

Nucleosíntesis en la fusión de dos estrellas de neutrones

Ignacio L. Pomponio

2018

Introducción a la Física Nuclear

Introducción

- ▶ 1974. Se especula que en el remanente de una fusión de estrellas de neutrones (NSM) podría ser una fuente importante de producción de elementos pesados (a través de r-process).
- ▶ 1999. Las primeras simulaciones muestran que la materia eyectada con alta proporción de neutrones produce estas reacciones.
- ▶ 2014/2015. Se comienza a sospechar que los sitios de mayor producción de estas reacciones son los NSM y no las supernovas.
- ▶ 2017. Primera detección de ondas gravitacionales tras un NSM. Medición del espectro electromagnético que sucedió al evento.

Captura rápida de neutrones (r-process)

Dada la alta presencia de neutrones cuando $Y_e \leq 0,3$ es de esperar que sucedan reacciones que extiendan las cadenas de isótopos hacia la derecha en la grilla de núcleos, más allá de los primeros isótopos radiactivos (drip line). Las capturas de neutrones deben darse en un intervalo de tiempo pequeño, antes de que los núcleos decaigan (β^-). Hay puntos de frenado en los números mágicos $A= 50, 82, 126$ debido a que estos núcleos presentan estructura de closed shell (más estable) y es favorecido el decaimiento β sobre la captura de neutrones.

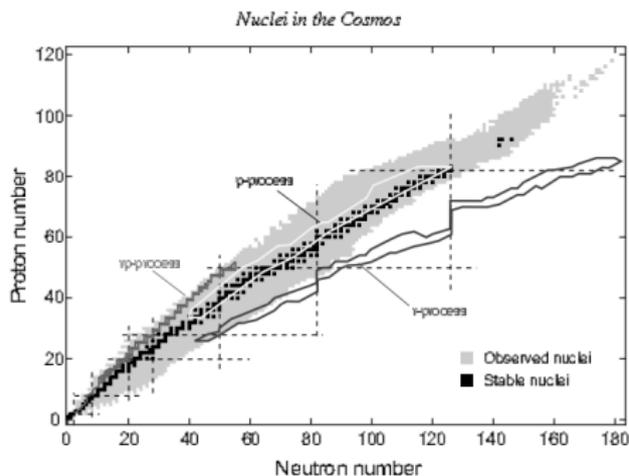


Figura: Crédito: Thomson, Nunes; Nuclear reactions for astrophysics (2009)

Luminosidad bolométrica: una pista de nucleosíntesis por r-process

Simulación de las tasas de emisión de energía nuclear en distintas condiciones (Nuclear reaction network WinNet).



En cada caso se encontró una aproximación de primer orden de la forma

Tasa de emisión de energía nuclear

$$\dot{q} = \dot{q}_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^\alpha$$

con $\alpha \approx -1,3$ para $Y_e \leq 0,3$. Para Y_e mayores, esta ley no sirve.

Luminosidad bolométrica: una pista de nucleosíntesis por r-process

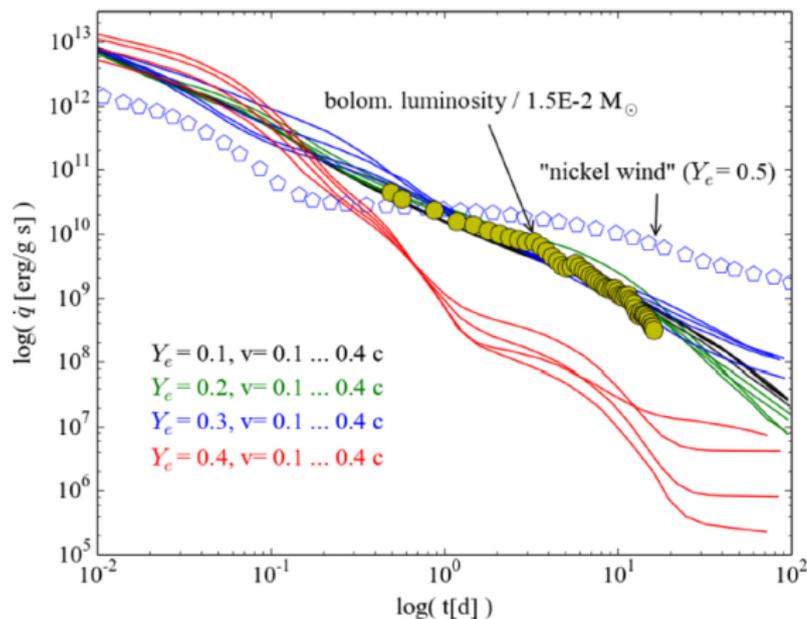


Fig. 1. Nuclear heating rates of the explored parameter space, colours label Y_e -values. Overlaid are bolometric luminosities computed following the description in Kasliwal et al. (2017) using updated photometry from <https://kilonova.space> (yellow circles). We show the total nuclear heating rate (luminosities divided by an ejecta mass of $1.5 \times 10^{-2} M_\odot$). Also shown is the heating rate of a wind with $Y_e = 0.5$ that produces a substantial amount of nickel, see last panel in Fig. 2. The close agreement with $Y_e \leq 0.3$ strongly suggests the presence of substantial amounts of r-process matter.

