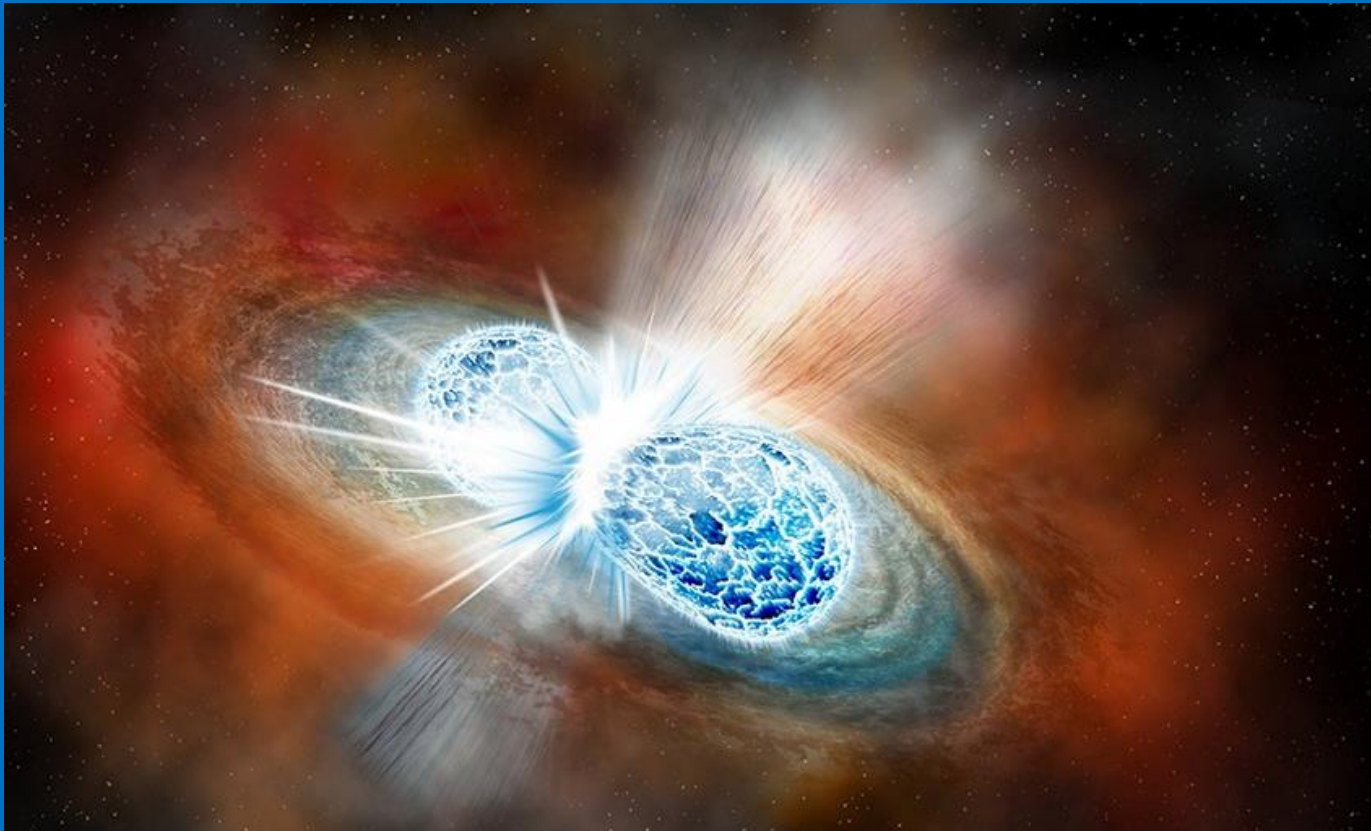


Origine degli elementi pesanti nell'Universo: prime evidenze nell'evento di neutron star merger GW170817 (parte II)

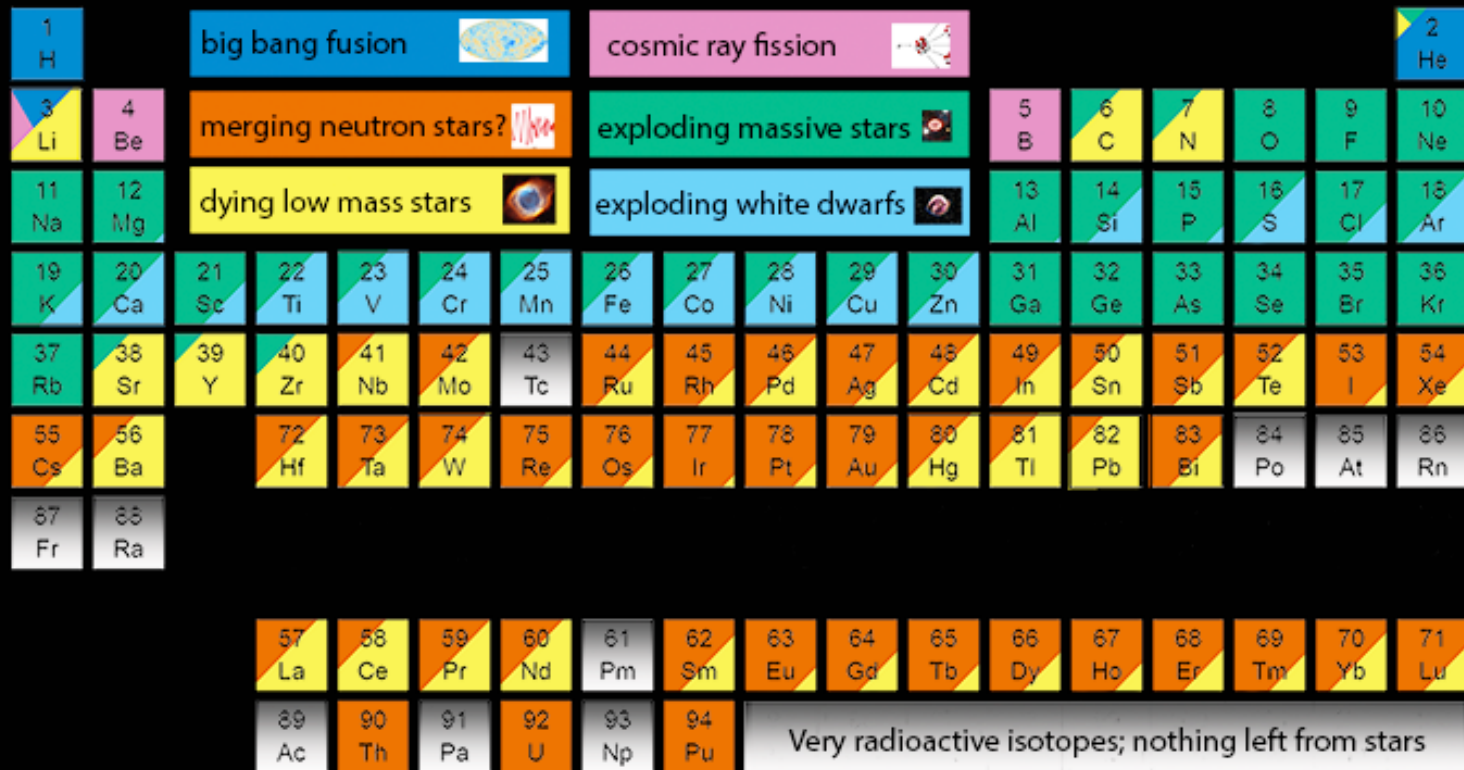


Sergio Cristallo

INAF- Osservatorio Astronomico d'Abruzzo
INFN – Sezione di Perugia

Astronomy Picture of the Day

The Origin of the Solar System Elements



Graphic created by Jennifer Johnson
<http://www.astronomy.ohio-state.edu/~jaj/nucleo/>

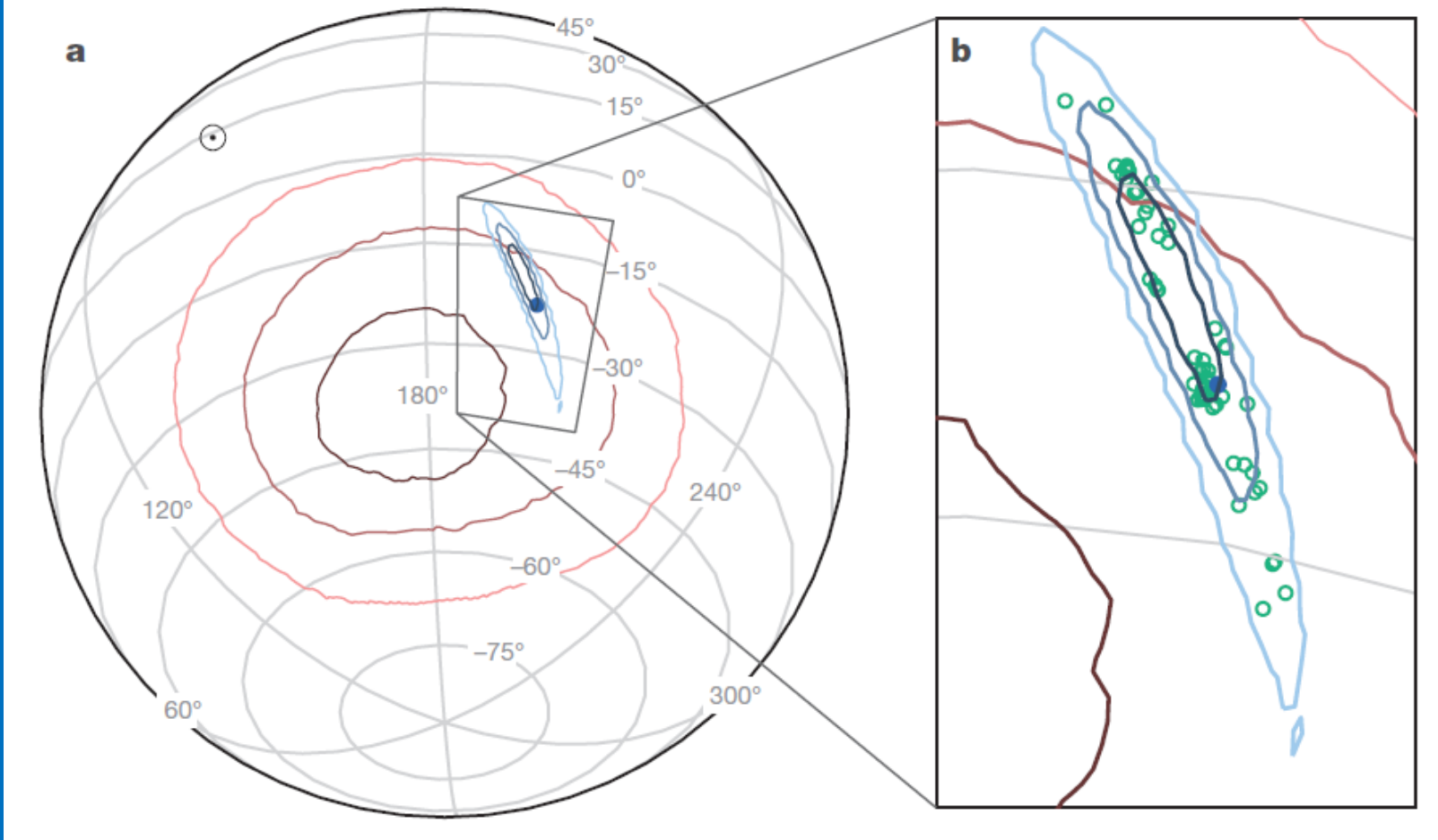
Astronomical Image Credits:
 ESA/NASA/AASNova

Where your elements come from

GW170817

Una rivoluzione paragonabile a quella galileiana

Arcavi+ 2017

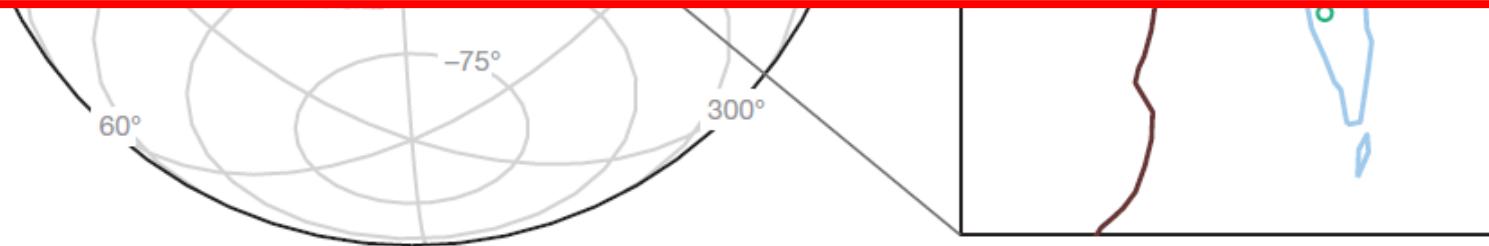
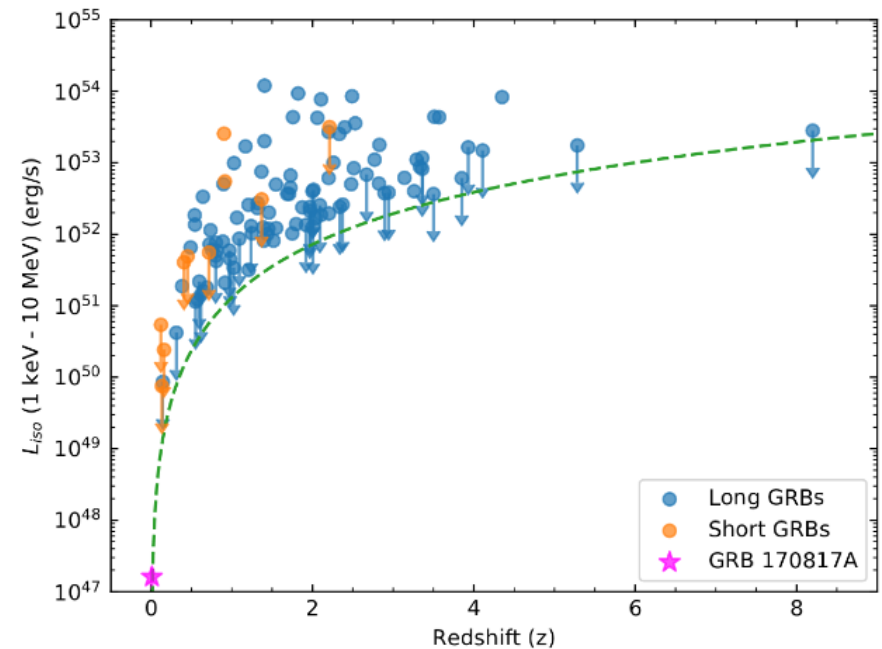
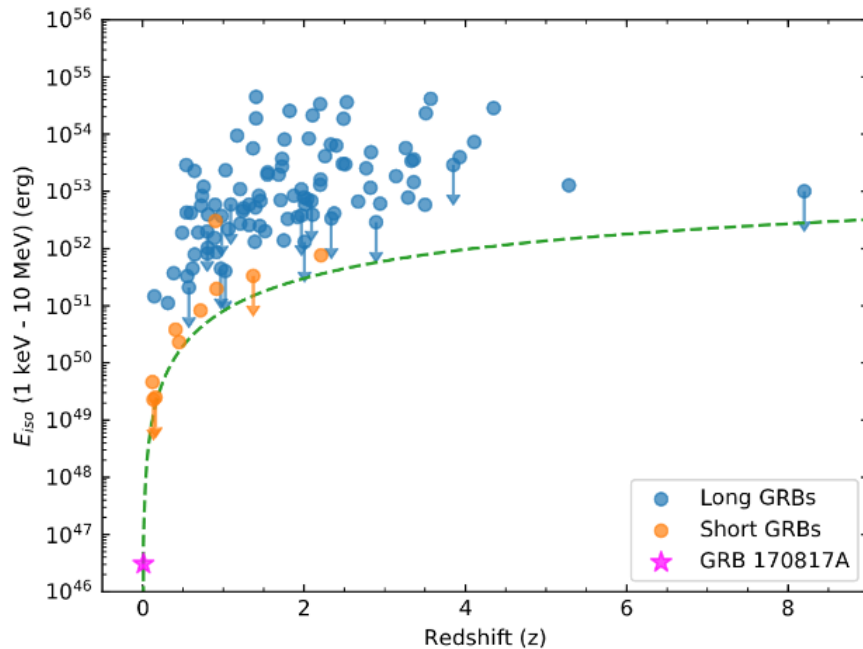


