

La producción de oro en el Universo

Gabriel Martínez-Pinedo

Fundación Ramón Areces y Real Sociedad Española de Física

2 de octubre de 2019, Madrid



Síntesis de elementos en el Universo

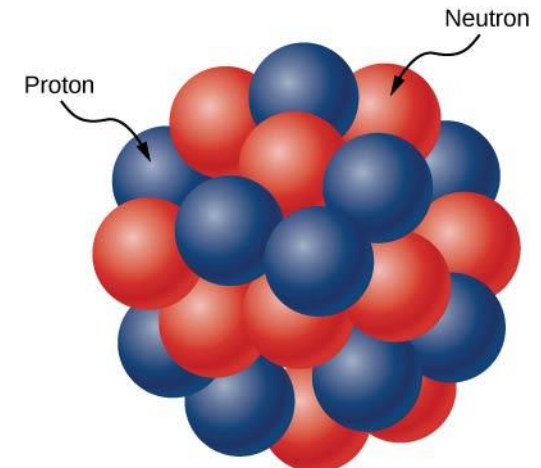
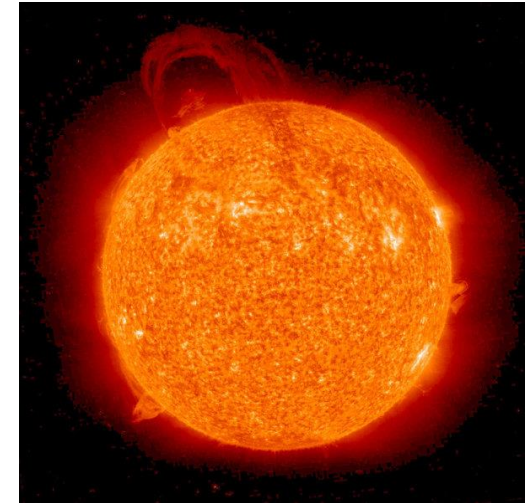
Alquimia nuclear

Astrofísica nuclear: estudia los procesos nucleares responsables de la producción de energía en el universo y la síntesis de los elementos



Pieter Bruegel (el viejo): El alquimista

Estrellas: hornos cósmicos



Estructura nuclear

GW170817: una gran revelación del cosmos

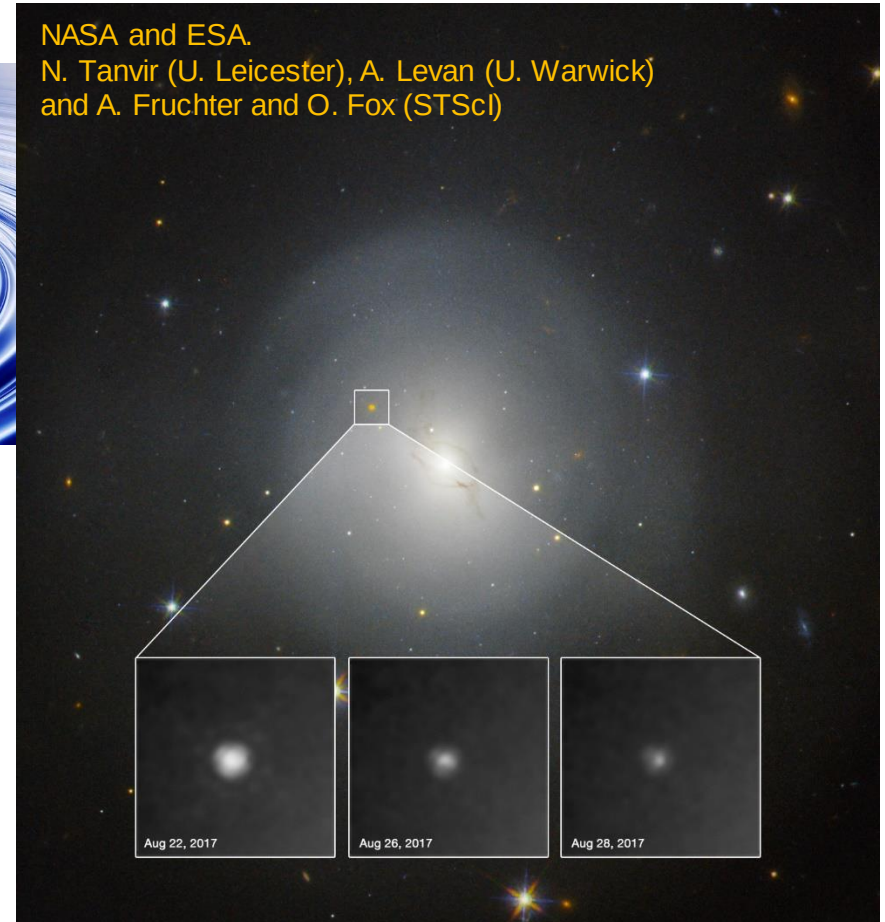
Primera detección de ondas gravitatorias
procedentes de una colisión de estrellas
de neutrones



Primera evidencia de la producción
de oro en el Universo.

Primera observación de una kilonova

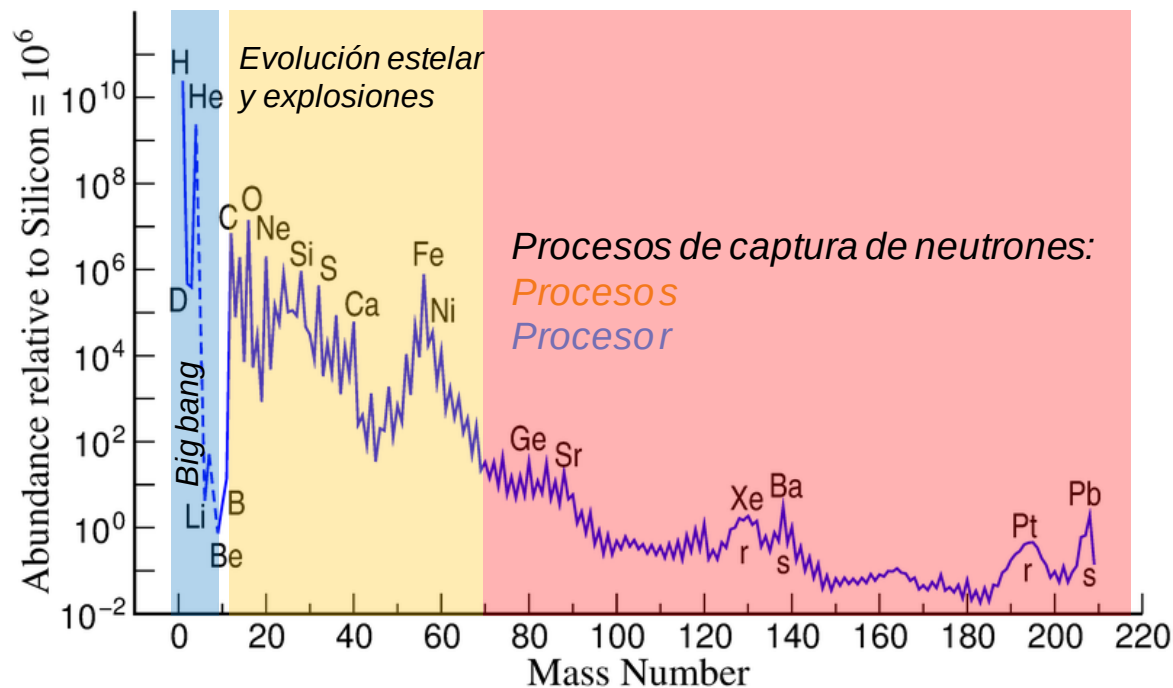
NASA and ESA.
N. Tanvir (U. Leicester), A. Levan (U. Warwick)
and A. Fruchter and O. Fox (STScI)



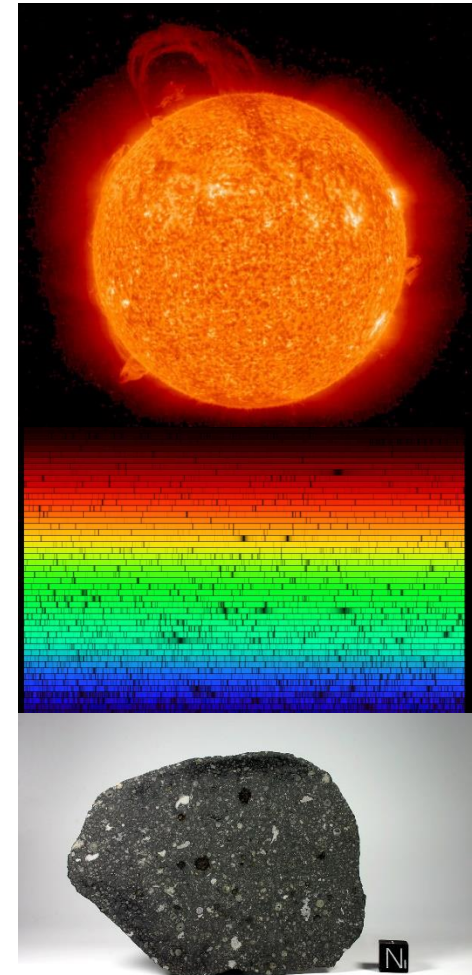
- Introducción a la nucleosíntesis
- Evolución estelar: formación de estrellas de neutrones
- Sistemas binarios: emisión de ondas gravitatorias
- Colisión de estrellas de neutrones:
 - Nucleosíntesis de elementos pesados
 - Señal electromagnética: kilonova
- Conclusiones

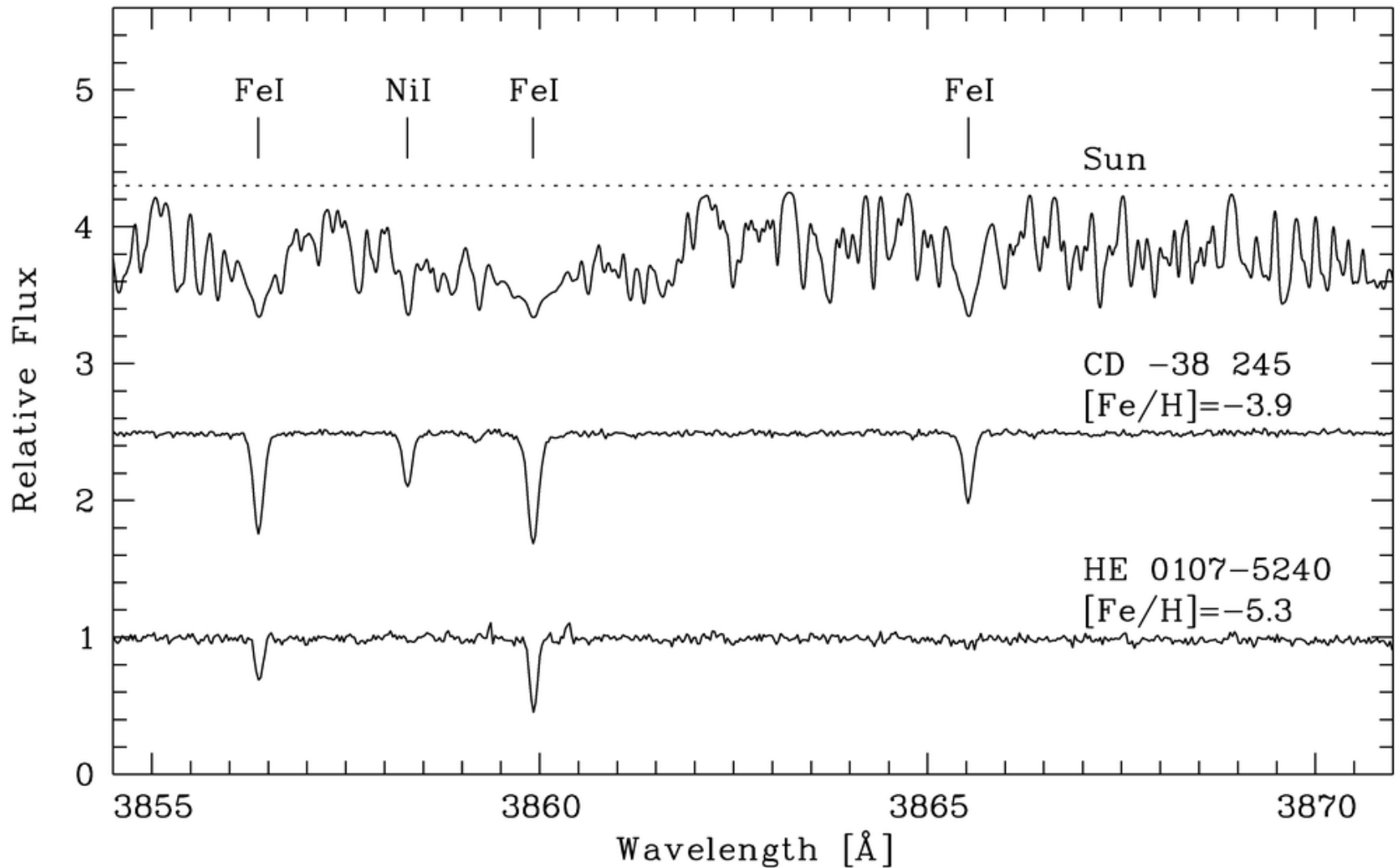
Abundancias Sistema solar

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



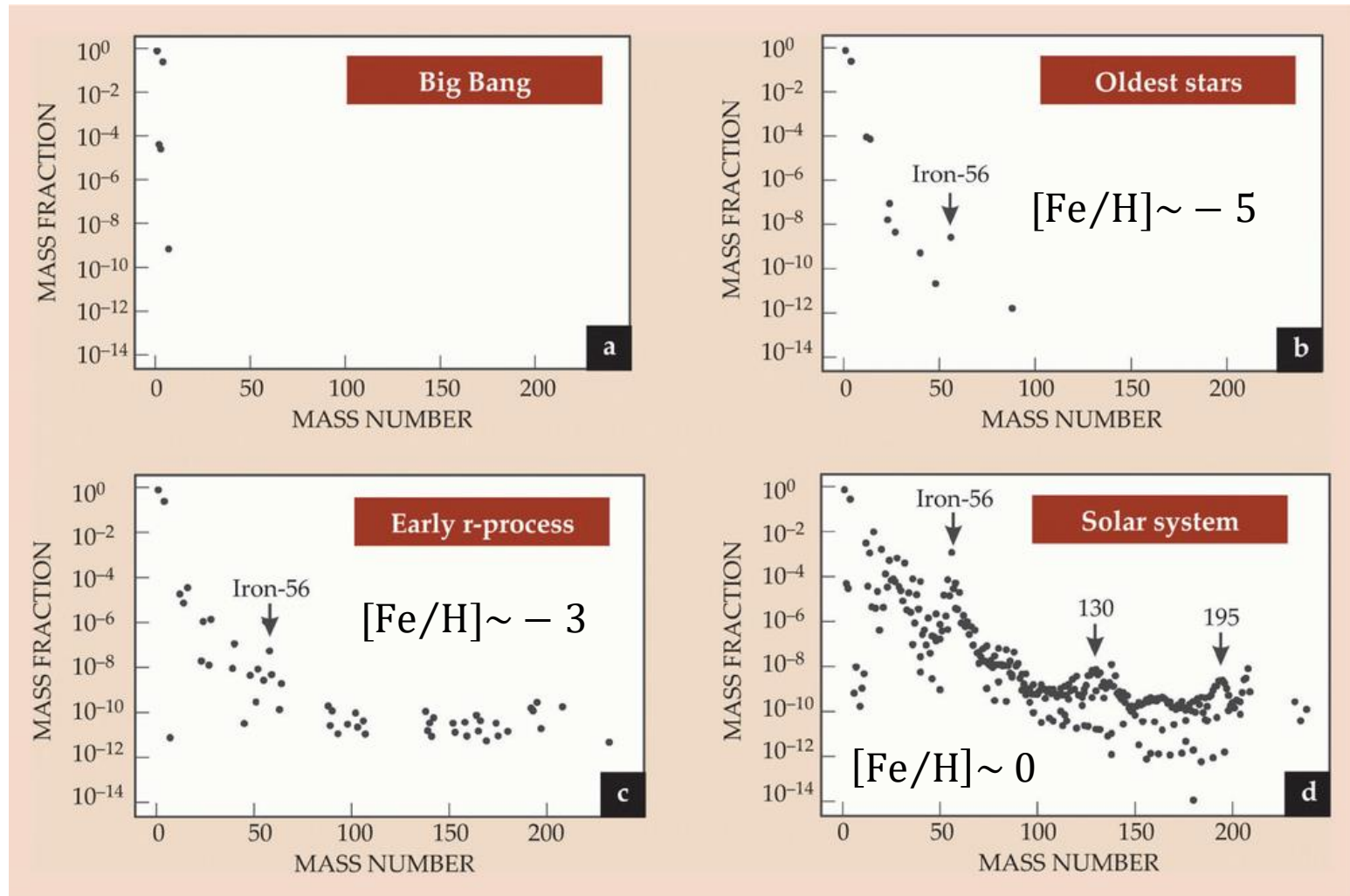


Estrellas mas viejas tienen un menor contenido de metales

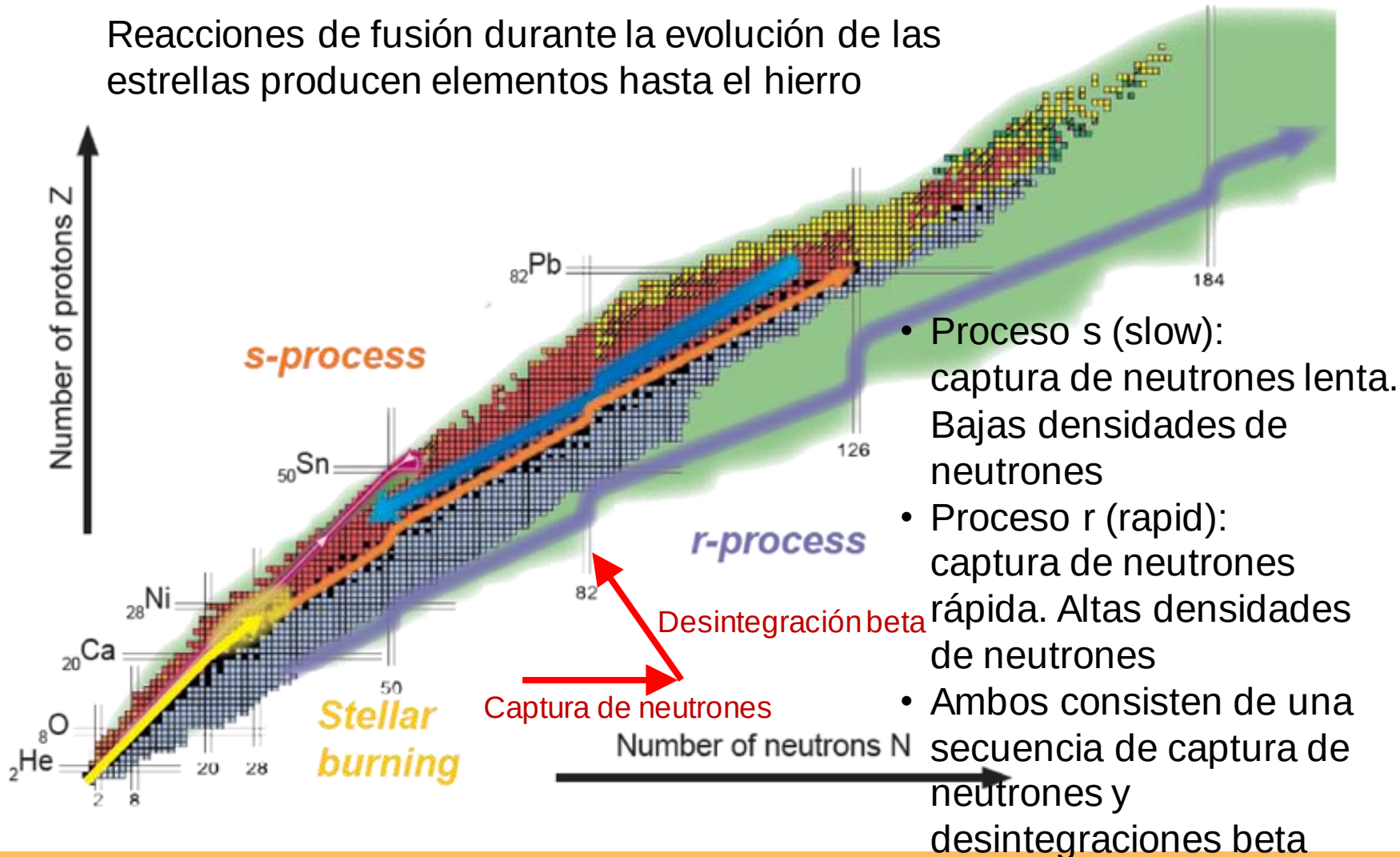
Metalicidad: $[Fe/H] = \log[Fe/H]_{\text{estrella}} - \log[Fe/H]_{\text{sol}}$

Evolución con el tiempo

La composición depende del momento en que se formo la estrella



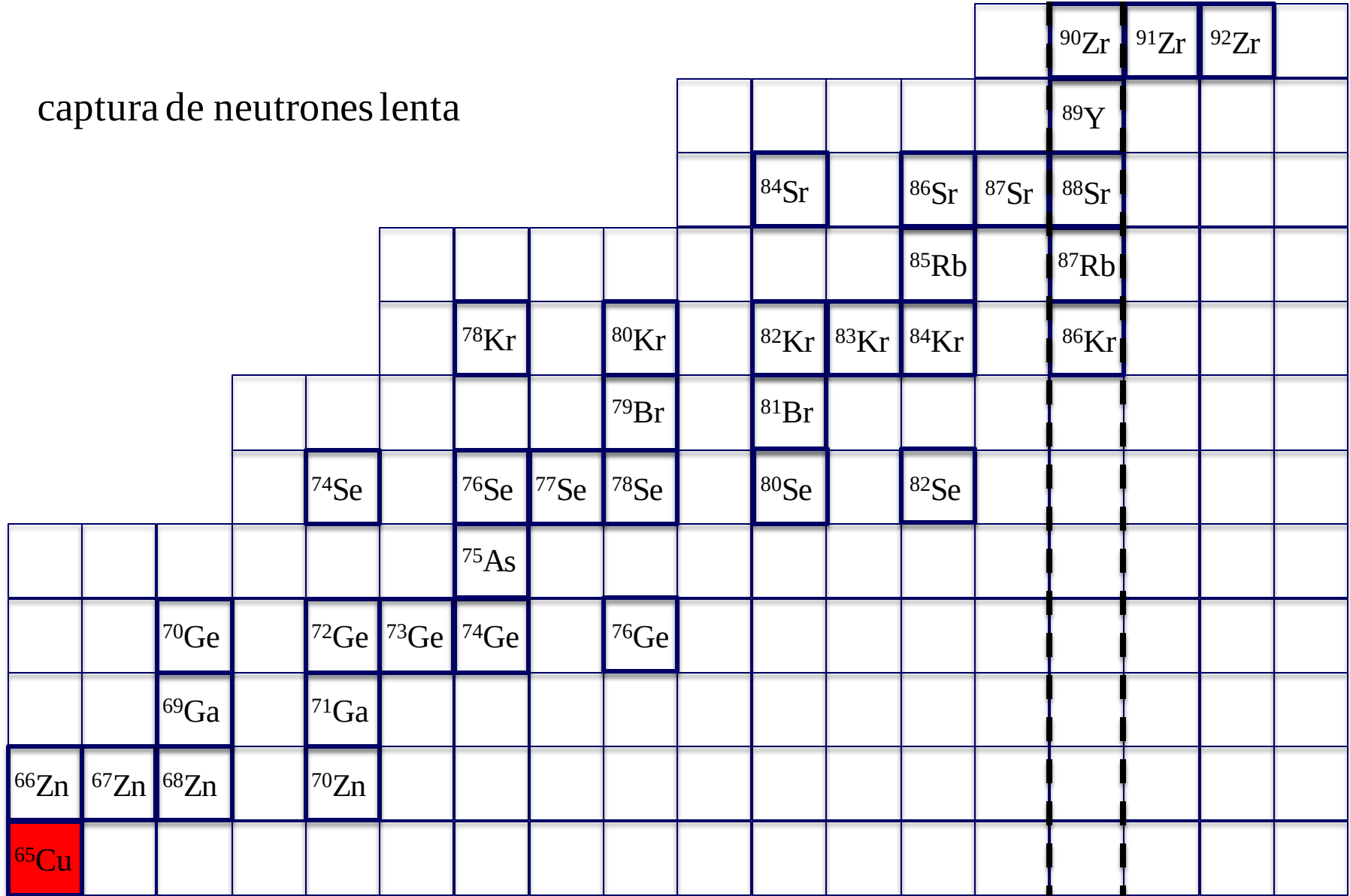
Reacciones de fusión durante la evolución de las estrellas producen elementos hasta el hierro



