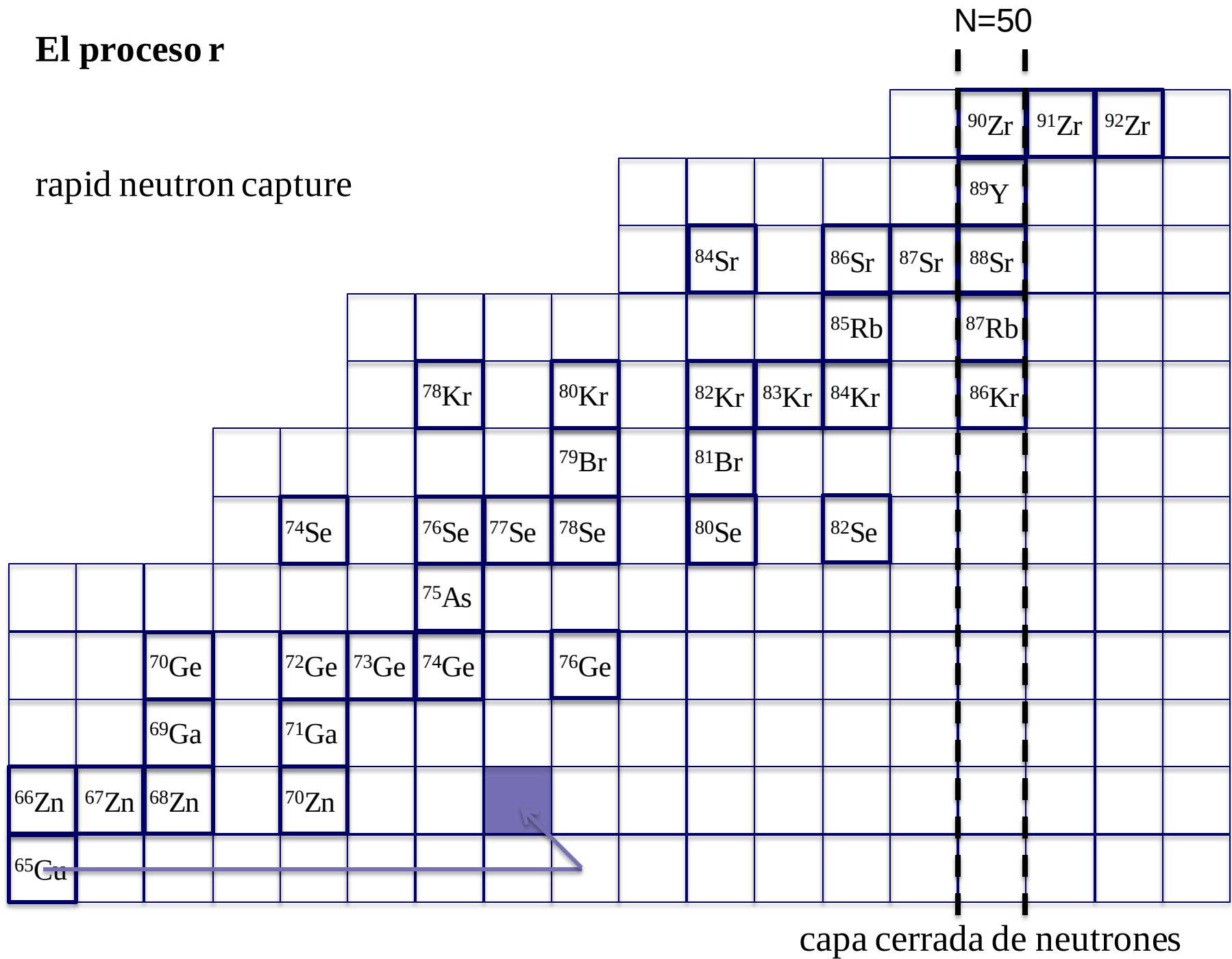
El proceso r

rapid neutron capture



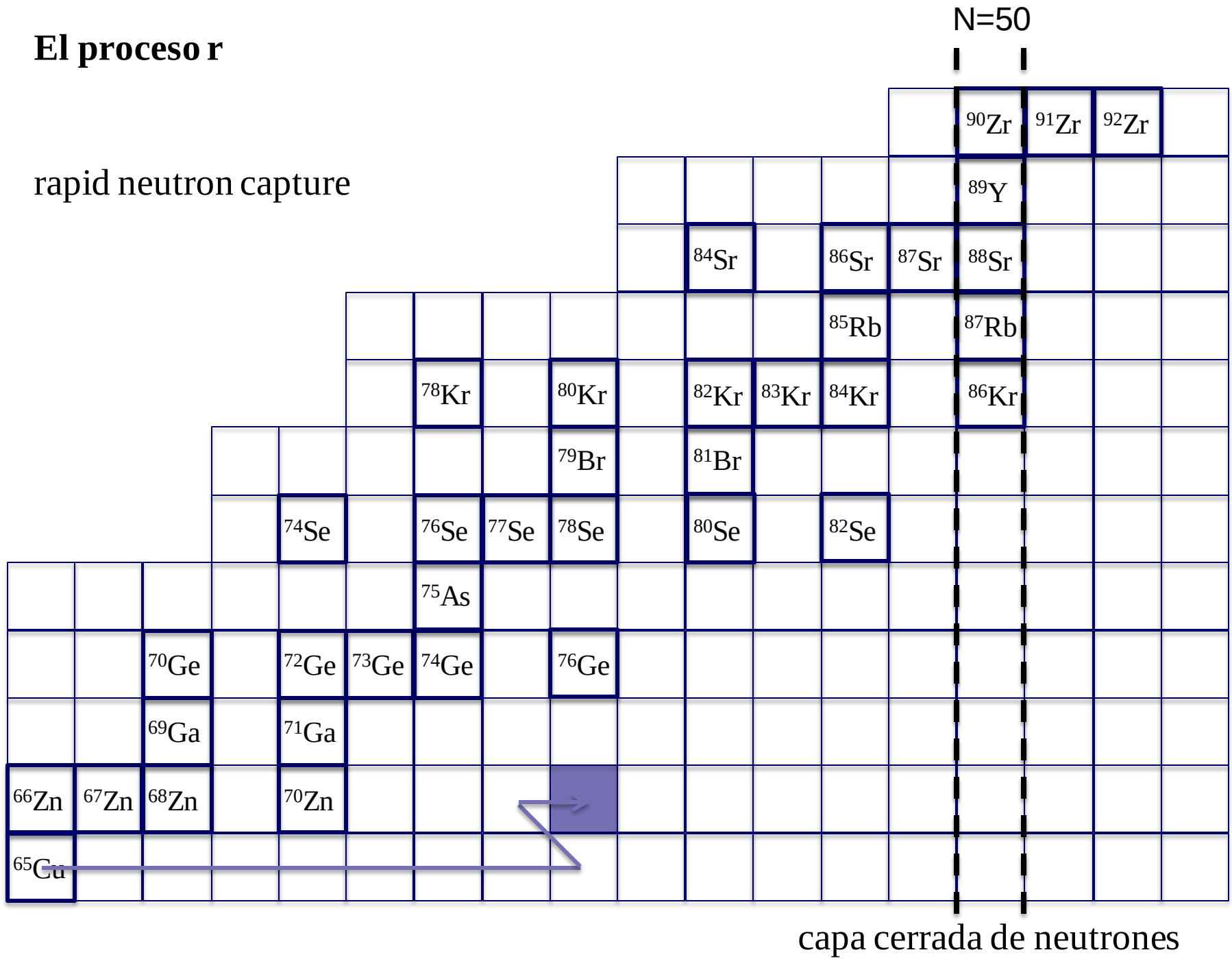
El proceso r

rapid neutron capture



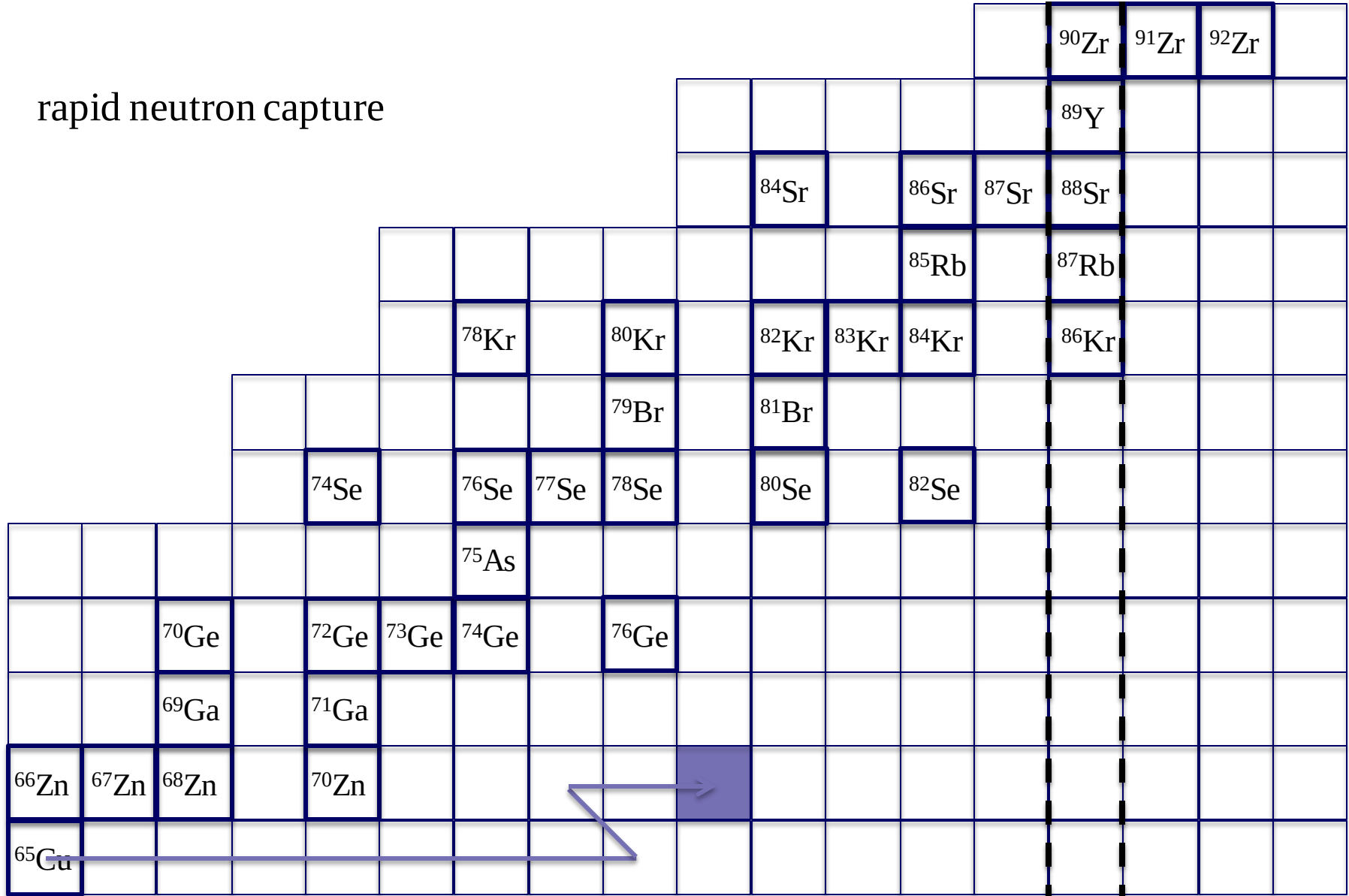
El proceso r

rapid neutron capture



El proceso r

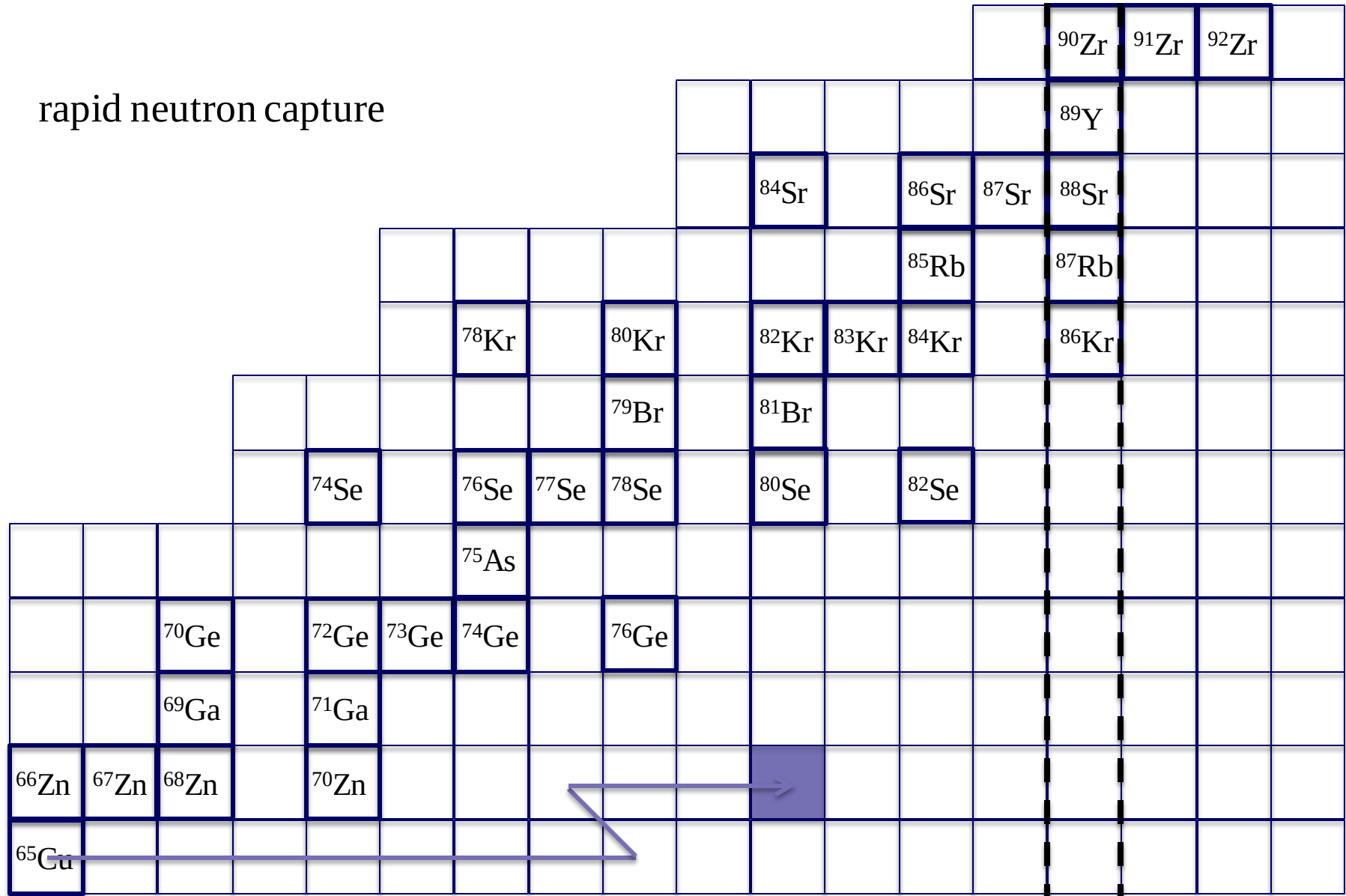
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

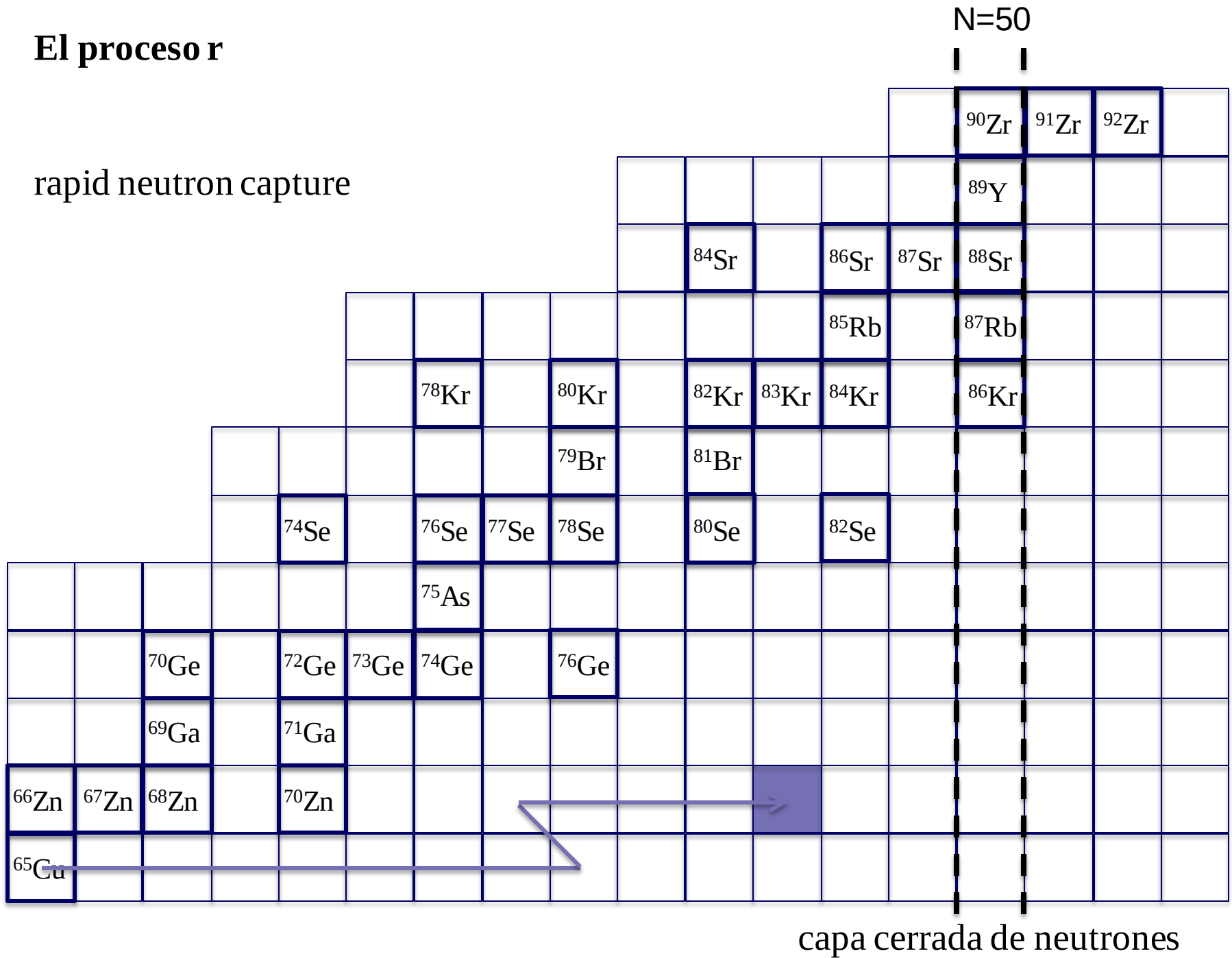
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

