
Ascoltando l'Universo di onde gravitazionali: implicazioni e prospettive dopo la scoperta

Imagination is more important than knowledge. Knowledge is limited to all we now know and understand, while imagination embraces the entire world, and all there ever will be to know and understand.

Albert Einstein

Paola Leaci Dipartimento di Fisica - Università "La Sapienza di Roma e INFN Sezione di Roma

La data dello scorso 14 Settembre 2015 ha ufficialmente segnato l'inizio di una nuova era, quella dell'*Astronomia Gravitazionale*. In questo articolo, dopo una breve introduzione sul concetto di onde gravitazionali, strumentazione utilizzata per la loro rivelazione e sorgenti astrofisiche, saranno illustrati i dettagli della prima osservazione diretta dell'esistenza di onde gravitazionali, evidenziando le ricadute in am-

bito scientifico e tecnologico derivanti da questa sensazionale scoperta.

Cosa sono le onde gravitazionali?

Le onde gravitazionali sono increspature dello spazio-tempo, predette dalla Teoria della Relatività Generale di Einstein nel 1916, che si propagano alla velocità della luce [1]. Esse sono prodotte da accelerazioni di massa a simmetria non assiale, in maniera analoga a cariche elettriche che, in moto accelerato, emettono onde

elettromagnetiche che viaggiano a velocità della luce. Le due tipologie di onde, entrambe trasversali, sono comunque piuttosto differenti. Le onde gravitazionali sono caratterizzate da due stati di polarizzazione, denotati come “+” e “×”, che differiscono tra loro per una rotazione di 45 gradi attorno all’asse di propagazione, mentre le onde elettromagnetiche differiscono tra loro per una rotazione di 90 gradi [2].

Quando un’onda gravitazionale attraversa la materia, la distanza spazio-temporale tra i suoi costituenti viene modificata di una quantità estremamente piccola. L’effetto di un’onda gravitazionale che attraversa un anello di particelle libere è schematizzato in Fig. 1 notevolmente amplificato per essere più chiaro. L’anello di particelle diventa una delle ellissi e ritorna ad essere un cerchio durante la prima metà del ciclo, diventa quindi l’altra ellisse e ritorna ad essere un cerchio durante la successiva metà.

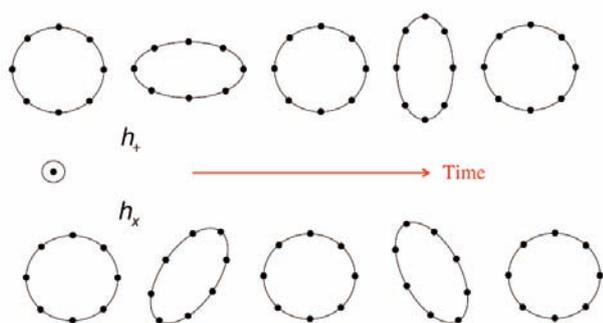


Figura 1: Risposta di un anello di particelle libere (punti in figura), in funzione del tempo, ad onde gravitazionali polarizzate “+” (h_+) e “×” (h_x), che si propagano perpendicolarmente al piano della figura.

A differenza delle onde elettromagnetiche, le onde gravitazionali interagiscono in maniera trascurabile con la materia, viaggiando quasi indisturbate dalle zone più remote del cosmo a noi, trasportando quindi tutta quell’informazione che le onde elettromagnetiche non trasportano.

La quantità di energia emessa sotto forma di onde gravitazionali da un qualsiasi sistema meccanico costruito dall’uomo è estremamente piccola, pertanto molto difficile da misurare. Per questa ragione si preferisce osservare la radiazione gravitazionale emessa da eventi catastrofici e da sorgenti astrofisiche.

Rivelatori di onde gravitazionali

Il pioniere della rivelazione di onde gravitazionali è stato Joseph Weber negli anni 1960 [3], che ha sviluppato il primo rivelatore a barra risonante e più tardi ha investigato la più promettente interferometria laser. I primi rivelatori interferometrici sono stati suggeriti negli anni 1960 [4] e 1970 [5] e, grazie a studi riguardanti la caratterizzazione del rumore, successivamente migliorati [6, 7], fino a diventare strumenti a larga banda estremamente sensibili in grado di rivelare onde gravitazionali [8, 9, 10, 11].

