

Speciale N° 32: atti dal simposio
"Nuovi orizzonti di una scienza in divenire"

FANTASTICI QUEI GIORNI

di Stefano Covino*

La storia della scienza è costellata da eventi importanti, scoperte, esperimenti chiave. Momenti in cui la conoscenza di qualche fenomeno compie passi avanti importanti. E può accadere nella vita di uno scienziato di essere testimone diretto e protagonista, di una combinazione di eventi che hanno portato all'ingresso nel mondo della scienza di qualcosa che possiamo chiamare astronomia multi-messaggio.

Una serie di scoperte rese possibili dalla sinergia fra astronomia gravitazionale e astronomia elettromagnetica nell'osservazione di un evento di onde gravitazionali, denominato GW170817, e della sua controparte ottica, denominata AT2017gfo.

La combinazione di informazioni permessa dallo studio di questo evento celeste davvero epocale sono state in grado di ampliare in maniera spettacolare i confini della nostra conoscenza.

Ma è solo l'inizio di quella che possiamo tranquillamente definire un'epoca d'oro per l'astrofisica.

* Istituto Nazionale di
Astrofisica - INAF,
Osservatorio Astronomico
di Brera - Milano

La storia degli eventi che andiamo a raccontare comincia in realtà circa un secolo fa, quando nel 1915 Albert Einstein¹ pubblica uno degli articoli più influenti della storia della scienza introducendo quella che è oggi nota come Teoria della Relatività Generale. Il successo nel mondo scientifico dell'idea di Einstein fu immediato e già pochi anni dopo la pubblicazione si ebbero alcune conferme sperimentali² con una serie continua di esperimenti con accuratezza sempre crescente che continuano anche oggi.

Inerzia e gravità

L'aspetto più affascinante e innovativo della teoria è che la gravità veniva descritta non più come un'interazione di natura non precisata fra due corpi dotati di massa, ma come una modifica della geometria dello spazio-tempo. Essenzialmente un oggetto nello spazio tridimensionale a noi familiare si muove, in assenza di perturbazioni, in linea retta a velocità costante. Nello spazio tempo quadrimensionale utilizzato da Einstein le linee rette sono dette «geodesiche», e rappresentano in generale le traiettorie più brevi per congiungere due punti nello spazio³.

L'intuizione Einsteiniana fu quella di ipotizzare che ciò che noi chiamiamo gravità in realtà corrisponda all'introduzione di una curvatura, generata dalla massa ed energia degli oggetti nello spazio, in vicinanza degli oggetti stessi.

Tecnicamente si parla di modifica della metrica e, a tutti gli effetti, gli oggetti nello spazio curvo quadrimensionale continuano a muoversi seguendo le geodesiche date dalla metrica dello spazio. Ma a un osservatore che interpreta il tutto nel familiare spazio tridimensionale il moto lungo le geodesiche corrisponde alle traiettorie orbitali



osservate in vicinanza di oggetti massicci. Dalla palla di cannone ai pianeti. E oggi anche alla struttura ed evoluzione dell'Universo nel suo insieme.

Uno degli aspetti di questa teoria che fu già identificato da Einstein, sebbene con vari ripensamenti, e da altri fisici contemporanei come Max Abraham⁴ e Willem de Sitter⁵ è quello che in presenza di masse sottoposte a violente accelerazioni e di asimmetrie nella loro distribuzione le perturbazioni dello spazio-tempo potevano propagarsi sotto forma di onde viaggianti anch'esse alla velocità della luce, le cosiddette onde gravitazionali. L'effetto delle onde gravitazionali è quello di modificare la metrica dello spazio tempo inducendo delle vere e proprie distorsioni che, in linea di principio, possono essere misurate.

Fu però già immediatamente chiaro ai contemporanei che l'effetto era realmente di piccola entità, tale da apparire senz'altro immisurabile con le tecnologie disponibili all'epoca.

Gli Interferometri

Qualche decennio prima dell'enunciazione della teoria della relatività generale, a fine Ottocento, due brillanti fisici, Albert Michelson⁶ e Edward Morley⁷, erano impegnati a svolgere una serie di esperimenti i cui risultati avrebbero influenzato lo sviluppo futuro della fisica e allo stesso tempo sviluppato una tecnica di misura che avrebbe costituito la base di numerosi esperimenti, con svariati obiettivi, nei decenni successivi e fino a oggi. L'obiettivo dell'esperimento era quello di misurare la velocità della luce in diverse direzioni.

Nella seconda metà dell'Ottocento, infatti, James Maxwell⁸, un valente fisico e matematico scozzese, era riuscito a formulare una teoria che tenesse conto in maniera unitaria dei fenomeni elettrici e magnetici descrivendoli come conseguenza dell'azione di un campo, appunto detto elettromagnetico, che si propaga nello spazio seguendo la meccanica ondulatoria alla velocità, tautologicamente, della luce.

Ancora però i tempi non erano maturi per una moderna concezione dei campi in fisica e per lungo tempo rimase aperta la questione di identificare il mezzo che sosteneva le onde elettromagnetiche, il cosiddetto etere.

L'idea quindi di Michelson e Morley era quella di verificare la velocità della luce in varie direzioni e in diversi periodi dell'anno. La Terra, infatti, a causa del suo moto di rivoluzione intorno al Sole, avrebbe plausibilmente invertito il moto rispetto all'etere a sei mesi di distanza permettendo di misurare la combinazione della velocità della luce e orbitale della Terra rispetto all'etere. Senza entrare in dettagli a noi non essenziali, con crescente sconcerto degli sperimentatori, nessuna variazione della velocità della luce fu mai misurata nonostante la crescente accuratezza degli esperimenti.

Fu poi infatti ancora Einstein, nel 1905, con la pubblicazione della cosiddetta teoria della Relatività Ristretta⁹ a fornire uno scenario interpretativo alla questione partendo dal presupposto, per certi versi rivoluzionario, della costanza della velocità della luce come aspetto fondamentale dello spazio-tempo.

Gli esperimenti si basavano sull'osservazione che due raggi di luce monocromatici potevano dare luogo al fenomeno, tipico della meccanica ondulatoria, dell'interferenza. Questa può essere costruttiva o distruttiva a seconda che i raggi luce siano in fase o meno. Tecnicamente si parla di differenze di percorso ottico e questo, con adeguati apparati sperimentali, porta alla possibilità di misurare differenze di percorsi di frazioni della lunghezza d'onda della luce impiegata per i due raggi considerati¹⁰. Oppure, a parità degli stessi, differenze appunto di velocità.

Lo stesso principio, con tutti gli avanzamenti tecnologici del caso, è alla base della costruzione dei grandi interferometri per misurare le onde gravitazionali a cura dei consorzi LIGO e Virgo¹¹.

Un contributo essenziale a questi progetti, per il tempo senz'altro visionari, venne da Rainer Weiss¹² e Kip Thorne¹³, per LIGO, e Alain Brillet¹⁴ e Adalberto Giazotto¹⁵, per Virgo.

Il funzionamento di un interferometro per onde gravitazionali è schematizzato in *Figura 1*, ed essenzialmente si basa su una sorgente di luce coerente che viene separata in due fasci che vengono fatti poi rimbalzare numerose volte nei due bracci perpendicolari dello strumento. Successivamente i due fasci vengono fatti interferire su uno schermo dove, a seconda della differenza di fase, si può avere interferenza distruttiva o costruttiva.

Il passaggio di un'onda gravitazionale genera una modifica delle dimensioni spaziali del sistema può quindi essere misurata con la precisione necessaria.

Sorgenti di onde gravitazionali

Analogamente allo sviluppo strumentale, rilevanti sforzi teorici furono volti all'identificazione delle più probabili sorgenti di onde gravitazionali che potessero essere alla portata degli strumenti in fase di sviluppo, e l'attenzione fu immediatamente volta alla famiglia dei sistemi binari stretti formati da oggetti compatti come stelle di neutroni o buchi neri. In generale l'emissione di onde gravitazionali richiede l'accelerazione rapida di masse in una situazione di asimmetria¹⁶.

La valutazione del possibile segnale generato dalla coalescenza di un tale sistema dipende dalle masse dello stesso e, ovviamente, dalla distanza¹⁷. Normalmente si utilizza un parametro che associa la deformazione indotta nella metrica dal passaggio dell'onda gravitazionale alla modifica delle dimensioni di corpi materiali:

$$h = 2 \Delta L / L,$$

dove L è per esempio la lunghezza di uno dei bracci dell'interferometro riportato in *Figura 1* e ΔL la variazione della sua lunghezza. Per la coalescenza di un sistema binario di stelle di neutroni, per esempio alla distanza dell'ammasso della Vergine¹⁸, si ottiene un valore $h \sim 10^{-21}$ ovvero, per avere un'idea, l'equivalente della dimensione di un atomo sulla distanza Terra-Sole o una frazione della dimensione di un protone su una lunghezza di un chilometro.

In realtà quello che si misura è una variazione delle lunghezze dei bracci, a seconda dell'orientazione spaziale dello strumento e della direzione di provenienza delle onde gravitazionali, con una relazione temporale ben precisa: la cosiddetta forma d'onda generata dall'evoluzione del sistema che ha generato il segnale.

L'importanza di sistemi binari di oggetti compatti, come talvolta in letteratura vengono indicati le stelle di neutroni o i buchi neri, è anche però legata al fatto che la prima misura diretta dell'effetto di emissione di onde gravitazionali da una sorgente astrofisica si ebbe verso la metà degli anni Settanta quando Russel Hulse¹⁹ e Joseph Taylor²⁰, studiando l'emissione radio del sistema binario di stelle di neutroni PSR 1913+16, misero in evidenza che l'orbita del sistema stava progressivamente restringendosi proprio a causa della perdita di energia per emissione di onde gravitazionali. Ed esattamente con il tasso previsto dalla teoria della Relatività Generale. Si trattò, infatti, della prima evidenza, anche se solo indiretta, dell'emissione di onde gravitazionali da un sistema astrofisico.