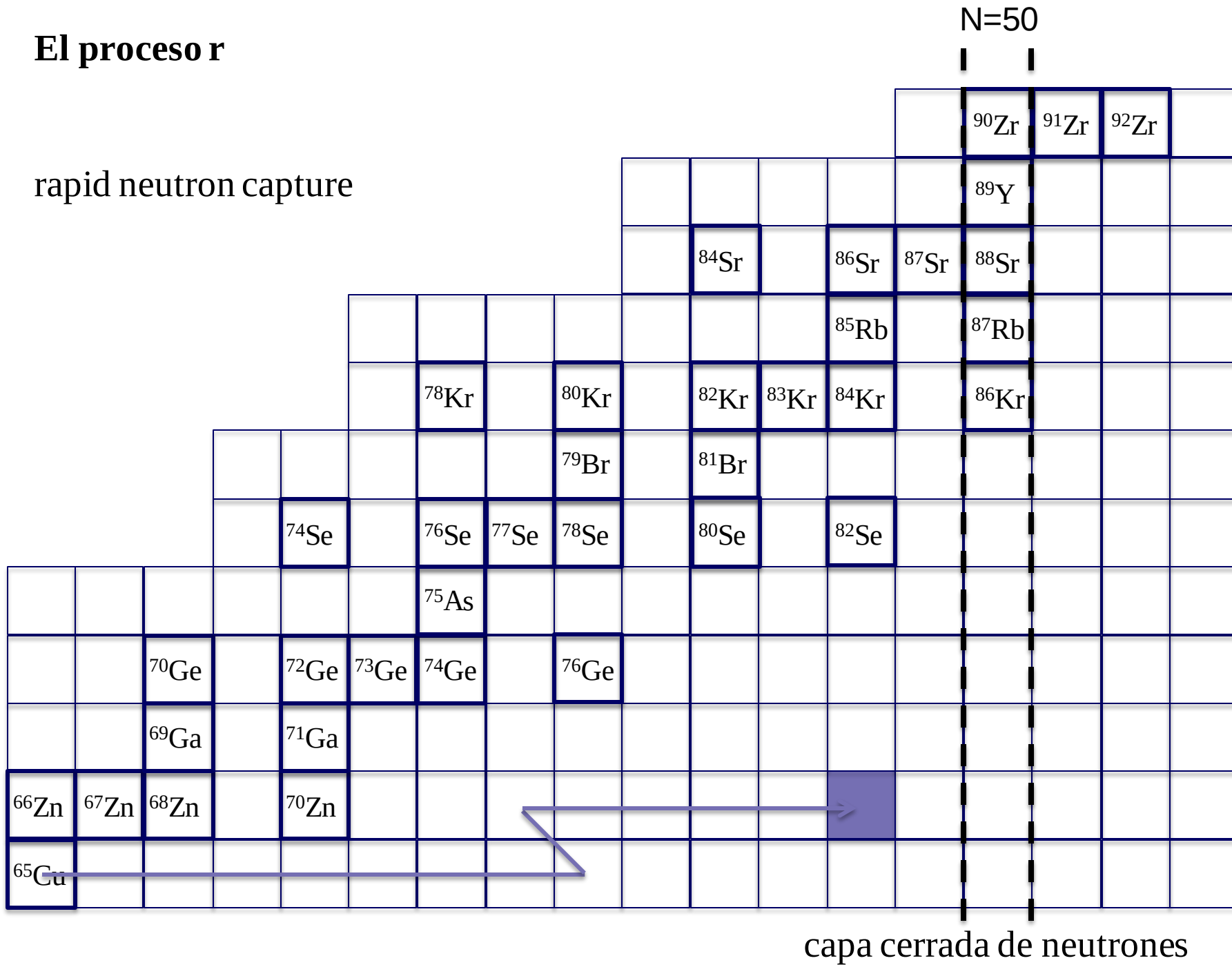
El proceso r

rapid neutron capture



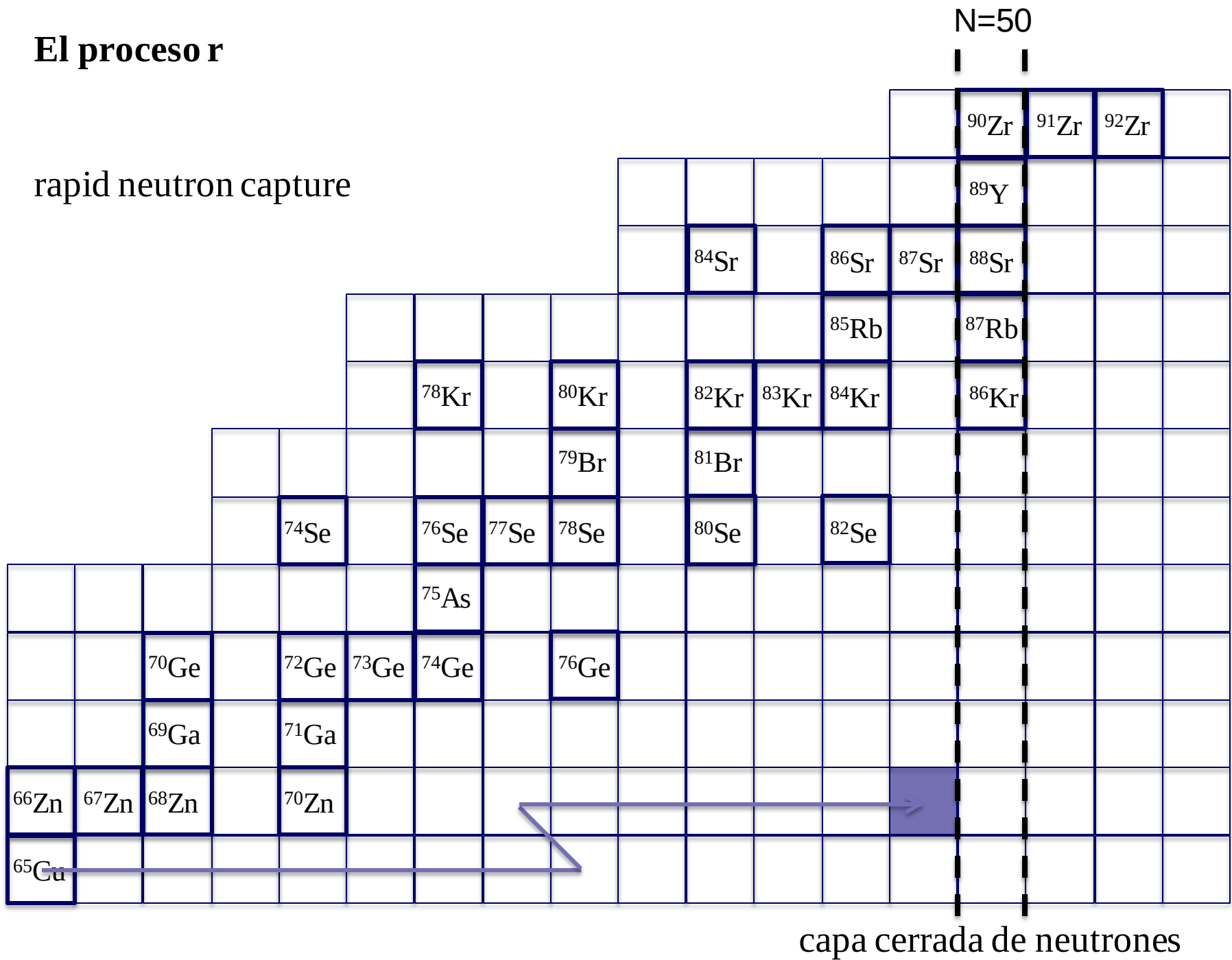
El proceso r

rapid neutron capture



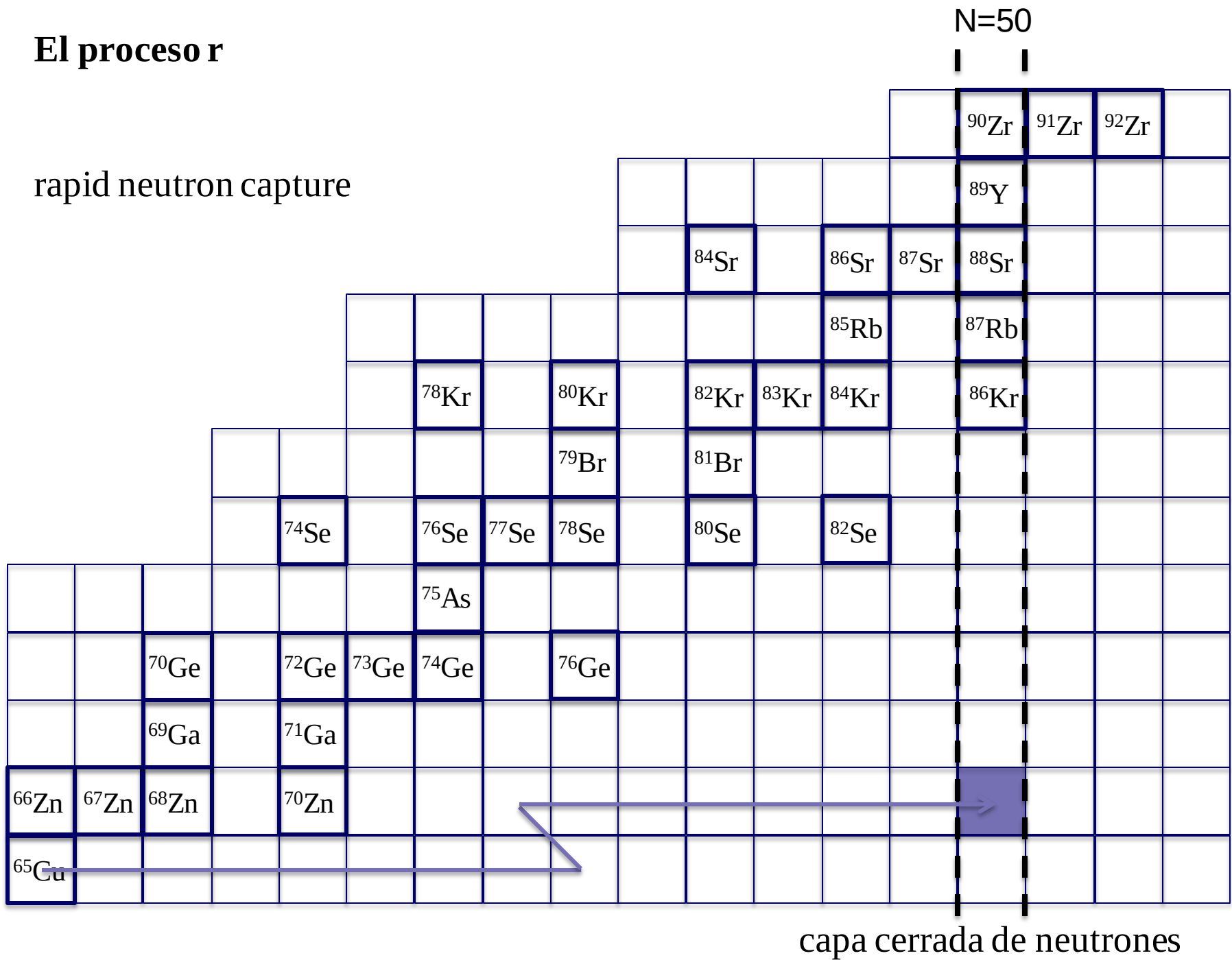
El proceso r

rapid neutron capture



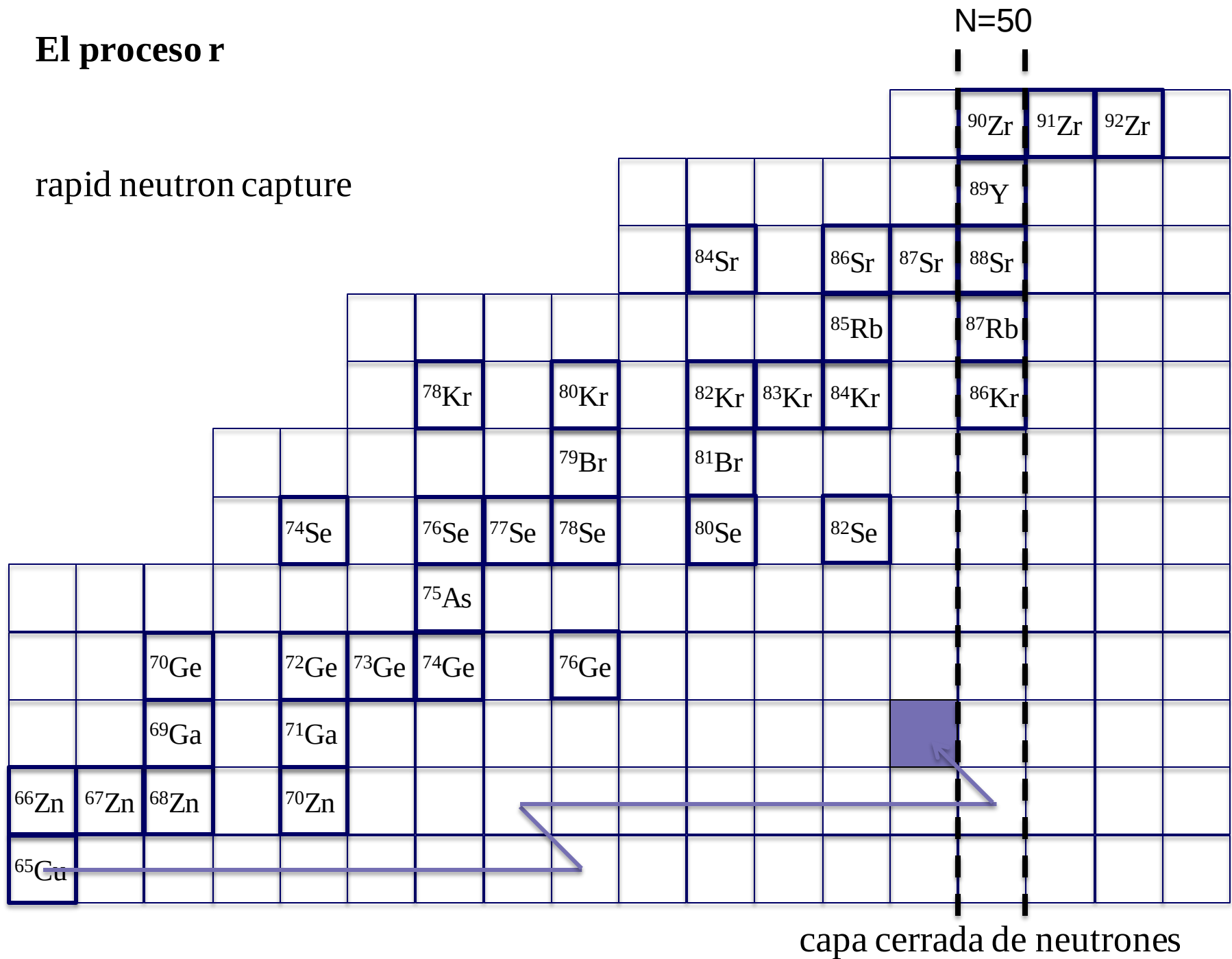
El proceso r

rapid neutron capture



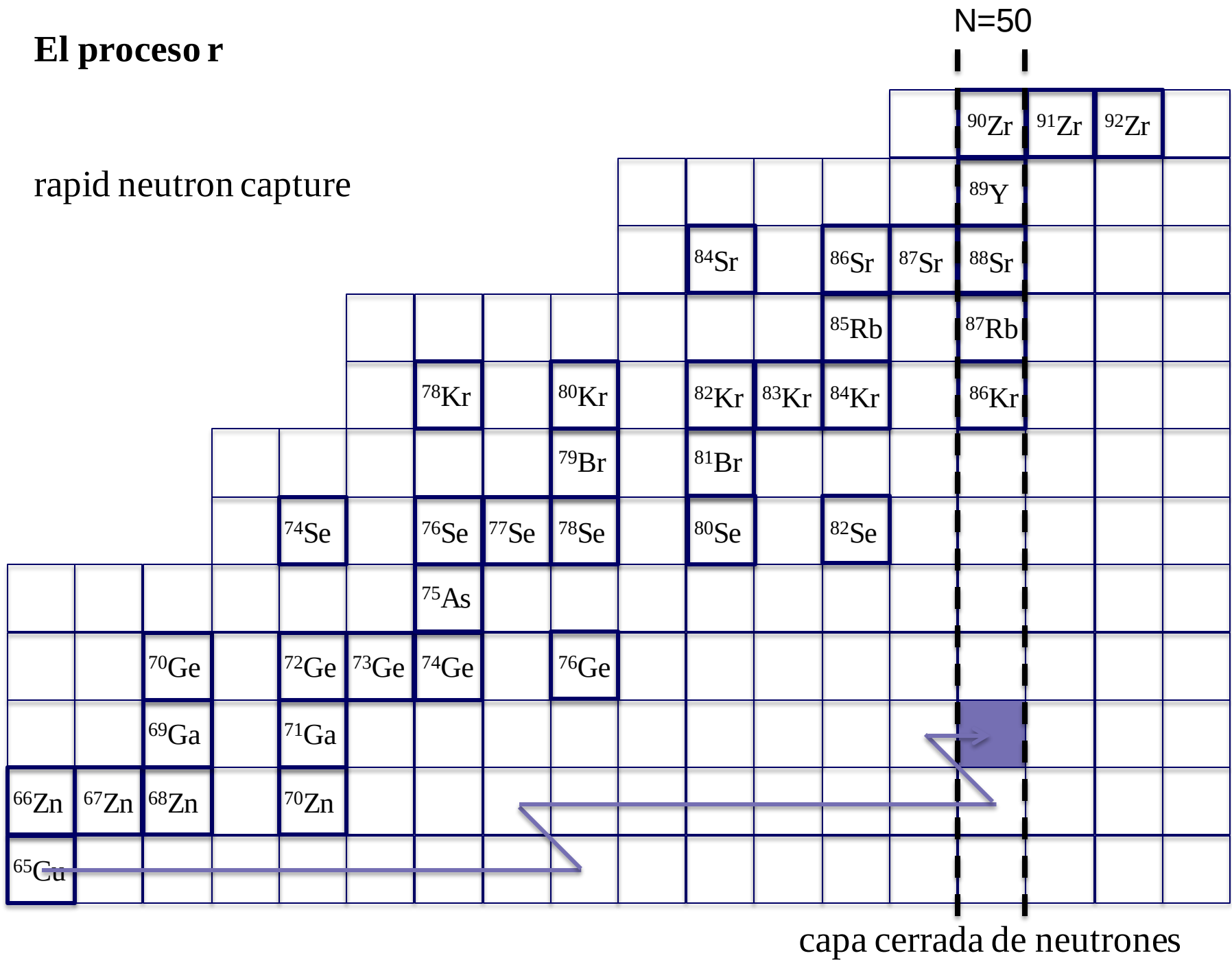
El proceso r

rapid neutron capture



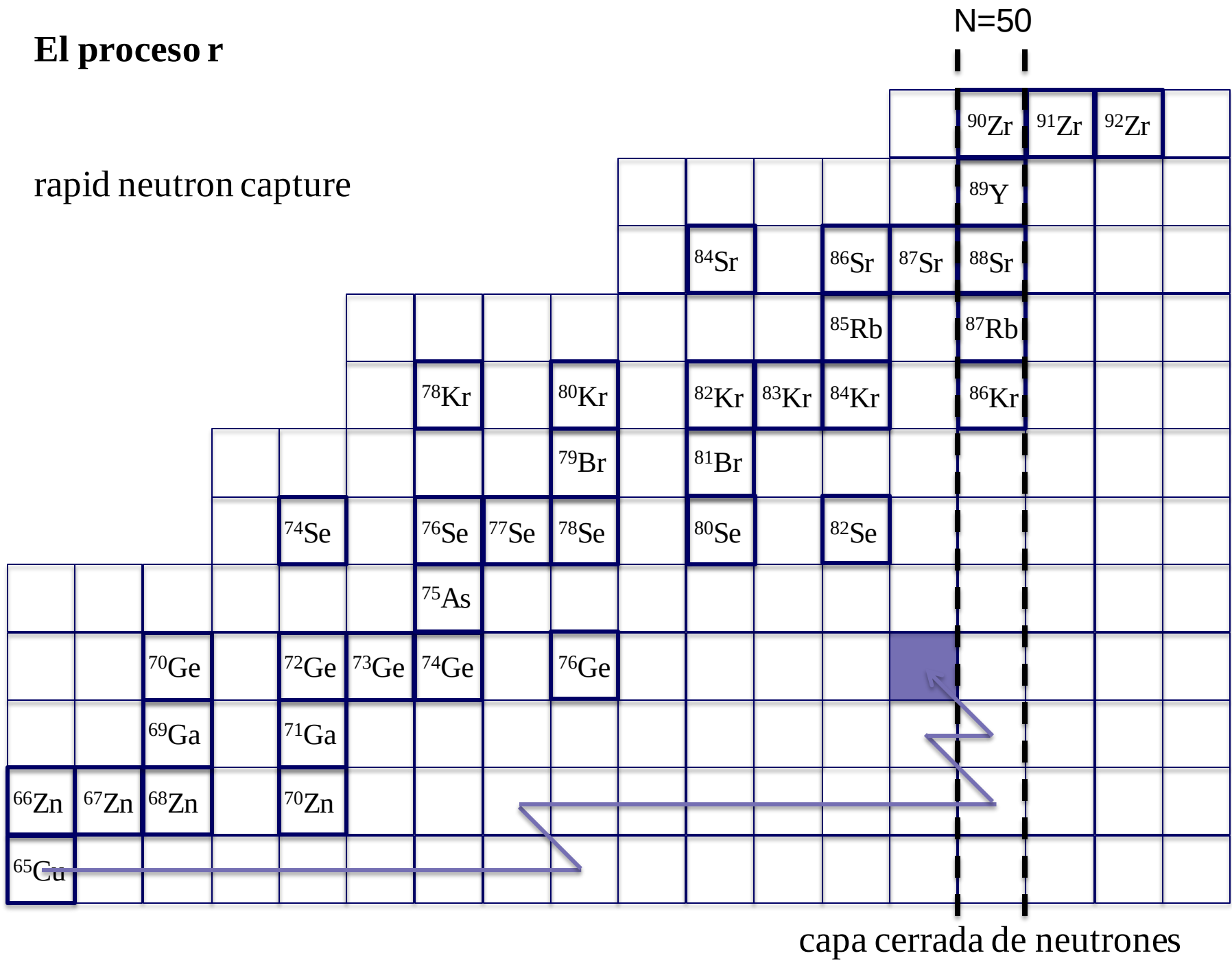
El proceso r

rapid neutron capture



