

* NOVA *

N. 1161 - 1 GIUGNO 2017

ASSOCIAZIONE ASTROFILI SEGUSINI

ONDE GRAVITAZIONALI

La visione geniale di Albert Einstein è partita dal concetto che il mondo sensibile che conosciamo dipende dalla gravità presente al momento, che in casi estremi è in grado persino di bloccare la luce riuscendo a deformare lo spazio piano newtoniano.

La gravità è infatti l'unica forza fisica in grado di agire ad una distanza tendente ad infinito, ed è creata dalla materia presente in uno spazio in un dato tempo.

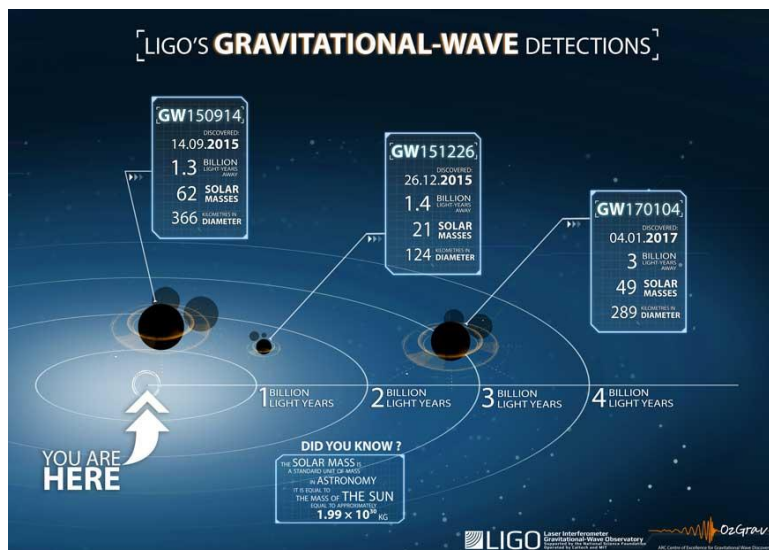
Lo stesso concetto di tempo dipende dalla velocità della luce, e gradienti altissimi di gravità si realizzano nei buchi neri; la perturbazione del tessuto spazio-tempo causato dalla coalescenza di due di tali entità può irradiarsi ed essere rilevato a distanze e tempi inimmaginabili per noi.

L'uomo è passato dal percorrere la strada del creare istantaneamente grandi quantità di energia dalla materia (ordigni nucleari) al modo di rilevare perturbazioni relativistiche del nostro spazio, come in questo caso. (p.p.)

Da MEDIA INAF di oggi riprendiamo, con autorizzazione, tre articoli sulle onde gravitazionali.

Gw170104: TERZA RILEVAZIONE PER LIGO-VIRGO

Il 4 gennaio di quest'anno i ricercatori della Collaborazione Ligo/Virgo hanno identificato, per la terza volta, una sorgente di onde gravitazionali generate dalla fusione di un sistema binario di buchi neri, localizzato a 3 miliardi di anni luce, che ha prodotto un oggetto di circa 49 masse solari. I risultati, annunciati oggi, 1° giugno, sono pubblicati su Physical Review Letters.

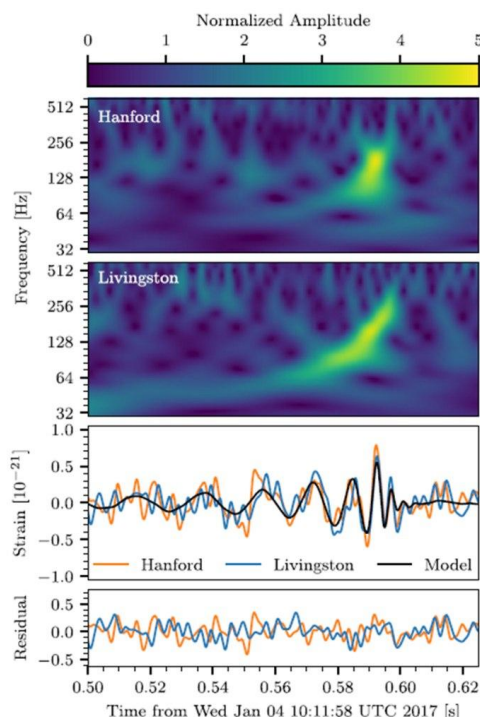


Infografica con i tre eventi confermati fino a oggi rivelati da Ligo e la loro distanza da noi in miliardi di anni luce.

