

IN EVIDENZA / HIGHLIGHTS

Filippo Martelli

Un agosto pieno di sorprese gravitazionali

An August full of gravitational surprises

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

INFN - Sezione di Firenze

LIGO-Virgo Scientific Collaboration

Riassunto. L'interferometro per la rivelazione di onde gravitazionali Advanced Virgo è entrato in funzione il 1 agosto 2017. I 25 giorni di presa dati con tre interferometri hanno segnato la nascita dell'astronomia multimessaggera. Dapprima è stata rivelata la coalescenza di due buchi neri, ricostruendo per la prima volta la posizione della sorgente. Poco dopo si è scoperta la coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni, osservata contemporaneamente per la prima volta anche nell'emissione elettromagnetica.

Parole chiave. Onde gravitazionali, rivelatori interferometrici, stelle di neutroni, sistemi binari, kilonova.

Il 1 agosto 2017, dopo molti mesi di messa a punto, l'interferometro europeo Advanced Virgo [1] presso lo European Gravitational Observatory (EGO) di Cascina (PI), ha finalmente raggiunto una sensibilità sufficiente ad unirsi ai due interferometri americani di Advanced LIGO nella seconda presa dati scientifica (O2).

Abstract. The gravitational wave interferometric detector Advanced Virgo began its data collecting on August 1, 2017. The following 25 days saw the dawn of multimessenger astronomy. First, a two black hole merger was detected, with the first reconstruction of the source position in the sky. A few days later, a binary neutron star system merger was discovered and for the first time observed simultaneously even through electromagnetic emission.

Keywords. Gravitational waves, interferometer detectors, neutron stars, binary systems, kilonova.

On August 1 2017, after many months of adjustment work, the European interferometer Advanced Virgo [1] at the European Gravitational Observatory (EGO) in Cascina (PI) finally attained a level of sensitivity that allowed it to join the two American Advanced LIGO interferometers in the second scientific run (O2).

The previous run (O1) successfully ended in January 2016, having led to the historical first



La precedente presa dati (O1) si era felicemente conclusa nel gennaio 2016 e aveva portato alla storica prima rivelazione delle onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri stellari di grande massa, l'evento GW150914 [2,3], e a quella di GW151226 [4], un'altra fusione che ha coinvolto due buchi neri di massa minore, ma pur sempre superiore a quella che si pensava essere la massima massa di questi oggetti (), secondo le misure indirette su sistemi binari sorgenti di raggi X.

L'importanza delle prime osservazioni delle onde gravitazionali è stata da poco sottolineata con l'assegnazione del Premio Nobel per la Fisica 2017 e con quella dello Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics nel 2016 (assegnato finora solo due volte) a tutti i membri della collaborazione scientifica LIGO-Virgo.

Dopo una serie di miglioramenti apportati agli strumenti per incrementarne la sensibilità, nel novembre del 2016 è iniziata la seconda presa dati scientifica (O2), alla quale dopo poco avrebbe dovuto unirsi anche Advanced Virgo. Tuttavia una serie di problemi, principalmente legati al sistema di vuoto delle torri che ospitano il sistema di sospensione e isolamento sismico delle ottiche, hanno costretto la collaborazione a continuare la presa dati con i soli due interferometri AdvLIGO. Però, proprio quando O2 si avviava alla sua conclusione, con un nuovo evento di coalescenza di buchi neri all'attivo (GW170104) [5], il più lontano (880 Mpc), la sensibilità di AdvVirgo, seppur sempre limitata dalla non completa implementazione di tutti i miglioramenti previsti, raggiungeva valori sufficienti da consentire circa un mese di presa dati con tre interferometri attivi. E quel mese doveva presto rivelarsi un mese assai fortunato.

detection of gravitational waves from the merger of two large mass stellar black holes, the GW150914 event [2, 3]. It further led to the identification of GW151226 [4], another two black hole merger, with smaller masses, but in any case greater than what was thought to be the maximum mass for these objects (), according to indirect measurements on binary X-ray sources.

The significance of these first gravitational wave observations was recently rewarded with the Nobel Prize in Physics 2017 and with the Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics 2016 (awarded only twice up to now), which was conferred upon all the members of the LIGO-Virgo Scientific Collaboration.