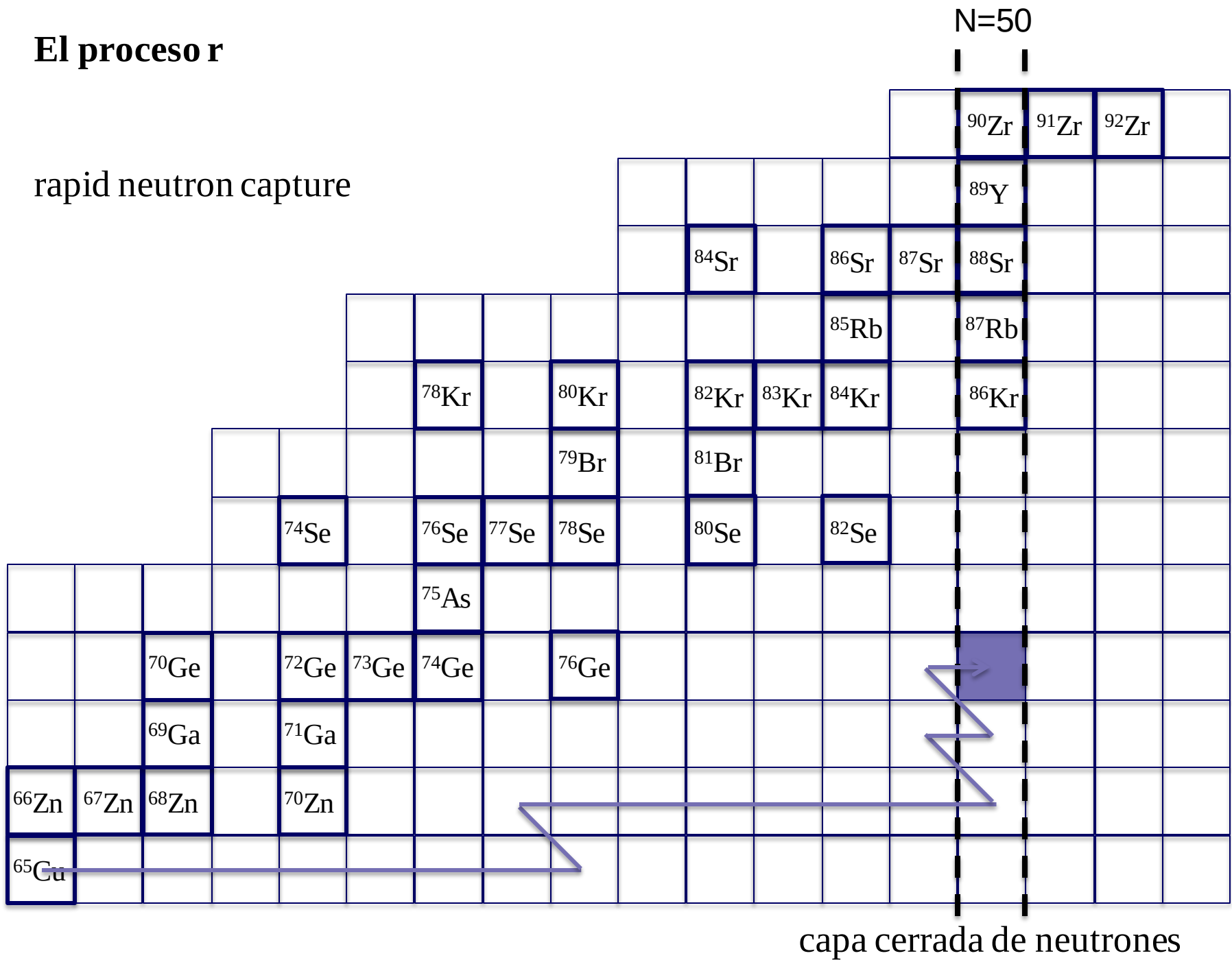
El proceso r

rapid neutron capture



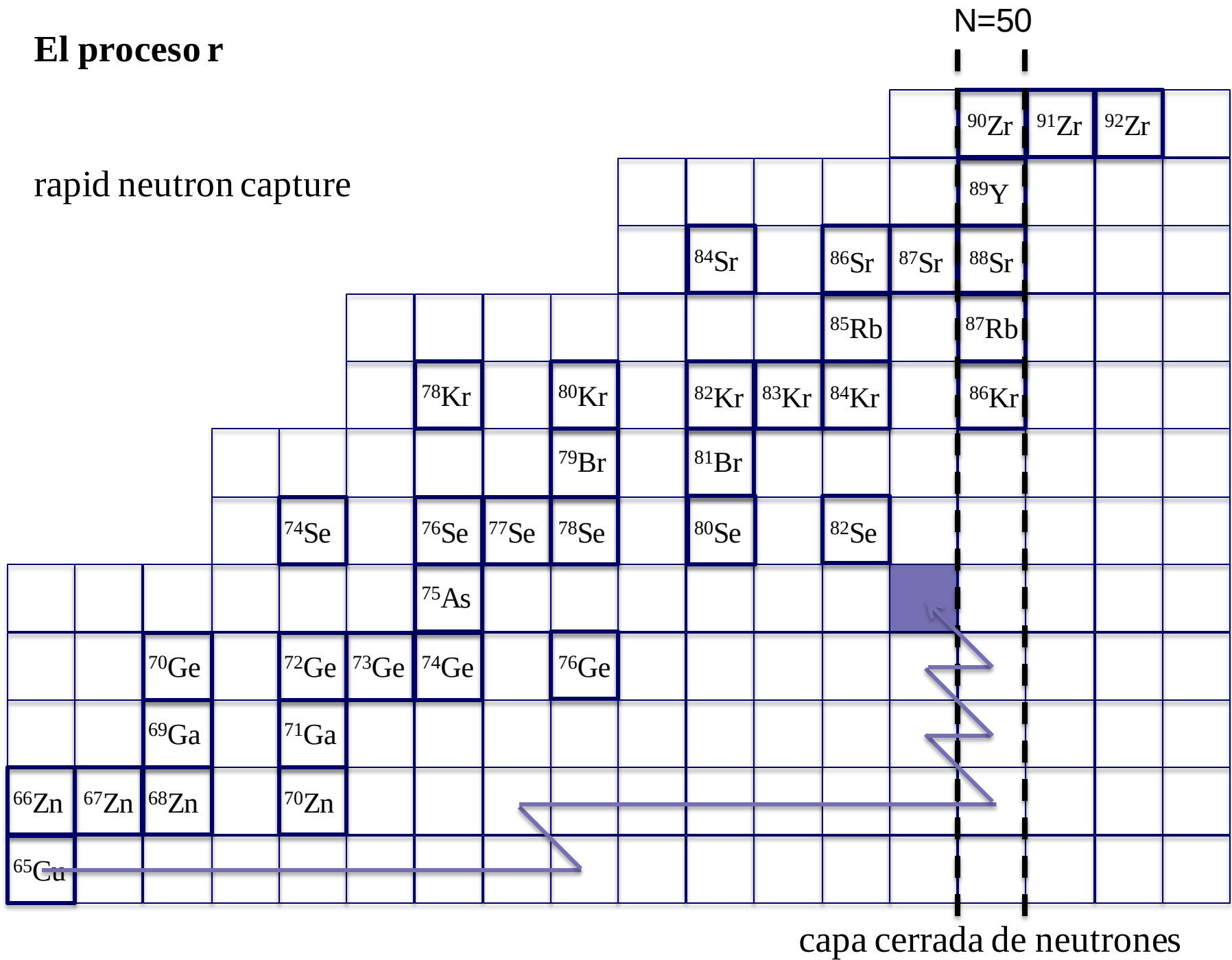
El proceso r

rapid neutron capture



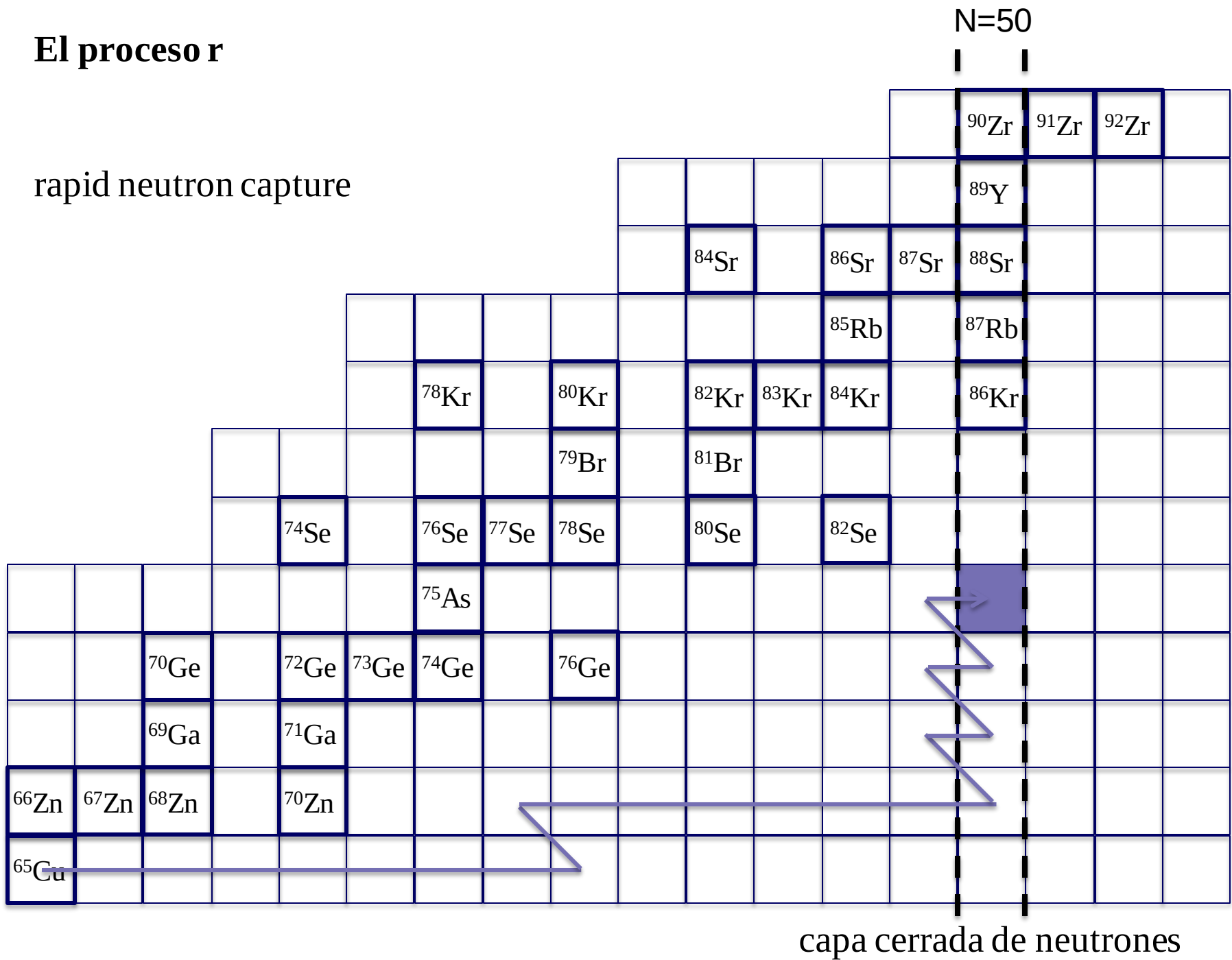
El proceso r

rapid neutron capture



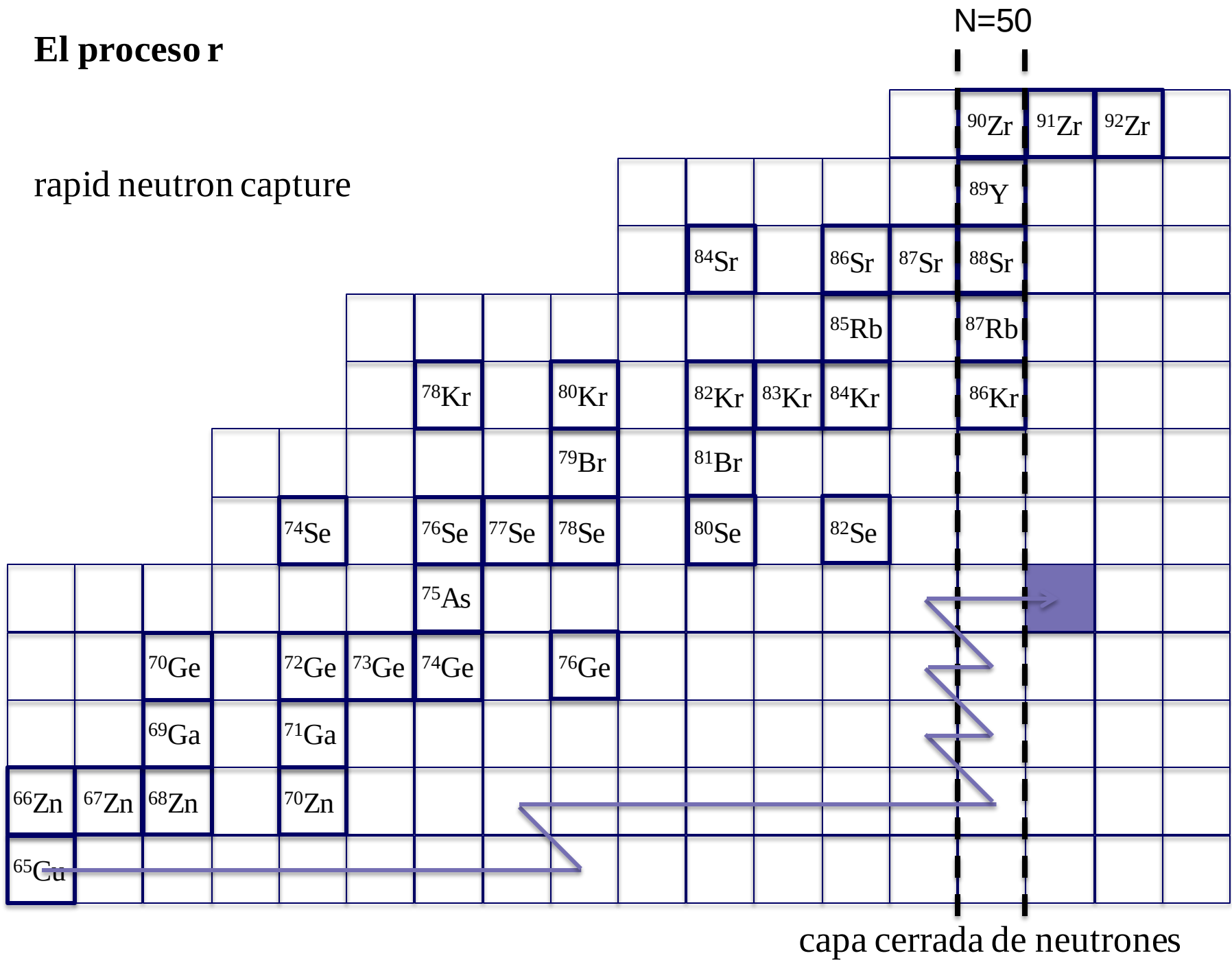
El proceso r

rapid neutron capture



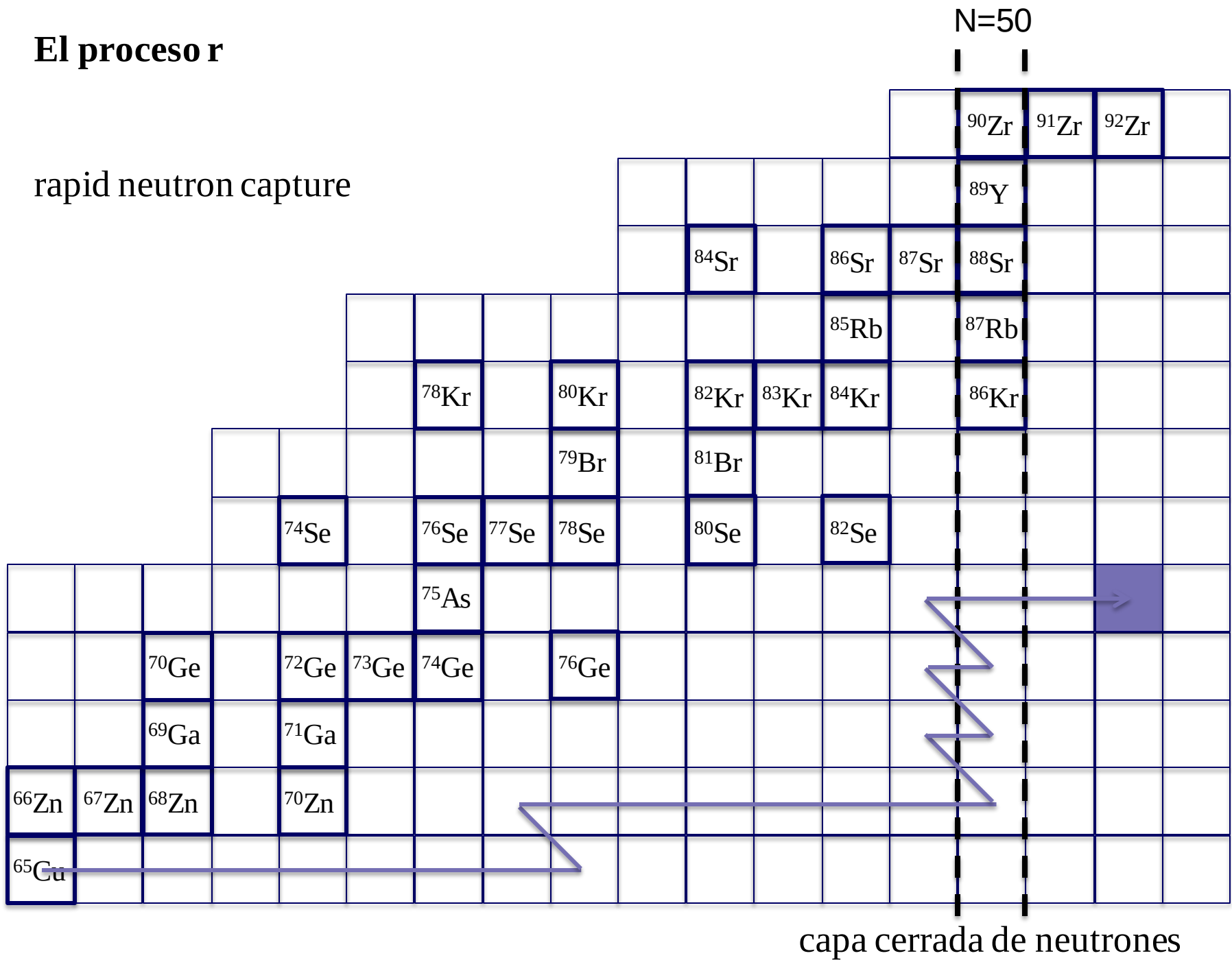
El proceso r

rapid neutron capture



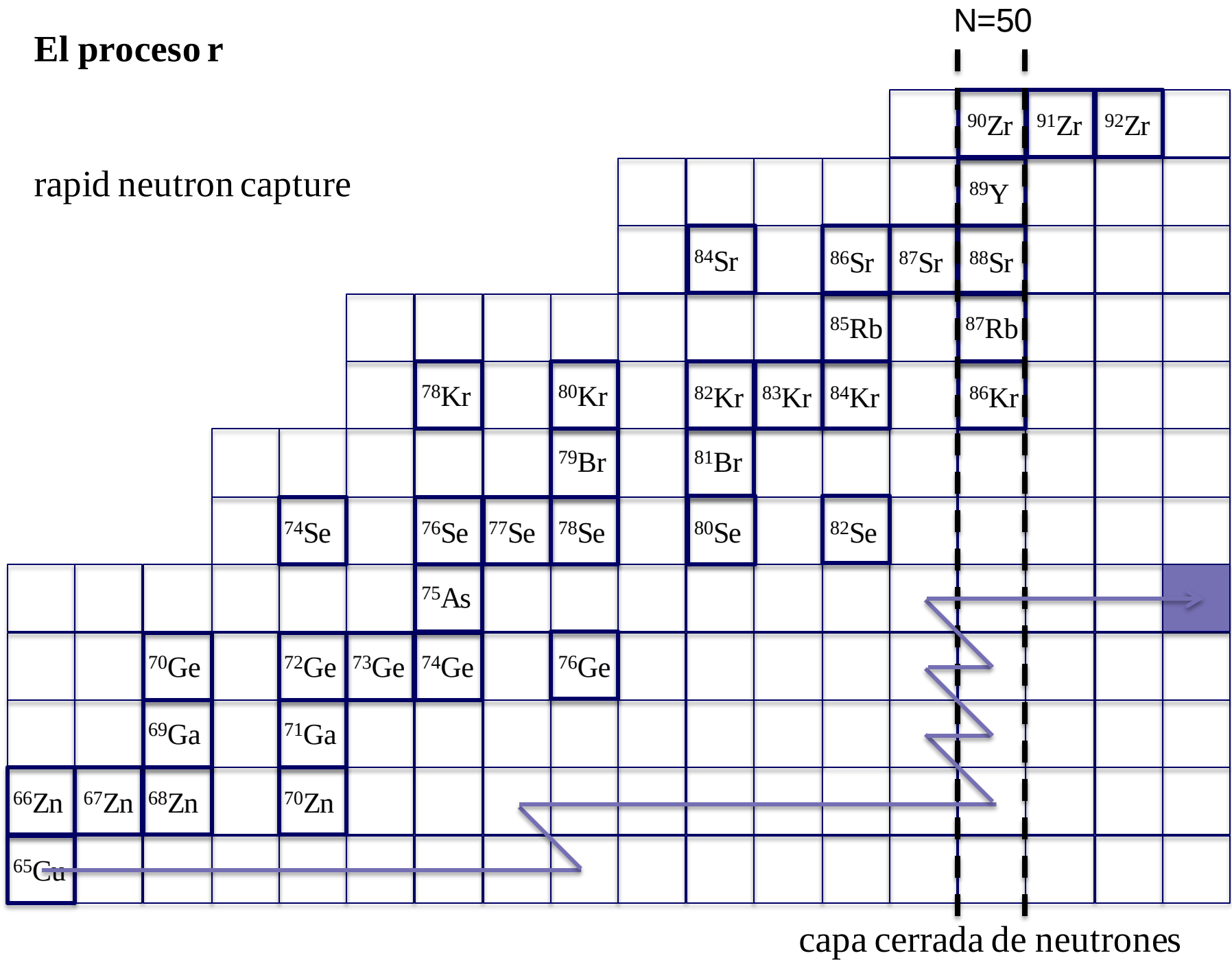
El proceso r

rapid neutron capture



