

C'era una volta...

La scoperta delle onde gravitazionali narrata da un lontano postero

di Flavio Vetrano

L'esploratore capo Ken ammirava con autentico piacere lo splendido panorama che si offriva ai suoi occhi. Il sole fasciava teneramente il morbido profilo di verdi colline che sembravano fare corona all'antichissimo agglomerato urbano, dominato da un palazzo le cui forme architettoniche colpivano per la loro inarrivabile armonia; due torricini marcavano i limiti della facciata da cui i corpi laterali, simili ad ali spiegate, si allargavano librandosi magicamente nello spazio come se l'intero corpo monumentale fosse pronto a spiccare il volo. E Ken immaginò per un istante che realmente il Palazzo fosse un'aquila, maestosa e grifagna ad un tempo, che con slancio improvviso solcasse quel cielo cristallino per scrutare con attenta regalità il suo splendido territorio.

“Papà, papà: cos’è questo?”. Ken fu distolto dalla sua fantastica visione dal figlio che gli mostrava uno strano oggetto a forma di disco. Sembrava realizzato in un qualche materiale sintetico, molto in uso diversi secoli prima; forse era stato inciso o magnetizzato per archiviare informazioni importanti. Incuriosito interrogò l’enciclopedia universale 3D on-line che confermò la sua intuizione, fornendogli sia la descrizione di quello che all’epoca era chiamato CD-ROM, sia la tecnica software di decrittazione. Con un po’ di fatica riuscì a mettere in funzione un lettore sensoriale e la sua mente ebbe infine accesso al contenuto del disco.

Realizzati con una tecnologia digitale molto grossolana, vi erano alcuni video, molte fotografie, riproduzioni di documenti informativi (all'apparenza cartacei!) che trattavano argomenti scientifici di incerta interpretazione datati nella seconda decade del XXI secolo; ma all'improvviso una frase in un inglese arcaico gli provocò un tuffo al cuore: "*...at present the interferometric antenna Virgo runs in science mode: the Urbino*

Virgo-group...”. Aveva tra le mani una testimonianza originale di ciò che da ragazzo aveva studiato sui testi di Fisica e di Storia della Fisica: la scoperta delle onde gravitazionali legata alle stupefacenti antenne gravitazionali LIGO e Virgo costruite a cavallo tra il XX ed il XXI secolo! Frenando a stento l’eccitazione, Ken cominciò ad organizzare il materiale tentando di coniugare sviluppo temporale e logica scientifica, apprestandosi inoltre a produrre una sintesi esplicativa che avrebbe accompagnato la spedizione di tale eccezionale documentazione al suo Centro di Ricerche in Fisica e Cosmologia.

“Nel XX secolo apparve chiaramente lo schema della meccanica newtoniana, che individuava nelle forze le cause delle modifiche dello stato di moto dei sistemi, in diversi casi era inadeguata. In particolare la legge di gravitazione universale non riusciva a descrivere fenomeni ormai ampiamente rilevati. [BOX1]

Si rendeva necessaria una profonda revisione dei concetti di base e una nuova teoria della gravitazione. Ciò fu realizzato nella prima metà del XX secolo da Albert Einstein con la teoria della Relatività Ristretta, che ridefiniva i concetti di spazio, tempo e simultaneità, e con la teoria della Relatività Generale che forniva una interpretazione nuova della forza di gravità [\[BOX2-a\]\[BOX2.b\]](#). Grazie a questa rivoluzione scientifica, nel giro di alcuni decenni l'astrofisica e la cosmologia compirono un grosso balzo in avanti, dando sostanza scientifica a idee fino a quel momento ricche di originalità e fantasia ma ancora lontane da possibili verifiche sperimentali.

Restava tuttavia un punto cruciale della Relatività Generale ancora non verificato: l'esistenza delle onde gravitazionali.

Le equazioni di Einstein prevedevano che rapide e imponenti modifiche delle sorgenti (le masse di materia che popolano l'universo) dessero origine a onde, increspature dello spazio-tempo che si propagano alla

[illegible][illegible]

BOX 1
(clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX 2a
(clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX 2b: La Relatività Generale

Con due articoli del 1905 Albert Einstein (1879-1955), anche sulla scorta di precedenti elaborazioni critiche di altri scienziati, aveva portato a termine la revisione della meccanica newtoniana giungendo allo schema operativo della Relatività Ristretta, che, in un primo tempo, aveva presentato una certa incomprensione nei suoi contenuti (la Relatività speciale), e, in seguito, aveva compiutamente il campo gravitazionale e traccia le linee formali operative per rendere tutti i sistemi di riferimento (non solo quelli inerziali) equivalenti per le enunciazioni delle leggi fisiche. Il punto di partenza è lo spaziotempo a 4 dimensioni in cui però la geometria non è a priori pseudoeuclidea ma dipende dal contenuto (le masse). Si assume che valga un Teorema di Pitagora generalizzato in forma ampia; indicando con la lettera a una piccola variazione delle grandezze spaziotemporali, la distanza tra due eventi vicinissimi ha la seguente espressione (chiamata α metrica dello spaziotempo):

$$ds^2 = a_{11}dx^2 + 2a_{12}dxdy + 2a_{13}dxdz + 2a_{14}dxc dt + a_{22}dy^2 + 2a_{23}dydz + 2a_{24}dyc dt + a_{33}dz^2 + 2a_{34}dzcdt + a_{44}c^2dt^2$$

dove tutti i coefficienti a_{ij} dipendono in generale dalle variabili x, y, z, t . Se questa espressione è sempre maggiore o uguale a zero questi tipi di geometrie si chiamano riemanniane, dal nome del matematico Bernhard Riemann (1826-1866) che le studiò sistematicamente. Poiché però ciò non si verifica per lo spaziotempo, si parla di geometria pseudoriemanniana. L'insieme dei coefficienti a_{ij} nella espressione della distanza definisce le proprietà dello spazio.

In figura è rappresentato un ottaedro per tre diversi insiemi di coefficienti: nel primo caso siamo nella ben nota geometria euclidea; nel secondo caso nella geometria iperbolica mentre nel terzo siamo nella geometria ellittica. Si noti la profonda differenza dei triangoli che costituiscono le facce del solido: nel primo caso la somma degli angoli interni è 180° ; nel secondo essa è minore di 180° ; nel terzo caso è maggiore di 180° .

Questo approccio ha due conseguenze importanti: in primo luogo se le masse sono responsabili della geometria dello spaziotempo e sono anche le sorgenti del campo gravitazionale, tutte le informazioni sulla gravità sono contenute nei coefficienti a_{ij} della metrica; in secondo luogo, essendo la luce il mezzo più veloce che collega due eventi nello spaziotempo, essa traccia il percorso più breve tra di essi: tale percorso è una retta nello spazio euclideo, ma in spazi non euclideo essi è una curva (detta geodetica) diversa da caso a caso. In questa visione geometrica della gravità, la Terra ad esempio ruota intorno al Sole non perché esista una «forza» che la attrae ma perché segue la geometria determinata dalla massa solare; la luce proveniente da stelle lontane curva la propria traiettoria passando accanto a corpi massivi, non perché sia attratta, ma perché la traiettoria più breve (la geodetica) non è una retta, ma un'altra curva in quanto lo spazio non è euclideo.

Credit: LIGO

La Terra tende a cadere nella buca geometrica del Sole, ma avendo una sua velocità la caduta diventa una rotazione attorno ad esso. Non sono necessarie le forze attrattive a distanza.

La luce, percorrendo il tragitto più breve, segue la geometria ("curvatura") dello spazio: la stella in A verrebbe stimata in B secondo la geometria euclidea.

Credit: LIGO

Partendo dalla considerazione che un corpo in caduta libera «non sente la gravità», Einstein enuncia il **principio di equivalenza**, per il quale all'interno di un campo gravitazionale si può sempre scegliere un sistema di riferimento che annulli localmente gli effetti della gravità. Utilizzando tale principio e richiedendo che nel caso di campi deboli si riottienga la legge di gravitazione di Newton, sfruttando le tecniche di analisi matematica offerte dal calcolo tensoriale sviluppate da Gregorio Ricci Curbastro (1853-1925) e da Tullio Levi Civita (1873-1941), Einstein scrive le nuove equazioni per il campo gravitazionale: $E_{jk} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{jk}$, dove E_{jk} è il tensore di Einstein, che si esprime tramite i coefficienti della metrica (cioè tramite le componenti del campo gravitazionale), mentre T_{jk} è il tensore energia-impulso che tiene conto delle sorgenti (le masse). In sostanza le equazioni di Einstein collegano le proprietà dello spaziotempo (la sua geometria), rappresentate dal tensore di Einstein, alla dinamica delle masse che sono simultaneamente sorgenti del campo e oggetti influenzati dal campo: con linguaggio figurato, le masse dicono allo spazio che geometria avere, la geometria realizzata dice alle masse come muoversi.

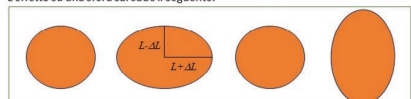
La Relatività Generale risolve tutti i punti critici della meccanica newtoniana, la comprende come caso limite, prevede fenomeni nuovi (verificati dall'esperienza), ha superato tutti i test possibili, dimostrandosi la miglior teoria della gravitazione attualmente formulata. Il suo limite è rappresentato dall'essere non trattabile nell'ambito della meccanica quantistica: contrariamente a ciò che avviene negli altri tre campi fondamentali (campo nucleare forte, campo elettromagnetico, campo nucleare debole), non si riesce a formulare una teoria quantistica coerente della gravitazione come descritta dalla Relatività Generale.

BOX 2b
(clicca sull'immagine per ingrandirla)

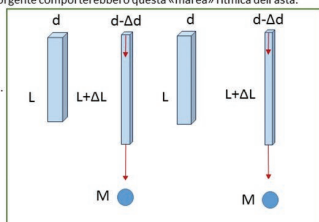
BOX 3: Le Onde Gravitazionali

Le equazioni di Einstein prevedono l'esistenza di onde gravitazionali, piccole increspature dello spaziotempo che si propagano alla velocità della luce. Esse sono generate da masse assoggettate a cambiamenti dinamici a simmetria non sferica: poiché gli effetti gravitazionali sono dimensionati dal valore di $\frac{m}{r^2}$, che è un numero piccolissimo, le sorgenti devono essere molto grandi ed avere rapidi cambiamenti per poter generare onde significative. Inoltre, sempre a causa della piccolezza degli effetti, esse interagiscono pochissimo con la materia che incontrano. Per capirne le proprietà ed il comportamento, partiamo da un effetto gravitazionale più noto, le maree o meglio le forze di marea. Immaginiamo un'asta di dimensioni enormi in caduta libera verso una grande massa; la forza di attrazione dipende dalla distanza, per cui l'estremo dell'asta più vicino alla sorgente è attratto con maggiore intensità e quindi cade più rapidamente dell'estremo lontano: l'asta si allunga, ovviamente assottigliandosi. Se la massa scomparisse, l'asta riprenderebbe la sua forma primitiva: un'accensione ed uno spegnimento ritmico della sorgente comporterebbero questa «marea» ritmica dell'asta.

