

Travolti dalle onde

I primi passi della rete di rivelatori gravitazionali

di Viviana Fafone

Per secoli la conoscenza dell'universo si è fondata sullo studio della radiazione elettromagnetica emessa dagli oggetti celesti (vd. p. 27, ndr). Grazie alla prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali da parte della collaborazione Ligo/Virgo del 14 settembre 2015, oggi si è aperta una nuova finestra osservativa sull'universo, complementare alle osservazioni elettromagnetiche, che si avvale dei messaggi portati da queste minuscole vibrazioni dello spaziotempo.

Mentre gran parte delle onde elettromagnetiche sono prodotte da molecole e atomi eccitati, le onde gravitazionali sono emesse da movimenti collettivi di materia e per questo motivo hanno lunghezze d'onda molto più grandi rispetto alle onde che compongono lo spettro elettromagnetico. Inoltre, mentre la radiazione elettromagnetica può essere facilmente schermata, quella gravitazionale interagisce assai debolmente

con la materia. Se da un lato questa proprietà la rende estremamente difficile da rivelare, dall'altro le consente di viaggiare fino a noi senza essere attenuata apprezzabilmente dalla materia che incontra lungo il suo cammino. Le onde gravitazionali sono dunque portatrici di informazioni inaccessibili alle onde elettromagnetiche.

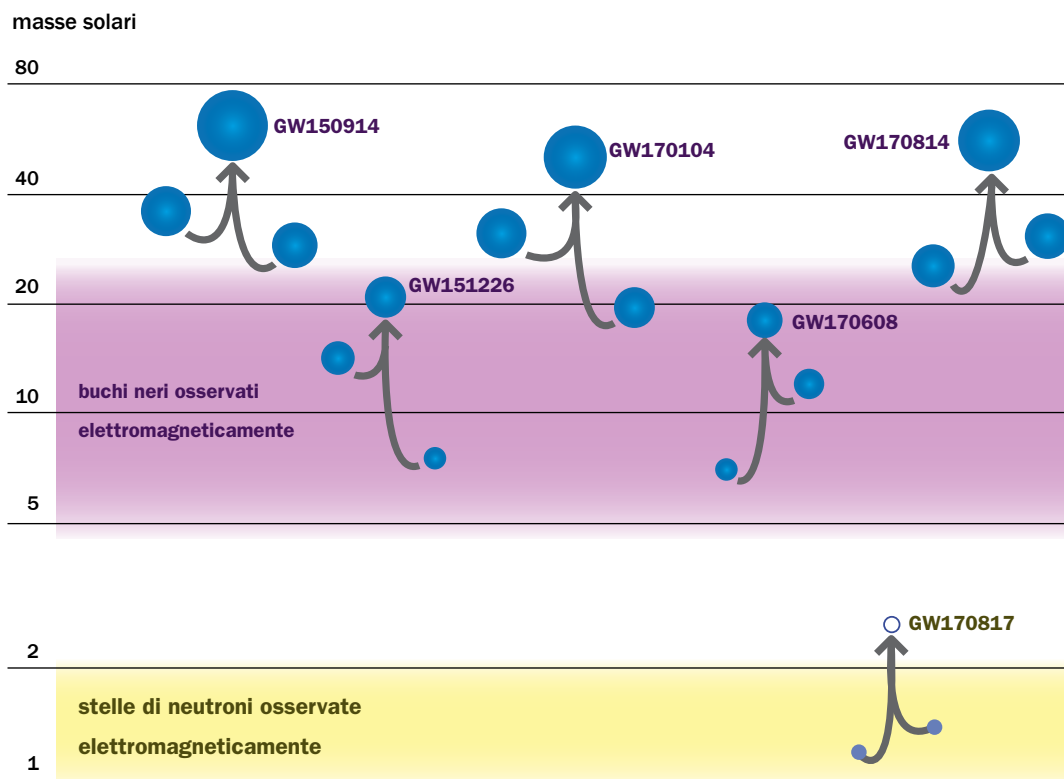
Le prime misure di segnali gravitazionali da parte degli interferometri Ligo e Virgo ci hanno consentito di studiare i buchi neri in sistemi binari. Nell'evoluzione temporale dell'onda gravitazionale da essi emessa è infatti codificata l'informazione sulla natura della sorgente e sui suoi parametri fondamentali, in questo caso la massa e lo spin (vd. in Asimmetrie n. 21 p. 13, ndr).