After several improvements to the instruments in order to achieve greater sensitivity, the second scientific run (O2) started in November 2016. Advanced Virgo was expected to join after a while, but problems mainly due to the vacuum system in the towers hosting the suspended optical elements forced the collaboration to collect data with only the two AdvLigo interferometers. Fortunately, as O2 was ending, having identified another binary black hole system merger (GW170104) [5], the most distant of its detections (880 Mpc), AdvVirgo sensitivity reached values that were sufficient to warrant about one month of data collection with the three working interferometers, even if this was limited by an incomplete implementation of all the projected improvements. That month was going to be a very lucky one.

On August 14, 2017, at 10:30:43 UTC, a new gravitational signal from a binary black hole merger of was detected by the three interferometers, at a distance of 540 Mpc (GW170814) [6]. It was the first time AdvVirgo observed gravitational waves, and for the first time the great

Il 14 agosto 2017, alle 10:30:43 UTC, i tre interferometri osservavano infatti un nuovo segnale gravitazionale dovuto alla coalescenza di due buchi neri di, ad una distanza di 540 Mpc (GW170814) [6]. Era la prima volta che AdvVirgo rivelava le onde gravitazionali e per la prima volta si poteva apprezzare il grande vantaggio di avere tre interferometri operativi. La posizione della sorgente degli eventi rivelati finora poteva infatti essere localizzata solo con una precisione di diverse centinaia di gradi quadrati, rendendo praticamente impossibile alla rete di telescopi a terra e nello spazio la ricerca di una controparte elettromagnetica dell'evento. Anche la localizzazione di GW170814, utilizzando i soli dati dei due interferometri americani, si sarebbe estesa per ben 1160 deg^2 , ma i tre rivelatori insieme hanno permesso di ridurre l'indeterminazione a soli 60 deg^2 . La precisione è aumentata anche nella stima della distanza della sorgente e conseguentemente il volume di universo nel quale cercare la possibile galassia ospite si è ridotto da a Mpc^3 . Un'altra grande possibilità offerta dalla rete di tre rivelatori è quella di consentire una misura della polarizzazione delle onde gravitazionali. La teoria della relatività generale prevede infatti l'esistenza di due gradi di libertà tensoriali per le perturbazioni della metrica, ma altre teorie della gravità ammettono combinazioni di gradi di libertà tensoriali, vettoriali e scalari. Ciascuna di queste polarizzazioni comporterebbe una differente risposta da parte degli interferometri. I due rivelatori di AdvLIGO hanno quasi lo stesso orientamento spaziale e non sono quindi sensibili a queste differenze, ma con l'aggiunta di AdvVirgo diviene possibile discriminare tra le diverse polarizzazioni. Questa analisi è stata fatta sui dati di GW170814, per ora in modo preliminare, confrontando polarizzazioni puramente tensoriali, vettoriali

advantage of having three working interferometers became apparent. In fact, up to now, the source position of the observed events could be located only with an accuracy of several hundred square degrees of sky region, thus creating a nearly impossible task for the ground and space telescopes looking for an electromagnetic counterpart of the event.

Using data from the two American interferometers alone, even the position of GW170814 would have extended to a sky region of 1160 deg^2 , but together the three detectors reduced the uncertainty to 60 deg^2 . The estimated source distance could also be better determined, and consequently the universe volume in which to search for the hosting galaxy was reduced from to.

Another great opportunity offered by the network of the three detectors was the possibility to measure gravitational wave polarization. The general theory of relativity indeed predicts two tensor degrees of freedom for metric perturbations, but other gravity theories in principle allow any combination of tensor, vector or scalar polarization. Any of these polarizations would imply a different response of the interferometers. The two AdvLIGO detectors have almost the same space orientation and are not sensitive to these differences, but with AdvVirgo this kind of discrimination becomes possible. This analysis was preliminarily done on GW170814 data, assuming a pure tensor, vector or scalar polarization, without including any mixed state, but there are clear indications in favour of a further confirmation of general relativity. This first gravitational wave detection with an interferometer network is thus a great success for the European collaborators and in particular for the Italian members, who rendered the Virgo interferometer operative.

o scalari e non includendo stati di polarizzazione mista, ma vi sono chiare indicazioni a favore di una ulteriore conferma della relatività generale. Questa prima rivelazione di onde gravitazionali da parte della rete di interferometri è stata dunque già di per sé un grande successo, soprattutto per la componente europea ed in particolare italiana, che ha reso operativo l'interferometro Virgo.

