

Neutrini nella coalescenza di stelle di neutroni: nucleosintesi e kilonova

Albino Perego

INFN Milano Bicocca & Gruppo collegato di Parma

5 Aprile 2018

Incontri di Fisica delle Alte Energie, Milano Bicocca



Coalescence di binarie di stelle di neutroni (BSN)

- ▶ BSN sono laboratori cosmici di fisica fondamentale
- ▶ 4 interazioni fondamentali giocano ruolo chiave
- ▶ grande varietà di osservabili, confermate da GW170817

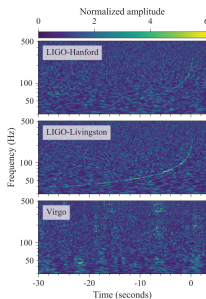
- ▶ onde gravitazionali
- ▶ nucleosintesi elementi pesanti

Lattimer & Schramm 74

- ▶ processo rapido (processo r)
- ▶ $t_{\text{cattura } n} \ll t_{\text{dec } \beta}$

- ▶ controparti elettromagnetiche (EM)

- ▶ sGRB (?) Paczynski 89
- ▶ kilonova Li, Paczynski 98



Segnale GW da GW170817, LVC 2017, PRL 119

- ▶ per predire e interpretare osservabili da BSN bisogna considerare tutte interazioni fondamentali in sofisticati modelli numerici (HPC)

Coalescence di binarie di stelle di neutroni (BSN)

- ▶ BSN sono laboratori cosmici di fisica fondamentale
- ▶ 4 interazioni fondamentali giocano ruolo chiave
- ▶ grande varietà di osservabili, confermate da GW170817

▶ onde gravitazionali

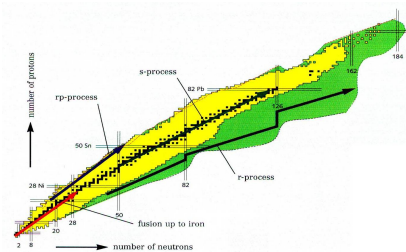
▶ nucleosintesi elementi pesanti

Lattimer & Schramm 74

- ▶ processo rapido (processo r)
- ▶ $t_{\text{cattura } n} \ll t_{\text{dec } \beta}$

▶ controparti elettromagnetiche (EM)

- ▶ sGRB (?) Paczynski 89
- ▶ kilonova Li, Paczynski 98



Percorso del processo r

- ▶ per predire e interpretare osservabili da BSN bisogna considerare tutte interazioni fondamentali in sofisticati modelli numerici (HPC)

Coalescence di binarie di stelle di neutroni (BSN)

- ▶ BSN sono laboratori cosmici di fisica fondamentale
- ▶ 4 interazioni fondamentali giocano ruolo chiave
- ▶ grande varietà di osservabili, confermate da GW170817

▶ onde gravitazionali

▶ nucleosintesi elementi pesanti

Lattimer & Schramm 74

- ▶ processo rapido (processo r)

- ▶ $t_{\text{cattura } n} \ll t_{\text{dec } \beta}$

▶ controparti elettromagnetiche (EM)

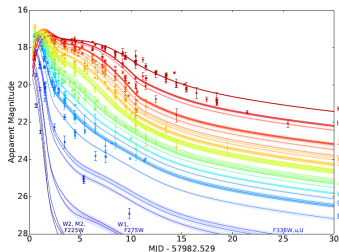
- ▶ sGRB (?)

Paczynski 89

- ▶ kilonova

Li, Paczynski 98

- ▶ per predire e interpretare osservabili da BSN bisogna considerare tutte interazioni fondamentali in sofisticati modelli numerici (HPC)



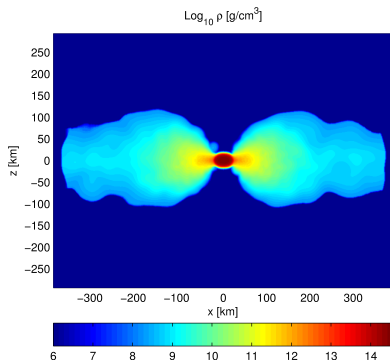
Curve di luce da AT2017gfo, Villar+ 2017 ApJL

Post-coalescenza di una BSN

Se fasi di inspiral e coalescenza ...