Supponiamo adesso di avere una seconda sorgente di massa M posizionata in modo che l'attrazione sia perpendicolare all'asta: assumendo ancora un'accensione ed uno spegnimento ritmico della seconda massa, avremo una dilatazione ritmica dell'asta ($d + \Delta d$) con relativo accorciamento della lunghezza ($L - \Delta L$). Immaginiamo adesso di poter gestire le due sorgenti con la seguente successione: accessi massa 1, spenta massa 1, accessi massa 2, spenta massa 2, accessi massa 1, spenta massa 1... e così via. L'effetto su una sfera sarebbe il seguente:



Un'onda gravitazionale può interpretarsi come una perturbazione della geometria dello spaziotempo (e quindi della gravità) che agisce su tutto ciò che incontra come se due sorgenti, con azioni perpendicolari tra loro e con la linea di propagazione dell'onda, avessero il comportamento ritmico «accesso/spento» precedentemente descritto. La perturbazione viaggia alla velocità della luce; matematicamente è descritta da un tensore le cui componenti in ampiezza sono usualmente indicate con h_{ij} .



BOX 3 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX4: Sorgenti di Onde Gravitazionali



BOX 4 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX5: L'Antenna Gravitazionale Interferometrica



BOX 5 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

velocità della luce [BOX3]. Tuttavia le sorgenti «locali» erano troppo piccole, mentre quelle astrofisiche troppo lontane: le onde che giungevano sul pianeta Terra erano talmente deboli da farne ritenere la rivelazione una sfida impossibile [BOX4].

E pur tuttavia tre scienziati, Rainer Weiss, Ronald Drever e Kip Thorne, raccolsero la sfida, individuando nel ben noto metodo interferometrico la chiave del possibile successo. Nella seconda metà del XX secolo si diede così l'avvio al progetto, coordinato da Barry Barish, per la costruzione delle due antenne LIGO (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory) in quello che era il continente nord americano; un decennio più tardi, grazie agli sforzi di Alain Brillet e Adalberto Giazotto, anche nel continente europeo si predispose un analogo progetto, chiamato Virgo (nome legato all'ambizioso obiettivo scientifico di rivelare segnali sino alla distanza dell'ammasso galattico Virgo, a circa 60 milioni di anni luce dal pianeta Terra) [BOX5].

Ma l'ambiente scientifico fu molto freddo nei confronti di questa impresa e pochi risposero all'invito a collaborare. Tra i primi, il Fisico Flavio Vetrano dell'Università di Urbino che per un decennio, per conto dell'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare), fu il responsabile nazionale del progetto e di tutte le attività di ricerca e sviluppo ad esso collegate. Gruppo molto particolare quello urbinato: formato inizialmente solo da uno scienziato, nel tempo, se pure in un contesto molto difficile, seppe crescere sino a diventare uno dei più importanti gruppi di Virgo, assumendo notevoli incarichi di responsabilità e mostrando grande lungimiranza nell'incoraggiare l'ingresso di astronomi «elettromagnetici» in Virgo, mirando al rafforzamento della *multi-messenger astronomy*, nata tempo prima dall'incontro dell'astronomia neutrinica con quella elettromagnetica. Se pure circondate dallo scetticismo generale, le antenne LIGO e Virgo furono costruite, ma le loro

sensibilità, nonostante raggiungessero valori sino a pochi anni prima immaginabili, non portarono ad alcuna rivelazione di segnali: inaugurate nel primo quinquennio del XXI secolo, per molto tempo esse rimasero mute e cieche di fronte all'universo. Sebbene i dati da esse raccolti permettessero di stabilire valori limite e di soglia per diversi fenomeni noti, la tanto attesa *direct detection* di un'onda gravitazionale restava ancora una chimera.

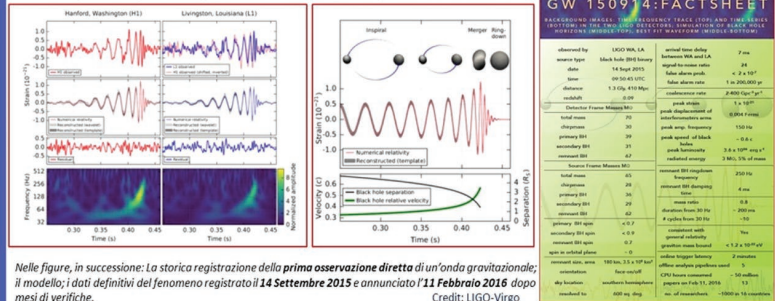
Gli scienziati delle due Collaborazioni LIGO e Virgo (uniti infine nella gestione delle tre antenne come una *single machine*) fecero ogni sforzo per migliorare le prestazioni degli apparati e nel disegnare tecniche sempre più sofisticate di elaborazione dati e di validazione critica dei risultati: e finalmente il 14 settembre del 2015 la loro costanza fu premiata! Due buchi neri, ciascuno «pesante» alcune decine di masse solari, dopo aver spiraleggiato per lungo tempo, si erano fusi dando origine ad un unico buco nero ed emettendo un intenso fiotto di onde gravitazionali rilevate dalle due antenne LIGO. Il mondo scientifico tutto entrò in fibrillazione per quella che fu definita la scoperta del secolo [BOX6].

Furono assegnati premi più o meno importanti a tutti coloro che avevano reso possibile l'impossibile; in particolare il tradizionale premio Nobel per la Fisica fu correttamente assegnato a chi quarant'anni prima aveva avuto l'idea primigenia (Rainer Weiss e Kip Thorne) e a chi in seguito aveva coordinato la realizzazione della prima coppia di detector (Barry Barish): non poté godere di quello che sarebbe stato per lui un meritissimo riconoscimento Ronald Drever, mancato purtroppo pochi mesi prima della designazione dei premiati per la scoperta cui aveva tanto contribuito.

Altri segnali furono rivelati dopo quella storica *first detection*, ma stranamente sembrava che i buchi neri fossero i protagonisti incontrastati; a dispetto dei modelli e delle attese (e speranze), mancavano le sor-

BOX6: the First Detection

Sulla Terra si stava formando il supercontinente *Rodinia* e la forma di vita dominante, i cianobatteri, si organizzava in colonie che avrebbero lasciato testimonianze fossili nelle stromatoliti. Nel pieno dell'era mesoproterozoica, ad una distanza dalla Terra di 410 Megaparsec (circa 1000 miliardi di miliardi di km) due Buchi Neri, dopo aver spiraleggiato avvicinandosi sempre più, si scontrarono ad una velocità quasi pari a quella della luce, dando origine ad un unico Buco Nero. I due corpi avevano masse rispettivamente di valore 36 e 29 masse solari, mentre il Buco Nero finale aveva una massa di 62 masse solari nel cataclisma, durato circa mezzo secondo, sono state bruciate tre masse solari liberando molta più energia di quanta il Sole possa produrre in tutta la sua esistenza! Le onde gravitazionali emesse si sono irradiate nello spazio e, dopo un viaggio durato 1.3 miliardi di anni, il 14 Settembre del 2015 sono arrivate sulla Terra, dove le antenne LIGO le hanno registrate: le comunità LIGO e Virgo hanno congiuntamente analizzato i dati, concludendo che per la prima volta nella storia dell'Umanità si erano osservate in modo diretto quelle onde gravitazionali previste da Albert Einstein un secolo prima.



Nelle figure, in successione: La storica registrazione della prima osservazione diretta di un'onda gravitazionale; il modello; i dati definitivi del fenomeno registrato il 14 Settembre 2015 e annunciato l'11 Febbraio 2016 dopo mesi di verifiche. Credit: LIGO-Virgo

Lo storico articolo dell'annuncio.

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)

229.000 downloads from APS in the first 24 hours

GW 150914: FACTSHEET

Parameter	Value
Observed by	LIGO, Virgo
Source Type	Black hole merger
Date	14 Sept 2015
Distance	~350-400 Mpc
Masses	36 and 29 solar masses
Final Mass	62 solar masses
Spin	~0.68
Energy	~3.6 x 10^54 J
Frequency	~350 Hz
Duration	~0.1 s
Signal-to-noise	~240
Location	~120°E, ~35°N
Discovery	14 Sept 2015
Announcement	11 Feb 2016
Impact	First direct detection of gravitational waves

Un piccolo angolo di Universo: il Superammasso

...ogni punto è una galassia!

Gruppo locale

Virgo Cluster

150 milioni di anni luce

La rivelazione diretta delle Onde Gravitazionali non fu soltanto una conferma importantissima della Relatività Generale, e quindi di una intera branca della Fisica, ma mostrò che i Buchi Neri «a picco dimensioni» (qualche decina di masse solari) anche meno: non i mostruosi Buchi Neri Supermassivi che formano i nuclei attivi delle Galassie esistono e hanno le proprietà previste, che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce indipendentemente dalla frequenza (per cui il campo di gravità, il gravitone, ha massa nulla), che la gravità è un campo tensoriale senza componenti di tipo scalare o vettoriale, ma soprattutto essa aprì la strada ad un nuovo modo di indagare l'Universo: l'interazione debolissima con la materia, il viaggiare alla velocità della luce, la forte segnatura fisico-matematica rendono l'onda gravitazionale un potente mezzo d'informazione, nuovo e totalmente diverso da tutti quelli utilizzati in passato dall'Uomo. Con l'osservazione del 14 Settembre 2015 diventa realmente operativa l'Astronomia Gravitazionale, aprendo nuovi orizzonti allo studio dell'Universo nella sua immensità.

Il gruppo Virgo di Urbino all'epoca della «grande scoperta»:

Oltre al fondatore Flavio Vetrano, i Fisici Gianluca Guidi, Jan Harms, Filippo Martelli, Francesco Piergiovanni, Andrea Viceré gli Astronomi Marica Branchesi, Giuseppe Greco, Giulia Stratta l'Ingegnere Matteo Montani il Dottorando Lorenzo Cerboni Balardi

BOX 6 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX 7: Coalescenza di due Stelle di Neutroni

Il 17 Agosto 2017 alle 14.41 (ora italiana) le due antenne LIGO e l'antenna Virgo registravano un'onda gravitazionale di maggior durata rispetto a tutti i precedenti segnali registrati: l'analisi permise di identificare l'evento come la coalescenza di due stelle di neutroni, con masse poco diverse da 1 massa solare; i protocolli di intesa concordati da LIGO-Virgo con molti gruppi della comunità degli Astronomi permisero di utilizzare il segnale gravitazionale come «allerta», corredata da indicazioni sufficientemente precise per restringere di molto l'area della volta celeste in cui ricercare la sorgente. Circa 11 ore dopo, la controparte elettromagnetica fu individuata nella Galassia NGC 4993 (nella Costellazione dell'Hydra) a 130 milioni di anni luce dalla Terra. Quasi 70 Osservatori, terrestri o in orbita, hanno partecipato a questa «caccia celeste»: l'evento è stato rilevato nelle Radioonde, nell'Infrarosso, nel Visibile, nell'Ultravioletto, nei RX. Inoltre, circa 2 secondi dopo l'arrivo dell'onda gravitazionale, il satellite FERMI ha registrato un lampo gamma «breve». L'origine del «gamma ray burst», rapidi flash ad altissima frequenza ed a contenuto energetico enorme (pari o superiore all'energia liberata nello scoppio di una Supernova), con distribuzione isotropa per quanto concerne la loro provenienza, è un problema a lungo dibattuto: per i lampi «lunghi» (> 2 secondi) si presume che la sorgente sia identificabile nel collasso di stelle massicce extragalattiche; per i lampi «brevis» (< 2 s), si ha ora la prova che essi si generano nella fusione di due «Neutron Star».

