

Filippo Martelli

La prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali: una nuova finestra sull'Universo

The first direct observation of gravitational waves: a new window on the Universe

Dipartimento di Scienze Pure e Applicate - Università degli Studi di Urbino
"Carlo Bo"

INFN – Sezione di Firenze

LIGO-Virgo Scientific Collaboration

Riassunto. La prima osservazione diretta delle onde gravitazionali con i rivelatori interferometrici della collaborazione LIGO-Virgo ha dato inizio all'astronomia gravitazionale. La grande difficoltà della misura ha richiesto molti anni di lavoro, ma finalmente il 14 settembre 2015 è stato osservato il segnale proveniente dalla coalescenza di due buchi neri di grande massa.

Parole chiave. Onde gravitazionali, rivelatori interferometrici, buchi neri, sistemi binari.

Il 14 settembre 2015, alle 09:50:45 UTC, i due rivelatori interferometrici di LIGO hanno osservato simultaneamente per la prima volta un segnale di onde gravitazionali. Questo evento è certamente una pietra miliare nella storia della fisica, in quanto segna la nascita dell'astronomia gravitazionale.

Abstract. The first direct observation of gravitational waves using the interferometer detectors of the LIGO-Virgo collaboration has marked the start of gravitational astronomy. The extreme difficulty of such measurements called for many years of hard work, but finally, on 14 September 2015, the signal produced by the coalescence of two black holes of large mass was observed.

Keywords. Gravitational waves, interferometer detectors, black holes, binary systems.

On 14 September 2015, at 09:50:45 UTC, the two LIGO interferometer detectors for the first time simultaneously detected a gravitational wave signal: this event is undoubtedly a milestone in the history of physics, since it marks the birth of gravitational astronomy.

The existence of gravitational waves is one of the direct predictions of Einstein's theory of general relativity. As known, the theory of general relativity explains the force of gravity as a consequence of the space-time curvature: the space-time curvature increases the closer it is to



L'esistenza delle onde gravitazionali è una diretta previsione della teoria della relatività generale di Einstein. Come è noto, la teoria della relatività generale spiega la forza di gravità come una conseguenza della curvatura dello spazio-tempo: lo spazio-tempo si curva quanto più ci si avvicina ad una massa e quanto più è grande la massa che dà luogo alla curvatura. Il movimento di masse che stanno curvando lo spazio-tempo è quindi in grado di generare in esso delle deformazioni che si propagano come onde alla velocità della luce, proprio come avviene facendo ruotare due corpi in uno specchio d'acqua. Le leggi di conservazione dell'energia e della quantità di moto fanno sì che per generare un'onda gravitazionale sia necessario che la sorgente possieda un momento di quadrupolo, ovvero che la massa non sia distribuita con simmetria sferica. Sistemi binari in cui due masse ruotano attorno ad un centro comune appaiono dunque come naturali sorgenti di onde gravitazionali.

La rivelazione delle onde gravitazionali non rappresenta soltanto un'ulteriore conferma della teoria della relatività, ma riveste anche e soprattutto un interesse di carattere astronomico. Tutto ciò che conosciamo dell'Universo deriva infatti dallo studio della radiazione elettromagnetica alle differenti lunghezze d'onda. Partendo dalla luce visibile che raggiunge i telescopi terrestri, l'uomo ha progressivamente esteso le proprie conoscenze osservando le emissioni elettromagnetiche alle differenti frequenze, ed ogni volta l'accesso ad una nuova banda ha permesso di identificare fenomeni sempre nuovi, di sviluppare e confermare i modelli di evoluzione stellare e di comprendere la storia evolutiva dell'Universo.

L'osservazione delle onde gravitazionali offre però l'opportunità di avere accesso ad uno spettro completamente nuovo ed inesplorato, che permetterà lo studio

the mass and in proportion to the size of the mass that causes the curvature. The movement of masses curving space-time can hence generate deformations in it which are propagated in the form of waves at the speed of light, in exactly the same way as when two bodies are rotated in a pool of water. Energy and momentum conservation laws constrain the source of gravitational waves to possess a quadrupole moment, in other words the mass must not be distributed with spherical symmetry. Binary systems in which two masses revolve around a common centre therefore appear as natural sources of gravitational waves.