Da sinistra: quello del 14 settembre 2015, quello del 26 dicembre 2015 e, infine, quello annunciato oggi del 4 gennaio 2017. Crediti: Lsc/Ozgra

Si chiama **Gw170104**, dalla data della sua scoperta (il 4 gennaio 2017), ed è la terza sorgente di onde gravitazionali rivelata dall'interferometro Ligo. Come nei due precedenti casi, le onde gravitazionali sono state generate dalla **fusione di due buchi neri**, fusione che ha prodotto un oggetto più grosso con una massa risultante pari a 49 volte la massa del Sole. Un valore a metà strada fra le 62 e le 21 masse solari dei due buchi neri rivelati da Ligo, rispettivamente, nel settembre e nel dicembre 2015 (vedi immagine sopra). L'evento Gw170104, registrato nel corso delle attuali osservazioni iniziate il 30 novembre 2016 e che proseguiranno per tutta l'estate, **conferma definitivamente la nascita di una nuova disciplina nell'ambito dell'astronomia gravitazionale**. I risultati sono pubblicati su *Physical Review Letters*.

Gw170104 si trova a circa 3 miliardi di anni luce, una distanza quasi doppia rispetto a quella delle prime due sorgenti rivelate dall'interferometro americano (1,3 e 1,4 miliardi di anni luce rispettivamente). «Abbiamo un'ulteriore conferma che esistono buchi neri di massa stellare più grande di 20 masse solari: si tratta di oggetti di cui ignoravamo l'esistenza prima di Ligo», spiega **David Shoemaker** del MIT, portavoce della collaborazione scientifica di Ligo. «È notevole riuscire a ricostruirne la storia e a studiarla nonostante questi eventi strani ed estremi siano accaduti miliardi di anni fa e a miliardi di anni-luce di distanza. Grazie al lavoro svolto dalle due collaborazioni scientifiche, Ligo e Virgo, è stato possibile ricostruire questa storia».



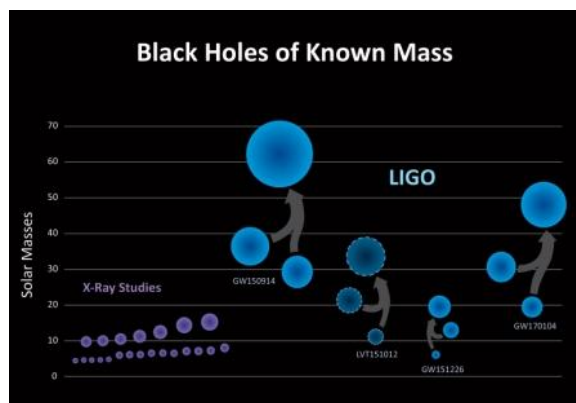
La figura illustra, in alto, la variazione della frequenza in funzione del tempo relativamente ai dati registrati dai rivelatori situati a Hanford e Livingston per la sorgente Gw170104. Il grafico al centro mostra le serie temporali dei dati dai due rivelatori (i dati di Livingston sono stati spostati indietro di 3ms per tener conto della posizione celeste della sorgente e il segno dell'ampiezza è stato invertito per tener conto del diverso orientamento dei rivelatori). La forma d'onda di massima probabilità relativa alla binaria di buchi neri è mostrata in nero. Il grafico in basso mostra i residui tra i dati e la forma d'onda di massima probabilità.

Crediti: Abbott *et al.* 2017

In tutti e tre i casi, ciascuno dei due rivelatori gemelli di Ligo ha rivelato le onde gravitazionali emesse a seguito della fusione di una coppia di buchi neri. Questo processo genera una quantità di energia tale da superare quella prodotta da tutte le stelle e galassie dell'universo in un determinato istante di tempo.