Dalla prima rivelazione ad oggi sono state osservate sei coalescenze di sistemi binari di buchi neri, di cui cinque confermate con grande significatività statistica (vd. fig. b). Le

a.
L'interferometro Virgo, nei pressi di Cascina (Pisa). La sua entrata in funzione il primo agosto 2017 ha rappresentato una svolta decisiva nelle capacità osservative della rete di rivelatori interferometrici.



b.
 Le masse dei sistemi binari rivelati da Ligo e Virgo, confrontate con quelle note tramite osservazioni elettromagnetiche, indicate dalle bande colorate.
 Il corpo risultante dalla fusione delle due stelle di neutroni potrebbe essere un'altra stella di neutroni immediatamente collassata in un buco nero.



masse dei buchi neri progenitori arrivano fino a circa 40 volte la massa del Sole, tipicamente più del doppio rispetto a quelle precedentemente note tramite le osservazioni della radiazione X emessa dalla materia orbitante attorno al corpo celeste. I segnali gravitazionali hanno messo quindi in evidenza una nuova famiglia di buchi neri, ponendo nuovi interrogativi sul loro meccanismo di formazione.

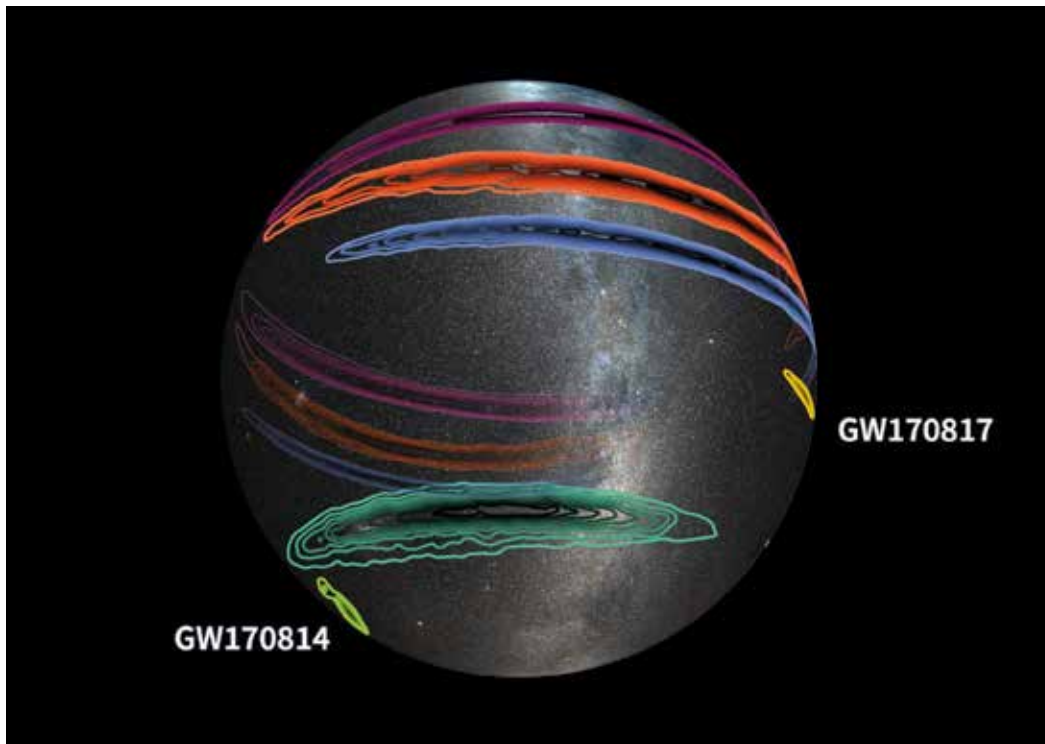
La conoscenza accurata della forma d'onda prodotta da questi sistemi binari li rende dei formidabili laboratori per la verifica della relatività einsteiniana in regime di campo gravitazionale forte e grandi velocità (si pensi, ad esempio, che al momento della collisione i due buchi neri della prima rivelazione si muovevano con una velocità relativa pari a circa metà della velocità della luce). Dalla misura del segnale gravitazionale emesso è anche possibile ricavare la distanza della sorgente dalla Terra: il sistema binario più lontano da noi finora osservato si trovava a quasi tre miliardi di anni luce.