Intorno ad un nucleo centrale derivante dalla fusione delle due stelle si forma un disco di accrescimento che emette un lampo gamma mentre alimenta il nucleo; un'altra parte di materia viene espulsa: essendo ricca di isotopi pesanti, si riscalda per il loro decadimento dando origine ad una forte emissione termica nel visibile, chiamata Kilonova, che vira verso l'Infrarosso e si spegne dopo una decina di giorni. L'aver osservato per la prima volta uno stesso evento sia per mezzo delle onde elettromagnetiche, sia per mezzo delle onde gravitazionali dà pieno significato all'**Astronomia Multimessaggera**.

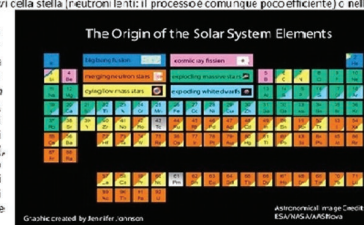
observed by	H, L, V	inferred duration from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 60 s
source type	binary neutron star (NS)	inferred # of GW cycles from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 3000
date	17 August 2017	initial astronomer alert latency*	27 min
time of merger	12:41:04 UTC	HLV sky map alert latency*	5 hrs 14 min
signal-to-noise ratio	32.4	HLV sky area*	26 deg ²
false alarm rate	< 1 in 80 000 years	# of EM observations that followed the trigger	~ 70
distance	86 to 160 million light-years	also observed in	gamma-ray, X-ray, ultraviolet, optical, infrared, radio
total mass	2.73 to 3.29 M _⊙	host galaxy	NGC 4993
primary NS mass	1.36 to 2.26 M _⊙	source RA, Dec	13°09' 49", -22°22' 53"
secondary NS mass	0.86 to 1.36 M _⊙	sky location	in Hydra constellation
mass ratio	0.4 to 1.0	viewing angle (without and with host galaxy identification)	≤ 56° and ≤ 28°
radiated GW energy	> 0.025 M _⊙ c ²	Hubble constant inferred from host galaxy identification	62 to 107 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹
radius of a 1.4 M _⊙ NS	likely ≲ 14 km		
effective spin parameter	-0.01 to 0.17		
effective precession spin parameter	unconstrained		
GW speed deviation from speed of light	< few parts in 10 ¹⁵		

BOX 7 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

BOX 8: la Nucleosintesi

L'elemento di materia «ordinaria» più diffuso nell'Universo (74%) è l'idrogeno (H), il cui atomo è formato da un protone e un elettrone. Segue l'elio (He), formato da due protoni, due elettroni e uno o due neutroni: esso raggiunge la percentuale di poco più del 24%. Tutti gli altri elementi «natura», quasi un centinaio, insieme non raggiungono la percentuale dell'1%. Come si siano formati gli elementi a partire dalle particelle elementari «di base», cioè protoni, elettroni e neutroni in un mare di fotoni (il neutrone può formarsi per cattura elettronica da parte di un protone, con simultanea emissione di un neutrino) è un problema scientifico di grande rilevanza per la comprensione dell'Universo. In teoria aggiungendo un protone alla volta (e alcuni neutroni) al nucleo di partenza (l'H), processo chiamato di fusione nucleare, si otterrebbero tutti gli elementi. Vi sono però due problemi seri: come nelle reazioni chimiche anche in quelle nucleari si devono fare i conti con il bilancio energetico. Se il prodotto ha minore energia dei componenti di partenza, si libera energia (reazione esotergica) per cui ci si guadagna; se il prodotto ha maggiore energia dei componenti di partenza, manca l'energia che deve essere fornita dall'esterno (reazione endotergica) per cui «ci si perde». Lo spartiacque è rappresentato dal ferro (Fe): sino a tale elemento le reazioni di fusione nucleare sono privilegiate in quanto esotergiche; dopo il Fe le reazioni sono endotergiche, per cui è favorita la frammentazione (fissione nucleare). In secondo luogo i nuclei sono formati da protoni carichi positivamente per cui respingono il nuovo protone anch'esso positivo: per far avvenire la reazione si deve fornire al protone aggiuntivo sufficiente energia per vincere questa repulsione elettrostatica, avvicinandolo così al nucleo al punto da far scattare l'attrazione nucleare, molto più intensa ma limitata a distanze infinitesime. Assumendo il modello cosmologico del Big Bang, l'Universo si forma da un punto (una singolarità) che si autoespande con temperature iniziali di 10¹⁰ gradi di centigradi; copio meno di un milionesimo di secondo la temperatura è scesa abbastanza da consentire la formazione di particelle stabili: che però, a causa dell'energia ancora troppo elevata, non possono «cagarsi»; dopo quasi un secondo, la temperatura è scesa a circa 10 miliardi di gradi, ed i protoni possono interagire tra loro per dare origine ai primi nuclei stabili di He; l'energia termica è ancora sufficientemente alta da consentire la fusione nucleare con la formazione di altri nuclei leggeri (Duterio e Litio); dopo pochi minuti la temperatura diventa troppo bassa e la fusione si arresta: i neutroni liberi decadono aumentando il numero di protoni liberi che danno origine al gran numero di atomi di H presenti ancora oggi nell'Universo. Questa successione di eventi, che si arresta pochi minuti dopo il Big Bang, è chiamata nucleosintesi primordiale. Per assistere a nuovi processi di fusione bisogna attendere qualche centinaio di milioni di anni, quando gli atomi di H, formati dai protoni liberi per cattura di un elettrone, condensandosi in aggregati massicci, contraggono sotto il loro peso: l'energia gravitazionale liberata è enorme ed innalza la temperatura interna sino ad innescare processi di fusione nucleare che interessano in primis l'He. A seconda della massa della stella si innescano vari cicli (protone-protone, C-N-O, carbonio-azoto-ossigeno, tre alla volta, ovvero 3 nuclei di He) che portano alla sintesi di elementi più pesanti, sino al Fe. Ulteriori processi di fusione, endotergici, richiederebbero molta più energia esterna, non disponibile. Una possibilità è la cattura neutronica per cui un neutrone viene catturato dal nucleo, decadendo poi con la emissione di un elettrone (e di un antineutrino) e la contemporanea comparsa di un protone dando così origine ad un nucleo di un altro elemento più pesante. Tali processi richiedono tuttavia un alto flusso di neutroni che può prodursi in una serie di reazioni in strati convettivi della stella (neutroni lenti: il processo è comunque poco efficiente) o nella fase esplosiva di Supernova (neutroni rapidi).

Tuttavia la cattura neutronica conseguente ai due fenomeni appena descritti rappresenta solo una parte della nucleosintesi degli elementi pesanti; per completare il quadro con le corrette percentuali per tutti gli elementi serve un'ulteriore sorgente, già da tempo ipotizzata: la fusione di due stelle di neutroni. L'osservazione del 17 agosto 2017 della coalescenza di due neutron star ha confermato in pieno questa ipotesi. La nucleosintesi primordiale, quella stellare ed esplosiva, quella legata alla coalescenza di due stelle di neutroni danno conto in maniera esauriente dell'intero sistema periodico degli elementi chimici nelle corrette percentuali; con due precisazioni: il boro (B), il berillio (Be) ed in piccola misura il litio (Li) si originano in maniera molto diversa, essendo prodotti per frammentazione da C, N ed O a seguito di urti da raggi cosmici; infine il promezio [Pm] ed il tecnezio (Tc) sono elementi artificiali prodotti per sintesi in laboratorio, anche se tracce di Tc sono state forse osservate in alcune atmosfere stellari.



BOX 8 (clicca sull'immagine per ingrandirla)

genti che potevano essere più ricche di informazioni: le stelle di neutroni. Infatti, proprio per la loro singolarità, le *black holes* sono essenzialmente massicci punti materiali ruotanti, da cui è impossibile ricavare informazioni strutturali: non emettono neutrini, non hanno controparti elettromagnetiche, una volta esaurita l'emissione gravitazionale tornano ad essere sostanzialmente invisibili punti attrattivi. Ma ancora una volta la pazienza fu premiata: il 17 Agosto 2017 i tre interferometri combinati LIGO-Virgo captarono il segnale gravitazionale della coalescenza di due stelle di neutroni; l'accordo scientifico raggiunto con gli astronomi «ottici» permise di studiare il fenomeno anche nello spettro elettromagnetico [BOX7].

I risultati furono esaltanti e una nuova finestra si aprì sull'Universo. I *gamma ray bursts*, quei lampi di luce ricchi di enorme energia che improvvisamente brillavano nell'universo, cominciarono ad avere spiegazioni supportate sperimentalmente; la sintesi degli elementi chimici pesanti non fu più un mistero [BOX8]; la Cosmologia divenne campo fondamentale di ricerca teorica e sperimentale, laboratorio immenso dove indagare le più ardite ipotesi. Con la scoperta delle onde gravitazionali l'universo cambiò profondamente agli occhi degli uomini: un sipario si era alzato e nulla fu più come prima, non solo per gli scienziati ma per chiunque alzasse gli occhi al cielo per inseguire un sogno, un pensiero, un'idea. O per capire il nostro ruolo in quel fantastico e strano mondo dove ogni mistero svelato prelude a nuovi e più arcani misteri,

dove il Nulla e il Tutto si mescolano lasciandoci nel più profondo dubbio sui destini ultimi, come anticamente ci ricordava il Poeta "...there, where nothing is all, I, who am nobody, will become infinity and even perhaps divinity..."¹.

Ken riguardò il materiale originale che aveva riorganizzato e rilesse con soddisfazione la sintesi che ne aveva fatto: questa preziosa documentazione di episodi così lontani avrebbe ben figurato negli archivi del Centro e sarebbe stata di estremo interesse per Scienziati, Storici, Studenti. "Papà, papà, andiamo?" – "Sì, certo", rispose Ken avviandosi con un sentimento di profonda e nostalgica emozione: quel suo viaggio era stato fortunato e avrebbe ricordato a lungo quel luogo meraviglioso. Si voltò ancora a contemplarlo, quasi a voler prolungare il piacere estatico di cui sentiva colmo il suo animo. Sotto un cielo che lentamente incupiva, il sole al tramonto sembrava infiammare la campagna circostante, mentre sul terreno il Palazzo proiettava lunghe e mobili ombre che ne esaltavano la massiccia e ad un tempo elegante architettura. Al di là dei Torricini si intravedevano strutture dove una volta c'era l'Istituto di Fisica e, più in là ancora, la discesa lunga che dopo un falso tornante doveva condurre al laboratorio Virgo di Urbino. Mentre ripartiva, Ken ripensò al gruppo di Scienziati e al suo Fondatore che tanto tempo prima avevano lavorato in quel luogo meraviglioso e che tanta parte avevano avuto in una delle scoperte più importanti della storia del-

la scienza. Gli sembrò quasi di percepire l'entusiasmo che li aveva pervasi nel muoversi lungo quelle meravigliose avventure del pensiero, i dubbi e le ansie delle attese, la voglia di continuare ad inseguire un sogno, quel sogno che era "*l'infinita ombra del vero*"² e che avrebbe loro riservato onori e gloria... E li immaginò negli studi e nelle aule che una volta erano proprio a ridosso del Palazzo; o a discutere dove una volta c'era un luogo di convivialità, o dove una volta passeggiavano cercando soluzioni alle loro intuizioni, o dove una volta c'era... Già, c'era una volta.