El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

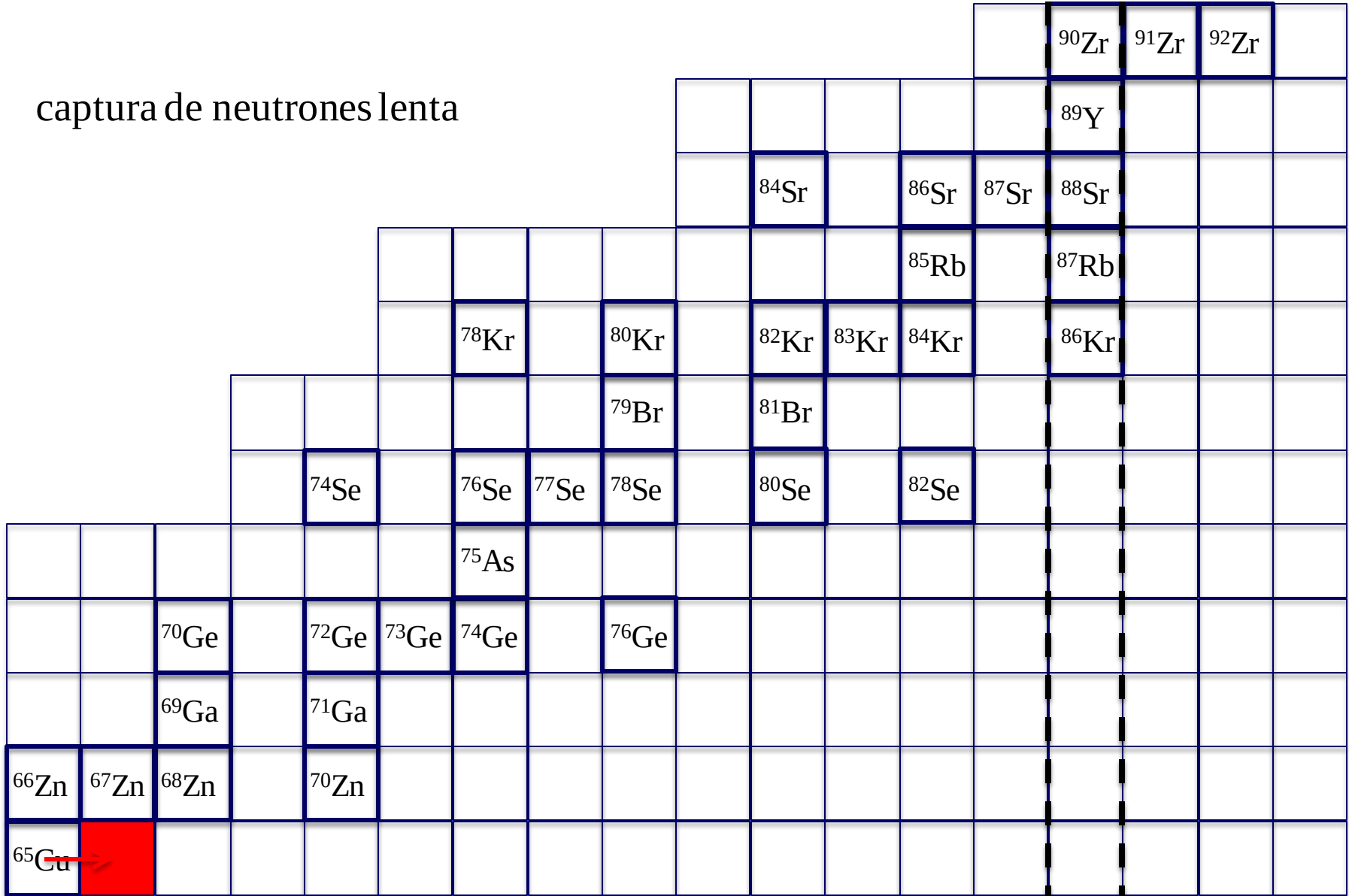


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

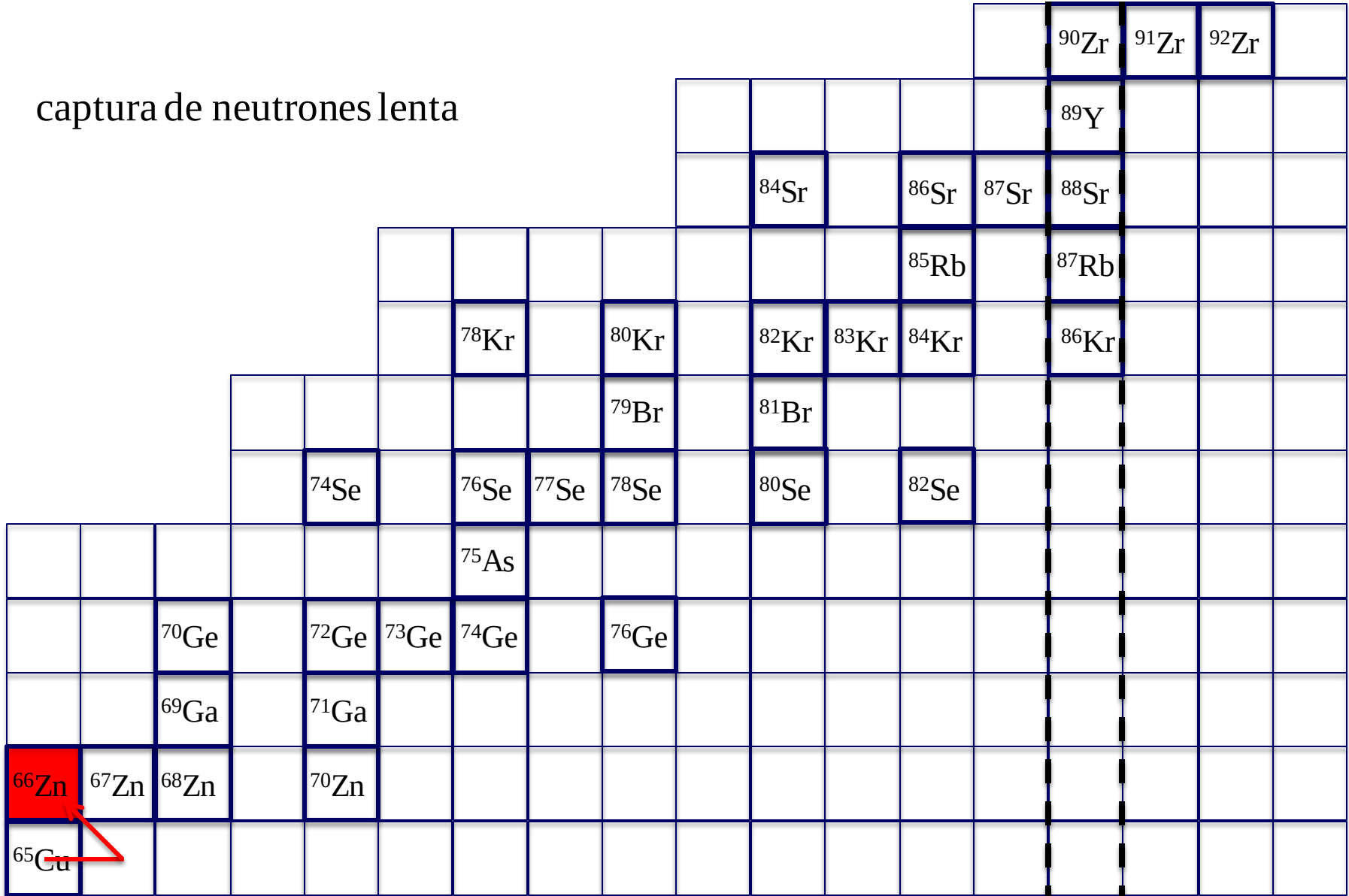


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

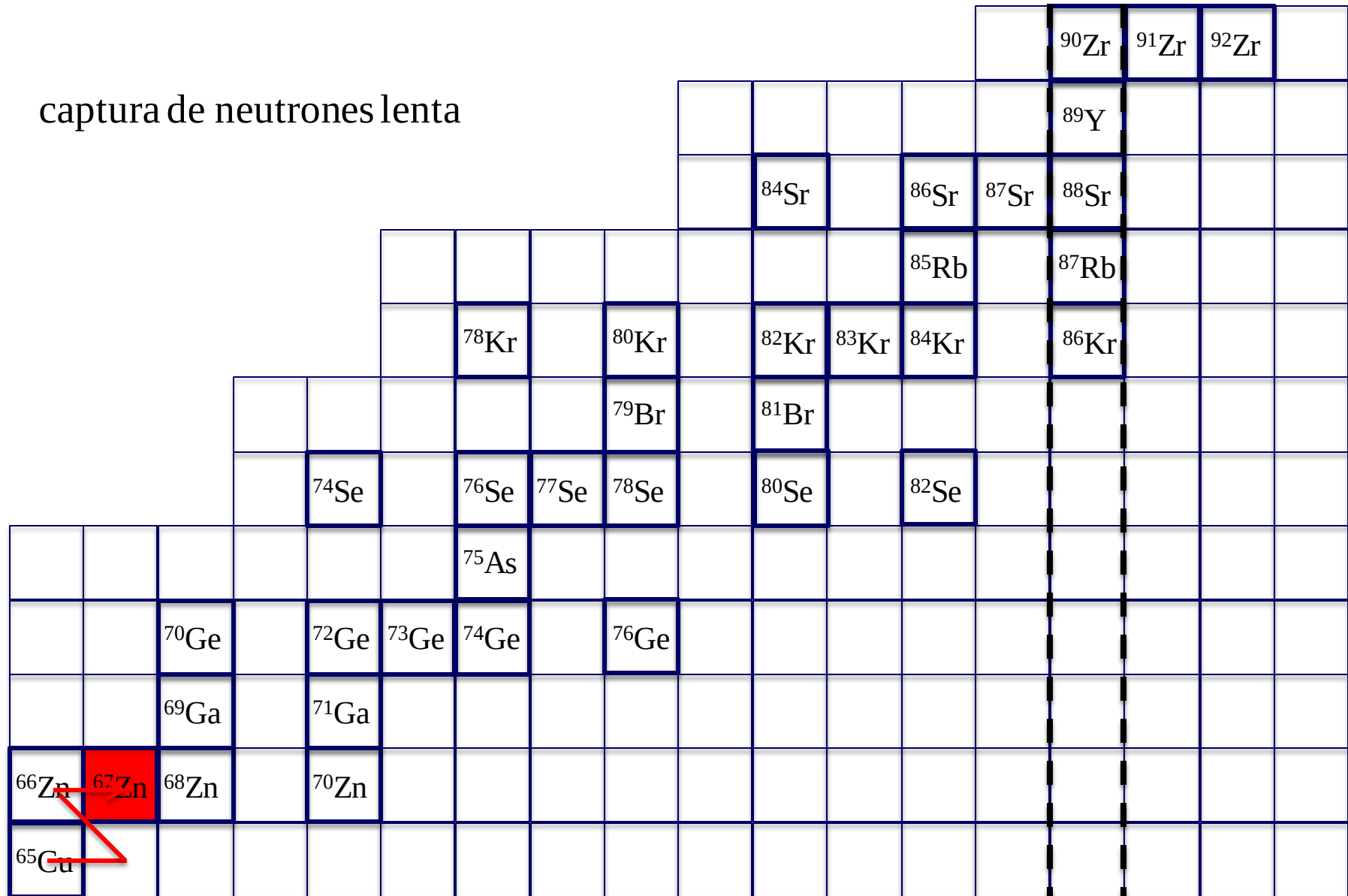


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta



capa cerrada de neutrones

I

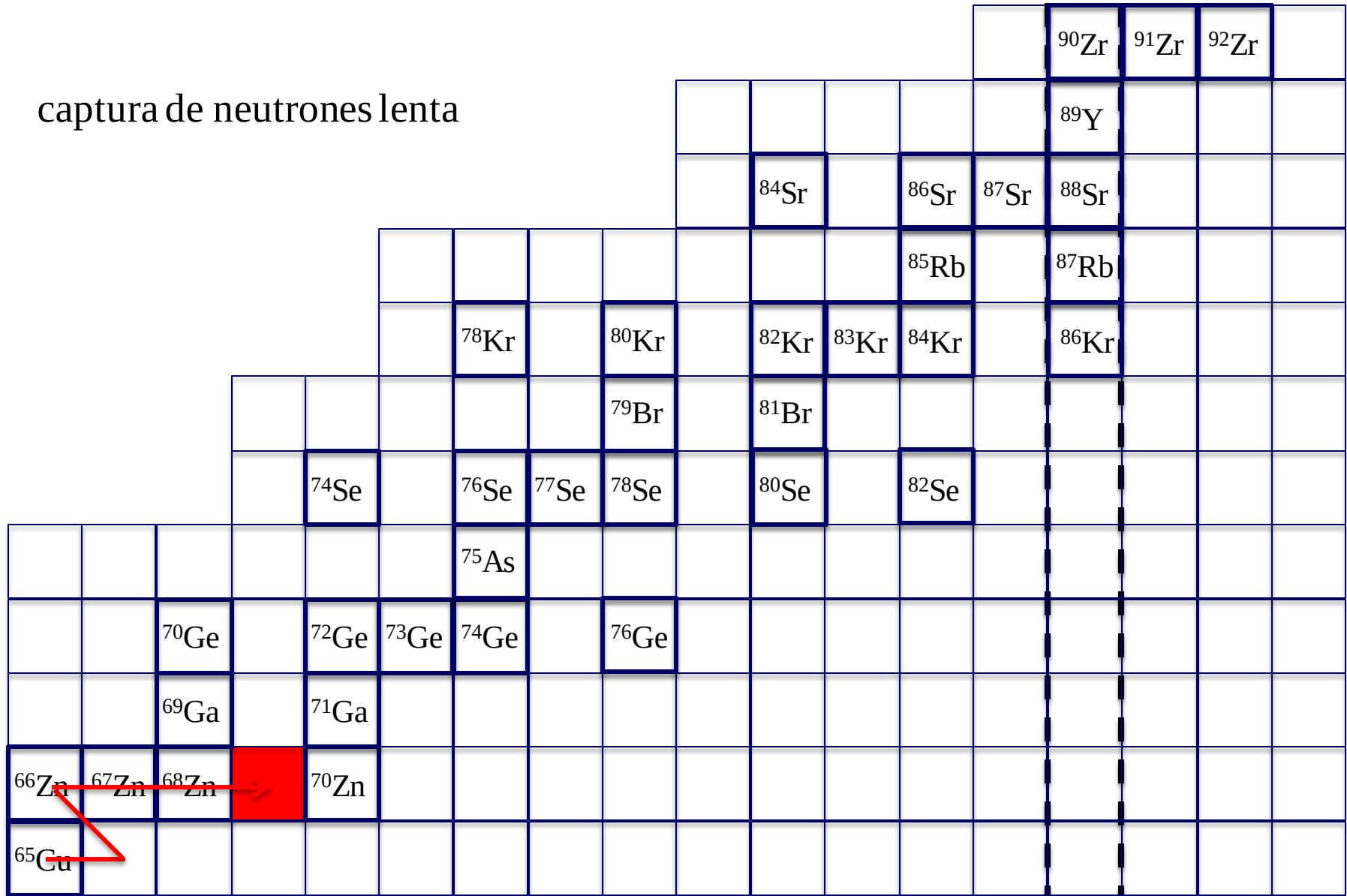
[illegible]

capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

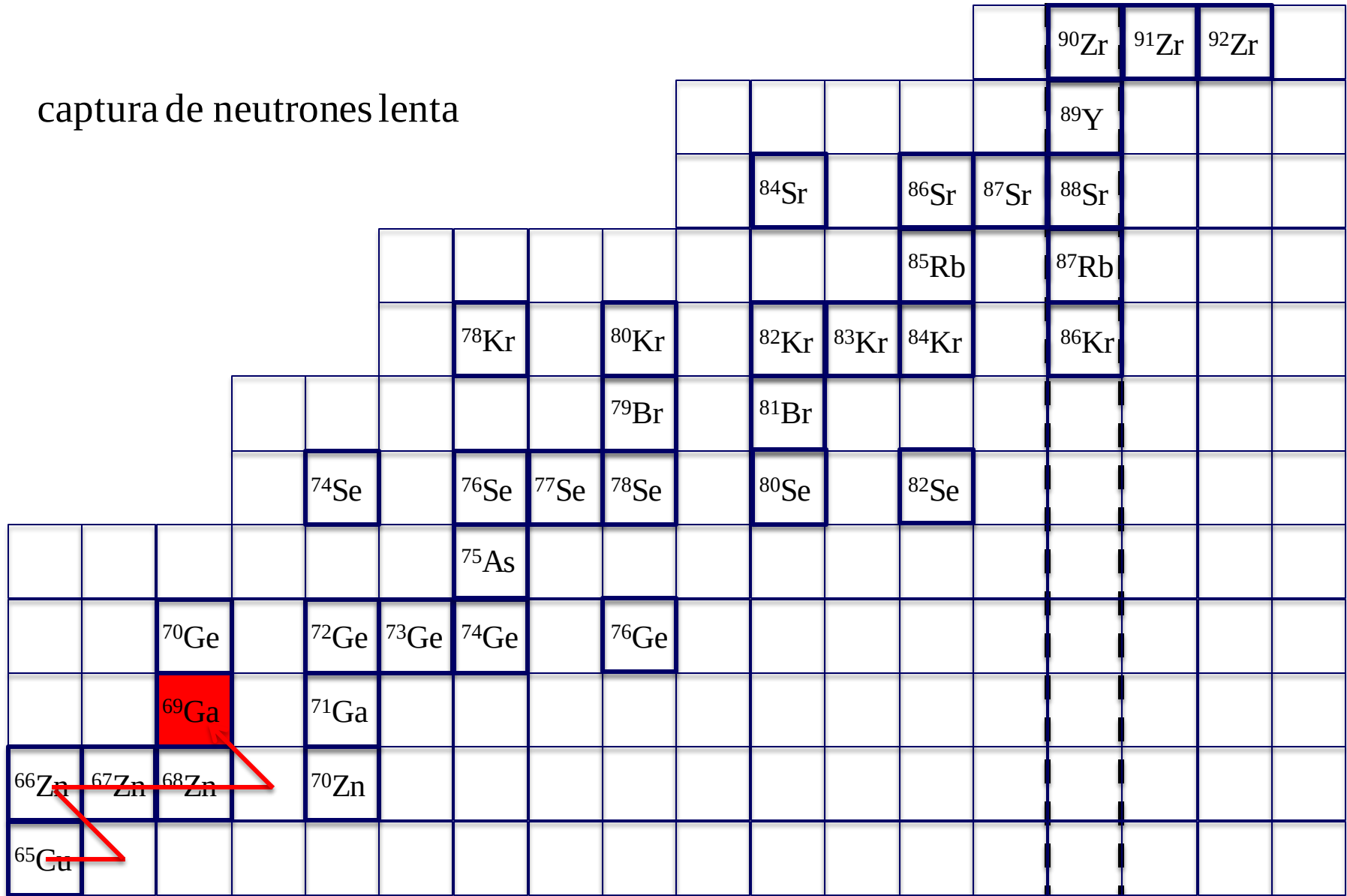


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

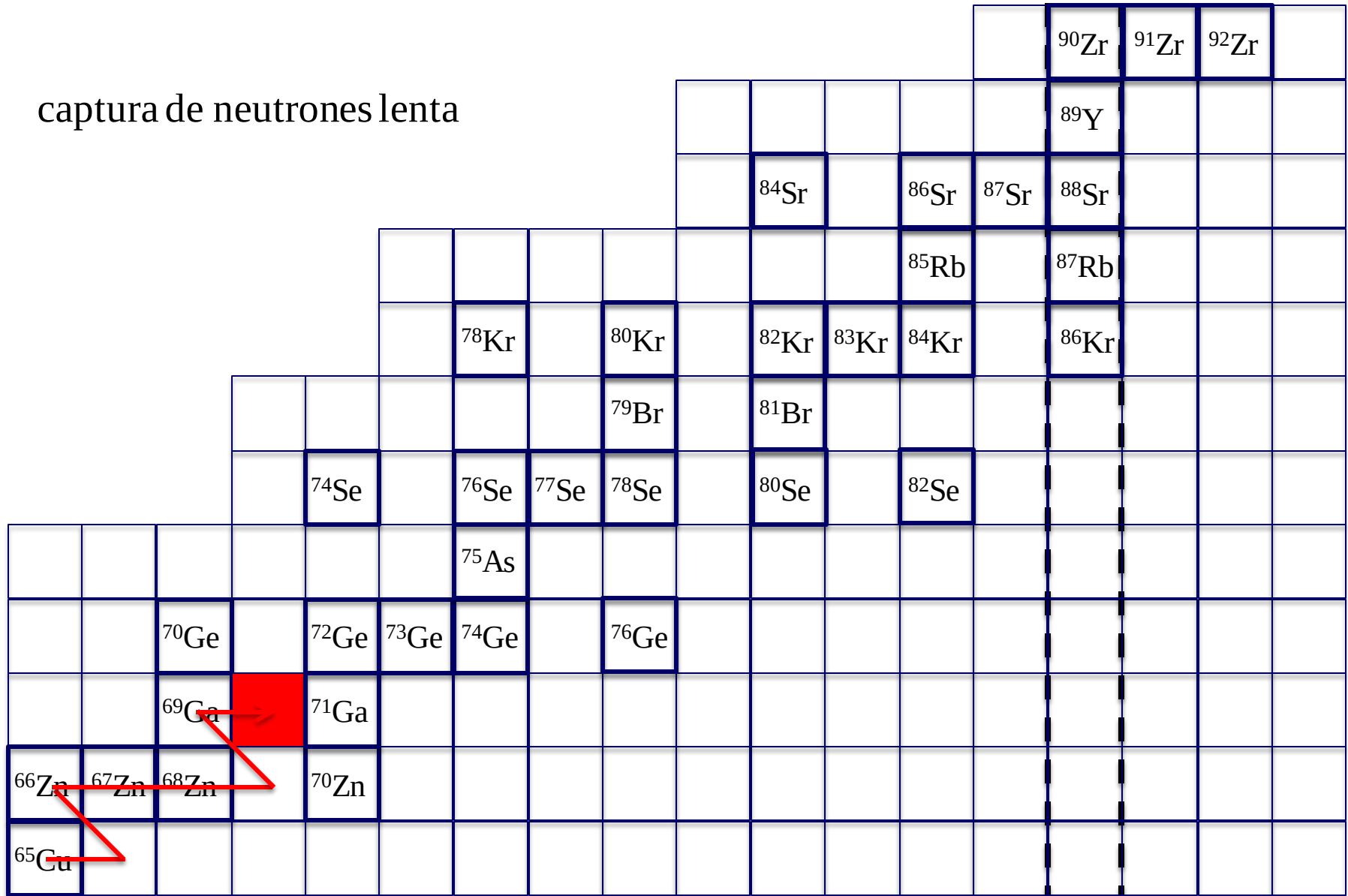


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

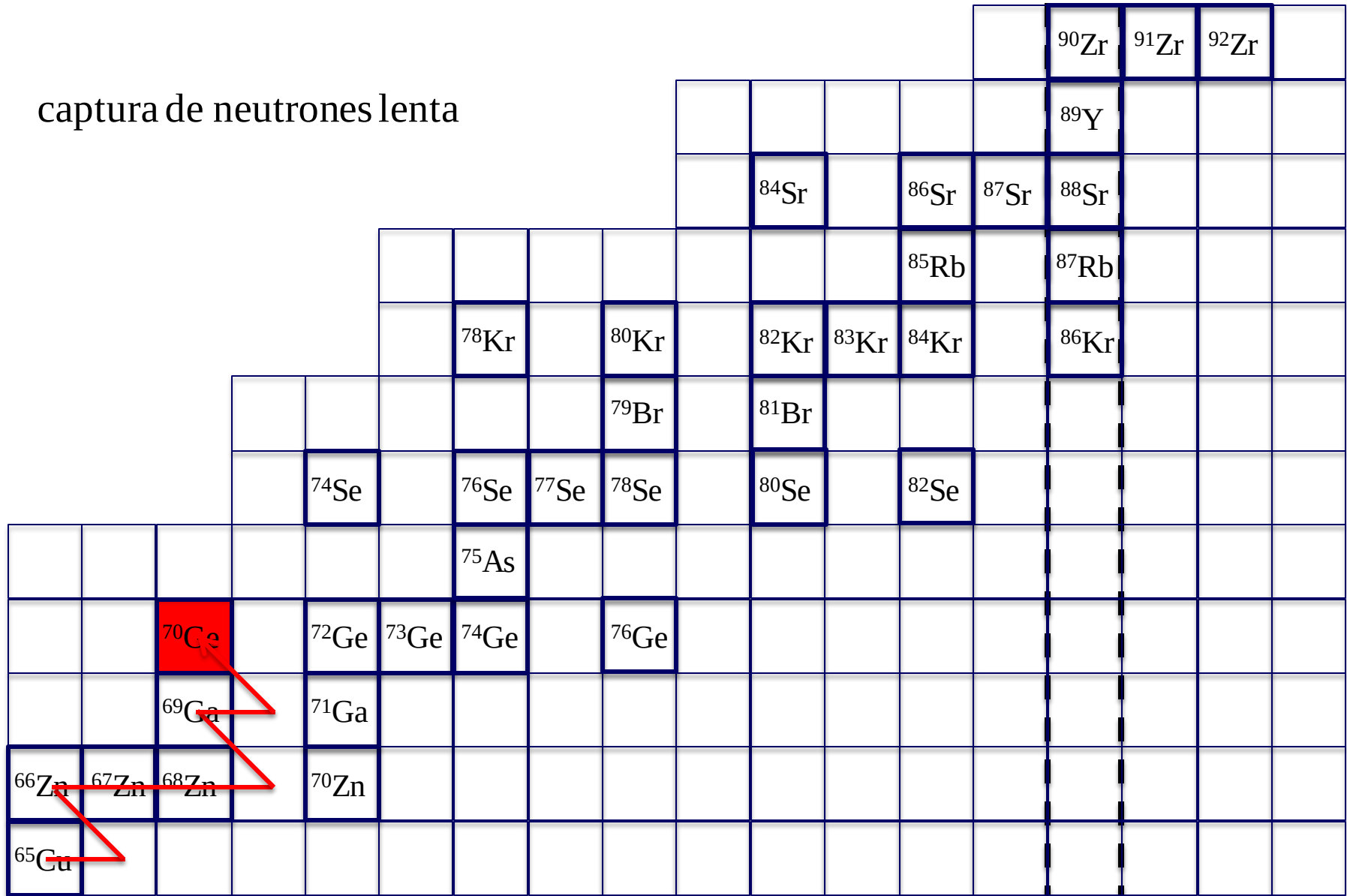


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

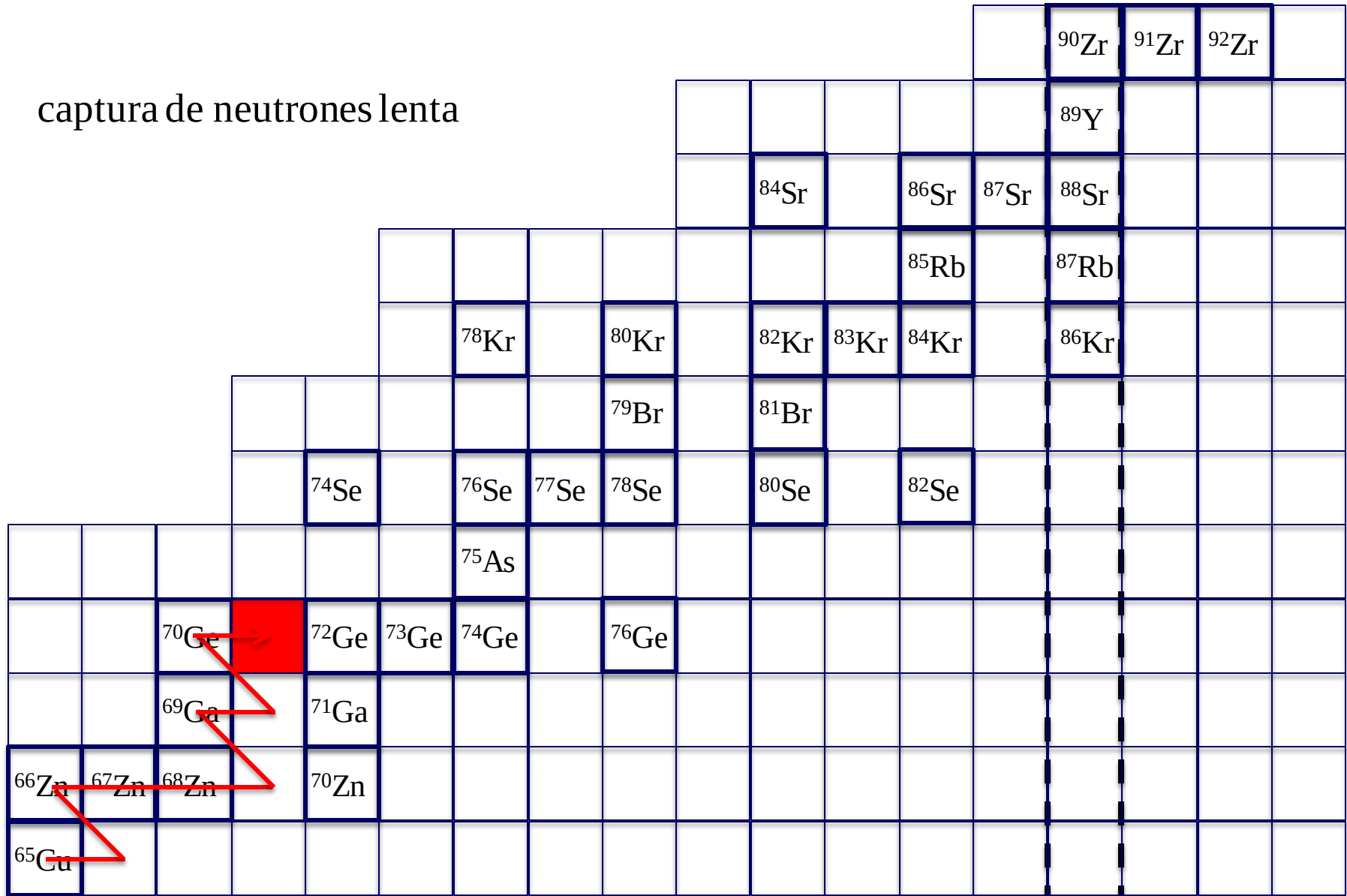


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

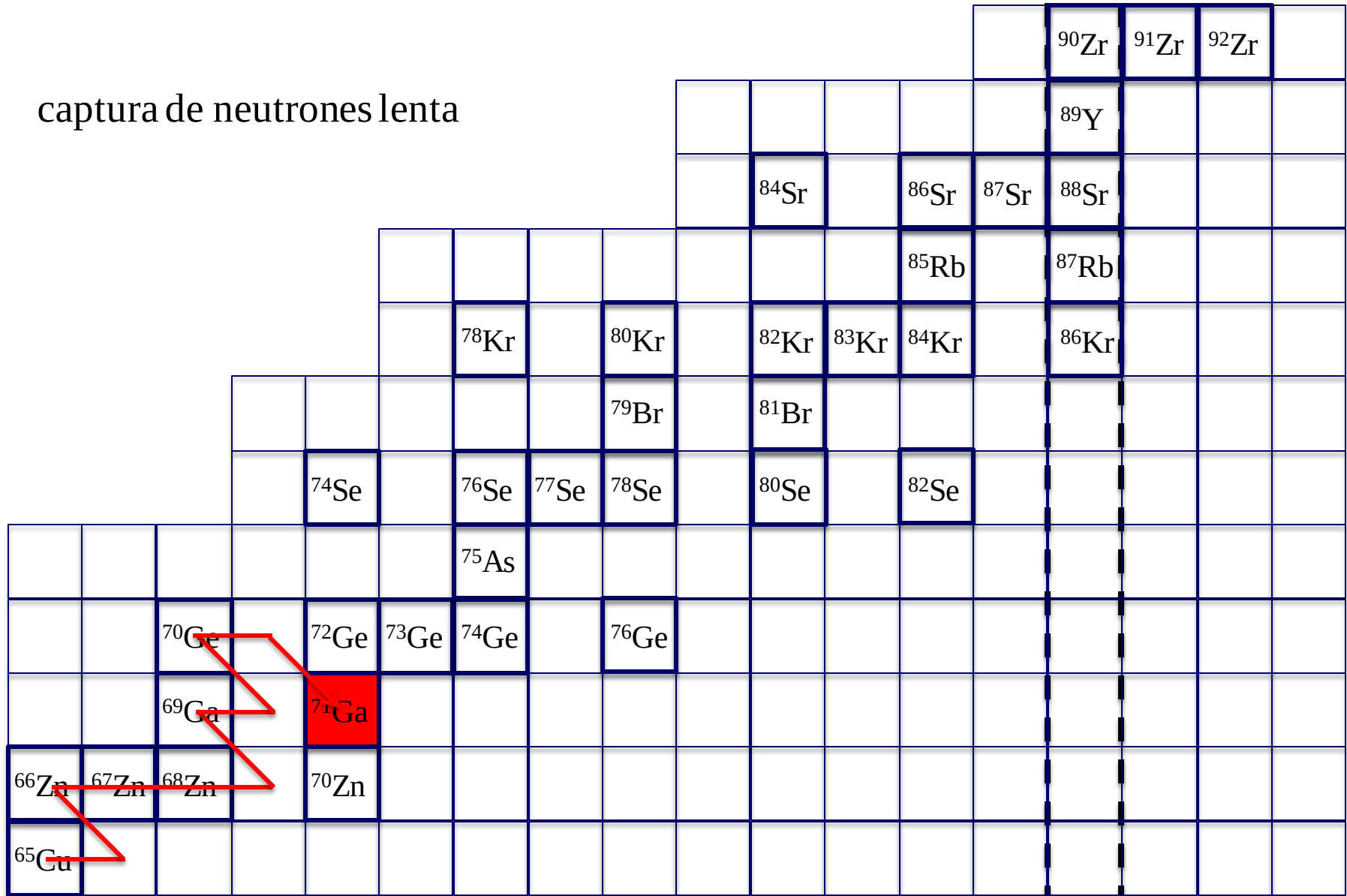


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

captura de neutrones lenta

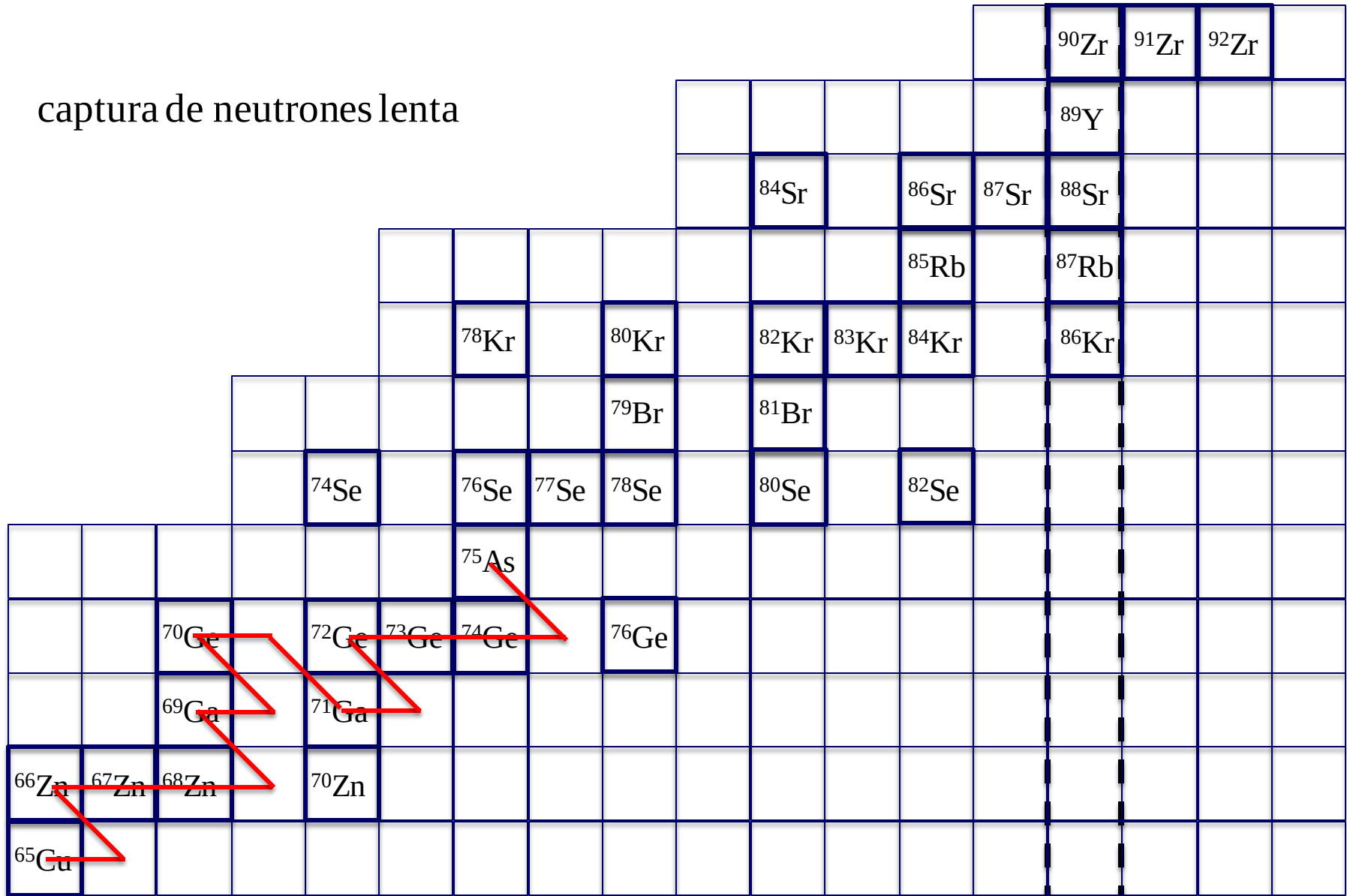


capa cerrada de neutrones

El proceso s

N=50

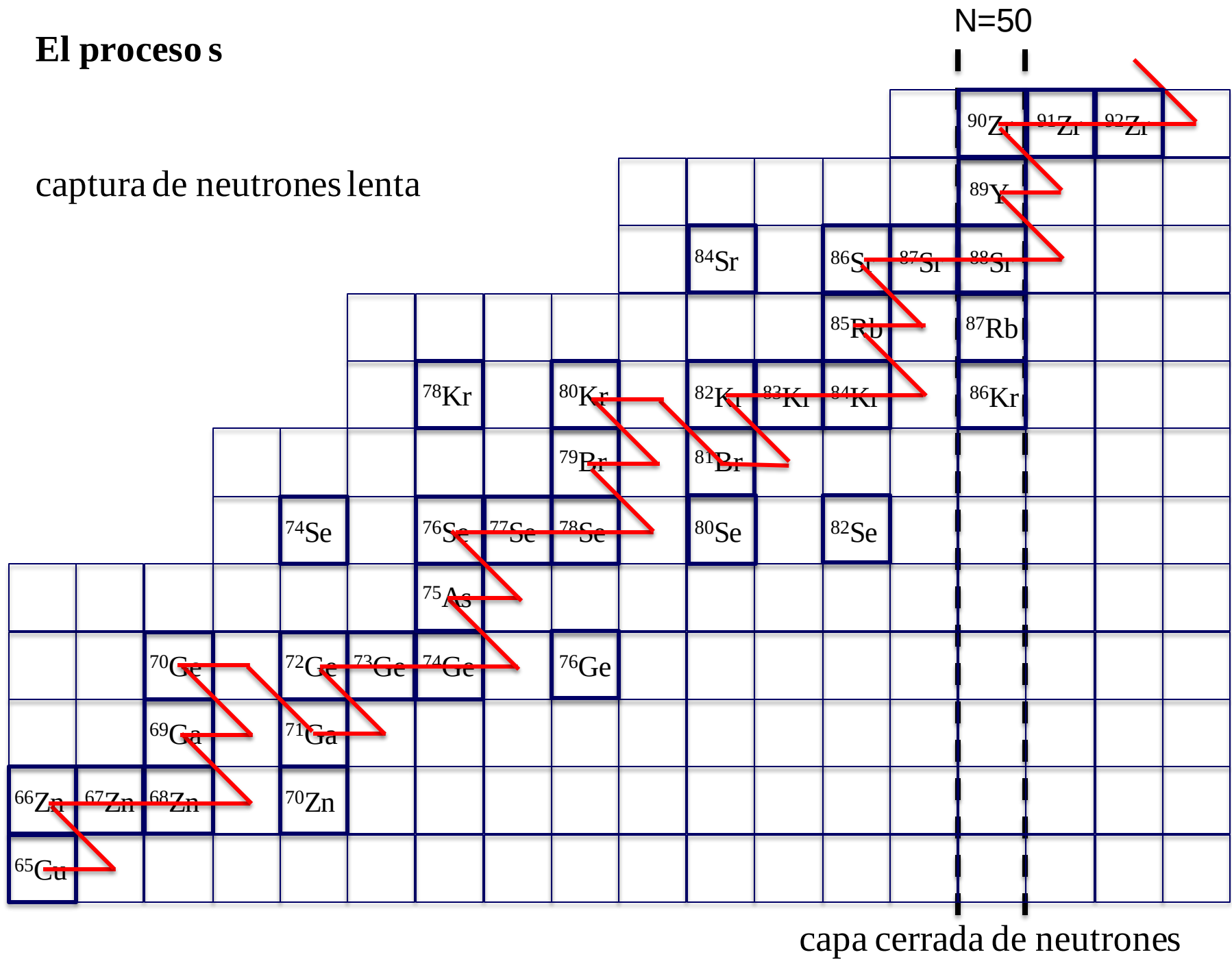
captura de neutrones lenta



capa cerrada de neutrones

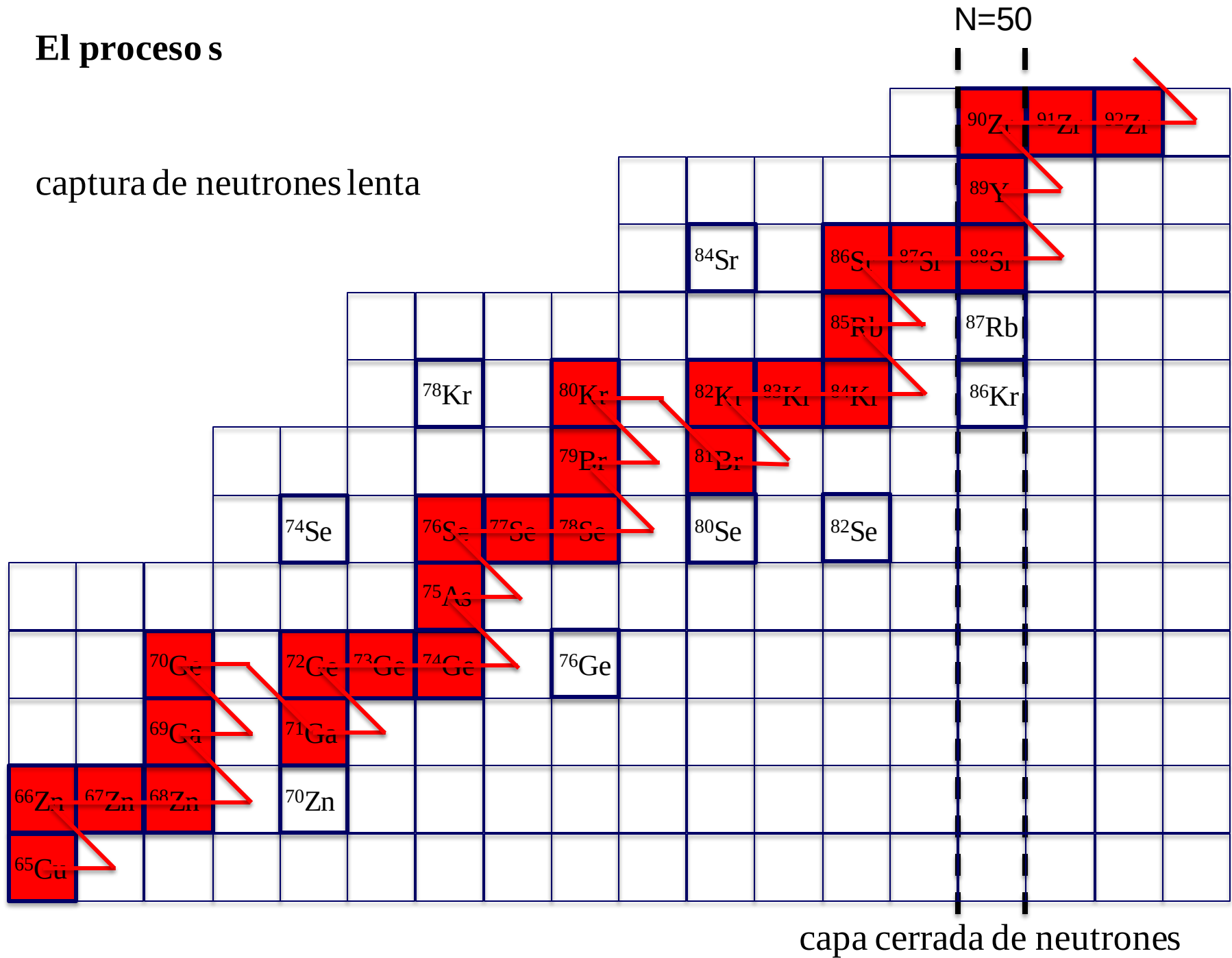
El proceso s

captura de neutrones lenta



El proceso s

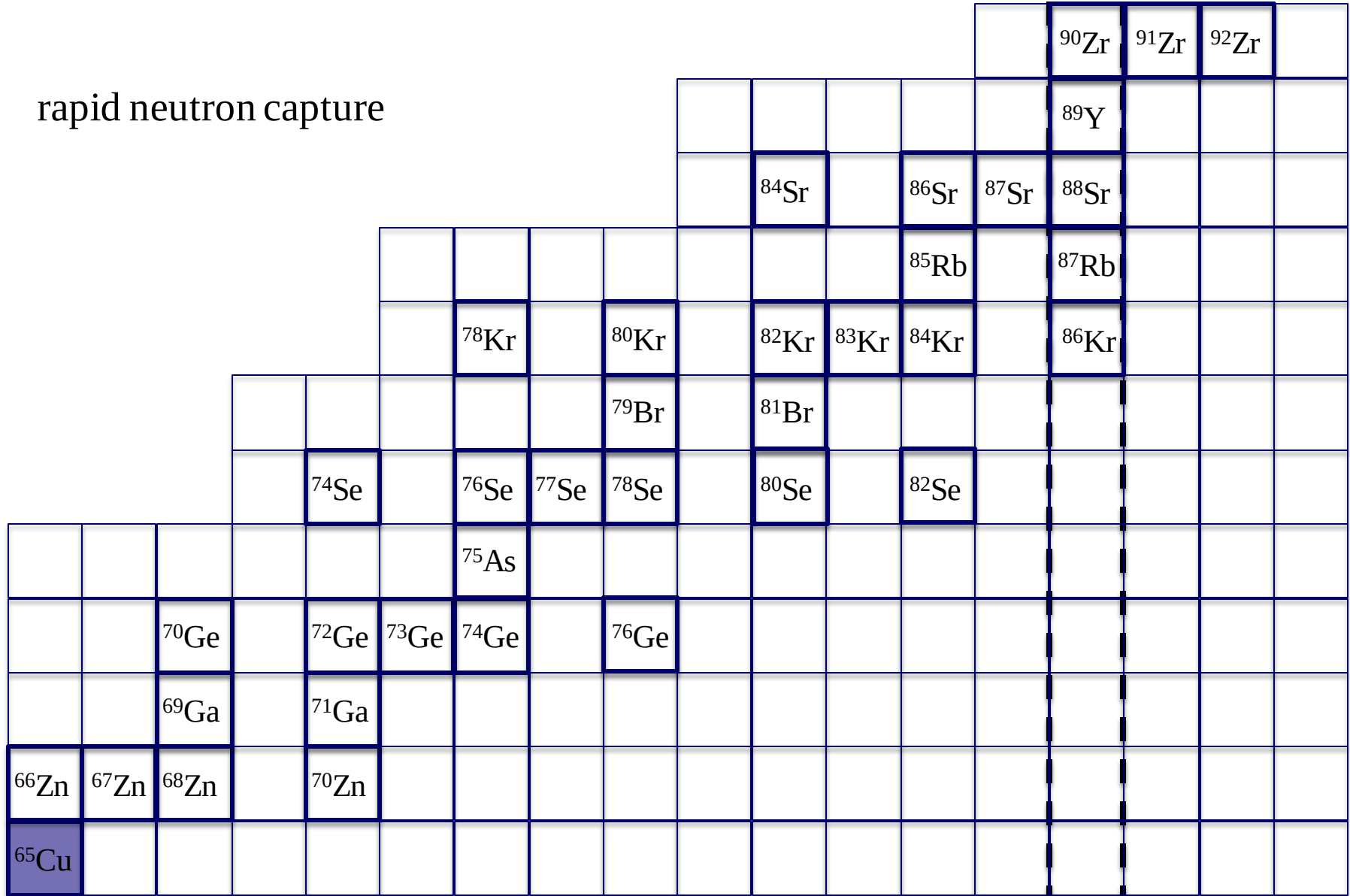
captura de neutrones lenta



El proceso r

N=50

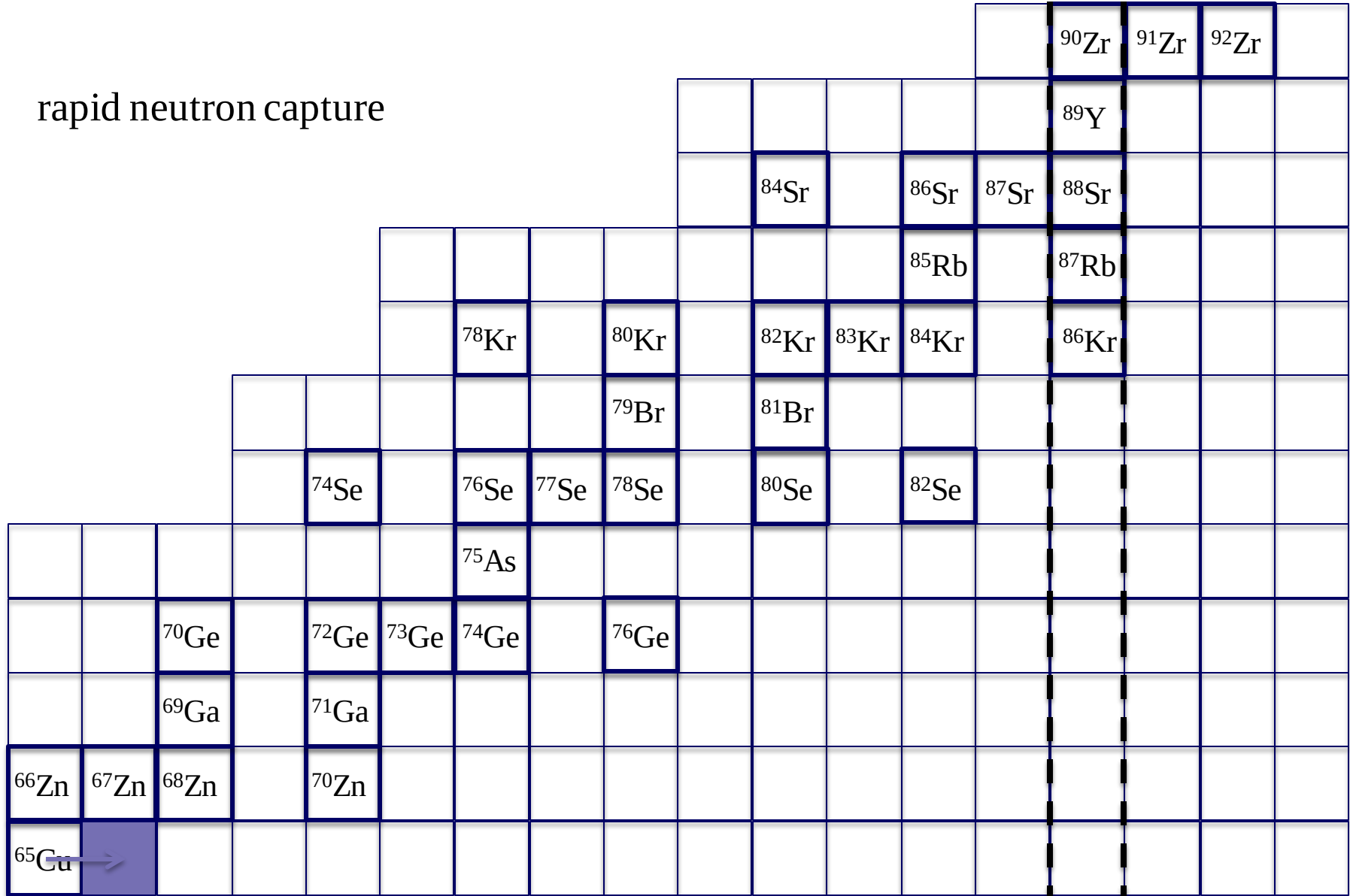
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

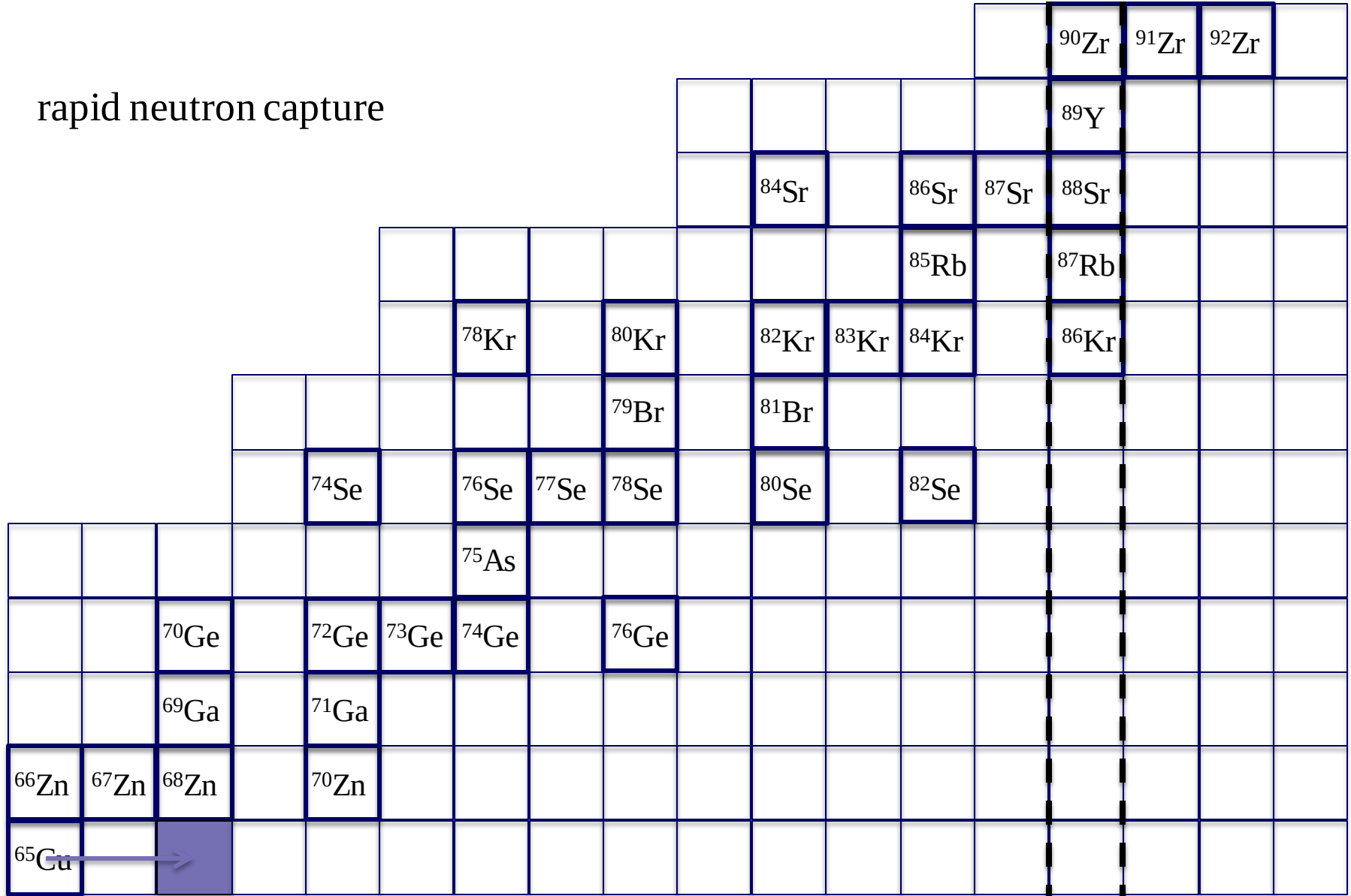
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

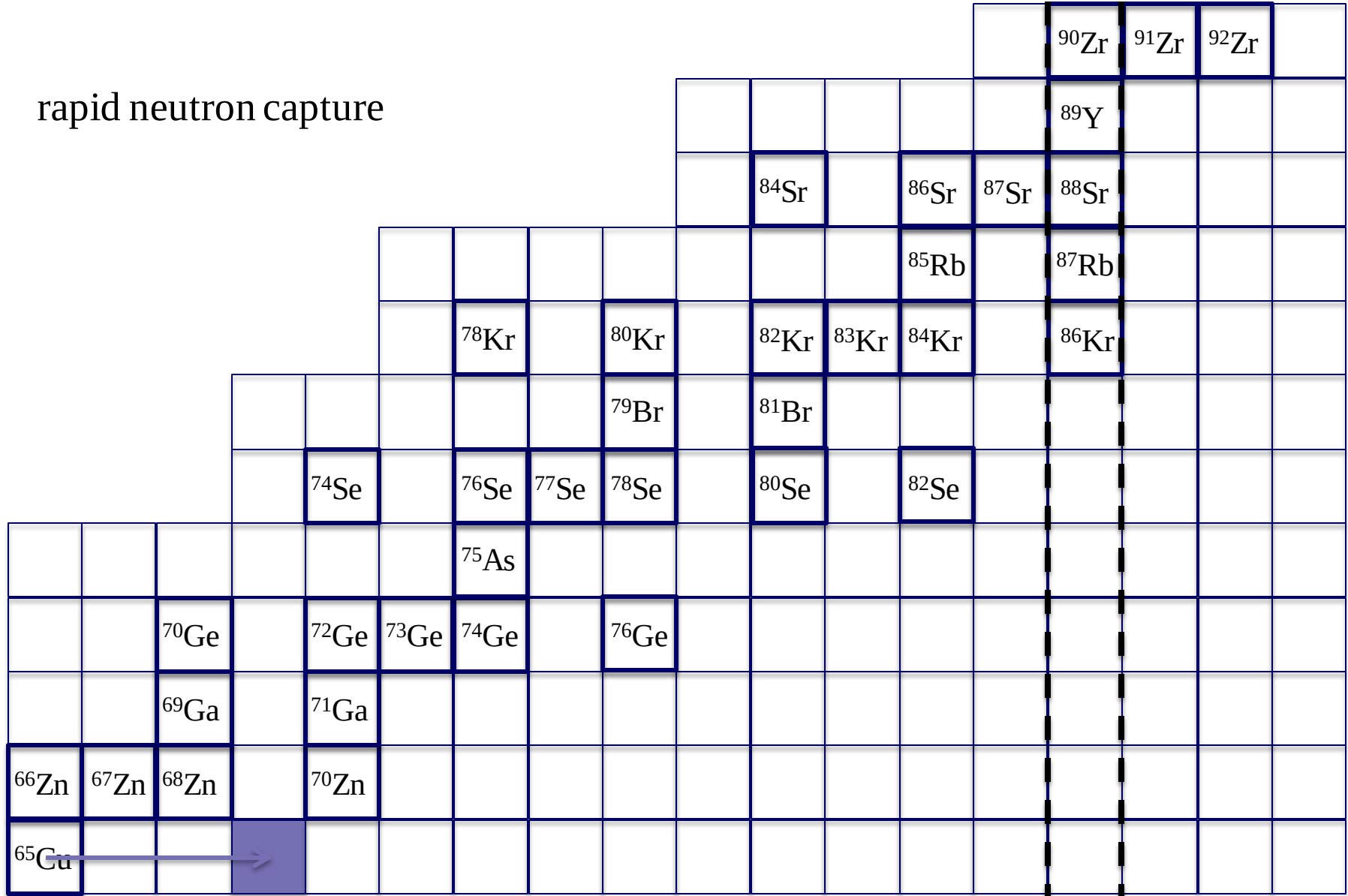
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

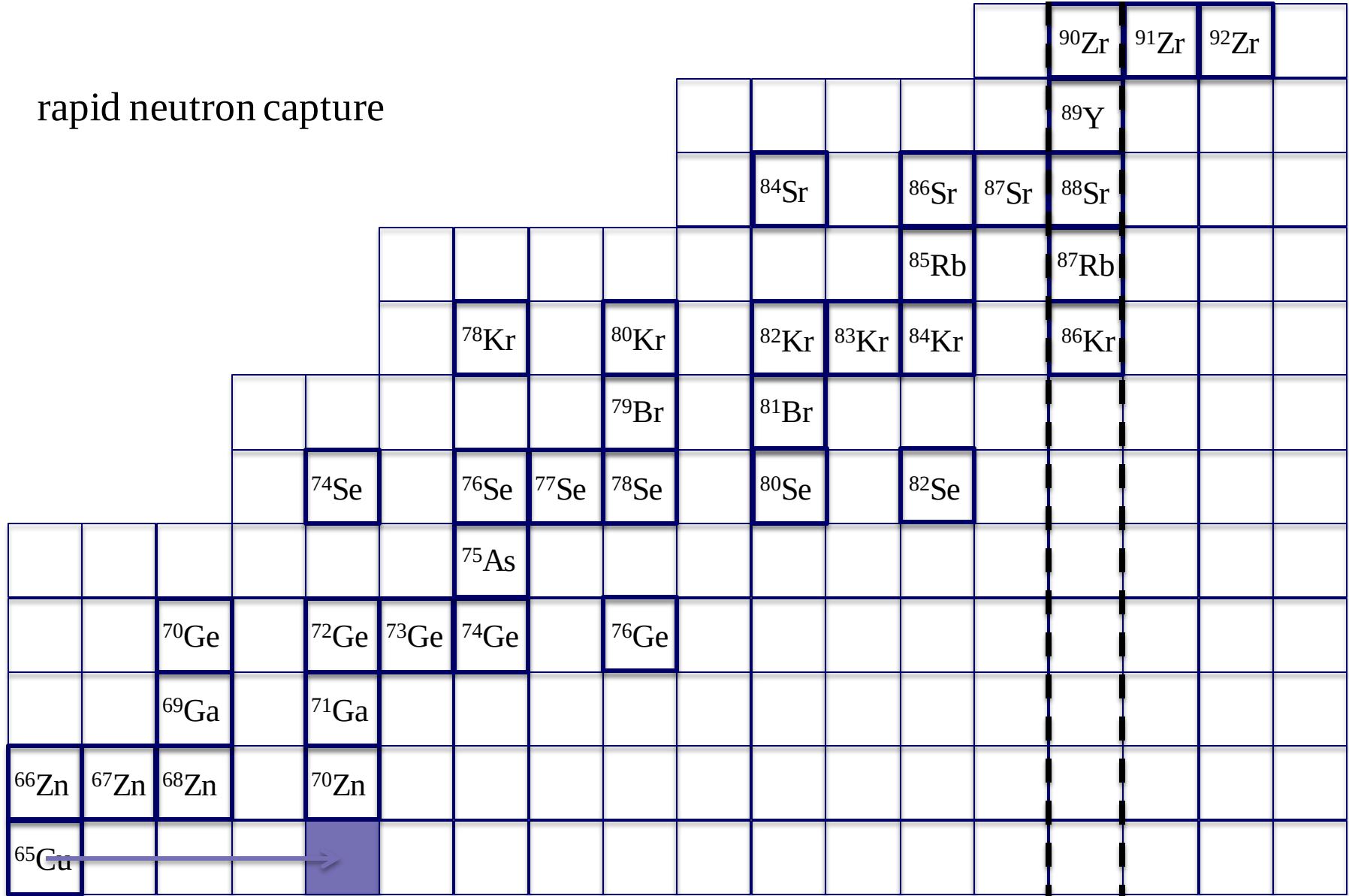
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

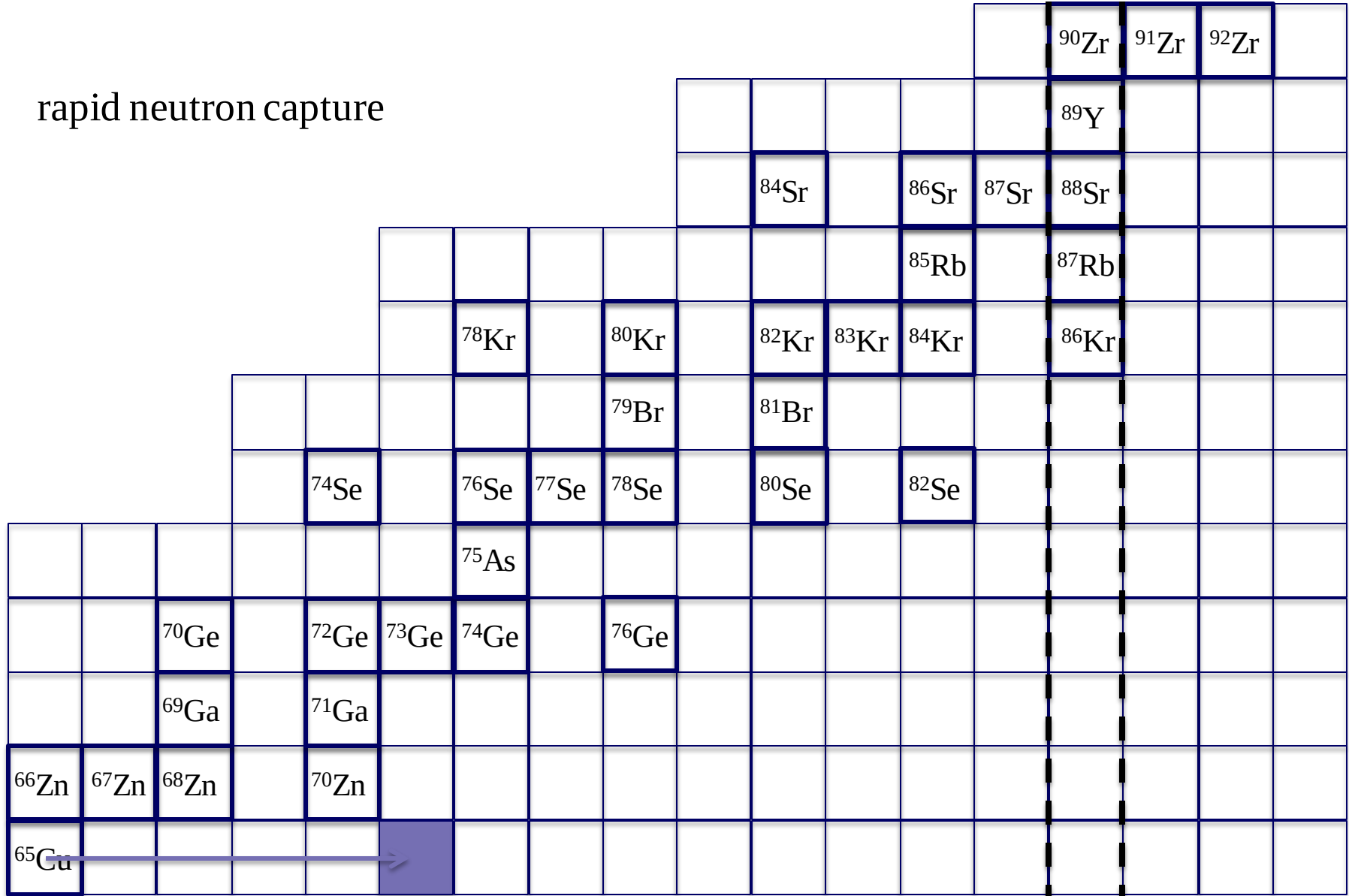
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