Un rivelatore interferometrico di onde gravitazionali è costituito da due bracci lunghi da 3 a 4 km, posti a 90 gradi l’uno dall’altro e alla cui estremità sono posizionate delle masse libere, gli specchi, su cui viene riflessa la radiazione laser che percorre entrambi i bracci. Un’onda gravitazionale che attraversa un interferometro tenderà ad allungare leggermente un braccio e ad accorciare un altro, producendo uno sfasamento tra i due fasci di luce laser, che è direttamente proporzionale all’intensità dell’onda gravitazionale in transito. L’effetto di un’onda gravitazionale è quello di cambiare la distanza fra le estremità dei bracci dell’interferometro di una quantità ΔL . Le tecniche attuali permettono di identificare ΔL dell’ordine di 10^{-18} m, ossia distanze cento milioni di volte più piccole delle dimensioni di un atomo. L’intensità delle onde gravitazionali produce fenomeni proporzionali al rapporto $\Delta L/L$, risulta pertanto chiaro che bracci più lunghi consentono di rivelare segnali più deboli. Per rivelatori come LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory), con bracci lunghi $L = 4$ km, questo significa essere in grado di rivelare segnali con un’ampiezza (*strain*) pari a $h \sim \Delta L/L \sim 10^{-22}$. Per maggiori dettagli consultare per esempio [12].

I rivelatori interferometrici di onde gravitazionali attualmente esistenti sono:

- i rivelatori americani LIGO, situati uno ad Hanford (Washington) e l’altro a Livingston (Louisiana), entrambi (ribadiamo) con una lunghezza di bracci pari a 4 km;
- il rivelatore europeo Virgo, situato a Cascina (Italia), avente una lunghezza di bracci di 3 km;

- il rivelatore anglo-tedesco GEO, situato nelle vicinanze di Hannover (Germania), con bracci di lunghezza pari a 600 m.

Dopo il 2019 si prevede l'entrata in funzione del rivelatore giapponese KAGRA e successivamente al 2022 di quello americano-indiano LIGO-India. Pertanto, in un futuro molto vicino, questa rete mondiale di rivelatori, schematizzata in Fig. 2, garantirà un'ottima copertura del cielo. Questi rivelatori rappresentano gli interferometri di seconda generazione. Ad essi seguiranno rivelatori di terza generazione, sotterranei, criogenici e con lunghezza di bracci di decine di km, come i progetti futuri ed ambiziosi Einstein Telescope [13], LIGO Voyager e LIGO Cosmic Explorer [14].

Tutti i rivelatori descritti in questa sezione sono rivelatori terrestri caratterizzati da una risposta a larga banda, in grado di coprire l'intervallo di frequenze da ~ 10 Hz a ~ 2 kHz. Del tutto complementare è il futuro rivelatore spaziale LISA, che mira a rivelare onde gravitazionali a bassissima frequenza, da 0.1 mHz a 1 Hz, dato che non risente dei disturbi ambientali di origine terrestre di cui sono affetti i rivelatori in Fig. 2.

Sorgenti di onde gravitazionali e tecniche di analisi dati

Le sorgenti di onde gravitazionali si possono raggruppare in sorgenti impulsive, che generano segnali transienti di onde gravitazionali e sorgenti che danno luogo a segnali continui di onde gravitazionali.

Sorgenti impulsive

- Una delle principali sorgenti di onde gravitazionali è la *coalescenza di sistemi compatti*, formati da due stelle di neutroni, due buchi neri oppure una stella di neutroni ed un buco nero. Le fasi della coalescenza includono: (i) lo spiraleggiamento, in cui i due corpi orbitano uno attorno all'altro perdendo energia e momento angolare attraverso emissione di onde gravitazionali; i due oggetti pertanto si avvicinano, le loro velocità aumentano, come anche la frequenza ed ampiezza delle onde gravitazionali emesse

finchè i due oggetti si fondono durante la fase di (ii) *merger*, a cui segue l'ultima fase di (iii) *ringdown*, in cui si viene a formare l'oggetto compatto finale che emette onde gravitazionali ad una frequenza costante ed ampiezza che si smorza esponenzialmente.