The detection of gravitational waves does not simply represent a further confirmation of the theory of relativity but is above all interesting from an astronomical aspect. Everything that we know about the universe indeed derives from the study of electromagnetic radiation at different wavelengths. Starting from the visible light reaching terrestrial telescopes, man has progressively extended his knowledge by observing the electromagnetic emissions at different frequencies, and every time access to a new band has made it possible to identify new phenomena and to confirm the models of stellar evolution and enhance our understanding of the history of the evolution of the Universe.

However, the observation of gravitational waves offers the possibility of accessing a completely new and unexplored spectrum, which will make it possible to study the vast range of phenomena characterising the different spectral bands. There ought to be a background gravitational radiation at very low frequencies which, if observed, would reveal details of the primordial universe otherwise totally inaccessible, given that before the formation of the neu-

della vasta gamma di fenomeni che caratterizza le diverse bande spettrali. A bassissime frequenze dovrebbe esistere una radiazione gravitazionale di fondo che, se venisse osservata, rivelerebbe dettagli sull'Universo primordiale totalmente inaccessibili altrimenti, dato che prima della formazione degli atomi neutri la luce non era ancora disaccoppiata dalla materia e l'Universo era opaco. Salendo in frequenza ci si attende un segnale anche dall'interazione tra galassie che si scontrano, un fenomeno estremamente lento. Certamente queste sorgenti sono molto al di là della portata delle attuali tecniche di rivelazione. Più accessibili appaiono invece le emissioni provenienti da sistemi binari stellari, molto prima delle fasi di coalescenza, anche se le basse frequenze del segnale comportano l'impossibilità di una rivelazione a terra, richiedendo la realizzazione di rivelatori gravitazionali nello spazio, un'impresa già iniziata. Il segnale più promettente è quindi quello emesso da sistemi binari estremamente compatti durante le fasi finali della coalescenza. I sistemi binari finiscono infatti con l'avvicinarsi sempre più, mentre la loro frequenza orbitale aumenta, perché emettono energia sotto forma di radiazione gravitazionale, un fenomeno già evidenziato dalle osservazioni della pulsar binaria PSR1913+16, compiute da parte di Hulse, Taylor e Weisberg [1], che mostravano un perfetto accordo con le previsioni della relatività generale. Altre sorgenti possono essere le esplosioni di supernova o le stelle di neutroni in rapida rotazione, se non hanno simmetria perfettamente sferica.

Quando una regione dello spazio-tempo è investita da un'onda gravitazionale, cambiano le distanze tra i punti. Un sistema di punti disposti in maniera circolare, viene distorto in un'ellisse: una lunghezza si accorcia, mentre quella ad

tral atoms light was not yet uncoupled from matter and the Universe was opaque. Increasing the frequency we would also expect a signal from the interaction of colliding galaxies, which is an extremely slow phenomenon. Such sources are definitely way beyond the possibilities of the current techniques of detection. On the other hand, the emissions originating from stellar binary systems long before the coalescence phases appear more accessible, even though the low frequencies of the signal make detection on earth impossible and call for the creation of gravitational detectors in space, an enterprise that has already been launched. Hence the most promising signal is that emitted by extremely compact binary systems during the final stage of coalescence. In fact, binary systems continue to get progressively closer, while their orbital frequency increases, because they emit energy in the form of gravitational radiation. This phenomenon was already discovered through the observations of the binary pulsar system PSR1913+16 carried out by Hulse, Taylor and Weisberg, [1] which were totally in agreement with the predictions of general relativity. Other sources could be the explosions of supernovae or rapidly rotating neutron stars if without a perfectly spherical symmetry.

When a region of space-time is struck by a gravitational wave the distances between points change. A series of points arranged in a circle is distorted to become an ellipse: one of the lengths is shortened while that perpendicular to it is lengthened, alternately (fig. 1). The wave amplitude h is measured by the ratio between the variation ΔL of a length L and the length itself: $h = \Delta L / L$.

For the observation of these distortions it would appear natural to attempt to carry out the experiment of Hertz using gravity. However, the intrinsic weakness of the force of gravity

essa perpendicolare si allunga, in modo alternato (fig. 1). L'ampiezza dell'onda h è misurata proprio dal rapporto tra la variazione ΔL di una lunghezza L e la lunghezza stessa: $h = \Delta L / L$.