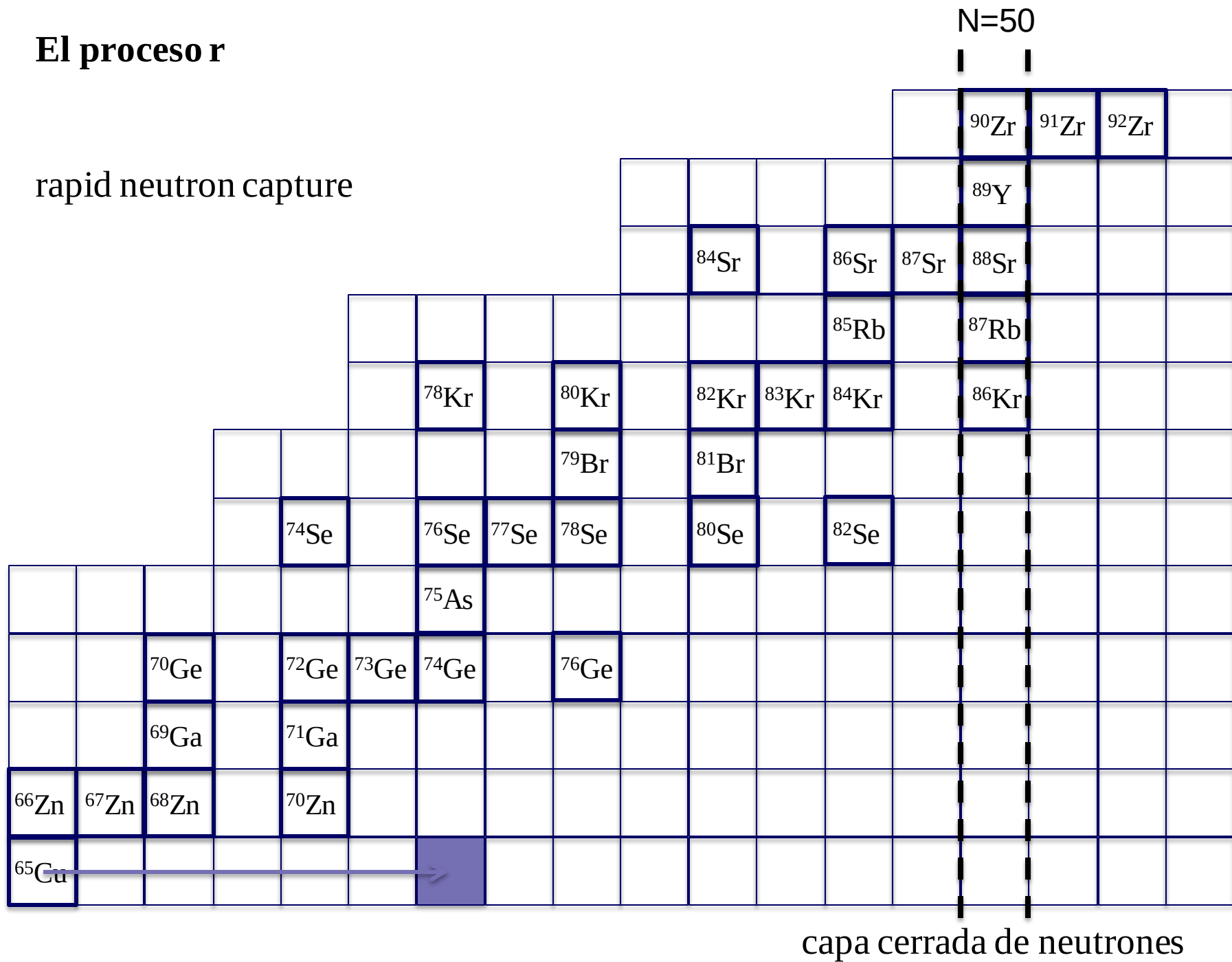
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

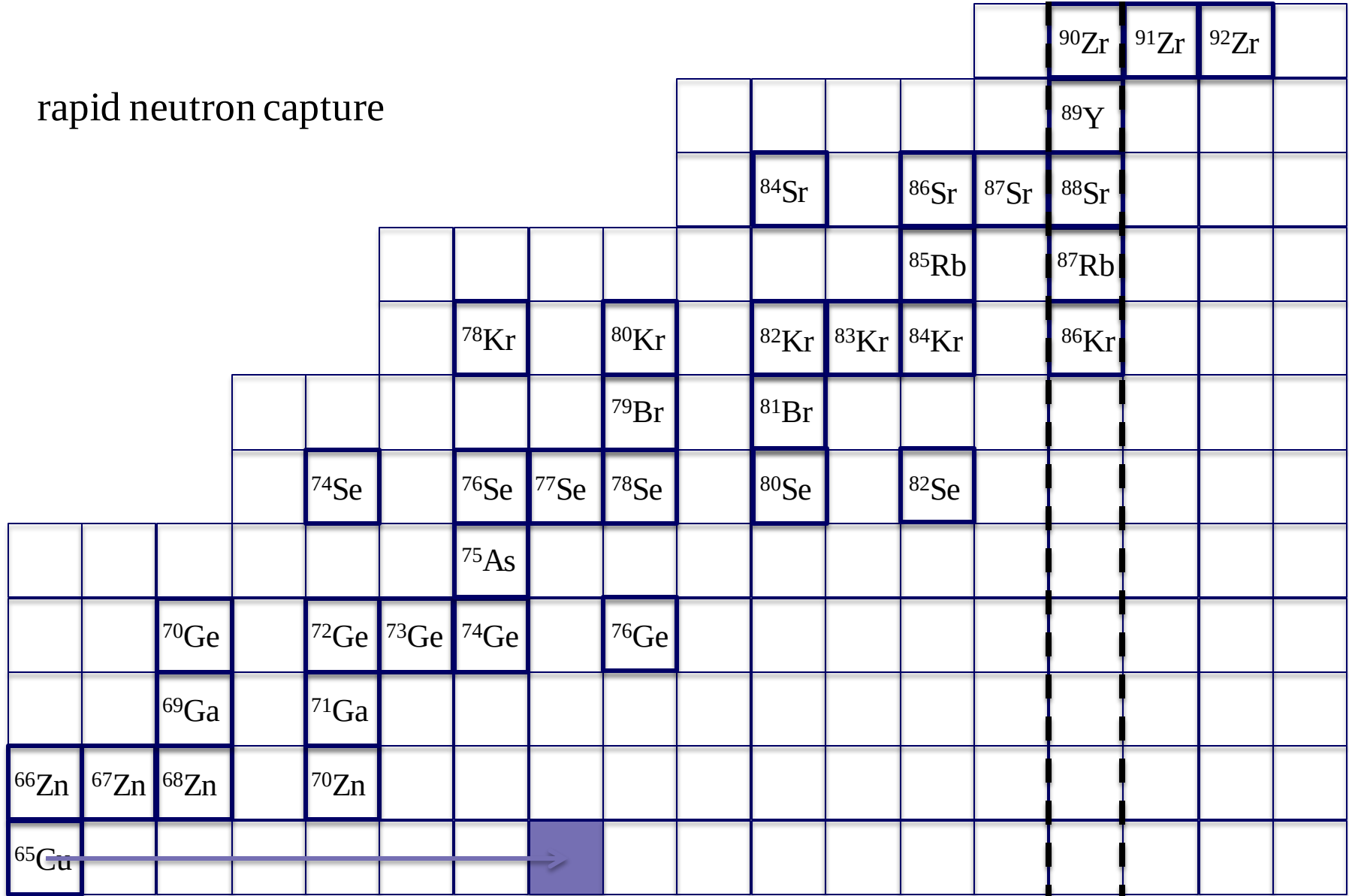
El proceso r

rapid neutron capture



El proceso r

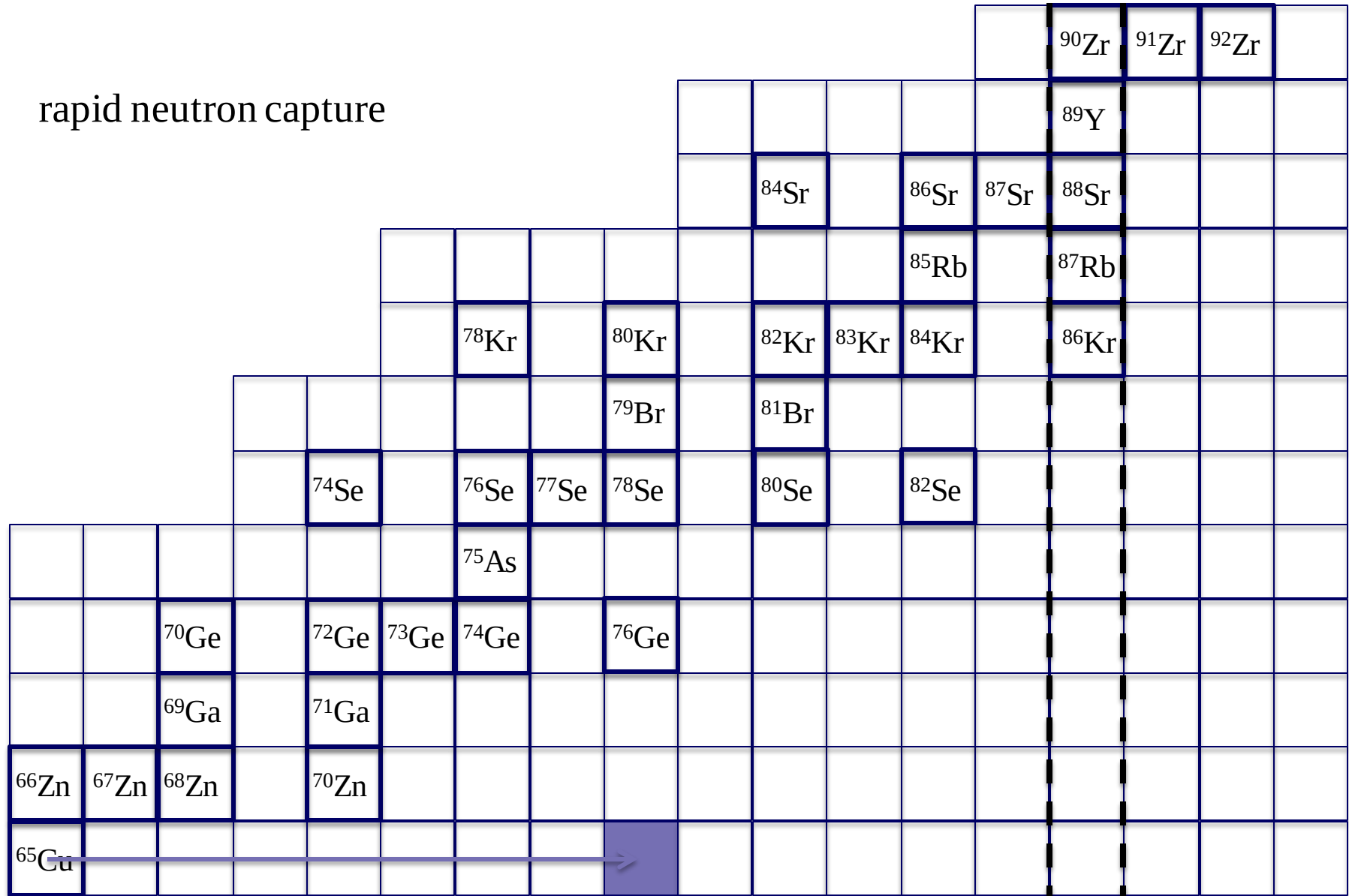
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

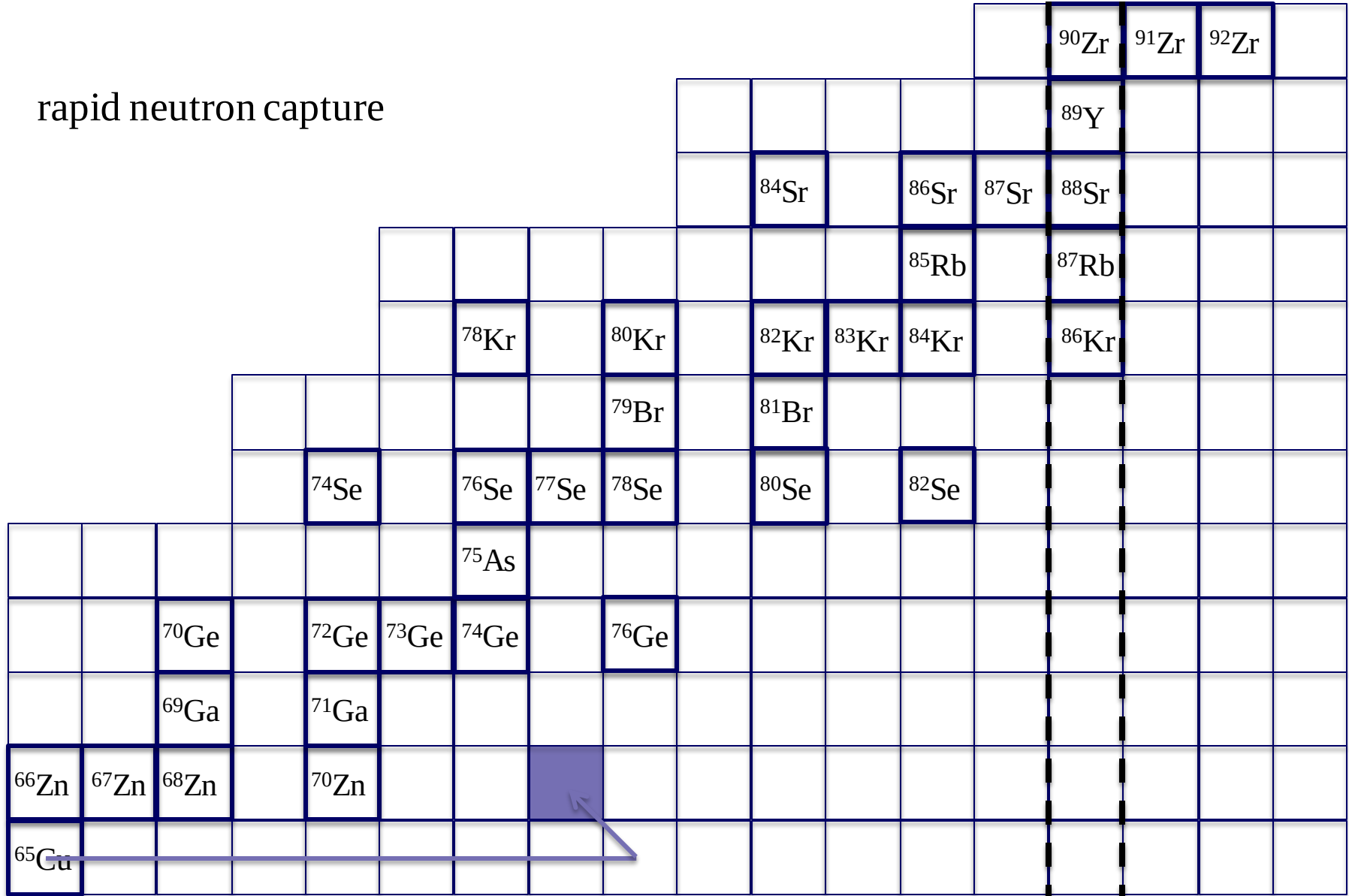
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

El proceso r

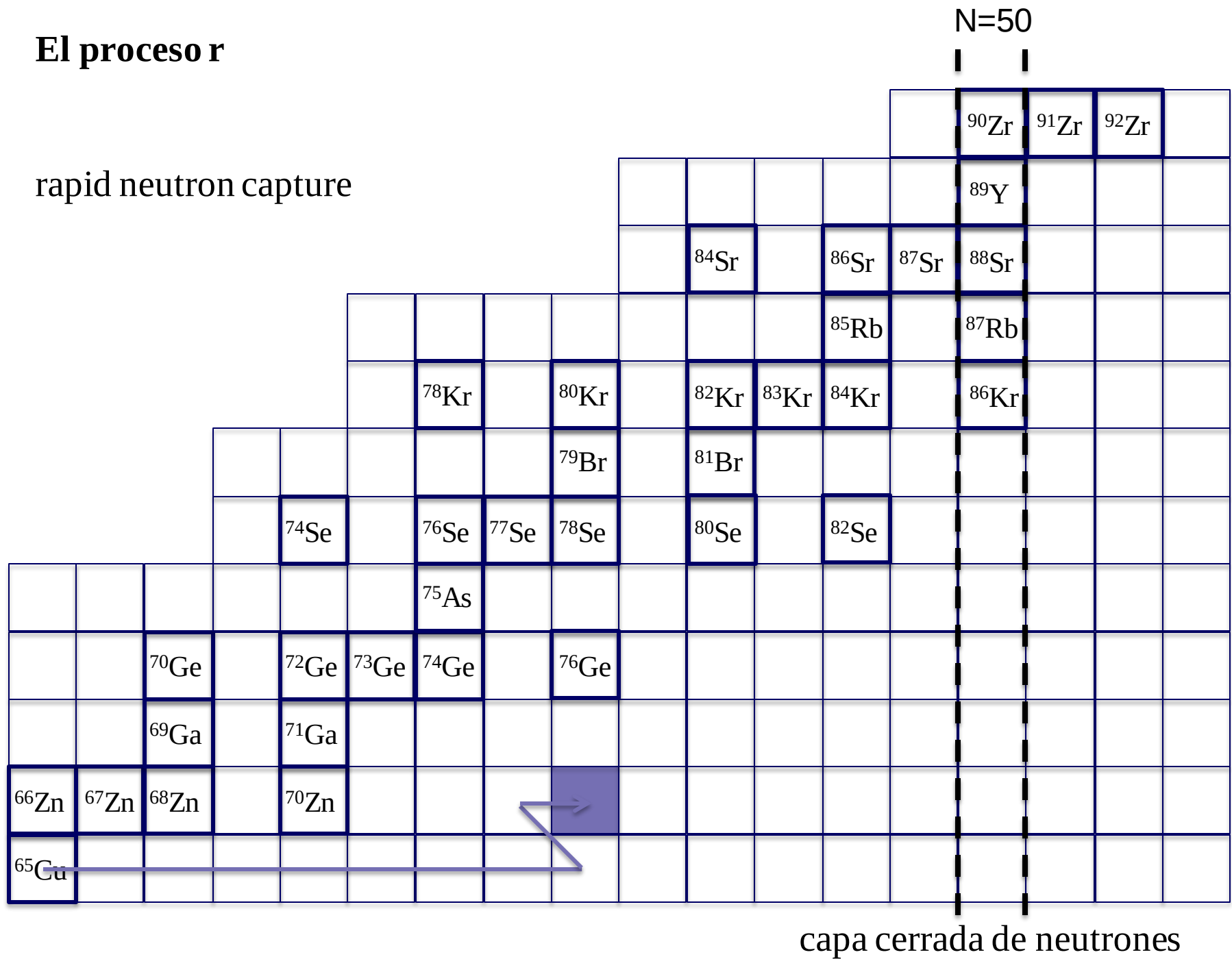
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