¹ Da "*There*", Langston Hughes (1902-1967)

² Da "*Alexandros*", Giovanni Pascoli (1855-1912)

Flavio Vetrano, Università degli Studi di Urbino Carlo Bo.

BOX 1: La Meccanica Newtoniana

Secondo Isaac Newton (1642-1727) lo spazio è il contenitore dove avvengono i fenomeni senza che questi possano influenzarlo, mentre il tempo scorre ad un suo ritmo proprio, testimoniato dall'evolversi dei sistemi fisici ma senza reciproca influenza. In questo senso spazio e tempo sono concetti assoluti e universali. Il moto NON ha invece valore assoluto: discostandosi in ciò dalla Fisica aristotelica, sono le variazioni dello stato di moto (le accelerazioni) ad essere assolute, mentre le velocità sono relative. Quindi l'assenza di accelerazione comporta l'equivalenza dinamica.

Di qui l'enunciato base del **principio di inerzia** (già presente *in nuce* negli scritti di Leonardo e di Galileo): in assenza di sollecitazioni esterne, un corpo non ha accelerazione (o è fermo, o si muove di moto rettilineo uniforme).

Scelto un sistema di riferimento che soddisfi il principio di inerzia (trovandone uno ne esistono infiniti in moto rettilineo uniforme rispetto al primo), in esso vale la **legge fondamentale della dinamica** $\vec{F} = M\vec{a}$, dove l'accelerazione $\vec{a}$ è proporzionale alla sollecitazione (la forza $\vec{F}$) tramite una costante di proporzionalità M che rappresenta l'inerzia del sistema, chiamata massa e da Newton identificata con la quantità di materia del corpo in esame.

Lo schema è completato dal **principio di azione e reazione** che individua nell'interazione reciproca dei corpi la sorgente delle forze, presenti quindi sempre in coppia, identiche ma opposte, e agenti separatamente sui due corpi coinvolti.

Se per le forze tra corpi a contatto il discorso trova una sua corrispondenza con l'esperienza «sforzo fisico per spostare un corpo», concettualmente complicato è immaginare una forza che istantaneamente agisca tra due corpi distanti, senza alcuna intermediazione; in particolare la forza di gravità, sperimentata da tutti come «peso» sulla superficie terrestre e responsabile del moto dei corpi nello spazio, è espressa dalla **legge di gravitazione universale di Newton** $\vec{F} = -G \frac{M_1 M_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$, azione istantanea tra due masse $M_{1,2}$ poste ad una distanza r tra loro; la forza F , sempre attrattiva, agisce lungo la congiungente le due masse; G è la costante di gravitazione universale pari a $6.67 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$. Sebbene lo schema newtoniano si applichi tuttora con successo alla quasi totalità dei fenomeni «meccanici» noti, esso falliva nell'infinitamente piccolo (per la cui descrizione fu necessaria la rivoluzione concettuale della meccanica quantistica) ed in quei casi dove le forze in gioco assumevano valori ben superiori a quelli «a dimensione umana». L'esempio più noto è la corretta previsione del moto del perielio di Mercurio: ogni pianeta, descrivendo un'orbita ellittica, raggiunge una distanza minima dal Sole (perielio) che non è nello stesso punto ad ogni giro, ma precede, cioè ogni volta anticipa rispetto al giro precedente. Per Mercurio tale precessione è di 5600" al secolo, un valore che scarta di 43" rispetto alla previsione newtoniana.

[TORNA ALL'ARTICOLO](#)

BOX 2a: La Relatività Ristretta (o Speciale)

Nella Relatività Ristretta si amplia il principio di inerzia in **principio di invarianza**: conservando il concetto di sistema di riferimento inerziale, si assume che tutte le leggi della Fisica siano invarianti (vengano cioè conservate le relazioni formali tra le grandezze fisiche) passando da un sistema inerziale ad un altro. Inoltre si assume come ulteriore **principio** l'esistenza di una velocità limite, **la velocità della luce, costante in tutti i sistemi di riferimento inerziali**, con il valore $c = 299792458 \text{ m/s}$. Poiché la velocità della luce ha un valore finito, la simultaneità di eventi in due luoghi diversi A e B dipende dal sistema di riferimento: ciò che è simultaneo per un osservatore equidistante da A e B ed in quiete rispetto a tali punti non sarà simultaneo per un osservatore che si muove verso A e che dirà a buon diritto che l'evento in A precede quello in B; viceversa se l'osservatore si muove verso B. Questo ha delle conseguenze: una distanza spaziale tra due punti è misurata come differenza tra le posizioni dei due punti **allo stesso istante**. Poiché la simultaneità dipende dall'osservatore, anche la distanza spaziale misurata dipenderà dal sistema di riferimento e, conseguentemente, anche il tempo impiegato a percorrere tale distanza. In conclusione gli intervalli spaziali e temporali non sono affatto quantità assolute ma relative, dipendendo dal sistema di riferimento in cui sono misurati. In particolare si ha che una lunghezza in moto diminuisce rispetto a quanto misurato in un sistema in cui essa è in quiete (contrazione delle lunghezze) mentre un intervallo temporale si allunga rispetto a quanto misurato in un sistema in cui gli eventi avvengono in punti in quiete (dilatazione dei tempi).

Supponiamo di inviare dall'origine di un sistema di riferimento e all'istante $t = 0$ un flash di luce; dopo un tempo t esso raggiungerà un punto di coordinate x, y, z . Utilizzando il teorema di Pitagora, per quanto detto dovrà risultare che in ogni sistema di riferimento sarà vera la relazione $\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} / t = c$; i singoli termini x, y, z, t a primo membro cambieranno a seconda del sistema di riferimento, ma anche con i nuovi valori il risultato sarà sempre c . La relazione precedente può scriversi come $x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2 = 0$, il cui significato è che in qualunque sistema di riferimento la distanza spaziale tra i due eventi coincide con il cammino percorso dalla luce. Se la distanza spaziale è maggiore i due eventi non possono essere collegati causalmente; se la distanza spaziale è minore (o uguale) del cammino percorso dalla luce, può esserci relazione causale tra i due eventi. Perciò se $s^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2 t^2$ è positivo, predomina la parte spaziale (nessun nesso causale); se è negativo predomina la parte temporale (può esserci nesso causale); se è nullo i due eventi sono collegabili con un flash di luce. L'espressione di s^2 definisce una nuova distanza (o meglio un intervallo) tra due eventi in uno spazio a 4 dimensioni (lo **spaziotempo**) tramite una generalizzazione del teorema di Pitagora dove però un termine (il tempo t) contribuisce negativamente: lo spaziotempo non è propriamente euclideo. Per tale motivo si parla di geometria **pseudoeuclidea**.

[TORNA ALL'ARTICOLO](#)

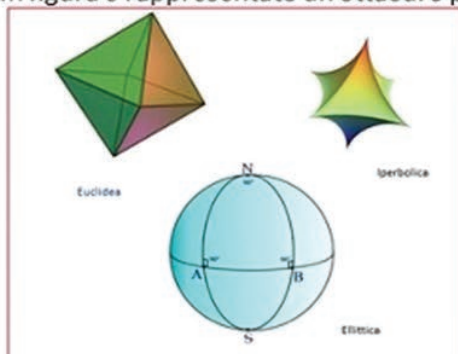
BOX 2b: La Relatività Generale

Con due articoli del 1905 Albert Einstein (1879-1955), anche sulla scorta di precedenti elaborazioni critiche di altri scienziati, aveva portato a termine la revisione della meccanica newtoniana giungendo allo schema operativo della Relatività Ristretta; in un articolo fondamentale del 1915 presenta una teoria completamente innovativa (la Relatività Generale) in cui descrive più compiutamente il campo gravitazionale e traccia le linee formali e operative per rendere tutti i sistemi di riferimento (non solo quelli inerziali) equivalenti per la enunciazione delle leggi fisiche. Il punto di partenza è lo spaziotempo a 4 dimensioni in cui però la geometria non è a priori pseudoeuclidea ma dipende dal contenuto (le masse). Si assume che valga un Teorema di Pitagora generalizzato in forma ampia; indicando con la lettera «d» una piccola variazione delle grandezze spaziotemporali, la distanza tra due eventi vicinissimi ha la seguente espressione (chiamata «metrica dello spazio»):

$$ds^2 = a_{11}dx^2 + 2a_{12}dxdy + 2a_{13}dxdz + 2a_{14}dxc dt + a_{22}dy^2 + 2a_{23}dydz + 2a_{24}dyc dt + a_{33}dz^2 + 2a_{34}dzcdt + a_{44}c^2dt^2$$

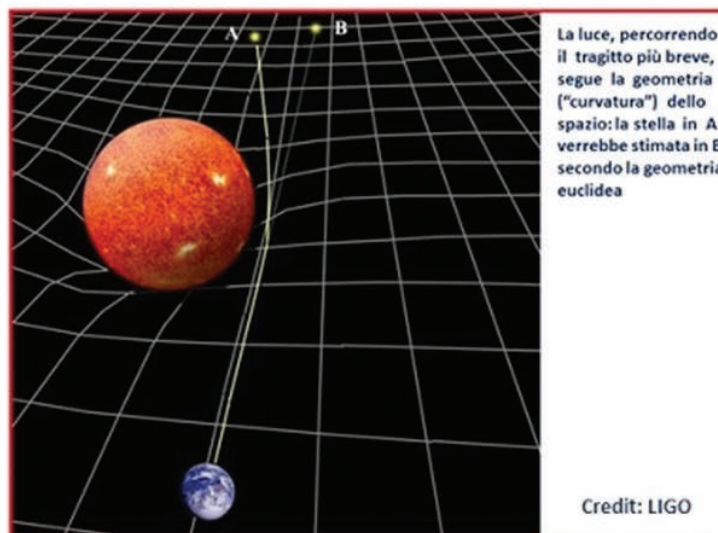
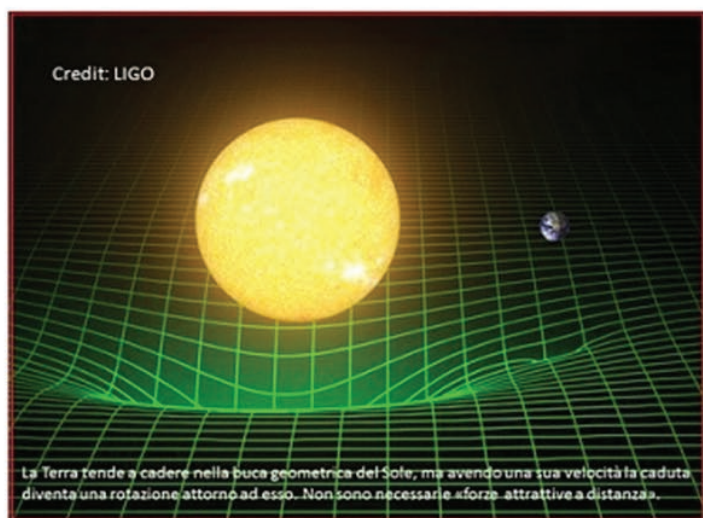
dove tutti i coefficienti a_{ij} dipendono in generale dalle variabili x, y, z, t . Se questa espressione è sempre maggiore o uguale a zero questi tipi di geometrie si chiamano riemanniane, dal nome del matematico Bernhard Riemann (1826-1866) che le studiò sistematicamente. Poiché però ciò non si verifica per lo spaziotempo, si parla di geometria pseudoriemanniana. L'insieme dei coefficienti a_{ij} nella espressione della distanza definisce le proprietà dello spazio.