Ma le sorprese non sono ancora finite. A soli tre giorni da GW170814, e precisamente alle 12:41:04 UTC del 17 agosto 2017, un nuovo segnale di onde gravitazionali è stato rivelato dai tre interferometri [7]. Si tratta del segnale più forte mai registrato finora, con un rapporto segnale rumore (SNR) di 32.4 e una durata di ben 100 s (da 24 Hz). Quasi in contemporanea ed in modo del tutto indipendente, il Gamma-ray Burst Monitor del telescopio spaziale Fermi della NASA ha rivelato un lampo (GRB) di breve durata, identificato come GRB170817A, a soli 1.7 s dall'evento di coalescenza misurato dagli interferometri. L'analisi del segnale gravitazionale ha indicato subito che le masse coinvolte nella coalescenza avevano valori compatibili con quelle di un sistema binario di stelle di neutroni, risultando negli intervalli e, e che la sorgente era relativamente vicina, a circa 130 milioni di anni luce dalla Terra. Il segnale è apparso molto più debole in Virgo e questo non solo per la sensibilità inferiore, ma soprattutto perché proveniente da una direzione verso la quale l'interferometro è quasi insensibile. Questo dato ha permesso però di restringere la posizione della sorgente ad un area di soli 31 deg², successivamente ridotta a 28 deg² con un'analisi più raffinata. La regione di provenienza individuata da Fermi e poco dopo anche dagli strumenti dell'altro osservatorio spaziale INTEGRAL, senza il decisivo contributo della rete di in-

But the surprises didn't end there. Only three days after GW170814, precisely on August 17, 2017, at 12:41:04 UTC, a new gravitational wave signal was detected by the three interferometers [7]. It was the loudest signal ever, with a signal to noise ratio (SNR) of 32.4, lasting for 100 s (from 24 Hz). Almost simultaneously and completely independently, the Gamma-ray Burst Monitor on the NASA space telescope Fermi registered a short gamma ray burst (GRB) identified as GRB170817A, only 1.7 s after the merging event detected by the interferometers. The gravitational signal showed that the merging masses were compatible with a binary neutron star system, being in the intervals and , and that the source was rather close, only about 130 million light years from Earth. The signal was dim in Virgo, which was due not only to reduced sensitivity, but mainly because it was coming from a direction toward which the interferometer is almost blind. Still, this information allowed researchers to restrict the source position in the sky to a region of 31 deg², which was further reduced to 28 deg² using more detailed analysis. Without the contribution of the interferometer network, the region determined by Fermi and later by the space observatory INTEGRAL would have been too large for an effective search of an electromagnetic counterpart.

The announcement of the binary neutron star merger discovery, which was accompanied by the detection of a GRB, immediately triggered intensive observation, involving numerous instruments both on the ground and in space. The source was localized to the southern sky, setting in the early evening for the northern hemisphere, which thus made it inaccessible to the majority of observatories. Less than 11 hours after the merger, the 1 m Swope telescope at Las

terferometri, sarebbe stata troppo grande per una efficace ricerca di una controparte elettromagnetica.

La notizia dell'osservazione della coalescenza di due stelle di neutroni, accompagnata dalla rivelazione di un GRB, ha fatto partire subito una vasta campagna osservativa coinvolgendo moltissimi strumenti, a terra e nello spazio. La sorgente si trovava nel cielo meridionale e tramontava presto la sera nell'emisfero nord, il che la rendeva inaccessibile alla maggioranza degli osservatori. A meno di 11 ore dalla coalescenza, il telescopio da 1 m Swope al Las Campanas Observatory in Cile ha osservato per primo un transiente brillante ottico identificato con la sigla SSS17a (ora AT 2017gfo) vicino alla galassia NGC4993, che si trova ad una distanza consistente con la misura derivante dal segnale gravitazionale [8]. Altri gruppi hanno indipendentemente identificato il medesimo segnale. Per comprenderne la natura era indispensabile provvedere a misure spettroscopiche nella banda dall'infrarosso all'ultravioletto. Queste hanno mostrato un rapido decadimento dell'emissione nella regione blu, non accompagnata dalle righe di assorbimento che sono tipiche di un'esplosione di supernova. Lo spostamento dell'emissione verso il vicino infrarosso, le righe identificate, e il progressivo attenuarsi dell'emissione sono perfettamente compatibili con i modelli previsti per il fenomeno noto come kilonova ed in particolare con le emissioni dovute ai processi di rapida nucleosintesi, processi nei quali nel materiale nucleare in rapida espansione dopo la coalescenza delle due stelle di neutroni, si formano i nuclei degli elementi più pesanti del Fe, la cui origine finora era misteriosa. La coalescenza delle stelle di neutroni è dunque all'origine di almeno una parte dei lampi gamma corti ed è il