- ▶ ... guidate da emissione onde gravitazionali
- ▶ ... fredda ($T \lesssim 1 \text{ MeV}$)

...invece dopo coalescenza:



densità di materia dopo coalescenza di BSN

(Price&Rosswog 07 Science, Perego+ 14 MNRAS)

- ▶ **SN massiva (\rightarrow BH)**

$$M \sim 2.2 - 2.8 M_{\odot},$$

$$\rho \gtrsim 10^{12-15} \text{ g cm}^{-3}$$

$$T \sim \text{qualche } 10 \text{ MeV}$$

- ▶ **disco accrescimento**

$$M \sim 10^{-3} - 0.2 M_{\odot}$$

$$Y_e \lesssim 0.20 \left(Y_e = \frac{n_e}{n_B} \approx \frac{n_p}{n_p + n_n} \right)$$

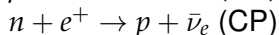
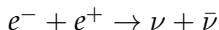
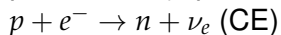
$$T \sim \text{qualche MeV}$$

$$t_{\text{disco}} \lesssim 0.5 \text{ sec}$$

Interazioni ν -materia nella post-coalescenza di BSN

- ▶ ν : interazione debole (processi carichi & neutri)

- ▶ produzione (e possibilmente assorbimento: “ \leftarrow ”):



- ▶ scattering:



tassi produzione ν : incrementati da alte temperature & densità

- ▶ $R_{CE} \propto (\rho Y_e) T^5 F_4(\mu_e/T)$ $R : [\#/s]$

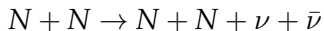
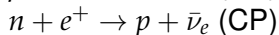
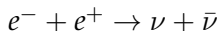
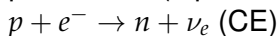
- ▶ $R_{CP} \propto (\rho(1 - Y_e)) T^5 F_4(-\mu_e/T)$

cf. Rosswog & Liebendörfer 03

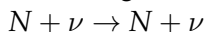
Interazioni ν -materia nella post-coalescenza di BSN

▶ ν : interazione debole (processi carichi & neutri)

▶ produzione (e possibilmente assorbimento: “←”):



▶ scattering:



tassi produzione ν : incrementati da alte temperature & densità

tassi scattering/assorbimento ν :

sezione d'urto \leftrightarrow libero cammino medio

$$\sigma_\nu \sim \sigma_0 \left(\frac{E_\nu}{m_e c^2} \right)^2 \quad \sigma_0 = \frac{4G_F^2 (m_e c^2)^2}{\pi (\hbar c)^4} \approx 1.76 \times 10^{-44} \text{ cm}^2$$

$$\lambda_\nu \approx \frac{1}{n_{\text{target}} \sigma_\nu} \sim 2.36 \times 10^3 \text{ cm} \left(\frac{\rho}{10^{14} \text{ g/cm}^3} \right)^{-1} \left(\frac{E_\nu}{10 \text{ MeV}} \right)^{-2} \ll R_{\text{SN}}$$

Ruolo dei ν nella post-coalescenza di BSN

- ▶ scambiare energia e momento con materia
- ▶ rapporto tra n e p ($\rightarrow Y_e$)
 $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
 $n + e^+ \rightarrow p + \bar{\nu}_e$

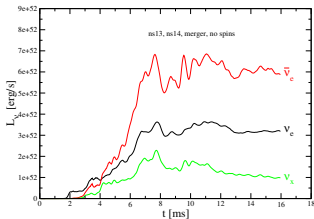
luminosità dei ν

- ▶ $L_\nu \sim 10^{53}$ erg/s
- ▶ neutrini termici
 $E_\nu \sim 10 - 15$ MeV
- ▶ abbondanza di $n \rightarrow L_{\bar{\nu}_e} \gtrsim L_{\nu_e}$

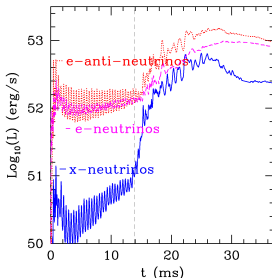
trattamento ν molto complesso

- ▶ idrodinamica radiativa in multi-D & GR

Shibata+11, Foucart+15,18; Perego+15, Radice+16,...