L'entrata in funzione di Virgo, avvenuta il primo agosto 2017, ha rappresentato una svolta decisiva nelle capacità osservative della rete di rivelatori interferometrici. Grazie all'aggiunta di un terzo strumento, è infatti possibile migliorare drasticamente la

capacità di localizzazione nel cielo della sorgente. Ad esempio, nel caso della fusione di due buchi neri registrata il 14 agosto del 2017 dagli interferometri Ligo e Virgo, il sistema binario è stato localizzato entro un'area di circa 60 gradi quadrati, da confrontare con i 1200 individuati dai soli interferometri Ligo (vd. fig. c). Non solo, con tre interferometri è anche possibile fare una stima degli "stati di polarizzazione" dell'onda (cioè delle sue direzioni di oscillazione): la relatività generale ne prevede due, ma altre teorie metriche della gravitazione ne ammettono fino a sei. Si capisce, quindi, come le onde gravitazionali possano essere uno strumento per discriminare tra diverse teorie della gravità.

La capacità di puntamento nel cielo è stata determinante per un altro evento, registrato anch'esso durante l'agosto 2017. Il giorno 17, alle 14:41, Virgo e Ligo hanno osservato per la prima volta la collisione di due stelle di neutroni a 130 milioni di anni luce da noi, e sono riusciti a indentificarne la posizione nel cielo con una precisione di circa 30 gradi quadrati.

Il segnale gravitazionale è stato seguito a breve distanza (circa 1,7 secondi) da un lampo di raggi gamma registrato dai satelliti Fermi e Integral, confermando così l'associazione di questi



c. Incertezza nelle aree di provenienza delle onde gravitazionali rivelate da Ligo e Virgo. Le linee colorate indicano le probabilità associate all'area inclusa (dal 90% per la linea più esterna, al 10% per la linea più interna). Le aree più piccole, indicate dalle sigle, si riferiscono ai due segnali misurati con tutti e tre gli interferometri (i due Ligo e Virgo): GW170814 è il segnale proveniente dal sistema binario di buchi neri, GW170817 quello proveniente dal sistema binario di due stelle di neutroni. I due eventi registrati da Ligo e Virgo mostrano un'incertezza oltre 10 volte inferiore rispetto agli eventi registrati dai soli interferometri Ligo.

eventi altamente energetici con la coalescenza di stelle di neutroni (vd. p. 31, ndr). L'allerta lanciata da Ligo e Virgo è stata raccolta da decine di telescopi che sono stati puntati verso la regione di cielo incriminata, hanno identificato la galassia ospite (NGC 4993) e hanno seguito l'evoluzione dell'emissione elettromagnetica in tutte le bande spettrali per molte settimane. Il sistema binario osservato il 17 agosto è stato il primo che ha prodotto una controparte elettromagnetica, grazie alla presenza di stelle di neutroni, e ha di fatto segnato la nascita dell'astronomia multimessaggera.

Siamo solo all'inizio di una grande avventura. Ligo e Virgo rientreranno in misura nei primi mesi del 2019. Nuovi segnali verranno rivelati, magari provenienti da sorgenti finora non sondate: sistemi binari misti costituiti da buchi neri e stelle di neutroni, singole stelle di neutroni in rapida rotazione, supernovae. Alcuni di questi eventi gravitazionali potranno essere accompagnati non solo dall'emissione di radiazione elettromagnetica, ma anche di neutrini, realizzando così le condizioni per nuove e più ampie osservazioni multimessaggera (vd. p. 23, ndr).

E nel futuro più lontano? Programmi di miglioramento degli attuali interferometri sono già avviati, mentre, in parallelo, la comunità internazionale si sta muovendo verso la terza generazione di interferometri terrestri. In Europa, l'Einstein Telescope potrà portare un miglioramento di sensibilità di circa dieci volte rispetto ai rivelatori attuali, aprendo le porte all'astronomia gravitazionale

di precisione e allo studio dettagliato di possibili violazioni della gravità einsteiniana in condizioni di campo forte. La promessa ultima, insita nella natura elusiva di questa radiazione, sarà l'osservazione del "fondo stocastico" di onde gravitazionali, che ci consentirà di risalire indietro nel tempo, fino ai primissimi istanti dopo il Big Bang.

Biografia

Viviana Fafone è professore di fisica presso l'Università degli Studi di Roma "Tor Vergata". La sua attività di ricerca si rivolge principalmente agli esperimenti per la rivelazione di onde gravitazionali, con interessi anche per la fisica del fondo cosmico di microonde. Ha collaborato agli esperimenti Explorer al Cern e Nautilus presso i Laboratori di Frascati dell'Infn. Dal 2006 partecipa all'esperimento Virgo, di cui è il responsabile nazionale.

Link sul web

<http://public.virgo-gw.eu/language/en/>

<https://www.ligo.caltech.edu/>

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

<http://www.einstein-online.info/>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2018.25.5