

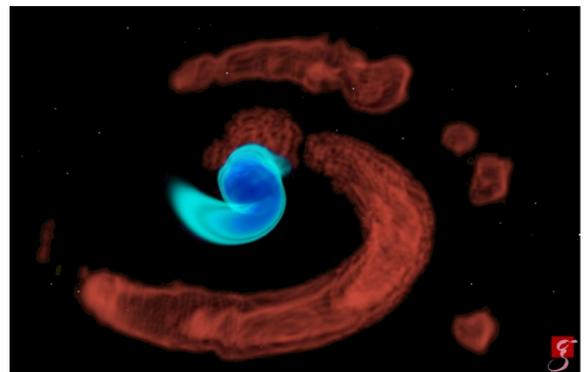
Predire il risultato finale della collisione tra stelle di neutroni che ha prodotto il segnale GW170817

La sorgente del segnale gravitazionale GW170817, molto probabilmente la fusione di un sistema binario di stelle di neutroni, è stata osservata anche elettromagneticamente, fornendo le prime osservazioni multi-messenger di questo tipo. In questo articolo studiamo la materia che viene espulsa dal sistema quando le due stelle di neutroni si fondono assieme. Si ritiene che questo materiale emesso subisca un “processo r” di nucleosintesi e generi un intenso bagliore, chiamato kilonova: un tale bagliore è in effetti stato osservato dagli astronomi. Possiamo ottenere informazioni su questo materiale espulso anche dai soli dati dell’onda gravitazionale usando modelli di sistemi di stelle di neutroni calibrati in base a simulazioni della fusione. In dettaglio, applichiamo questi modelli alle masse del sistema binario ricavate dalle misure di GW170817 per determinare la quantità di materia espulsa *in modo dinamico*, cioè durante la fusione. La distribuzione della massa espulsa in modo dinamico varia per GW170817 tra 1 millesimo e 1 centesimo della massa del Sole. La quantità di materia espulsa viene poi usata per stimare il suo contributo all’evoluzione corrispondente di luminosità e colore della kilonova. Inoltre, usiamo le nostre stime della massa espulsa in modo dinamico e dei tassi di fusione di sistemi binari di stelle di neutroni ricavati da GW170817 per porre dei limiti sul contributo di eventi come questo all’abbondanza di elementi pesanti come l’oro nel nostro universo.

Introduzione

La rivelazione di GW170817 dalla fusione di due [stelle di neutroni](#) (NS, dall’inglese neutron star) si distingue dalle precedenti rivelazioni di onde gravitazionali (GW, dall’inglese gravitational wave) da [buchi neri](#), poiché coinvolge non solo la fisica dello spaziotempo curvo, ma anche quella della materia super-densa. In particolare, la materia ricca di neutroni coinvolta nella collisione tra NS può produrre una controparte elettromagnetica. Si ritiene che parte di questa materia venga espulsa dal sistema durante la fusione e subisca il cosiddetto “processo-r” di nucleosintesi. Mentre la materia espulsa dalla fusione delle NS subisce reazioni nucleari, brilla intensamente. Nel caso di GW170817 questo brillare, tipicamente chiamato ‘[kilonova](#)’, è stato osservato da diversi gruppi di astronomi (per maggiori dettagli si consiglia il [riassunto scientifico delle osservazioni multimessenger](#)).

Usando solo i dati dell’onda gravitazionale GW170817, siamo in grado di porre dei limiti sulle proprietà della massa espulsa, che gli astronomi possono confrontare con le loro osservazioni elettromagnetiche (EM).