In figura è rappresentato un ottaedro per tre diversi insiemi di coefficienti: nel primo caso siamo nella ben nota geometria euclidea; nel secondo caso nella geometria iperbolica mentre nel terzo siamo nella geometria ellittica. Si noti la profonda differenza dei triangoli che costituiscono le facce del solido: nel primo caso la somma degli angoli interni è 180° ; nel secondo essa è minore di 180° ; nel terzo caso è maggiore di 180° .



Questo approccio ha due conseguenze importanti: in primo luogo se le masse sono responsabili della geometria dello spaziotempo e sono anche le sorgenti del campo gravitazionale, tutte le informazioni sulla gravità sono contenute nei coefficienti a_{ij} della metrica; in secondo luogo, essendo la luce il mezzo più veloce che collega due eventi nello spaziotempo, essa traccia il percorso più breve tra di essi: tale percorso è una retta nello spazio euclideo, ma in spazi non euclidei esso è una curva (detta

geodetica) diversa da caso a caso. In questa visione geometrica della gravità, la Terra ad esempio ruota intorno al Sole non perché esista una «forza» che la attrae ma perché segue la geometria determinata dalla massa solare; la luce proveniente da stelle lontane curva la propria traiettoria passando accanto a corpi massicci, non perché sia attratta, ma perché la traiettoria più breve (la geodetica) non è una retta, ma un'altra curva in quanto lo spazio non è euclideo.



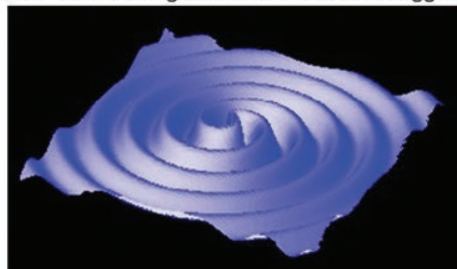
Partendo dalla considerazione che un corpo in caduta libera «non sente la gravità», Einstein enuncia il **principio di equivalenza**, per il quale all'interno di un campo gravitazionale si può sempre scegliere un sistema di riferimento che annulli localmente gli effetti della gravità. Utilizzando tale principio e richiedendo che nel caso di campi deboli si riottienga la legge di gravitazione di Newton, sfruttando le tecniche di analisi matematica offerte dal calcolo tensoriale sviluppate da Gregorio Ricci Curbastro (1853-1925) e da Tullio Levi Civita (1873-1941), Einstein scrive le nuove equazioni per il campo gravitazionale: $E_{jk} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{jk}$, dove E_{jk} è il tensore di Einstein, che si esprime tramite i coefficienti della metrica (cioè tramite le componenti del campo gravitazionale), mentre T_{jk} è il tensore energia-impulso che tiene conto delle sorgenti (le masse). In sostanza le equazioni di Einstein collegano le proprietà dello spaziotempo (la sua geometria), rappresentate dal tensore di Einstein, alla dinamica delle masse che sono simultaneamente sorgenti del campo e oggetti influenzati dal campo: con linguaggio figurato, le masse dicono allo spazio che geometria avere, la geometria realizzata dice alle masse come muoversi.

La Relatività Generale risolve tutti i punti critici della meccanica newtoniana, la comprende come caso limite, prevede fenomeni nuovi (verificati dall'esperienza), ha superato tutti i test possibili, dimostrandosi la miglior teoria della gravitazione attualmente formulata. Il suo limite è rappresentato dall'essere non trattabile nell'ambito della meccanica quantistica: contrariamente a ciò che avviene negli altri tre campi fondamentali (campo nucleare forte, campo elettromagnetico, campo nucleare debole), non si riesce a formulare una teoria quantistica coerente della gravitazione come descritta dalla Relatività Generale.

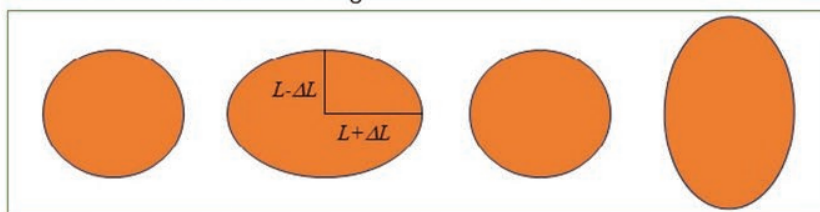
TORNA ALL'ARTICOLO

BOX 3: Le Onde Gravitazionali

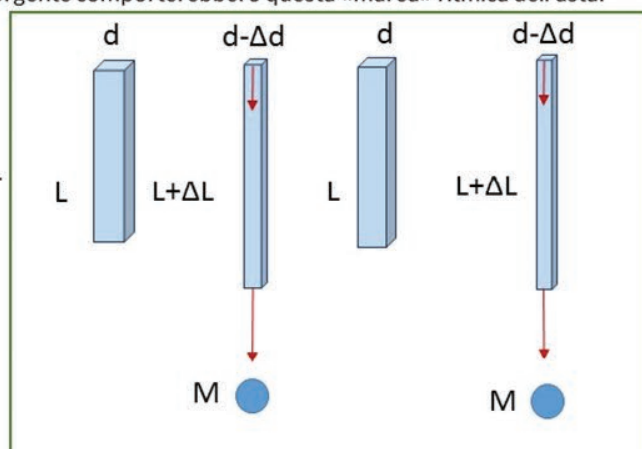
Le equazioni di Einstein prevedono l'esistenza di onde gravitazionali, piccole increspature dello spaziotempo che si propagano alla velocità della luce. Esse sono generate da masse assoggettate a cambiamenti dinamici a simmetria non sferica: poiché gli effetti gravitazionali sono dimensionati dal valore di $8\pi G/c^4$ che è un numero piccolissimo, le sorgenti devono essere molto grandi ed avere rapidi cambiamenti per poter generare onde significative. Inoltre, sempre a causa della piccolezza degli effetti, esse interagiscono pochissimo con la materia che incontrano. Per capirne le proprietà ed il comportamento, partiamo da un effetto gravitazionale più noto, le maree o meglio le forze di marea. Immaginiamo un'asta di dimensioni enormi in caduta libera verso una grande massa; la forza di attrazione dipende dalla distanza, per cui l'estremo dell'asta più vicino alla sorgente è attratto con maggiore intensità e quindi cade più rapidamente dell'estremo lontano: l'asta si allunga, ovviamente assottigliandosi. Se la massa scomparisse, l'asta riprenderebbe la sua forma primitiva: un'accensione ed uno spegnimento ritmico della sorgente comporterebbero questa «marea» ritmica dell'asta.



Supponiamo adesso di avere una seconda sorgente di massa M posizionata in modo che l'attrazione sia perpendicolare all'asta: assumendo ancora un'accensione ed uno spegnimento ritmico della seconda massa, avremo una dilatazione ritmica dell'asta ($d + \Delta d$) con relativo accorciamento della lunghezza ($L - \Delta L$). Immaginiamo adesso di poter gestire le due sorgenti con la seguente successione: accesa massa 1, spenta massa 1, accesa massa 2, spenta massa 2, accesa massa 1, spenta massa 1...e così via. L'effetto su una sfera sarebbe il seguente:



Un'onda gravitazionale può interpretarsi come una perturbazione della geometria dello spaziotempo (e quindi della gravità) che agisce su tutto ciò che incontra come se due sorgenti, con azioni perpendicolari tra loro e con la linea di propagazione dell'onda, avessero il comportamento ritmico «acceso/spento» precedentemente descritto. La perturbazione viaggia alla velocità della luce; matematicamente è descritta da un tensore le cui componenti in ampiezza sono usualmente indicate con h_{ij} .



TORNA ALL'ARTICOLO

BOX4: Sorgenti di Onde Gravitazionali

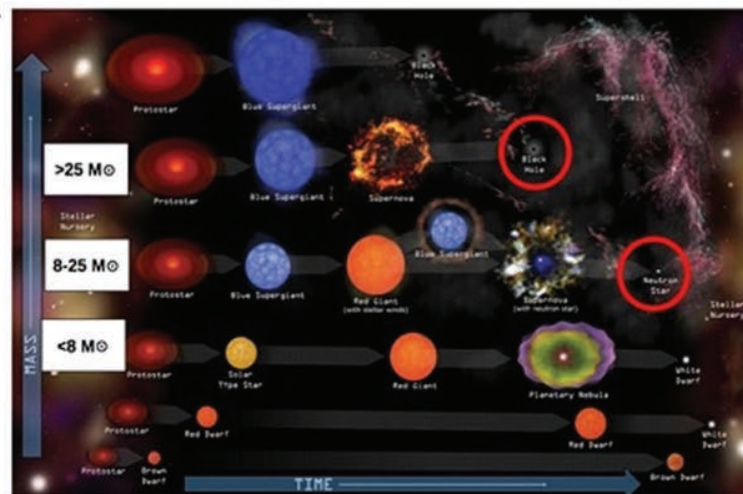
Le equazioni di Einstein danno per le onde gravitazionali un'ampiezza h_{ij} proporzionale al termine costante $G/c^4 \sim 10^{-44} \text{ s}^2/\text{m kg}$, valore talmente piccolo da rendere impensabile qualunque ricerca con sorgenti terrestri. Si dovrà guardare ad oggetti di massa spaventosamente grande e soggetti a rapidissimi mutamenti nella loro forma «non sferica». Le sorgenti interessanti sono dunque, con termine generico, «le stelle».