Durante il processo di fusione, i due buchi neri ruotano attorno al proprio asse mentre si muovono l'uno attorno all'altro, come una coppia di pattinatori che girano su se stessi mentre ruotano l'uno attorno all'altra. A volte, man mano che la coppia si muove, i buchi neri ruotano attorno al proprio asse nella stessa direzione del moto orbitale, ma altre volte succede il contrario. C'è di più: può capitare che i buchi neri siano inclinati rispetto al piano orbitale. In pratica, il moto di rotazione attorno al proprio asse può essere orientato in qualsiasi direzione. I nuovi dati di Ligo non permettono di determinare se i buchi neri fossero inclinati, ma implicano che almeno uno di essi non fosse allineato rispetto al moto orbitale. Occorreranno ulteriori osservazioni per arrivare a conclusioni più certe sul moto di rotazione dei buchi neri, ma questi primi risultati offrono degli indizi sulla loro formazione. «È la prima volta che abbiamo una prova del fatto che i buchi neri possono essere non allineati, e questo suggerisce che le binarie di buchi neri si possano formare in ammassi stellari molto densi», osserva **Bangalore Sathyaprakash** della Penn State e Cardiff University, coautore dello studio.

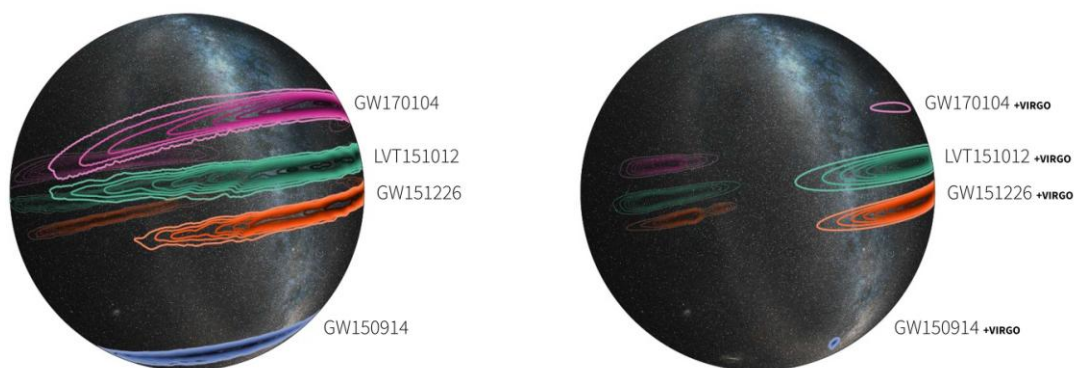
Ci sono due modelli che tentano di spiegare l'origine delle coppie di buchi neri. Il primo assume che questi oggetti nascano insieme: in tal caso, i buchi neri si formano quando esplodono entrambe le stelle di un sistema binario, e quindi, poiché le stelle ruotano inizialmente attorno al proprio asse in maniera allineata, anche i buchi neri risultanti rimarranno allineati. Nel secondo modello, invece, i buchi neri formano una coppia in una fase successiva della loro evoluzione, quando si avvicinano verso le regioni più interne di ammassi stellari molto affollati. In questo scenario, a differenza del precedente, i due buchi neri possono ruotare attorno al proprio asse in qualsiasi direzione rispetto al loro moto orbitale. Ora i dati di Ligo, suggerendo che i due oggetti di partenza – nel caso della sorgente Gw170104 – non fossero allineati, vanno a sostegno, anche se non definitivamente, del modello dell'ammasso stellare denso.



Le sorgenti gravitazionali identificate da Ligo rappresentano una nuova popolazione di buchi neri le cui masse sono decisamente più grandi rispetto a quelle che sono state ottenute con le sole osservazioni in banda X. Le tre sorgenti di onde gravitazionali confermate (Gw150914, Gw151226 e Gw170104), assieme a un'altra che ha un livello di significatività più basso (Lvt151012), suggeriscono l'esistenza di una popolazione di binarie di buchi neri di massa stellare che dopo il processo di fusione possono raggiungere 20 masse solari, un valore più grande rispetto a quanto si pensava prima. Crediti: Ligo / Caltech / Sonoma State (Aurore Simonnet)

«Stiamo iniziando a fare vera statistica sulle binarie di buchi neri», dice **Keita Kawabe** del Caltech, coautore dello studio. «Tutto questo è molto interessante: alcuni modelli sulla loro formazione sono più accreditati rispetto ad altri e, in futuro, si spera di essere in grado di discriminare meglio tra diverse ipotesi».