Il metodo che si utilizza per rivelare onde gravitazionali emesse da questo tipo di sorgenti è basato sul cosiddetto filtro adattato (*matched filtering*), che consiste nel correlare i dati (raccolti dai rivelatori) con varie forme d'onda note (dette *templates*) ognuna delle quali descrive le caratteristiche del segnale mediante valori diversi di parametri non noti, quali le masse e gli *spins* degli oggetti compatti [15]. Chiaramente, maggiore è lo spazio dei possibili valori di masse e *spins* che si vogliono considerare e tanto più onerosa sarà la ricerca dal punto di vista computazionale. Questa tecnica è stata utilizzata per identificare il primo segnale gravitazionale, indicato con GW150914 (dato che si è verificato il 14 Settembre 2015), in maniera diretta [16].

- Altra sorgente di segnali transienti di onde gravitazionali è quella prodotta dal collasso asimmetrico della parte centrale di stelle massive durante eventi di supernovae, fenomeno durante il quale sono prodotti *bursts* di onde gravitazionali.

La tecnica che si utilizza per rivelare questo tipo di segnale si basa sulla ricerca di un eccesso di potenza nello spazio tempo-frequenza utilizzando una decomposizione *wavelet* [17]. Ricerche per questo tipo di segnale si svolgono analizzando anche la controparte elettromagnetica utilizzando, ad esempio, eventi di tipo *gamma-ray bursts* identificati da vari telescopi [18]. Anche la ricerca basata sulla decomposizione *wavelet* è stata utilizzata per identificare il primo segnale gravitazionale in maniera diretta [16].

Sorgenti continue

- Si prevede inoltre l'esistenza di un fondo stocastico di onde gravitazionali, sia di natura astrofisica, per esempio dovuto alla sovrapposizione

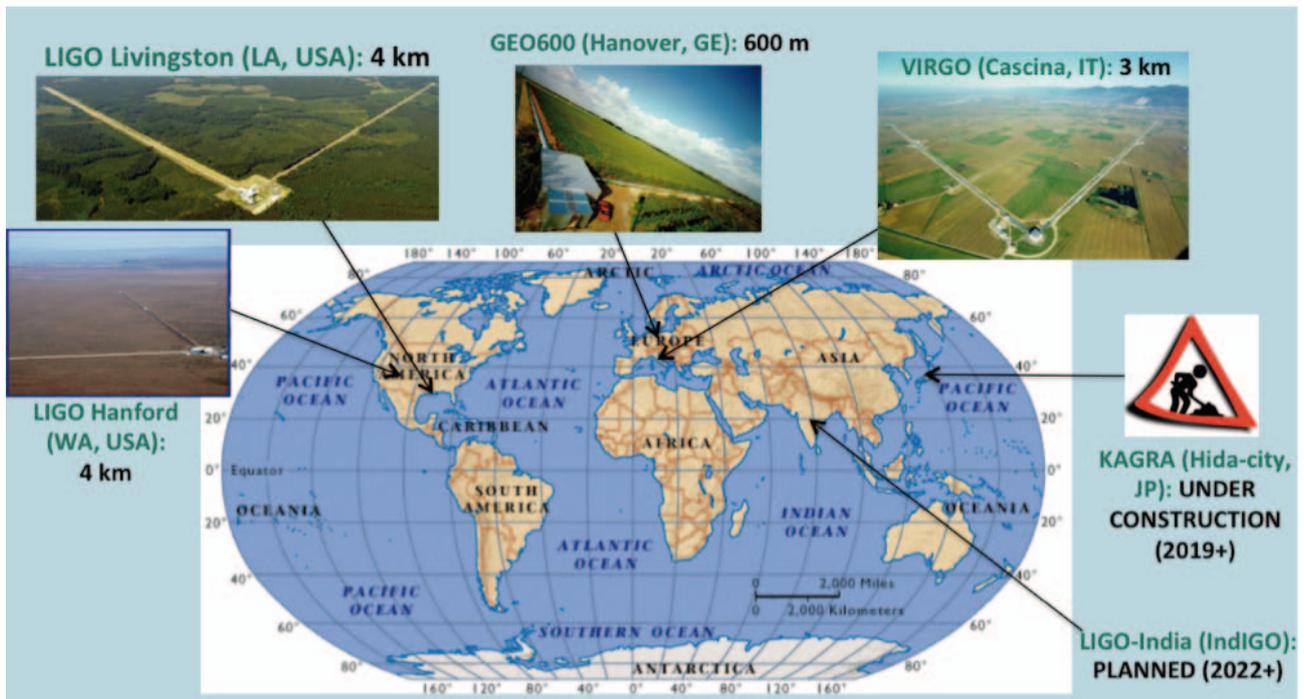


Figura 2: Rete di rivelatori interferometrici di onde gravitazionali.