Il sistema binario studiato da Hulse e Taylor arriverà fra circa 300 milioni di anni alla coalescenza, e proprio le ultime fasi di evoluzione di questo genere di sistemi astrofisici sono, come si è detto, la più promettente classe di sorgenti di onde gravitazionali. Il motivo è legato all'intensità del segnale gravitazionale emesso ma anche alla relativa frequenza di questi sistemi. Infatti la sensibilità delle grandi antenne per onde gravitazionali come LIGO e Virgo viene spesso indicata come la distanza massima

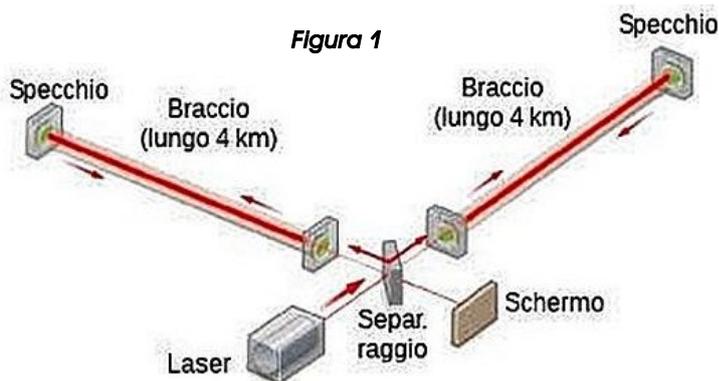


Figura 1—Schema semplificato di un interferometro di Michelson e Morley per la misura delle perturbazioni introdotte dal passaggio di onde gravitazionali. Una sorgente di luce coerente viene separata da ottiche opportune e quindi i due fasci vengono fatti rimbalzare numerose volte nei due bracci perpendicolari fino a quando convergono sul rivelatore dove, a seconda delle condizioni, possono dare luogo a interferenza costruttiva o distruttiva. Il grado di interferenza è legato alla differenza di fase dei due percorsi ottici del fascio di luce originale e infine questo alla differenza fisica di percorso (immagine prodotta da LIGO/Virgo).

alla quale il segnale previsto per una tale coalescenza potrebbe essere rivelato dagli interferometri.

Nella prima fase di funzionamento dei rivelatori, nel 2015, era vicino ai 200 milioni di anni luce mentre i successivi miglioramenti hanno portato tale limite, detto orizzonte, a circa 400 milioni di anni luce. Sebbene siano numeri che colpiscono l'immaginazione, si tratta ancora, in termini cosmologici, delle vicinanze della nostra Galassia.

Buchi neri massicci

Dopo alcuni decenni di sviluppo, con una rapidità quasi inaspettata, il 14 settembre 2015²¹, si ebbe uno degli eventi di valore epocale nella storia della scienza, la rivelazione diretta di onde gravitazionali emesse durante la coalescenza di un sistema binario compatto formato da due buchi neri.

Il segnale (Figura 2) fu molto intenso, tanto da essere chiaramente visibile sovrapposto al rumore di fondo di questi rivelatori anche senza la necessità delle complesse operazioni di filtraggio che sono normalmente necessarie²². La sorgente del segnale gravitazionale, infatti, era un sistema binario di buchi neri di 29 e 36 masse solari²³.

L'esistenza di sistemi binari formati da buchi neri era già stata ipotizzata da tempo e, in un certo senso non rappresentava una reale sorpresa. Tuttavia la grande massa delle due componenti invece era inaspettata, mostrando così con un solo evento rivelato la grande potenzialità dell'astrofisica gravitazionale che richiese di riformulare le nostre convinzioni sulla formazione di buchi neri²⁴ di, come si usa dire, taglia stellare²⁵.

Si trattò in ogni caso di un risultato eccezionale e, la rivelazione di questo evento, denominato GW150914²⁶, e di altri nei mesi successivi, portò comprensibilmente all'assegnazione del premio Nobel per la fisica nel 2017 ai già citati Rainer Weiss e Kip Thorne con l'aggiunta di Barry Barish²⁷. Un premio davvero meritato che coronò una ricerca e sviluppo durate almeno una quarantina d'anni.

Non fu comunque un caso isolato o fortunato. Nei due anni successivi diversi altri eventi della stessa natura sono stati identificati, ovvero sempre dovuti alla coalescenza di buchi neri e sempre con masse dell'ordine di qualche decina di masse solari.

La coalescenza di buchi neri è un fenomeno fisico di estremo interesse, e le possibili ricadute di conoscenza astrofisiche di queste osservazioni sono numerose e di primario interesse. Inoltre lo studio questi fenomeni permette anche di confrontare le predizioni della Relatività generale con le osservazioni in condizioni estreme mai verificate in precedenza²⁸.

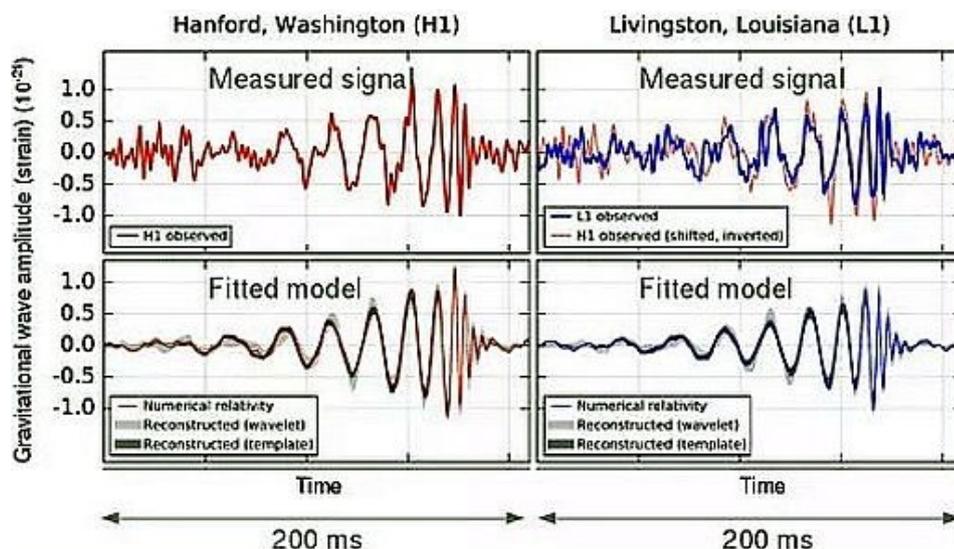


Figura 2 Tracciati dei segnali gravitazionali rivelati dalle antenne di Hanford e di Livingston il 14 settembre 2015. Il segnale era di tale intensità da essere facilmente visibile sovrapposto a rumore di fondo anche senza complesse operazioni di filtraggio. Il fenomeno che ha generato questo evento è stato la coalescenza di due buchi neri, uno di 29 e l'altro di 36 masse solari (immagine prodotta da LIGO/Virgo).

Tuttavia, in generale, il fenomeno di coalescenza di buchi neri non dovrebbe generare oggetti capaci di elevata luminosità elettromagnetica. I buchi neri, come è noto, sono oggetti la cui gravità è tale da non permettere nemmeno alla luce di sfuggire al loro campo gravitazionale entro una certa distanza dal centro dell'oggetto, nota con il suggestivo termine di orizzonte degli eventi. Di fatto anche la coalescenza di oggetti di questa categoria ci si aspetta, e si è osservato, produrre buchi neri di massa un poco inferiore alla somma delle masse degli oggetti di partenza²⁹.

I buchi neri possono certamente influenzare lo spazio circostante con la loro gravità ma non emettendo radiazione elettromagnetica non sono osservabili con i normali telescopi di uso astrofisico alle varie lunghezze d'onda³⁰.

Tuttavia questo non è più vero se almeno uno degli oggetti che danno luogo alla coalescenza non è una stella di neutroni. In questo caso, come teorizzato in realtà già dagli anni Novanta, durante la coalescenza potrebbero crearsi le condizioni adatte per avere espulsione di massa che possono dare luogo a una fenomenologia nota come «kilonova» o «macronova»³¹, sulle quali torneremo fra breve.

Alla ricerca della kilonova

Come abbiamo discusso in precedenza, la coalescenza di un sistema binario formato da stelle di neutroni è stata, ed è tuttora, il riferimento su cui basare le previsioni teoriche per le possibili sorgenti di onde gravitazionali alla portata dei rivelatori attuali.

La scoperta di un gran numero di coalescenze di buchi neri di massa elevata ha naturalmente attratto l'attenzione dei teorici e degli sperimentali ma l'interesse verso i sistemi in cui almeno una delle due componenti sia costituita da stelle di neutroni non è certo scemato.

Il motivo principale è legato all'interazione gravitazionale che guida la coalescenza. In oggetti con gravità superficiale senz'altro intensa ma non ai livelli di un buco nero il fenomeno è accompagnato dall'espulsione di una certa quantità di massa, tipicamente alcuni centesimi di massa solare, che vanno a formare un «guscio» in rapida espansione al 20-30% della velocità della luce, e che può essere identificato e osservato con i telescopi ottici.

Da molti punti di vista la possibilità di combinare osservazioni elettromagnetiche e osservazioni gravitazionali di un evento di coalescenza presenta opportunità eccezionali. Prima di tutto l'identificazione di una kilonova può permettere di misurare la distanza per esempio studiando lo spostamento verso il rosso della galassia di cui fa parte il sistema considerato.

Se questo accade è possibile confrontare la misura della distanza ottenibile dalle sole misurazioni di onde gravitazionali e da ciò derivare preziose informazioni cosmologiche. Inoltre, sempre se la distanza è nota da altre fonti, le osservazioni a onde gravitazionali permettono di ricavare con precisione l'inclinazione del sistema binario che ha originato la coalescenza rispetto alla direzione di osservazione. E questo a sua volta per esempio offre precisi vincoli modellistici per l'interpretazione delle osservazioni ottiche.

Esiste tuttavia un altro aspetto di enorme rilevanza che tuttavia per essere compreso richiede un ragionamento relativamente articolato. Partiamo da quello che senza dubbio è uno dei più grandi risultati della moderna astrofisica, sebbene talvolta non adeguatamente compreso nella sua portata. Si tratta di uno scenario che normalmente è noto come «storia dell'arricchimento chimico dell'Universo».