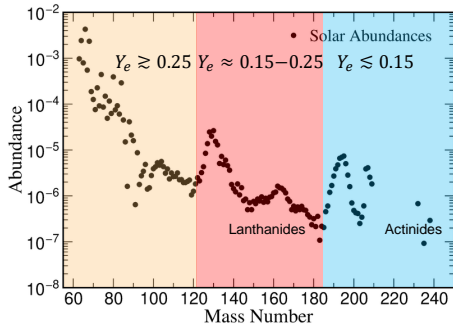


luminosità da simulazioni numeriche di
coalescenza di BSN, Rosswog+13, Neilsen+15



Ejecta dalla coalescenza di BSN

- ▶ piccola frazione di materia espulsa dal sistema: **ejecta**
- ▶ espulsione attraverso diversi canali
 - ▶ differenti meccanismi di espulsione e tempi scala
 - ▶ differenti proprietà:
quantità, velocità, $Y_e \rightarrow$ composizione \rightarrow opacità fotoni, κ



Fonte: G. Martinez-Pinedo

▶ presenza di lantanidi

- ▶ alta opacità ($\kappa \sim 10 \text{ cm}^2/\text{g}$)
- ▶ picco ~ 1 settimana
- ▶ kilonova rossa

▶ assenza di lantanidi

- ▶ bassa opacità ($\kappa \lesssim 1 \text{ cm}^2/\text{g}$)
- ▶ picco ~ 1 giorno
- ▶ kilonova blu

Ejecta dalla coalescenza di BSN

- ▶ piccola frazione di materia espulsa dal sistema: **ejecta**
- ▶ espulsione attraverso diversi canali
 - ▶ differenti meccanismi di espulsione e tempi scala
 - ▶ differenti proprietà:
quantità, velocità, $Y_e \rightarrow$ composizione \rightarrow opacità fotoni, κ

The image shows a standard periodic table of elements. The elements are color-coded into groups: Alkali Metals (red), Alkaline Earths (orange), Transition Metals (yellow), Lanthanides (green), Actinides (blue), and Noble Gases (purple). The lanthanide and actinide series are shown as separate rows below the main table.

- ▶ **presenza di lantanidi**
 - ▶ alta opacità ($\kappa \sim 10 \text{ cm}^2/\text{g}$)
 - ▶ picco ~ 1 settimana
 - ▶ kilonova rossa
- ▶ **assenza di lantanidi**
 - ▶ bassa opacità ($\kappa \lesssim 1 \text{ cm}^2/\text{g}$)
 - ▶ picco ~ 1 giorno
 - ▶ kilonova blu

Canali di emissione durante e post-coalescenza

▶ ejecta dinamica

Freiburghaus+98, Korobkin+12, Bauswein+13,
Hotokezaka+13, Radice+16...

- ▶ shock ed effetti mareali
- ▶ $10^{-4} - 10^{-3} M_{\odot}$
- ▶ veloce: $v \sim 0.2 - 0.3 c$
- ▶ $Y_e = Y_e(\theta)$

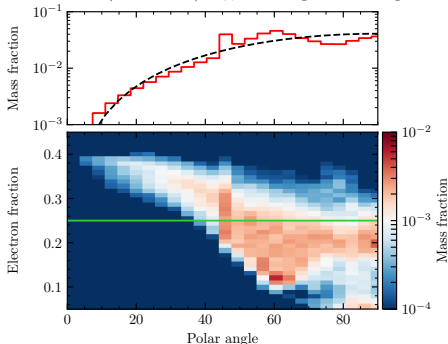
▶ evaporazione del disco

- ▶ viscosità e ricombinazione nucleare
- ▶ fino a qualche $10^{-2} M_{\odot}$
- ▶ lento: $v \lesssim 0.1 c$
- ▶ Y_e : vario e spazialmente omogeneo

Metzger+10, Fernandez&Metzger13, Just+15,
Lippuner+17, Siegel&Metzger17, Fujibayashi+ 18...

▶ venti neutrinici

SFHo: $(1.35 + 1.35) M_{\odot}$; ν cooling and heating



Distribuzione angolare di Y_e da ejecta dinamica.

Perego, Radice, Bernuzzi 17 ApJL, Radice+ in prep

Canali di emissione durante e post-coalescenza

▶ **ejecta dinamica**

Freiburghaus+98, Korobkin+12, Bauswein+13,

Hotokezaka+13, Radice+16...