Galassia ospitante: NGC 4993 (distanza ≈ 44 Mpc)

GW170817

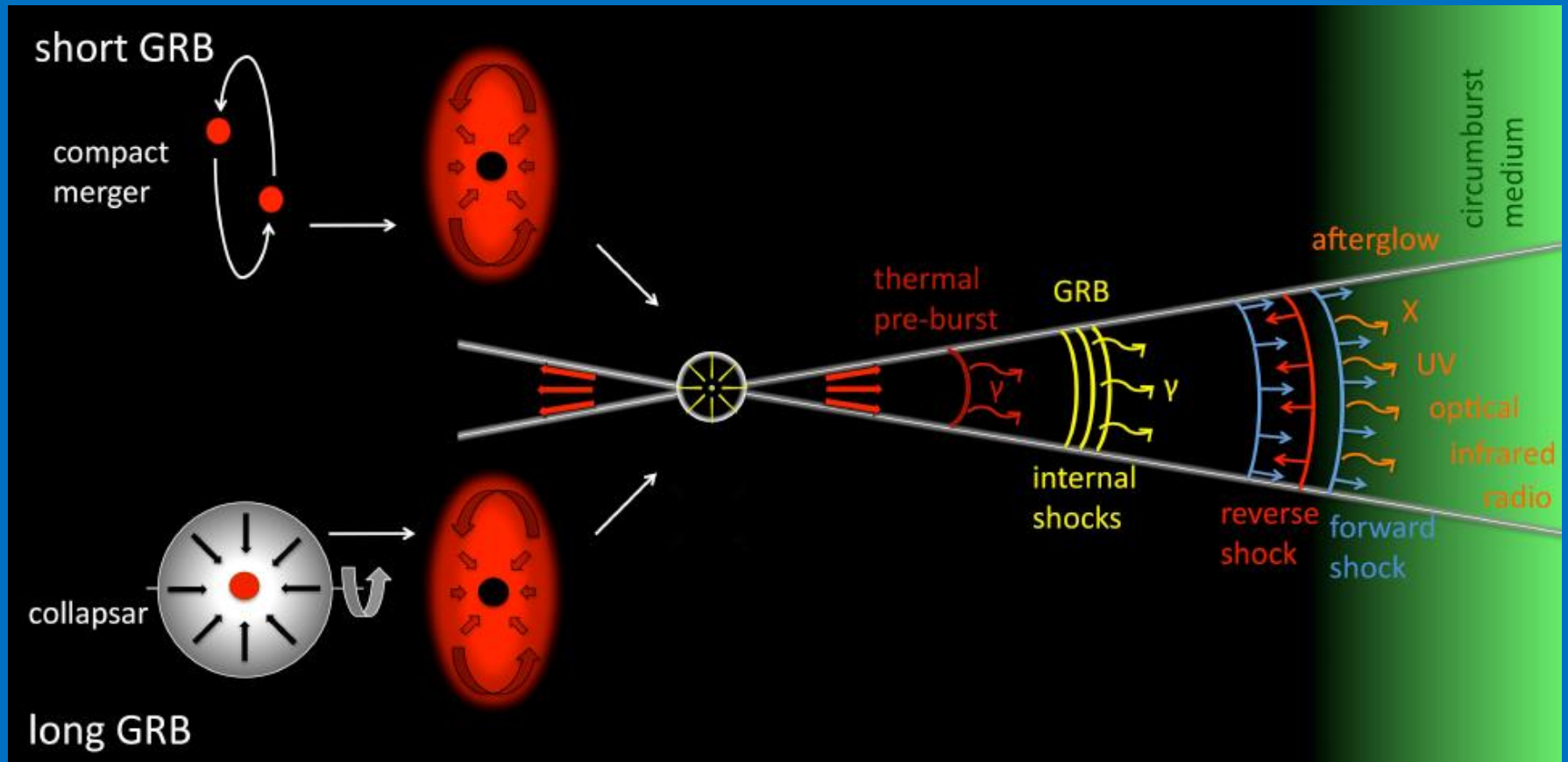
Una rivoluzione paragonabile a quella galileiana

Arcavi+ 2017



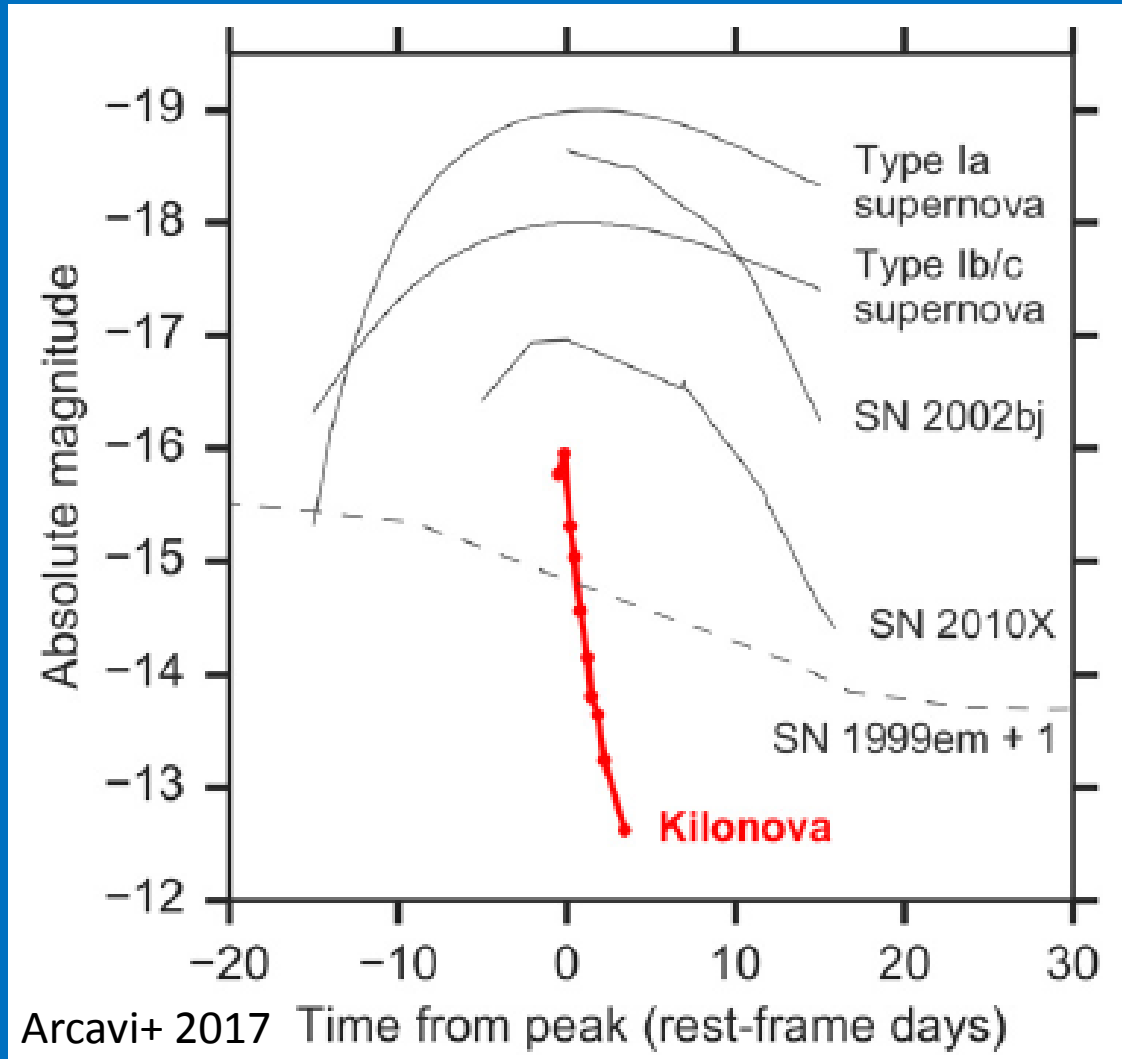
Galassia ospitante: NGC 4993 (distanza ≈ 44 Mpc)

Le fasi di un NS-NS merger



Perchè non potrebbe essere una Supernova?

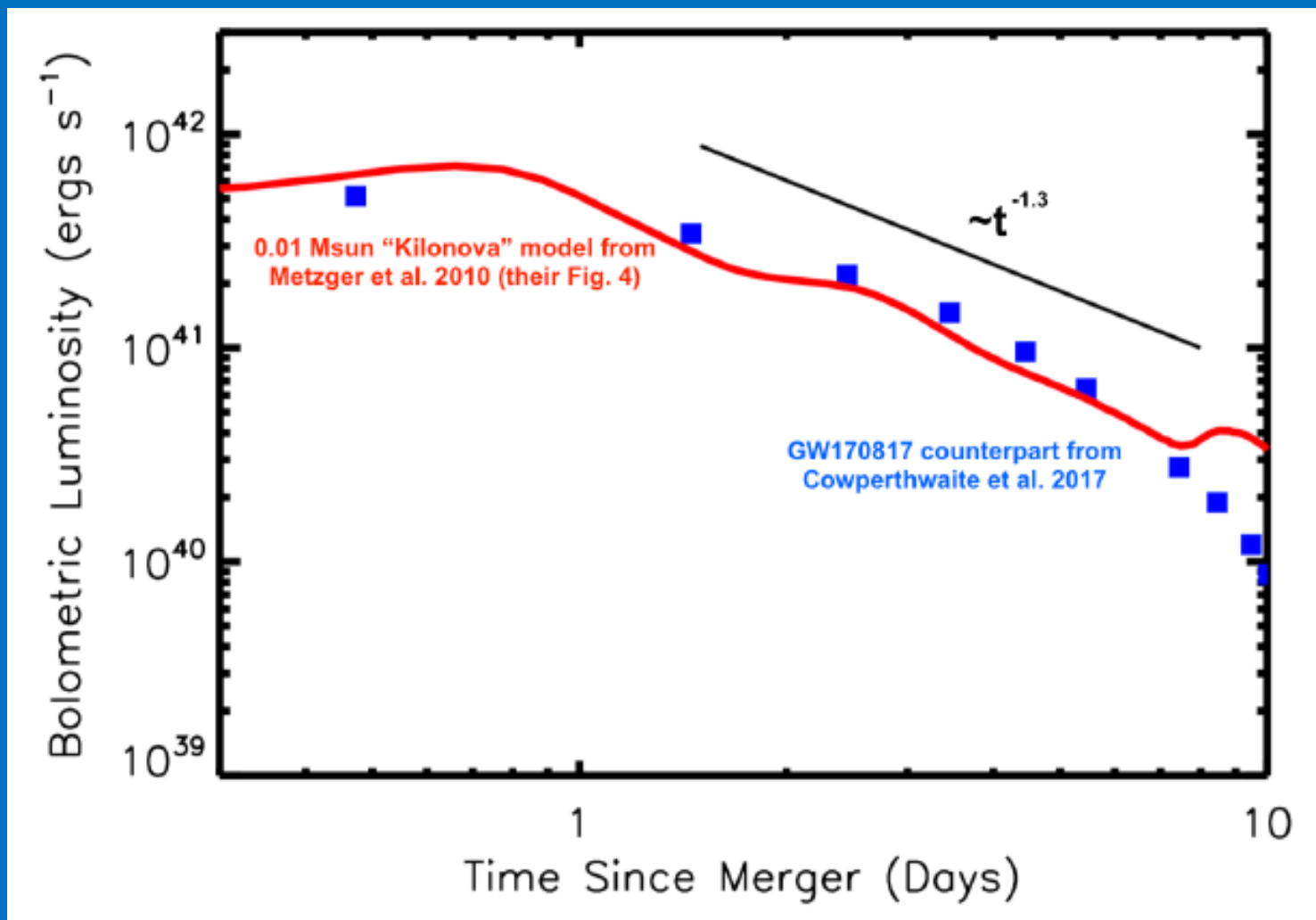
$M_{\text{SUN}} \sim +4.5$
 $M_{\text{VENUS}} \sim -4.5$



Banda
Ottica (filtro r)

Sono due cose completamente distinte!!!!