L'Universo che si è formato pochi istanti dopo il big-bang³², infatti, era formato essenzialmente da solo idrogeno ed elio. La rapida evoluzione in temperatura dell'Universo primordiale, insieme ad alcune caratteristiche delle reazioni di fusione nucleare coinvolte, ha fatto sì che gli altri elementi chimici che seguono nella tabella periodica fossero presenti solo in tracce.

La gran parte degli elementi chimici di cui è composto l'Universo attuale, infatti, si sono formati all'interno delle stelle, dove reazioni di fusione a partire da elementi «leggeri», come appunto l'idrogeno e l'elio, lasciati da quella che è chiamata nu-

cleosintesi primordiale, producono gli altri elementi e l'energia che serve a sostenere le strutture stellari stesse.

La scoperta di questi meccanismi di produzione di energia, e di fatto quindi a tutti gli effetti del «motore delle stelle», ha visto il ruolo fondamentale di Hans Bethe³³ verso la fine degli anni Trenta del secolo passato. In questo scenario mancano ancora, però, gli elementi chimici molto «pesanti», quelli che nella tabella periodica vengono essenzialmente dopo il ferro.

La fusione nucleare infatti non è in grado di produrre nuclei più pesanti se non a spese dell'energia stessa delle stelle, e gli astronomi infatti hanno identificato altri meccanismi che sono legati alla possibilità che in determinate situazioni la materia possa essere sottoposta a un intenso flusso di neutroni³⁴.

Se questo accade è possibile arrivare alla produzione³⁵ di essenzialmente tutti gli elementi pesanti della tabella periodica fino alla categoria detta dei lantanoidi o attinoidi. E i fenomeni astrofisici dove si presentano le condizioni più adatte per la produzione di elementi pesanti sono proprio durante la fusione di stelle di neutroni. Comprensibile quindi la convergenza di interessi nello studio di questi fenomeni anche oltre l'interesse legato all'astrofisica gravitazionale.

Un tranquillo pomeriggio di mezza estate

La possibilità di rivelare il segnale gravitazionale dovuto a una fusione di un sistema binario con almeno una stella di neutroni era naturalmente fra le possibilità attese durante i periodi di osservazione di LIGO e Virgo anche se, generalmente, si riteneva che ci fosse bisogno di un ulteriore incremento delle capacità degli strumenti tali da far rendere plausibile una prima rivelazione solamente dopo alcuni anni di lavoro. Predizioni quanto mai errate, come vedremo.

Il 17 agosto 2017, poco dopo le due del pomeriggio, la tranquilla routine, spesso vacanziera, di molti astronomi, infatti, fu interrotta dalla ricezione di messaggi³⁶ che annunciavano la scoperta di un nuovo segnale di onde gravitazionali.

Non è un mistero che la reazione di molti, certamente dello scrivente, fu a un primo momento guidata dal pensiero che, magari, questa volta, «lo si poteva lasciare andare». Tre giorni prima, infatti, il 14 agosto 2017³⁷, un altro evento di onde gravitazionali era stato rivelato e la collaborazione GRAWITA aveva dedicato notevoli sforzi osservativi per coprire in maniera efficace l'ampia area di provenienza probabile dell'evento.

Si trattava per altro di un'altra coalescenza di buchi neri e quindi, sebbene in ogni campo di ricerca sostanzialmente inesplorato sia opportuno essere pronti alle sorprese, avevamo la ragionevole aspettazione che nessuna controparte ottica alla portata dei nostri telescopi poteva essere rivelata.

In effetti le nostre attese per una rilassante fine agosto sarebbero state rapidamente stravolte. Nemmeno il tempo, infatti, di verificare la visibilità dell'evento³⁸, che comunque risultava osservabile dai telescopi terrestri posti nell'emisfero meridionale del nostro pianeta per poche ore dopo il tramonto, che ci veniva comunicato³⁹ la abbastanza inaspettata, e per questo probabilmente anche più eccitante, notizia che si trattava con grande probabilità di una coalescenza fra stelle di neutroni! In quel preciso istante io e i miei colleghi abbiamo avuto la chiara conferma che le nostre residue speranze di passare una fine estate con le nostre famiglie erano destinate a essere rapidamente frantumate...

Nei primi minuti dalla ricezione della comunicazione dell'evento, in realtà, le novità si accavallavano ma certamente non rimase in secondo piano la comunicazione che meno di due secondi dopo l'istante della probabile coalescenza di due stelle neutroni due satelliti per l'osservazione del cielo ad alte energie, *Fermi* e *Integral*⁴⁰, avevano rivelato in maniera indipendente ma consistente fra loro un debole lampo di luce gamma⁴¹ da una direzione nel cielo compatibile con quella del segnale gravitazionale.

Fino a questo momento avevamo solo le informazioni gravitazionali provenienti dalle antenne in territorio statunitense, LIGO, ma come abbiamo visto anche Virgo era diventato operativo e infatti in breve fummo informati sui risultati dell'antenna italiana e, come era già successo per l'evento gravitazionale del 14 agosto, la combinazione di tutte le informazioni disponibili permise di restringere l'area di provenienza a circa una trentina di gradi quadrati⁴² verso la direzione della costellazione dell'Idra.

A questo punto ormai il dado era tratto e praticamente tutti i gruppi di ricerca del pianeta che avevano interesse per questa tematica e potevano contare su strumenti di osservazione nell'emisfero sud del pianeta cominciarono a pianificare la ricerca della possibile controparte ottica di questo fenomeno. Sebbene l'area di incertezza fosse sostanzialmente più ridotta che per gli eventi precedenti⁴³, si trattava comunque di uno sforzo imponente.

La ricerca di un oggetto ignoto di questa categoria poteva avvenire seguendo due diverse strategie. In un caso si cerca di «coprire» l'area di incertezza con telescopi a grande campo, tali cioè da essere in grado di poter contenere ampie porzioni di cielo in un'unica immagine.

I telescopi ad ampio campo sono strumenti altamente specializzati e richiedono una notevole organizzazione per essere gestiti in maniera propria e poterne analizzare i dati con efficienza. La comunità italiana ha a disposizione uno strumento eccellente per questo scopo, il *Survey Telescope*⁴⁴ (VST), localizzato presso l'osservatorio del Cerro Paranal dell'ESO. Il consorzio GRAWITA infatti aveva accesso al telescopio con dei programmi osservativi volti proprio alla ricerca di controparti di eventi gravitazionali⁴⁵. La mole di dati prodotta da questi strumenti a grande campo è imponente e di conseguenza un'analisi completa richiede diverse ore di lavoro ed è quindi importante seguire anche un approccio differente che consiste nel costruire un catalogo delle galassie note nella direzione dell'area di probabilità della sorgente gravitazionale entro un ragionevole intervallo alla distanza aspettata per la sorgente⁴⁶.

Nel caso di GW170817 le informazioni da LIGO e Virgo indicavano un'origine a poco più di 100 milioni di anni luce dalla Terra e nell'area indicata i cataloghi in nostro possesso⁴⁷ riportavano la posizione di una cinquantina di galassie con diverse morfologie e luminosità. Così come la maggior parte delle stelle sono associate in galassie, è plausibile immaginare che anche i sistemi di oggetti compatti binari, comunque risultato finale dell'evoluzione di stelle di massa elevata, seguano una distribuzione simile⁴⁸.

Dal momento che si tratta anche in questo caso di una ricerca complessa e che richiede una rilevante quantità di tempo telescopio, normalmente solo una galassia per volta cade nel campo di vista di un telescopio «normale». Ne consegue che non è possibile pensare di utilizzare i telescopi di grande taglia impegnati in osservazioni spesso pianificate mesi prima per queste ricerche, ma l'ideale sono piccoli strumenti con i quali l'interazione può essere rapida e con un programma osservativo adattabile alle circostanze in maniera dinamica.

La comunità italiana ha a disposizione per questo genere di attività uno strumento dedicato, il telescopio robotico REM⁴⁹ anch'esso situato sulle Ande cilene (*Figura 3*) ma nell'osservatorio ESO di La Silla. Identificate una trentina di galassie, le più brillanti e le meglio visibili fra quelle note, e programmato il telescopio per osservarle una ad una con la massima priorità, l'appuntamento era quindi per il tramonto cileno, grossomodo le nostre 2 del mattino del 18 agosto.

Figura 3 Il telescopio REM, con il suo riconoscibilissimo color «melanzana» e il massiccio parco strumenti, mentre punta verso le zone centrali della Via Lattea dall'osservatorio dell'ESO di La Silla sulle ande cilene (immagine prodotta da REM/IP. Aniol).



Non ci potevamo credere...

Puntuali quindi nella notte estiva italiana, connessi in video conferenza, quattro ricercatori⁵⁰ della collaborazione GRAWITA si trovarono a ricevere in tempo reale i dati da REM e verificare, con mappe degli stesse zone di cielo ottenute in passato, la presenza di sorgenti «nuove».

Il processo era abbastanza ripetitivo. Il telescopio osservava una delle galassie in programma. Noi ricevevamo i dati dal Cile tramite l'archivio dei dati REM di Bologna, e controllavamo che non ci fossero evidenti sorgenti non catalogate nei campi in esame. Era anche suggestivo, nella quiete delle notti estive, pensare a quanti altri colleghi, alcuni anonimi, ma per lo più ben conosciuti se non realmente amici, erano impegnati per lo stesso scopo in varie parti del mondo. I confini in queste occasioni sembrano davvero un'invenzione innaturale.

Poco dopo le tre del mattino, quando ormai REM aveva osservato una decina di galassie differenti, riceviamo una comunicazione che annunciava che un gruppo americano con il telescopio *Swope*⁵¹, situato a poche decine di chilometri dal sito di REM, aveva identificato una sorgente brillante non catalogata, nei pressi della galassia relativamente massiccia denominata NGC4993⁵².