posizione incoerente di segnali emessi da una vasta popolazione di sorgenti distanti, che di natura cosmologica. Quest'ultimo si pensa sia stato emesso nei primissimi istanti di vita dell'Universo e, se rivelato, ci fornirà preziose informazioni su ciò che è avvenuto all'era di Planck, ossia 10^{-43} s dopo il Big Bang. La metodologia di ricerca utilizzata per distinguere tale debole segnale dal rumore strumentale si basa sulla correlazione tra i dati raccolti almeno da due rivelatori. La rivelazione dell'evento GW150914 ha permesso di stimare un fondo stocastico di onde gravitazionali da binarie di buchi neri che risulta più alto delle predizioni precedenti, pertanto di possibile rivelazione con la rete di rivelatori avanzati LIGO e Virgo operanti a sensibilità ottimali [19].

- Una classe di sorgenti di onde gravitazionali molto promettente è rappresentata da stelle di neutroni (caratterizzate da una simmetria non assiale) rapidamente rotanti nella nostra Galassia. Si noti che un oggetto compatto a simmetria sferica non emette onde gravitazionali perchè la propria distribuzione di massa non ha una componente quadrupolare variabile nel tempo. La deviazione dalla simmetria sferica può per

esempio essere causata da stress magnetici interni per stelle di neutroni rapidamente rotanti o da accrescimento di materia su stelle di neutroni facenti parte di stelle binarie a raggi X di piccola massa. Sebbene questa tipologia di segnali non sia stata finora identificata, sono stati posti stringenti limiti superiori sull'intensità di onde gravitazionali emesse da stelle di neutroni isolate (come ad esempio [20, 21]) e sono stati raggiunti importanti risultati nel caso di onde gravitazionali emesse da stelle di neutroni facenti parte di sistemi binari (si vedano ad esempio le referenze [22, 23]).

La prima rivelazione diretta di onde gravitazionali

In seguito ad un importante aggiornamento, e conseguente miglioramento in sensibilità [12], i rivelatori LIGO sono tornati ad essere operativi con il *run* scientifico O1 durante il quale gli interferometri hanno raccolto dati tra Settembre 2015 e Gennaio 2016¹. Il 14 Settembre 2015 i due rivelatori LIGO hanno osservato per la prima volta un segnale di onde gravitazionali transiente pro-

¹Il rivelatore Virgo era in fase di aggiornamento in questo periodo, pertanto non utilizzabile per la presa dati.

dotto dalla fusione di due buchi neri, processo questo mai osservato finora, con masse pari a 36 e 29 volte quella del Sole e distanti più di un miliardo di anni luce da noi. In [16] (e nei riferimenti bibliografici in esso contenuti) sono stati riportati i dettagli di questa duplice scoperta, che riassumiamo nel seguito. Il segnale è caratterizzato da un aumento in ampiezza e frequenza, da 35 a 150 Hz in otto oscillazioni, per poi raggiungere il picco massimo, con l'ampiezza del segnale che raggiunge il valore massimo di 10^{-21} , come si può notare in Fig. 3. Le serie temporali illustrate sono state filtrate per rimuovere vari disturbi strumentali. Si possono notare le ampiezze (*strain*) osservate da Livingston (L1, prima colonna di destra), dove l'evento è giunto prima e da Hanford (H1, prima colonna di sinistra), 7 ms più tardi. Per una migliore visualizzazione, i dati di H1 sono stati spostati temporalmente di una tale quantità ed invertiti (in maniera tale da considerare le diverse orientazioni dei rivelatori) [16]. La seconda riga di Fig. 3 mostra le forme d'onda ottenute utilizzando la relatività numerica² per un sistema con parametri consistenti con quelli dell'evento GW150914 (linee solide) e le forme d'onda ricostruite con due metodi basati sul filtro adattato (utilizzando 150 000 *templates*) e la decomposizione *wavelet* (aree ombreggiate). Si può notare l'accordo tra le forme d'onda, che si traduce in una conferma dell'esattezza della teoria della Relatività Generale di Einstein [24]. Nella rappresentazione tempo-frequenza dell'ultima riga di Fig. 3 si nota che la frequenza del segnale aumenta nel tempo, indicando che il sistema osservato è costituito da due oggetti che ruotano uno intorno all'altro, avvicinandosi fino a fondersi in un unico oggetto. L'informazione su quanto massivi siano gli oggetti in questione viene fornita dal repentino aumento della frequenza, mentre il valore massimo di frequenza raggiunto ci dice quanto vicini (~ 240 km) fossero i due oggetti prima del contatto. La ragione che porta a dedurre che si tratti di due buchi neri è dovuta al fatto che, per raggiungere una frequenza orbitale di 75 Hz (metà della frequenza dell'onda gravitazionale), i due oggetti devono essere molto vicini e molto compatti. Gli unici