Campanas Observatory in Chile was the first to discover a bright optical transient, identified as SSS17a (now AT 2017gfo), close to the NGC4993 galaxy, at a distance compatible with that determined by the gravitational signal [8]. Other groups later identified the same signal independently. In order to understand the nature of the source, it was important to perform spectrometric measurements in the infrared to ultraviolet band. These showed a rapid fall off in the blue spectrum, without the line absorption typical of supernovae explosions. The spectrum shift towards near infrared, the identified lines and the continuous fading, are perfectly compatible with models predicting kilonova explosions, in particular with emissions due to rapid nucleosynthesis processes. In these processes, nuclei heavier than Fe, whose origin was not clear up to now, are formed in the rapidly expanding nuclear matter which is ejected upon the merger of two neutron stars. Thus, the coalescence of neutron stars is the origin of at least some of the short gamma ray bursts and also represents the inner engine of the kilonova, the explosion allowing enrichment of the interstellar medium in heavy elements.

Chandra detected an X-ray signal 9 days after the event, and the VLA registered the first radio emission on the 16th day as well. Gamma, X and radio emissions are not, however, due to the kilonova, but come from the ultrarelativistic jets ejected after the merger. The GRB associated to GW170817 is particularly dim if compared to similar events. The effect is probably due to the view angle from Earth being outside the ultrarelativistic jet cone. This is also a very lucky occurrence, since observing the jet directly would have made it impossible to study the kilonova emission.

meccanismo alla base della kilonova, l'esplosione che permette l'arricchimento in elementi pesanti del mezzo interstellare.

A 9 giorni dall'evento, Chandra ha rivelato anche un'emissione X dalla medesima sorgente e a 16 giorni il VLA ha registrato la prima emissione radio. Le emissioni nei negli X e radio non sono tuttavia legate all'emissione dalla kilonova, ma ai getti ultrarelativistici emessi al momento della coalescenza [9]. Il lampo gamma associato a GW170817 appare decisamente poco luminoso se confrontato con eventi della stessa classe. La spiegazione sembra essere legata all'angolo sotto il quale l'evento è stato osservato da terra, un angolo che fa sì che la linea di vista sia al di fuori del cono nel quale viene emesso il getto ultrarelativistico. Anche questa è una circostanza favorevole, altrimenti, accecati dalle emissioni del getto, non sarebbe stato possibile lo studio della kilonova.

Se GW150914 ha segnato la nascita dell'astronomia gravitazionale, GW170817 ha segnato quella dell'astronomia multimessaggera, aprendo nuove interessantissime prospettive per il futuro, una disciplina per la quale il ruolo dell'interferometro AdvVirgo è essenziale. La possibilità di studiare emissioni dovute alla coalescenza di stelle neutroni e buchi neri, all'esplosione di supernovae, quella di associare agli eventi gravitazionali anche la rivelazione di neutrini, le opportunità di approfondire l'analisi della polarizzazione delle onde gravitazionali, prospettano un radioso futuro per questa disciplina, un futuro da affrontare con una migliorata sensibilità degli interferometri, con una rete più estesa, che includerà anche il giapponese KAGRA e un interferometro indiano, o con una terza generazione di rivelatori, la cui progettazione è già in uno stadio avanzato.

If GW150914 marked the birth of gravitational astronomy, GW170817 represents that of multimessenger astronomy, opening new exciting opportunities for the future. The role of the AdvVirgo interferometer in this matter is essential. The possibility of studying neutron star-black hole mergers and supernovae explosions, the hope of detecting neutrinos together with gravitational waves or to measure the gravitational wave polarization are the future of this field. This future will offer the opportunity of operating with better sensitivity interferometers, with an extended network including the Japanese KAGRA and a new Indian detector, or with a third generation of detectors, whose design phase is already at an advanced stage.