Questo oggetto era nell'elenco di quelli che erano in programma per essere osservati anche da noi, ma il telescopio lo avrebbe puntato quasi un'ora più tardi. Con pochi comandi al computer di controllo del telescopio abbiamo portato questa galassia immediatamente nel campo di vista e, ovviamente, ma non per questo con meno eccitazione, la sorgente era lì ben visibile e brillante nel campo di vista, nelle immediate vicinanze di questa galassia di morfologia apparentemente ellittica ma con segni di altre strutture al suo interno (Figura 4). Non ci potevamo credere, letteralmente.

In realtà non è affatto un'evenienza rara quella di trovare un oggetto non catalogato in campi stellari. Ci sono una grande quantità di possibili sorgenti che mostrano comportamenti transienti. Dalle fasi finali di vita di stelle massicce, tipo supernove, a stelle variabili di lungo periodo, asteroidi non catalogati, stelle nove, a flares, eccetera.

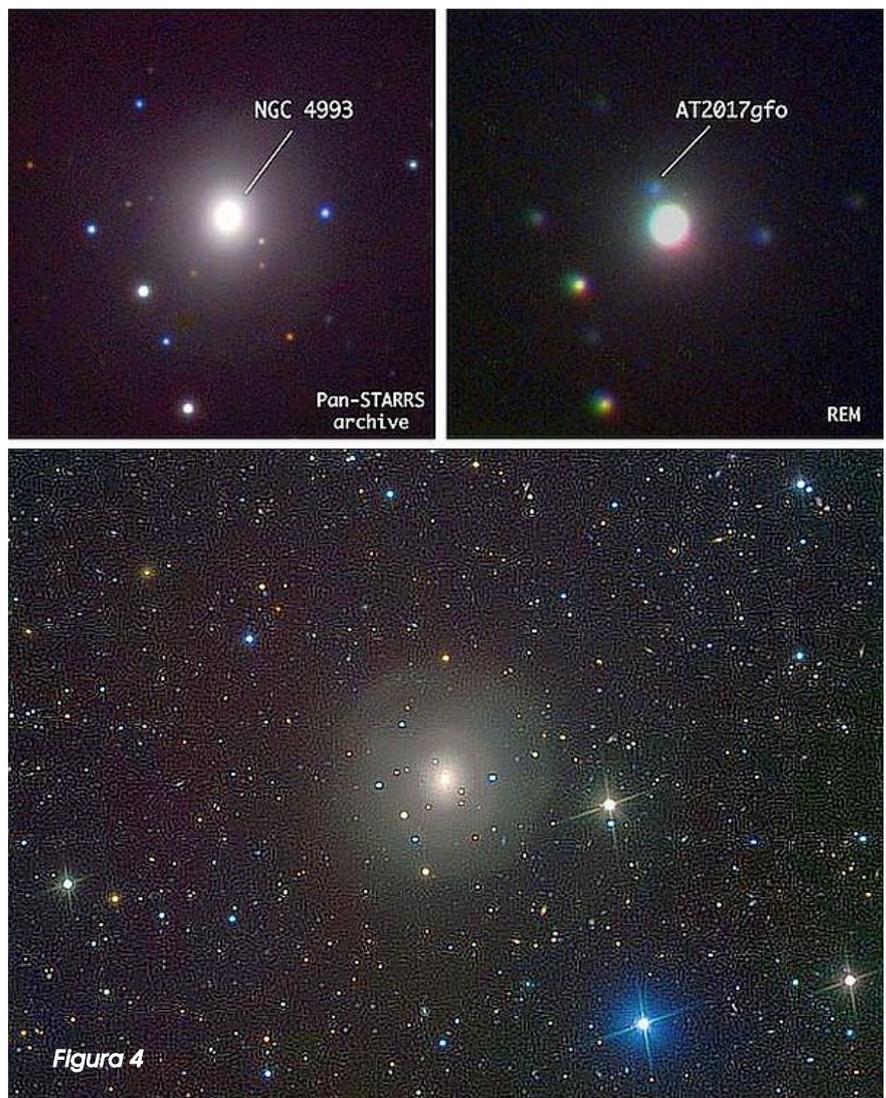


Figura 4: Immagini del campo di NGC4993 ottenute con il telescopio Pan-STARRS (dati di archivio) e il telescopio REM, in alto e VST, in basso. La controparte ottica dell'evento di onde gravitazionali GW1808117, denominata AT2017gfo, è la sorgente blu in alto a sinistra (tecnicamente una decina di secondi d'arco verso nord-est) nei pressi della galassia. La galassia stessa mostra una morfologia da galassia ellittica ma con strutture a suo interno segno, forse, di passati episodi di interazione (immagini prodotte da GRAWITA/ A. Melandri/A. Grado).

Di suo, insomma, il trovare un oggetto non catalogato non presenterebbe particolare eccezionalità. Tuttavia la combinazione di elevata luminosità dell'oggetto identificato, la coincidenza temporale e spaziale con l'evento di onde gravitazionale e il lampo di luce gamma e la vicinanza a una galassia massiccia e brillante rendeva la probabilità di associazione casuale molto bassa.

Di conseguenza era convinzione comune, anche se mediata da una normale prudenza scientifica, di trovarsi davvero di fronte a un punto di svolta. L'identificazione della prima controparte elettromagnetica di un evento di onde gravitazionali. Qualcosa che, se confermato, avrebbe significato una scoperta realmente epocale.

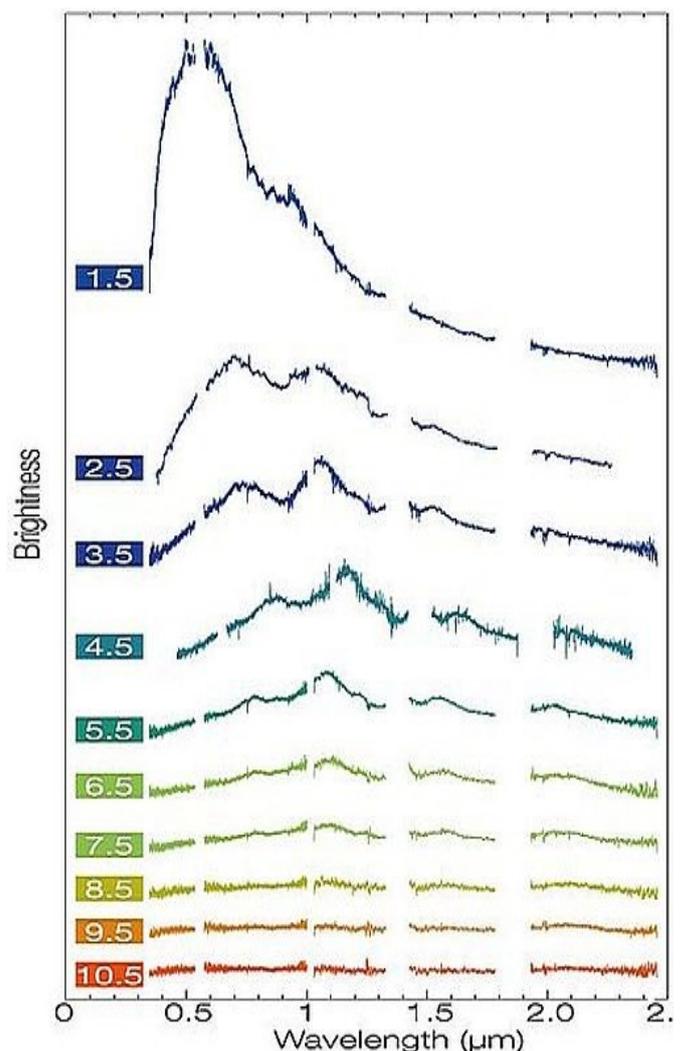
Ma la conferma non poteva venire a breve. Il campo era ormai vicino a tramontare in Cile, e ad altre longitudini non c'erano telescopi di taglia adeguata per poter compiere il passo successivo per una sicura identificazione, ovvero l'ottenere degli spettri⁵³ del nostro oggetto, nel frattempo denominato con il non poco astruso codice di AT2017gfo. In effetti l'attesa era realmente spasmodica nella comunità internazionale e informazioni spettroscopiche ottenute la notte stessa della scoperta non avevano ancora la qualità sufficiente per dare una risposta certa.

Stava per cominciare quella che forse è stata la più imponente campagna osservativa, almeno se si guarda al diametro dei telescopi coinvolti, di tutti i tempi. La comunità italiana era particolarmente ben posizionata in questa grande avventura ma anche competizione, avendo accesso alla grande varietà di strumenti che equipaggiano le 4 unità del VLT⁵⁴ al Cerro Paranal in Cile. In particolare pensavamo di poter usufruire delle speciali caratteristiche di uno strumento denominato *X-shooter*, uno spettrografo avanzato capace di ottenere spettri in una sola osservazione dall'ultravioletto al vicino infrarosso⁵⁵.

I ricercatori del consorzio GRAWITA erano alla guida di due differenti programmi osservativi con *X-shooter* ma anche di altri con diverse strumentazioni del VLT⁵⁶. Il pomeriggio del 18 agosto infatti preparammo le osservazioni con tutte le informazioni disponibili e ancora una volta, all'inizio della notte cilena, eravamo pronti a ricevere i dati e analizzarli immediatamente.

I contatti con la superba organizzazione dell'ESO ci davano confidenza che le osservazioni sarebbero state fatte con efficienza e infatti nel corso della notte cominciarono ad arrivare i dati. L'analisi richiede un certo tempo ma anche i risultati preliminari mostravano uno spettro assolutamente peculiare (*Figura 5*), dissimile da quanto visto in precedenza per altre sorgenti transienti come le supernove, e in definitiva la firma chiara di una categoria di sorgenti astrofisiche del tutto nuove: avevamo identificato con certezza una kilonova! Ancora una volta, in un certo senso, non ci potevamo credere...

Figura 5 Una sequenza di spettri ottenuti con lo strumento *X-shooter* che equipaggia il telescopio VLT all'osservatorio dell'ESO di Cerro Paranal in Cile. Sulla scala verticale abbiamo il flusso ricevuto in unità arbitrarie e scalato artificialmente per mostrare gli spettri ottenuti dal 18 al 27 agosto. Lungo la scala orizzontale abbiamo la lunghezza d'onda espressa in micrometri, equivalenti a $10^{-6}m$ (immagine prodotta dal ESO/E. Pian/S. Smartt).