Per l'osservazione di queste distorsioni sembrerebbe naturale tentare una realizzazione dell'esperimento di Hertz in chiave gravitazionale. La debolezza intrinseca della forza di gravità rende tuttavia vano ogni tentativo di produrre e rivelare onde gravitazionali in laboratorio. Se ad esempio si riuscisse a porre in rotazione alla straordinaria frequenza di 1 kHz un rotore con due masse da 1 ton poste alla distanza di 2 m, l'ampiezza dell'onda gravitazionale risultante sarebbe $h \approx 10^{-33} / D$, dove D è la distanza del rivelatore dalla sorgente.

Fortunatamente la rivelazione di onde gravitazionali da sorgenti astrofisiche non appare così proibitiva, dato che le masse coinvolte sono molto grandi. L'onda emessa da due stelle di neutroni di 1.4 masse solari, orbitanti ad una frequenza di 50 Hz a 50 milioni di anni luce, arriverebbe con un'ampiezza di 10^{-22} .

Per tentare la rivelazione di un segnale così piccolo, la tecnica più promettente è quella della realizzazione di un interferometro di Michelson (fig. 1). Un fascio di luce laser viene diviso in due raggi ortogonali che si riflettono su due specchi posti a distanza L , prima di essere ricombinati. Lo strumento può essere accordato sulla frangia oscura per massimizzare la sensibilità del fotorivelatore. L'arrivo di un'onda gravitazionale, variando la lunghezza dei bracci, causerebbe una variazione nell'intensità luminosa misurata. Il limite ultimo di questo strumento risiede nel cosiddetto *shot noise*, il rumore indotto dalle fluttuazioni nel numero di fotoni che raggiungono il rivelatore. Per ridurre questo rumore occorre utilizzare laser

makes any attempt to produce and detect gravitational waves in the laboratory impossible. If, for example, it were possible to set in rotation at the extraordinary frequency of 1 kHz a rotor with two masses of 1 ton set at a distance of 2 m, the amplitude of the resulting gravitational wave would be $h \approx 10^{-33}$, where D is the distance of the detector from the source.

Fortunately, the detection of gravitational waves from astrophysical sources does not appear so prohibitive, since the masses involved are extremely large. The wave emitted by two neutron stars of 1.4 solar masses, orbiting at a frequency of 50 Hz 50 million light years far from us would arrive with an amplitude of 10^{-22} .

The most promising technique for attempting to detect such a small signal is to construct a Michelson interferometer (fig. 1). A beam of laser light is divided into two orthogonal rays which are reflected in two mirrors set at a distance L , before being recombined. The instrument can be tuned on the dark fringe to maximise the sensitivity of the photodetector. The arrival of a gravitational wave varies the length of the arms, thus causing a change in the intensity of measured light. The ultimate limitation of this device is what is called the shot noise, which is the noise induced by the fluctuations in the number of photons reaching the detector. To reduce this noise, extremely powerful low wavelength lasers have to be used. Current technologies make it possible to use infrared lasers with micrometric wavelength and power of 20 W, which can limit the oscillations to values of $\Delta L \approx 10^{-17}$ m. In this case, however, to measure h of 10^{-22} while preventing changes in the refraction index simulating the gravitational signal, arms of 100 km would be required along which the light has to propagate in a vacuum: a challenge that is clearly not viable.

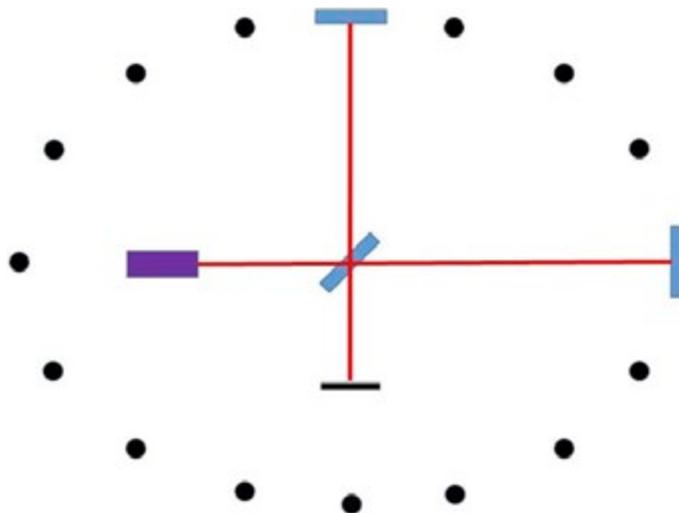


Figura 1. La distorsione prodotta da un'onda gravitazionale su una disposizione circolare di punti e lo schema concettuale di un interferometro di Michelson.