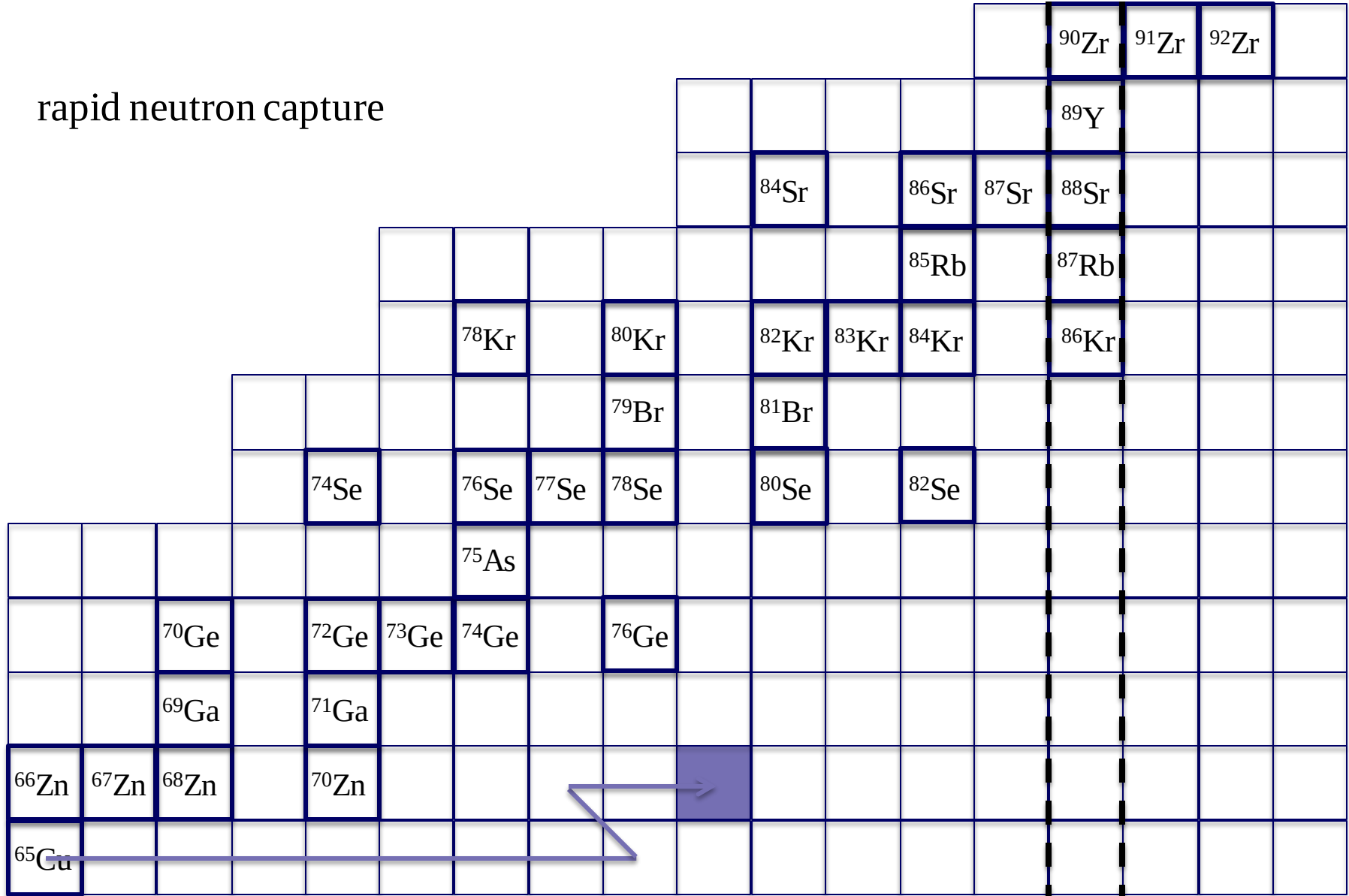
El proceso r

rapid neutron capture



El proceso r

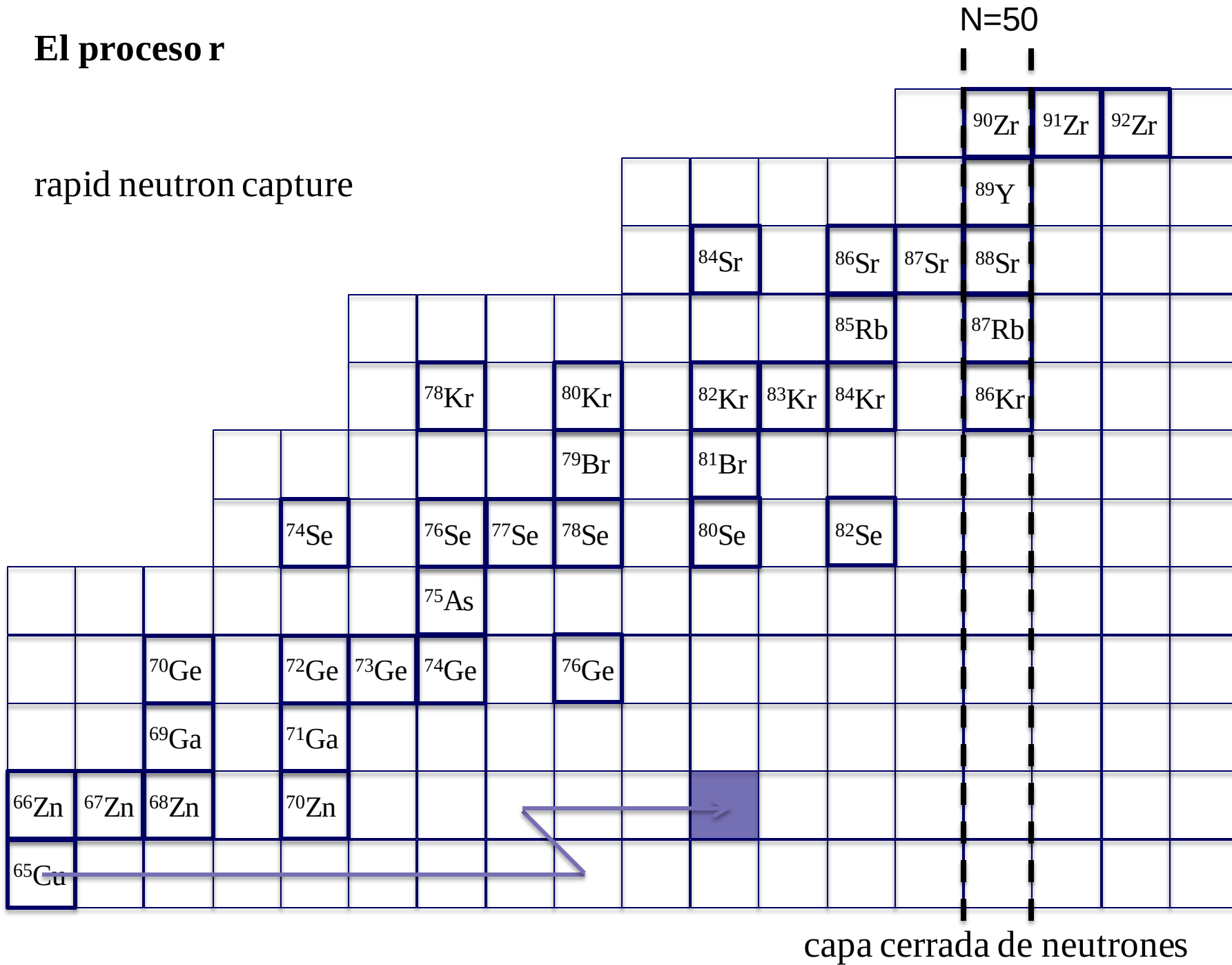
rapid neutron capture



capa cerrada de neutrones

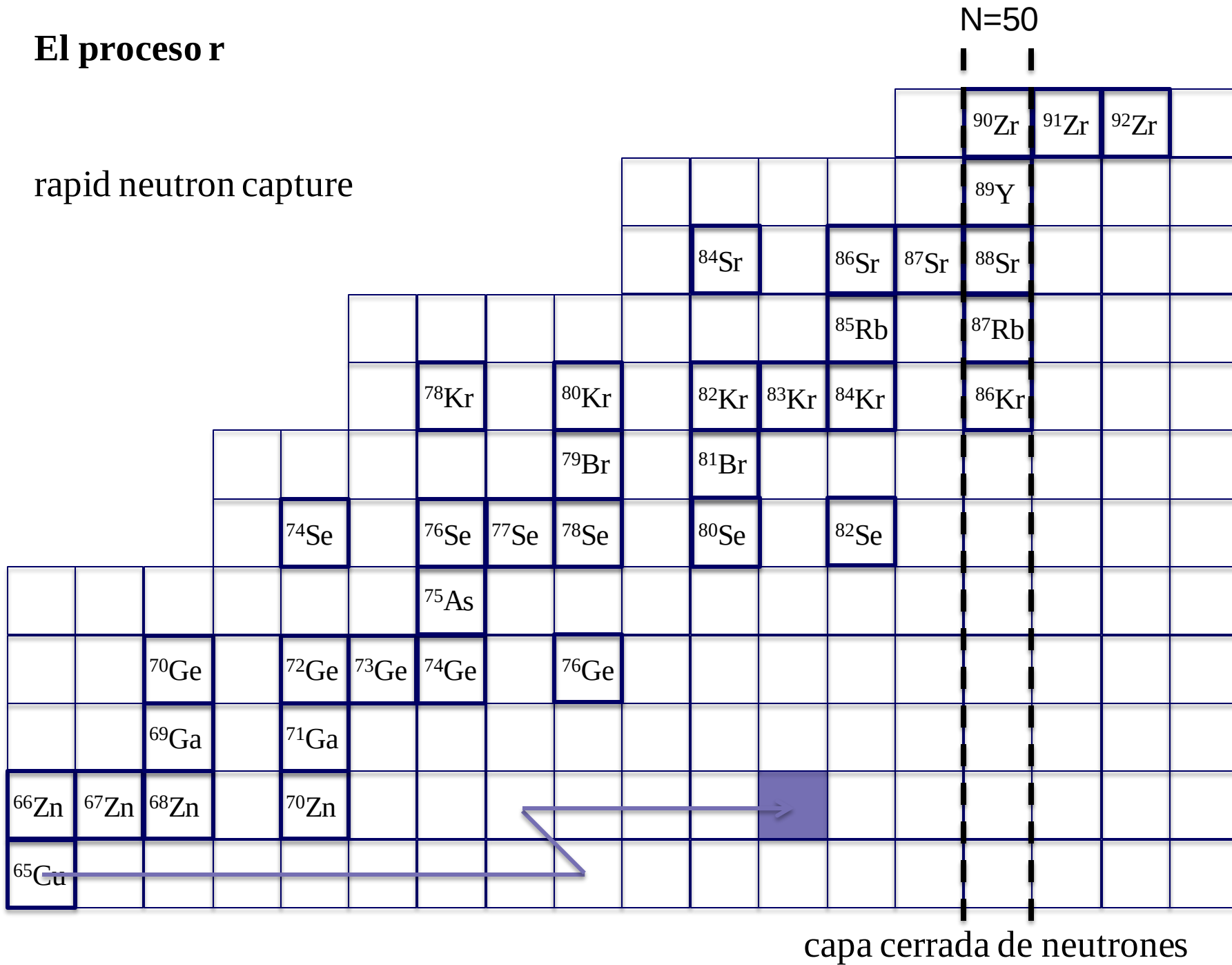
El proceso r

rapid neutron capture



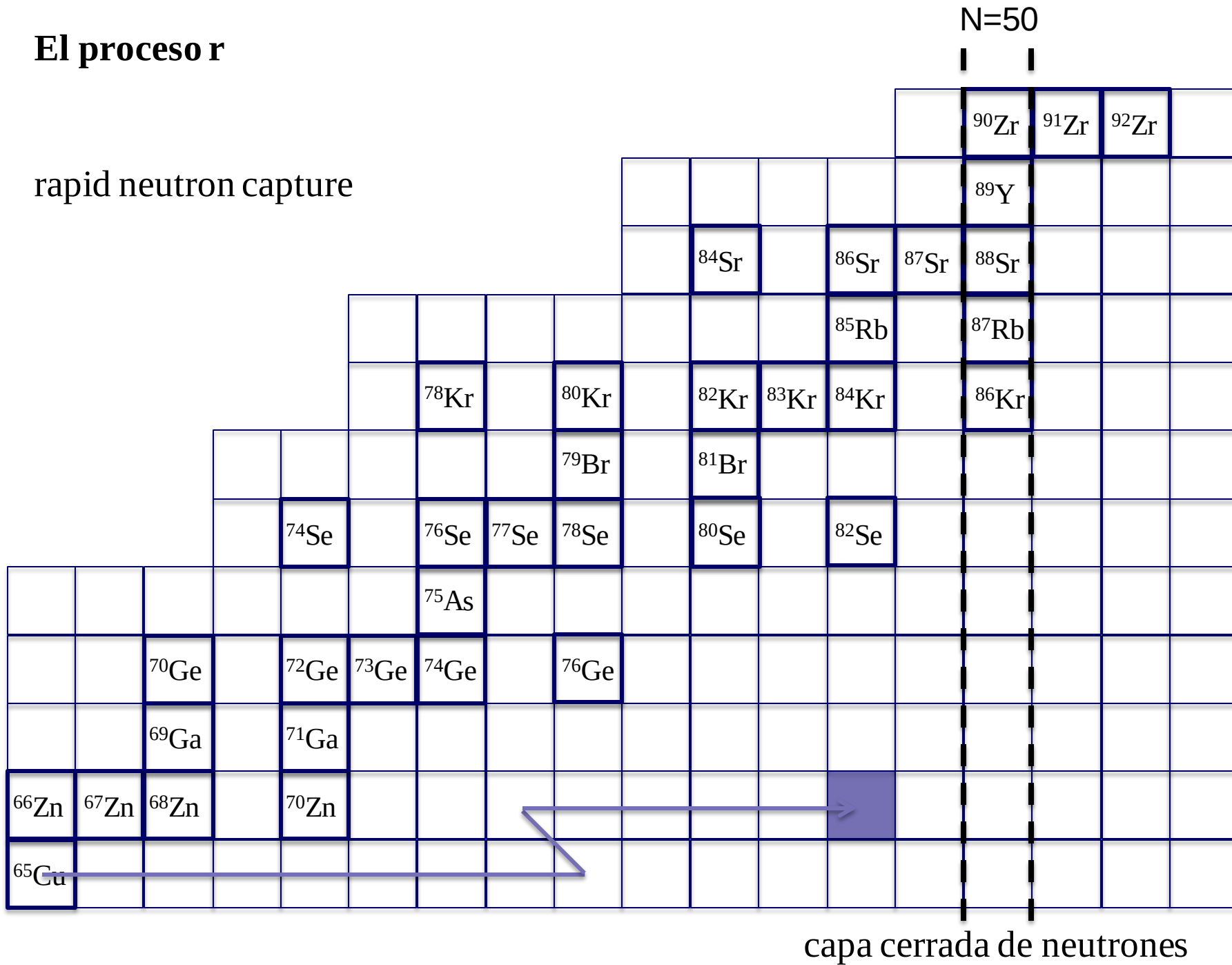
El proceso r

rapid neutron capture



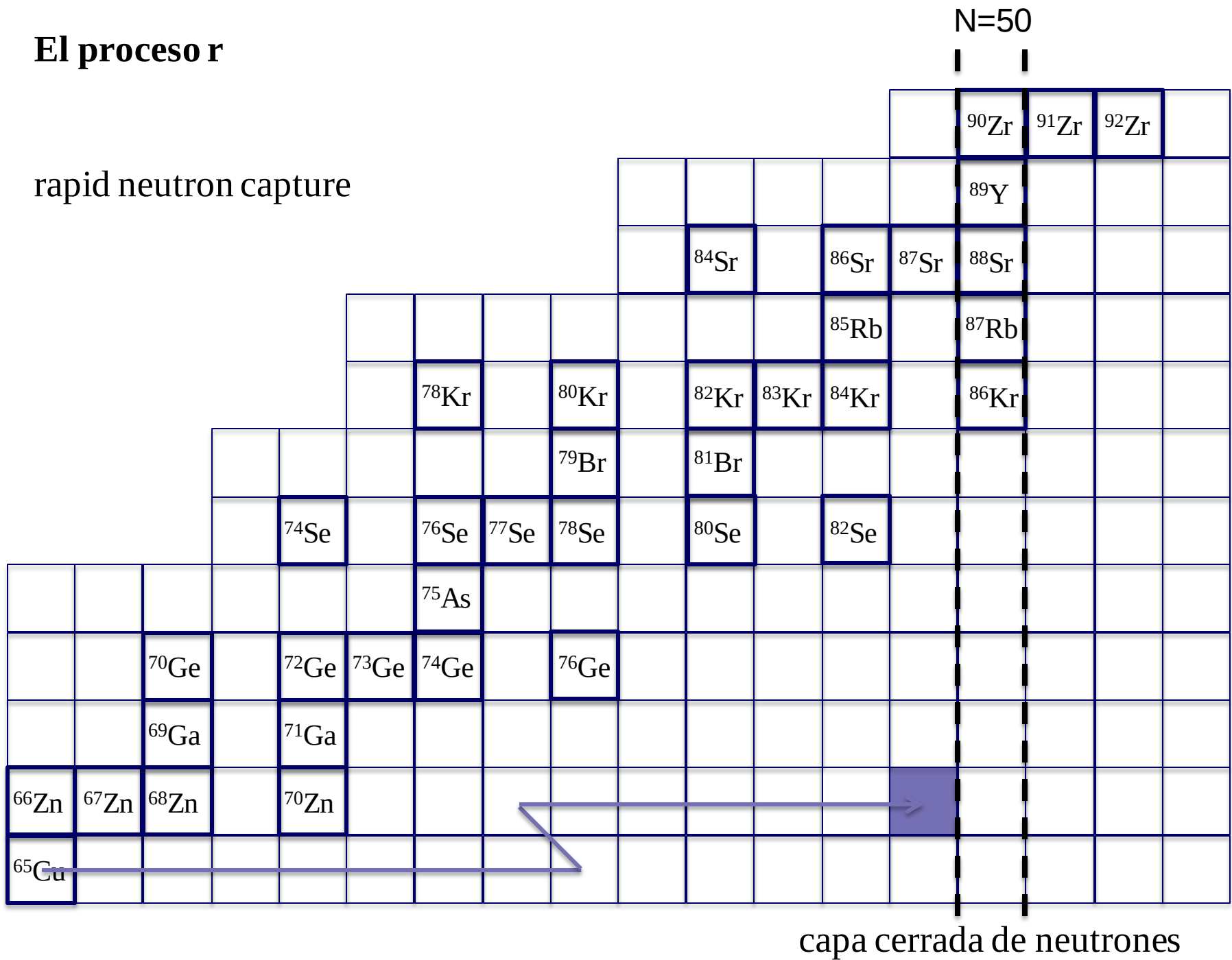
El proceso r

rapid neutron capture



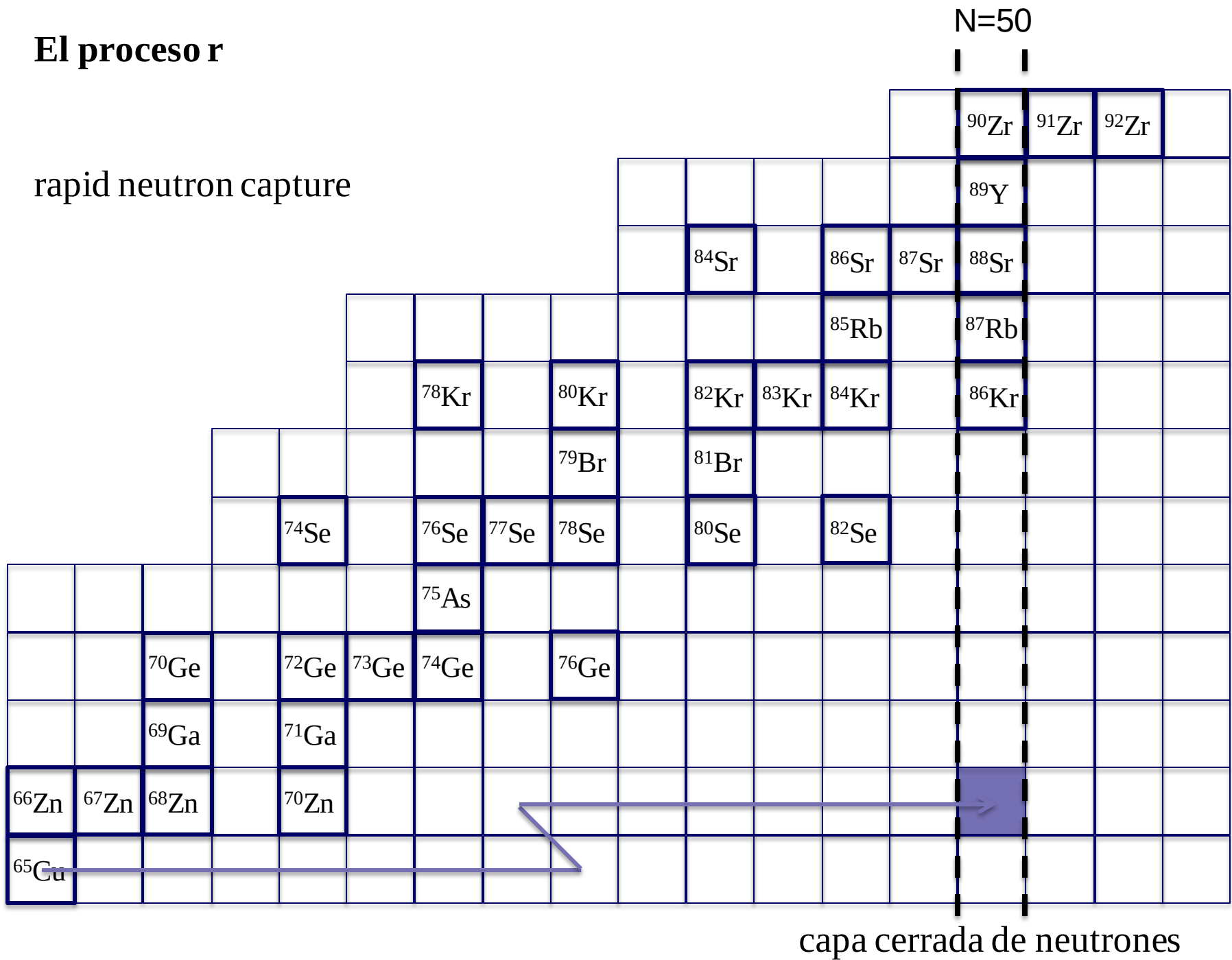
El proceso r

rapid neutron capture



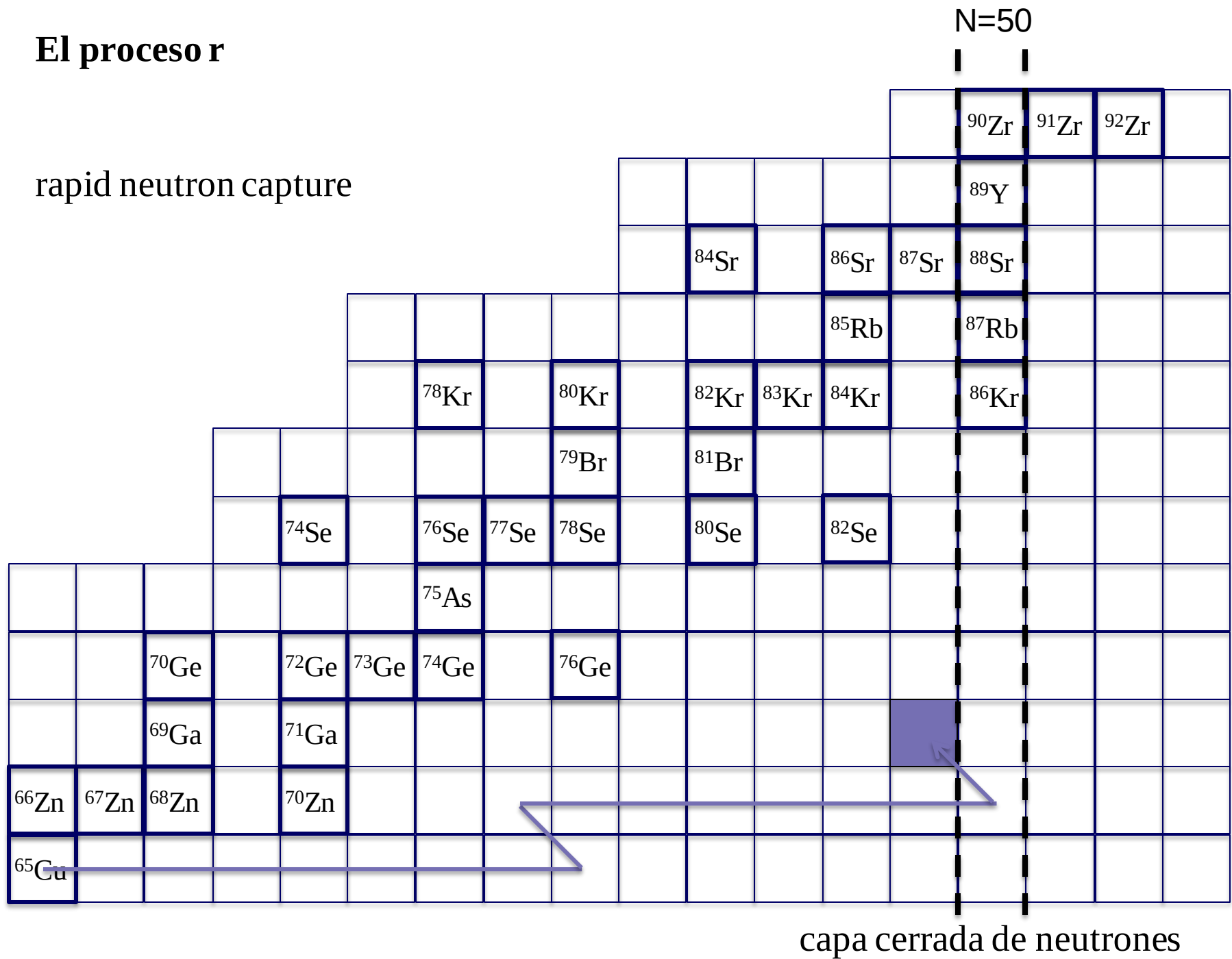
El proceso r

rapid neutron capture



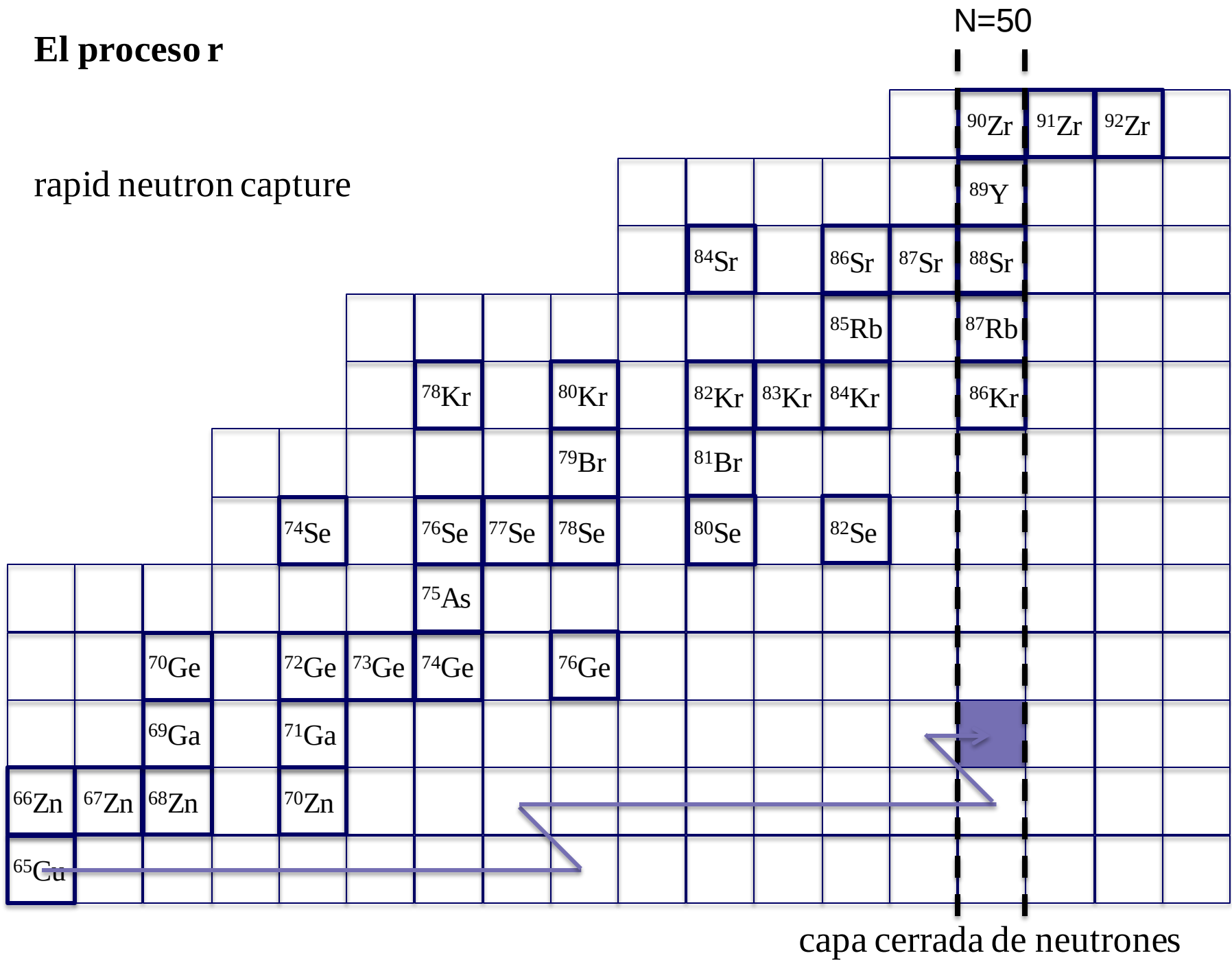
El proceso r

rapid neutron capture



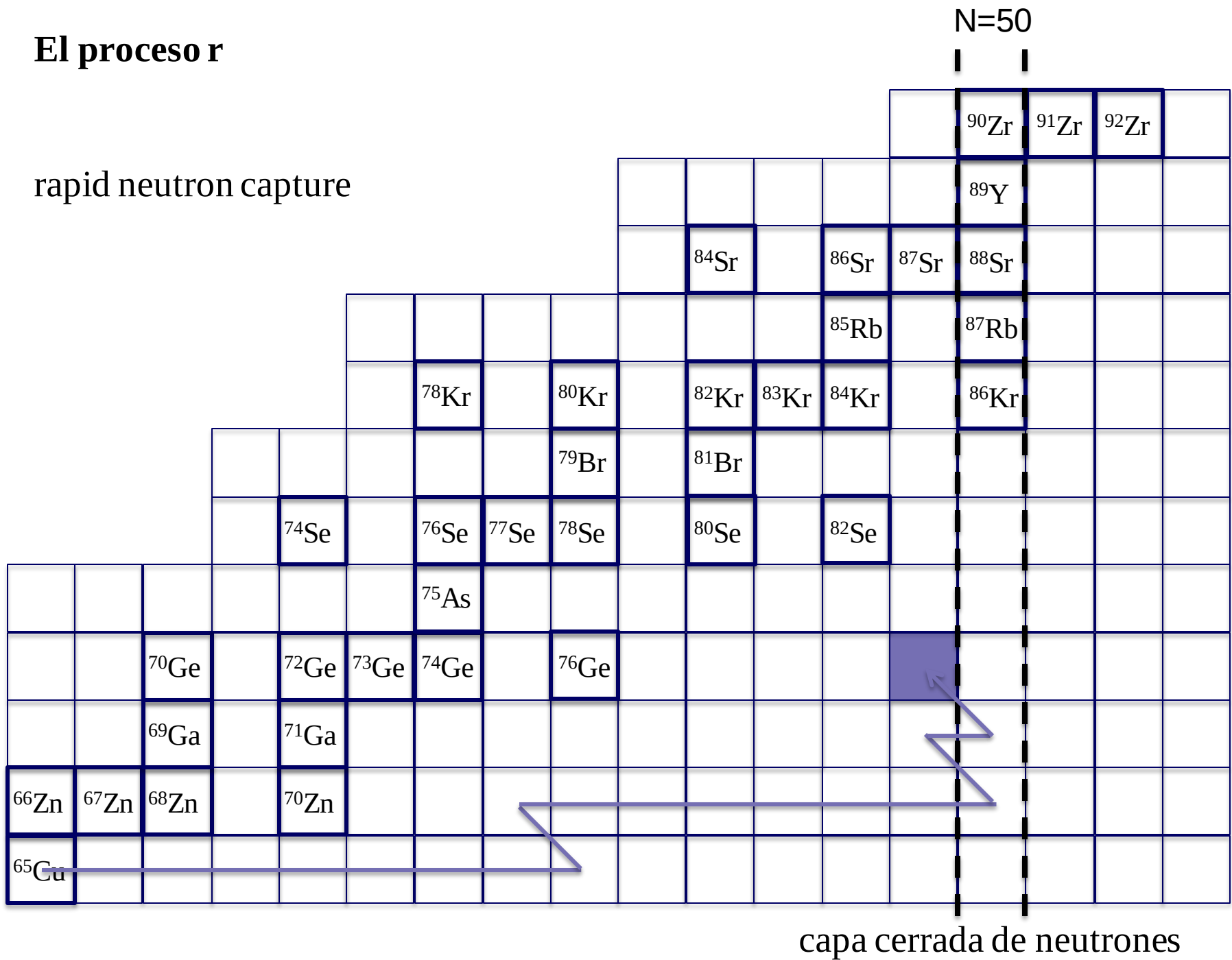
El proceso r

rapid neutron capture



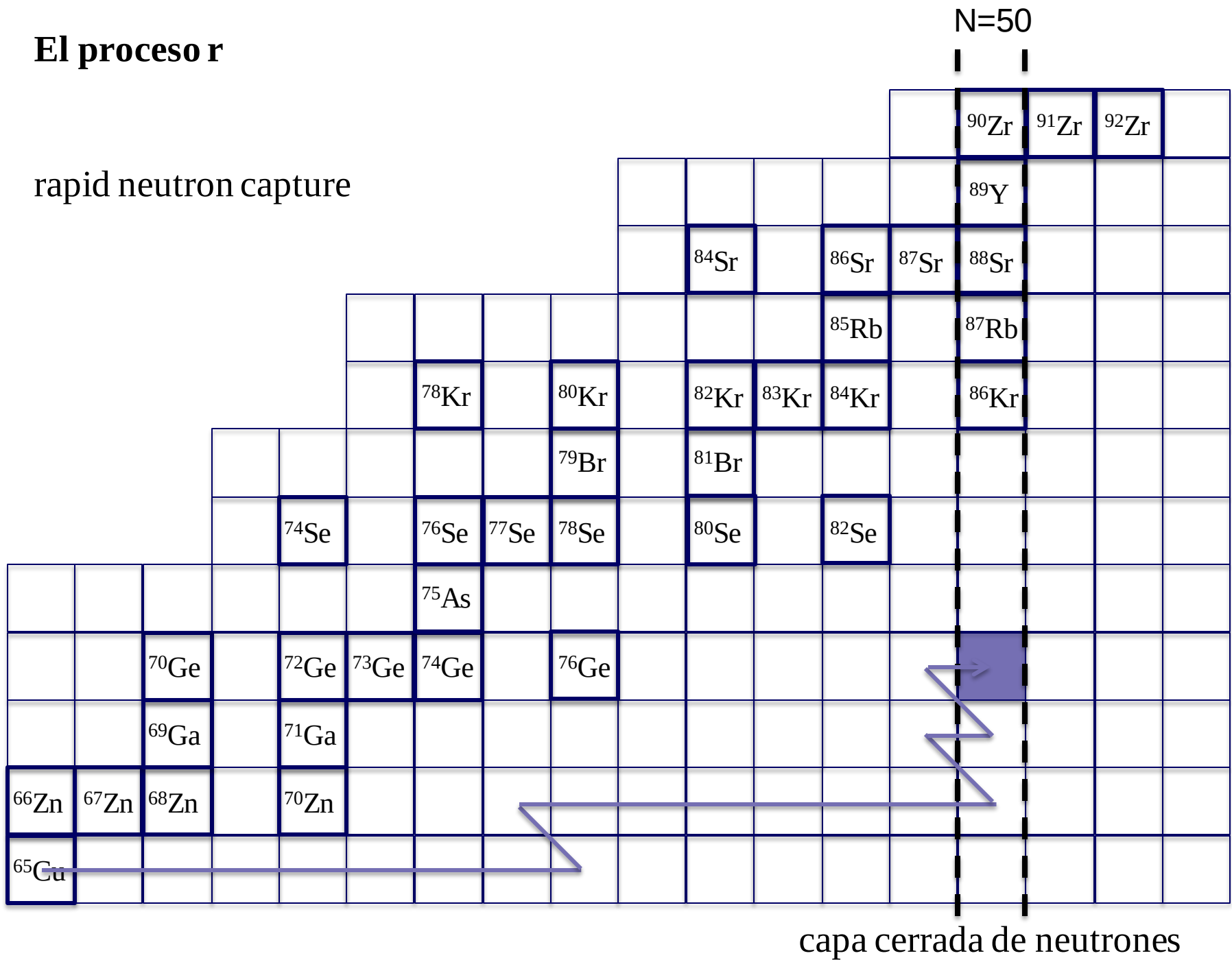
El proceso r

rapid neutron capture



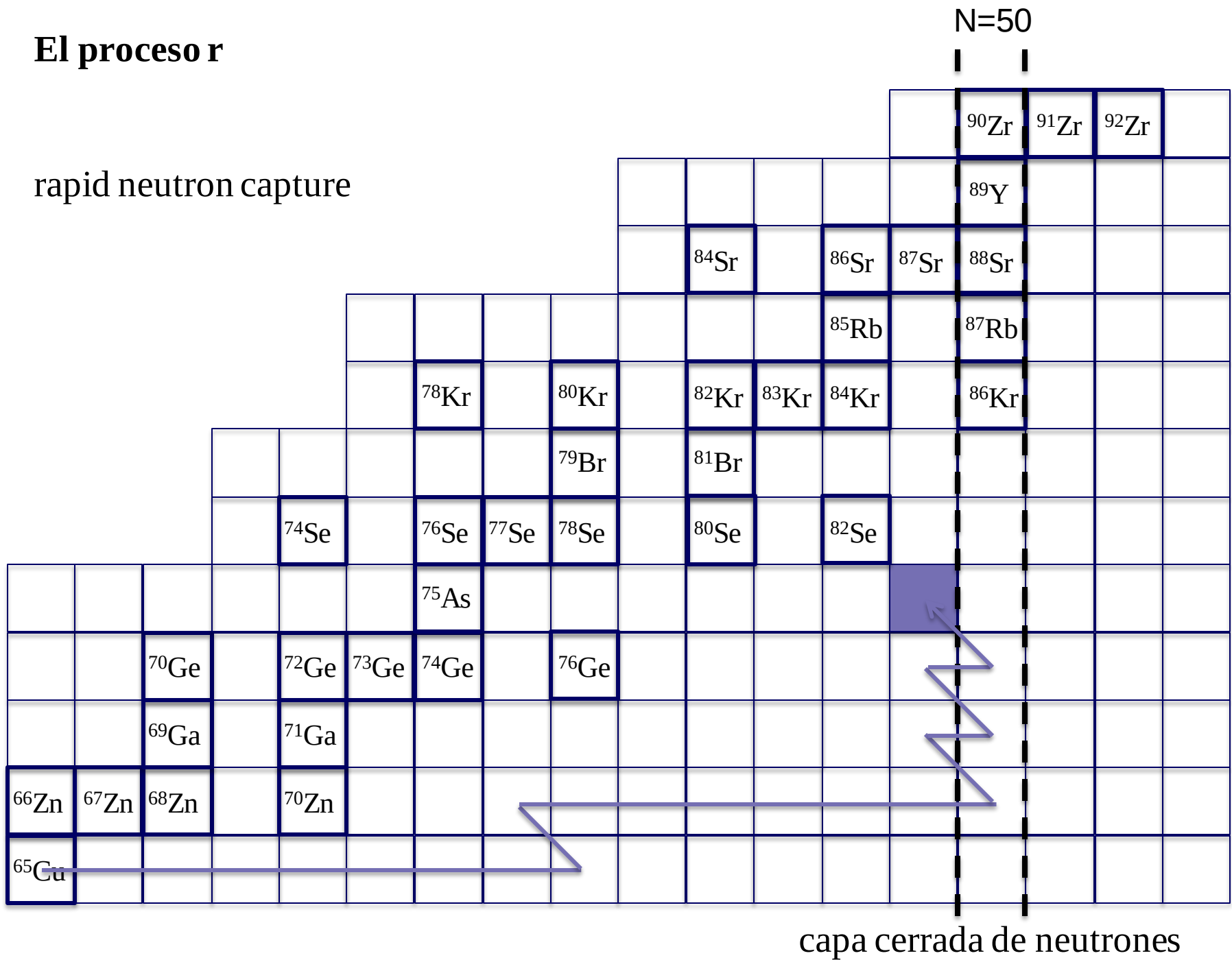
El proceso r

rapid neutron capture



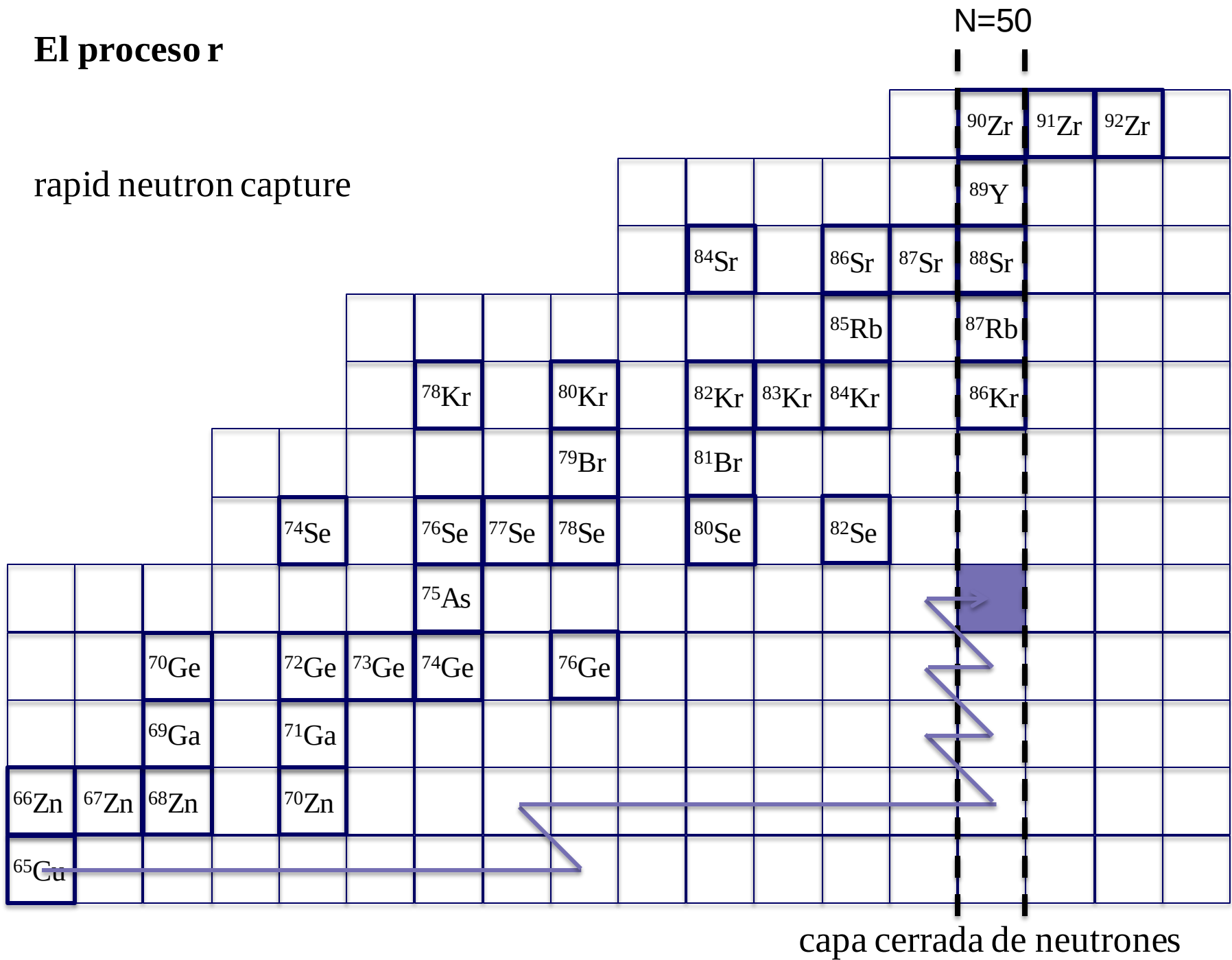
El proceso r

rapid neutron capture