- ▶ shock ed effetti mareali
- ▶ $10^{-4} - 10^{-3} M_{\odot}$
- ▶ veloce: $v \sim 0.2 - 0.3 c$
- ▶ $Y_e = Y_e(\theta)$

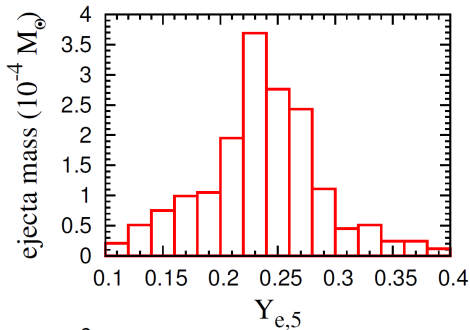
▶ **evaporazione del disco**

- ▶ viscosità e ricombinazione nucleare
- ▶ fino a qualche $10^{-2} M_{\odot}$
- ▶ lento: $v \lesssim 0.1 c$
- ▶ Y_e : vario e spazialmente omogeneo

Metzger+10, Fernandez&Metzger13, Just+15,

Lippuner+17, Siegel&Metzger17, Fujibayashi+ 18...

▶ **venti neutrinici**

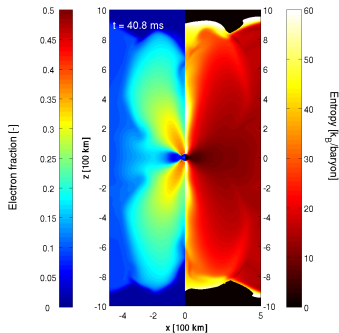
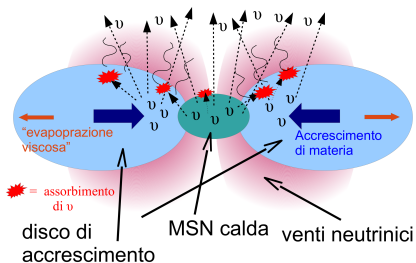


Distribuzione di Y_e da evaporazione del disco.

Wu+ 16 MNRAS

Venti neutrini da coalescenza di BSN

- ▶ dovuta al riassorbimenti di ν dentro il disco
- ▶ $t_{\text{ej,vento}} \sim$ qualche 10 ms e $v_{\text{ej,vento}} \lesssim 0.1 c$
- ▶ $M_{\text{ej,wind}} \lesssim$ qualche $10^{-3} M_{\odot}$
- ▶ emissione polare, $Y_e \gtrsim 0.3 \rightarrow$ bassa opacità ($\kappa \lesssim 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)
 \rightarrow emissione blu di kilonova, con picco a 1 giorno

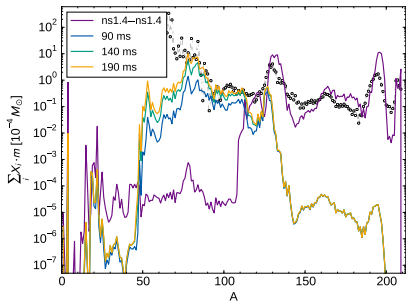


Perego+ 2014, MNRAS; Martin, AP + 2015, ApJ

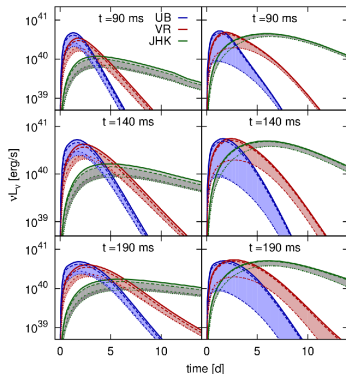
Frazione elettronica ed entropia nel vento

Venti neutrini da coalescenza di BSN

- ▶ dovuta al riassorbimenti di ν dentro il disco
- ▶ $t_{ej,vento} \sim$ qualche 10 ms e $v_{ej,vento} \lesssim 0.1 c$
- ▶ $M_{ej,wind} \lesssim$ qualche $10^{-3} M_{\odot}$
- ▶ emissione polare, $Y_e \gtrsim 0.3 \rightarrow$ bassa opacità ($\kappa \lesssim 1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$)
 \rightarrow emissione blu di kilonova, con picco a 1 giorno



nucleosintesi: dinamica (viola) + venti (gialla, verde, blu)