²Si utilizza la locuzione relatività numerica per indicare una soluzione numerica delle equazioni di Einstein per una situazione di accoppiamento forte della gravità.

oggetti che conosciamo essere tanto massivi e compatti sono i buchi neri (per maggiori dettagli consultare [16]). Inoltre, l'intensità del segnale gravitazionale che ha raggiunto la Terra fornisce informazioni sulla loro distanza e quindi su quanto tempo fa l'evento si è verificato, ossia poco meno di un miliardo e mezzo di anni fa, quando sul nostro pianeta iniziavano a comparire le prime cellule evolute in grado di utilizzare l'ossigeno.

Il violento processo di fusione osservato è caratterizzato da un rilascio di energia pari a tre volte la massa del Sole, ma risulta invisibile. Le onde gravitazionali, che ribadiamo essere in grado di attraversare indisturbate profondi strati di materia, risultano quindi l'unico messaggero in grado di fornire informazioni su ciò che è veramente accaduto, essendo assenti le emissioni di segnali elettromagnetici.

Precisiamo che entrambi i rivelatori LIGO operavano in condizioni stabili all'epoca dell'evento, consentendoci di escludere, dopo studi dettagliati, che l'evento in questione potesse esser dovuto a un disturbo strumentale. Inoltre è stata vagliata anche la possibilità che potesse trattarsi di una *blind injection*, ossia un segnale artificiale introdotto nel rivelatore a livello *hardware* per controllare l'abilità dei vari algoritmi di ricerca di identificare un segnale di questo tipo. Questa eventualità è stata banalmente esclusa dato che i rivelatori non operavano in tale modalità al tempo dell'evento.

Onde gravitazionali tra scienza e progresso tecnologico

Dal punto di vista scientifico, la scoperta delle onde gravitazionali, oltre che convalidare la teoria della Relatività Generale di Einstein, ci permette di comprendere quello che accade a densità sopranucleari nelle fusioni di stelle di neutroni, di conoscere il grado di asimmetria tipico della stessa stella di neutroni, di conoscere la densità di stelle di neutroni nell'universo e l'evoluzione dei sistemi binari oggetto di studio. Tutte queste informazioni saranno possibili dopo aver rivelato più segnali di onde gravitazionali, sia transienti che continui. La scoperta di un fondo stocastico cosmologico di onde gravitazionali ci