Oro, platino e neodimio

L'interpretazione degli spettri, come è immaginabile, è un lavoro specialistico molto complesso. E altrettanto importante è l'evoluzione temporale degli stessi. Senza entrare in dettagli inessenziali in questo contesto, la *Figura 4* mostra una sequenza temporale caratterizzata dalla presenza di una componente molto brillante nella parte blu/gialla dello spettro⁵⁷ che in pochi giorni sparisce completamente, lasciando una componente con maggiori emissioni nella parte infrarossa dello spettro che invece decade molto più lentamente nel tempo.

Se, ipoteticamente, questa sorgente fosse stata così brillante da essere visibile chiaramente ad occhio nudo avremmo assistito a uno spettacolo esaltante e, per certi versi, drammatico (*Figura 6*). Appena dopo l'evento di onde gravitazionali la sorgente che si è formata sarebbe stata di un colore blu profondo per poi passare in poche ore a un azzurro intenso e poi degradare verso il giallo in un paio di giorni. Per poi quindi diventare di un rosso brillante e poi sempre più cupo, e il tutto in poco più di una settimana.

Questo comportamento era stato in effetti predetto alcuni anni fa' in seguito a simulazioni numeriche della fusione di stelle di neutroni. L'averlo effettivamente confermato osservativamente rappresenta un grande successo per gli astrofisici teorici che avevano affrontato il problema di modellizzare questa categoria di eventi.

Lo studio dell'imponente mole di dati ottenuta per questo evento, nelle poche settimane in cui è stato sufficientemente luminoso per essere osservabile, ha fornito preziose informazioni su vari aspetti del fenomeno come la velocità di espulsione della materia, la quantità di massa, la geometria, ecc.

Un punto di grande rilevanza è stato quello della composizione chimica del materiale in espansione che ha formato la kilonova.

Come è noto, le analisi spettroscopiche hanno permesso agli astrofisici di ottenere informazioni, a volte anche molto accurate, sulla composizione chimica di stelle e nebulose anche a grande distanza dal Sole.

E come si era anche accennato in precedenza, la fusione di stelle di neutroni fornisce un ambiente ricco di neutroni energetici che si è ipotizzato possa essere uno dei luoghi dell'universo dove la formazione degli elementi pesanti, i cosiddetti lantanoidi ed attinoidi, possa essere più efficiente.

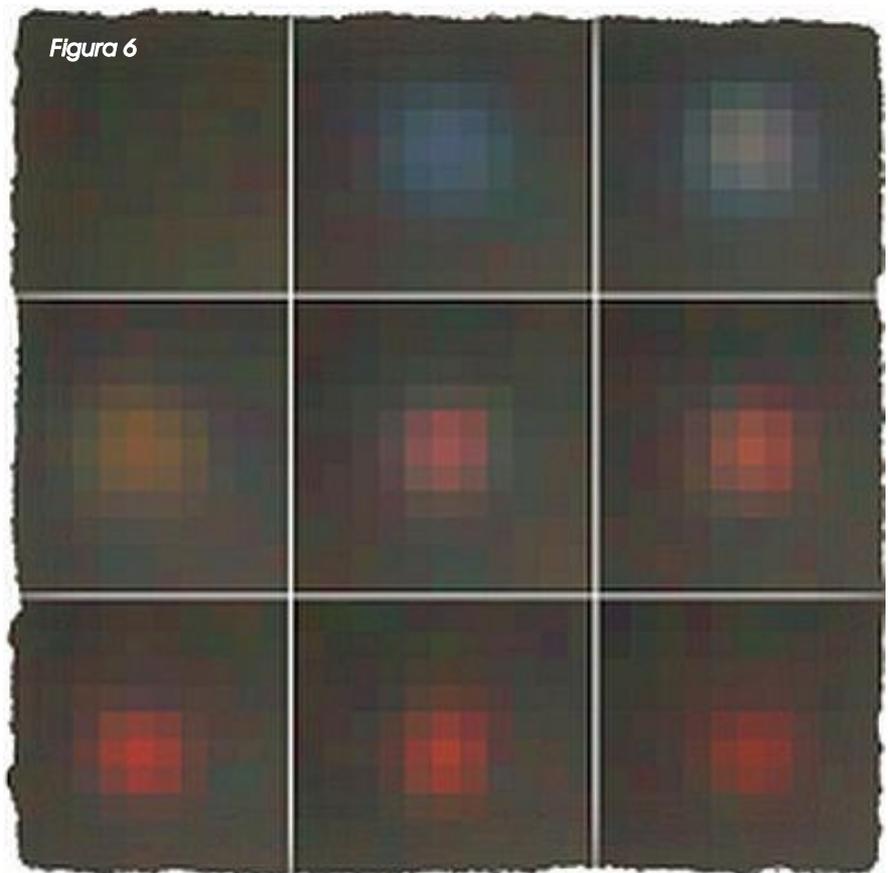


Figura 6 Evoluzione di colore della kilonova associata all'evento di onde gravitazionali GW170817. Ogni quadrato rappresenta, approssimativamente, un giorno dall'evento, partendo dal primo che rappresenta il giorno 0 (prima della scoperta). In poco più di una settimana passiamo dal blu più intenso al rosso cupo (immagine prodotta da B. Milvang-Jensen/collaborazione VINROUGE).

L'analisi degli spettri ottenuti, oltre ad una serie di evidenze indirette, ha brillantemente confermato questa ipotesi (Figura 7). Si è calcolato che in questa fusione si sia formata una massa equivalente a una decina di volte la nostra Terra in oro e platino. Ed è sicuramente suggestivo pensare che uno qualunque degli oggetti d'oro che possiamo indossare o possedere, si è formato in una fusione di stelle di neutroni che si è completata ben prima che il nostro sistema solare, e con esso la Terra, si formasse, circa 5 miliardi di anni fa.

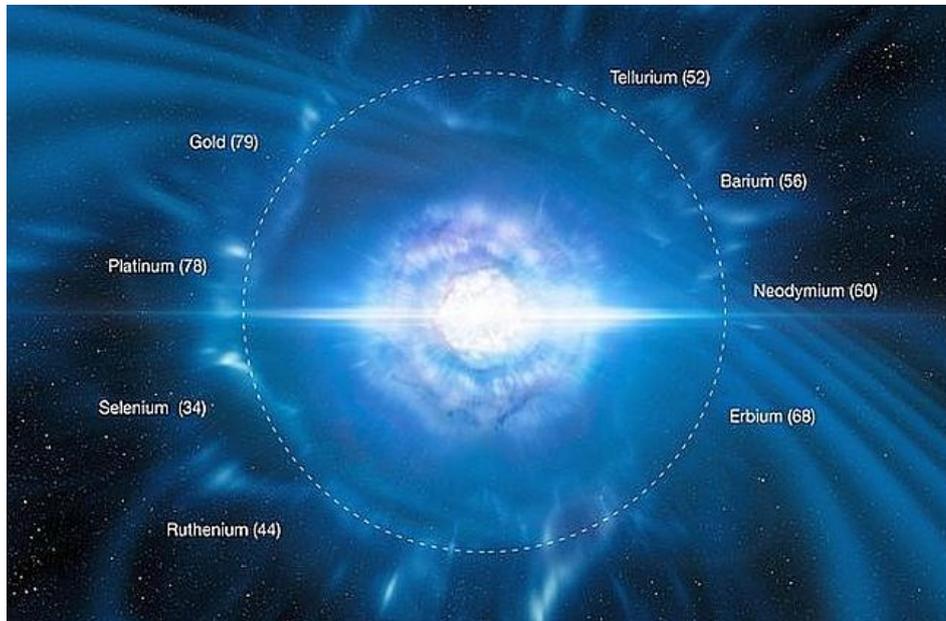


Figura 7 Rappresentazione artistica dell'esplosione di una kilonova con indicati alcuni degli elementi che si sono prodotti e il loro numero atomico (immagine prodotta da ESO/L. Calçada/M. Kornmess).

Anche se non direttamente legate alla fisica della kilonova, le osservazioni relative a questo evento però sono proseguite nelle settimane e mesi successivi. Come si ricorderà, meno di due secondi dopo l'evento gravitazionale, fu identificato un debole segnale gamma.

La fusione di oggetti compatti con almeno una stella di neutroni è stato ipotizzato essere l'evento progenitore di una delle due classi note di lampi di luce gamma, quella dei cosiddetti lampi «corti»⁵⁸.

I lampi di luce gamma sono emissioni di radiazione di alta energia estremamente collimate denominati infatti «getti». L'essere rivelati da satelliti dotati di strumenti per l'osservazione ad alte energie implica che la Terra e il sistema solare, per casualità, sono entro il cono di apertura della loro emissione⁵⁹.

Se invece siamo fuori dalla regione di emissione principale l'emissione risulterà molto più debole, come appunto è stato il caso di questo evento. Per tutta una serie di motivi legati all'evoluzione temporale di questi getti si è calcolato che, mesi dopo l'evento che ha generato il segnale gravitazionale e il lampo di luce gamma, doveva emergere un'emissione molto debole ma persistente per molte settimane e rivelabile con telescopi radio, ottici e X.

Esattamente quello che è successo e, grazie a un'ulteriore campagna osservativa con i migliori strumenti da terra e dallo spazio, i è riusciti a ottenere informazioni che hanno chiarito la struttura dei getti di questa categoria di sorgenti astrofisiche risolvendo problemi aperti da decenni⁶⁰.

Il futuro

Con la scoperta e studio della controparte ottica di un evento di onde gravitazionali si è detto, e con ragione, che l'astrofisica è entrata di diritto nell'era dell'astronomia multi-messaggio. Dove, cioè, le informazioni dalle sorgenti celesti possono provenire tramite diversi vettori di informazione.