Masa eyectada

Asumiendo que el 100 % de la energía producida por decaimiento radiactivo es observada en el espectro de emisión, se obtiene una cota inferior de la masa eyectada en el NSM

Masa eyectada

$$m_{ej}^{min} \equiv \frac{L_{bol}}{\dot{q}} = 1,5 \times 10^{-2} M_{Sol}$$

Dependencia en la nucleosíntesis de la fracción electrónica

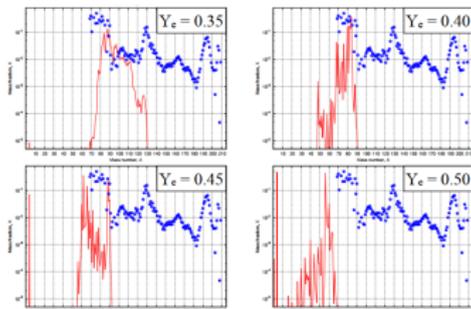
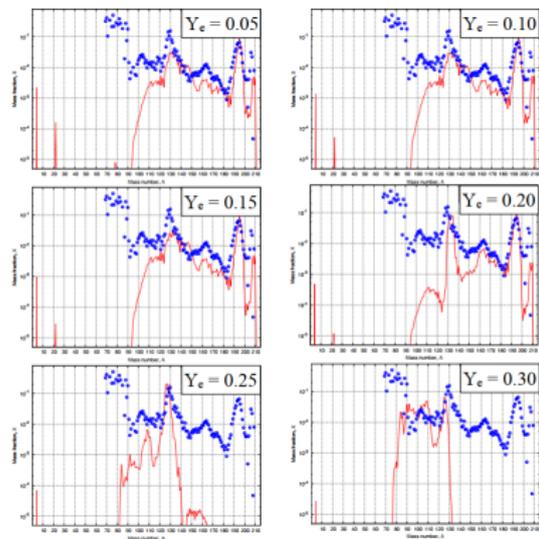


Fig. 2. Dependence of the nucleosynthesis on the electron fraction Y_e (from 0.05 upper left to 0.5 lower right), for $n_0 = 15 \text{ k}_0/\text{baryon}$, $\alpha_0 = 0.25c$ and FREDM mass model. Red lines label the resulting abundances, blue symbols refer to the solar system r -process. Beyond $17^{Z=2}$ ≈ 0.25 hardly any heavy elements beyond the second r -process peak ($A = 130$) are produced.

Abundancias relativas

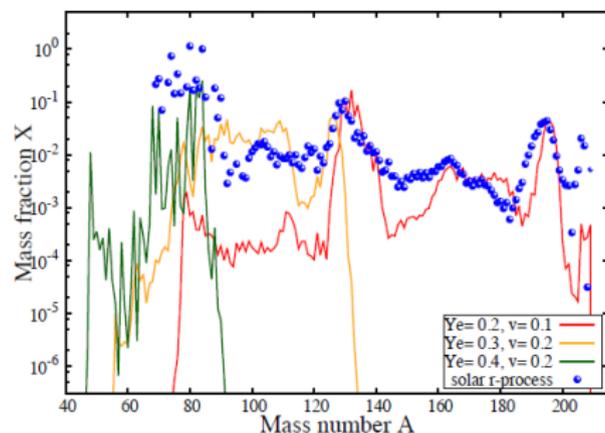


Fig. 3. Abundances for two cases (red and orange lines) that can both reproduce the bolometric luminosity evolution. While both produce *r*-process material, one case produces the third *r*-process peak ($Y_e = 0.2$ and $v = 0.1c$), but the other ($Y_e = 0.3$ and $v = 0.2c$) does not. Thus, from the bolometric lightcurve alone the absence/presence of lanthanides cannot be inferred. For comparison, we also show a case (green line) with large $Y_e = 0.4$ ($v = 0.2c$) that only produces elements with $A < 90$. That case does not fit the bolometric luminosity.