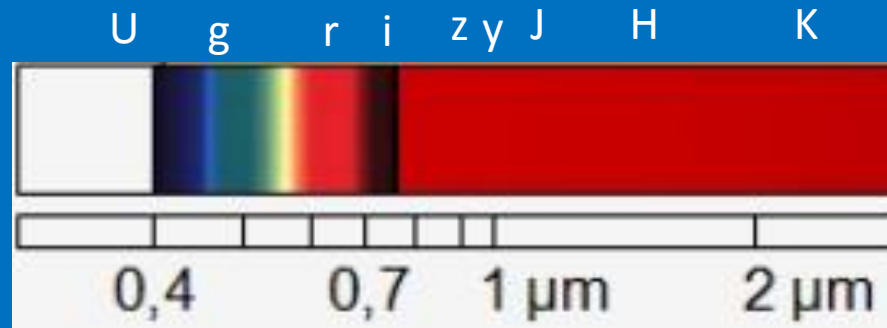
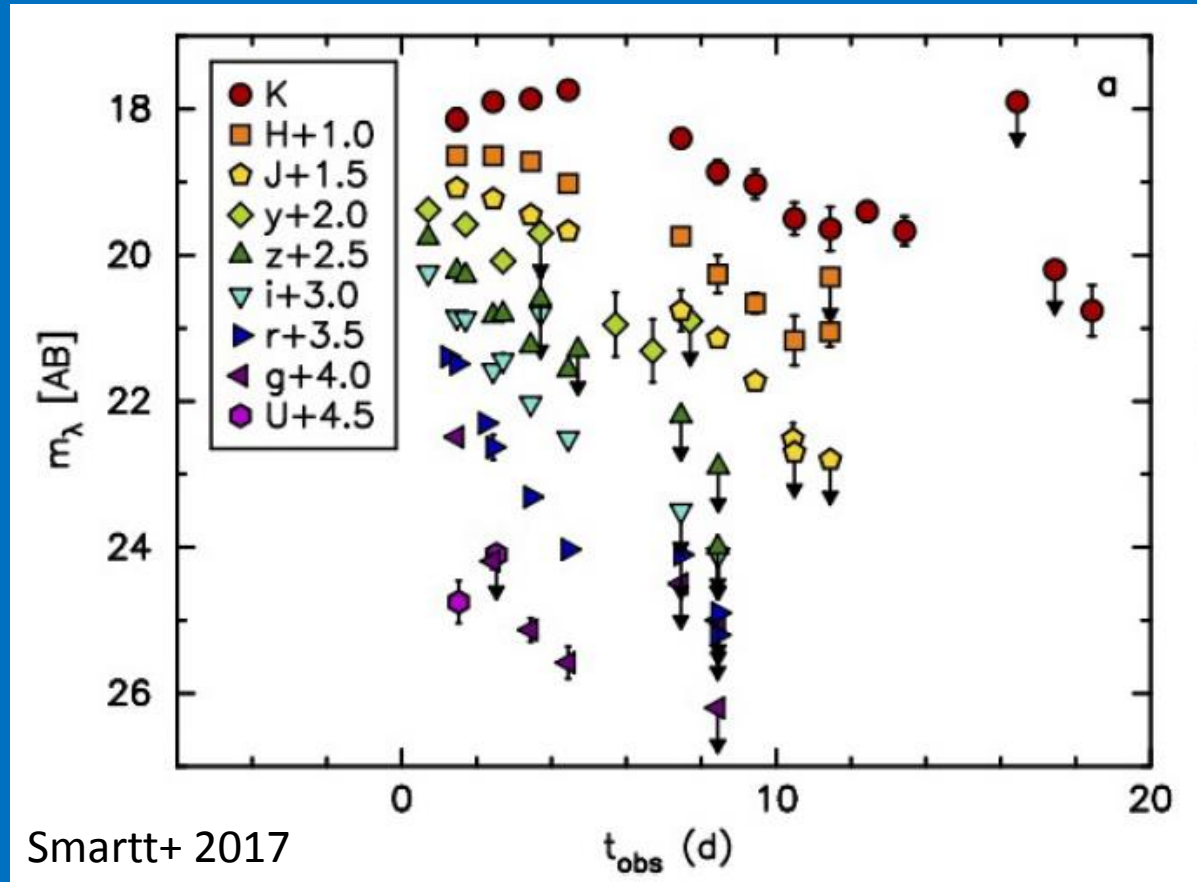
Curva bolometrica di GW170817



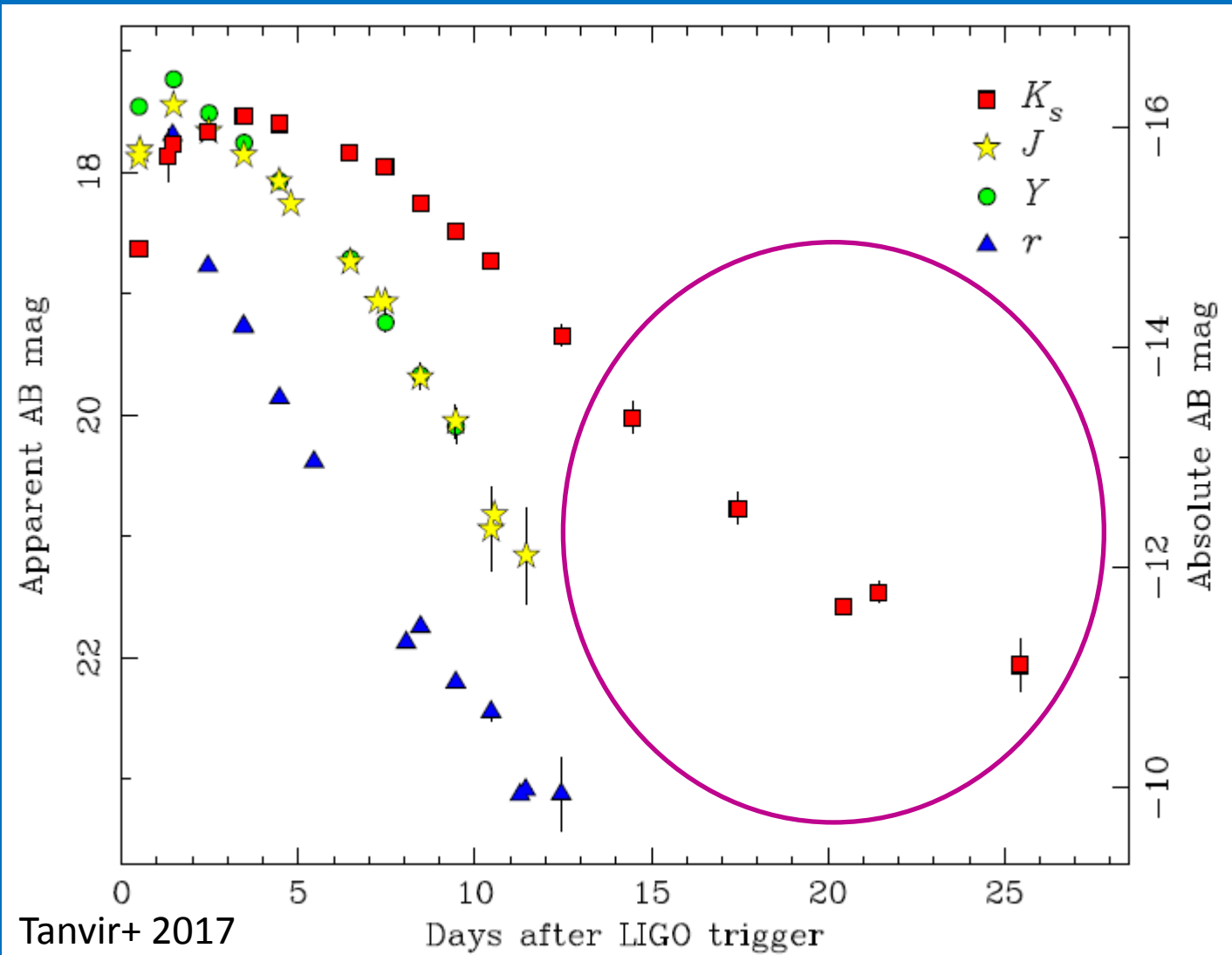
Tiene conto dell'energia emessa a tutte le lunghezze d'onda

Osservazioni a diverse bande spettrali

U = 365 nm
g = 477 nm
r = 623 nm
i = 762 nm
z = 913 nm
y = 1005 nm
J = 1220 nm
H = 1630 nm
K = 2190 nm



Reddening di GW170817



Equazione del Trasferimento Radiativo

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = S_\nu - I_\nu$$

Intensità della
radiazione

Profondità ottica

Funzione sorgente

(rapporto tra emissività ed assorbimento)

$$\tau_\nu(D) = \int_0^D \alpha_\nu(s) ds$$

$$\alpha_\nu = \kappa_\nu \rho$$

κ_ν è l'opacità del materiale

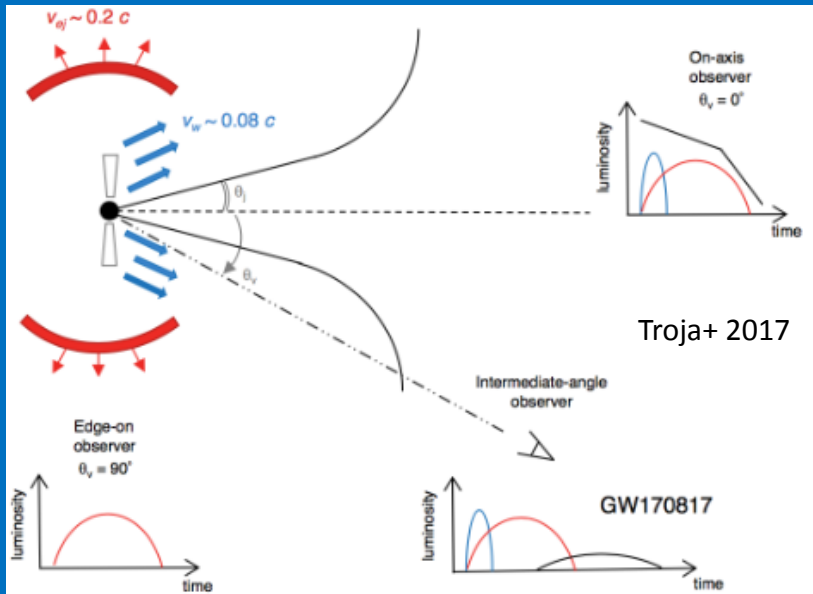
Come è avvenuto il merger?

$$Y_e = \sum \frac{X_i Z_i}{A_i}$$

Jet ejection

$$Y_e \approx 0,25$$

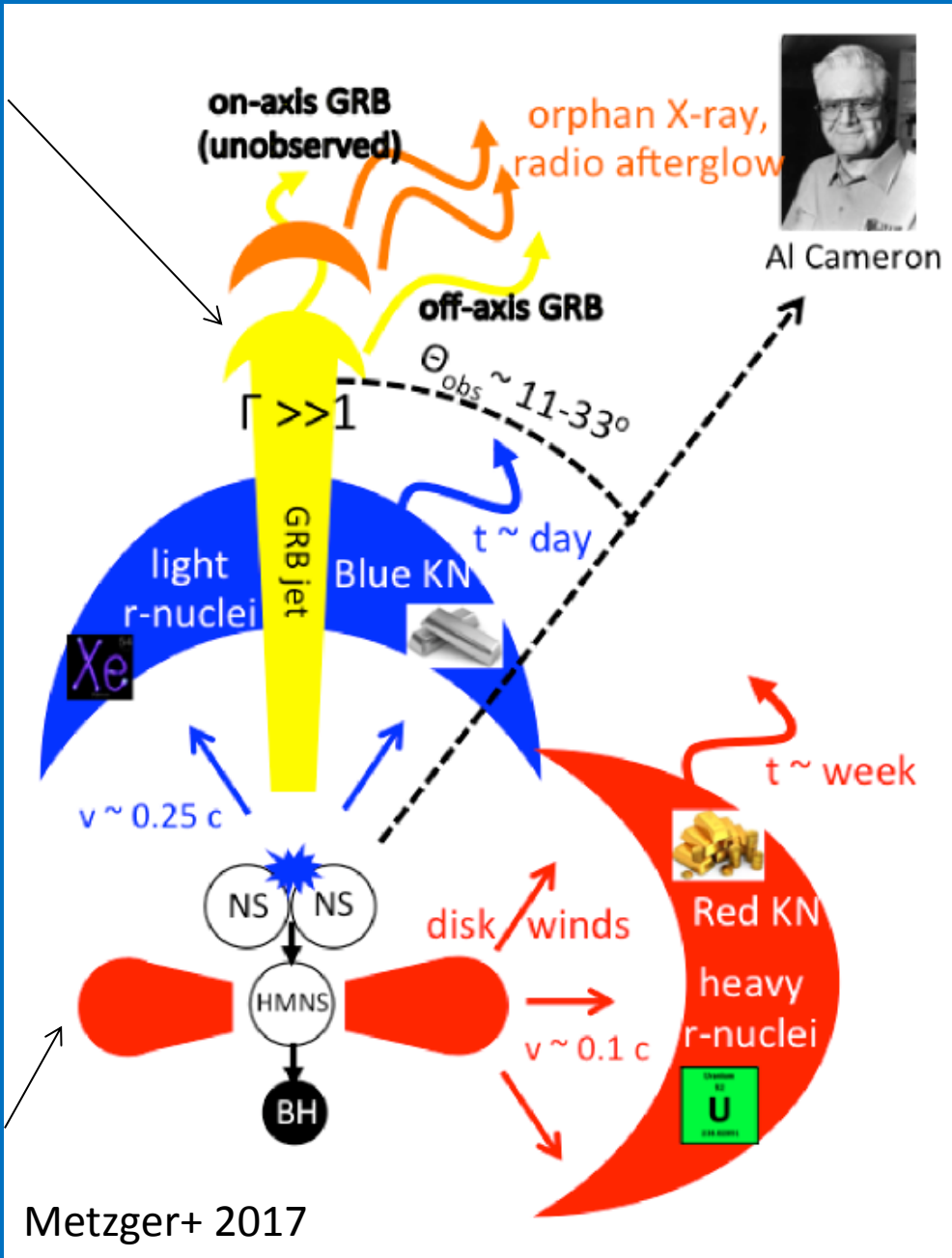
Riscaldamento da shock e irradiazione neutrिनica



L'emissione X osservata è postluminiscenza da sincrotrone (afterglow radiation) dovuta allo short γ -ray burst

Tidal mass ejection

$$Y_e \approx 0,1$$



UN PO' DI FISICA

1. ESPANSIONE ADIABATICA: gran parte del riscaldamento iniziale (così come il calore dallo stesso merger) è perso adiabaticamente perché il materiale è altamente opaco. La pressione compie lavoro per espandere e, di conseguenza, l'energia interna viene convertita in energia cinetica. Questa fase avviene PRIMA che parta il processo r:

$$TV^{\gamma-1} = \text{cost}$$

$$\gamma = C_P / C_V$$

2. Un segnale elettromagnetico (EM) significativo è possibile solo quando la densità è scesa abbastanza affinché i fotoni possano sfuggire dal materiale. Il picco di emissione si raggiunge in un tempo:

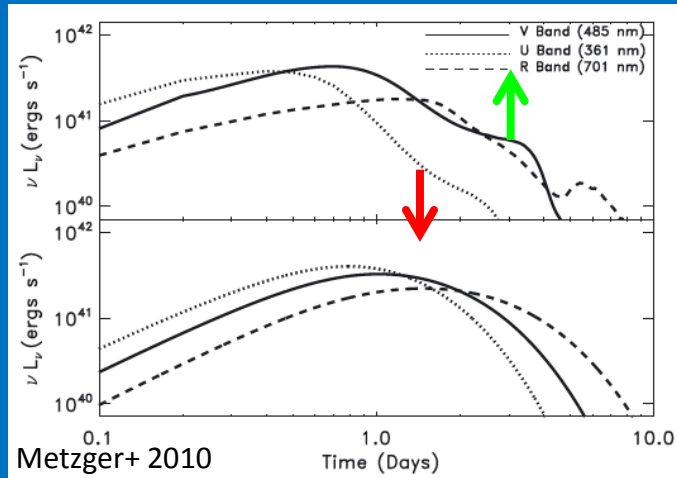
$$t_{\text{peak}} \approx 0.5 \text{ d} \left(\frac{v}{0.1c} \right)^{-1/2} \left(\frac{M_{\text{ej}}}{10^{-2} M_{\odot}} \right)^{1/2}$$