I fotoni, ovviamente, ovvero la radiazione elettromagnetica, come abbiamo visto le onde gravitazionali, ma anche i neutrini e i raggi cosmici, ovvero particelle di materia accelerate da vari processi che ci arrivano da oggetti celesti. Ed è suggestivo vedere come in una manciata di mesi sia successo tutto in maniera così intensa. Dalla prima riunione costitutiva della collaborazione GRAWITA, nel settembre 2015, ai rocamboleschi eventi dell'agosto 2017, e alle osservazioni più tarde dei getti del lampo di luce gamma nella primavera del 2018, sono passati poco più di due anni.

Naturalmente, questa è stata solo la fase più apparente di un processo che però era già in corso da tempo⁶¹ e che ha visto certamente l'astrofisica italiana mostrarsi pronta a cogliere l'occasione quando si è presentata⁶². Si è trattato in effetti di uno sforzo corale, sono moltissimi i ricercatori che meriterebbero di essere citati per il loro contributo.

In queste note ci siamo limitati per ovvia necessità ai responsabili delle principali campagne osservative, ma da tutti i punti di vista non sarebbe stato possibile ottenere questi risultati senza una sinergia efficace fra specialisti di diversa estrazione, dalle osservazioni alle interpretazioni teoriche. E, sebbene il contributo italiano a questa impresa sia stato oggettivamente primario, si è trattato di uno sforzo collettivo della comunità astrofisica internazionale che ha coinvolto migliaia di ricercatori in tutto il mondo⁶³.

L'annuncio pubblico della rivelazione di GW170817 da parte del consorzio LIGO/Virgo fu concordato per la metà di ottobre del 2017⁶⁴, e anche i risultati interpretativi e osservativi delle campagne di osservazione furono diffusi in simultanea. In un colpo solo furono pubblicati più di un centinaio di articoli scientifici dedicati a questo evento. E probabilmente altrettanti sono seguiti nei mesi successivi.

E ora, mentre concludiamo queste note, ci stiamo infatti preparando per una nuova serie di osservazioni gravitazionali che, dopo una lunga fase di miglioramento e messa a punto delle apparecchiature, la collaborazione LIGO/Virgo dovrebbe cominciare nei primi mesi del 2019.

Essendo lo sforzo ormai globale i ricercatori europei hanno deciso di fondare un consorzio che raggruppi tutti coloro che sono impegnati in questo campo dal punto di vista delle osservazioni con telescopi ottici. Il consorzio ENGRAVE⁶⁵. In questo, come in molti altri campi della scienza, la collaborazione europea ha prodotto eccellenti risultati. E la sinergia fra scienziati di qualità, e strumentazione all'avanguardia, non mancherà di dare i suoi frutti.

Da molti punti di vista, probabilmente il meglio deve ancora venire!

Stefano Covino

(Istituto Nazionale di Astrofisica - INAF, Osservatorio Astronomico di Brera - Milano)

[Vai allo Speciale dedicato al Simposio](#)

[Vai alle presentazioni dei relatori del Simposio](#)

NOTE

- ¹ Albert Einstein nasce il 14 marzo 1879 a Ulma da una famiglia benestante di cultura ebraica e muore negli Stati Uniti, a Princeton, il 18 aprile 1955. Nei suoi anni giovanili visse anche in Italia, a Milano, al seguito della famiglia. I continui spostamenti resero difficile al giovane Einstein ottenere i certificati scolastici necessari per l'accesso all'istruzione universitaria sebbene eccellesse in matematica e fisica. L'opinione diffusa di una sua poca brillantezza come studente è infatti sostanzialmente errata. Nel 1921 fu insignito del premio Nobel per i suoi contributi alla fisica teorica.
- ² Una delle predizioni della teoria della relatività generale è che la luce, oltre che i corpi materiali, subisca l'effetto della gravità. La prima verifica di questa predizione si ebbe durante una spedizione organizzata dal famoso fisico britannico Sir Arthur Eddington (1822-1944) per osservare un'eclisse di Sole il 29 maggio 1919. Durante l'eclisse risultò possibile confrontare la posizione di stelle osservate a ridotta distanza angolare dal Sole con immagini dello stesso campo stellare riprese in precedenza, confermando in maniera brillante e quantitativamente corretta le predizioni della teoria.
- ³ La matematica necessaria per descrivere lo spazio come una superficie curva in quattro dimensioni, in sostanza in calcolo tensoriale alla base delle descrizioni della relatività generale, fu suggerita a Einstein dal matematico italiano Tullio Levi-Civita (1873-1941), al quale lo scienziato tedesco si disse sempre grato in numerose corrispondenze.
- ⁴ Max Abraham è un fisico tedesco nato il 26 marzo 1875 e morto ancor giovane il 16 novembre del 1922. Fu uno dei primi a interessarsi di relatività generale e, fatto poco noto in Italia, su invito di Levi-Civita, fu docente di meccanica razionale al Politecnico di Milano fino alla vigilia della Prima Guerra Mondiale.
- ⁵ Willem de Sitter, olandese, nasce il 6 maggio 1872 e muore il 20 novembre 1934. Fra la fine degli anni Venti de Sitter e i primi anni Trenta del Novecento fu tra i più prolifici studiosi della relatività generale in particolare a riguardo di problematiche cosmologiche.
- ⁶ Albert Michelson nasce il 19 dicembre 1852 in Polonia ma emigrò con la famiglia verso gli Stati Uniti ancora in tenera età. Fu insignito del premio Nobel nel 1907 in fisica per lo sviluppo di tecniche di misure di alta precisione in ottica. Fu in effetti il primo cittadino americano a ottenere tale onore. Morì a Pasadena, in California, il 9 maggio 1931.
- ⁷ Edward Morley nasce il 29 gennaio 1838 nel New Jersey e morì nel Connecticut il 24 febbraio 1923. Sebbene fu insignito di numerose onorificenze e riconoscimenti nella sua carriera non ebbe mai il premio Nobel a differenza di Albert Michelson con il quale collaborò a lungo sulla serie di esperimenti dedicati alla misura della velocità della luce in varie condizioni che vengono ancora ricordati come «esperimenti di Michelson-Morley».
- ⁸ James Clerk Maxwell nasce ad Edimburgo il 5 maggio 1831 e muore a Cambridge il 5 novembre 1879. Fu il protagonista di uno dei più grandi avanzamenti concettuali del diciottesimo secolo, la formulazione della moderna teoria dell'elettromagnetismo.

- ⁹ Le teorie della relatività ristretta e generale di Einstein sono parte di un unico sviluppo concettuale in quanto la prima si occupa di ridefinire i concetti di relatività già sviluppati dal Galilei come, per esempio, la composizione della velocità quando queste si avvicinavano al valore della velocità della luce (circa 300000 km s⁻¹). Modificando le regole di composizione ne scaturivano conseguenze molto importanti e spesso conflittuali con il senso comune, come la dilatazione dei tempi e contrazione delle distanze, e i conseguenti paradossi (apparenti). La teoria della relatività generale estende questi concetti ipotizzando che la gravità fosse in realtà un fenomeno del tutto analogo ai fenomeni dinamici generati da accelerazioni ancora naturalmente inquadrati nella dinamica relativistica.
- ¹⁰ Per esempio la luce che i nostri occhi percepiscono come gialla ha una lunghezza d'onda di circa 550 nanometri (nm), dove un nm è un milionesimo di metro.
- ¹¹ LIGO (Laser Interferometric Gravitational-Wave Observatory) e Virgo sono collaborazioni scientifiche volte allo sviluppo di interferometri per misurare l'effetto di onde gravitazionali che attraversano la Terra e sono state fondate negli anni Ottanta. La prima è un'iniziativa di scienziati e finanziamenti statunitensi e ha prodotto i due interferometri situati ad Hanford, nello stato di Washington, e Livingstone, in Louisiana. La seconda è una collaborazione italiana e francese e ha sviluppato l'interferometro situato a Cascina, vicino a Pisa.
- ¹² Rainer Weiss, nato il 29 settembre 1932, è stato insignito del premio Nobel per la misura diretta di onde gravitazionali nel 2017. Ed è stato il primo, nei primi anni Settanta, a produrre uno studio realistico per un sistema a interferometria dedicato a questo scopo.
- ¹³ Kip Thorne nasce il 1 giugno 1940 è stato insignito del premio Nobel per la misura diretta di onde gravitazionali nel 2017, ed è un fisico teorico molto noto per i suoi studi sulla gravitazione.
- ¹⁴ Alain Brillet, nato il 30 marzo 1947, è un fisico francese fra gli iniziatori del progetto di un interferometro europeo.
- ¹⁵ Adalberto Giazotto è nato il 1 febbraio 1940 ed è deceduto recentemente, il 16 novembre 2017. Ebbe un ruolo chiave nel formare il gruppo di ricerca che poi portò al consorzio Virgo e la costruzione di un interferometro per onde gravitazionali europeo.
- ¹⁶ Tecnicamente si parla di una distribuzione di masse con momento di quadrupolo che varia nel tempo.
- ¹⁷ Un aspetto interessante, anche se un po' tecnico, della misura del passaggio di un'onda gravitazionale è che l'intensità della deformazione della metrica h decresce con l'inverso della distanza della sorgente. Nel caso, per esempio, delle onde elettromagnetiche invece abbiamo una dipendenza con l'inverso del quadrato. Questo dipende dal fatto che nel primo caso di misura l'ampiezza dell'onda gravitazionale, mentre nel secondo l'intensità dell'onda elettromagnetica che è, essenzialmente, legata al quadrato dell'ampiezza.
- ¹⁸ L'ammasso della Vergine si trova a circa 60 milioni di anni luce dalla nostra Galassia ed è composto da circa 1500 galassie.
- ¹⁹ Russell Alan Hulse nasce il 28 novembre 1950, fu insignito nel 1993 insieme a Joseph Taylor del premio Nobel per la scoperta del decadimento dell'orbita del sistema binario PSR 1913+16. Il decadimento dell'orbita fu trovato essere in eccellente accordo con le previsioni della teoria della relatività generale di Einstein e dovuto all'emissione di onde gravitazionali da parte del sistema. Si è trattata della prima evidenza, sia pure indiretta, della realtà fisica delle onde gravitazionali.