Lo studio permette poi di mettere ancora una volta al vaglio la relatività generale. Ad esempio, i ricercatori hanno analizzato un effetto, chiamato dispersione, che si ha quando le onde luminose che si propagano in un mezzo, come il vetro, viaggiano a velocità diverse in funzione della loro lunghezza d'onda (è grazie a questo effetto che un prisma scompone la luce visibile nei diversi colori). Nel caso delle onde gravitazionali, la teoria di Einstein vieta l'effetto di dispersione. E in effetti la dispersione non è stata osservata da Ligo. «Pare che Einstein abbia avuto ancora ragione, anche per questo evento, che è avvenuto a una distanza circa doppia rispetto a quella della nostra prima rivelazione», dice **Laura Cadonati** della Georgia Tech, viceportavoce della collaborazione Ligo. «Non vediamo delle deviazioni dalla relatività generale, e l'elevata distanza della sorgente ci permette di affermarlo con ancora maggiore fiducia».



A sinistra, l'immagine raffigura la proiezione tridimensionale della Via Lattea su una sorta di globo trasparente in cui viene mostrata la posizione più probabile delle tre sorgenti di onde gravitazionali confermate da Ligo con una quarta possibile sorgente (Lvt151012). I contorni più esterni rappresentano la regione con il 90 per cento del livello di confidenza mentre quello più interno indica la regione con il 10 per cento del livello di confidenza. A destra, la mappa illustra come l'aggiunta dei dati di Virgo può migliorare la posizione delle sorgenti. Crediti: Ligo / Caltech / Mit / Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger)

«I rivelatori di Ligo hanno raggiunto delle sensibilità impressionanti», fa notare **Jo van den Brand**, portavoce della collaborazione Virgo. «Ci aspettiamo che entro questa estate l'interferometro Virgo espanderà la rete di rivelatori, il che ci aiuterà a localizzare meglio i segnali gravitazionali».

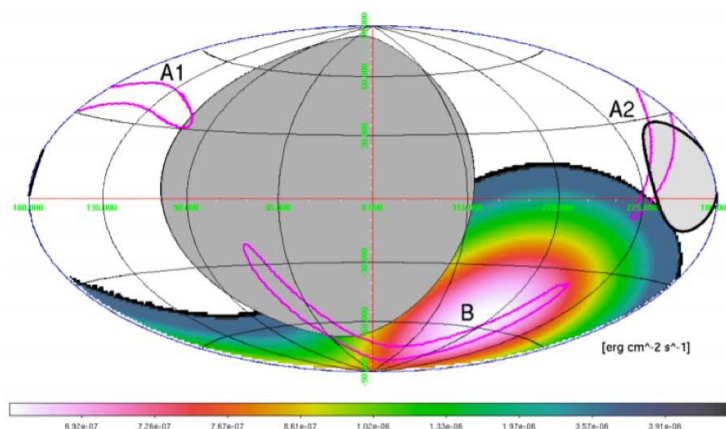
«Con la terza rivelazione confermata di onde gravitazionali generate dalla fusione di due buchi neri, Ligo si conferma un osservatorio potente per esplorare il lato oscuro dell'universo», conclude **David Reitze** del Caltech, direttore esecutivo del laboratorio Ligo e coautore dello studio. «Se Ligo è ideale per osservare questi tipi di eventi, speriamo presto di vedere anche eventi di altro tipo, come la violenta fusione di due stelle di neutroni».

Corrado Ruscica

<http://www.media.inaf.it/2017/06/01/ligo-gw170104/>

UN ISTANTE PRIMA DI LIGO, AGILE HA VISTO QUALCOSA

In concomitanza con l'onda gravitazionale del 4 gennaio scorso, circa mezzo secondo prima, il piccolo satellite italiano ha registrato un segnale debole ma interessante. Potrebbe essere associato all'evento Gw170104, e la conferma potrebbe venire dalla rivelazione combinata di più satelliti.