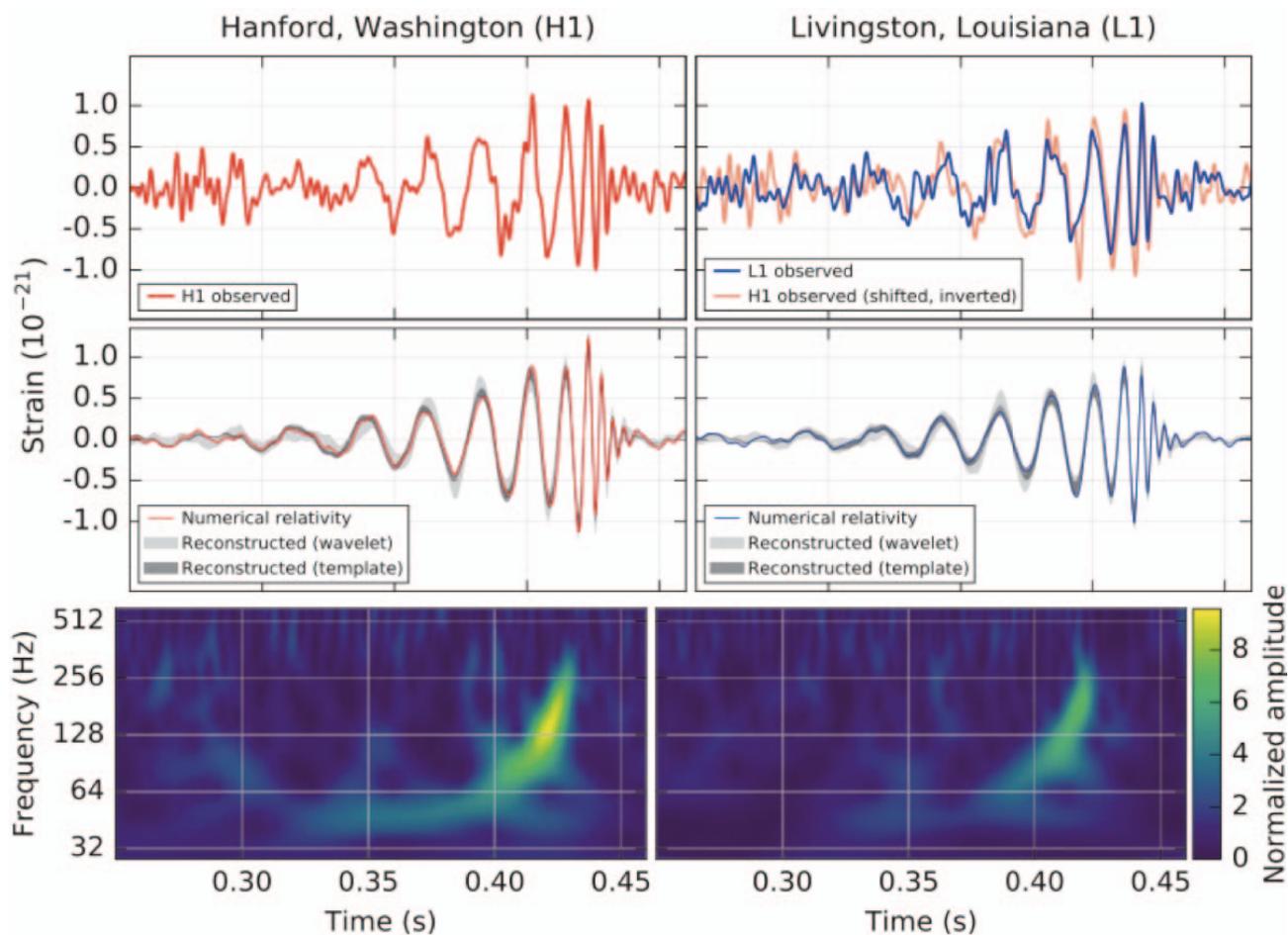


Figura 3: Evento GW150914 osservato dai rivelatori LIGO Hanford e Livingston [16]. Per maggiori dettagli fare riferimento al testo.

consentirebbe poi di guardare indietro nel tempo, di avere quindi accesso ai primissimi istanti di vita dell'Universo (ossia a circa 13.8 miliardi di anni fa), di conoscerne i dettagli e di osservare quest'ultimo diversamente da come abbiamo fatto finora.

Oltre alle tante implicazioni di carattere scientifico, ce ne sono varie anche in ambito tecnologico e pratico. La Relatività Generale di Einstein, che predice l'esistenza di onde gravitazionali, ha fornito per esempio un contributo essenziale alla messa a punto e al grado di precisione ottenibile dalle attuali reti satellitari GPS. Ci sono inoltre molte analogie tra alcune delle tecniche utilizzate per l'identificazione del segnale gravitazionale continuo e quelle utilizzate nel campo dell'elaborazione digitale delle immagini, che trovano impieghi rilevanti anche nel campo della videosorveglianza. Inoltre, il processo di estrazione del segnale gravitazionale è nella maggior parte dei casi molto complicato dal punto di vista com-