Una simulazione della fusione tra due stelle di neutroni con masse compatibili con quelle di GW170817. Credit: T. Dietrich, S. Ossokine, H. Pfeiffer, A. Buonanno/Max Planck Institute for Gravitational Physics/BAM Collaboration

Stima della massa espulsa

Si può predire la quantità di materia espulsa durante una fusione di due stelle di neutroni con simulazioni numeriche che risolvono le [equazioni di Einstein](#), che descrivono lo spazio-tempo curvo, assieme alle equazioni idrodinamiche relativistiche, che descrivono la materia nelle stelle di neutroni (possibilmente assieme anche ad altre equazioni che descrivono i campi magnetici o i [neutrini](#)). Queste simulazioni mostrano che la materia espulsa dipende da molti parametri; ma, per il caso che consideriamo, essa dipende principalmente dalle masse delle due stelle, dalle loro dimensioni e da quanto fortemente la loro materia è ad esse legata dalla loro stessa gravità. Più specificatamente, dipende dalla compattezza delle stelle – cioè quanto grandi sono in relazione alle masse – e dalle loro energie di legame – la quantità di energia necessaria per disgregare completamente la stella. Usiamo una formula di regressione che fornisce la massa del materiale emesso in base a queste proprietà delle stelle nel sistema binario ed è calibrata in base ai risultati di un centinaio di simulazioni numeriche della coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni. Queste predizioni prendono in considerazione solo la

materia espulsa *in modo dinamico*, cioè la materia emessa dal sistema durante la sua violenta fusione. Ulteriore materia può essere espulsa, su scale di tempi più lunghe dopo la fusione, da parte di venti provenienti dal disco di materia attorno a ciò che resta dopo la fusione. Questa tuttavia non è inclusa nelle simulazioni su cui si basa la formula di regressione, e perciò non la prendiamo in considerazione qui.

Le masse delle stelle di neutroni possono essere ricavate dalle osservazioni dell'onda gravitazionale. La compattezza e l'energia di legame delle stelle possono essere ricavate dalle loro masse usando un'equazione di stato che descrive il comportamento su larga scala della materia nella stella di neutroni (vedere il [riassunto dell'articolo scientifico di scoperta](#) per maggiori dettagli). Poiché la materia nelle stelle di neutroni è molto più densa di qualsiasi materia che possiamo studiare sulla Terra (a parte casuali collisioni di particelle), non siamo certi dell'equazione di stato. Pertanto prendiamo in considerazione una serie di predizioni teoriche. Alternativamente, possiamo usare le misure dell'onda gravitazionale sulle deformabilità mareali delle stelle di neutroni per ricavare la compattezza e l'energia di legame delle stelle usando formule di regressione calibrate su un ampio intervallo di equazioni di stato. Come discusso nel [riassunto dell'articolo scientifico di scoperta](#), la deformabilità mareale ci dice quanto la stella si deforma in risposta al campo gravitazionale della compagna e quindi ci dà informazioni sulla loro struttura interna.

Curve di luce

A seconda di come e quanta massa viene espulsa dal sistema di stelle di neutroni, la kilonova esibirà un diverso spettro elettromagnetico. Usiamo tre diversi modelli per calcolare i possibili segnali nell'ottico e nel vicino infrarosso (dette [curve di luce](#)) che potrebbero essere osservati in base a ciò che ricaviamo sulla massa espulsa. Gli astronomi che hanno fatto osservazioni EM della kilonova di GW170817 possono confrontare le loro osservazioni con queste predizioni al fine di verificare quei modelli e testare l'ipotesi che la materia venga espulsa solo in modo dinamico. Con GW170817 siamo in grado di fare tali confronti per la prima volta, una delle molte possibilità eccitanti di questo campo appena inaugurato della astronomia multi-messenger.

Il processo-r

Il processo di rapida cattura neutronica, o "processo-r", è uno dei canali attraverso cui possono essere creati elementi più pesanti del ferro; è stata anche avanzata l'ipotesi secondo cui precedenti fusioni tra NS possano essere state la sorgente degli elementi creati in processi-r che vediamo oggi nella nostra galassia, inclusi tutti quelli che abbiamo qui sulla Terra. Ci si aspetta che anche le supernovae contribuiscano a queste abbondanze, anche se non si sa se le supernovae o le fusioni tra NS siano l'ambiente dominante per i processi-r. Se con le fusioni tra NS si dovesse rendere conto di tutti gli elementi prodotti con processi-r che abbiamo osservato, esse dovrebbero espellere parecchia materia risultante da processi-r e dovrebbero avvenire relativamente spesso nell'universo. Dai nostri dati di GW170817 ricaviamo dei limiti sia sulla massa espulsa sia sulla frequenza delle fusioni tra NS, dati che possono essere usati per stimare il contributo delle fusioni tra NS alla abbondanza di processi-r. Assumendo che tutte le fusioni tra NS abbiano proprietà simili a quelle che ricaviamo per GW170817, otteniamo che se $\geq 10\%$ della massa espulsa in modo dinamico è convertita in elementi con processi-r, allora le fusioni tra NS potrebbero rendere conto di tutte le abbondanze osservate di elementi prodotti con processi-r. Future osservazioni di onde gravitazionali da fusioni tra NS aiuteranno a risolvere il mistero che perdura da lunga data su dove vengano creati la maggior parte degli elementi da processi-r.