Figure 1. The distortion produced by a gravitational wave on a circular arrangement of points and the conceptual diagram of a Michelson interferometer.

di bassa lunghezza d'onda e di grande potenza. Le tecnologie attuali permettono di utilizzare laser infrarossi di lunghezza d'onda micrometrica e potenze di 20 W, che consentono di limitare le fluttuazioni a valori di $\Delta L \approx 10^{-17}$ m. In questo caso, tuttavia, per misurare h di 10^{-22} occorrerebbero bracci di 100 km lungo i quali la

Nevertheless, a solution to this problem is offered by the possibility of installing Fabry-Perot optical resonators in each arm, adding two semi-reflecting mirrors at the input of each arm. In practice, the light kept in resonance within the cavities increases the effective power stored, a technique which is further improved with the use of another mirror in front of the laser source, which returns the power which would otherwise be dispersed back into the cavity, since the interferometer works on the dark fringe. Using these techniques it is possible to create interferometers that are sufficiently sensitive with arms of 3 or 4 kilometres.

However, another significant problem is that of the seismic isolation of all the optics. In fact, the appreciation of variations in length of 10^{-17} or 10^{-18} m demands filtering any type of vibration that could reach the mirrors. The technique adopted by Virgo is a system of mechanical filters that operate like a series of pendulums working in cascade which constitute the superattenuator. This system can produce an attenuation factor of 10^{-18} at 100 Hz. In the final stage the mirrors are suspended by four wires. To improve performance a system of active controls is also introduced: the residual shifts, measured through a system of accelerators and position detectors, are offset by magnetic actuators so as to keep the interferometer always in resonance. The arrival of a gravitational wave is therefore detected through the correction signal used to keep the mirror in position.

The implementation of these techniques has made it possible to create three large interferometers, two in the United States (LIGO) and one in Italy, at Cascina (PI), called Virgo. Between 2007 and 2011 the three detectors carried out several data taking runs, along with the

luce dovrebbe propagarsi nel vuoto per evitare che cambiamenti dell'indice di rifrazione possano simulare il segnale gravitazionale, un'impresa irrealizzabile.

Una soluzione è però offerta dalla possibilità di creare nei bracci due cavità ottiche risonanti di Fabry-Perot, aggiungendo due specchi semiriflettenti all'ingresso di ogni braccio. La luce mantenuta in risonanza all'interno delle cavità aumenta in pratica la potenza effettiva immagazzinata, tecnica ulteriormente migliorata con l'utilizzo di un ulteriore specchio, posto di fronte alla sorgente laser, che immette nuovamente nelle cavità la potenza che andrebbe sprecata mantenendo l'interferometro a lavorare sulla frangia oscura. Con questi accorgimenti è possibile realizzare interferometri sufficientemente sensibili con bracci di 3 o 4 km.

Un altro formidabile problema è tuttavia quello dell'isolamento sismico di tutte le ottiche. Apprezzare variazioni di lunghezza di 10^{-17} o 10^{-18} m richiede infatti di filtrare qualunque tipo vibrazione che possa raggiungere gli specchi. La tecnica adottata da Virgo è quella di un sistema di filtri meccanici che si comportano come una serie di pendoli in cascata e che costituiscono il superattenuatore, un sistema in grado di realizzare un fattore di attenuazione di 10^{-18} a 100 Hz. Gli specchi sono appesi all'ultimo stadio tramite quattro fili. Per migliorare le prestazioni viene anche introdotto un sistema di controlli attivi: gli spostamenti residui, misurati tramite un sistema di accelerometri e rivelatori di posizione, vengono compensati con degli attuatori magnetici in modo da mantenere sempre l'interferometro in risonanza. L'arrivo di un'onda gravitazionale viene quindi rivelato attraverso il segnale di correzione utilizzato per mantenere lo specchio in posizione.