3. C'è però da considerare l'apporto energetico dato dagli isotopi radioattivi creati dal processo r. Questi depositano energia (attraverso decadimenti β e prodotti di fissione) nel materiale in espansione, il quale a sua volta emette termicamente:

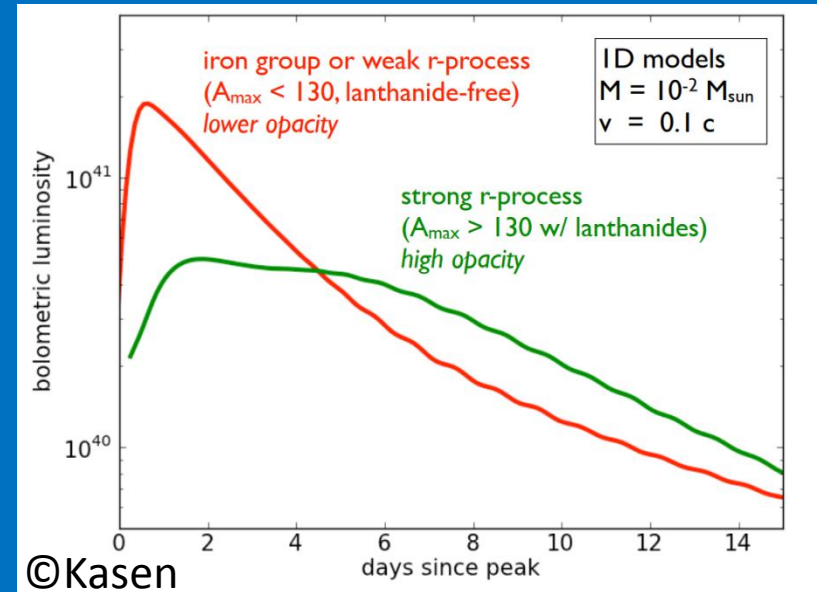
$$dQ/dt \approx t^{-\alpha} \quad \text{con } \alpha < 2$$

EFFETTO «COPERTA» DELLE LINEE SPETTRALI (LINE BLANKETING)

Lantanides opacity



Grey opacity



Line blanketing: processo per cui i fotoni assorbiti (che formao linee di assorbimento spettrali) vengono termalizzati e riemessi ad altre lunghezze d'onda, in particolare nel continuo (le linee si comportano come una "coperta" che causa il riscaldamento degli strati interni). L'energia del decadimento viene assorbita e riemessa così tante volte negli strati opachi ricchi di lantanidi da essere ridistribuita secondo uno spettro di corpo nero con picco nell'infrarosso.

SPEZZIAMO UNA LANCIA PER QUESTI POVERI BISTRATTATI TEORICI (DI OGNI GENERE)

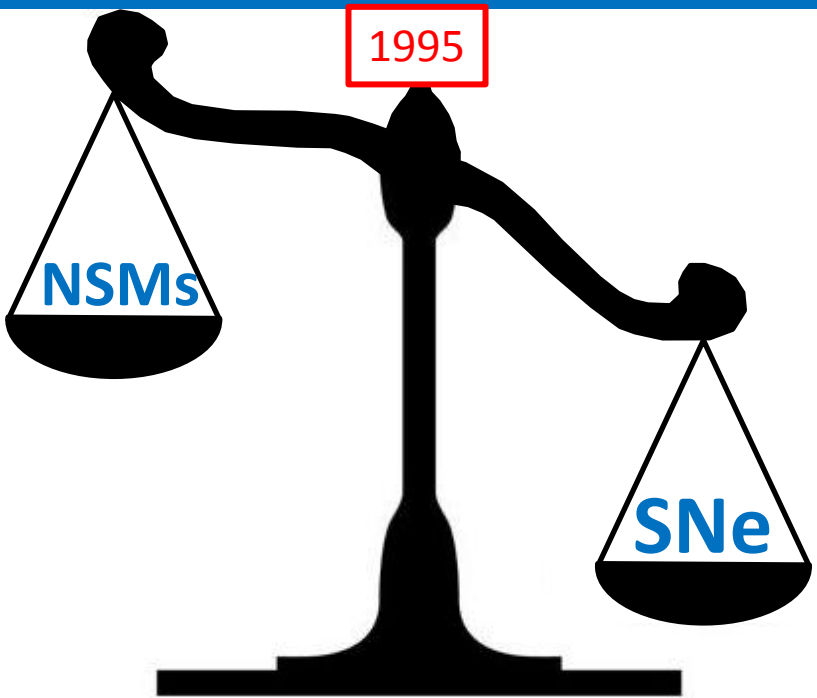
...This assumes that radioactive r-process transients exist and that we can find them. Admittedly, we test dangerous waters any time that, lacking observational input, we attempt to describe a new astrophysical phenomenon on purely theoretical grounds.

(METZGER+ 2010)

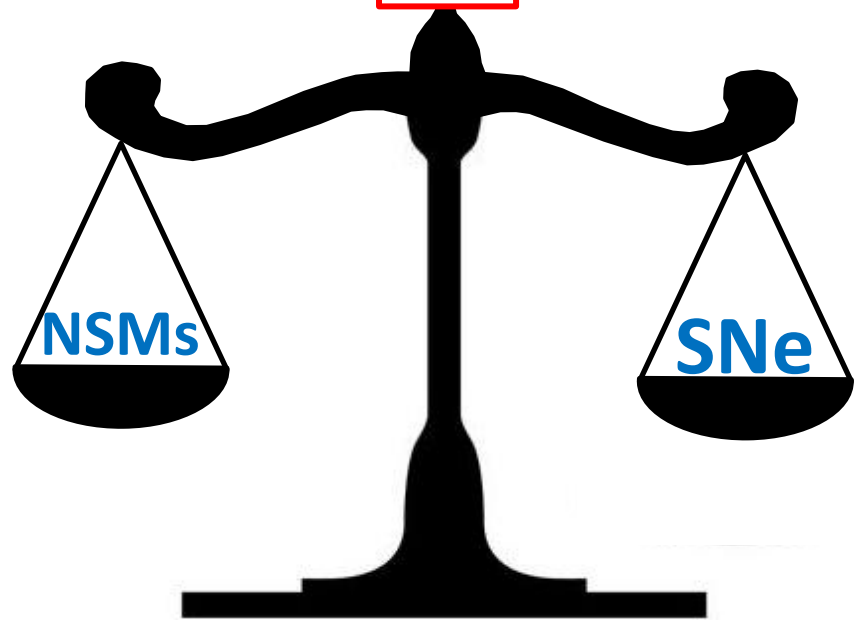
The situation here is a step more treacherous; not only must we rely on simulations of a complex macroscopic system, even the microscopic structures of our ions are model-based.

(KASEN+ 2003)

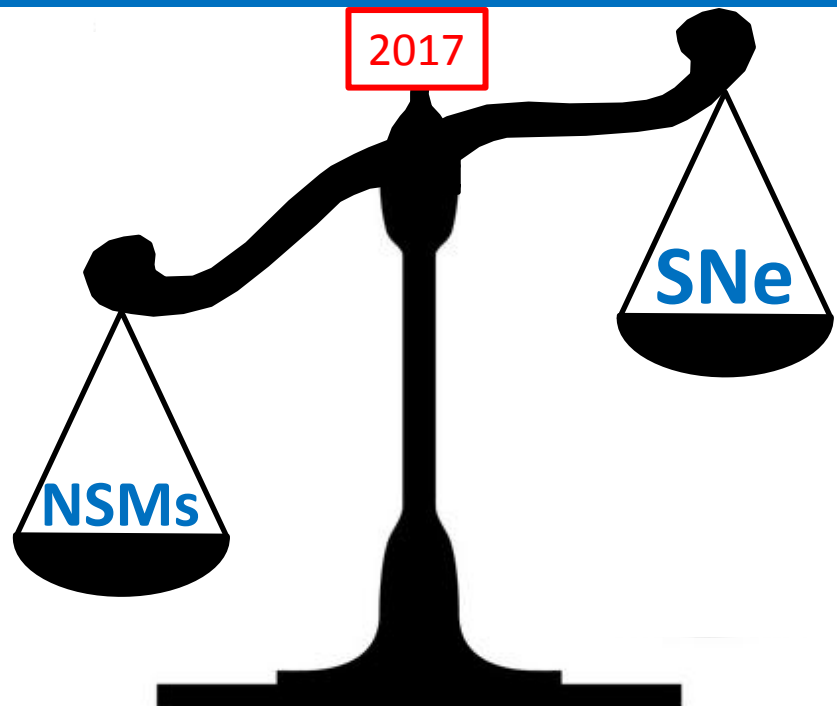
1995



2005



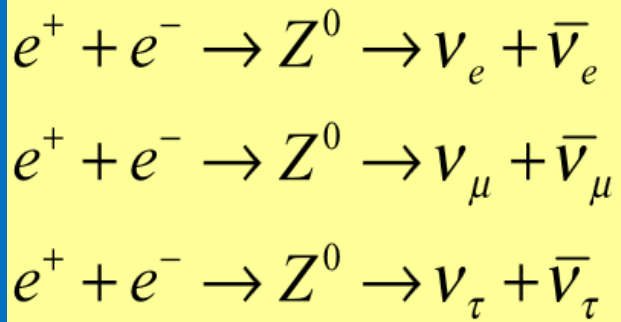
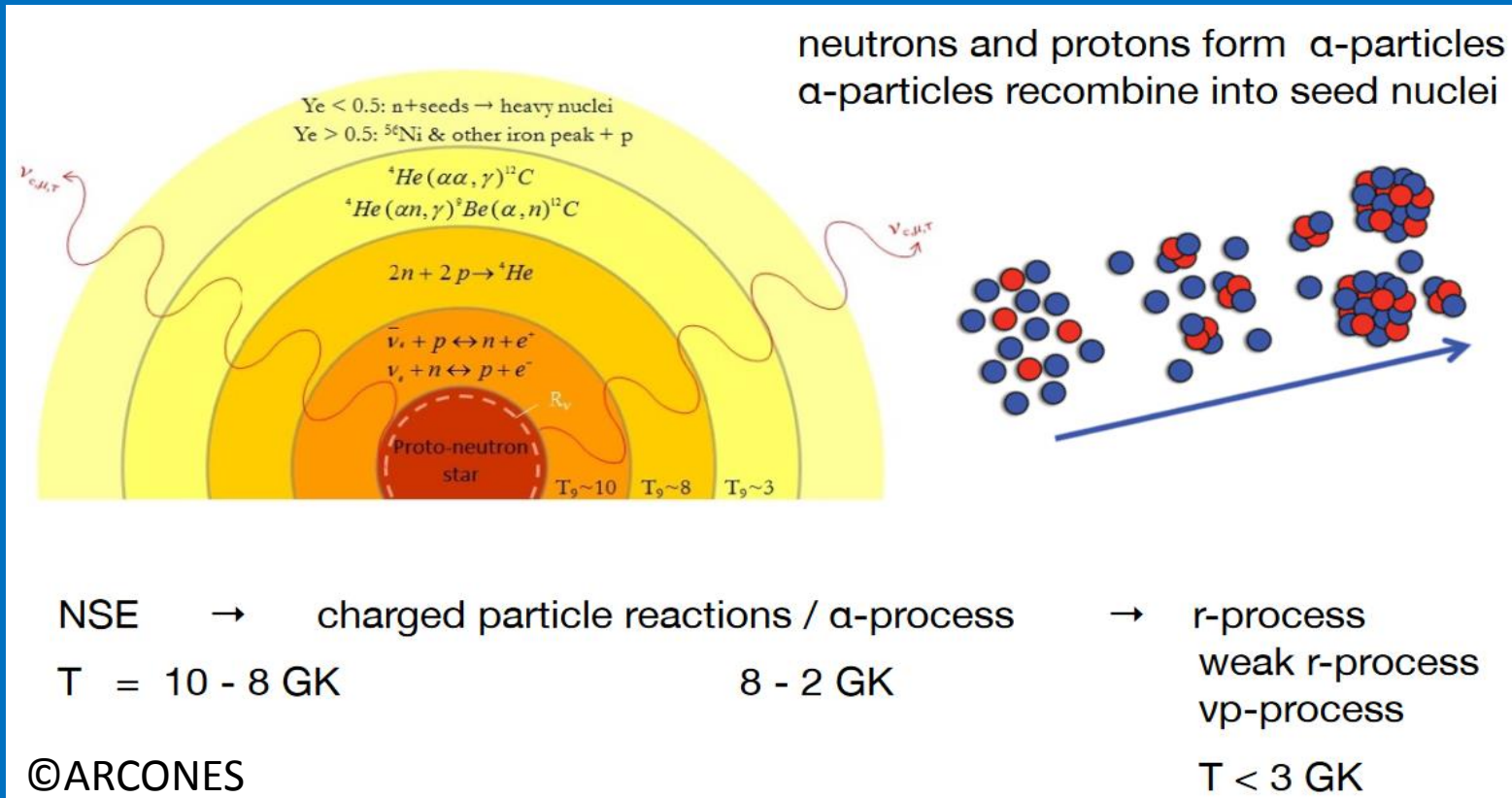
2017



2024



Il meccanismo più studiato in letteratura: il vento neutrino nelle SN II



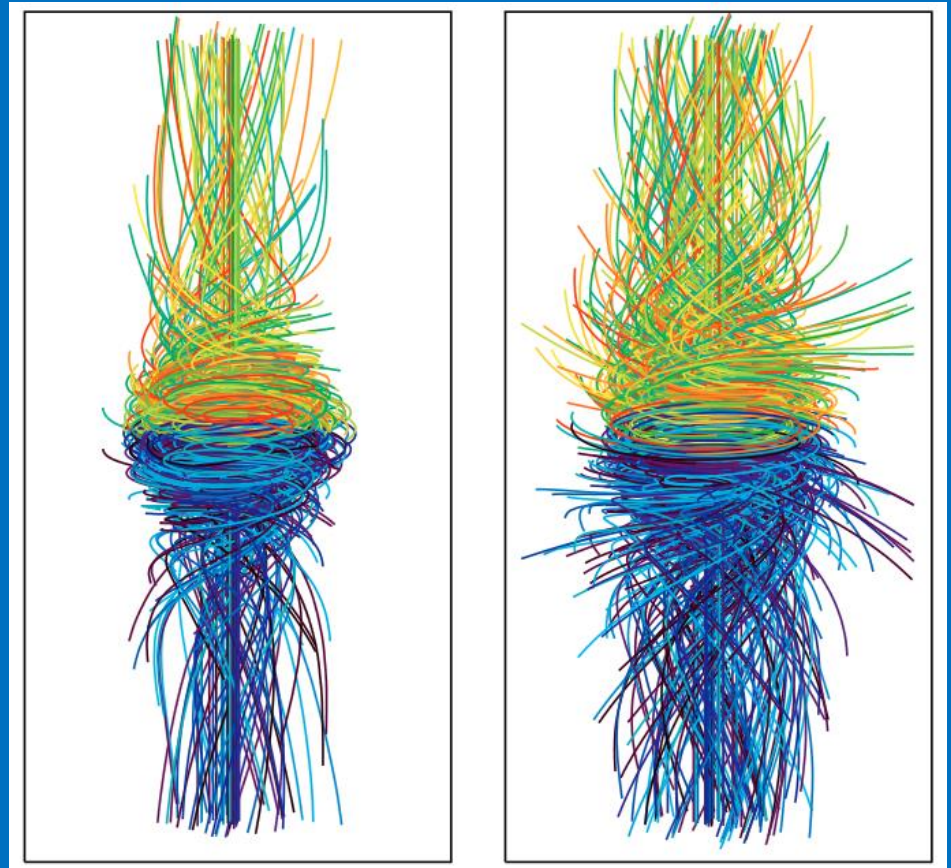
Piccolo problema:

NON HA MAI FUNZIONATO!