- ²⁰ Joseph Hooton Taylor nasce a Filadelfia il 29 marzo 1941. Fu insignito del premio Nobel, insieme a Russell Hulse, per avere ottenuto la prima evidenza indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali osservando il decadimento dell'orbita del sistema binario PSR 1913+16.
- ²¹ Abbastanza curiosamente per l'ottimo tempismo, il giorno successivo, il 15 settembre, ma totalmente ignari dell'accaduto (la notizia della rivelazione del segnale gravitazionale non era ancora stata resa nota) un gruppo di astronomi italiani, tra cui lo scrivente, Marica Branchesi, Enzo Brocato, Enrico Cappellaro, Aniello Grado, Luciano Nicastro, Eliana Palazzi, ed Elena Pian, tenne a Bologna la riunione fondativa della collaborazione denominata GRAWITA (*GRavitational Wave Inaf TeAm*). Si tratta di un consorzio costituito per la ricerca e lo studio delle possibili controparti elettromagnetiche di sorgenti di onde gravitazionali con, al momento, Enzo Brocato, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Roma, come investigatore principale. Come vedremo nel proseguimento di questa storia, GRAWITA avrà un ruolo fondamentale negli eventi che seguiranno.
- ²² Esiste una ricca aneddotica riguardo a questa prima detezione. C'era una certa fiducia infatti nella capacità dei rivelatori di arrivare a una misura di una segnale di onde gravitazionali in tempi abbastanza rapidi, ma si pensava che comunque il primo segnale reale sarebbe stato debole e quindi rilevabile solo dopo complesse analisi statistiche. Nella realtà il segnale da GW150914 fu invece molto intenso, tanto da essere quasi identificabile «ad occhio». La sorpresa fu notevole, e come racconta Marco Draghi, ricercatore italiano oggi al *Gran Sasso Science Institute* e coinvolto nell'analisi dei dati di LIGO, che al tempo fu tra i primi ad analizzare il segnale, per qualche tempo addirittura ci si domandò se non potesse essere un segnale artificiale, un test, iniettato nel sistema per metterne alla prova le varie componenti. Rapidamente tuttavia le verifiche del caso mostrarono invece che si trattava di un autentico segnale astrofisico.
- ²³ Convenzionalmente, in astrofisica, le masse degli oggetti celesti vengono misurate in multipli della massa del nostro Sole. In unità a noi più familiari la massa del Sole risulta essere circa 2×10^{30} kg.
- ²⁴ La formazione di un buco nero di taglia stellare è un processo complesso che coinvolge le ultime fasi di evoluzione di stelle di grande massa che tipicamente, ma non sempre, danno origine a esplosioni di supernove. Tuttavia non si pensava che il fenomeno potesse portare a buchi neri così massicci anche se, come spesso accade nella scienza, si è poi realizzato che scenari capaci di portare a buchi neri di qualche decina di masse solari erano già stati proposti in passato come, per esempio, dall'astrofisica dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Padova, Michela Mapelli.
- ²⁵ I buchi neri sono oggetti astrofisici che possono presentarsi in diverse categorie a seconda delle loro masse: quelli di taglia stellare hanno appunto masse comparabile o non troppo più grandi di quelle del Sole, altrimenti possiamo avere buchi neri «intermedi» o «super-massicci» con masse da qualche decina di migliaia fino anche a miliardi di volte quella del Sole. I buchi neri super-massicci sono al centro delle galassie e la loro interazione con l'ambiente è spesso responsabile dell'ampia gamma di fenomeni che caratterizza i nuclei galattici attivi.
- ²⁶ La sigla è composta dall'acronimo GW, *Gravitational Wave*, e poi da 6 cifre che indicano le ultime due dell'anno in corso, «15», il mese, «09», e il giorno, «14». Ovvero GW150914.
- ²⁷ Barry Clark Barish nasce il 27 gennaio 1936, ed è il responsabile del funzionamento degli interferometri LIGO nel suo ruolo di direttore che tiene dal 1997. È stato insignito del premio Nobel per la fisica per la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali nel 2017, insieme a Kip Thorne e Rainer Weiss.

- ²⁸ Per ottenere dei risultati conclusivi sarà necessario osservare un numero elevato di eventi di coalescenza, ma in ogni caso fino a ora, ancora una volta, non sembra ci siano deviazioni significative dalle predizioni della teoria della relatività generale.
- ²⁹ La massa mancante infatti è quella convertita in energia irraggiata tramite onde gravitazionali. Nel caso dell'evento GW150914, a partire come si è detto da due oggetti di 26 e 32 masse solari, il buco nero risultante era di «sole» 62 masse solari, e di conseguenza ben 3 masse solari sono state convertite in onde gravitazionali.
- ³⁰ Effettivamente i buchi neri in quanto tali non sono osservabili elettromagneticamente, ma in caso si trovino ad accrescere massa, per esempio in un sistema binario con una stella evoluta, le cosiddette binarie X, possono dare luogo a fenomeni come la formazione di dischi di accrescimento che portano la materia in fase di caduta nel buco nero a raggiungere temperature estremamente elevate e quindi a diventare potenti sorgenti di radiazione tipicamente, ma non esclusivamente, di alta energia. Questa però non è una caratteristica univoca di sistemi con buchi neri ma vale, in maniera sostanzialmente analoga, ogni qualvolta abbiamo un oggetto compatto (una stella di neutroni, una nana bianca o, appunto, un buco nero) in fase di accrescimento di materia. Non è sorprendente quindi comprendere come i sistemi in accrescimento siano di enorme interesse astrofisico anche per la grande varietà di fenomenologie che possono produrre.
- ³¹ I termini *kilonovae* o *macronovae* sono stati conati da due gruppi di ricerca che, indipendentemente fra loro, avevano studiato il fenomeno della coalescenza di sistemi binari con almeno una stella di neutroni, e fanno riferimento al fatto che dal punto di vista osservativo l'oggetto che si forma presenta similitudini con le *supernovae*, anche se caratterizzato da una luminosità circa un migliaio di volte inferiore.
- ³² La teoria del big-bang si basa sull'ipotesi che l'Universo in un lontano passato, quasi 14 miliardi di anni fa, abbia sperimentato una fase di grande densità e temperatura. Sebbene molti dettagli siano ancora in attesa di un'adeguata comprensione, lo scenario generale è ampiamente accettato e in effetti si basa in maniera solida su tre grandi evidenze sperimentali: a) l'osservazione della recessione delle galassie, b) la scoperta della radiazione fossile di fondo e infine, c) la composizione chimica dell'Universo che, essenzialmente, non potrebbe essere correttamente spiegata senza la citata fase iniziale di alta densità e temperatura.
- ³³ Hans Albrecht Bethe nasce a Strasburgo il 2 luglio 1906 e muore negli Stati Uniti, a Ithaca, il 6 marzo 2005. Si tratta di un altro dei tantissimi scienziati che lasciarono la Germania alla fine degli anni Trenta del secolo scorso e fu lo scopritore dei cicli di fusione nucleare che a partire da idrogeno arrivano alla formazione di elio e rilascio di ingenti quantità di energia. Si tratta infatti del principale meccanismo di produzione di energia con il quale le strutture stellari si sostengono contro la loro stessa gravità. Bethe fu insignito per queste scoperte, che diedero soluzione all'antica diatriba su quale fosse il meccanismo che permetteva alle stelle di esistere come oggetti radianti per miliardi di anni, del premio Nobel per la fisica nel 1967.
- ³⁴ I neutroni sono particelle subatomiche grossomodo di massa simile ai protoni, ma con carica elettrica nulla, da cui il nome. Protoni e neutroni possono legarsi insieme in diverse proporzioni nei nuclei atomici.
- ³⁵ In letteratura, più precisamente, si parla di processi «lenti» e «rapidi» («s» ed «r», dagli equivalenti termini inglesi) a seconda del fatto che il bombardamento di neutroni sia più o meno rapido dei decadimenti a cui i nuclei possono soggiacere come risposta a instabilità se eccessivamente arricchiti di neutroni.

- ³⁶ L'astrofisica dei fenomeni transienti ha richiesto la definizione di un sistema di *alert* rapidi che dopo la ricezione di un segnale da parte di un satellite o, nel caso delle onde gravitazionali, da parte delle antenne dedicate, comunica le prime informazioni disponibili agli astronomi interessati tramite un sistema di messaggistica anche su telefoni cellulari.
- ³⁷ Il segnale fu denominato GW140817, e fu il primo evento di onde gravitazionali rivelato da tre antenne. Il rivelatore Virgo infatti era finalmente arrivato all'operatività e, sebbene ancora con sensibilità ridotta rispetto alle controparti americane di LIGO, si trattava di un accadimento di grande importanza in quanto la capacità di indicare la regione di massima probabilità per la provenienza del segnale gravitazionale risultava sostanzialmente migliorata, rendendo molto più efficaci la ricerca di eventuali controparti elettromagnetiche.
- ³⁸ Gli eventi di onde gravitazionali sono osservabili dai rivelatori di LIGO e Virgo essenzialmente in ogni posizione del cielo. La Terra o il Sole non sono ostacoli alla rivelazione. Non è questo il caso per esempio di telescopi sulla superficie della Terra. Così come a seconda delle stagioni vediamo determinate costellazioni durante la notte e altre no, una qualunque area di cielo può essere non visibile da Terra, in generale, se per esempio troppo vicina angolarmente alla direzione del Sole.
- ³⁹ La comunicazione veniva direttamente dalla collega Marica Branchesi, al momento in forza al *Gran Sasso Science Institute*. Il suo ruolo in questi eventi è stato infatti quello di fornire una preziosa connessione fra la comunità di scienziati al lavoro con le antenne per onde gravitazionali e quella degli astrofisici (detta scherzosamente, ma anche correttamente degli «elettromagnetici»). Per il suo ruolo di coordinamento ed organizzazione è stata indicata nel 2017, dalla prestigiosa rivista scientifica *Nature*, fra le 10 personalità scientifiche più rilevanti dell'anno.
- ⁴⁰ Fermi è un satellite della NASA, con importante collaborazione italiana, e fu lanciato nel giugno del 2008. Come dice il nome è intitolato al grande fisico Enrico Fermi. *Integral* invece è un satellite dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), anch'esso con ampie collaborazioni internazionali, lanciato nell'ottobre del 2002. Entrambi questi satelliti ospitano diversi strumenti e sono progettati per osservare radiazioni elettromagnetiche di alta energia, dai raggi X fino ai raggi gamma.
- ⁴¹ Denominato, con le stesse convenzioni degli eventi gravitazionali, GRB170817A.
- ⁴² A titolo esemplificativo un grado quadrato corrisponde grosso modo all'area di volta celeste occupata da quattro lune piene affiancate.
- ⁴³ Tipicamente da centinaia a migliaia di gradi quadro, con un marcato miglioramento in seguito alla raggiunta operatività di Virgo.
- ⁴⁴ Il VST, ovvero il VLT (*Very Large Telescope*) *Survey Telescope* nasce da un progetto congiunto fra il nostro paese e l'Osservatorio Europeo dell'Emisfero Sud (*European Southern Observatory*, ESO). In Italia il progetto è guidato da scienziati dell'INAF/Osservatorio di Capodimonte a Napoli. Si tratta di un telescopio di taglia intermedia, circa 2,5 metri di diametro, ottimizzato per osservazioni in luce visibile con un campo di vista di circa un grado di diametro.
- ⁴⁵ I responsabili di tali programmi erano Enrico Cappellaro, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Padova, ed Aniello Grado, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Capodimonte a Napoli. Mentre un ruolo chiave nella definizione della strategia di puntamento fu svolto da Giuseppe Greco, dell'Università di Urbino.