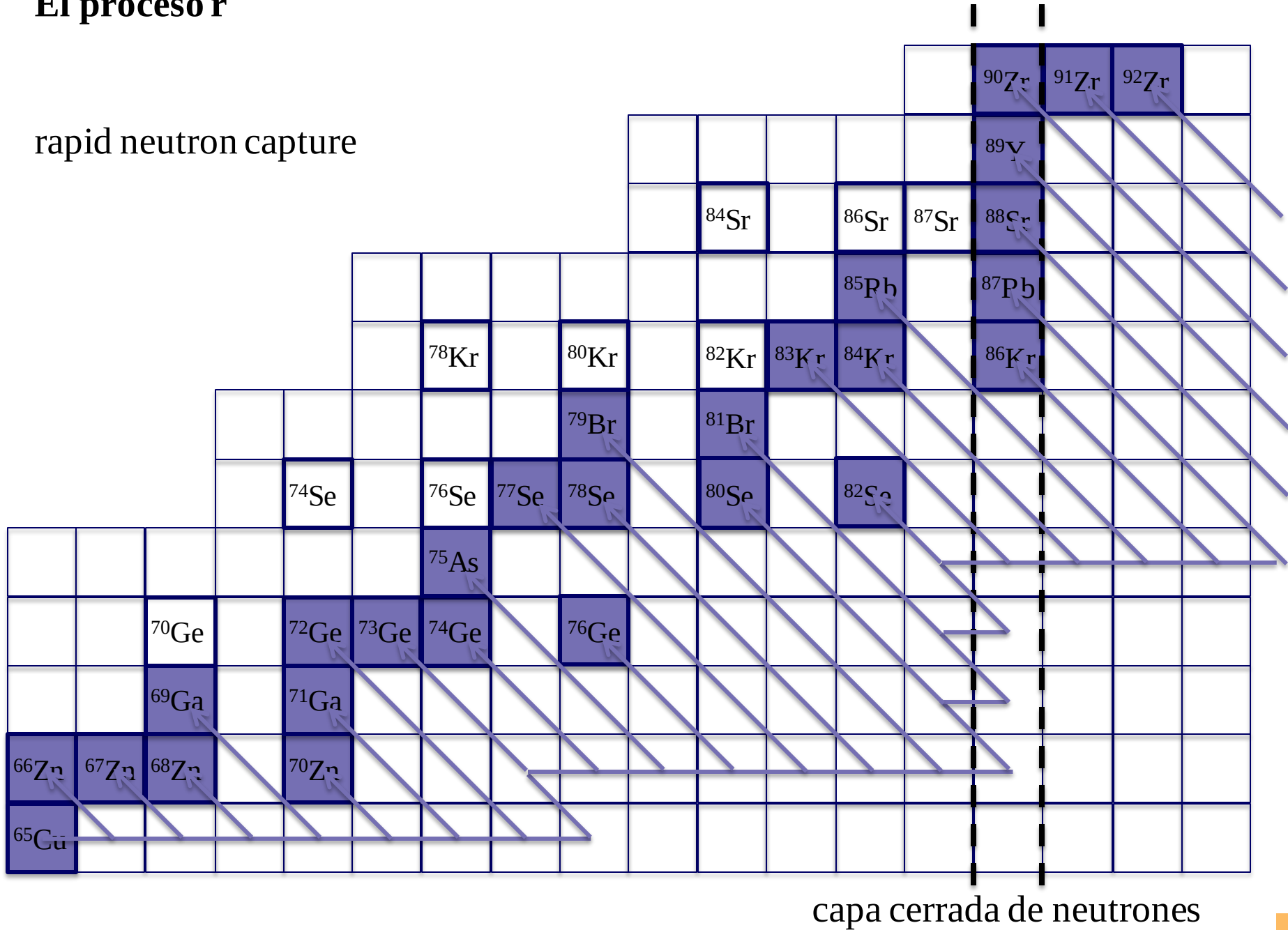
El proceso r

rapid neutron capture



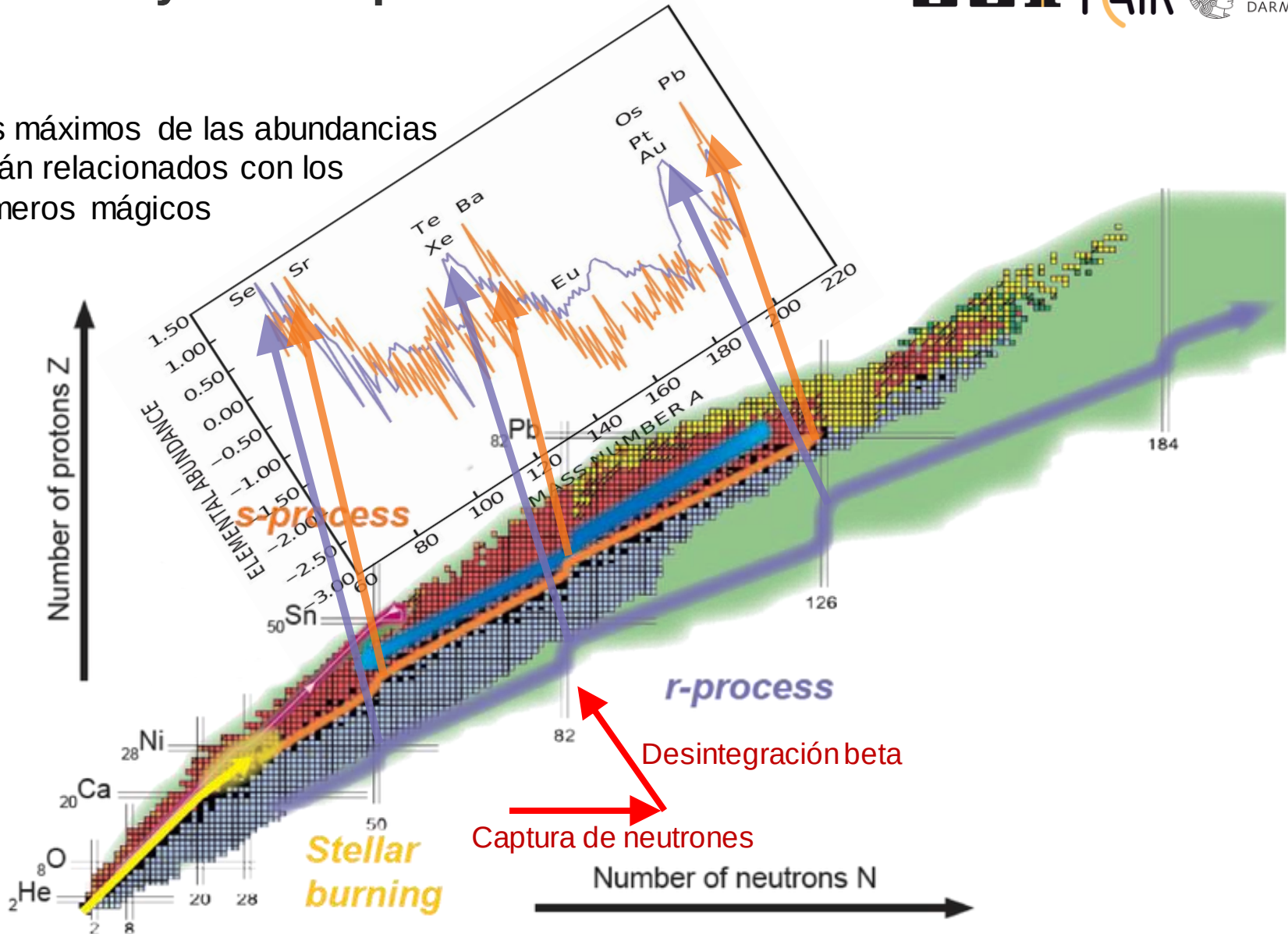
El proceso r

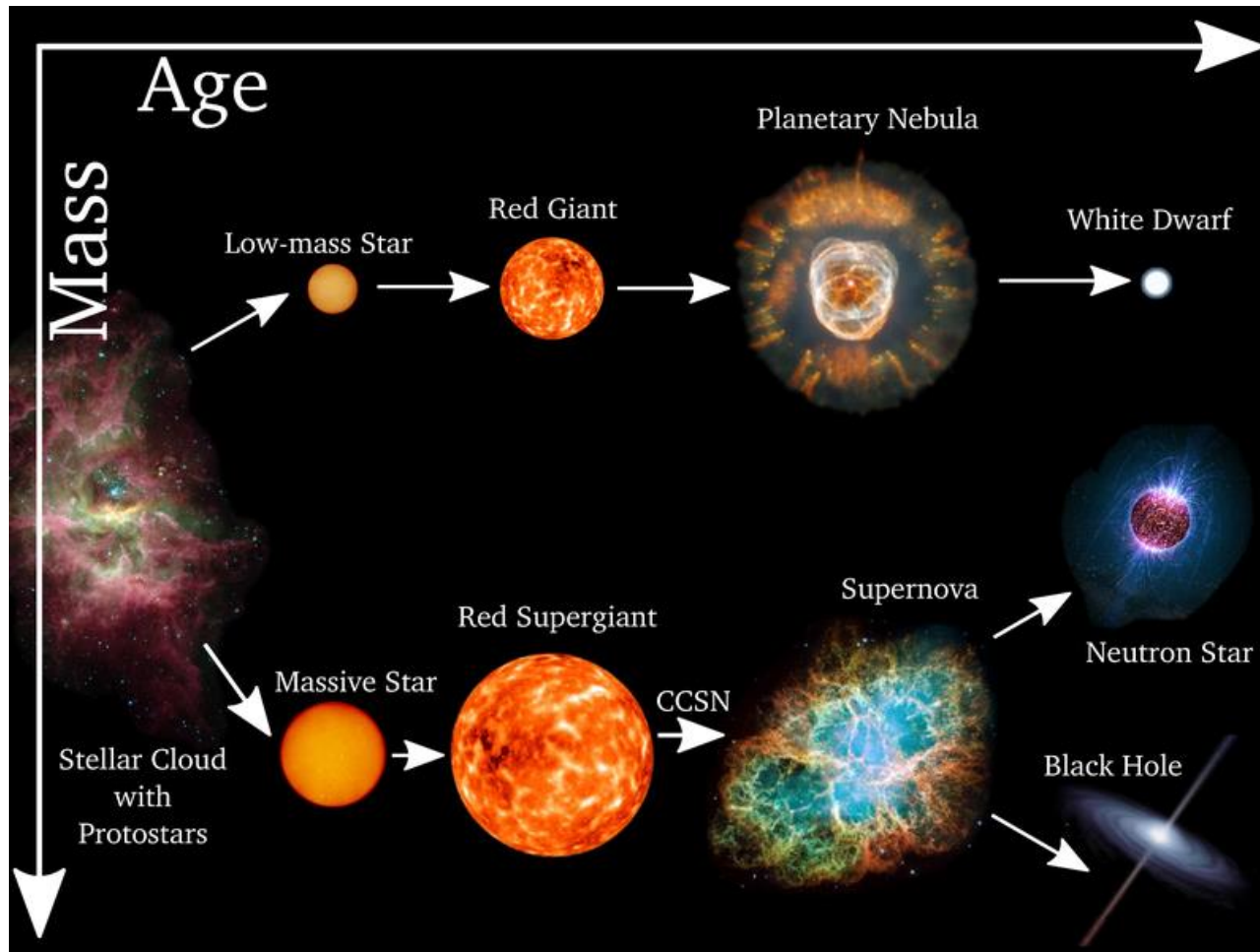
rapid neutron capture



Nucleosynthesis processes

Los máximos de las abundancias están relacionados con los números mágicos





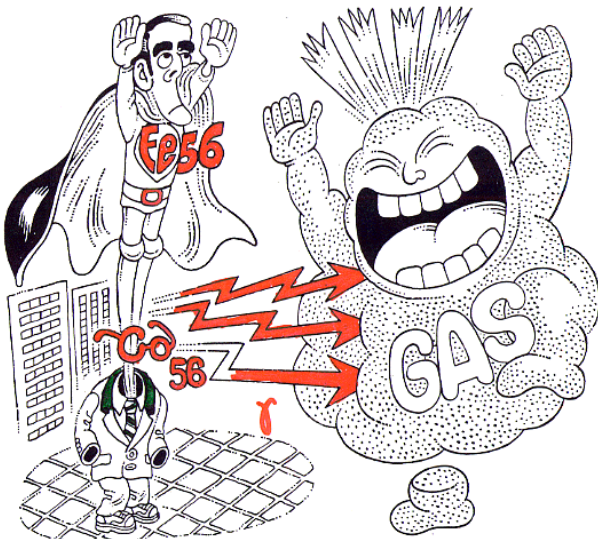
Estrellas con masas menores de 8 masas solares queman hidrogeno y helio y terminas sus vidas como una enana blanca