smaller GEO600 in Germany. The LIGO-Virgo international collaboration is unique and operates the three instruments as if they were one detector, analysing the data collected together and publishing the scientific results. In 2009 it was decided to use some of the new technologies available to create second-generation interferometers 10 times more sensitive. This led to the Advanced Ligo and Advanced Virgo projects [2,3]. Actually Virgo went through an intermediate stage (Virgo+) of partial verification of the new technological solutions, becoming the most sensitive interferometer in the world in the low-frequency region.

This new generation of interferometers uses futuristic solutions to reduce the residual background noise still present. More specifically, the thermal noise deriving from the thermal vibrations of the surfaces of the mirrors and of the suspension wires operating at ambient temperature has to be reduced. Given the difficulty of a cryogenic system, due to the need to extract the great power of the laser through the fine suspensions, the use of low dissipation materials was adopted. The optics of Virgo+ were already suspended using ultrafine silica fibres of a diameter of 0.28 mm, that have a breaking strength greater than that of steel, but which must absolutely not be touched to avoid creating microfractures on the delicate surface which would significantly reduce their resistance.

As a result of the use of heavier mirrors, cryogenic traps to separate the regions with different levels of vacuum, the new suspensions in silica, a system of thermal compensation that prevents the deformations of the mirrors induced by the heat of the laser, a more powerful laser and other adjustments, the new detectors have achieved a sensitivity 10 times greater

L'implementazione di queste tecniche ha permesso la realizzazione di tre grandi interferometri, due negli stati uniti (LIGO) e uno in Italia, a Cascina (PI), denominato Virgo. Tra il 2007 e il 2011 i tre rivelatori hanno effettuato diverse prese dati, insieme anche al più piccolo GEO600 in Germania. La collaborazione internazionale LIGO-Virgo è unica e opera i tre strumenti come se fossero un unico rivelatore, analizzando insieme i dati raccolti e pubblicando insieme i risultati scientifici. Nel 2009 si è deciso di utilizzare alcune nuove tecnologie disponibili per realizzare interferometri di 2° generazione, 10 volte più sensibili. Sono così nati i progetti Advanced Ligo e Advanced Virgo [2,3]. Virgo in realtà è passato attraverso una fase intermedia, Virgo+, verificando in parte le nuove soluzioni tecnologiche e divenendo il più sensibile interferometro al mondo nella regione delle basse frequenze.

Questa nuova generazione di interferometri si avvale di soluzioni avveniristiche per ridurre i rumori di fondo residui ancora presenti. In particolare è necessario ridurre il rumore termico, derivante dalle vibrazioni termiche delle superfici degli specchi e dei fili di sospensione che operano a temperatura ambiente. Data la difficoltà di una realizzazione criogenica, per la necessità di estrarre attraverso le sottili sospensioni la grande potenza del laser, ci si è orientati verso l'utilizzo di materiali a bassa dissipazione. Già le ottiche di Virgo+ sono state sospese utilizzando sottili fibre di silice di 0.28 mm di diametro, che hanno carichi di rottura superiori a quello dell'acciaio, ma che non devono essere assolutamente sfiorate per non creare nella delicata superficie delle microfratture che ne ridurrebbero alquanto la resistenza.

than the first generation versions, and can observe a volume of Universe 1000 times larger. At the end of summer 2015 the two LIGO interferometers were ready to start collecting data, whereas Advanced Virgo was still in the completion phase.

The analysis of the data searching for a signal of coalescence from a binary system is carried out through the use of 4 online and 5 offline programs. Using the match filter technique, the temporal series of data is compared with the 250,000 reference waveforms – variable depending on the parameters of the binary system – thus extracting the signal from the background noise.

On 14 September 2015, at 09:50:45 UTC the two LIGO interferometers observed the event called GW150914 [4]. The signal was detected first by the Livingston (LA) instrument and 7 ms after reached that of Hanford (WA). The event was observed with a signal/noise ratio of 24 and the probability of a false coincidence between the two detectors is of one event every 203,000 years, in other words it has a significance greater than 5.1σ . The signal grows in frequency from 35 to 250 Hz with a peak of amplitude of 10^{-21} .