(Magneto Rotational Instability, MRI)

Lo shock viene «spinto»
dalla pressione magnetica

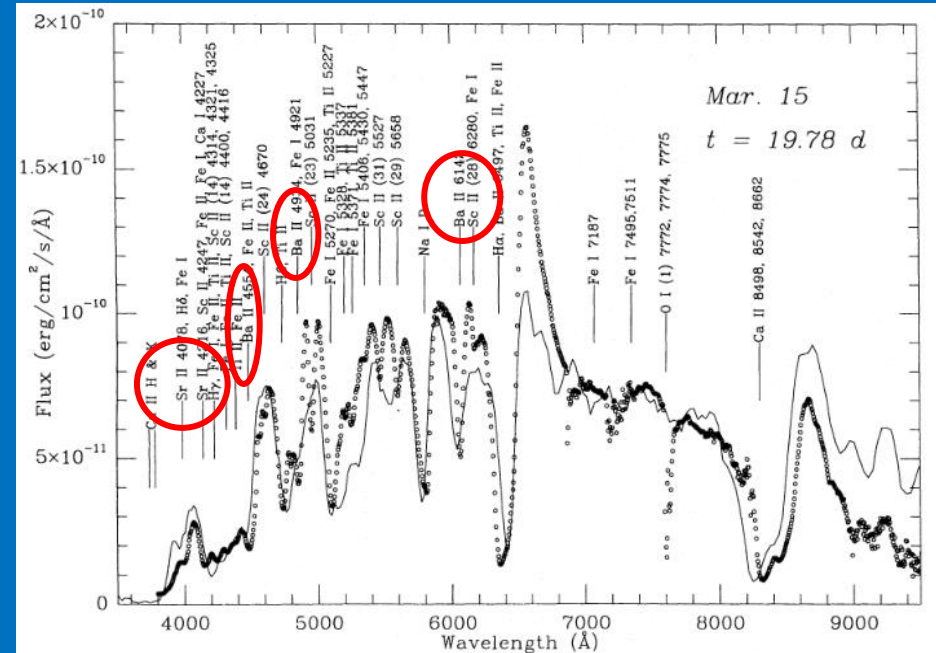
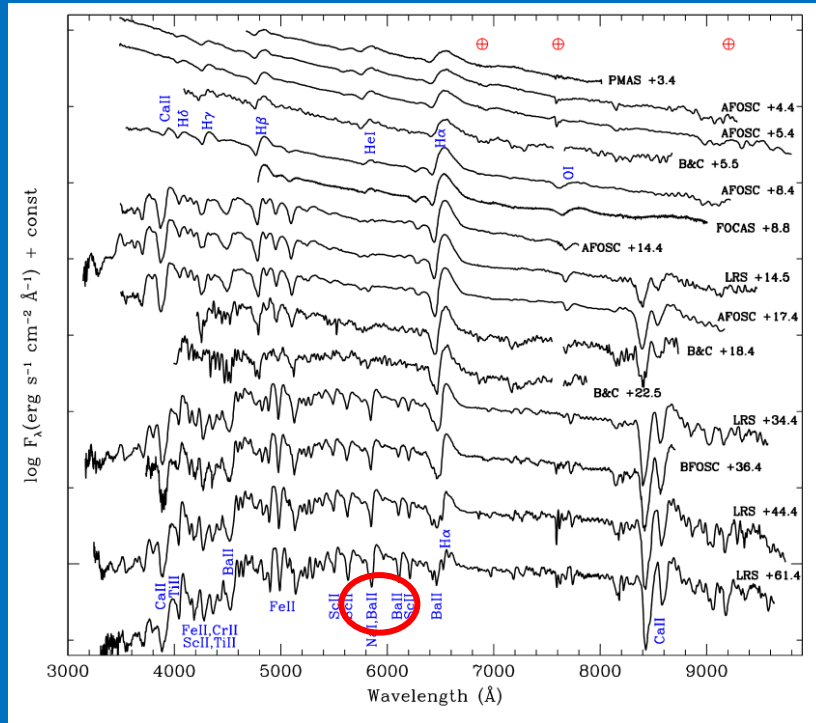
Burrows+ 2007 Mosta+ 2015
Saway&Yamada 2014



Necessarie per ovviare al problema connesso alla tempistica dei NS mergers: questi eventi richiedono almeno 100 milioni di anni per evolvere (troppo tempo per riprodurre l'alone galattico, a meno che la galassia non si sia formata attraverso un processo gerarchico di dwarf spheroidal galaxies (e.g. Hirai+ 2015).

Evidenze di elementi r nello spettro di SNIi

SN 2005cs (d=8 Mpc)

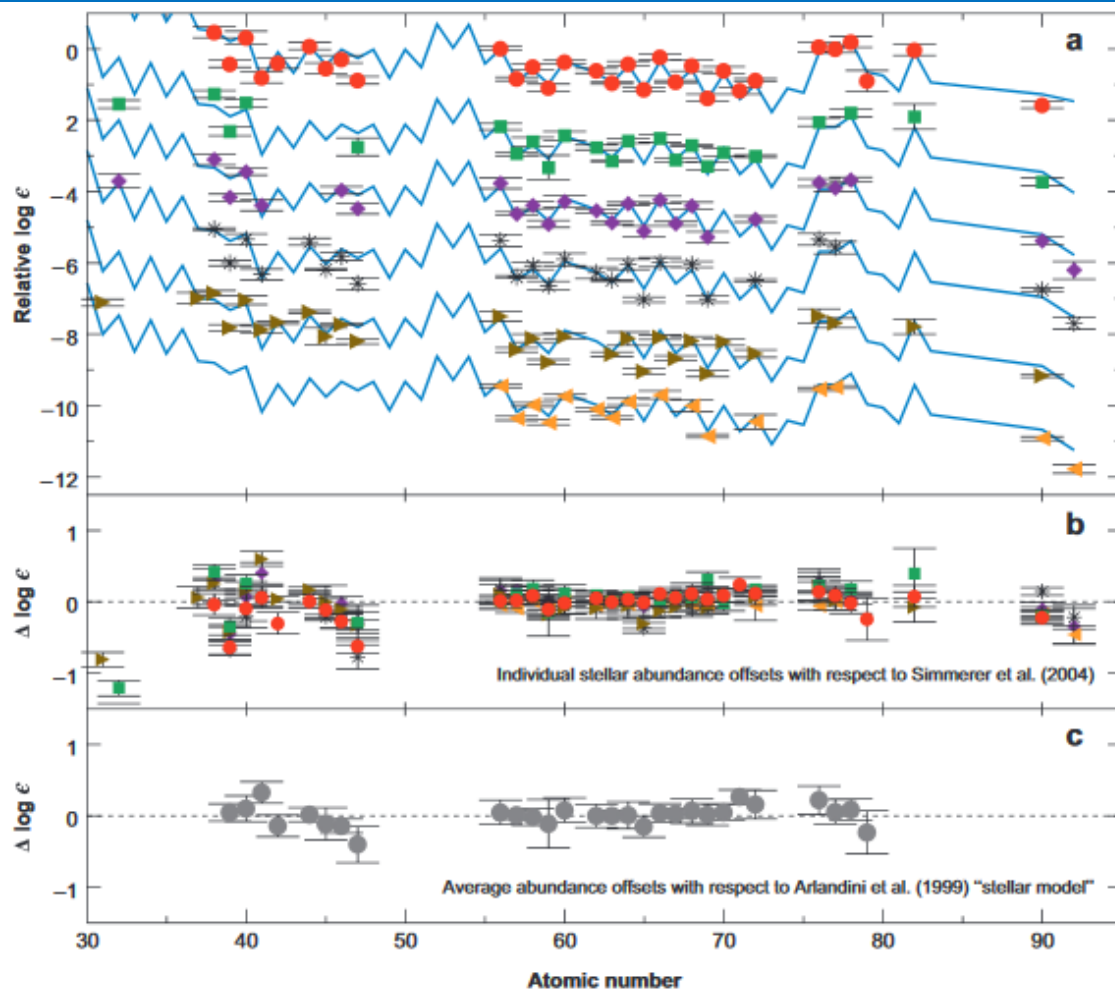


SN 1987A (d=0,05 Mpc)

Tracce di bario e stronzio: processo r o s?

Evidenze del process r a basse metallicità

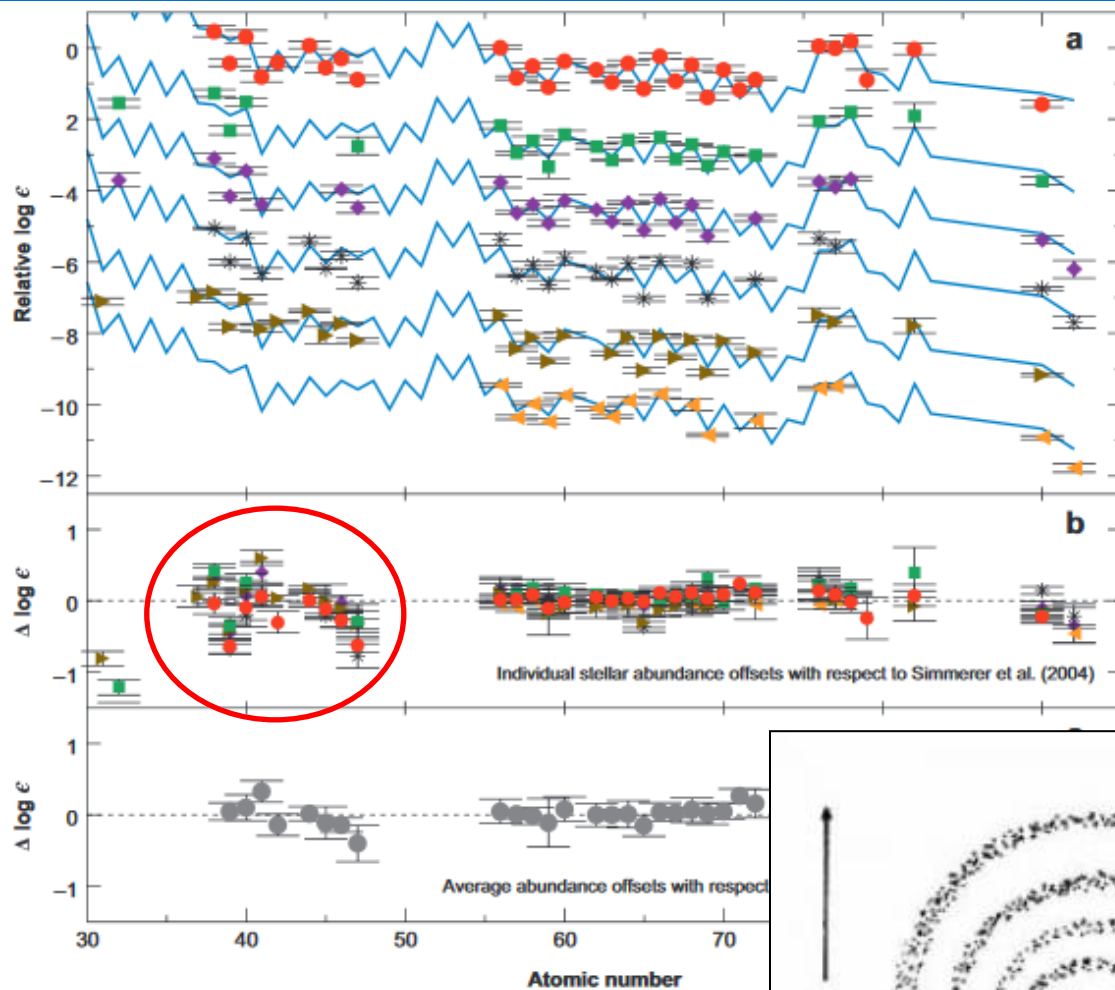
Sneden, Cowan & Gallino 2008



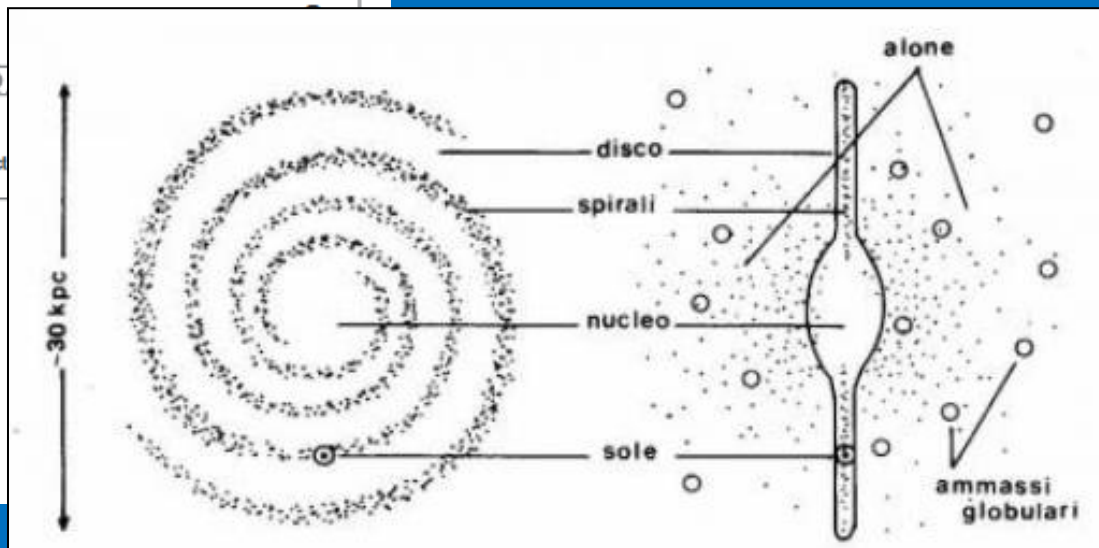
- CS 22892-052: Sneden et al. (2003)
- HD 115444: Westin et al. (2000)
- ◆ BD+17°324817: Cowan et al. (2002)
- * CS 31082-001: Hill et al. (2002)
- ▶ HD 221170: Ivans et al. (2006)
- ◀ HE 1523-0901: Frebel et al. (2007)