Estrellas con masas mayores de 8 masas solares producen un núcleo de hierro. El colapso gravitatorio del núcleo produce una **estrella de neutrones** y eyecta el manto estelar. Productos principales: Carbono, Oxigeno y Hierro

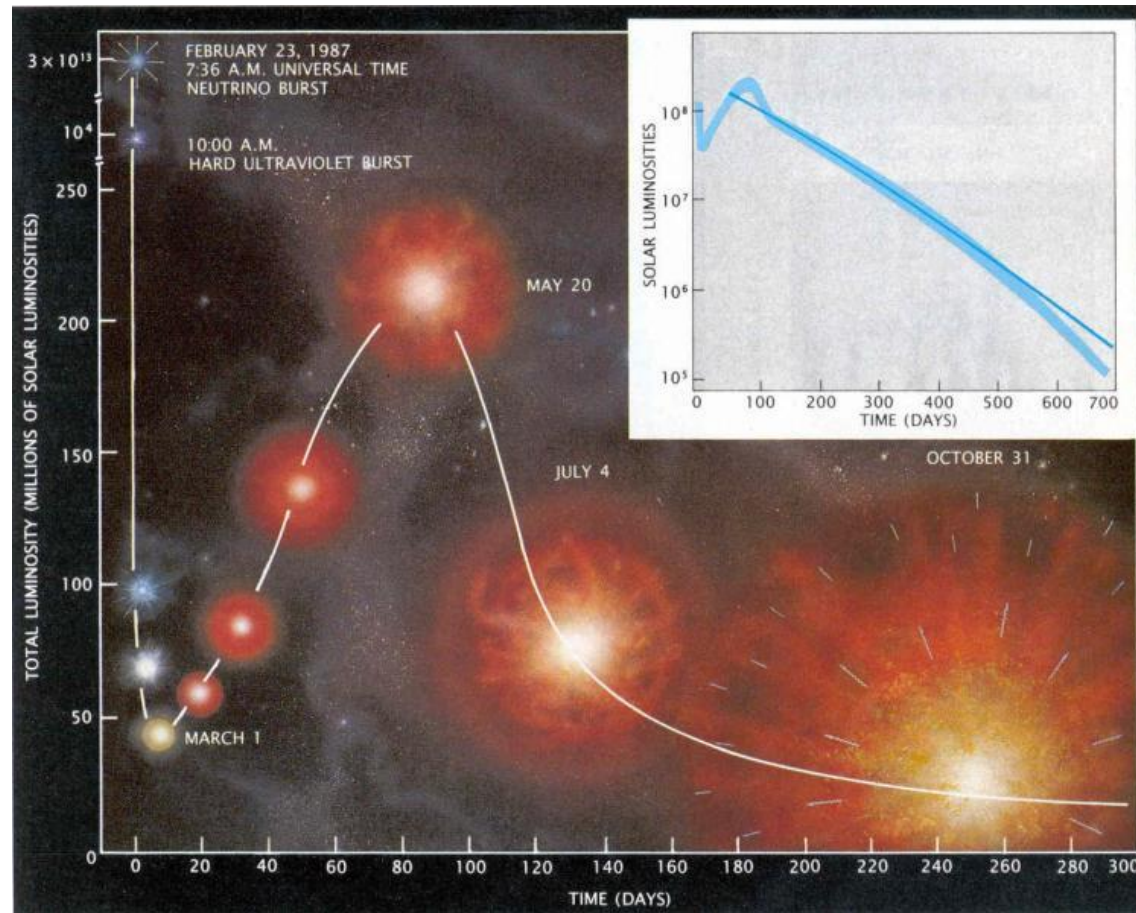
Curva de luz: evidencia de nucleosíntesis



Desintegración de ^{56}Ni ($t_{1/2} = 6 \text{ d}$) y ^{56}Co ($t_{1/2} = 77 \text{ d}$) determina la evolución

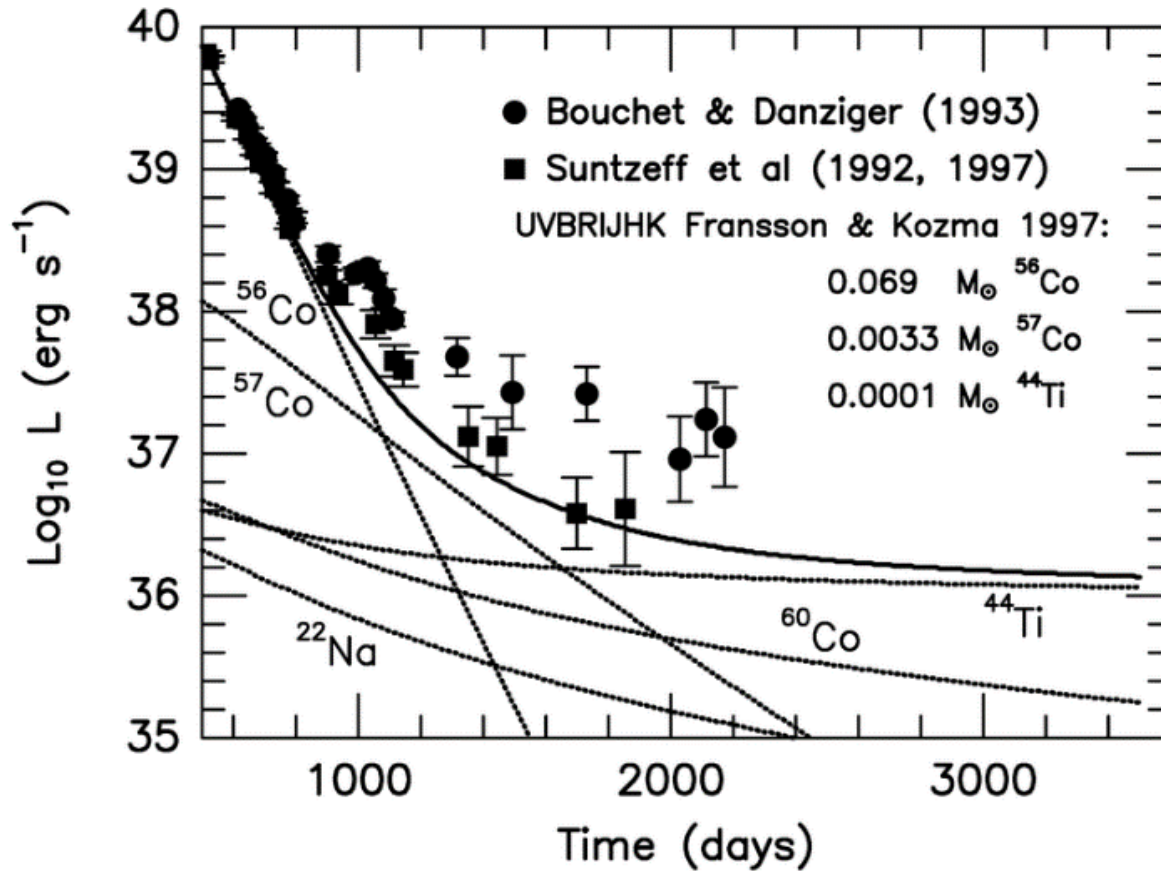


© Haruyo Nomoto



Woosley & Weaver, Scientific American 261, 1989

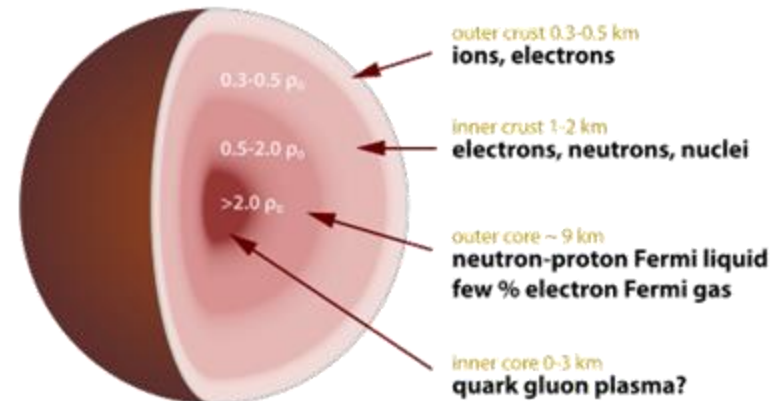
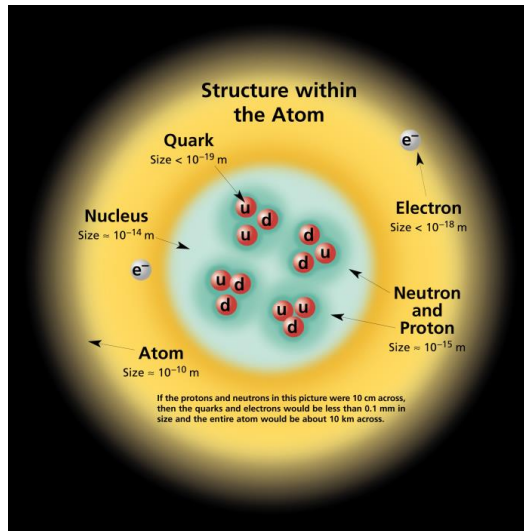
Curva de luz: evidencia *de nucleosíntesis*



Diehl & Timmes, PASP 110, 637 (1998)

Estrellas de neutrones

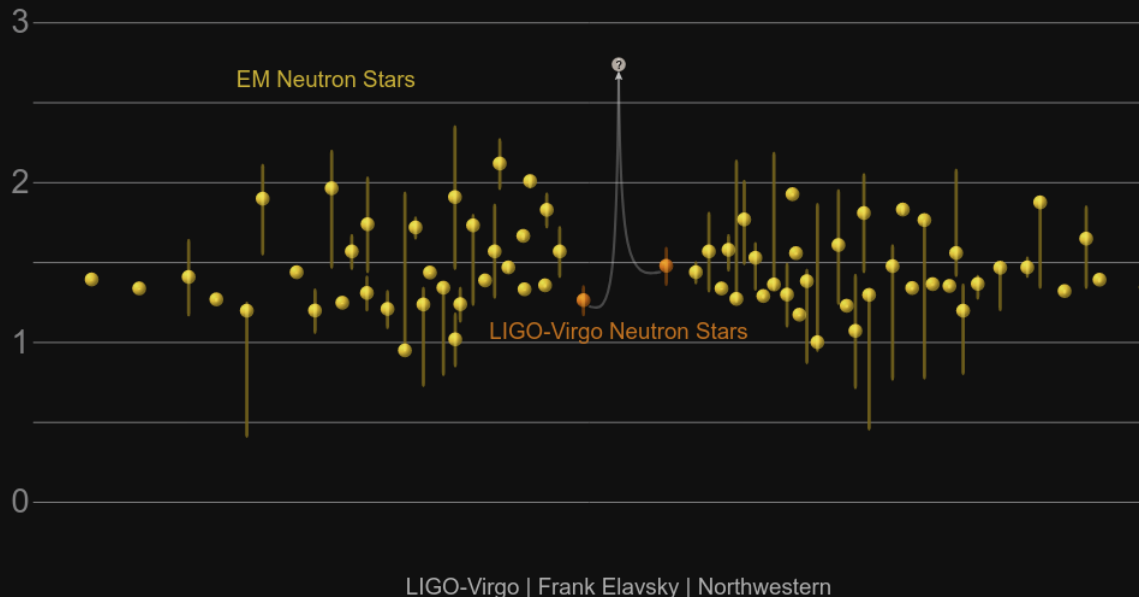
Densidad nuclear $\rho_0 \sim 2.3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$



Núcleo atómico: un centenar de neutrones y protones

Estrella de neutrons: 10^{58} neutrones

Masa (Masas solares)



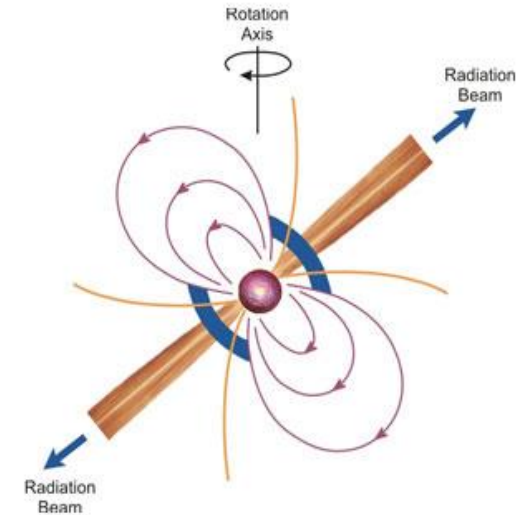
LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern

No se ha medido el radio: importante para inferir la estructura interna de la estrella.

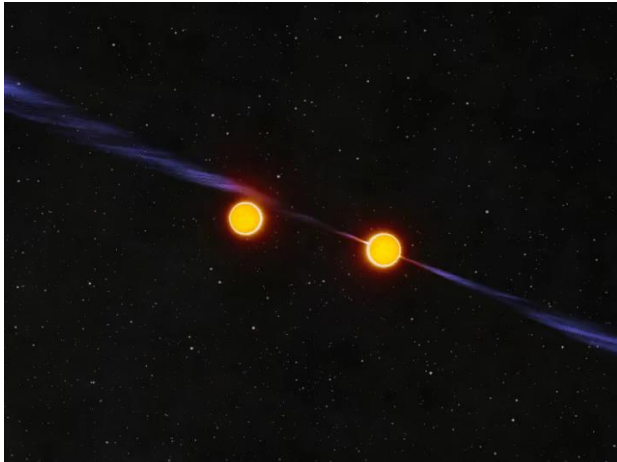
Tampoco conocemos la masa máxima de una estrella de neutrones.

Pulsars y sistemas binarios de estrellas de neutrones

- Las estrellas de neutrones tienen grandes campos magnéticos que producen un haz de radiación en la dirección del polo magnético.
- Debido a la rotación de la estrella observamos un pulso de radiación cada vez que el haz apunta hacia nosotros.
- Pulsares fueron descubiertos en 1967 por Jocelyn Bell and Anthony Hewish. Anthony Hewish ganó el premio Nobel de Física en 1974.



John Rowe Animation/Australia Telescope National Facility, CSIRO



The National Radio Astronomy Observatory, AUI, NSF

- El primer sistema binario con dos estrellas de neutrones fue descubierto por Russel Hulse y Joseph Taylor in 1974 (Premio Nobel de Física 1993)
- Predicción de relatividad general: emisión de ondas gravitatorias producirá una colisión de las estrellas en ~ mil millones de años

Relatividad general y ondas gravitatorias

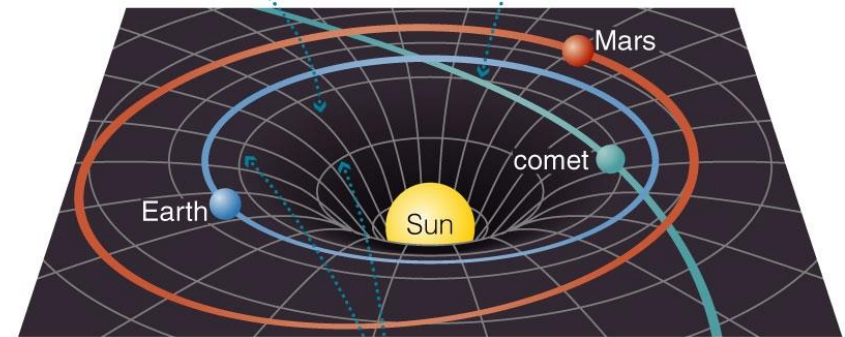
Campos gravitatorios estáticos corresponden en relatividad general a una curvatura del espacio-tiempo.

Trayectoria mas corta para una masa de prueba es una orbita kepleriana.

Para masas que orbitan una a otra con velocidad próxima a la de la luz, la “información” del cambio del campo gravitatorio se propaga hacia afuera como radiación gravitatoria a la velocidad de la luz.

Produce una onda de espacio-tiempo que se conoce como Onda Gravitacional.

The mass of the Sun causes spacetime to curve ...
... so freely moving objects (such as planets and comets) follow the straightest possible paths allowed by the curvature of spacetime.



Sistema binario de Hulse-Taylor

La emisión de ondas gravitatorias produce un decaimiento del periodo
(incremento de la frecuencia orbital)

$P = 7.752$ horas

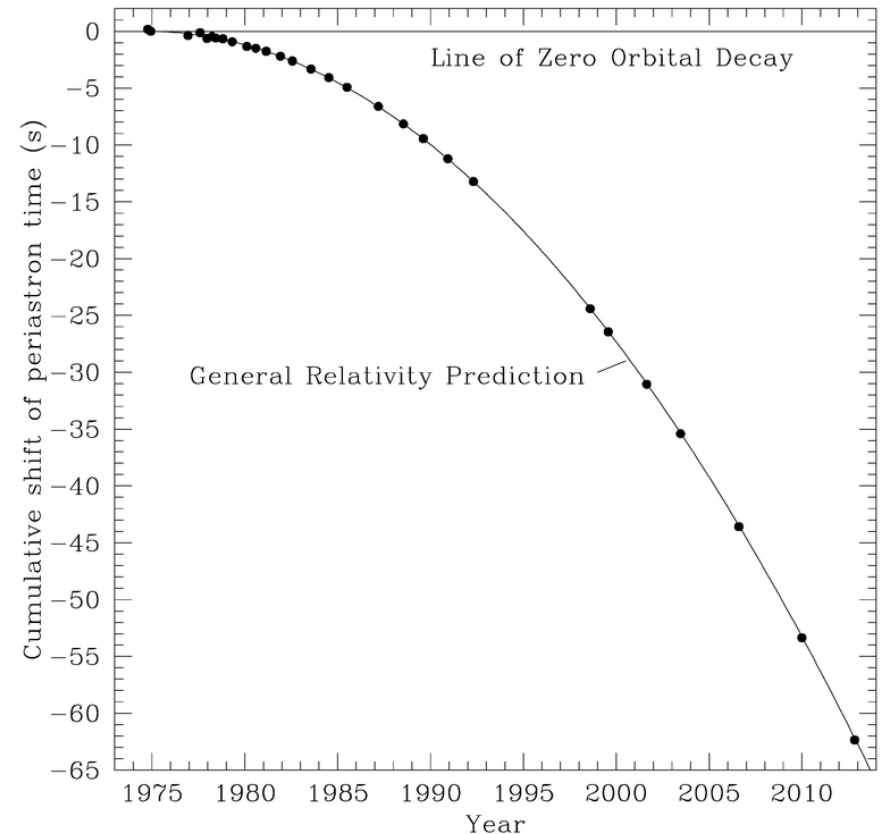
$m_1 = 1.440$ masas solares

$m_2 = 1.389$ masas solares

Periodo decrece 67 ns cada orbita

Cambio cumulativo esta de acuerdo
con la predicción de relatividad
general. Evidencia indirecta de
Ondas Gravitatorias (Russel Hulse
and Joseph Taylor, premio nobel de
Física en 1993)

Colisión en 6000 Millones de años



Weisberg & Huang, ApJ **829**, 55 (2016)