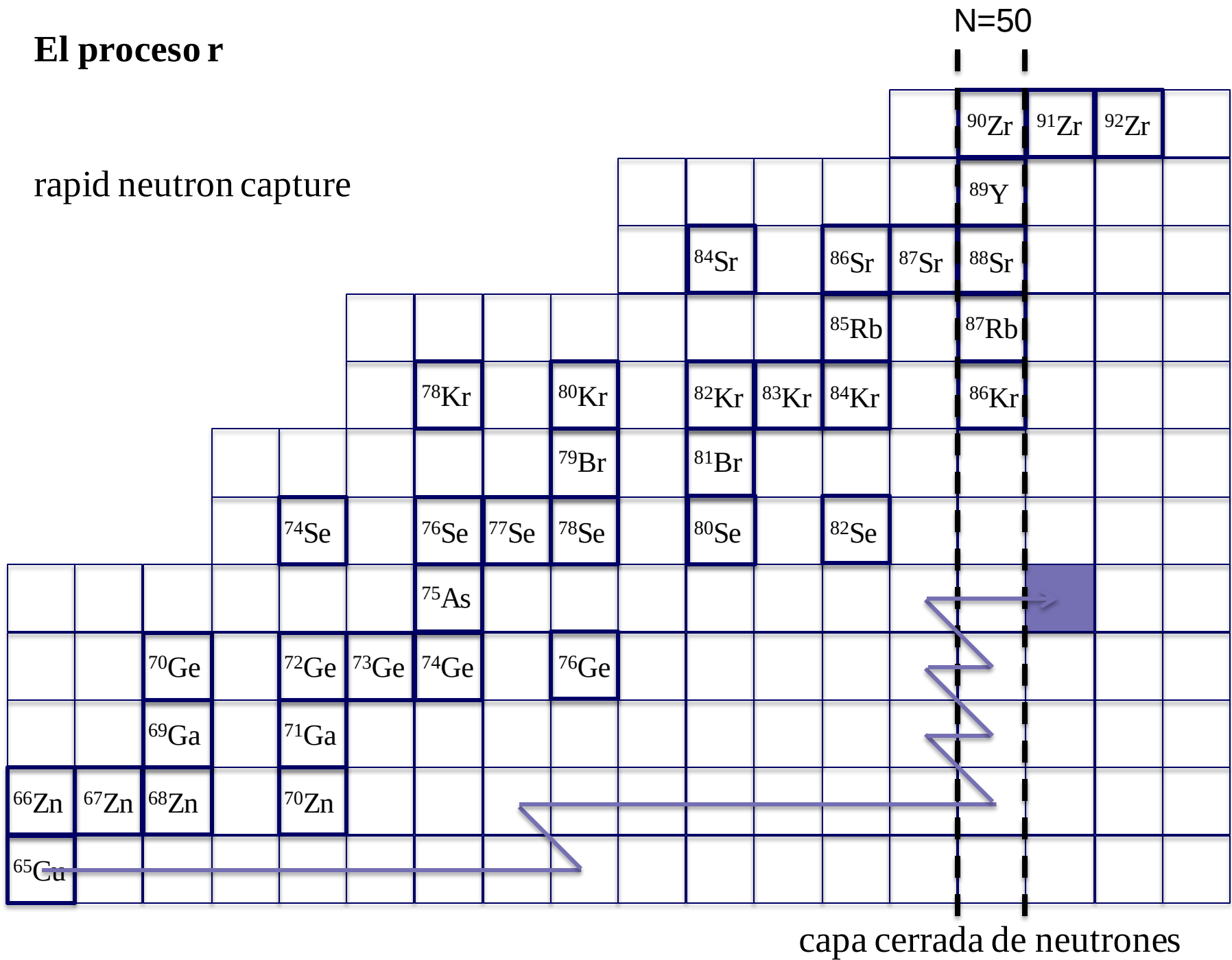
El proceso r

rapid neutron capture



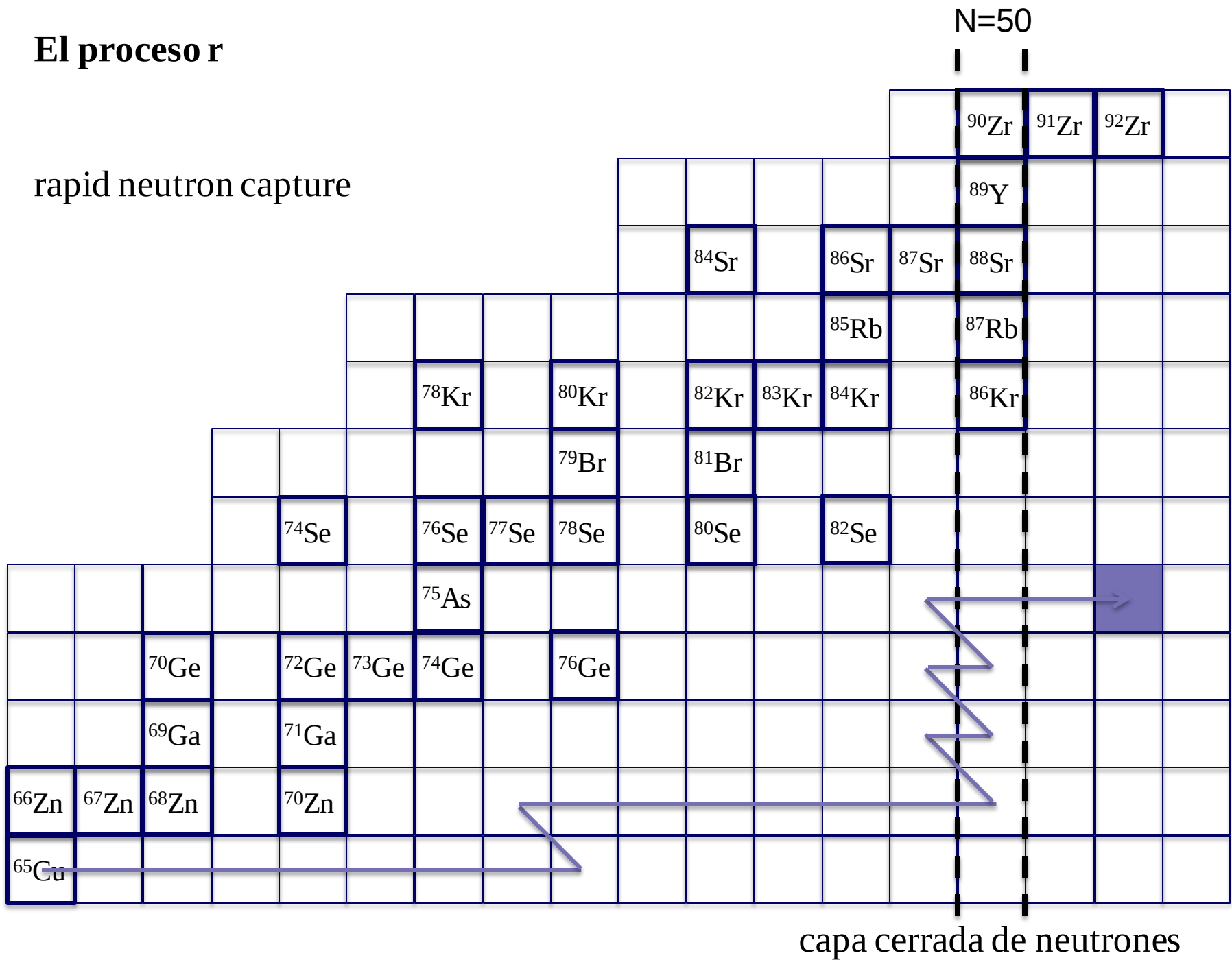
El proceso r

rapid neutron capture



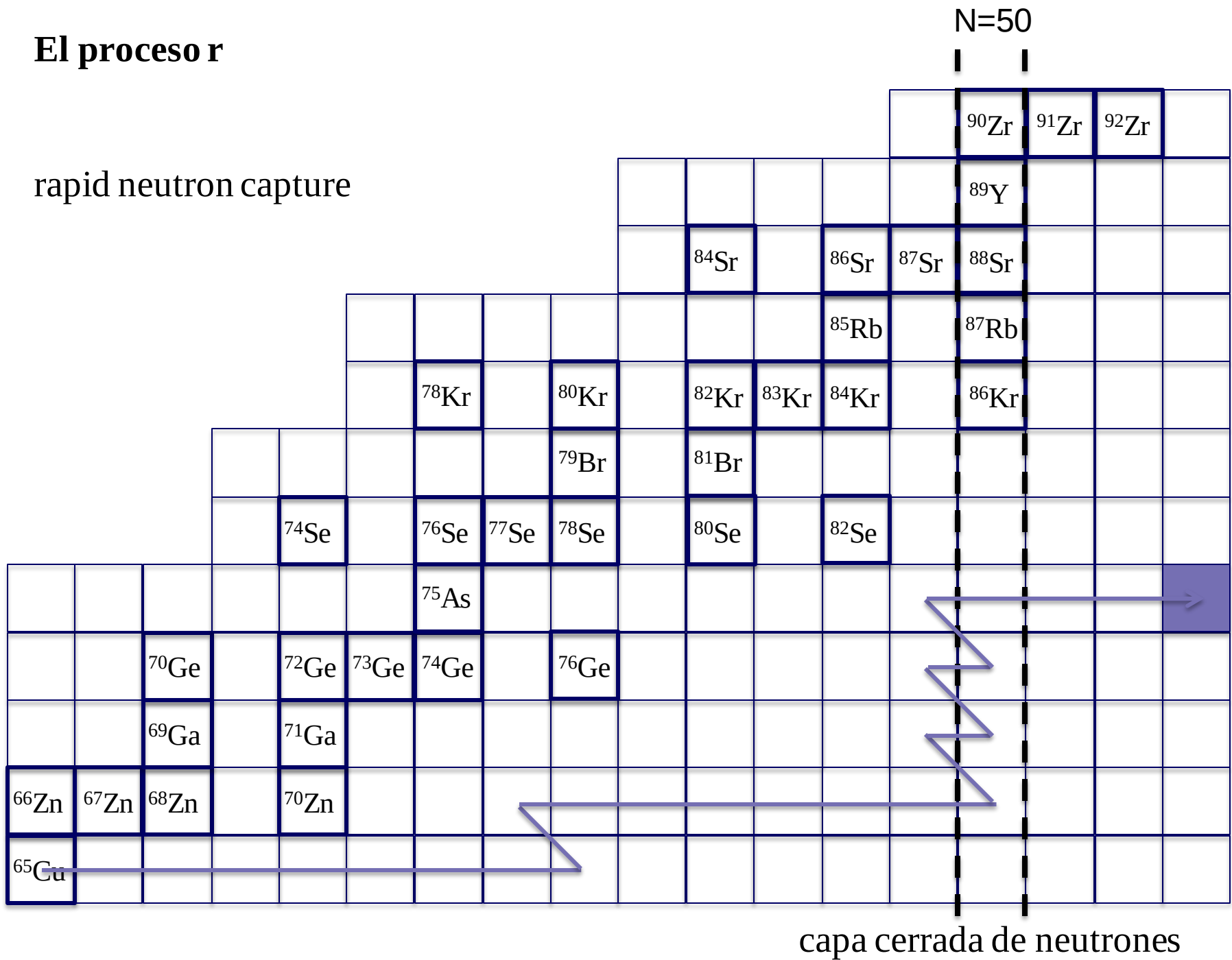
El proceso r

rapid neutron capture



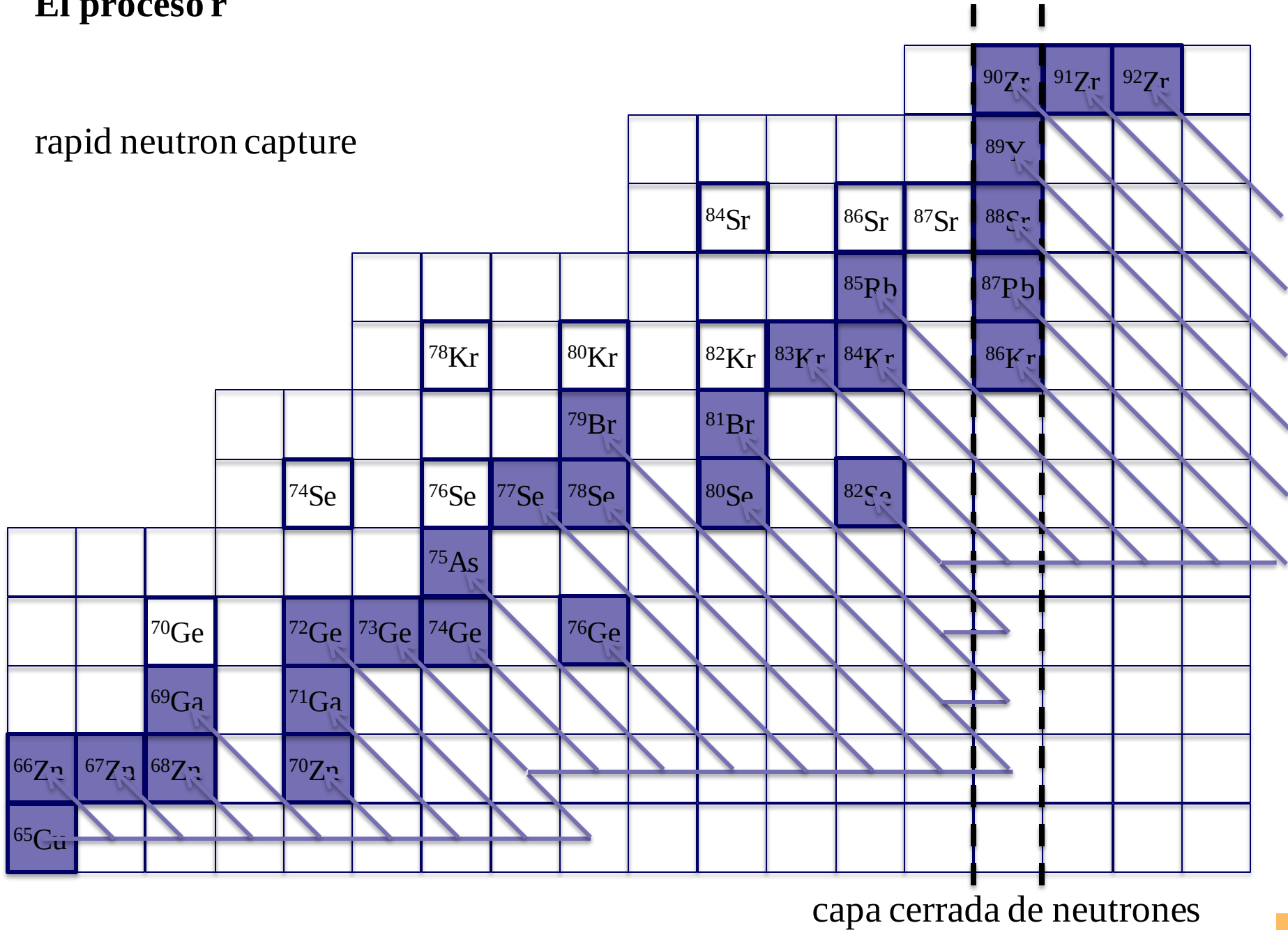
El proceso r

rapid neutron capture



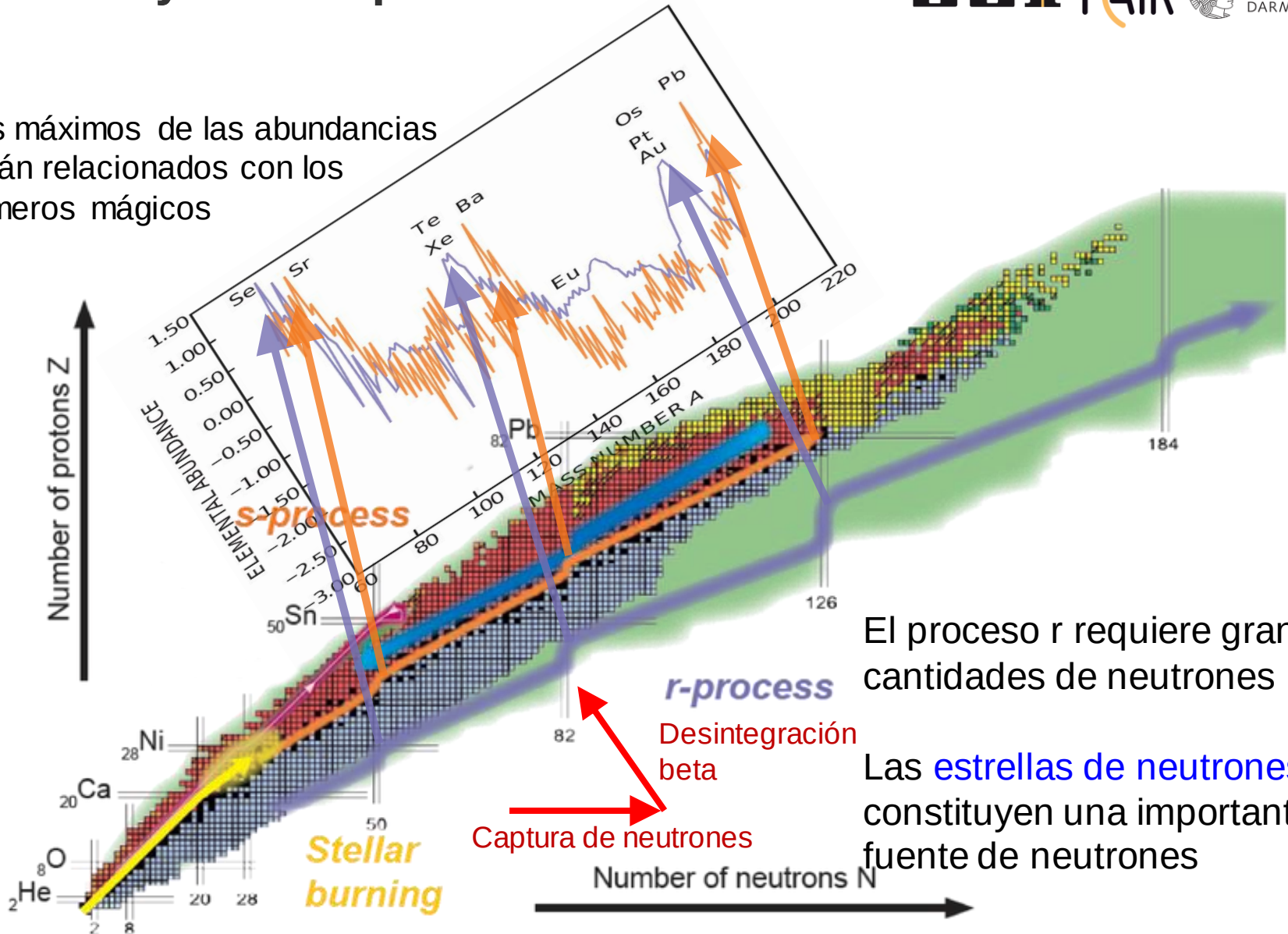
El proceso r

rapid neutron capture



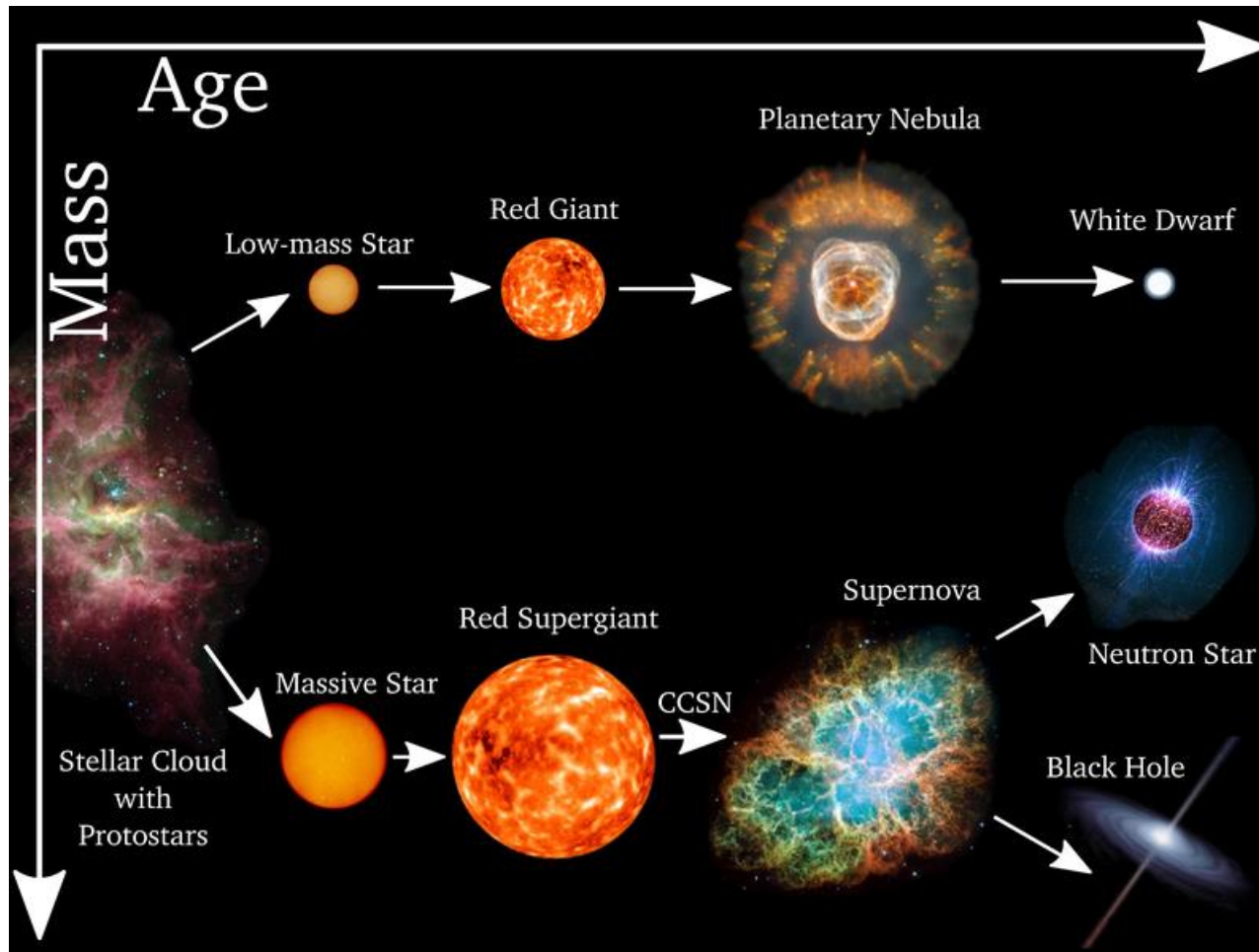
Nucleosynthesis processes

Los máximos de las abundancias están relacionados con los números mágicos



El proceso r requiere grandes cantidades de neutrones

Las **estrellas de neutrones** constituyen una importante fuente de neutrones



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

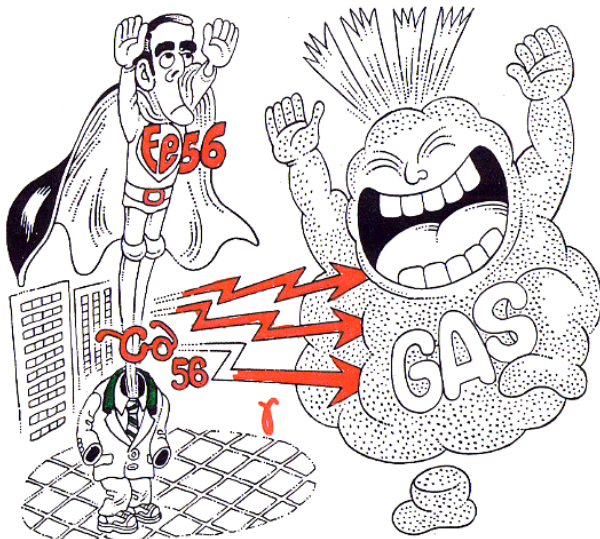
Estrellas con masas mayores de 8 masas solares producen un núcleo de hierro. El colapso gravitatorio del núcleo produce una **estrella de neutrones** y eyecta el manto estelar. Productos principales: Carbono, Oxigeno y Hierro