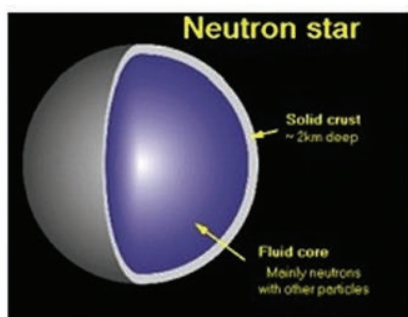
può dire che i corpi celesti si formano per «caduta» di gas e polveri su un «centro di attrazione» costituito anch'esso delle stesse sostanze che, per una qualche fluttuazione, hanno dato origine ad una concentrazione di materia in un punto. La gravità attrae altra materia che sotto il proprio peso collassa verso il centro. A questo punto il destino dipende dalla massa totale: se questa è inferiore a 0.013 masse solari, la materia resta abbastanza fredda, formando un pianeta; se la massa è superiore a questo limite, il riscaldamento dovuto alla contrazione dà origine a reazioni termonucleari che «accendono» la stella. Il calore delle reazioni ostacola un ulteriore collasso; esaurita la combustione nucleare la stella si spegne. Ma il modo in cui la stella svolge il suo ciclo dipende dalla massa.

Se la massa è inferiore a 0.08 masse solari, non si innesca la fusione dei nuclei di Idrogeno, ma può innescarsi la fusione dei nuclei di Deuterio e di Litio; esaurita questa fase, la stella si raffredda in tempi molto lunghi e risultando visibile nell'infrarosso. Questo tipo di stelle sono chiamate «Nane Brune». Se la massa è tale da permettere la fusione dei nuclei di Idrogeno, la stella è più luminosa e con temperature maggiori: se la massa è inferiore a quella del Sole la fusione è limitata all'Idrogeno; la stella passa una fase di intense reazioni (Nana Rossa) evolvendo in un oggetto compatto che si raffredda molto lentamente (Nana bianca). Se la massa è confrontabile o di poco superiore alla massa del Sole, altri nuclei (Carbonio, Ossigeno) entrano nel ciclo di fusione: la temperatura sale, si forma una nube di espansione gassosa (Gigante Rossa, Nebulosa Planetaria) che poi si disperde mentre resta un nucleo compatto pallido (Nana Bianca).

Quando la massa è molto maggiore, l'epilogo è molto più drammatico, passando inoltre (con temperature più alte) per la fase intermedia di Supergigante Blu.



Sino ad un valore di 25 masse solari, le reazioni di fusione arrivano a coinvolgere nuclei di maggior numero atomico, sino al Ferro; esso si raccoglie al centro formando un nucleo che, terminando le reazioni di fusione, collassa sotto il proprio peso. La contrazione è così rapida e potente da avere due notevoli effetti: la parte interna è talmente compressa da degenerare in neutroni; la parte esterna, a causa dell'onda di rimbalzo dovuta alla velocissima contrazione interna, viene espulsa a gran velocità. Si assiste di fatto ad una gigantesca esplosione (Supernova) in grado di emanare luce in quantità abnorme. I resti provenienti dall'involucro esterno continuano a disperdersi a gran velocità nello spazio, la parte collassata è di fatto un gigantesco nucleo atomico, formato da neutroni. Una tipica stella di neutroni ha una massa paragonabile a quella del Sole: le sue dimensioni sono però infinitamente minori, avendo un raggio di poco più di



10 km. La sua densità è tale che un cucchiaino di tale materia peserebbe circa 100 milioni di tonnellate: come paragone si consideri che un cucchiaino di marmo pesa poco più di 2 grammi.

Se la massa della stella supera le decine di masse solari, l'evoluzione è simile, ma nell'ultimo stadio la forza di gravità è talmente grande da non poter essere contrastata: il collasso prosegue sino a valori di densità inimmaginabili. Neppure la luce riesce a sfuggire da tale corpo, divenuto di fatto invisibile. Esso è caratterizzato solo dalla sua massa e dalla rotazione (spin): la sua presenza può essere dedotta dagli effetti gravitazionali sui corpi celesti prossimi. Poiché però è in grado di intercettare la luce, un osservatore vedrebbe di fatto una sorta di nicchia vuota sullo sfondo, priva di qualunque luminosità: di



qui il nome di Buco Nero.

Gli oggetti descritti hanno masse enormi e velocità di mutamento di forma notevoli: sono quindi possibili sorgenti di onde gravitazionali. In particolare sono state studiate e modellizzate le forme d'onda (o si sono sviluppate tecniche di analisi in grado di riconoscere le onde in mezzo ai numerosi disturbi presenti nei dati sperimentali) principalmente per lo scoppio di Supernove e per i sistemi binari che coalescono (possono essere Buco Nero+Buco Nero; Buco Nero+Stella di Neutroni; Stella di Neutroni+Stella di Neutroni). In entrambi i casi vengono emessi flash di onde gravitazionali più o meno brevi.

Un'altra notevole classe di sorgenti è rappresentata dalle Pulsar: esse sono Stelle di Neutroni rotanti in cui è presente un campo magnetico non allineato con l'asse di rotazione (per cui vengono emessi segnali elettromagnetici pulsati; di qui il nome). Se l'allontanamento dalla simmetria sferica è abbastanza marcato, esse emettono onde gravitazionali continue ad una frequenza stabile.



Supernovae da collasso gravitazionale



Sistemi binari in coalescenza

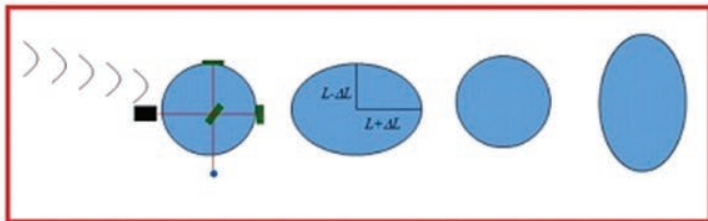


Pulsar non simmetriche

La frequenza delle onde emesse da queste sorgenti spazia da pochi Hz alla decina di kHz, anche se si prevedono sorgenti più «esotiche» a frequenze più alte e sorgenti cosmologiche a frequenze più basse.

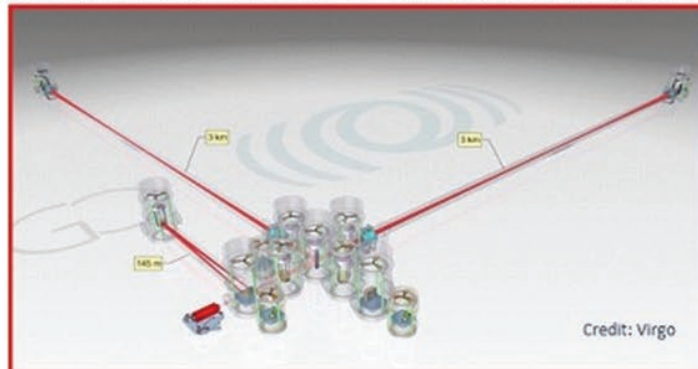
BOX5: le Antenne Gravitazionali interferometriche

Per misurare piccole lunghezze si può adoperare il metodo interferometrico: un unico raggio di luce è inviato ad uno specchio separatore che lo divide in due raggi tra loro uguali e perpendicolari; essi sono riflessi da due specchi e si ricombinano in un unico punto (rivelatore). Tra i due raggi, derivati da un'unica sorgente, vi è una relazione di fase stabile, per cui essi interferiscono: se quando si incontrano sono in fase, si rinforzano (brillantezza); se sono in controfase si annullano (buio). Se per esempio un interferometro è calibrato in modo che in uscita si abbia il buio, in presenza di un'onda gravitazionale i due cammini mostreranno variazioni diverse: uno si allungherà, l'altro si accorcerà e questa variazione procederà ritmicamente con l'onda, provocando un'alternanza luce-buio (più correttamente: uno scorrimento delle frange d'interferenza) nel rivelatore. La misura di ΔL e del suo



andamento temporale permette di ricavare informazioni sull'onda e quindi sulla sorgente (astronomia gravitazionale). La sfida tuttavia è realmente ai limiti dell'impossibile. Assumendo che gli specchi dell'interferometro siano liberi (come se cadessero liberamente nel campo di gravità) la soluzione delle equazioni di Einstein per questo caso, chiamata «deviazione dalla geodetica», fornisce $\Delta L = h L$. Poiché l'ampiezza adimensionale (o meglio spettrale) h di un'onda proveniente ad esempio da due Stelle di Neutroni che coalescono nell'ammasso galattico Virgo è stimato in 10^{-21} , pur con grandi interferometri chilometrici ($L = 10^3 \text{ m}$) la grandezza da misurare è

$\Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$, una quantità spaventosamente piccola: è come misurare se la distanza tra la Terra e la Luna è aumentata o diminuita del diametro di un capello! E pur tuttavia, eliminando o controllando tutti i disturbi (spesso molto più grandi della quantità da misurare) che investono lo strumento, questa sensibilità è stata raggiunta nei grandi interferometri attualmente operativi, i due LIGO negli USA e Virgo in Italia. La struttura è simile: grandi torri in acciaio (alte una decina di metri) contengono sotto vuoto le sospensioni degli specchi; la luce (infrarossa) generata da laser ultrapotenti viaggia all'interno di tubi a vuoto del diametro di circa 1 m e lunghi alcuni chilometri. I due interferometri statunitensi si trovano ad Hanford, nello stato di Washington, e rispettivamente nello stato della Louisiana a Livingston.



Ronald Drever (Caltech), Rainer Weiss (MIT) e Kip Thorne (Caltech), furono gli ideatori di LIGO negli anni '70; a Barry Barish (Caltech) fu dato l'incarico di coordinare e realizzare il progetto. Le antenne LIGO vengono inaugurate nel 2002.

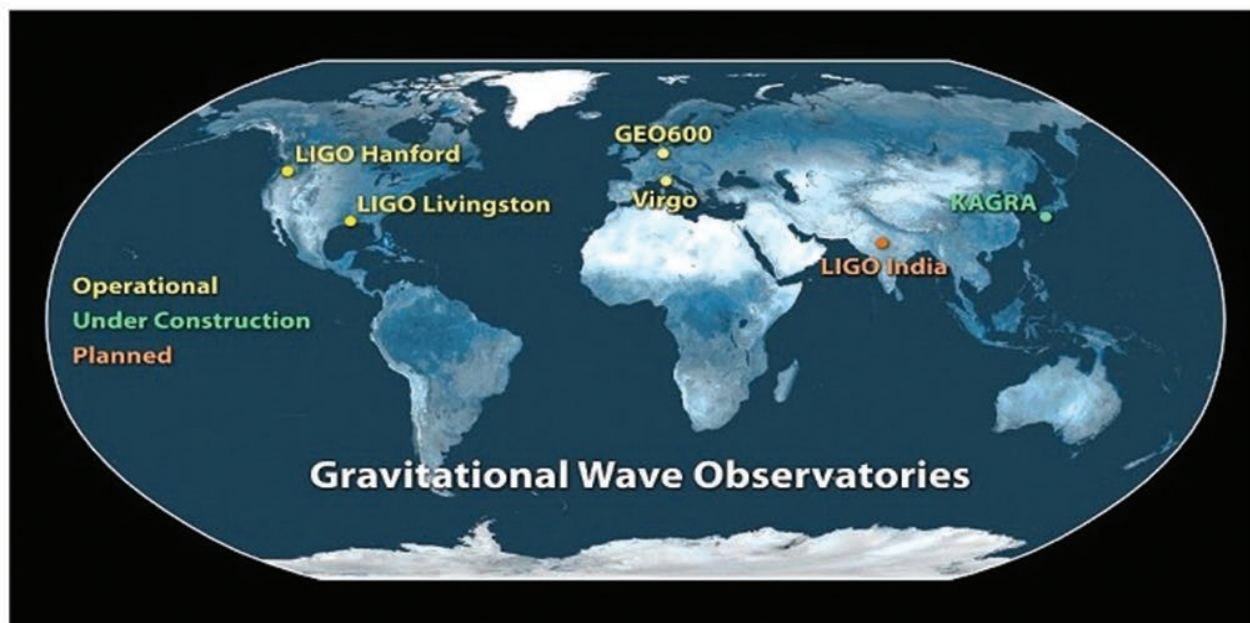


Negli anni '80 Adalberto Giazotto e Alain Brillet presentarono un analogo progetto europeo di antenna interferometrica. Dopo un'intensa fase di ricerca e sviluppo, il progetto prese il via a metà degli anni '90, finanziato dall'Italia tramite l'INFN e dalla Francia tramite il CNRS, con il nome di Virgo. Dopo alcuni anni, per l'Italia il coordinamento INFN di Virgo fu affidato a Flavio Vetrano. L'antenna, costruita nella piana di Cascina presso Pisa, viene inaugurata nel 2003. Dal 2007 con le due antenne gemelle LIGO costituisce un unico network di rivelatori gravitazionali uniti come una single machine e con la piena condivisione dei dati.