Glossario

Processo-r: Il processo di rapida cattura neutronica. Un modo di formare elementi più pesanti del ferro attraverso l'assorbimento di molti neutroni da parte di elementi più leggeri, formando così isotopi instabili radioattivi. Alcuni dei neutroni decadono poi in protoni (via [decadimento beta](#)), formando progressivamente elementi sempre più pesanti fino a raggiungere un isotopo stabile.

Curva di luce: la luminosità di una sorgente in funzione del tempo per un dato colore del filtro.

Astronomia multi-messenger: Usare i dati delle onde elettromagnetiche, delle onde gravitazionali e delle astro-particelle in modo combinato per studiare oggetti e fenomeni astrofisici nell'Universo.

Figure dall'articolo scientifico

Per maggiori informazioni su queste figure si rimanda all'articolo completo, disponibile [qui](#)

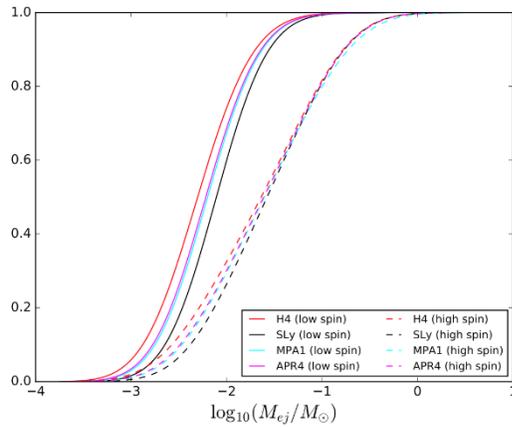


Figura 1: Queste curve mostrano la probabilità (asse verticale) che la materia espulsa dal sistema sia uguale o superiore a quella mostrata sull'asse orizzontale. Le linee continue valgono sotto l'ipotesi che le stelle di neutroni in collisione abbiano spin basso (o nullo), mentre per le linee tratteggiate si ammette la possibilità di stelle di neutroni con spin maggiori. I colori denotano assunzioni diverse sulla compattezza e energia di legame delle stelle di neutroni. Nel caso di basso spin, il materiale espulso è non superiore a 1 centesimo della massa del Sole.