Frecuencia de ondas gravitatorias

La onda gravitatoria, h , esta caracterizada por una fase

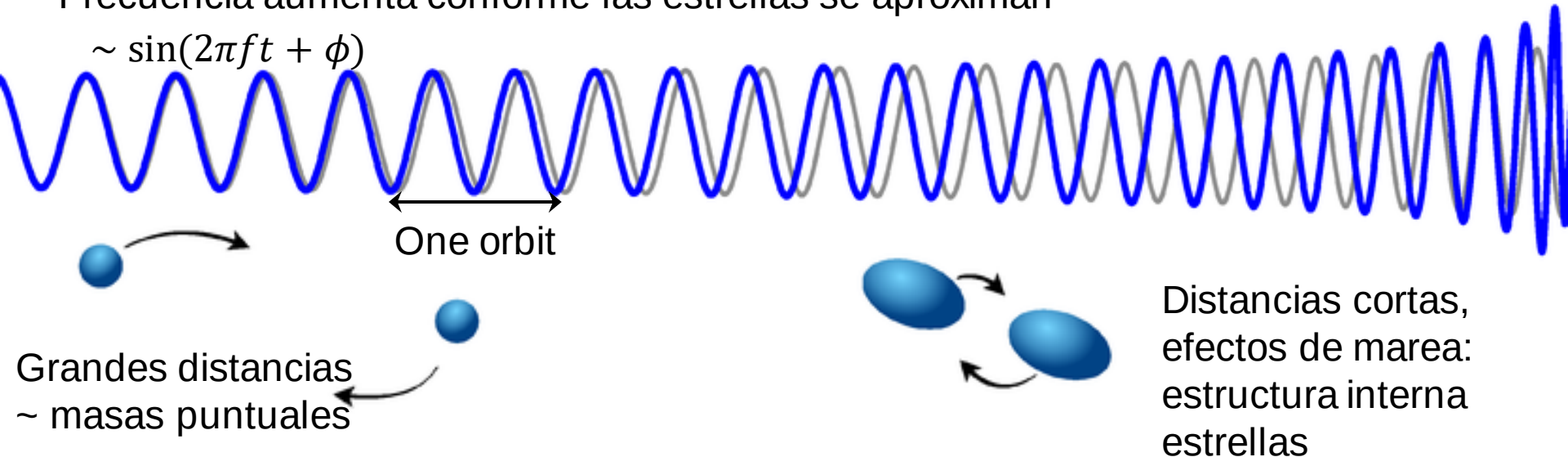
$$f = 2f_{orb} = 2/P, \quad h \sim \sin(2\pi f t + \phi)$$

Para estrella puntuates (distancia mayor que el radio)

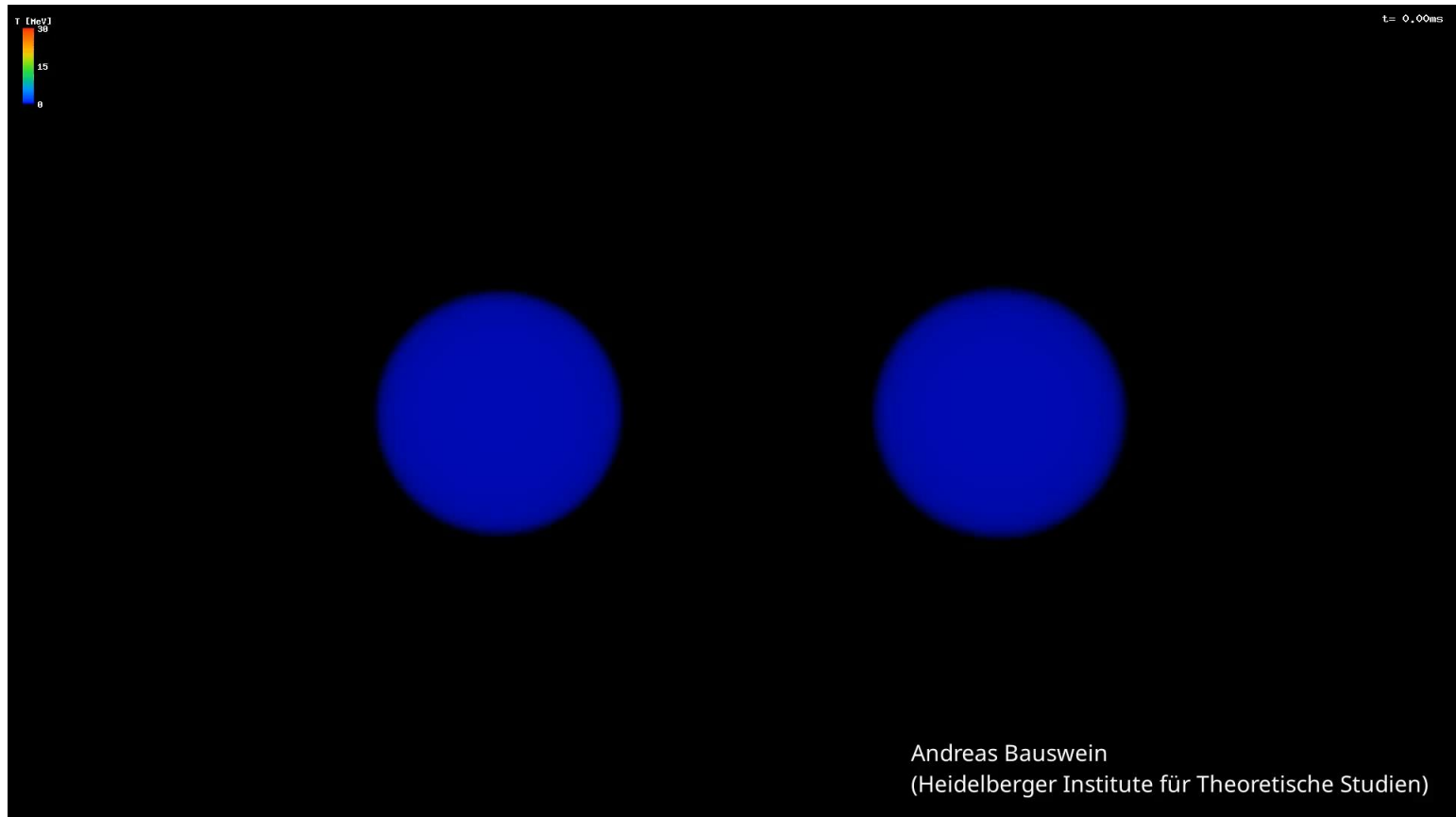
$$f^{-8/3} = \frac{(8\pi)^{8/3}}{5} \left(\frac{G\mathcal{M}}{c^3} \right)^{5/3} (t_c - t),$$

Chirp mass: $\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$

Frecuencia aumenta conforme las estrellas se aproximan



Eyección de materia durante la colisión



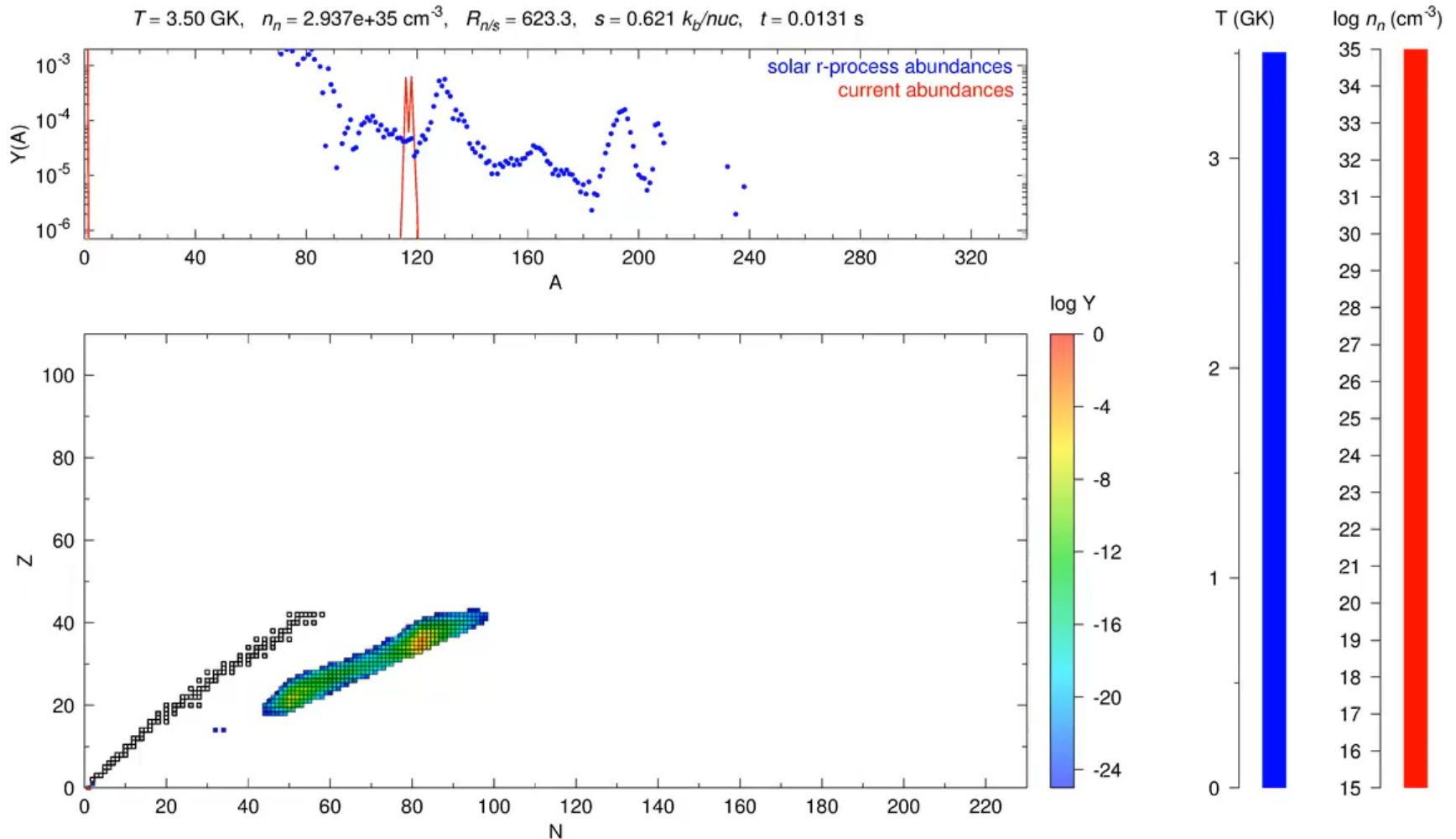
Dos fuentes de eyección:

- Dinámico: durante las fases iniciales de la colisión (milisegundos)
- Disco de acreción: época posterior (100-1000 milisegundos)

Propiedades de la materia eyectada dependen del objeto central (estrella de neutrones o agujero negro). Afecta la emisión de neutrinos

R process en el eyecta

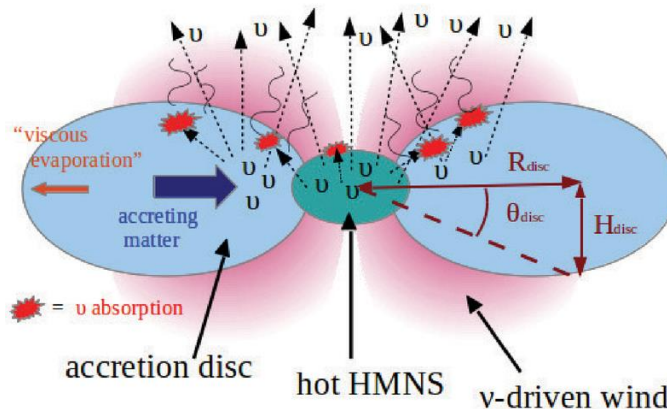
Materia eyectada contiene gran cantidad de neutrones



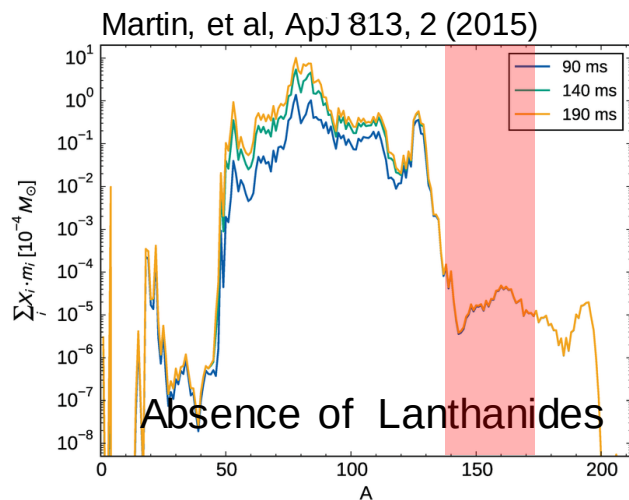
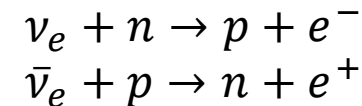
Decaimiento radioactivo produce energía

Influencia del objeto central

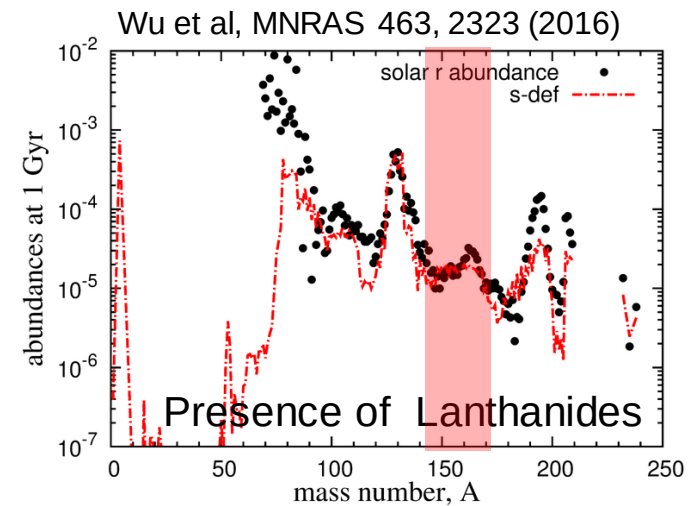
Después de la colisión se forma una estrella de neutrones hipermasiva que es estable debido a rotación antes de colapsar a un agujero negro.



Grandes flujos de neutrinos reducen la razón entre neutrones y protones.

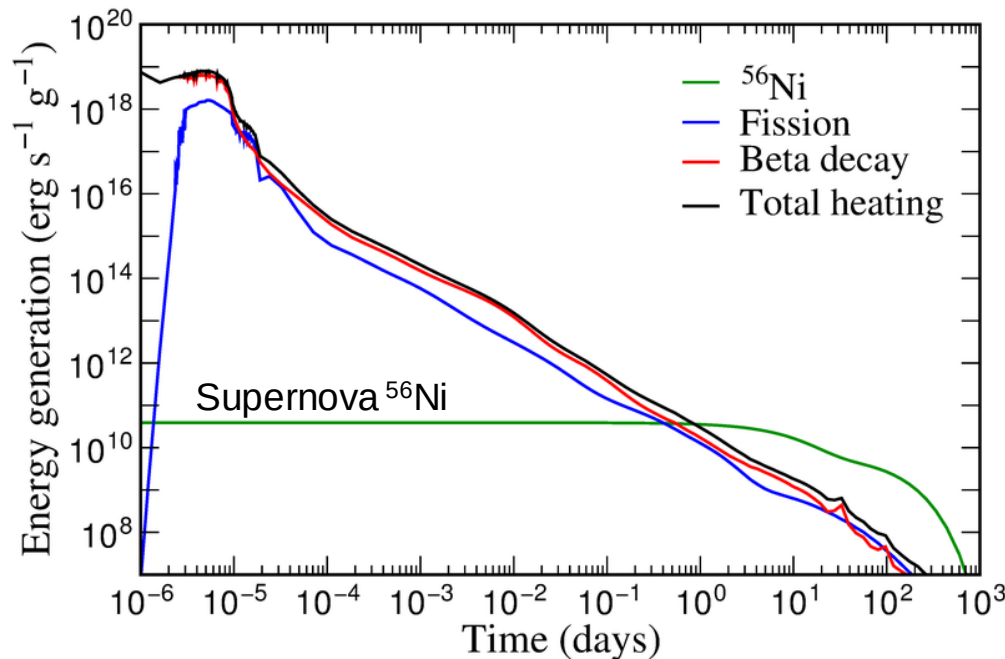


Una vez que la estrella colapsa a un agujero negro la emisión de neutrinos cesa y la razón entre neutrones y protones aumenta.



Producción de energía por el proceso r

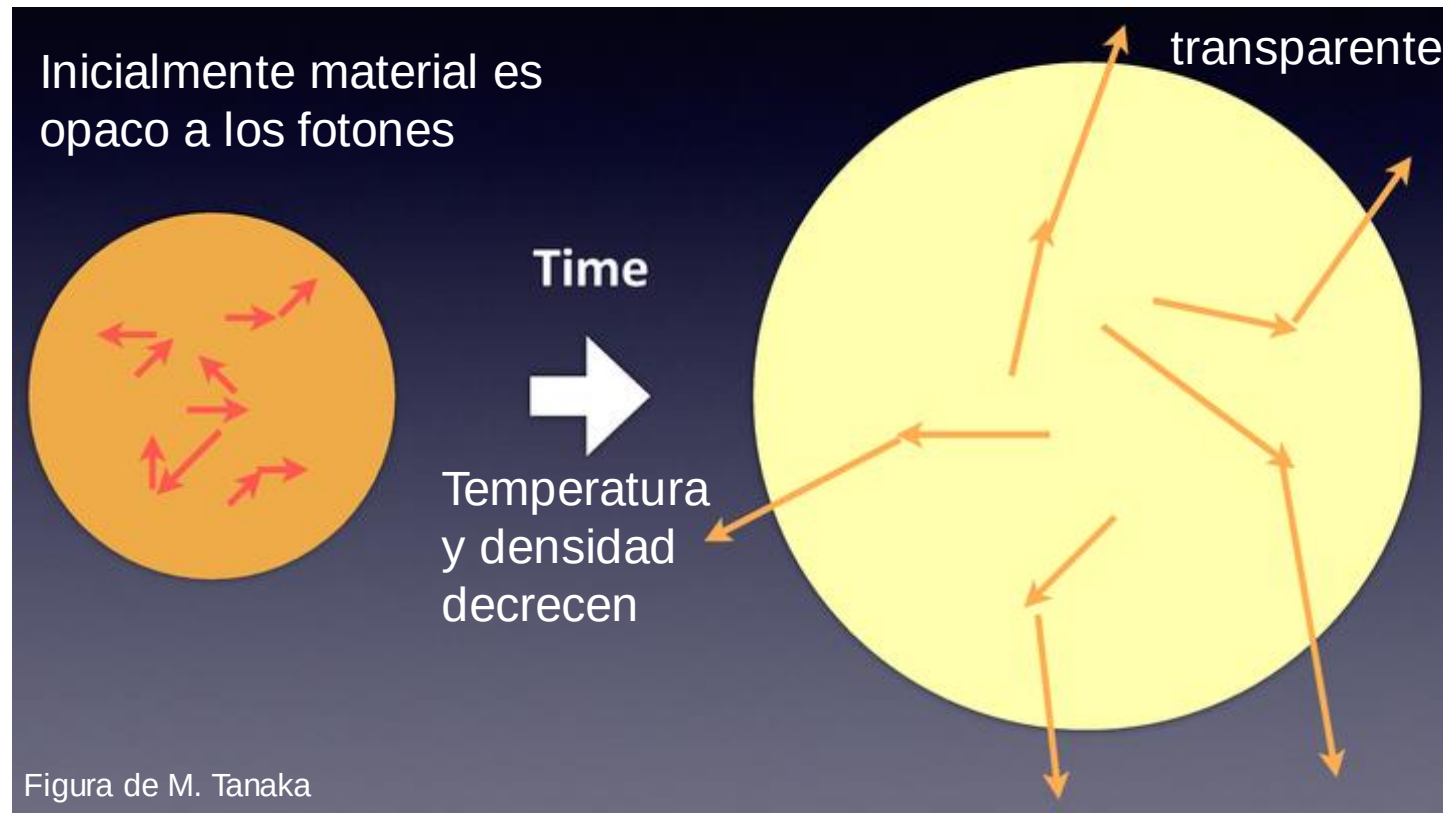
La desintegración de los productos del proceso r produce energía: $\dot{\epsilon} \sim t^{-1.3}$. Muchos núcleos decayendo al mismo tiempo.