La Collaborazione Virgo

Attualmente la Collaborazione scientifica Virgo è formata da otto gruppi italiani (Università di Urbino/INFN Firenze; Università di Genova/INFN Genova; Università di Napoli/INFN Napoli; Università di Padova e di Trento/INFN Padova; Università di Perugia/INFN Perugia; Università di Pisa/INFN Pisa; Università di Roma La Sapienza/INFN Roma1; Università di Roma Tor Vergata/INFN Roma2), sei gruppi francesi (APC et Université Denis Diderot, Paris; Artemis OCA, Nice; LAPP Annecy le Vieux; LAL et Université Paris Sud et ESPCI, Paris; LMA et Université Claude Bernard, Lyon; LKB et Université Pierre et Marie Curie, Paris), due gruppi olandesi (NIKHEF, Amsterdam; Radboud University, Nijmegen), un gruppo ungherese (RMKI, Hungarian Academy of Science, Budapest), un gruppo polacco (IMPAN, Polish Academy of Science, Warsaw).

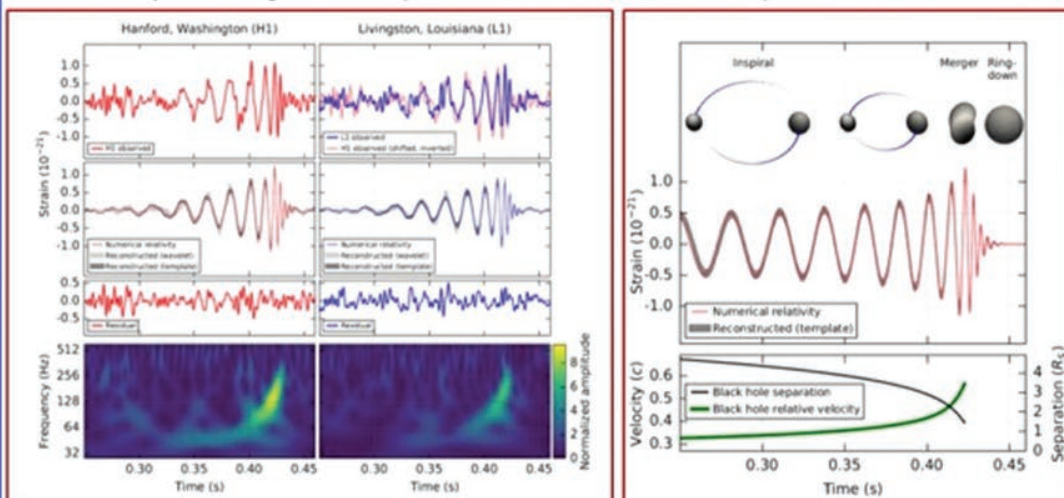
Gli Osservatori terrestri (2018)



TORNA ALL'ARTICOLO

BOX6: the First Detection

Sulla Terra si stava formando il supercontinente *Rodinia* e la forma di vita dominante, i *cianobatteri*, si organizzava in colonie che avrebbero lasciato testimonianze fossili nelle stromatoliti. Nel pieno dell'era mesoproterozoica, ad una distanza dalla Terra di 410 Megaparsec (circa 10000 miliardi di miliardi di km) due Buchi Neri, dopo aver spiraleggiato avvicinandosi sempre più, si scontrarono ad una velocità quasi pari a quella della luce, dando origine ad un unico Buco Nero. I due corpi avevano masse rispettivamente di valore 36 e 29 masse solari, mentre il Buco Nero finale aveva una massa di 62 masse solari: nel cataclisma, durato circa mezzo secondo, sono state bruciate tre masse solari liberando molta più energia di quanta il Sole possa produrne in tutta la sua esistenza! Le onde gravitazionali emesse si sono irradiate nello spazio e, dopo un viaggio durato 1.3 miliardi di anni, il 14 Settembre del 2015 sono arrivate sulla Terra, dove le due antenne LIGO le hanno registrate: le comunità LIGO e Virgo hanno congiuntamente analizzato i dati, concludendo che **per la prima volta nella storia dell'Umanità si erano osservate in modo diretto quelle onde gravitazionali previste da Albert Einstein un secolo prima.**



Nelle figure, in successione: La storica registrazione della **prima osservazione diretta** di un'onda gravitazionale; il modello; i dati definitivi del fenomeno registrato il **14 Settembre 2015** e annunciato l'**11 Febbraio 2016** dopo mesi di verifiche.

Credit: LIGO-Virgo

GW 150914: FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP); BEST-FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

observed by	LIGO WA, LA	arrival time delay between WA and LA	7 ms
source type	Black hole (BH) binary	signal-to-noise ratio	24
date	14 Sept 2015	false alarm prob.	$< 2 \times 10^{-7}$
time	09:50:45 UTC	false alarm rate	1 in 200,000 yr
distance	1.3 Gpc, 410 Mpc	coalescence rate	$2-400 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$
redshift	0.09	peak strain	1×10^{-21}
Detector Frame Masses $M_{\odot}$		peak displacement of interferometer arms	0.004 Fermi
total mass	70	peak amp. frequency	150 Hz
chirp mass	30	peak speed of black holes	$\sim 0.6 c$
primary BH	39	peak luminosity	$3.6 \times 10^{56} \text{ erg s}^{-1}$
secondary BH	31	radiated energy	3 $M_{\odot}$, 5% of mass
remnant BH	62		
Source Frame Masses $M_{\odot}$		remnant BH ringdown frequency	250 Hz
total mass	65	remnant BH damping time	4 ms
chirp mass	28	mass ratio	0.8
primary BH	36	durations from 30 Hz	$\sim 200 \text{ ms}$
secondary BH	29	# cycles from 30 Hz	~ 10
remnant BH	62	consistent with general relativity	Yes
primary BH spin	< 0.7	graviton mass bound	$< 1.2 \times 10^{-16} \text{ eV}$
secondary BH spin	< 0.9	online trigger latency	2 minutes
remnant BH spin	0.7	offline analysis pipelines used	5
spins in orbital plane	0	CPU hours consumed	~ 50 million
remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^4 \text{ km}^2$	papers on Feb 11, 2016	13
orientation	face-on/off	no. of researchers	~ 1000 in 16 countries
sky location	southern hemisphere		
resolved to	600 sq. deg.		

Lo storico articolo dell'annuncio.

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)
Selected for a Viewpoint in Physics
PHYSICAL REVIEW LETTERS
week ending 12 FEBRUARY 2016

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott et al.^{*}

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal exhibits a peak strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 200,000 years, equivalent to a significance greater than 5.1 σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+120}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.01}_{-0.01}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+3}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+3}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot}$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

Phys. Rev. Lett. 116, 061102 (2016)

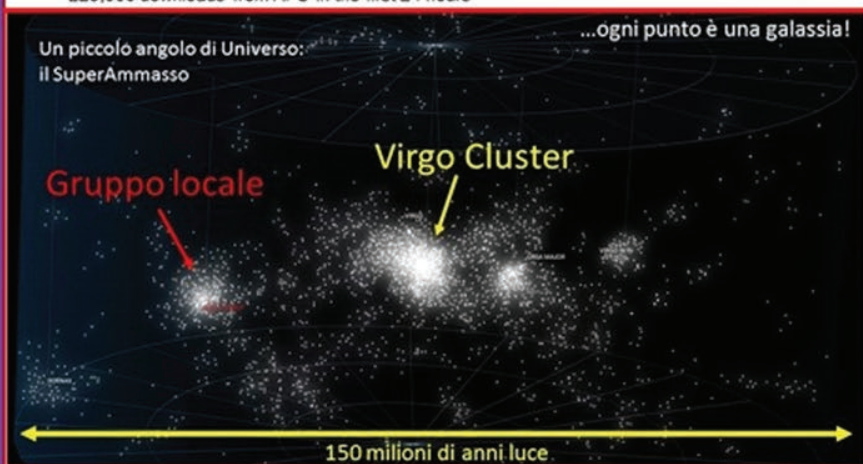
229,000 downloads from APS in the first 24 hours



La rivelazione diretta delle Onde Gravitazionali non fu soltanto una conferma importantissima della Relatività Generale, e quindi di una intera branca della Fisica, ma mostrò che i Buchi Neri di «piccole dimensioni» (qualche decina di masse solari o anche meno: non i mostruosi Buchi Neri Supermassivi che formano i nuclei attivi delle Galassie) esistono e hanno le proprietà previste, che le onde gravitazionali viaggiano alla velocità della luce indipendentemente dalla frequenza (per cui il quanto di gravità, il gravitone, ha massa nulla), che la gravità è un campo tensoriale senza componenti di tipo scalare o vettoriale, ...ma **soprattutto essa aprì la strada ad un nuovo modo di indagare l'Universo**: l'interazione debolissima con la materia, il viaggiare alla velocità della luce, la forte segnatura fisico-matematica rendono l'onda gravitazionale un potente mezzo d'informazione, nuovo e totalmente diverso da tutti quelli utilizzati in passato dall'Uomo. Con l'osservazione del 14 Settembre 2015 diventa realmente operativa l'**Astronomia Gravitazionale**, aprendo nuovi orizzonti allo studio dell'Universo nella sua immensità.