The observed waveform (fig. 2) shows that it is the coalescence of a binary system of two black holes of 36 and 29 solar masses which, by merging, generated a black hole of 62 solar masses. The incredible energy corresponding to 3 solar masses was thus converted into gravitational waves during the last phases of the coalescence. Moreover, the decay of the waveform following the peak makes it possible to observe the oscillations of the final black hole as it settles into its stationary configuration. From the measured waveform we can establish that the source is at a distance of 410 Mpc.

Grazie all'uso di specchi più pesanti, di trappole criogeniche per separare le regioni a diversi livelli di vuoto, delle nuove sospensioni in silice, di un sistema di compensazione termica che evita le deformazioni indotte dal calore del laser negli specchi, a un laser più potente e ad altri accorgimenti, i nuovi rivelatori hanno raggiunto una sensibilità 10 volte maggiore di quelli di prima generazione e possono osservare un volume di Universo 1000 volte più grande. Al termine dell'estate 2015 i due interferometri LIGO erano pronti ad iniziare la prima presa dati, mentre Advanced Virgo era ed è ancora in fase di completamento.

L'analisi dei dati, alla ricerca di un segnale di coalescenza di un sistema binario, viene effettuata grazie a 4 programmi on-line e 5 off-line. Con una tecnica di *match filter* si confronta la serie temporale dei dati con le 250000 forme d'onda di riferimento, variabili in base ai parametri del sistema binario, estraendo così il segnale dal rumore di fondo.

Il 14 settembre 2015, alle 09:50:45 UTC i due interferometri di LIGO hanno osservato l'evento denominato GW150914 [4]. Il segnale è stato visto prima dallo strumento di Livingston (LA) e 7 ms dopo è giunto a quello di Hanford (WA). L'evento è stato osservato con un rapporto segnale/rumore di 24 e la probabilità di una falsa coincidenza tra i due rivelatori è di 1 evento ogni 203000 anni, ovvero ha una significatività maggiore di 5.1σ . Il segnale cresce in frequenza da 35 a 250 Hz con un picco di ampiezza di 10^{-21} .

La forma d'onda osservata (fig. 2) mostra che si tratta della coalescenza di un sistema binario di due buchi neri di 36 e 29 masse solari che, fondendosi, ha generato un buco nero di 62 masse solari. L'incredibile energia corrispondente a 3

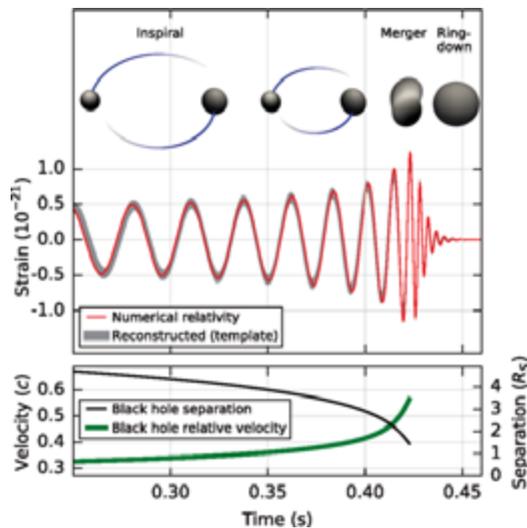


Figura 2. La forma d'onda dell'evento osservato, con una simulazione numerica delle corrispondenti fasi di coalescenza. Le curve in basso mostrano la separazione tra i buchi neri e la loro velocità relativa (tratta da [4]).
Figure 2. The waveform of the event observed, with numerical simulation of the corresponding phases of coalescence. The curves at the bottom represent the separation between the black holes and their relative velocity (taken from [4]).

masse solari è stata perciò convertita in onde gravitazionali durante le ultime fasi della coalescenza. Inoltre il decadimento della forma d'onda dopo il picco permette di osservare le oscillazioni del buco nero finale mentre si assesta nella sua configurazione stazionaria. Dall'ampiezza misurata si può stabilire che la sorgente si trova ad una distanza di 410 Mpc.