Curva de luz: evidencia de nucleosíntesis

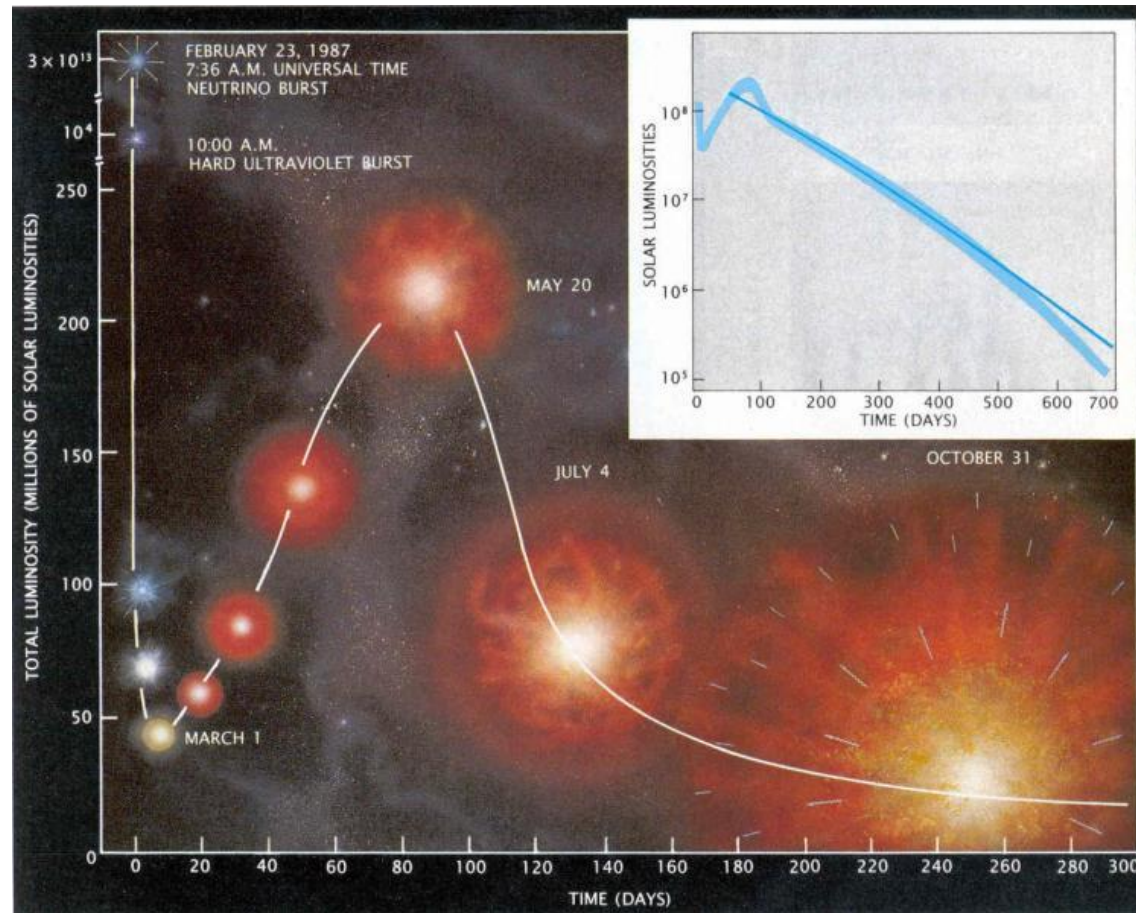


Supernova 1987A

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

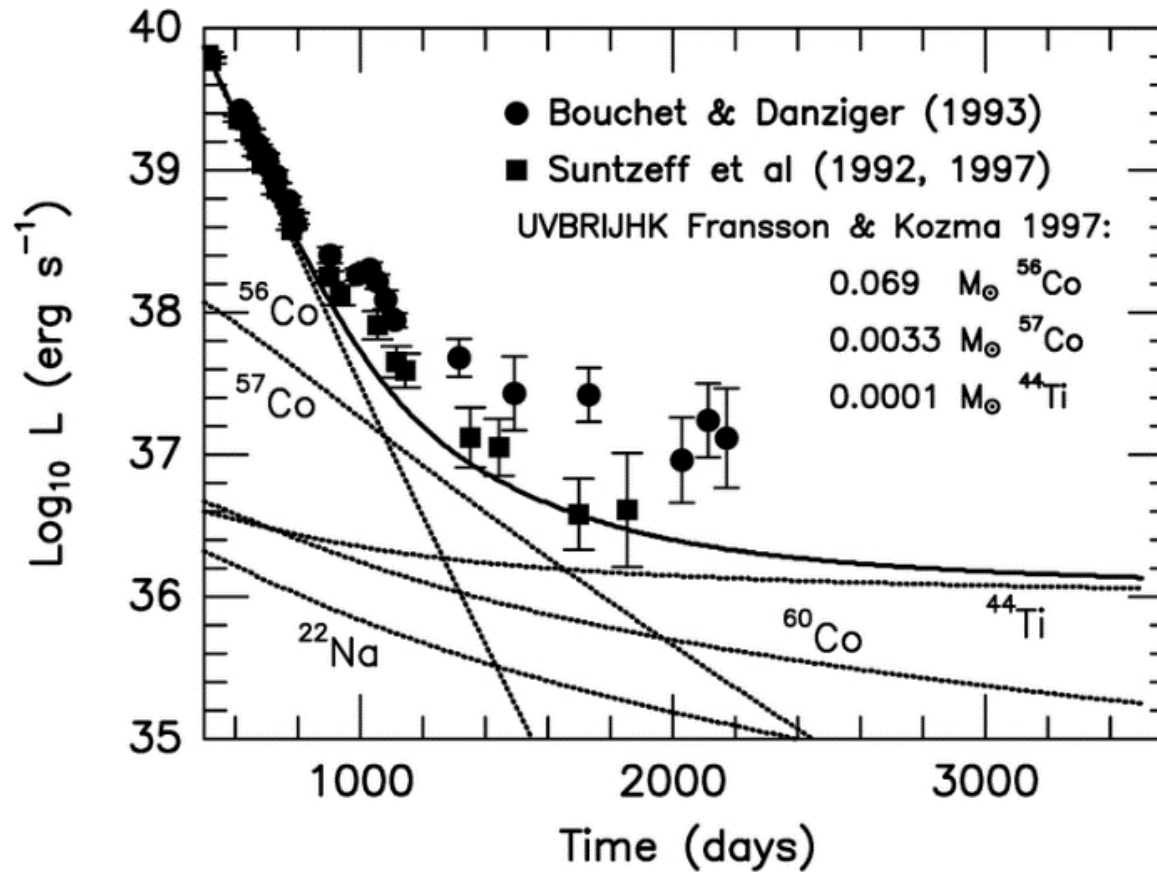


© Haruyo Nomoto



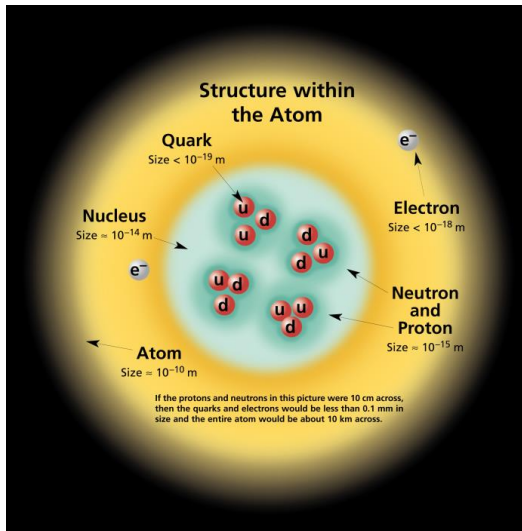
Woosley & Weaver, Scientific American 261, 1989

Curva de luz: evidencia *de nucleosíntesis*

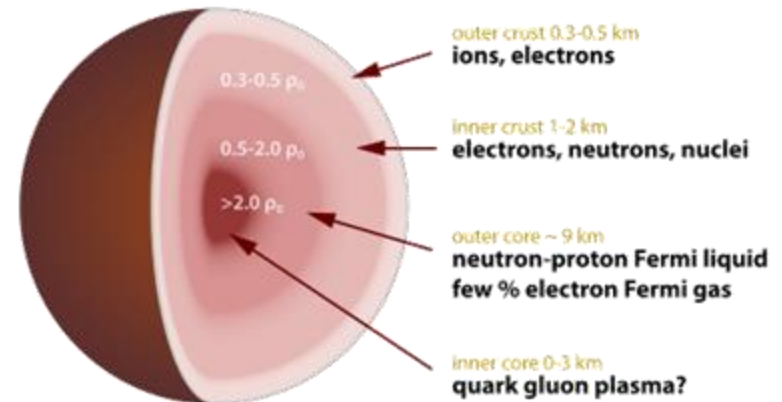


Diehl & Timmes, PASP 110, 637 (1998)

Estrellas de neutrones

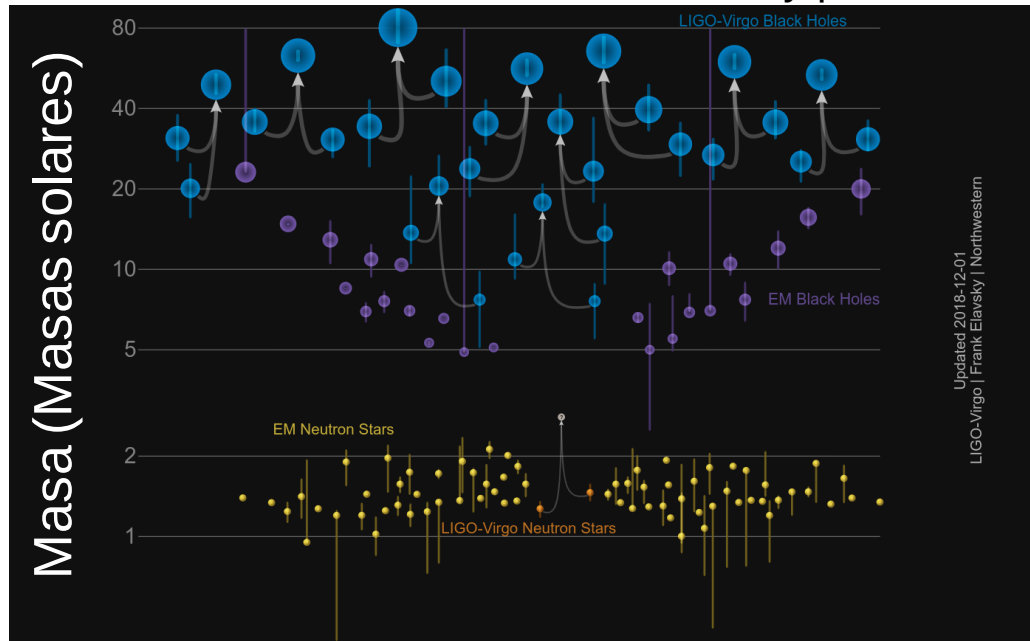


Densidad nuclear $\rho_0 \sim 2.3 \times 10^{14} \text{ g cm}^{-3}$



Núcleo atómico: un centenar de neutrones y protones

Estrella de neutrones: 10^{58} neutrones

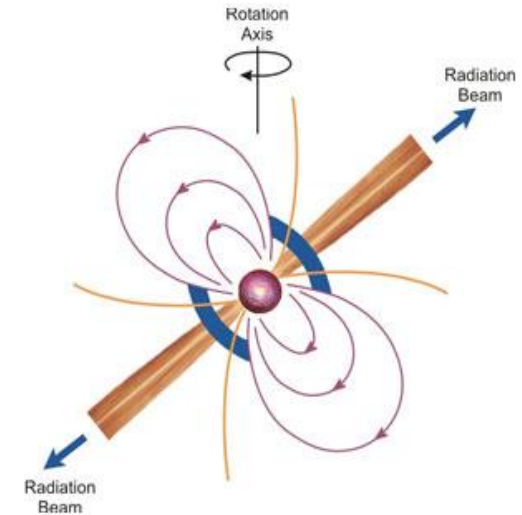


No conocemos la masa máxima de una estrella de neutrones.

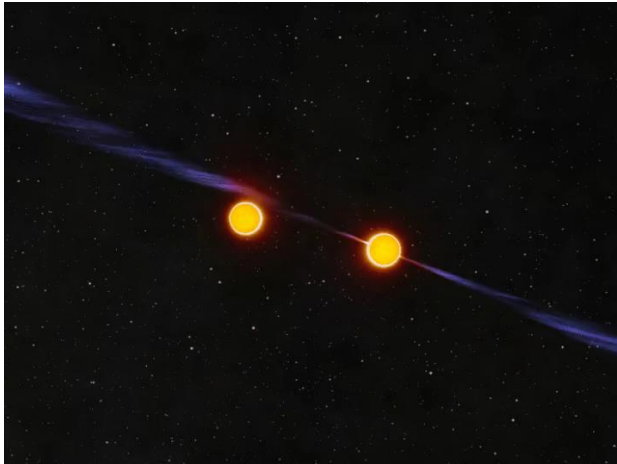
No sabemos cual es el radio: importante para inferir la estructura interna de la estrella.

Pulsares 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

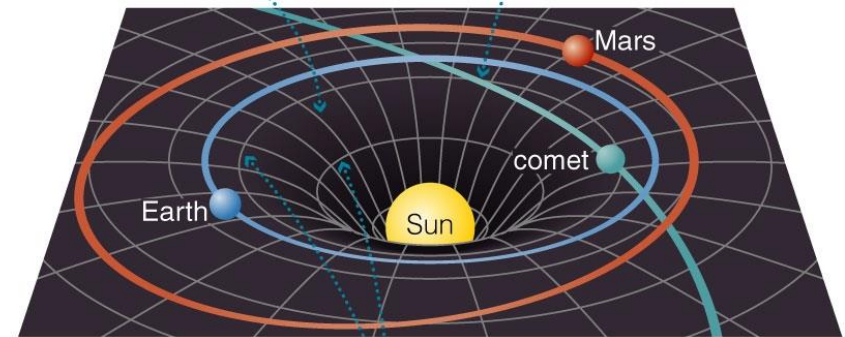
Campos gravitatorios estáticos corresponden en relatividad general a una curvatura del espacio-tiempo.

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 Gravitatoria.

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

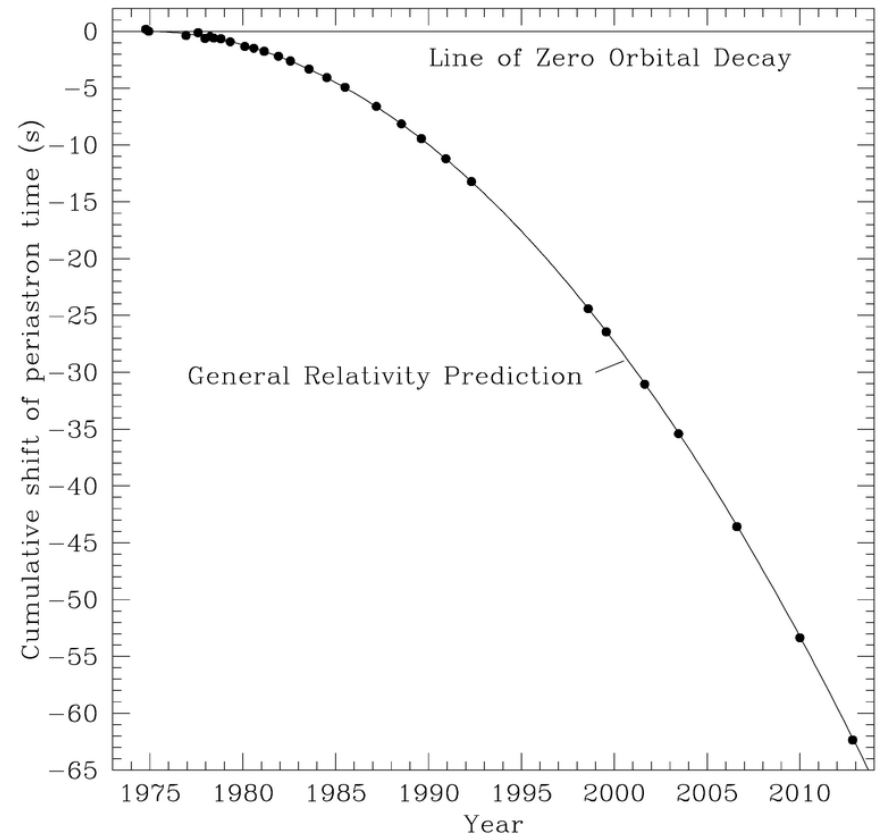
$m_1 = 1.440$ masas solares

$m_2 = 1.389$ 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)

La onda gravitatoria, h , está caracterizada por una frecuencia

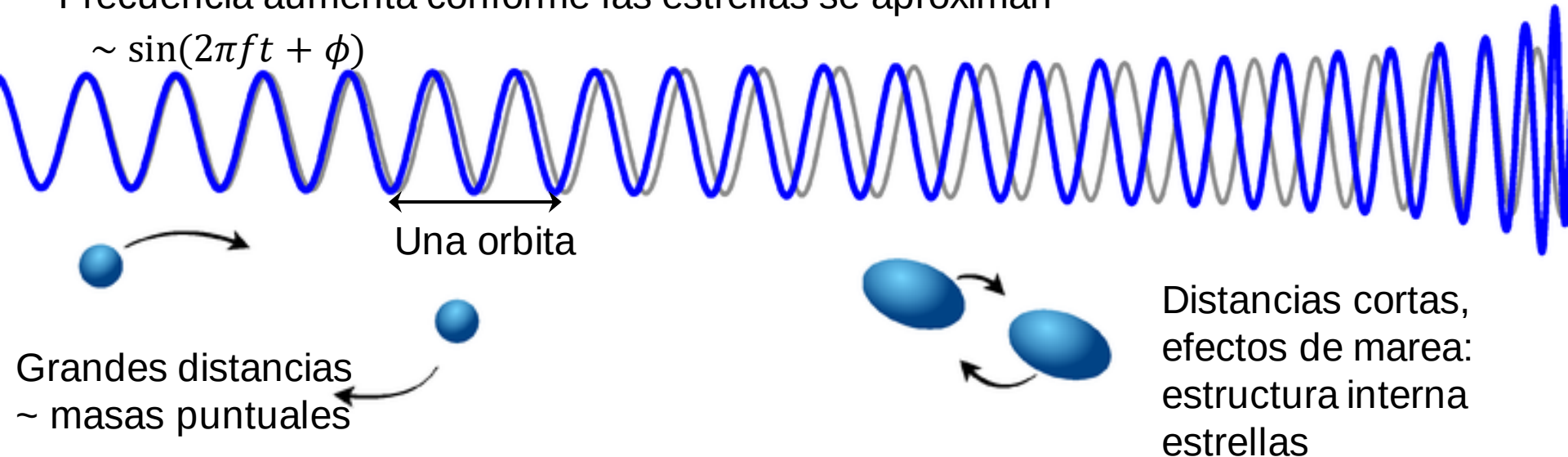
$$f = 2f_{orb} = 2/P, \quad h \sim \sin(2\pi ft + \phi)$$

Para estrellas puntuales (distancia mayor que el radio)

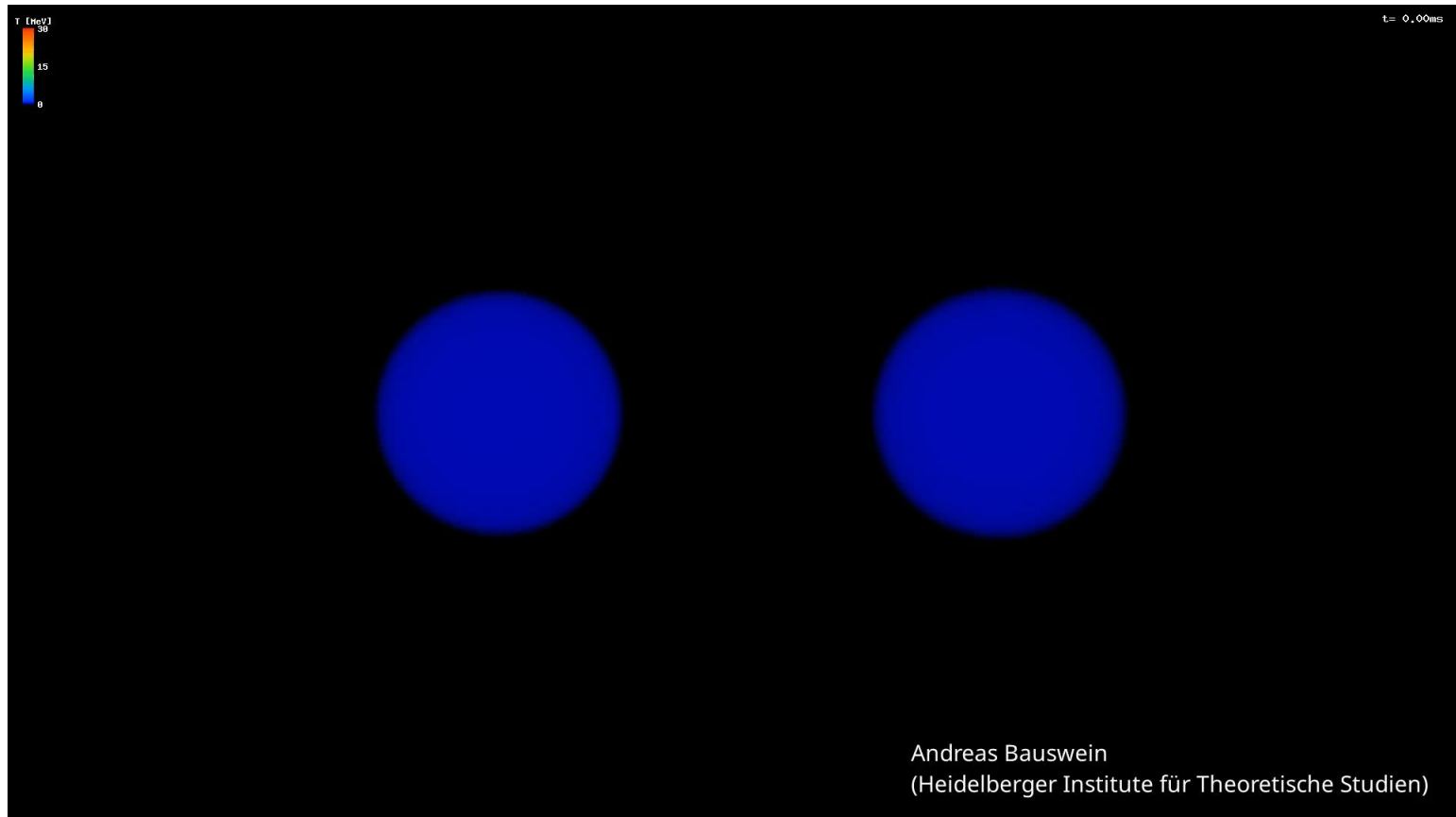
$$f^{-8/3} = \frac{(8\pi)^{8/3}}{5} \left(\frac{G\mathcal{M}}{c^3} \right)^{5/3} (t_c - t),$$

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



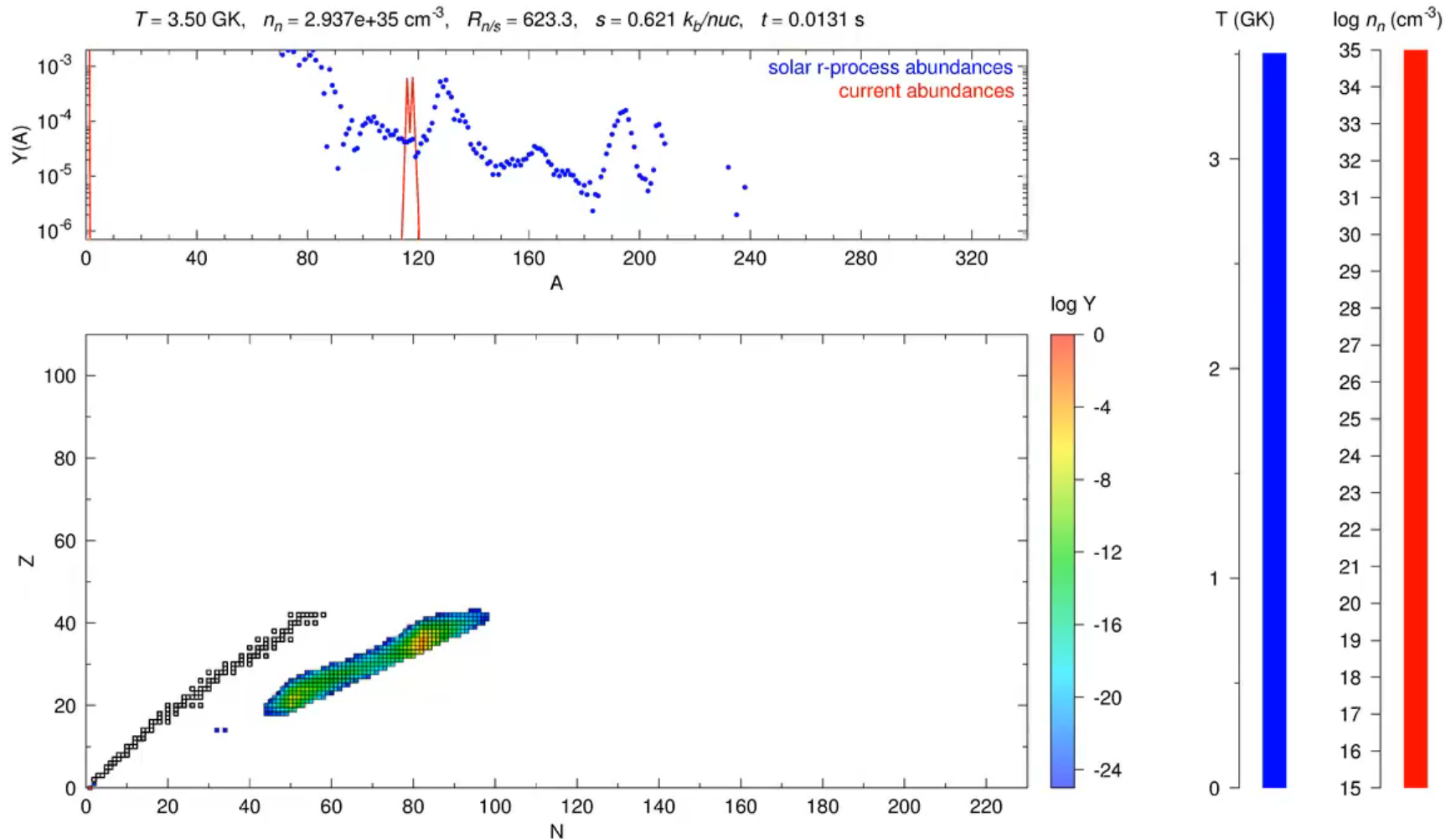
Dos fuentes de eyección:

- 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

Proceso r en la materia eyectada

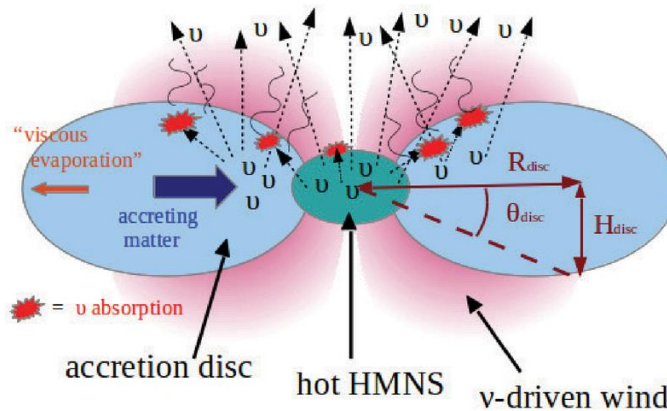
Materia eyectada contiene gran cantidad de neutrones



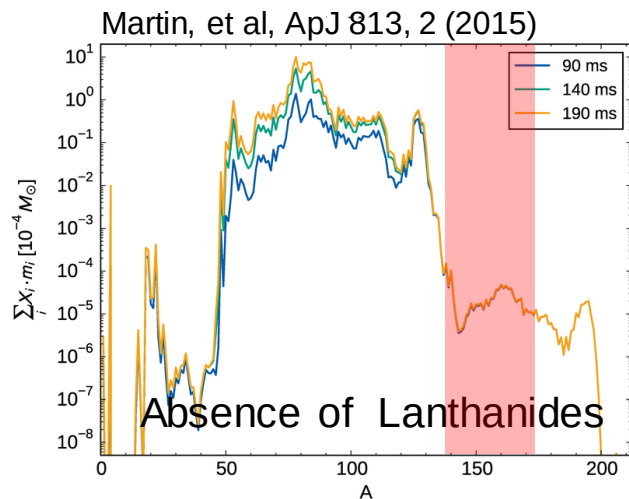
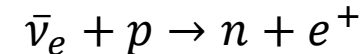
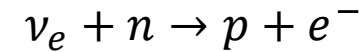
Decaimiento radioactivo produce energía

Influencia del objeto central

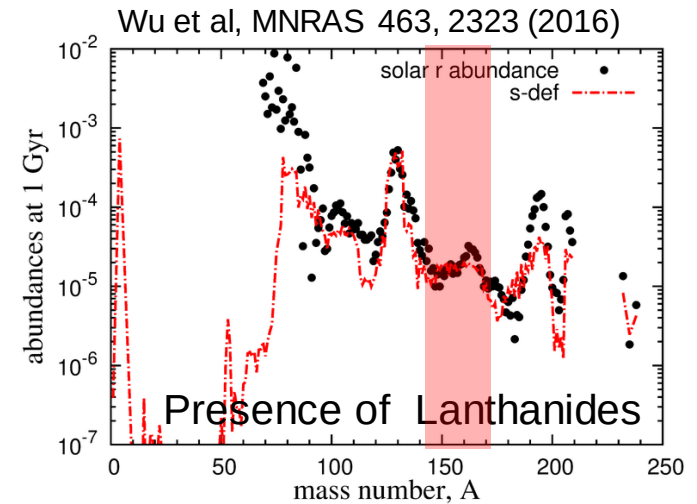
Después de la colisión se forma una estrella de neutrones hipermasiva que es estable debido a rotación antes de colapsar a un agujero negro.



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

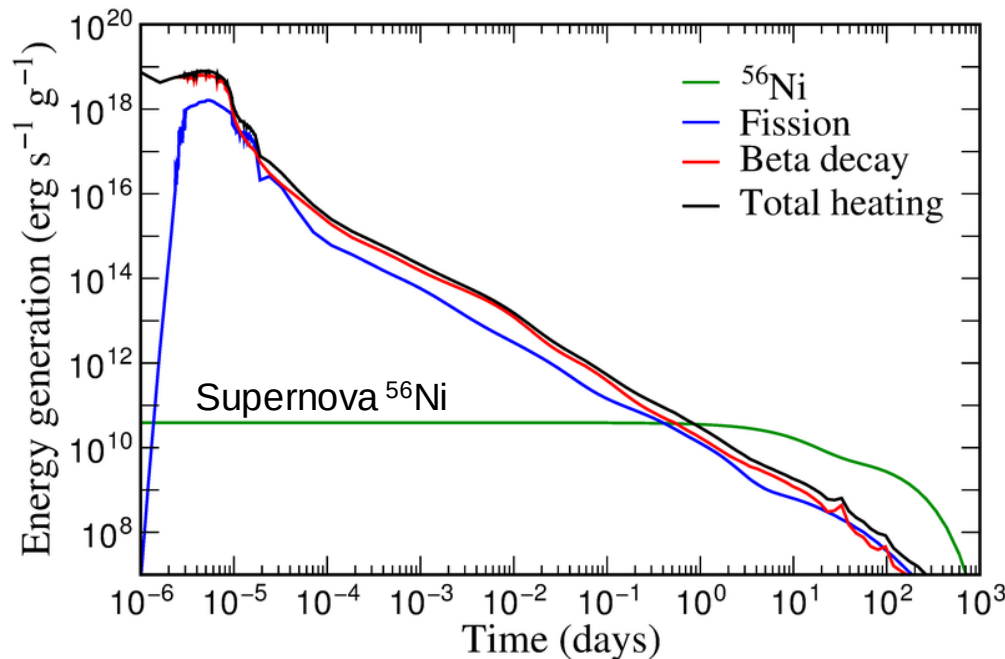


Una vez que la estrella colapsa a un agujero negro la emisión de neutrinos cesa y la razón entre neutrones y protones aumenta.