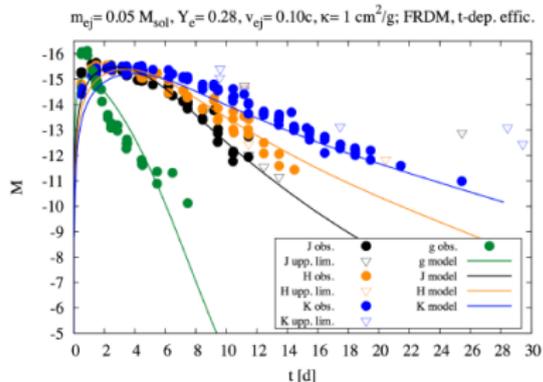
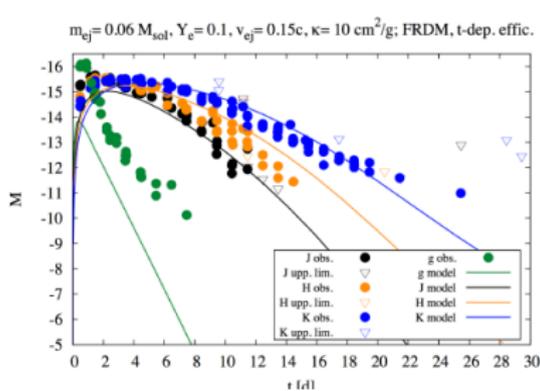
La luminosidad bolométrica no es conclusiva con respecto a la composición de la la masa eyectada.

Luminosidad del infrarrojo cercano

Se comparan las magnitudes aparentes de las bandas J,H y K del infrarrojo cercano (NIR) con simulaciones que utilizan la fórmula de masa FRDM (Finite Range Droplet Model) para obtener la energía emitida por radioactividad.

Es propuesto un modelo semianalítico para tener en cuenta la opacidad del medio y sus efectos difusivos. Para ello se resuelven las ecuaciones de la hidrodinámica no relativista de una esfera que se expande en el vacío con una cierta asimetría (para esto se agrega una función de forma).

Luminosidad del infrarrojo cercano



A pesar de que $Y_e = 0,28$ es mejor ajustado al agregar la banda g, los resultados podrían depender de otros factores como el coeficiente de opacidad, la velocidad de eyección, etc.

Discusión

- ▶ Primera detección directa de que los NSM son una fuente importante de nucleosíntesis por r-process.
- ▶ Las observaciones coinciden con las simulaciones cuando $Y_e \leq 0,3$ y no para valores mayores.
- ▶ Cota inferior para la masa eyectada de $m_{ej}^{min} = 1,5 \times 10^{-2} M_{Sol}$

Masa producida por r-process en la Vía Láctea

Según este evento, se calcula que se producen $320 - 4740 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ NSM.

En la vía láctea, existen aproximadamente 19.000 masas solares de elementos producidos por r-process. Los NSM podrían producir todos los elementos formados por r-process que existen en la galaxia.

$$M_r \sim 17\,000 M_\odot \left(\frac{\mathcal{R}_{\text{NSNS}}}{500 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}} \right) \left(\frac{\bar{m}_{\text{ej}}}{0.03 M_\odot} \right) \left(\frac{\tau_{\text{gal}}}{1.3 \times 10^{10} \text{ yr}} \right)$$

Para que todos los elementos producidos por r-process sean provenientes de NSM, se necesita una frecuencia del evento de $560 \text{ } 0,03 M_{\text{sol}} / m_{\text{ej}} \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$.

Frecuencia del evento de NSM

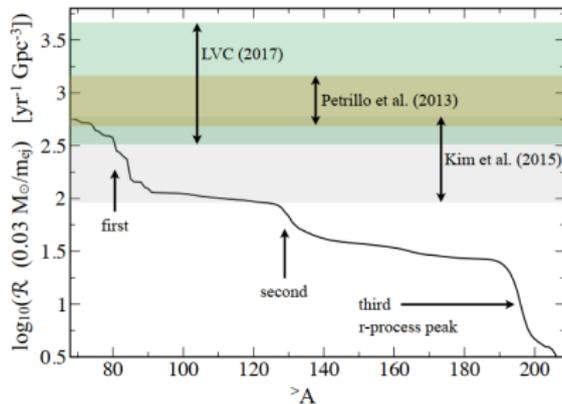


Fig. 6. Needed event rates, scaled to an ejecta mass of $0.03 M_{\odot}$, if NSNS mergers are to produce all r -process (in solar proportions) above a minimum nucleon number $>A$ (solid black line). Also shown are the estimated rates (90% conf.) for NSNS mergers from the population synthesis study of Kim et al. (2015), the sGRB rates based on Swift data from Petrillo et al. (2013) and the LVC estimate based on the first detected NSNS merger event.

Referencias

- ▶ S. Rosswog, J. Sollerman, U. Feindt, A. Goobar, O. Korobkin, R. Wollaeger, C. Fremling y M. M. Kasliwal; The first direct double neutron star merger detection: Implications for cosmic nucleosynthesis; *Astronomy & Astrophysics*; 2018.
- ▶ I. J. Thompson, F. M. Nunes; *Nuclear Reactions for Astrophysics: Principles, Calculations and Applications of Low-Energy Reactions*; Cambridge University Press, 2009.