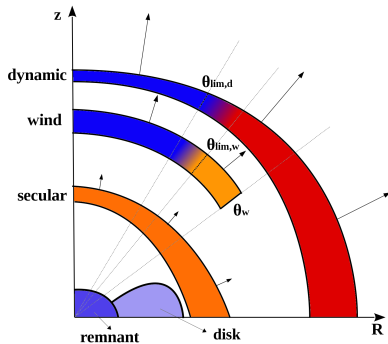


curve di luce (Sx: vento, Dx: vento + dinamici)

Perego+ 2014, MNRAS; Martin, AP + 2015, ApJ

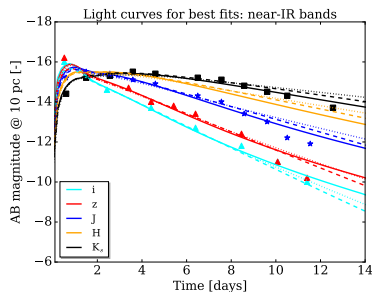
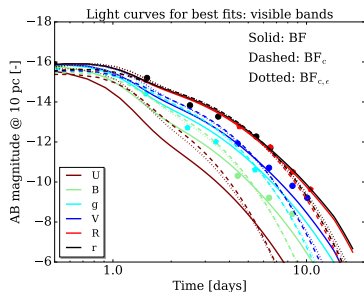
Interpretazione di AT2017gfo

- ▶ AT2017gfo: controparte EM di GW170817
 - ▶ componente UV/O, brillante, con picco a ~ 1 giorno
 - ▶ componente IR, brillante, con picco a ~ 5 giorno
- ▶ interpretazione: kilonova associata a coalescenza di BSN e alimentata da decadimento radioattivo da processo r
- ▶ possiamo spiegarla in termini dei diversi canali di ejecta?



- ▶ modello a 3 componenti ed anisotropo
- ▶ dipendenza esplicita dall'angolo di vista

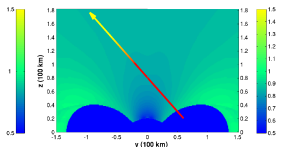
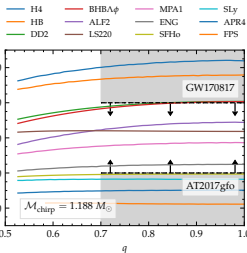
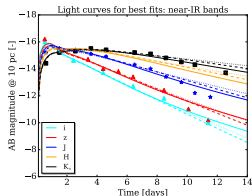
AT2017gfo: modello VS osservazioni



- ▶ esplorazione dello spazio dei parametri: modello riproduce le proprietà di AT2017gfo
- ▶ presenza di materiale rapido ($v \sim 0.3c$) e poco opaco ($\kappa \sim 1 \text{ cm}^2\text{g}^{-1}$)
- ▶ spiegazione proprietà globali di AT2017gfo
 - ▶ compatibili con ejecta a molte componenti e anisotropa
 - ▶ $M_{\text{ej,tot}} \sim 0.05M_{\odot}$, $\theta_{\text{obs}} \approx 30^\circ$, $M_{\text{disc}} \sim 0.1M_{\odot}$
 - ▶ presenza di materiale a bassa opacità: prova ruolo dei ν

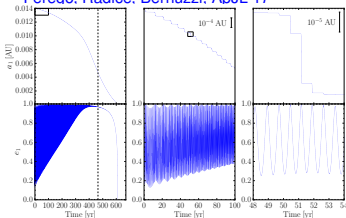
Conclusioni & prospettive

- ▶ reazioni deboli giocano ruolo centrale in coalescenza, espulsione di materia e emissione di kilonova da BSN
- ▶ AT2017gfo conferma natura a molte componenti e anisotropa dell'emissione EM, inclusa l'influenza dei ν
- ▶ analisi combinata GW-EM
- ▶ proprietà materia nucleare (EOS)
- ▶ ruolo oscillazioni neutriniche
- ▶ evoluzione elementi Universo



Zhu, Perego, McLaughlin PRD 16

Perego, Radice, Bernuzzi, ApJL 17



Bonetti, Perego+ 18, PASA