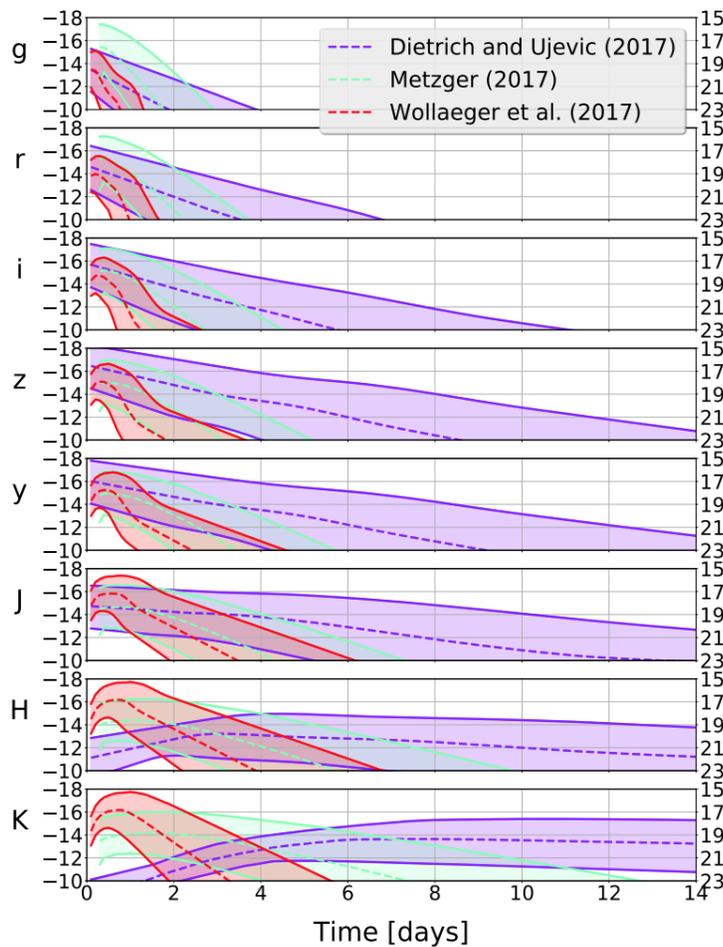


Figura 2: Le curve di luce qui a fianco mostrano quanta luce vediamo sulla Terra prodotta dalla massa espulsa dalla fusione tra stelle di neutroni. Ciascuna figura mostra la luminosità predetta della sorgente (asse verticale) a un dato istante (asse orizzontale) per un diverso colore di luce osservato nei nostri telescopi (un 'filtro'). Le figure sono ordinate dai filtri blu/verde in alto ai filtri sul vicino infrarosso in basso (questa è la figura 3 nel nostro [articolo scientifico](#)).

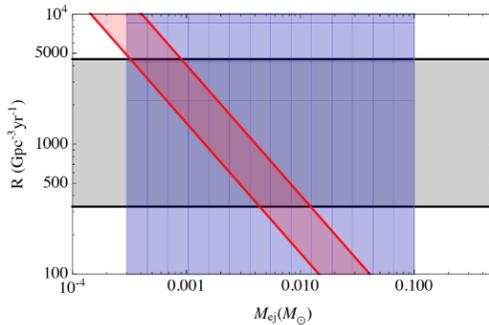


Figura 3: Questo grafico mostra che le fusioni tra stelle di neutroni potrebbero essere il luogo dominante per la produzione di alcuni elementi pesanti. L'asse verticale mostra quanto spesso avvengono le fusioni tra stelle di neutroni (il 'tasso' delle fusioni), e l'asse orizzontale mostra quanta materia è stata espulsa dalla fusione di sistemi di stelle di neutroni come GW17817. La fascia grigia mostra il tasso ricavato da GW170817 e la fascia blu mostra ciò che gli astronomi pensano siano valori ragionevoli di massa espulsa dato che scopriamo sorgenti luminose con i telescopi. La banda rossa, nella regione di sovrapposizione, mostra i casi possibili se le fusioni tra stelle di neutroni rendono conto di tutti gli elementi da processi-r osservati nel sistema solare. La sovrapposizione delle tre bande indica che le fusioni tra stelle di neutroni potrebbero essere verosimilmente la sorgente principale di elementi da processi-r in base ai nostri dati su GW170817. (Questa è la figura 5 nel nostro [articolo scientifico](#))

Visitate i nostri siti web:

<http://www.ligo.org>

<http://www.virgo-gw.eu>

[Qui](#) potete leggere l'articolo completo, pubblicato **Astrophysical Journal Letters**.

Leggete di più nei nostri articoli sulla scoperta di GW170817:

[Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger](#)

[GW170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral](#)

[Gravitational Waves and Gamma Rays from a Binary Neutron Star Merger: GW170817 and GRB 170817A](#)

[A standard siren measurement of the Hubble constant with GW170817](#)

[Search for post-merger gravitational waves from the remnant of the binary neutron star merger GW170817](#)

[Estimating the Contribution of Dynamical Ejecta in the Kilonova Associated with GW170817](#)

[On the Progenitor of Binary Neutron Star Merger GW170817](#)

[GW170817: Implications for the Stochastic Gravitational-Wave Background from Compact Binary Mergers](#)

[Search for High-energy Neutrinos from Binary Neutron Star Merger GW170817 with ANTARES, Ice-Cube, and the Pierre Auger Observatory](#)