Evidenze del process r a basse metallicità

Sneden, Cowan & Gallino 2008

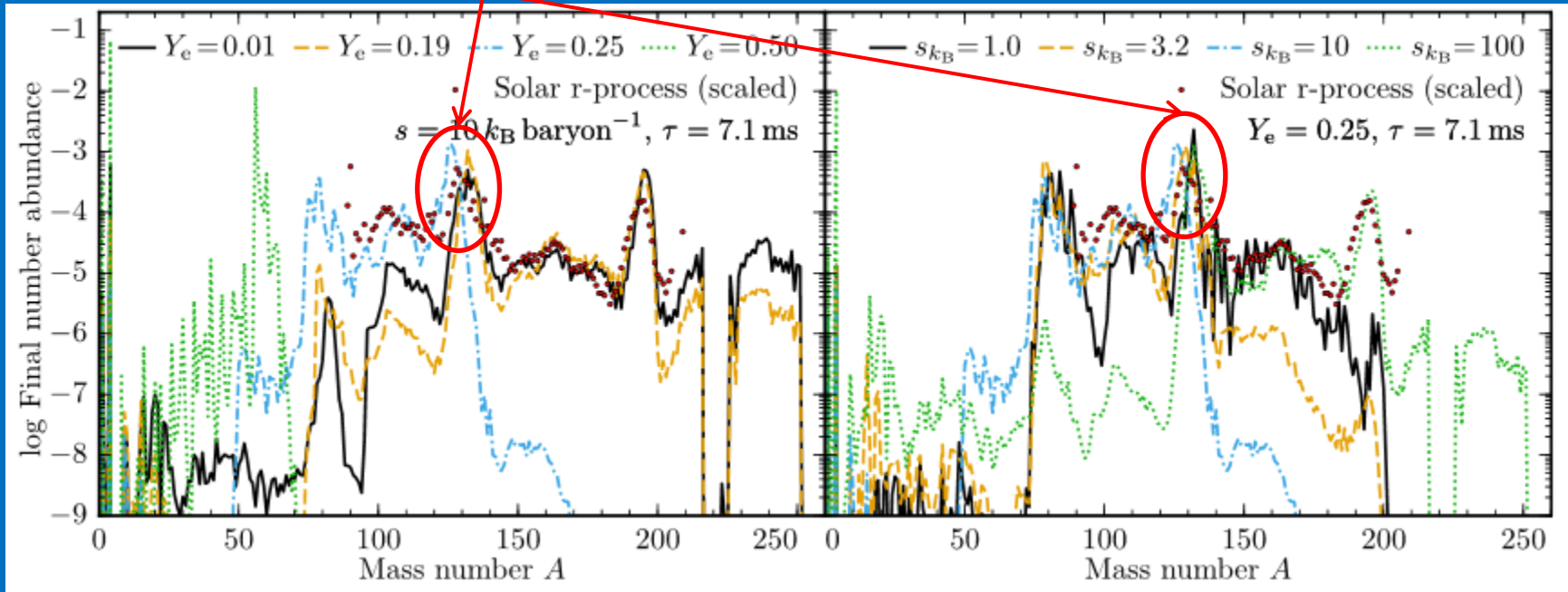


- CS 22892-052: Sneden et al. (2003)
- HD 115444: Westin et al. (2000)
- ◆ BD+17°324817: Cowan et al. (2002)
- * CS 31082-001: Hill et al. (2002)
- ▶ HD 221170: Ivans et al. (2006)
- ◀ HE 1523-0901: Frebel et al. (2007)



Dipendenza del processo r dai parametri fisici

Te-Ba



Weak r-process: $A < \approx 130$

Main r-process: sino ai transuranici

L'importanza dell'astrofisica nucleare

Un caso emblematico: il ^{135}Cs



— s-process (path principale)

— s-process (path secondario)

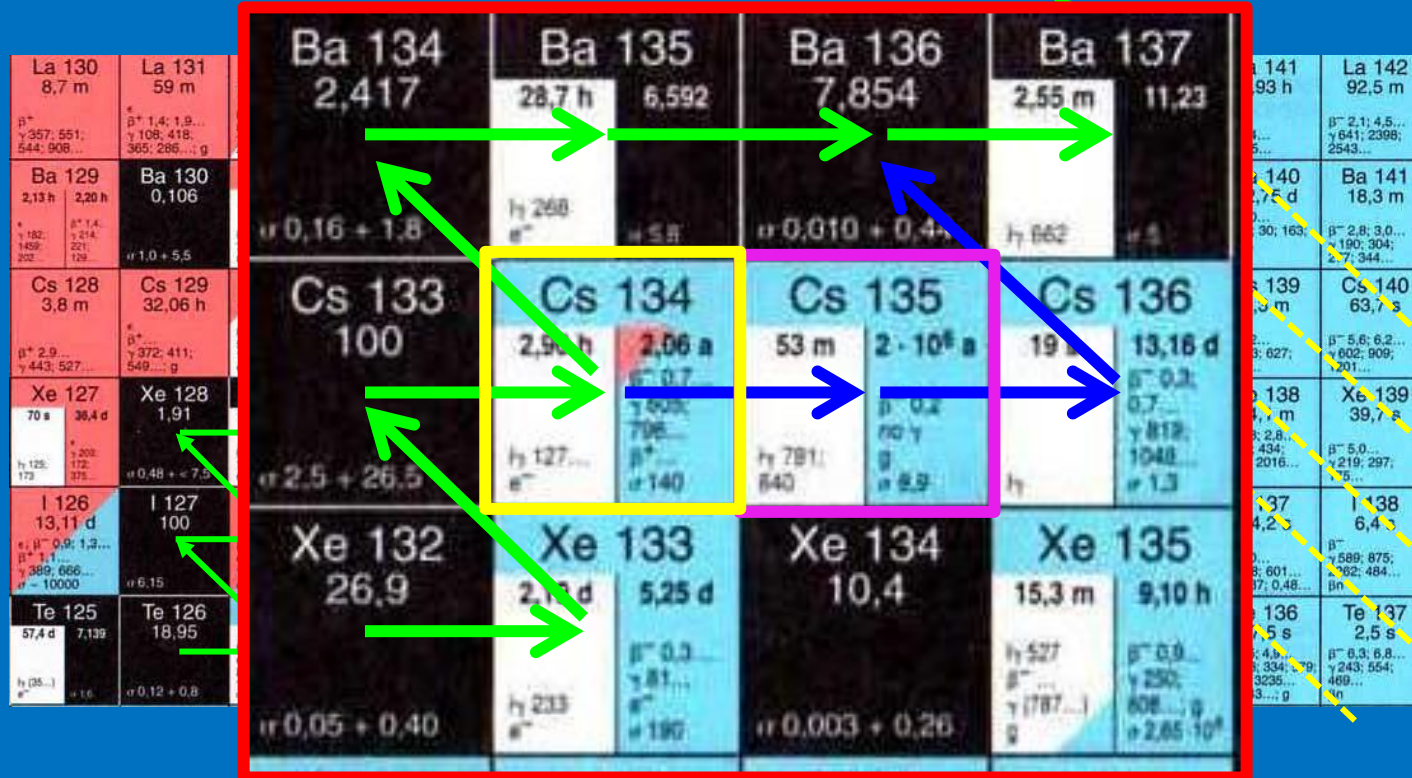
— r-process

$$\tau(^{129}\text{I}) = 15.7 \text{ Myr}$$

$$\tau(^{135}\text{Cs}) = 2.0 \text{ Myr}$$

L'importanza dell'astrofisica nucleare

Un caso emblematico: il ^{135}Cs



— s-process (path principale)

— s-process (path secondario)

— r-process

$$\tau(^{129}\text{I}) = 15.7 \text{ Myr}$$

$$\tau(^{135}\text{Cs}) = 2.0 \text{ Myr}$$

Come si determina il contributo del processo r alla distribuzione solare?

$$r = ?$$

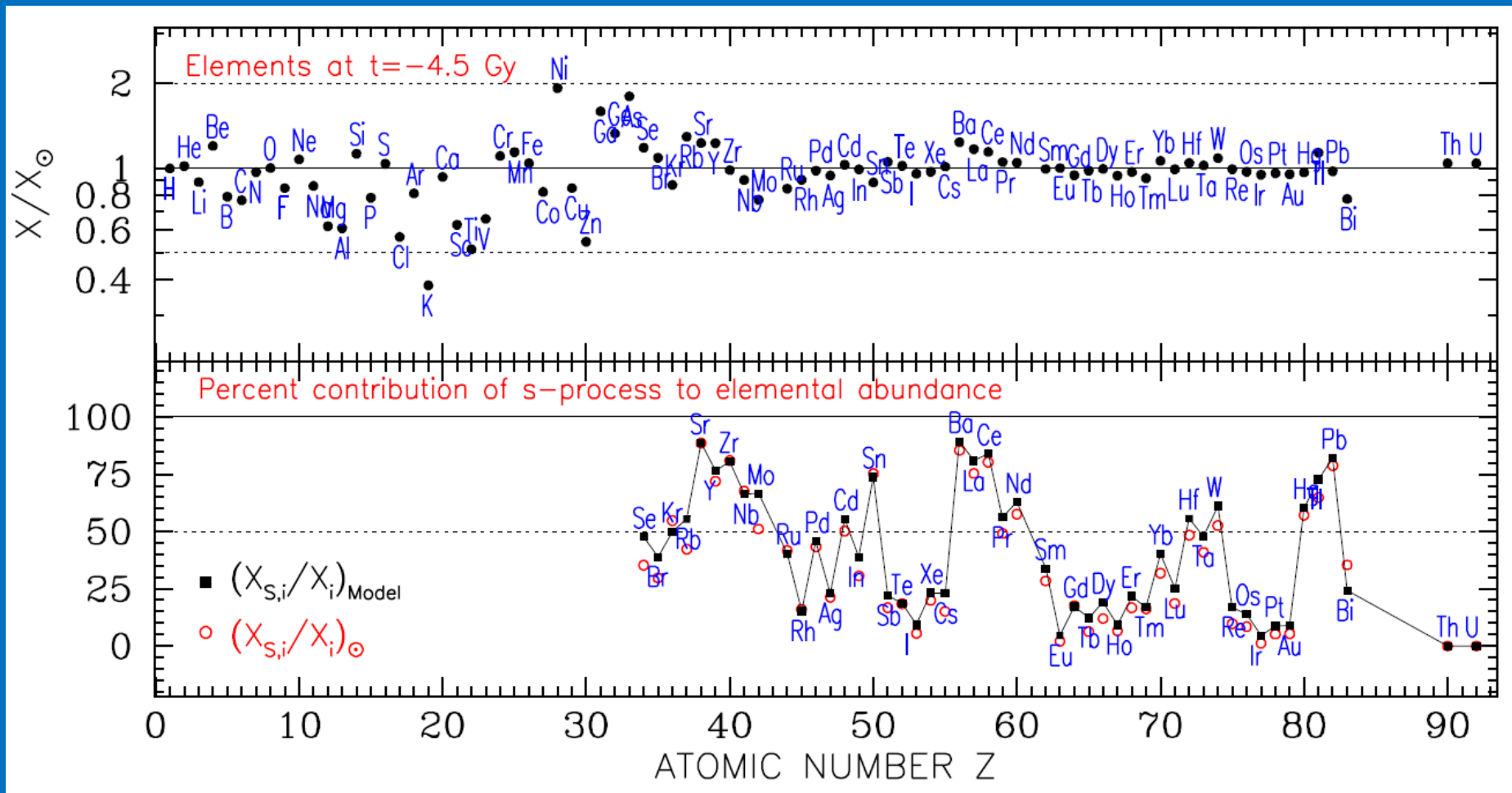
Una dettagliata conoscenza del processo s e' condizione imprescindibile per calcolare l'evoluzione chimica della Galassia

Come si determina il contributo del processo r alla distribuzione solare?

$$r = 1 - s$$

Una dettagliata conoscenza del processo s e' condizione imprescindibile per calcolare l'evoluzione chimica della Galassia

I contributi s ed r alla distribuzione osservata nel Sole

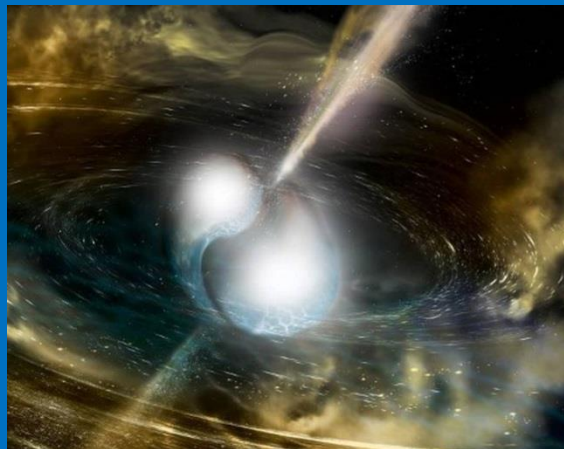


Main s-process

Weak s-process

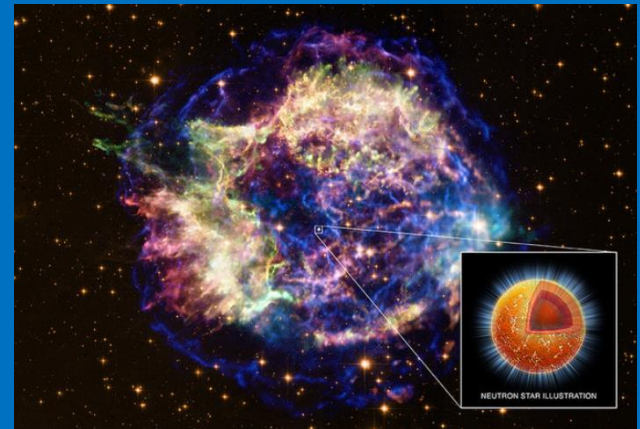
Main r-process

NEUTRON STARS MERGERS



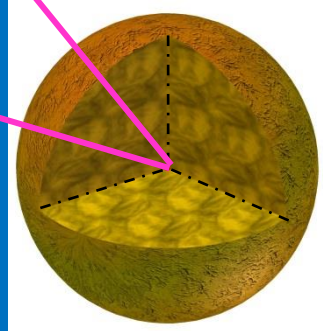
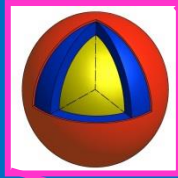
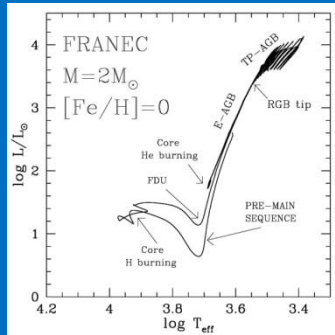
Weak r-process

FASE ESPLOSIVA DELLE STELLE MASSICCE??