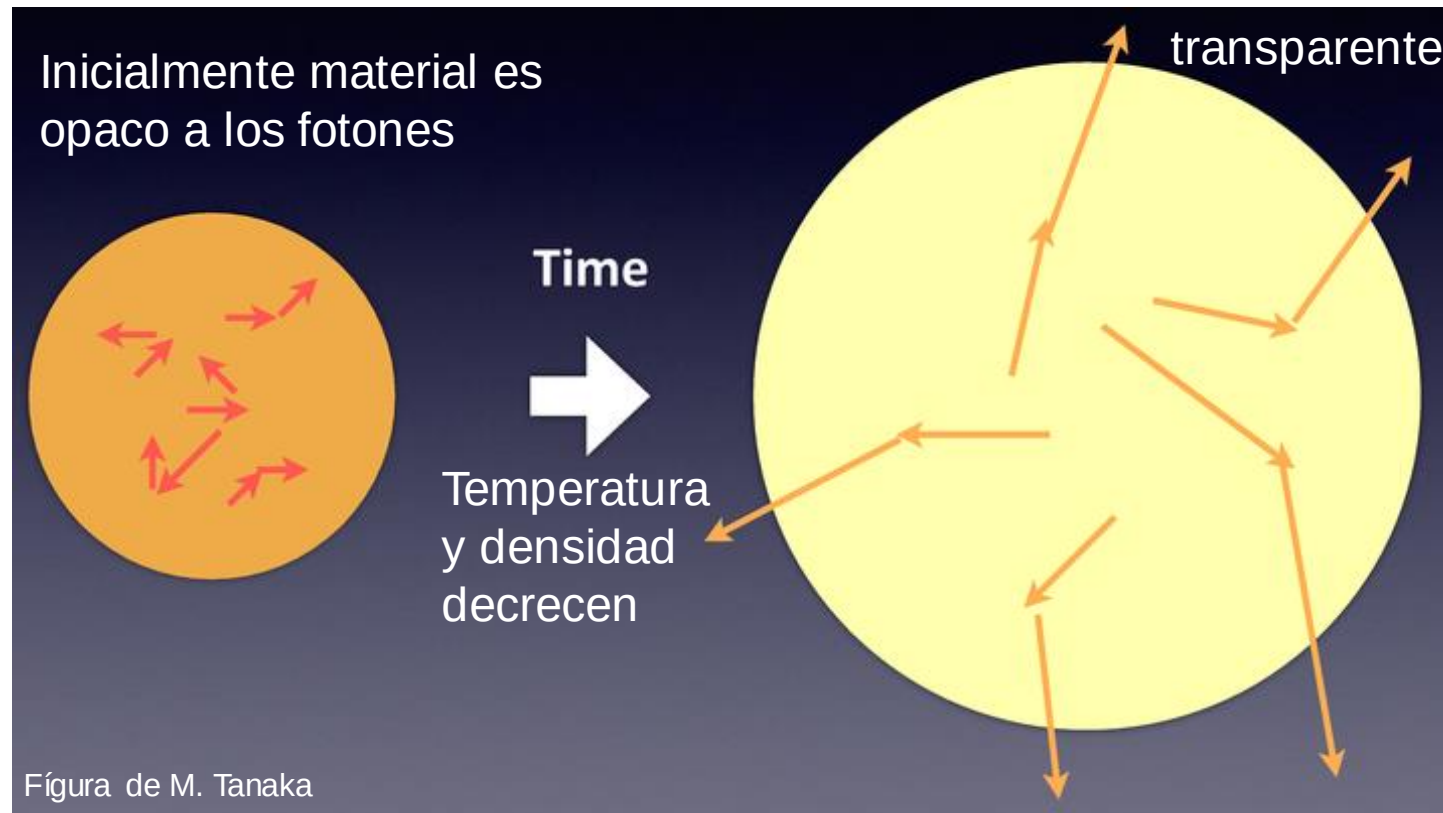
Producción de energía por el proceso r

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)

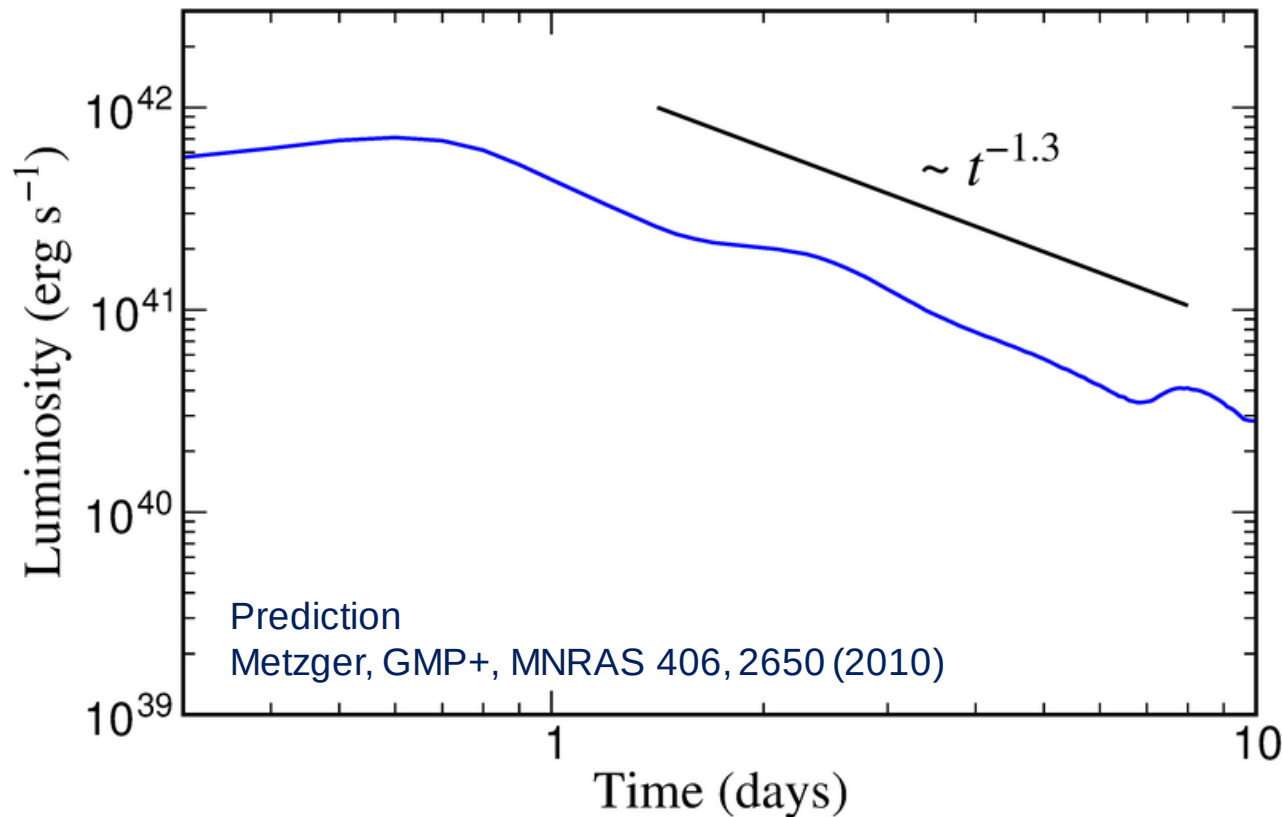


Transición de opaco a transparente depende de la probabilidad de interacción de los fotones (opacidad). Depende de la estructura de los átomos, presencia de Lantánidos/Actínidos.

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)

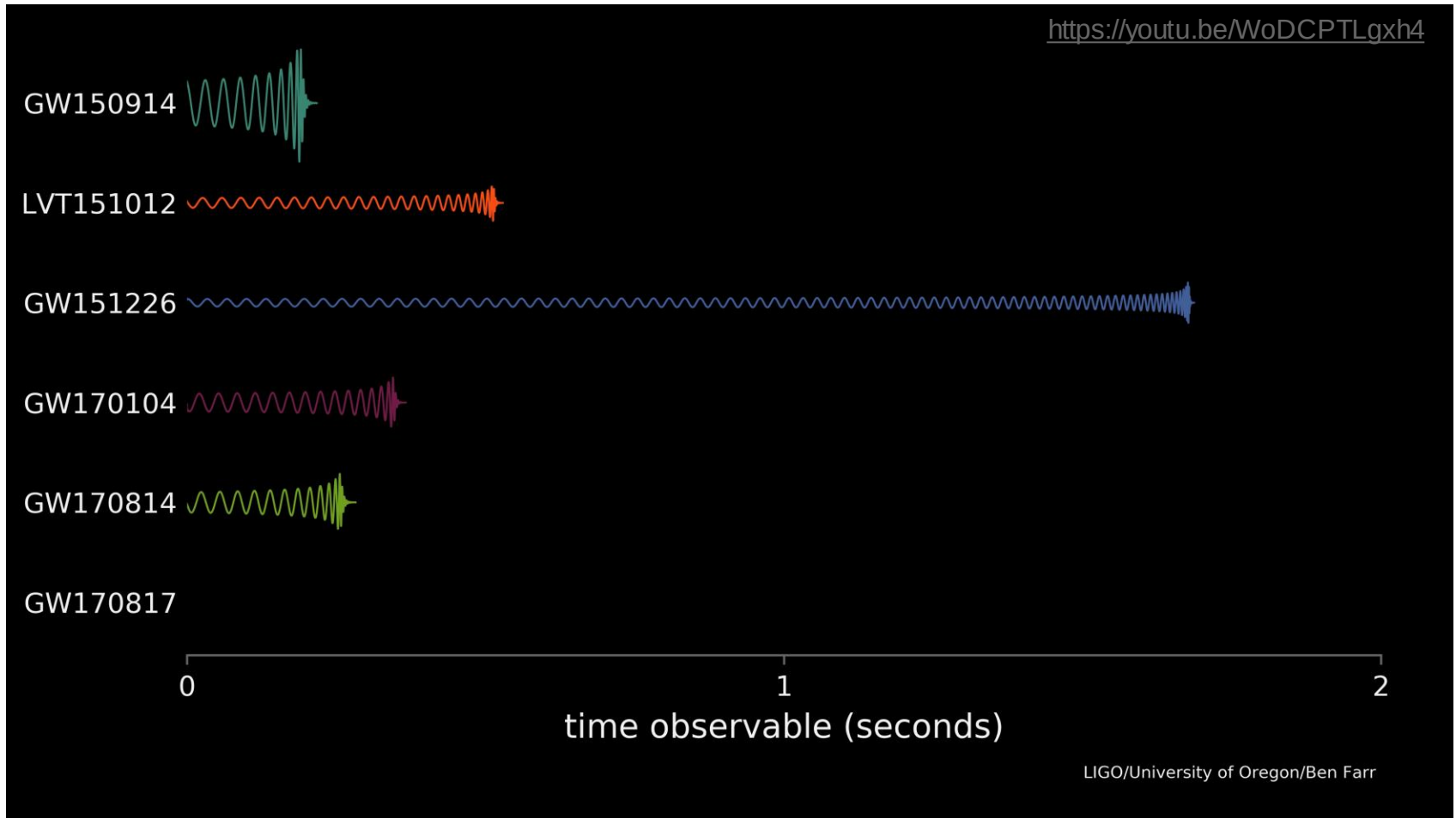
Kilonova: señal electromagnética del proceso r



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

GW170817

Ondas gravitatorias

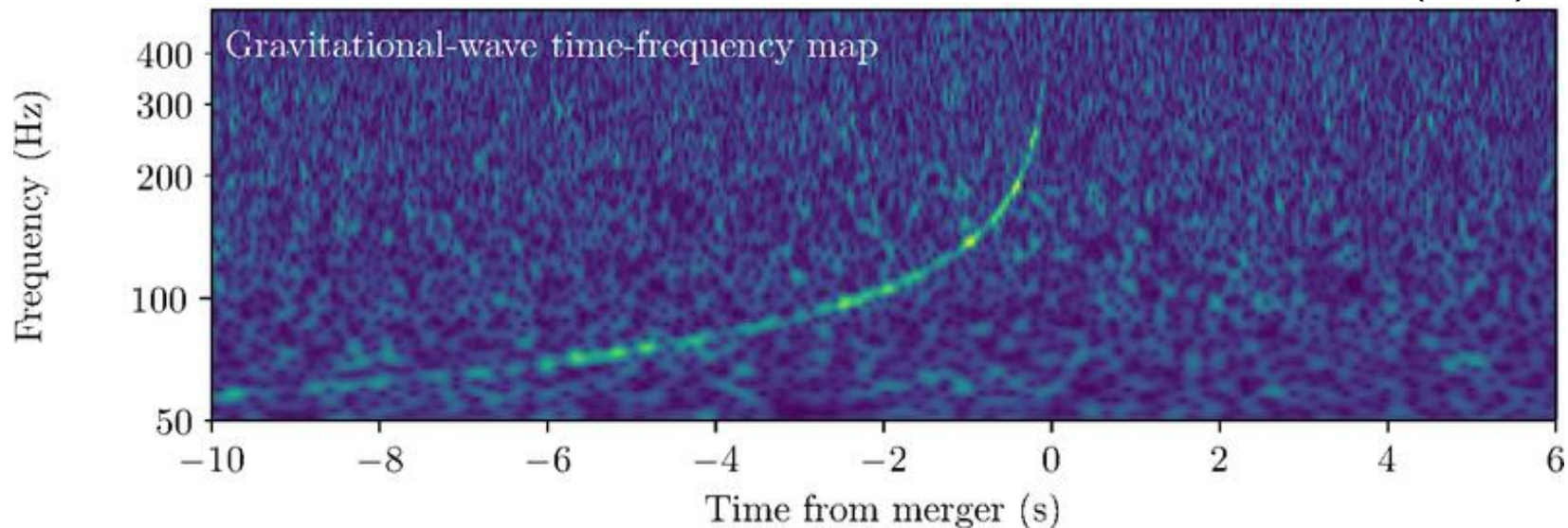


Más de mil orbitas observadas

GW170817: primera detección de ondas gravitatorias colisión estrellas de neutrones

El 17 agosto 2017, 12:41:04 UTC LIGO y Virgo detectaron la primera señal gravitatoria 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: $m_2 \in (1.17-1.36) M_{\odot}$

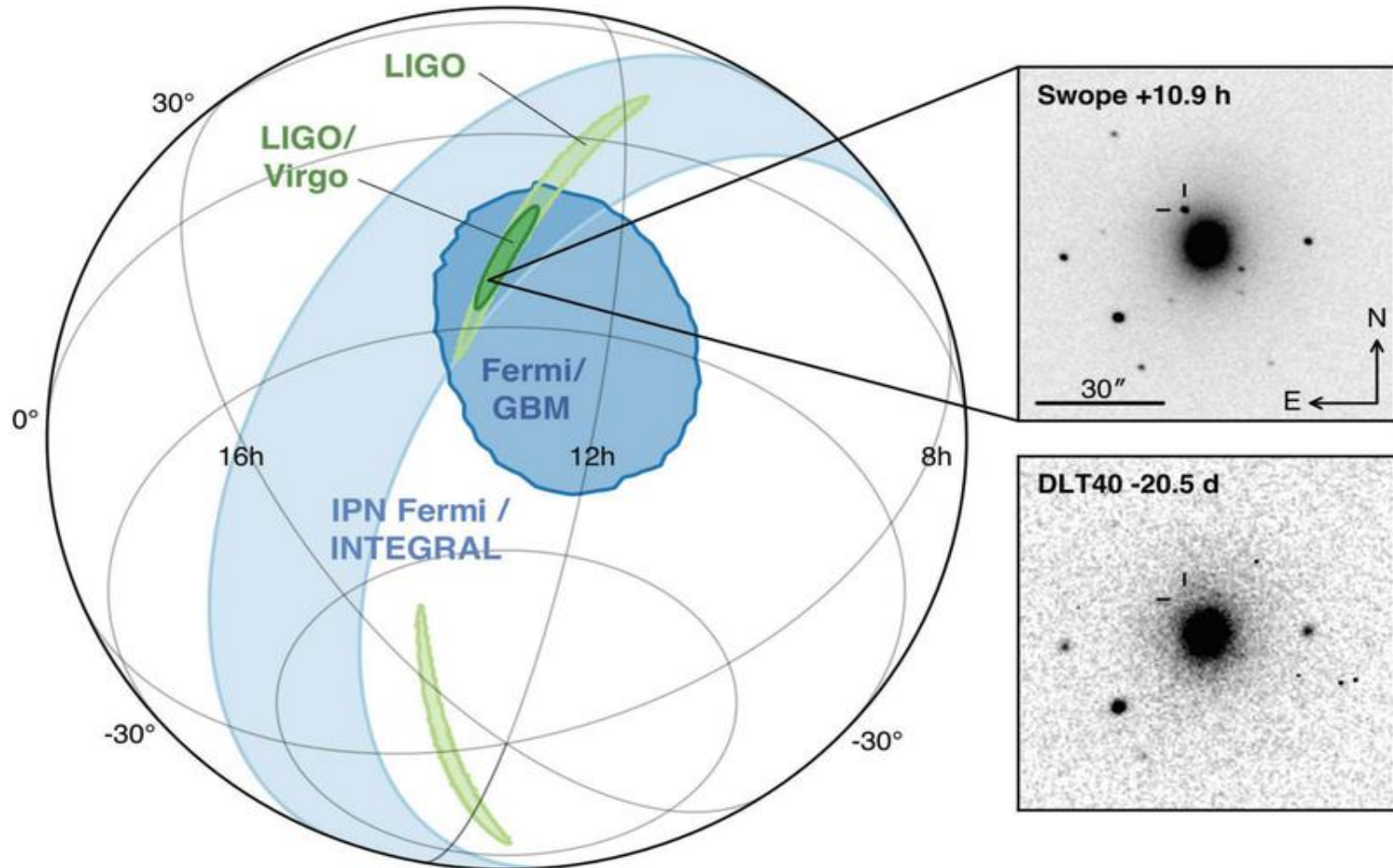
Distancia: 40^{+8}_{-14} Mpc (130 millones de años luz)

Radio: 8.9-13.2 km

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

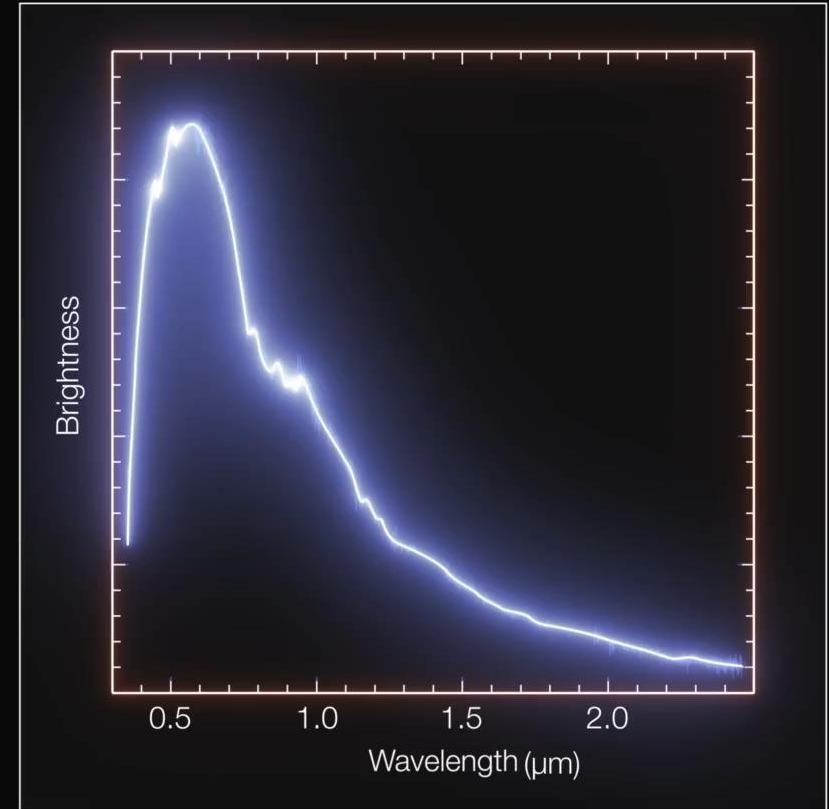
Kilonova identificada

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



Curva de luz y espectro

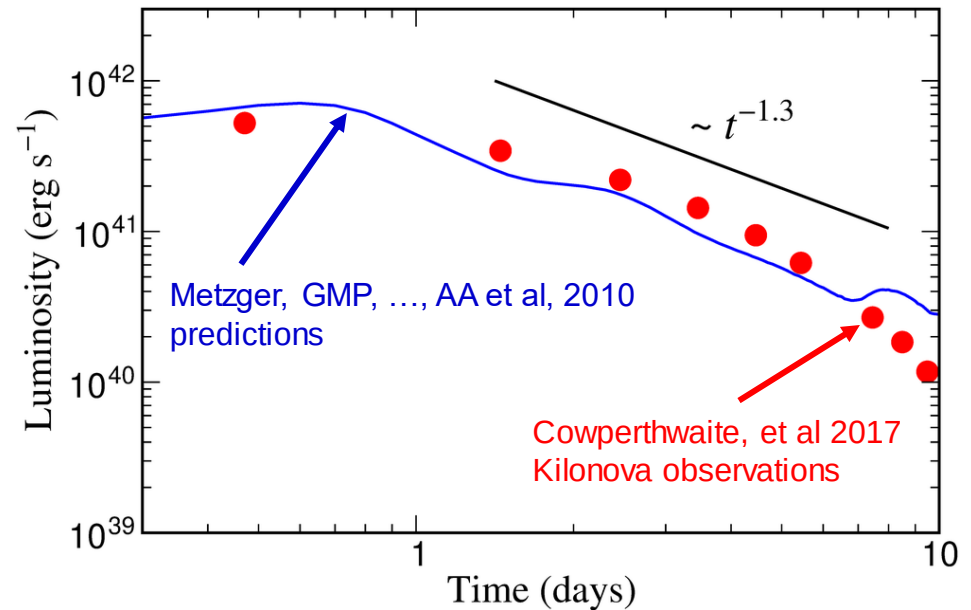
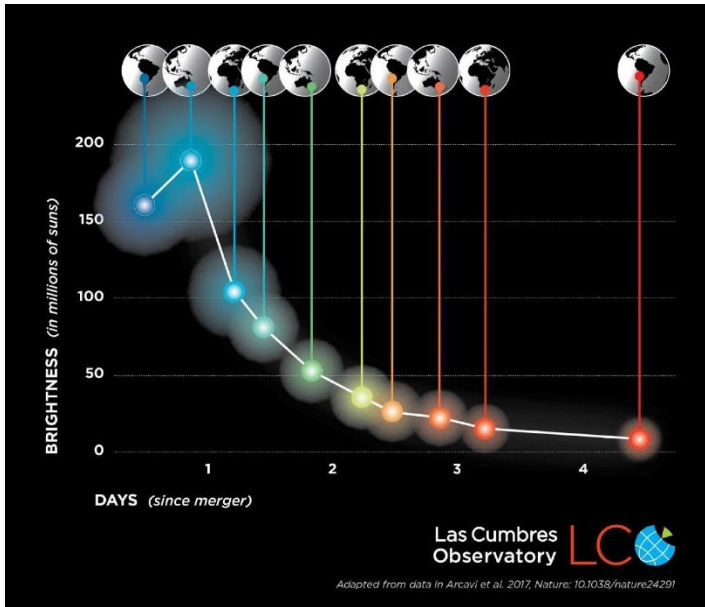
<https://youtu.be/kZiCKULA2cE>



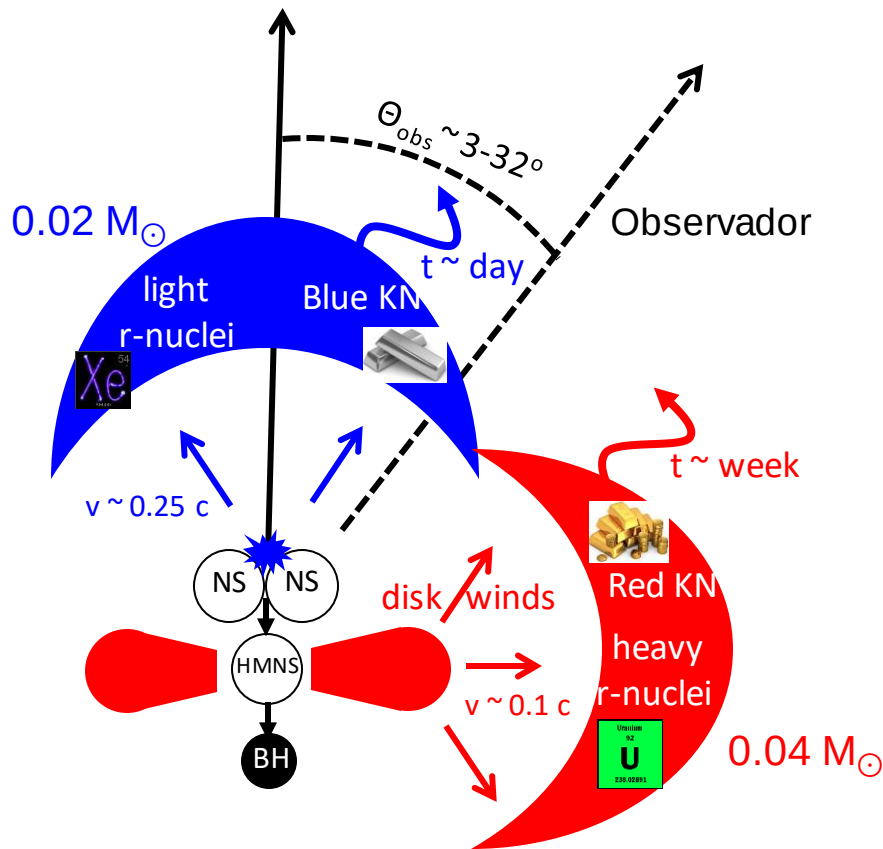
Time: +1.5 days

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

Kilonova: señal electromagnética 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

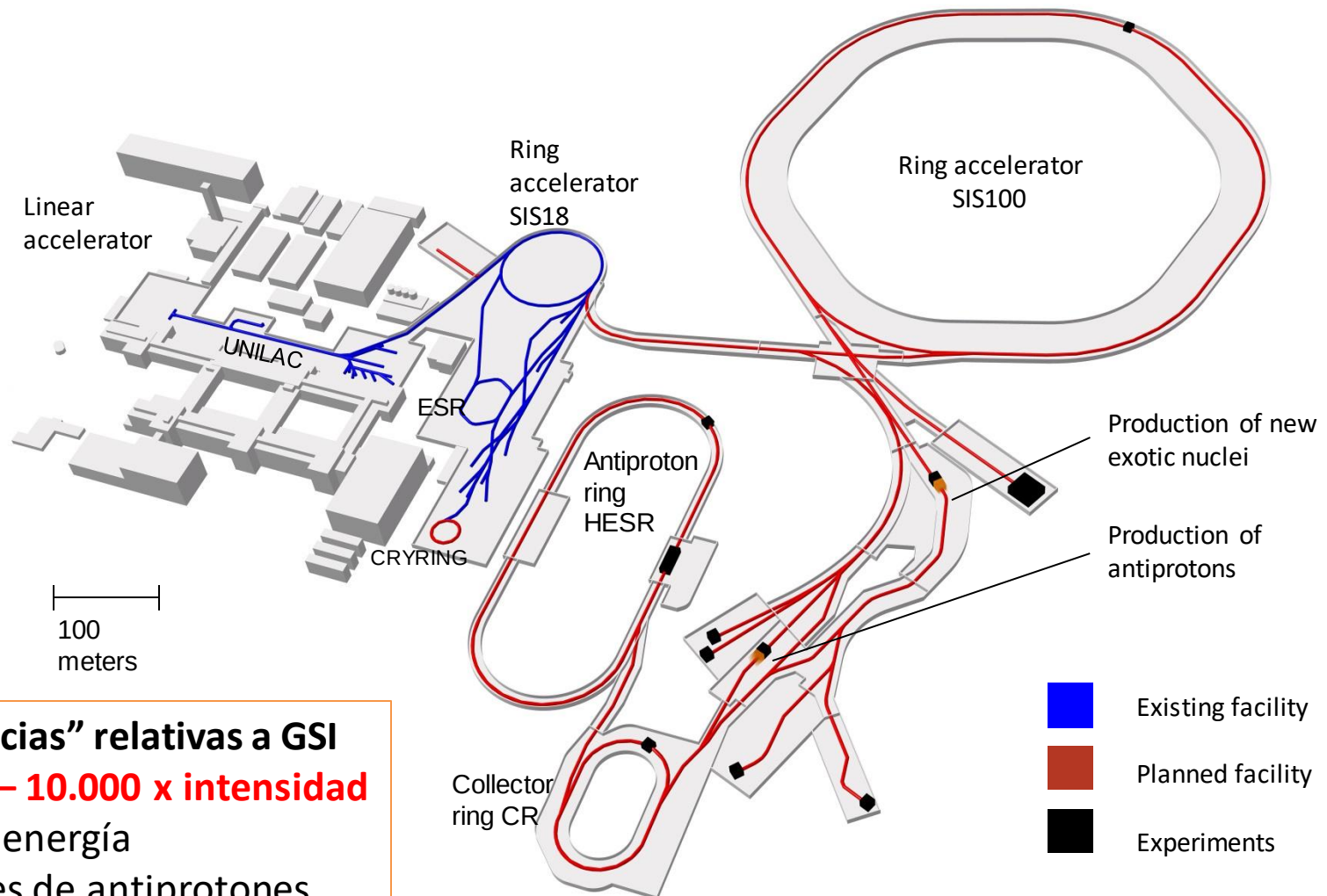
Figura de B. Metzger

- 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: variabilidad dependiendo del punto de observación. Evidencia directa de la producción de elementos particulares.
- 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



- FAIR gobernada por una convención internacional
 - 9 miembros + 1 asociado (naranja)
- Involucra a científicos de todo el mundo
 - Mas de 200 instituciones de 53 países (naranja y azul)



¡Gracias!