Producirá una señal electromagnética (luz) cuyas propiedades dependen :

- Cantidad de energía producida.
- Eficiencia con que la energía es absorbida (termalización)
- Opacidad del gas (depende de la composición, Lantánidos y Actínidos)

Impact of opacity

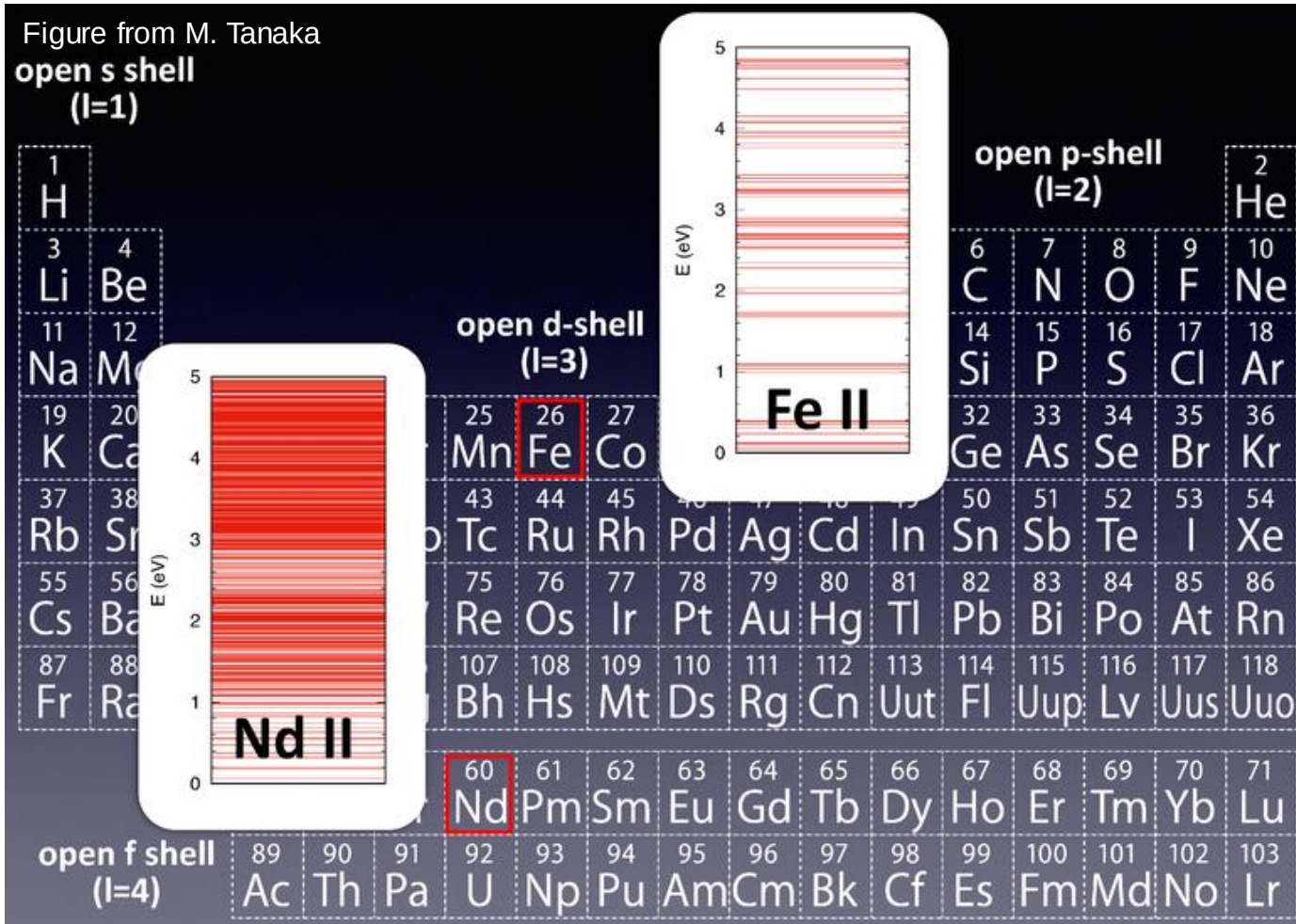


Transición de opaco a transparente depende de la probabilidad de interacción de los (opacidad). Depende de la estructura de los átomos.

Opacidad baja: emisión temprana debida a materia bastante caliente (longitudes de onda corta, azul)

Opacidad alta: emisión tardía debida a materia más fría (longitudes de onda larga, rojo)

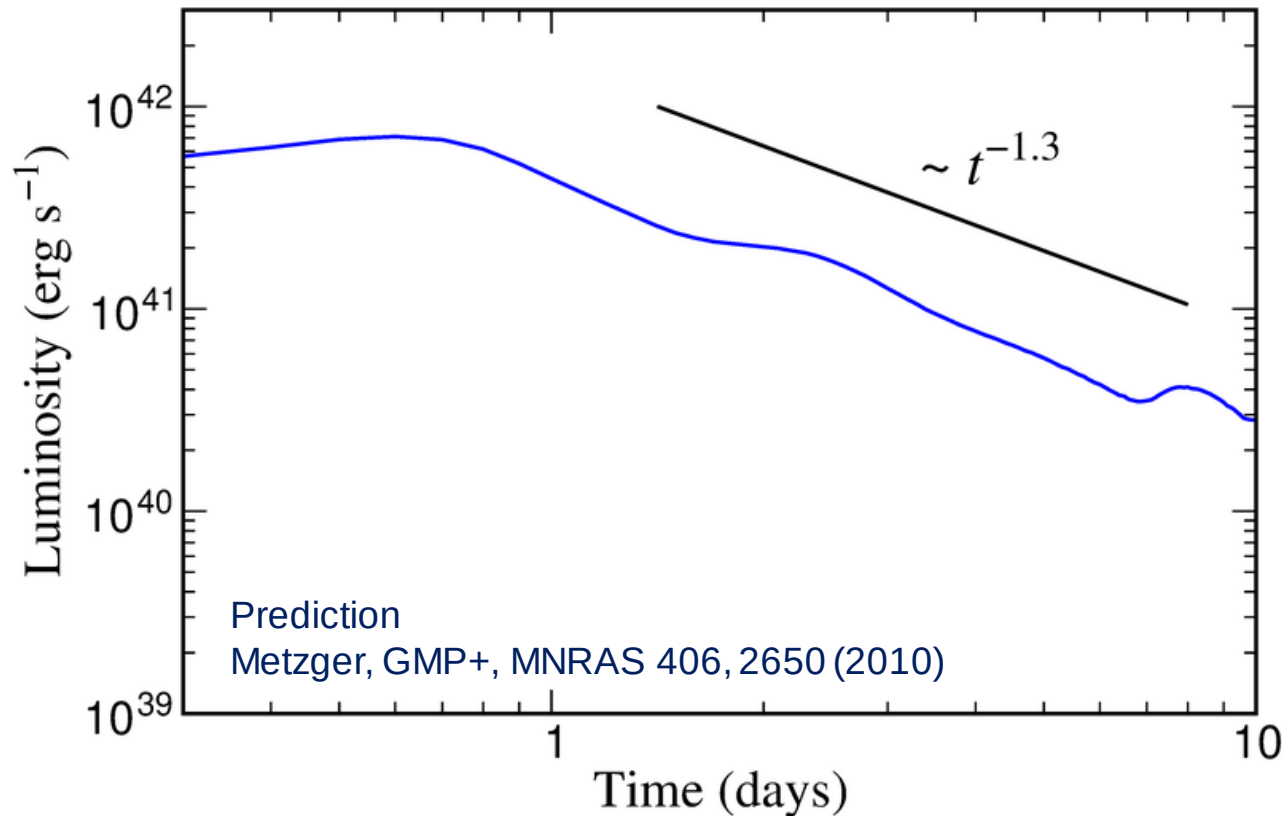
Impacto de Lantánidos/Actínidos



Gran número de estados de los Lanthanides/Actinides produce una opacidad alta

Barnes & D. Kasen, *Astrophys. J.* 775, 18 (2013); Tanaka & Hotokezaka, *Astrophys. J.* 775, 113 (2013).

Kilonova: señal electromagnética del proceso r

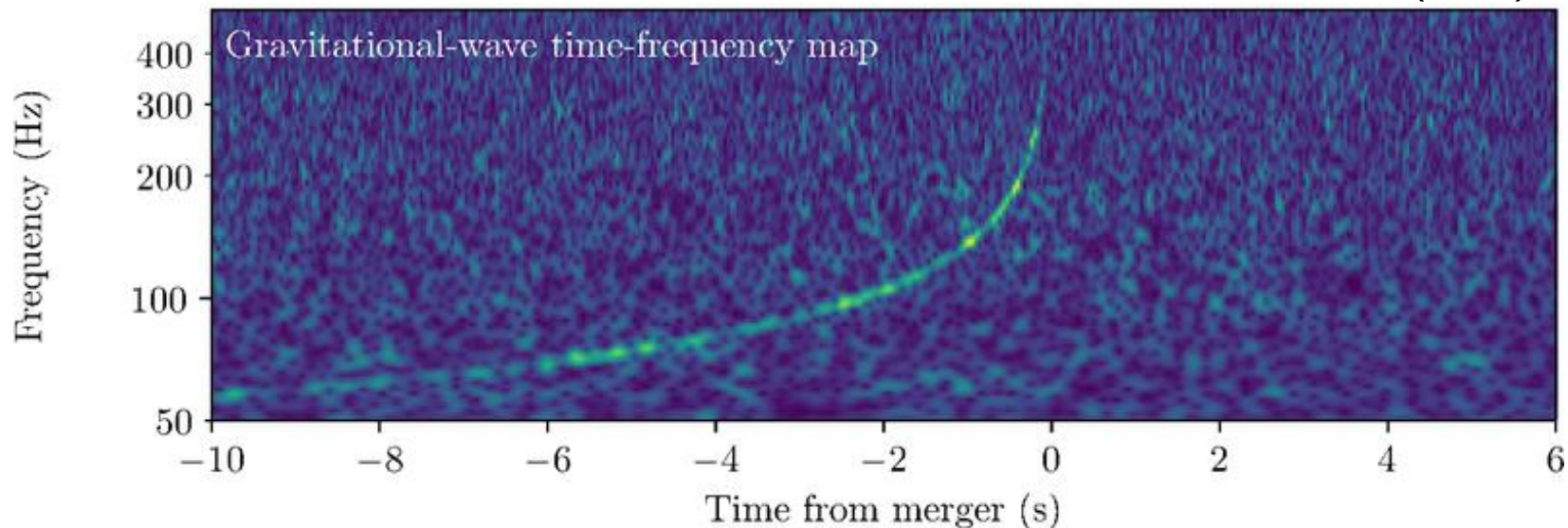


Luminosidad equivalente a 1000 novas ([kilonova](#)) en escalas de tiempos de días. Depende de la cantidad de materia eyectada, velocidad y composición.

GW170817: primera detección de ondas gravitatorias colisión estrellas de neutrones

El 17 agosto 2017, 12:41:04 UTC advanced LIGO y Virgo detectaron la primera señal gravitacional de una colisión de estrellas de neutrones

Abbott, et al, PRL 119, 161101 (2017).



Incremento de frecuencia determinado por la masa chirp $\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = 1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$

Masa total: $M = 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$

masa primaria: $m_1 \in (1.36-1.60) M_{\odot}$

masa secundaria: $m_2 \in (1.17-1.36) M_{\odot}$

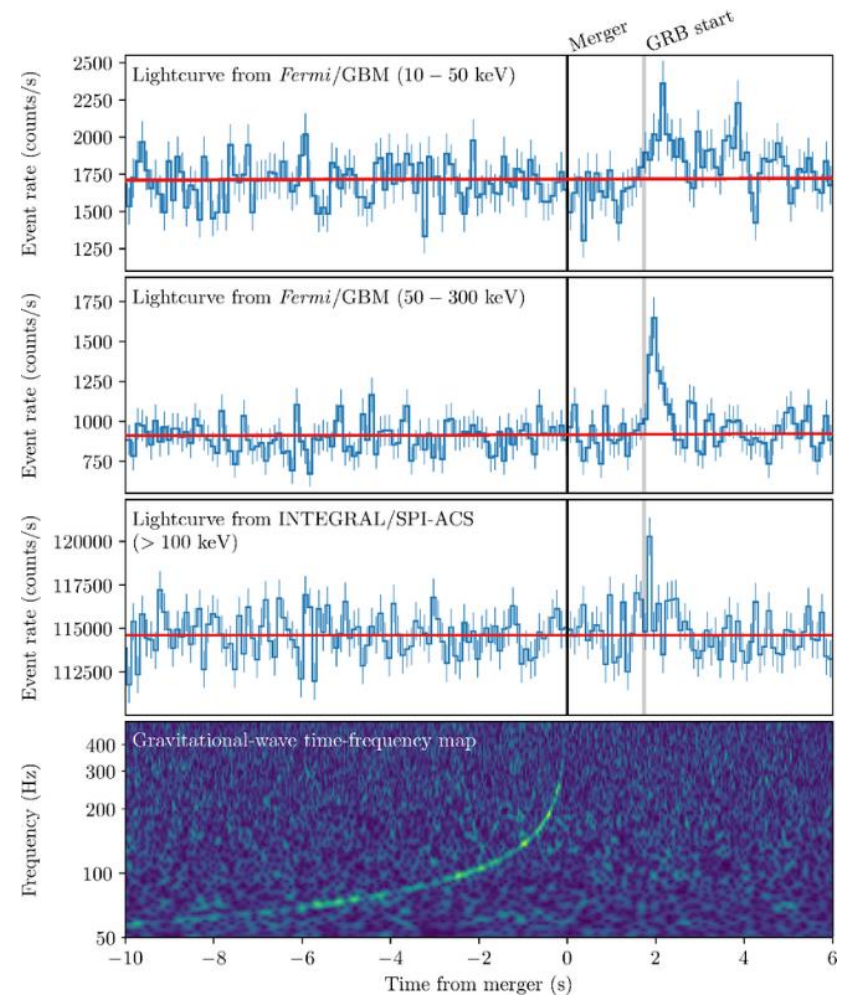
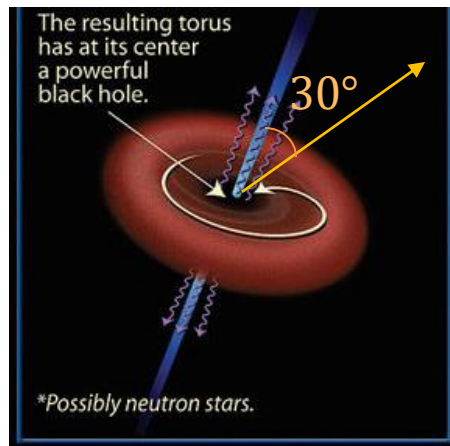
Distancia: 40^{+8}_{-14} Mpc (130 millones de años luz)

Radio: 8.9-13.2 km

De et al, PRL **121**, 091102 (2018)

GRB170817A: detección de rayos gamma

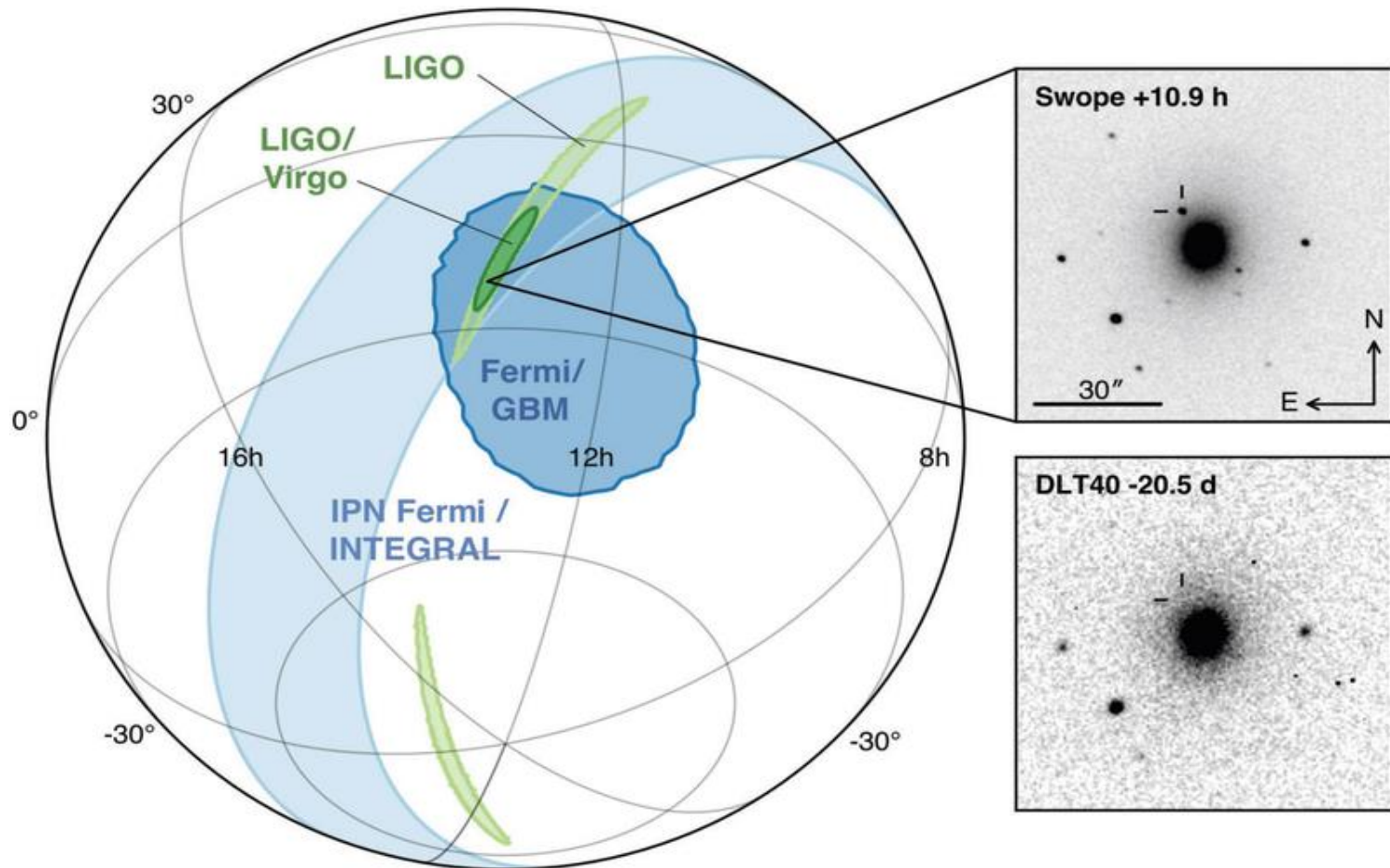
- 1.7 s más tarde Fermi and INTEGRAL detected the GRB 170817 A
- A pesar de ser el GRB más cercano jamás observado es muy débil
- Chorro forma un ángulo de $\sim 30^\circ$ con la línea de vista
- Formación de agujero negro $\lesssim 100$ ms. Masa máxima estrella de neutrones $\lesssim 2.2$ masas solares