putazionale. Esso richiede familiarità con vari software e tecniche per creare algoritmi efficienti in grado di funzionare su processori paralleli. Alcuni di questi programmi e tecniche sono largamente utilizzati non solo nel mondo accademico, ma anche in molti settori dell'industria. Un esempio immediato riguarda la tecnologia superiore basata sulle unità di elaborazione grafica (note come GPU), che è ampiamente utilizzata in campi disparati come l'elaborazione di immagini scientifiche, l'esplorazione petrolifera e perfino in ambito finanziario. Vi sono inoltre sistemi di isolamento sismico e accelerometri ultrasensibili utilizzati per il funzionamento dei rivelatori interferometrici che possono trovare applicazioni anche in settori industriali per quanto riguarda i problemi connessi ad oscillazioni di ponti e grattacieli, o perfino in geofisica. Questi sono solo alcuni esempi per evidenziare la notevole ricaduta tecnologica e non solo scientifica.

Conclusioni e prospettive future

La comunità scientifica delle onde gravitazionali è da sempre consapevole della necessità di raccogliere dati con più rivelatori installati in siti lontani tra loro. Questo consente non solo di abbattere i disturbi ambientali mediante tecniche di coincidenza, ma di ottenere notevoli miglioramenti nella stima dei parametri e nella precisione dell'identificazione della posizione celeste di una certa sorgente astrofisica. Questo sarà fattibile in maniera ancora più efficace nei prossimi anni, quando la rete di rivelatori di onde gravitazionali diventerà più grande e ancora più sensibile. Ulteriori vantaggi saranno ottenuti dall'instaurare collaborazioni sempre più strette con i colleghi astronomi ed effettuare ricerche di onde gravitazionali che consentono di identificare una controparte elettromagnetica nei processi astrofisici osservati. Questo ci consentirà infatti di conoscere la fisica degli oggetti compatti e delle esplosioni violente.

Si ribadisce che la scoperta scientifica annunciata costituisce una importantissima conferma della teoria della Relatività Generale di Einstein. Essa apre un nuovo capitolo della Fisica delle Interazioni Fondamentali e inaugura l'Astronomia Gravitazionale, una nuova finestra di osservazione dell'Universo, che può fornire informazioni non altrimenti accessibili (neanche ai rivelatori elettromagnetici). Tale scoperta ricompensa gli sforzi ininterrotti di generazioni di fisici e il sostegno delle agenzie finanziatrici, che hanno avuto il coraggio di investire a lungo termine in un'impresa tanto accattivante, ma non di ovvia riuscita. La tenacia di noi fisici è stata certamente fomentata dalla brillante prova indiretta sull'esistenza di onde gravitazionali, che risale al 1974. In tale anno, infatti, Hulse and Taylor scoprirono la prima radio pulsar³ in un sistema binario, il cui periodo orbitale decresceva in perfetto accordo con quando predetto dalla teoria della Relatività Generale riguardo all'emissione di onde gravitazionali [25].

Con l'osservazione diretta del primo segnale gravitazionale transiente, lo scorso 14 Settembre

³Una pulsar è una stella di neutroni rotante, caratterizzata da valori molto elevati di campo magnetico ed emettente fasci di radiazione elettromagnetica, che si possono osservare a Terra come impulsi emessi ad intervalli di tempo molto regolari.

2015 si è aperta una finestra del tutto nuova sull'Universo. Rimangono tuttavia altre classi di segnali gravitazionali da rivelare e senza dubbio il miglioramento in sensibilità dei nostri rivelatori ed algoritmi di ricerca porterà grandi risultati. Durante questo percorso non sarà sorprendente scoprire eventualmente oggetti inattesi, dal momento che abbiamo appena iniziato ad esplorare uno spazio di parametri a cui non abbiamo mai avuto accesso.

Nota

La trattazione qui presentata è una rassegna sommaria che illustra in modo divulgativo lo stato dell'arte della ricerca di onde gravitazionali e dell'astronomia che si può iniziare a fare. Pur non avendo la pretesa di essere completa, si auspica di dare una chiara panoramica dell'argomento, che permetta ai lettori più interessati di approfondire vari aspetti, sia nei riferimenti bibliografici di seguito elencati, sia consultando la vasta letteratura disponibile sul Web.