Il gruppo Virgo di Urbino all'epoca della «grande scoperta»:

Oltre al fondatore **Flavio Vetrano**,
i Fisici **Gianluca Guidi**, **Jan Harms**,
Filippo Martelli,
Francesco Piergiovanni,
Andrea Viceré
gli Astronomi **Marica Branchesi**,
Giuseppe Greco, **Giulia Stratta**
l'Ingegnere **Matteo Montani**
il Dottorando **Lorenzo Cerboni Baiardi**



TORNA ALL'ARTICOLO

BOX 7: Coalescenza di due Stelle di Neutroni

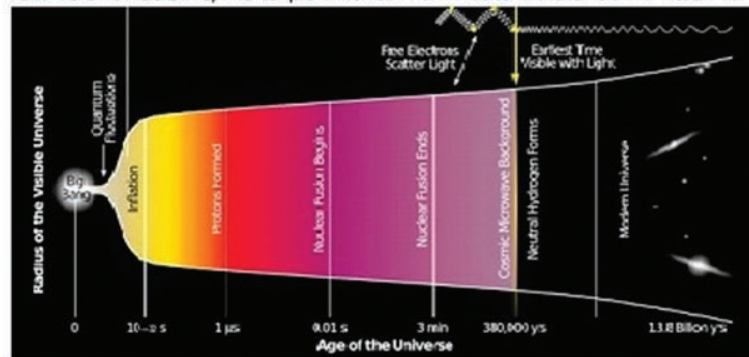
Il 17 Agosto 2017 alle 14.41 (ora italiana) le due antenne LIGO e l'antenna Virgo registravano un'onda gravitazionale di maggior durata rispetto a tutti i precedenti segnali registrati: l'analisi permise di identificare l'evento come la coalescenza di due stelle di neutroni, con masse poco diverse da 1 massa solare; i protocolli di intesa concordati da LIGO-Virgo con molti gruppi della comunità degli Astronomi permisero di utilizzare il segnale gravitazionale come «allerta», corredata da indicazioni sufficientemente precise per restringere di molto l'area della volta celeste in cui ricercare la sorgente. Circa 11 ore dopo, la controparte elettromagnetica fu individuata nella Galassia NGC 4993 (nella Costellazione dell'Hydra) a 130 milioni di anni luce dalla Terra. Quasi 70 Osservatori, terrestri o in orbita, hanno partecipato a questa «caccia celeste»: l'evento è stato rilevato nelle Radioonde, nell'Infrarosso, nel Visibile, nell'Ultravioletto, nei RX. Inoltre, circa 2 secondi dopo l'arrivo dell'onda gravitazionale, il satellite FERMI ha registrato un lampo gamma «breve». L'origine dei «gamma ray burst», rapidi flash ad altissima frequenza ed a contenuto energetico enorme (pari o superiore all'energia liberata nello scoppio di una Supernova), con distribuzione isotropa per quanto concerne la loro provenienza, è un problema a lungo dibattuto: per i lampi «lunghi» (> 2 secondi) si presume che la sorgente sia identificabile nel collasso di stelle massicce extragalattiche; per i lampi «brevi» (< 2 s), si ha ora la prova che essi si generano nella fusione di due «Neutron Star». Intorno ad un nucleo centrale derivante dalla fusione delle due stelle si forma un disco di accrescimento che emette un lampo gamma mentre alimenta il nucleo; un'altra parte di materia viene espulsa: essendo ricca di isotopi pesanti, si riscalda per il loro decadimento dando origine ad una forte emissione termica nel visibile, chiamata Kilonova, che vira verso l'Infrarosso e si spegne dopo una decina di giorni. L'aver osservato per la prima volta uno stesso evento sia per mezzo delle onde elettromagnetiche, sia per mezzo delle onde gravitazionali dà pieno significato all'**Astronomia Multimessaggera**.

observed by	H, L, V	inferred duration from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 60 s
source type	binary neutron star (NS)	inferred # of GW cycles from 30 Hz to 2048 Hz**	~ 3000
date	17 August 2017	initial astronomer alert latency*	27 min
time of merger	12:41:04 UTC	HLV sky map alert latency*	5 hrs 14 min
signal-to-noise ratio	32.4	HLV sky area†	28 deg ²
false alarm rate	< 1 in 80 000 years	# of EM observatories that followed the trigger	~ 70
distance	85 to 160 million light-years	also observed in	gamma-ray, X-ray, ultraviolet, optical, infrared, radio
total mass	2.73 to 3.29 M _☉	host galaxy	NGC 4993
primary NS mass	1.36 to 2.26 M _☉	source RA, Dec	13 ^h 09 ^m 48 ^s , -23°22'53"
secondary NS mass	0.86 to 1.36 M _☉	sky location	in Hydra constellation
mass ratio	0.4 to 1.0	viewing angle (without and with host galaxy identification)	≤ 56° and ≤ 28°
radiated GW energy	> 0.025 M _☉ c ²	Hubble constant inferred from host galaxy identification	62 to 107 km s ⁻¹ Mpc ⁻¹
radius of a 1.4 M _☉ NS	likely □ 14 km		
effective spin parameter	-0.01 to 0.17		
effective precession spin parameter	unconstrained		
GW speed deviation from speed of light	< few parts in 10 ¹⁵		

TORNA ALL'ARTICOLO

BOX 8: la Nucleosintesi

L'elemento di materia «ordinaria» più diffuso nell'Universo (74%) è l'idrogeno (H), il cui atomo è formato da un protone e un elettrone. Segue l'elio (He), formato da due protoni, due elettroni e uno o due neutroni: esso raggiunge la percentuale di poco più del 24%. Tutti gli altri elementi «natural», quasi un centinaio, insieme non raggiungono la percentuale dell'1%. Come si siano formati gli elementi a partire dalle particelle elementari «di base», cioè protoni, elettroni e neutrini in un mare di fotoni (il neutrone può formarsi per cattura elettronica da parte di un protone, con simultanea emissione di un neutrino) è un problema scientifico di grande rilevanza per la comprensione dell'Universo. In teoria aggiungendo un protone alla volta (e alcuni neutroni) al nucleo di partenza (l'H), processo chiamato di fusione nucleare, si otterrebbero tutti gli elementi. Vi sono però due problemi seri: come nelle reazioni chimiche anche in quelle nucleari si devono fare i conti con il bilancio energetico. Se il prodotto ha minore energia dei componenti di partenza, si libera energia (reazione esoergonica) per cui «ci si guadagna»; se il prodotto ha maggiore energia dei componenti di partenza, manca energia che deve essere fornita dall'esterno (reazione endoergonica) per cui «ci si perde». Lo spartiacque è rappresentato dal ferro (Fe): sino a tale elemento le reazioni di fusione nucleare sono privilegiate in quanto esoergoniche; dopo il Fe le reazioni sono endoergoniche, per cui è favorita la frammentazione (fissione nucleare). In secondo luogo i nuclei sono formati da protoni carichi positivamente per cui respingono il nuovo protone anch'esso positivo: per far avvenire la reazione si deve fornire al protone aggiuntivo sufficiente energia per vincere questa repulsione elettrostatica, avvicinandolo così al nucleo al punto da far scattare l'attrazione nucleare, molto più intensa ma limitata a distanze infinitesime.

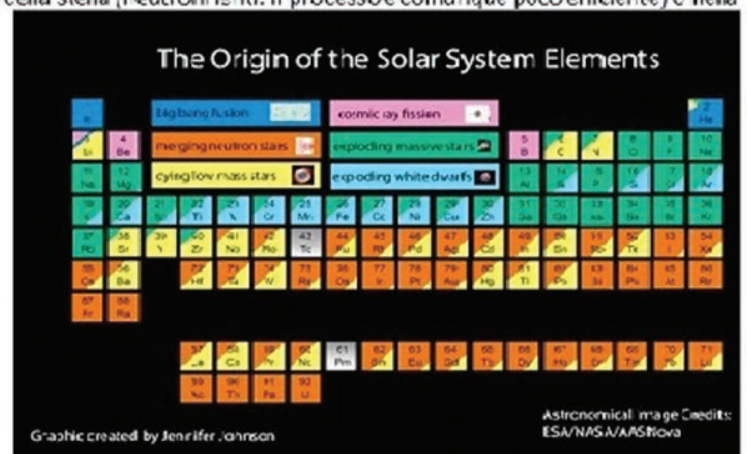


chiamata nucleosintesi primordiale. Per assistere a nuovi processi di fusione bisogna attendere qualche centinaio di milioni di anni, quando gli atomi di H, formati dai protoni liberi per cattura di un elettrone, condensandosi in agglomerati massicci si contraggono sotto il loro peso: l'energia gravitazionale liberata è enorme ed innalza la temperatura interna sino ad innescare processi di fusione nucleare che interessano in primis l'H e successivamente l'He. A seconda della massa della stella si innescano vari cicli (protone-protone; C-N-O, carbonio azoto ossigeno; tre alfa, ovvero 3 nuclei di He) che portano alla sintesi di elementi più pesanti, sino al Fe. Ulteriori processi di fusione, endoergonici, richiederebbero molta più energia esterna, non disponibile. Una possibilità è la cattura neutronica per cui un neutrone viene catturato dal nucleo, decadendo poi con la emissione di un elettrone (e di un antineutrino) e la contemporanea comparsa di un protone dando così origine ad un nucleo di un altro elemento più pesante. Tali processi richiedono tuttavia un alto flusso di neutroni che può prodursi in una serie di reazioni in strati convettivi della stella (neutroni lenti: il processo è comunque poco efficiente) o nella fase esplosiva di Supernova (neutroni rapidi).

Tuttavia la cattura neutronica conseguente ai due fenomeni appena descritti rappresenta solo una parte della nucleosintesi degli elementi pesanti; per completare il quadro con le corrette percentuali per tutti gli elementi serve un'ulteriore sorgente, già da tempo ipotizzata: la fusione di due stelle di neutroni. L'osservazione del 17 agosto 2017 della coalescenza di due *neutron star* ha confermato in pieno questa ipotesi. La nucleosintesi primordiale, quella stellare ed esplosiva, quella legata alla coalescenza di due stelle di neutroni danno conto in maniera esaustiva dell'intero sistema periodico degli elementi chimici nelle corrette percentuali; con due precisazioni: il boro (B), il berillio (Be) ed in piccola misura il litio (Li) si originano in maniera molto diversa, essendo prodotti per frammentazione da C, N ed O a seguito di urti da raggi cosmici; infine il promezio (Pm) ed il tecnezio (Tc) sono elementi artificiali prodotti per sintesi in laboratorio, anche se tracce di Tc sono state forse osservate in alcune atmosfere stellari.

Assumendo il modello cosmologico del Big Bang, l'Universo si forma da un punto (una singolarità) che si autoespande con temperature iniziali di 10^{30} gradi centigradi; dopo meno di un milionesimo di secondo la temperatura è scesa abbastanza da consentire la formazione di particelle stabili che però, a causa dell'energia ancora troppo elevata, non possono «legarsi»; dopo quasi un secondo, la temperatura è scesa a circa 10 miliardi di gradi, ed i protoni possono interagire tra loro per dare origine ai primi nuclei stabili di He; l'energia termica è ancora sufficientemente alta da consentire la fusione nucleare con la formazione di altri nuclei leggeri (Deuterio e Litio); dopo pochi minuti la temperatura diventa troppo bassa e la fusione si arresta: i neutroni liberi decadono aumentando il numero di protoni liberi che danno origine al gran numero di atomi di H presenti ancora oggi nell'Universo.

Questa successione di eventi, che si arresta pochi minuti dopo il Big Bang, è



[TORNA ALL'ARTICOLO](#)