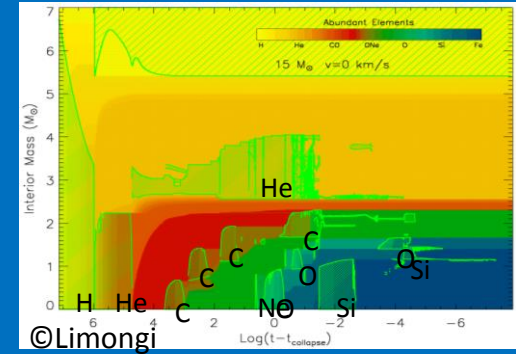
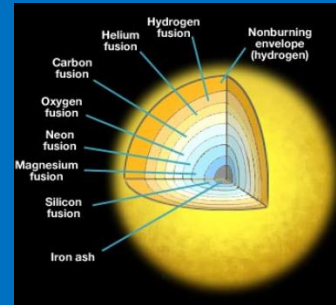
Main s-process

ASYMPTOTIC GIANT BRANCH STARS



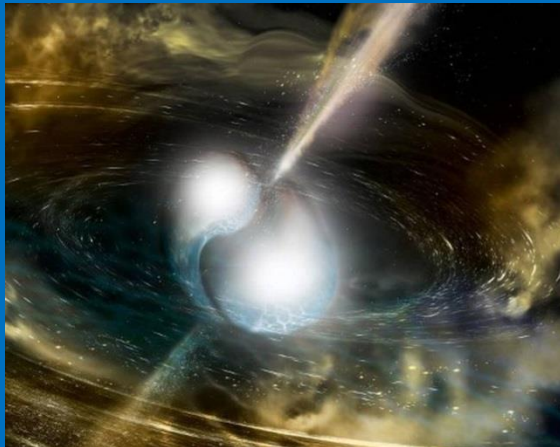
Weak s-process

QUIESCENT BURNINGS OF MASSIVE STARS



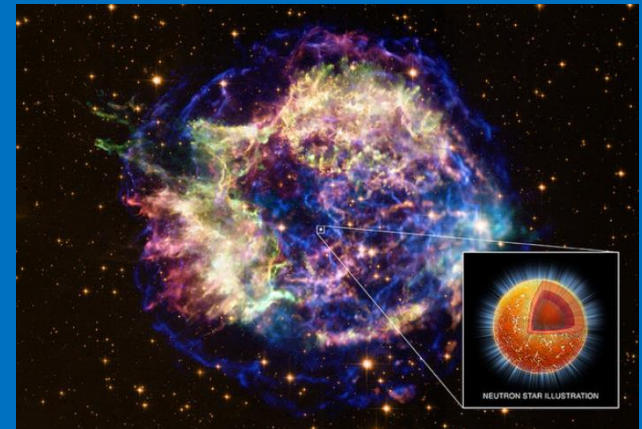
Main r-process

NEUTRON STARS MERGERS



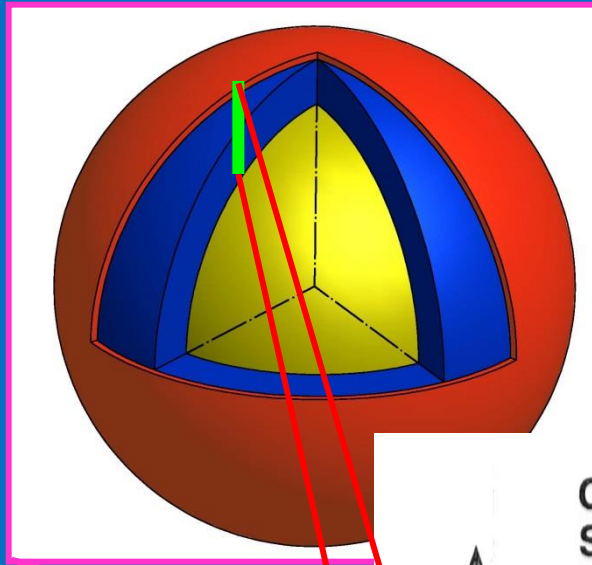
Weak r-process

FASE ESPLOSIVA DELLE STELLE MASSICCE??



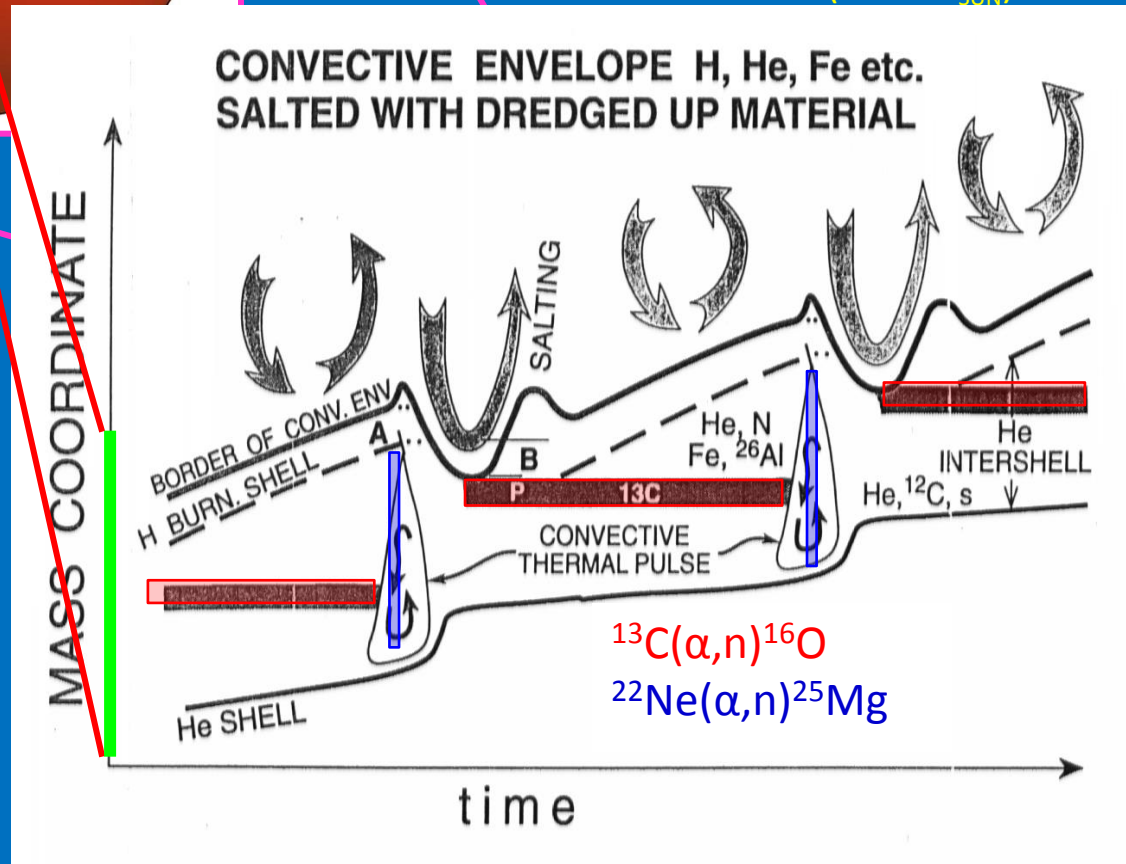
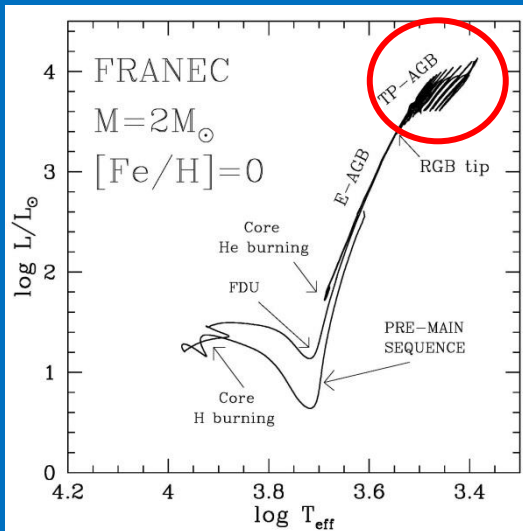
Stelle AGB

Earth radius ($\sim 10^{-2} R_{\text{SUN}}$)

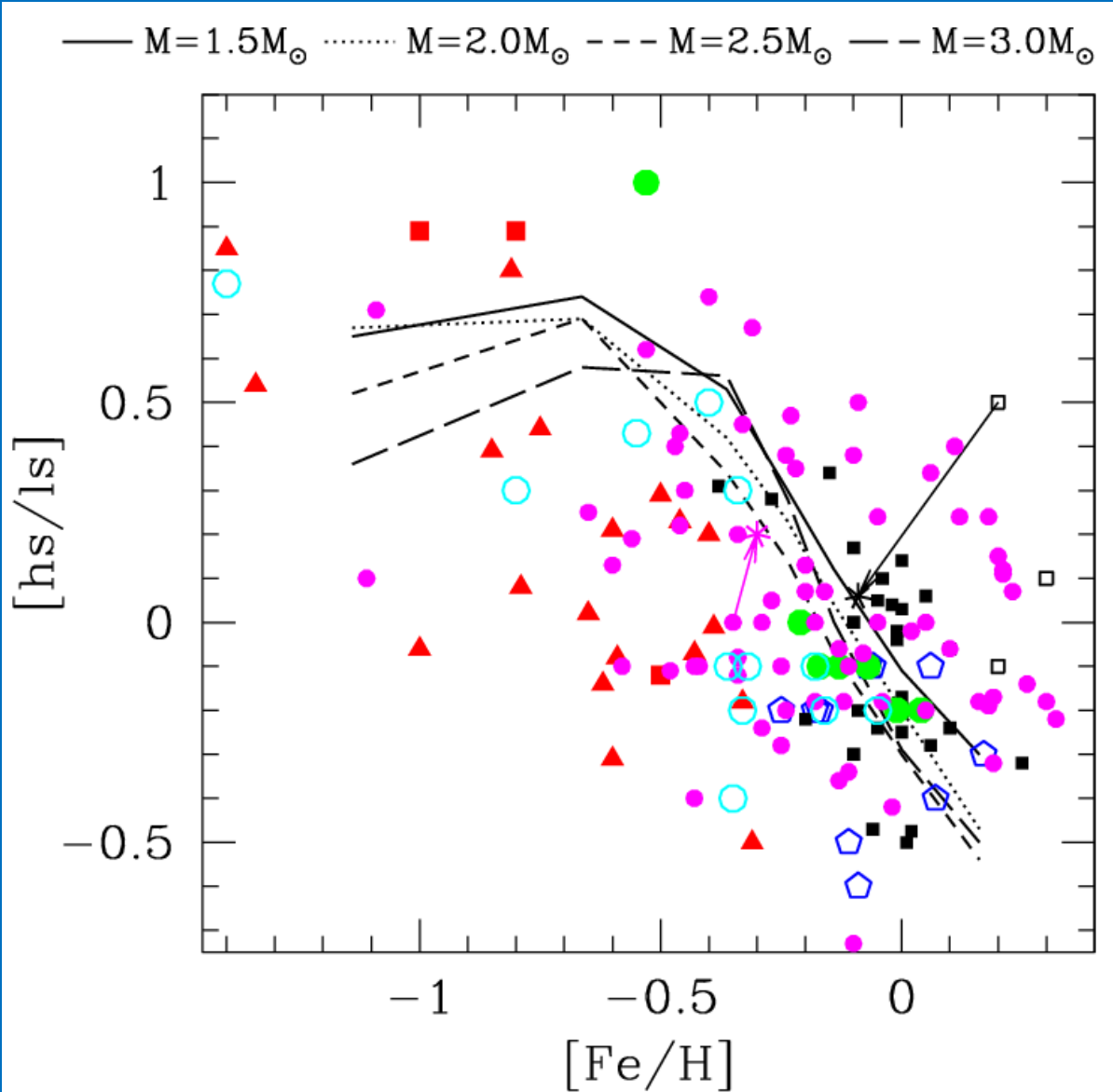


CO Core
He-shell
H-shell

Earth-Sun
($\sim 200 R_{\text{SUN}}$)



s-process [hs/ls]



Cristallo et al. 2011

$$[\text{ls}/\text{Fe}] = ([\text{Sr}/\text{Fe}] + [\text{Y}/\text{Fe}] + [\text{Zr}/\text{Fe}]) / 3$$

$$[\text{hs}/\text{Fe}] = ([\text{Ba}/\text{Fe}] + [\text{La}/\text{Fe}] + [\text{Nd}/\text{Fe}] + [\text{Sm}/\text{Fe}]) / 4$$

Meteoriti



Allende (Mexico, 1969)

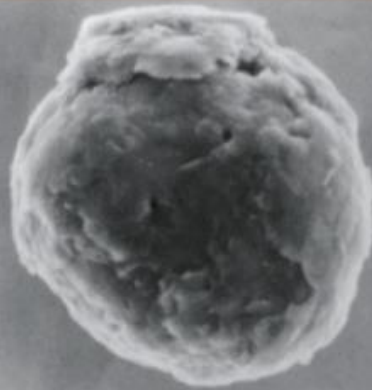
Murchison (Australia, 1969)



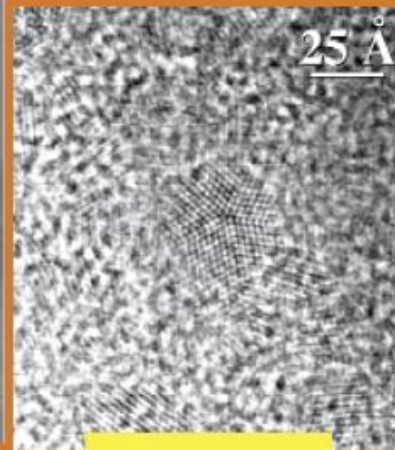
Granuli pre-solari



Silicon Carbide



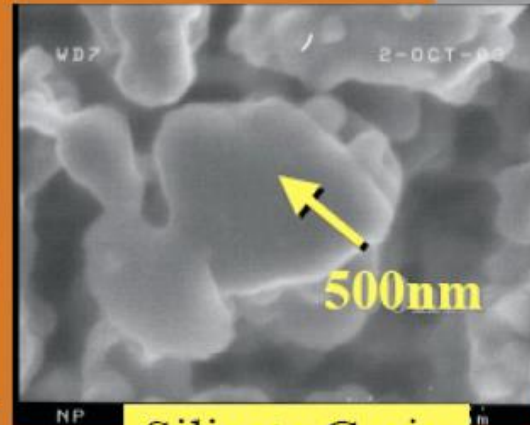
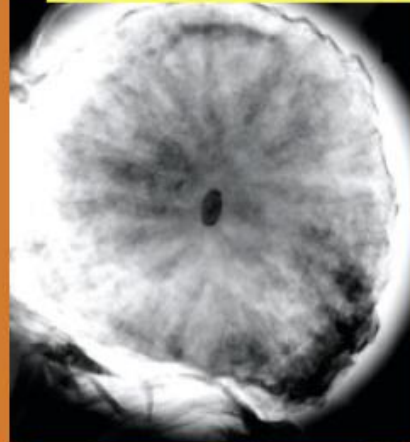
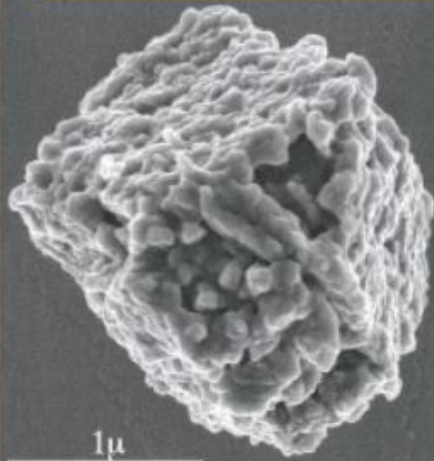
Graphite Grains