- [1] A. EINSTEIN: "Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie", *Annalen der Physik* **49** (1916) 769.
- [2] C. MISNER, K. THORNE, J. WHEELER: *Gravitation*. W. H. Freeman, S. Francisco USA (1973).
- [3] J. WEBER: "Detection and Generation of Gravitational Waves", *Phys. Rev.* **117** (1960) 306.
- [4] E. GERTSENSHTEIN AND V. I. PUSTOVOIT: "On the Detection of Low-Frequency Gravitational Waves", *Sov. Phys. JETP* **16** (1963) 433.
- [5] G. E. MOSS, L. R. MILLER, AND R. L. FORWARD: "Photon-Noise-Limited Laser Transducer for Gravitational Antenna", *Appl. Opt.* **10** (1971) 2495.
- [6] R. Weiss, MIT Report No. 105 (1972) : <https://dcc.ligo.org/public/0038/P720002/001/P720002-00.pdf>
- [7] R. W. P. Drever in "Gravitational Radiation", p. 321, N. Deruelle and T. Piran eds., North-Holland, Amsterdam (1983).
- [8] R. W. P. Drever, F. J. Raab, K. S. Thorne, R. Vogt, and R. Weis, Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory (LIGO) Technical Report (1989) : <https://dcc.ligo.org/public/0065/M890001/003/M890001-03%20edited.pdf>
- [9] A. ABRAMOVICI ET AL.: "LIGO: The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory", *Science* **256** (1992) 325.

- [10] A. Brilliet, A. Giazotto *et al.*, Virgo Project Technical Report No. VIR-0517A-15 (1989): <https://tds.ego-gw.it/itf/tds/index.php?callContent=2&callCode=12122>
- [11] J. Hough *et al.*, Proposal for a joint German-British interferometric gravitational wave detector, MPQ Technical Report 147 No. GWD/137/JH (1989) : <http://eprints.gla.ac.uk/114852/>
- [12] B. P. ABBOTT ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries”, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 131103.
- [13] Einstein Telescope Science Team, Einstein gravitational wave Telescope conceptual design study, ET Document: ET-0106C-10, 2011: <http://www.et-gw.eu/>
- [14] LIGO Scientific Collaboration, Instrument Science White Paper, LIGO-T1400316-v4, 2010: <https://dcc.ligo.org/public/0113/T1400316/004/T1400316-v5.pdf>
- [15] B. P. Abbott ..., P. Leaci *et al.* (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration): <http://arxiv.org/abs/1602.03840>
- [16] B. P. ABBOTT ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole”, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 061102.
- [17] B. P. Abbott ..., P. Leaci *et al.* (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration): <http://arxiv.org/abs/1602.03843>
- [18] J. AASI ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “Method and results of a search for gravitational waves associated with gamma-ray burst using the GEO 600, LIGO, and Virgo”, *Phys. Rev. D* **89** (2014) 122004.
- [19] B. P. ABBOTT ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “Implications for the stochastic gravitational wave background from binary black holes”, *Phys. Rev. Lett.* **116** (2016) 131102.
- [20] J. AASI ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “Einstein@Home all-sky search for periodic gravitational waves in LIGO S5 data”, *Phys. Rev. D* **87** (2013) 042001.
- [21] J. AASI ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “First low frequency all-sky search for continuous gravitational wave signals”, *Phys. Rev. D* **93** (2016) 042007.
- [22] J. AASI ..., P. LEACI *et al.* (THE LIGO SCIENTIFIC COLLABORATION AND THE VIRGO COLLABORATION): “First all-sky search for continuous gravitational waves from unknown sources in binary systems”, *Phys. Rev. D* **90** (2014) 062010.
- [23] P. LEACI AND R. PRIX: “Direct searches for continuous gravitational waves from binary systems: Parameter-space metrics and optimal Scorpius X-1 sensitivity”, *Phys. Rev. D* **91** (2015) 102003.
- [24] B. P. Abbott ..., P. Leaci *et al.* (The LIGO Scientific Collaboration and the Virgo Collaboration): <http://arxiv.org/abs/1602.03841>
- [25] R. A. HULSE AND J. H. TAYLOR: “Discovery of a pulsar in a binary system”, *Astrophys. J.* **195** (1975) L51.



Paola Leaci: è una ricercatrice di Fisica presso l'Università “La Sapienza di Roma. Si occupa di Fisica delle Onde Gravitazionali, Analisi dati di Onde Gravitazionali, Astrofisica Relativistica e Cosmologia.