Filippo Martelli is Associate Professor of Physics at "Carlo Bo" University of Urbino. He has a degree and research doctorate from Turin. He was a member of the Scientific Commission for astroparticle physics of 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.

Bibliography

- [1] F. Acernese et al. (Virgo Collaboration), *Classical Quantum Gravity* 32, 024001 (2015).
- [2] F. Martelli, *Il Colle di Galileo*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 49-58, Oct. 2016, ISSN 2281-7727.
- [3] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).
- [4] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (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. E' 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.

Bibliografia

- [1] F. Acernese et al. (Virgo Collaboration), *Classical Quantum Gravity* 32, 024001 (2015).
- [2] F. Martelli, *Il Colle di Galileo*, [S.l.], v. 5, n. 2, p. 49-58, Oct. 2016, ISSN 2281-7727.
- [3] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 061102 (2016).
- [4] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 116, 241103 (2016).
- [5] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 118, 221101 (2017).
- [6] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 141101 (2017).
- [7] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017).
- [8] B.P. Abbott *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, 848:L12, (2017).
- [9] LIGO and Virgo Collaborations, Fermi GBM, INTEGRAL, B.P. Abbott *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, 848: L13, (2017).

- [5] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 118, 221101 (2017).
- [6] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 141101 (2017).
- [7] LIGO and Virgo Collaborations, B.P. Abbott *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101 (2017).
- [8] B.P. Abbott *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, 848:L12, (2017).
- [9] LIGO and Virgo Collaborations, Fermi GBM, INTEGRAL, B.P. Abbott *et al.*, *The Astrophysical Journal Letters*, 848:L13, (2017).

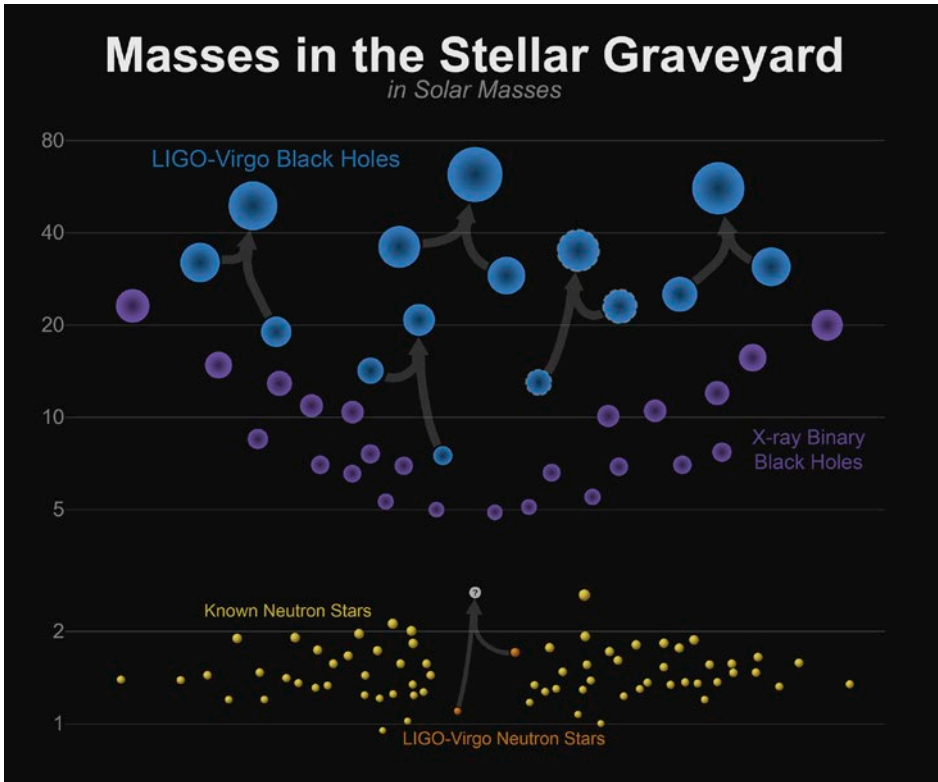


Figura 1. Il grafico mostra la massa dei buchi neri noti attraverso osservazioni elettromagnetiche (in viola) e quella dei buchi neri misurati attraverso la rivelazione delle onde gravitazionali (in blu), da cui si evince l'esistenza di una popolazione di buchi neri massivi finora sconosciuta. Vengono inoltre indicate le masse delle stelle di neutroni misurate attraverso osservazioni elettromagnetiche (in giallo) e quella delle stelle di neutroni relative all'evento GW170817, rivelate attraverso le onde gravitazionali. Il risultato della coalescenza di GW170817 non è chiaro ed è stato indicato con un punto interrogativo. [Credit: LIGO-Virgo/Frank Elavsky/Northwestern University]