- ⁴⁶ I rivelatori di onde gravitazionali, nel caso di segnali da sorgenti per le quali siamo in grado di modellare con ragionevole precisione lo svolgersi dell'evento, come è il caso per la coalescenza di un sistema binario di oggetti compatti, permettono dall'analisi del segnale gravitazionale di avere informazioni abbastanza accurate sulla distanza dell'evento
- ⁴⁷ Come è facile immaginare la nostra conoscenza dell'Universo è limitata, e i cataloghi di galassie in nostro possesso sono ragionevolmente completi, almeno se ci si limita a galassie abbastanza massicce, fino a distanze di poche centinaia di milioni di anni luce. Oltre invece abbiamo informazioni solo su zone ristrette di cielo mentre certamente mancano ancora al computo totale sistemi stellari di massa ridotta o con caratteristiche relativamente peculiari, come galassie a bassa luminosità superficiale, galassie nane, eccetera.
- ⁴⁸ Sebbene quanto scritto sia sostanzialmente corretto, avvertiamo il lettore che i processi che precedono la formazione di un sistema binario di oggetti compatti sono complessi e potenzialmente in grado di influenzare la distribuzione spaziale di questi sistemi nelle galassie in cui si sono formati originariamente.
- ⁴⁹ REM è l'acronimo di *Rapid Eye Mount*, un telescopio con specchio principale di 60 cm di diametro e un rispettabile parco strumenti formato da camere ottiche e infrarosse in grado di osservare in simultanea. Lo strumento è totalmente robotico ed è stato sviluppato inizialmente per la ricerca di controparti ottiche di lampi di luce gamma ed è installato presso l'osservatorio di La Silla dell'ESO in Cile.
- ⁵⁰ Si trattava dello scrivente, Paolo D'Avanzo, Andrea Melandri e Sergio Campana, investigatore principale del programma, tutti dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Brera.
- ⁵¹ *Swope* è un telescopio da 1 m di diametro situato presso l'osservatorio di Las Campanas
- ⁵² Le galassie identificate sono riportate in vari cataloghi, e lo NCG (*New General Catalogue*) è uno di questi. L'oggetto in questione è infatti il numero 4993 dell'elenco.
- ⁵³ Uno spettro, in astrofisica, e non solo, è il risultato della dispersione della luce proveniente da, per esempio, un oggetto celeste nelle sue lunghezze d'onda. In prima approssimazione possiamo pensare all'arcobaleno generato dalla luce solare che attraversa un prisma o le gocce d'acqua dopo un temporale. Le componenti cromatiche dello spettro possono essere studiate in grande dettaglio e da esse, nei casi più generali, ricavare informazioni sulla fisica dell'oggetto in studio, la sua dinamica, la distanza e la composizione chimica.
- ⁵⁴ Si tratta del già citato *Very Large Telescope* formato da quattro unità pressoché identiche con specchi di poco più di 8 metri di diametro. Nel suo complesso si tratta dello strumento per osservazioni ottiche più avanzato e potente attualmente in funzione al mondo.
- ⁵⁵ *X-shooter* è frutto di una collaborazione fra l'ESO e un consorzio italiano, francese, danese e olandese, ed è senza dubbio una pietra miliare nella progettazione di strumenti per telescopi ottici da terra. Come si è detto è in grado di garantire con alta efficienza spettri dal limite ultravioletto dell'atmosfera, poco meno di 350 nm, fino al vicino infrarosso, circa 2500 nm. Prima di questo strumento sarebbe stato necessario utilizzare tre strumenti differenti per ottenere lo stesso livello di informazioni.
- ⁵⁶ I programmi spettroscopici con *X-shooter* erano guidati da Elena Pian, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Bologna e dal già citato Paolo D'Avanzo. Lo scrivente invece era responsabile di una programma di polarimetria con lo strumento VLT denominato FORS2.

- ⁵⁷ A titolo puramente esemplificativo, uno spettro nell'ottico/vicino infrarosso lo possiamo suddividere in regione blu, sotto i 450 nm (0,45 μm), il giallo-verde (500-600 nm), il rosso (700-800 nm) e l'infrarosso oltre i 1000 nm.
- ⁵⁸ I lampi di luce gamma, noti in inglese come *gamma-ray bursts* (GRB), si pensa siano generati da due categorie di eventi differenti. Il collasso di stelle di grande massa è legato ai GRB «lunghi», dove la durata osservata dell'emissione di alta energia è maggiore di due secondi, oppure i «corti», dove appunto la durata è inferiore. Questi ultimi si pensa invece, e studiando GW170817 se ne è avuta la conferma, siano conseguenti ad una fusione di due stelle di neutroni o di una stella di neutroni e un buco nero.
- ⁵⁹ Tipicamente l'angolo di apertura è intorno ai 5-10 gradi. Si badi comunque che la visualizzazione di queste emissioni come dovute a getti conici è da una parte sostanzialmente corretta ma anche senz'altro semplificata e va intesa come una esemplificazione didattica.
- ⁶⁰ Anche in questo caso la comunità italiana ha giocato un ruolo primario con le osservazioni ai raggi X con il satellite dell'Agenzia Spaziale Europea XMM/Newton guidate da Paolo D'Avanzo e da Luigi Piro dell'INAF/Istituto di Astrofisica e Planetologia Spaziali. Con osservazioni ottiche, con il telescopio a partecipazione INAF LBT (*Large Binocular Telescope*) guidate da Eliana Palazzi e Andrea Rossi, dell'INAF/Istituto di Astrofisica e Scienza dello Spazio di Bologna, e con osservazioni radio tramite *Very Long Baseline Interferometry* (VLBI), guidate da Giancarlo Ghirlanda e Om Sharan Salafia, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Brera. Sebbene non parte della comunità italiana in quanto ricercatori in istituti esteri, un ruolo chiave in queste osservazioni è stato rivestito anche da Alessandra Corsi, alla *Texas Tech University* a Lubbock (USA), e Raffaella Margutti, alla *Northwestern University* di Chicago (USA), con osservazioni radio con il *Very Large Array* (VLA), ed Eleonora Troja, alla Università del Maryland (USA) con osservazioni ottiche con il telescopio Gemini e X con il satellite Chandra.
- ⁶¹ Un ruolo chiave nel sollecitare l'attenzione della comunità astrofisica agli sviluppi delle tecniche di rivelazione di onde gravitazionali che promettevano di diventare presto efficaci, fu giocato ancora all'inizio di questa decade da Luigi Stella, dell'INAF/Osservatorio Astronomico di Roma Monte Porzio.
- ⁶² La collaborazione GRAWITA ha avuto nel 2018 un finanziamento speciale da parte dell'Istituto Nazionale di Astrofisica proprio come riconoscimento del ruolo centrale rivestito in queste scoperte e come contributo per un'ulteriore organizzazione per la prosecuzione delle attività.
- ⁶³ Come ebbe a commentare Paolo D'Avanzo, in chiusura di un intervento durante una manifestazione pubblica in presenza dell'allora ministro alla Pubblica Istruzione, Valeria Fedeli, «bella è la scienza!»! Intendendo con questo, con enfasi voluta, sottolineare proprio la fantastica sequenza di scoperte realizzatesi in breve tempo grazie però al paziente lavoro preparatorio di generazioni di scienziati.
- ⁶⁴ Per questi primi eventi rivelati l'accordo con la collaborazione LIGO/Virgo era di attendere la loro «autorizzazione» prima di diffondere i risultati delle nostre ricerche come precauzione per permettere alla collaborazione di poter compiere tutte le verifiche del caso. Si dovevano in effetti evitare anche dichiarazioni pubbliche relative alle attività in corso. È chiaro che «mantenere il segreto» per la comunità scientifica è un'impresa pressoché impossibile anche se si cercò di rispettare il legittimo desiderio dei colleghi impegnati nella rivelazione di onde gravitazionali di mantenere un certo riserbo sulla cosa fino a completamento di tutte le verifiche.

⁶⁵ Ovvero *Electromagnetic counterparts of gravitational wave sources at the Very Large Telescope*, controparti elettromagnetiche di sorgenti di onde gravitazionali con il *Very Large Telescope*. Anche se il termine inglese «engrave» si può benissimo tradurre come «incidere», con un suggestivo gioco di parole a sottintendere il desiderio di giocare un ruolo importante in questo settore della moderna ricerca scientifica.