Oltre ad essere stata la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali, quella di GW150914 costituisce pertanto anche la prima osservazione diretta dei buchi neri, la prima osservazione della coalescenza di un sistema binario di buchi neri e la scoperta dei buchi neri stellari di maggiore massa mai osservati. Inoltre la teoria della relatività generale, proprio a 100 anni dalla sua formulazione, è stata verificata in condizioni davvero estreme con grandissima precisione.

L'osservazione di un segnale gravitazionale, grazie ad una serie di accordi internazionali, allerta anche una vastissima collaborazione di osservatori astronomici, a terra e sui satelliti, dai telescopi ottici a grande campo di vista, ai radiotelescopi, agli osservatori X e γ , che in breve tempo devono cercare, nella regione di cielo indicata, una eventuale controparte transiente elettromagnetica. Anche se non ci si attende alcuna emissione dalla coalescenza di due buchi neri, l'osservazione è stata avviata anche in questo caso in tempi molto stretti, senza evidenziare nulla. Purtroppo operare con soli due interferometri permette di identificare una regione di cielo molto vasta, dell'ordine di 600 gradi quadrati. La messa in funzione di Advanced Virgo ridurrà il campo di ricerca a poche decine di gradi quadrati.

Nei prossimi anni dunque la neonata astronomia gravitazionale, unendosi alle tradizionali tecniche osservative, offrirà un fertile terreno per sempre nuove

In addition to being the first direct detection of gravitational waves, that of GW150914 therefore also represents the first direct observation of black holes, the first observation of the coalescence of a binary system of black holes and the discovery of stellar black holes of the greatest mass ever observed. Furthermore, exactly 100 years after its formulation, the theory of general relativity was verified in genuinely extreme conditions with the greatest precision.

As a result of a series of international agreements, the observation of a gravitational signal also alerts a vast collaboration of astronomical observatories, on earth and on satellites – from optical telescopes with very large fields of view to radiotelescopes and X and γ observatories – which, in a very short time, have to seek in the region of the sky indicated, any transient electromagnetic counterpart. Even though we do not expect any emission from the coalescence of two black holes, the observation was launched in this case too with extreme rapidity, but did not reveal anything. Unfortunately, working with only two interferometers makes it possible to identify an extremely vast region of the sky, in the order of 600 square degrees. The setting in operation of Advanced Virgo will reduce the search field to just a few dozen square degrees.

In the years to come, therefore, the new-born gravitational astronomy, combined with traditional observation techniques, will offer fertile ground for many more new discoveries. Mankind which up to now could rely on sight alone to observe the cosmos has acquired a new sense which, given the frequency interval in question, can ultimately be compared to hearing.

scoperte. L'umanità che finora disponeva solo della vista per osservare il cosmo ha acquisito un nuovo senso che, visto l'intervallo di frequenze in esame, può in definitiva essere assimilato all'udito.

Bibliografia

- [1] J. H. Taylor and J. M. Weisberg, *Astrophys. J.* 253, 908 (1982).
- [2] J. Aasi et al., *Class. Quant. Grav.* 32, 074001 (2015).
- [3] F. Acernese, *Class. Quant. Grav.* 32, (2015), 024001 1-52.
- [4] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).

Filippo Martelli è professore associato di fisica presso l'Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo". Ha conseguito laurea e dottorato di ricerca a Torino. È stato membro della Commissione Scientifica per la fisica astroparticellare dell'INFN dal 1997 al 2003. Nell'ambito della collaborazione LIGO-Virgo si è occupato dello sviluppo delle sospensioni monolitiche degli specchi.

Bibliography

- [1] J. H. Taylor and J. M. Weisberg, *Astrophys. J.* 253, 908 (1982).
- [2] J. Aasi et al., *Class. Quant. Grav.* 32, 074001 (2015).
- [3] F. Acernese, *Class. Quant. Grav.* 32, (2015), 024001 1-52.
- [4] B.P. Abbot et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).

Filippo Martelli is Associate Professor of Physics at the "Carlo Bo" University of Urbino. He has a degree and research doctorate from Turin. He was a member of the Scientific Board for astroparticle physics of the INFN from 1997 to 2003. Within the framework of the LIGO-Virgo collaboration he dealt with the development of the monolithic suspensions for the mirrors.