Figure 1. This graphic shows masses for black holes known through electromagnetic observations (purple) and those of black holes measured by gravitational-wave observations (blue). The presence of a massive, previously unknown black hole population is thus evident. Masses of neutron stars measured with electromagnetic observations (yellow) and masses of the neutron stars that merged in the event called GW170817, which were detected by gravitational waves (orange), are also shown. The remnant of GW170817 is unclassified, and is here indicated by a question mark. [Credit: LIGO-Virgo/Frank Elavsky/Northwestern University]

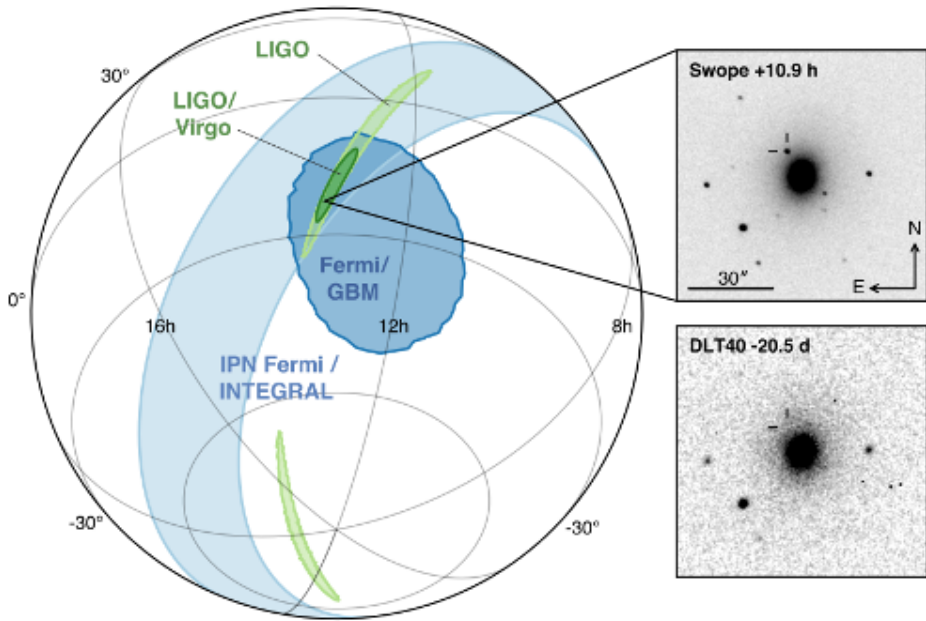


Figura 2. Localizzazione della sorgente con il segnale di onde gravitazionali, di raggi gamma e nella banda ottica. A sinistra una proiezione ortografica delle regioni al 90% di livello di confidenza individuate da LIGO (190 deg², verde chiaro); da LIGO-Virgo (iniziale, 31 deg², verde scuro); dalla triangolazione basata sul ritardo temporale tra Fermi e INTEGRAL (blu chiaro) e Fermi-GBM (dark blue). A destra la posizione della sorgente relativa alla apparente galassia ospite NGC 4993 nella immagine ottica di Swope 10.9 ore dopo la coalescenza (in alto) e l'immagine presa 20.5 giorni prima da DLT40. [Tratta da [8]]

Figure 2. Localization of gravitational-wave, gamma-ray and optical signals. Left, an orthographic projection of regions with a 90% confidence level identified by LIGO (190 deg², light green), by LIGO-Virgo (initial, 31 deg², dark green) and by triangulation based on the time delay between Fermi and INTEGRAL (light blue) and Fermi-GBM (dark blue). Right, location of source relative to the apparent host galaxy NGC 4993 in the Swope optical discovery image at 10.9 hr after merger (top right) and DLT40 pre-discovery image from 20.5 days prior to merger [from [8]].