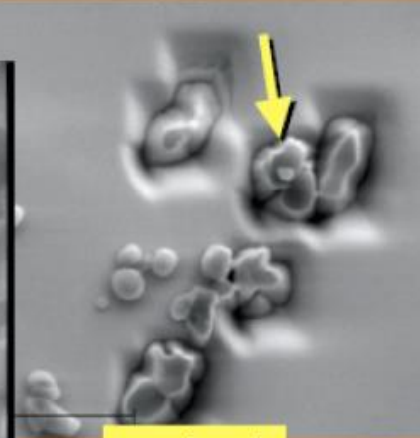
Diamond



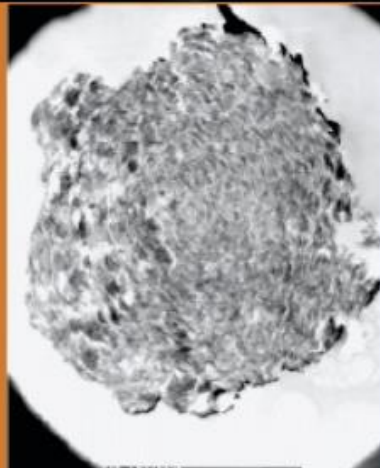
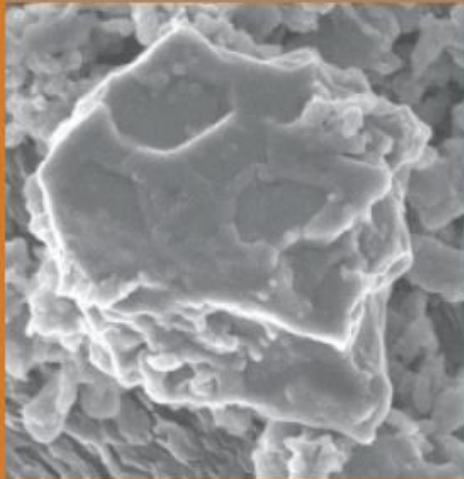
Corundum



Silicate Grain

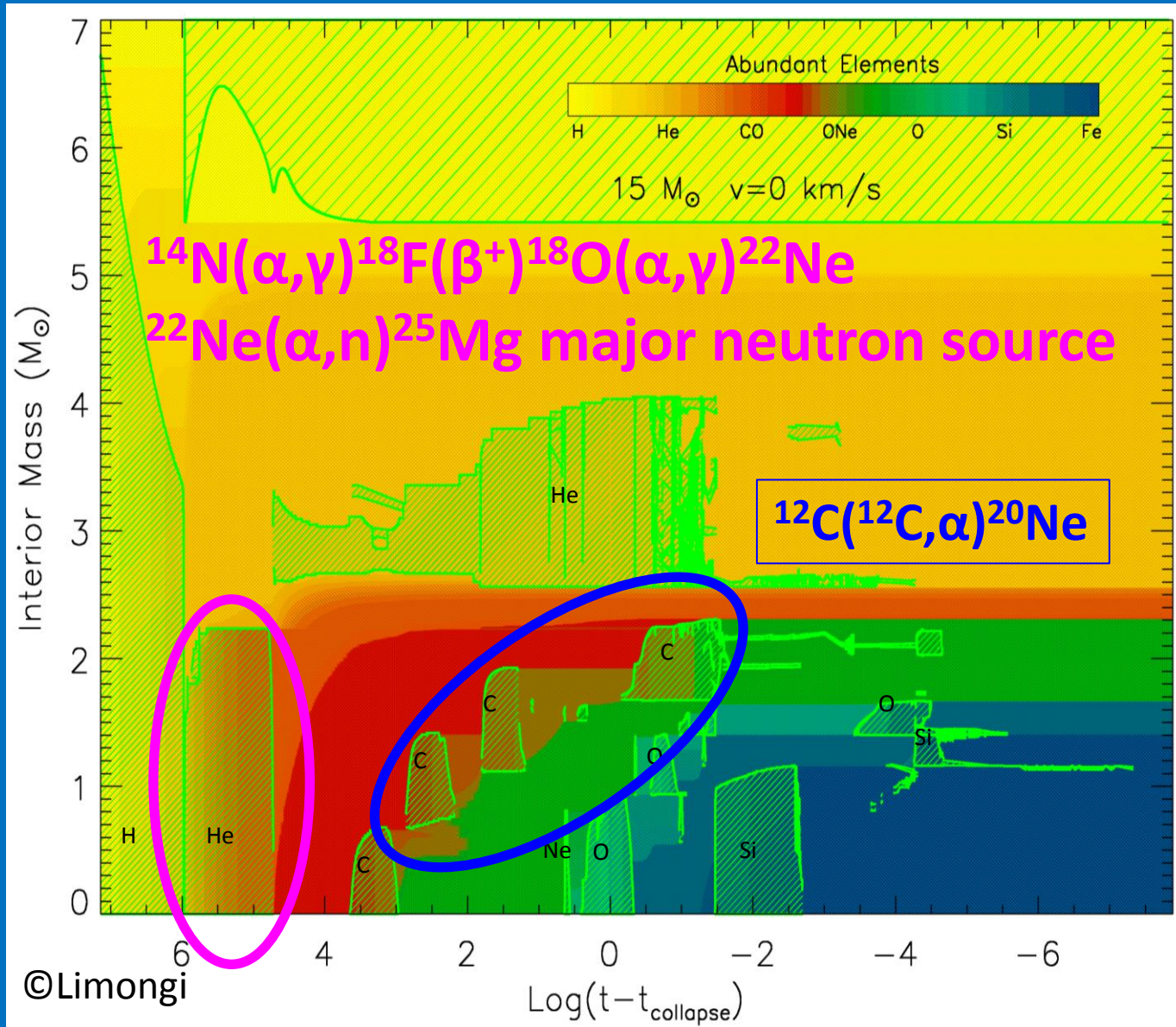


Spinel



La maggioranza dei Sic, Silicati e Ossidi, così come il 50% della Grafite, vengono dalle AGB

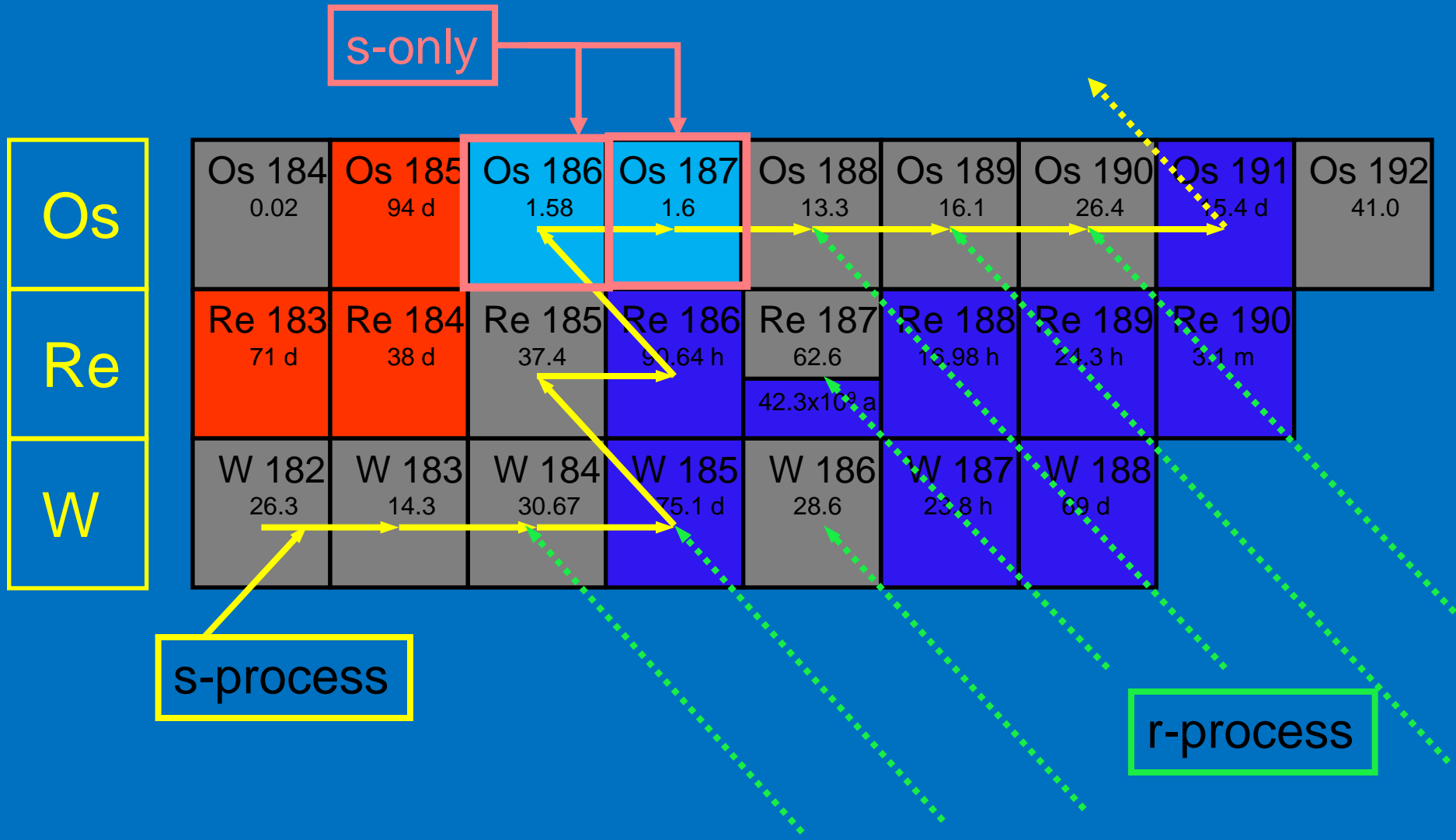
Il processo weak s e l'evoluzione delle stelle massicce



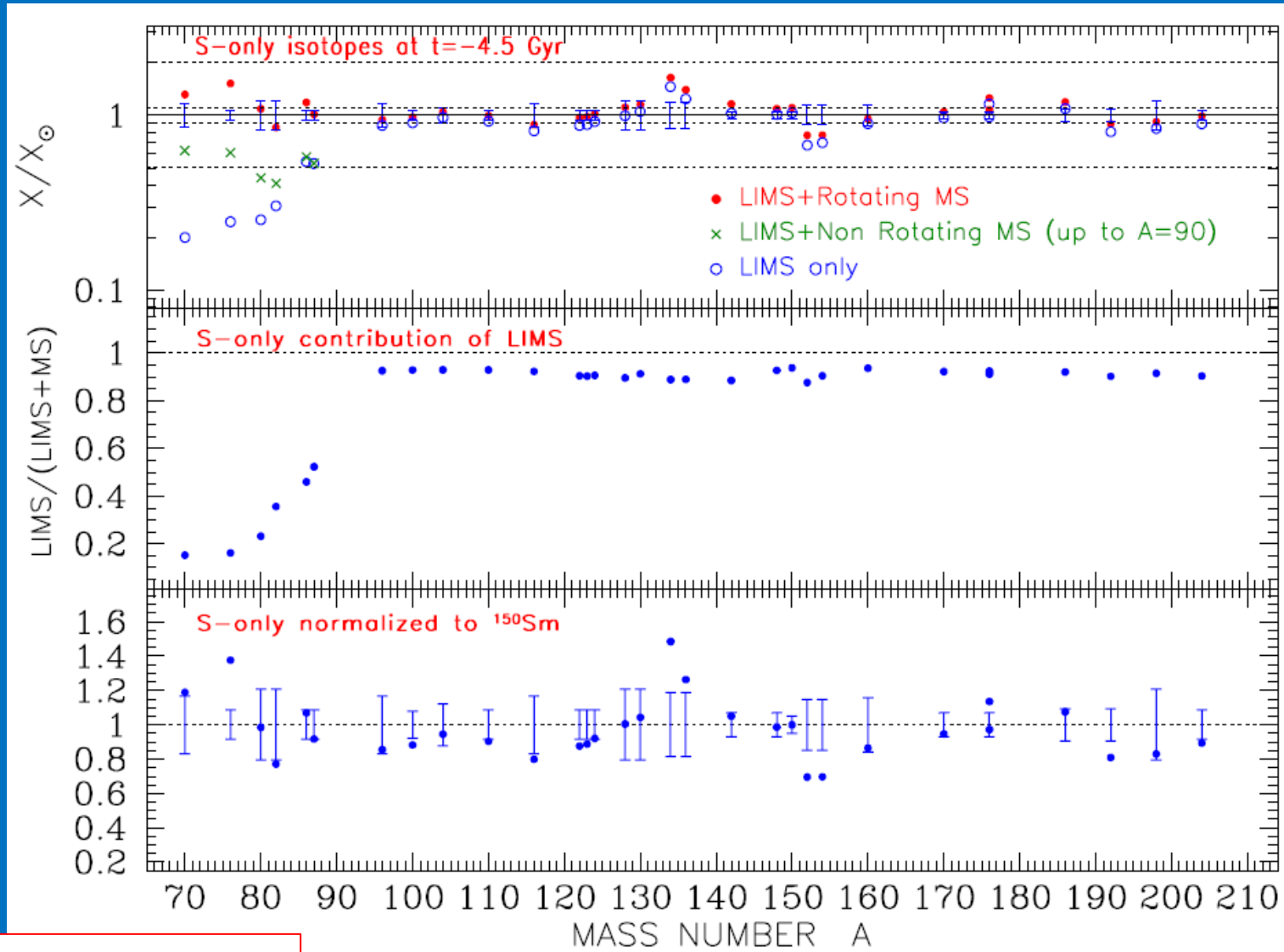
$\tau \approx 1$ Myr

$\tau \approx 1$ kyr

Come si può testare la robustezza dei modelli s?



La distribuzione solare degli s-only



The end