B. P. Abbott, et al, *Astrophys. J.* 848, L13 (2017).

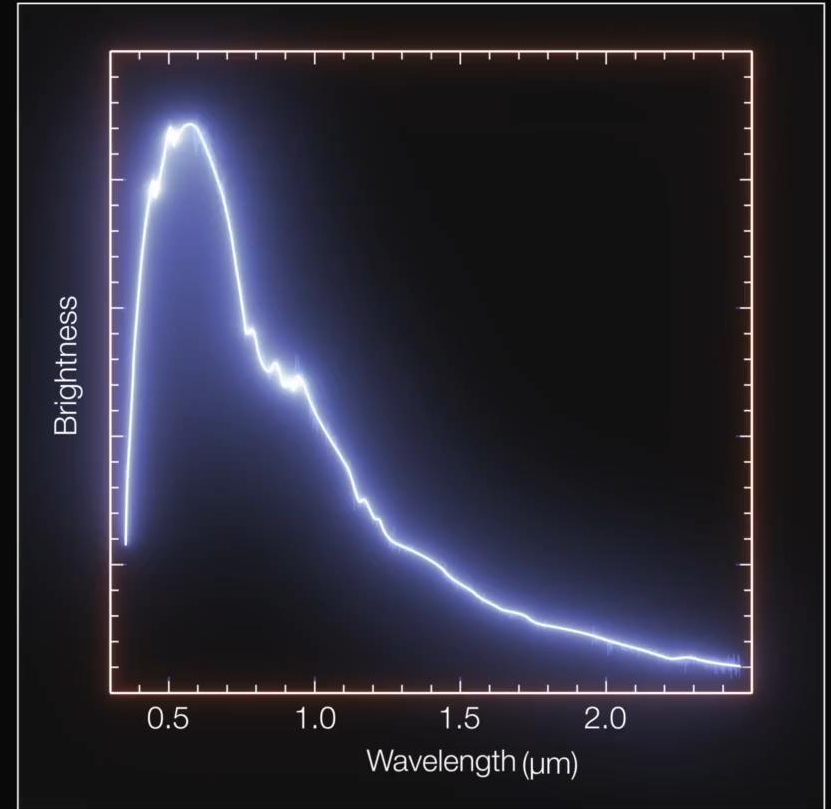
Kilonova identificada

La kilonova fue observada 10.9 horas después en la galaxia NGC 4993 (constelación de Hydra, hemisferio sur). Denominada AT 2017 gfo



Curva de luz y espectro

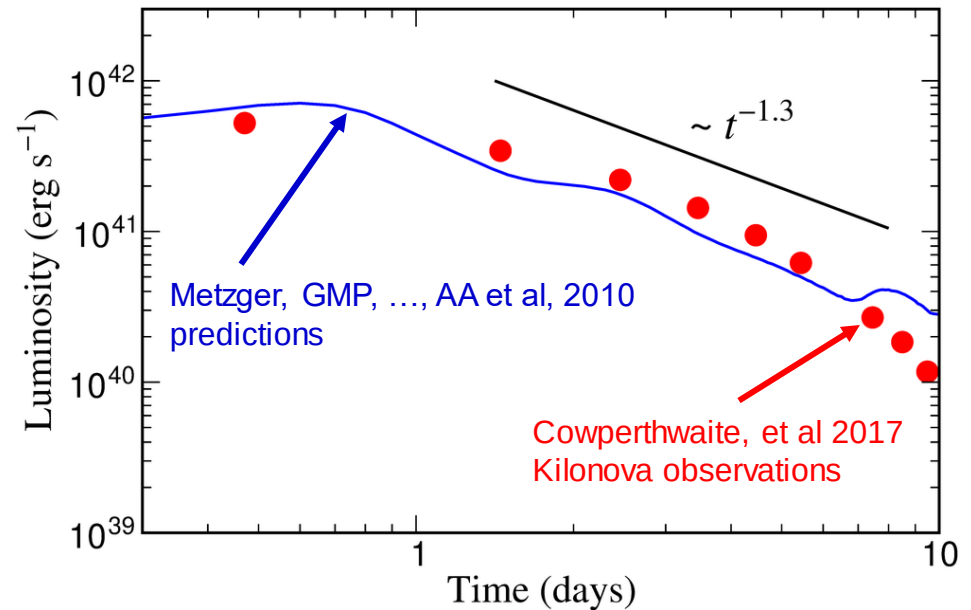
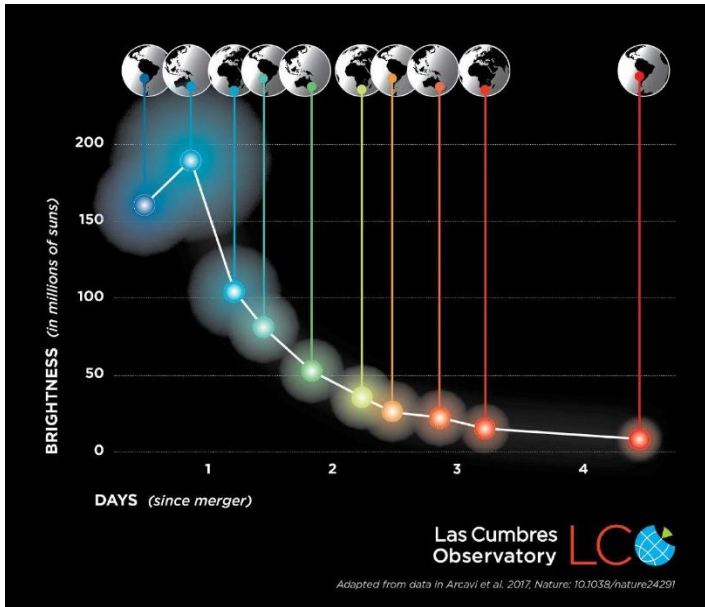
<https://youtu.be/kZiCKULA2cE>



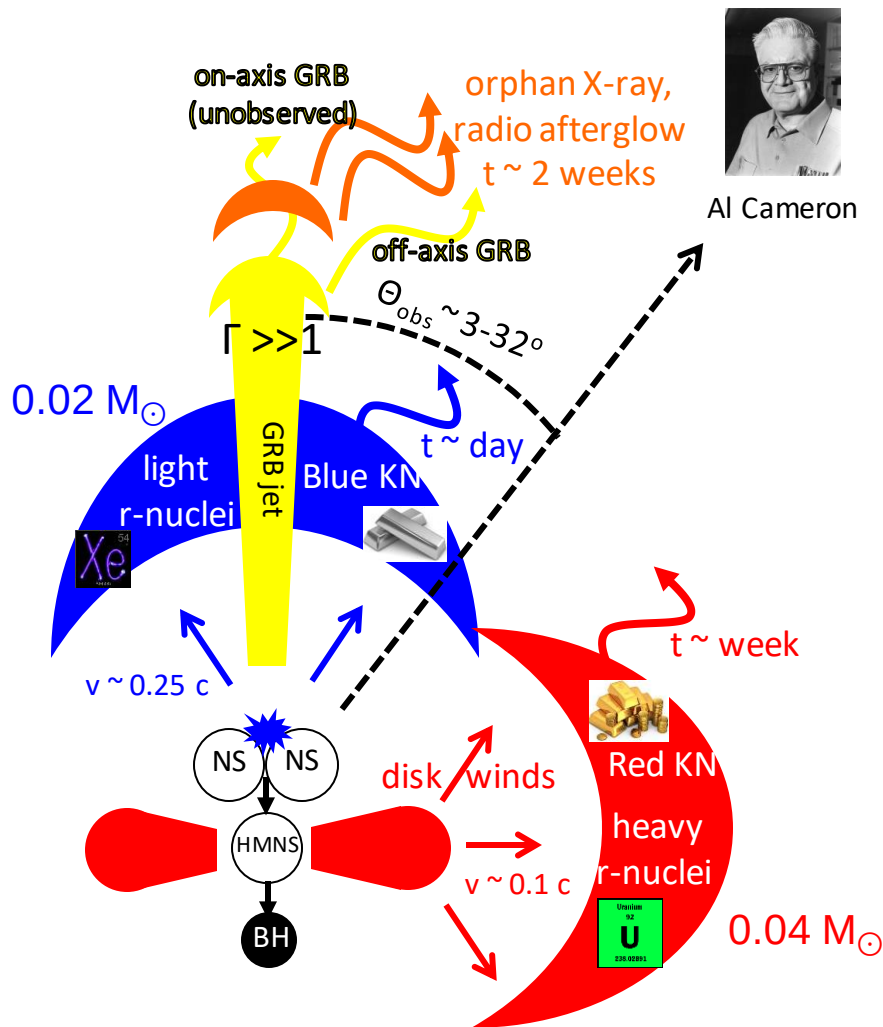
Time: +1.5 days

ESO/E. Pian/S. Smartt & ePESSTO/N. Tanvir/VIN-ROUGE, Pian et al, Nature 551, 67, 2017

Kilonova: señal electromagnetica debida al proceso r



- Evolución temporal determinada por la desintegración nuclear.
- Dos componentes:
 - Azul dominada por elementos ligeros ($Z < 50$)
 - Roja debida a la presencia de lantánidos ($Z = 57-71$) y/o Actínidos ($Z = 89-103$)
- Producción de elementos pesados incluyendo Oro, Platino y Uranio



- Detección ondas gravitatorias procedentes de la colisión de estrellas de neutrones
- Material eyectado en la región polar sujeto a grandes flujos de neutrinos. Producción de núcleos ligeros por el proceso r y emisión azul.
- Estrella de neutrones colapsa a un agujero negro en unos pocos 100 ms. Masa máxima de una estrella de neutrones ~ 2.2 masas solares.
- Emisión de neutrinos disminuye. Producción elementos pesados por el proceso r (Lantánidos y Actínidos, emisión roja).
- Alrededor de 0.06 masas solares eyectadas incluyendo (asumiendo proporciones solares):
 10 masas terrestres de Oro
 50 masas terrestres de Platino.
 5 masas terrestres de Uranio

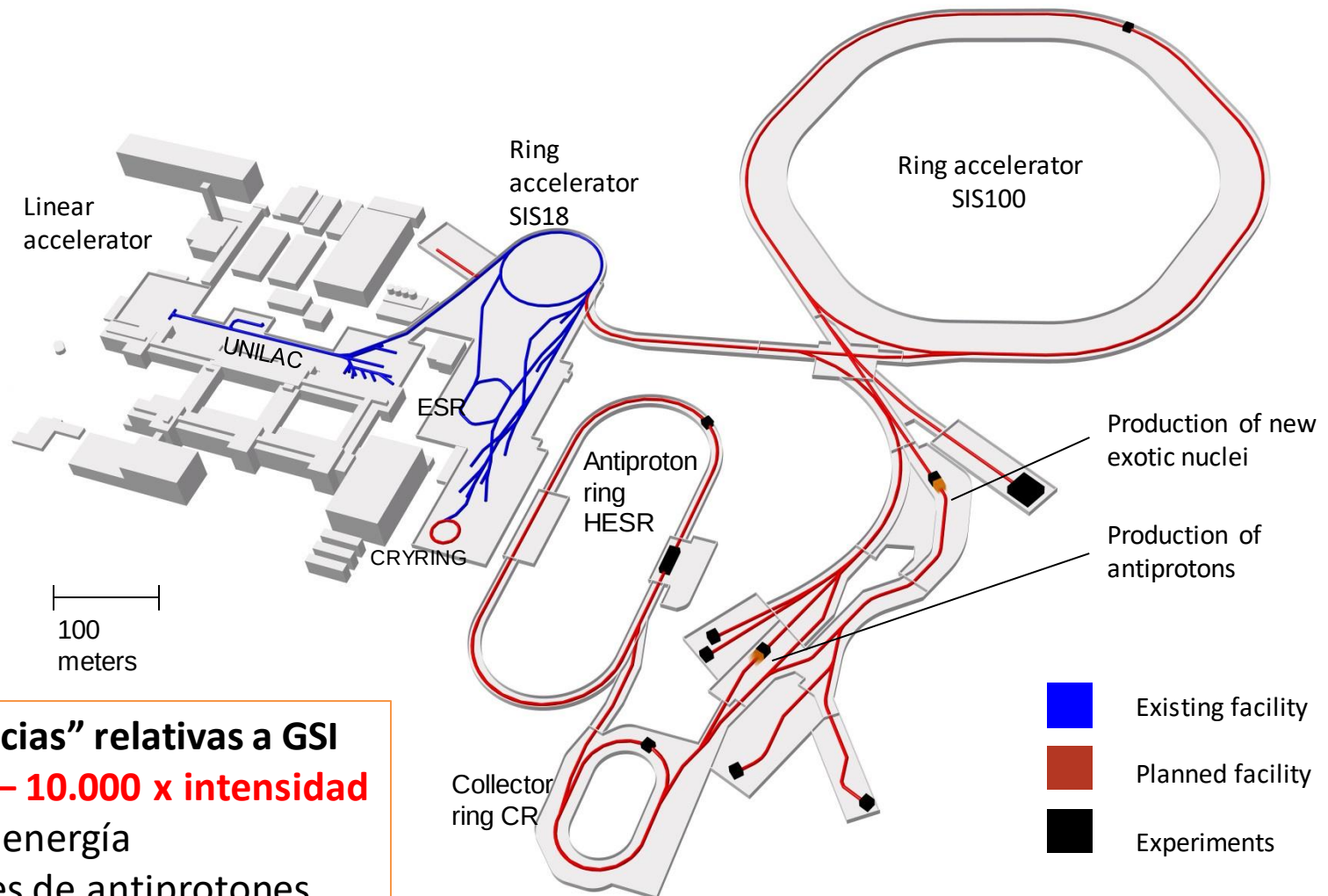
Figura de B. Metzger

- Observación colisión de una estrella de neutrones y un agujero negro
- Señal gravitatoria posterior a la colisión. Información sobre la ecuación de estado, masa máxima de una estrella de neutrones y la formación de un agujero negro.
- Observaciones de kilonova: gran variabilidad cambiando el punto de vista. Evidencia de la producción de ciertos núcleos a tiempos tardíos, e.g. Actínidos y ^{254}Cf .
- Mejorar nuestro conocimiento de las propiedades de núcleos ricos en neutrones: nuevas instalaciones experimentales FAIR

Facility for Antiproton and Iron Research (FAIR)



FAIR – Un nuevo complejo de aceleradores



“Ganancias” relativas a GSI

- **100 – 10.000 x intensidad**
- 10 x energía
- Haces de antiprotones

Masas de núcleos exóticos

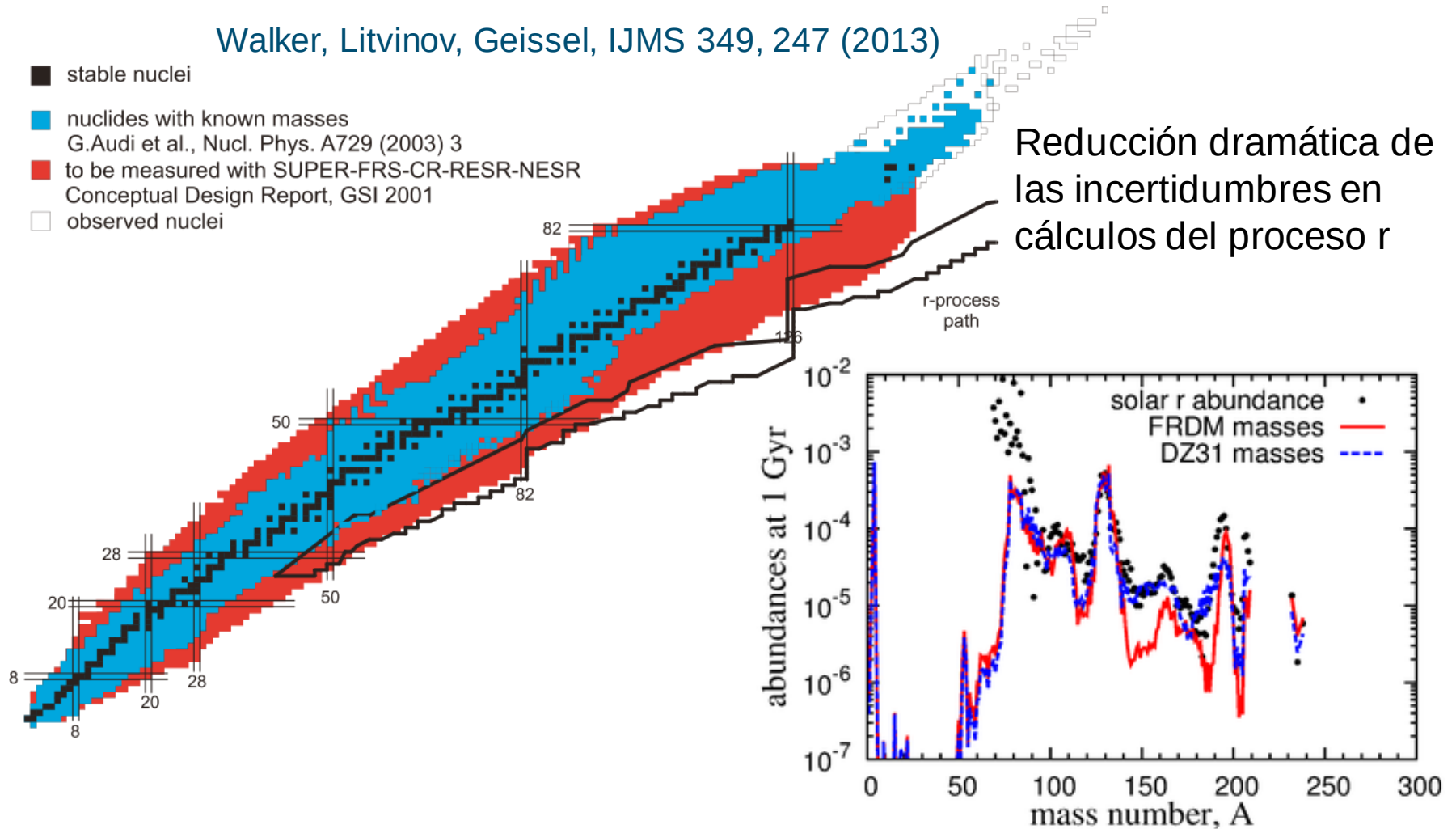
Walker, Litvinov, Geissel, IJMS 349, 247 (2013)

■ stable nuclei

■ nuclides with known masses
G.Audi et al., Nucl. Phys. A729 (2003) 3

■ to be measured with SUPER-FRS-CR-RESR-NESR
Conceptual Design Report, GSI 2001

□ observed nuclei





- FAIR governed by international convention
 - 9 shareholders + 1 assoc. partner (orange)
- Scientists from all over the world are engaged
 - More than 200 institutions from 53 countries are involved with their scientists (orange + blue)



Gracias!