Il cielo in coordinate galattiche al momento dell'arrivo dell'onda gravitazionale associata all'evento Gw170104. Le zone racchiuse dai contorni in colore "magenta" indicano l'area di possibile provenienza del segnale gravitazionale. La zona colorata in rosso, giallo e verde indica il campo di vista e l'esposizione oltre i 50 MeV (in $\text{erg}/\text{cm}^2/\text{sec}$) dello strumento gamma del satellite Agile, che copre quindi buona parte della zona "B" e possibilmente anche porzioni degli archi indicati con "A". Immagine è tratta dall'articolo di Verrecchia *et al.* spedito alla rivista *Astrophysical Journal Letters* e ora disponibile in rete su *arXiv*.

La collaborazione Ligo-Virgo ha appena annunciato la rivelazione di un terzo evento confermato di onde gravitazionali, Gw170104. Ora, il sogno di tutti gli astrofisici è quello di cogliere – in concomitanza d'un segnale gravitazionale – un segnale elettromagnetico. La "controparte", la chiamano. Riuscirci rappresenterebbe una scoperta storica: *sentire* e *vedere* lo stesso evento. Un'impresa difficilissima, forse impossibile: quando due buchi neri fondono l'uno nell'altro, infatti, non è scontato che ci sia qualcosa da *vedere*, anzi: se trattengono tutto, persino la luce, il catastrofico evento potrebbe increspare per miliardi di anni luce il tessuto dello spaziotempo senza però lasciare la benché minima traccia elettromagnetica. Un'impresa difficilissima ma cruciale: ecco dunque che i team dei principali telescopi spaziali per le alte energie e telescopi da terra, ogni volta che Ligo li avverte d'una potenziale onda gravitazionale, corrono subito a guardare i dati.

Così hanno fatto anche i ricercatori del team del satellite Agile – il telescopio spaziale giusto, nel posto giusto e al momento giusto. Frutto della collaborazione tra l'Agenzia spaziale italiana (ASI), l'Istituto nazionale di astrofisica (INAF) e l'Istituto nazionale di fisica nucleare (INFN), Agile è idealmente in grado di poter rivelare fenomeni transienti X e gamma su un campo molto grande, dal diametro di più di 100 gradi. Quando è arrivata l'onda gravitazionale vista da Ligo, il 4 gennaio 2017, Agile si trovava nella posizione giusta per coprire, con il suo *imager* gamma, addirittura il 40 per cento della zona possibile di provenienza dell'onda gravitazionale (si veda la figura in alto).

«Abbiamo immediatamente attivato il nostro sistema di analisi rapida dei tre rivelatori di Agile», ricorda **Francesco Verrecchia**, ricercatore INAF dell'Osservatorio astronomico di Roma di stanza al Centro dati dell'ASI e primo autore di un articolo inviato ad *Astrophysical Journal Letters* – al momento, occorre sottolineare, non ancora accettato, ma solo reso pubblico in rete. «Inizialmente non abbiamo rivelato nulla di significativo, sia nella banda X che quella gamma. Abbiamo però continuato ad analizzare a fondo i dati nelle settimane scorse. Abbiamo verificato l'assenza di segnale gamma rivelabile su tempi scala molto brevi (2 secondi, 20 secondi, 200 secondi) ponendo dei limiti molto stringenti sull'emissione gamma oltre i 50 MeV». Tradotto: fin qui nulla, nessun segnale. Tuttavia, aggiunge Verrecchia, «abbiamo poi notato la presenza di un evento debole, ma molto interessante, a ridosso del tempo della coalescenza finale, rivelato con Mcal (*il minicalorimetro, uno dei tre strumenti a bordo di Agile, ndr*). A circa 0.5 secondi prima del tempo dell'evento gravitazionale, Mcal rivela un debole segnale della durata di 30 millisecondi che è stato osservato in passato in altri lampi gamma cosmici brevi (short grb) e che potrebbe essere associato all'evento gravitazionale del 4 gennaio».

«Agile è sempre in allerta, e in questo caso il sistema di acquisizione ha funzionato molto bene. L'emissione transiente che Mcal ha rivelato a ridosso del tempo di arrivo dell'onda gravitazionale», aggiunge **Marco Tavani** dell'INAF-IAPS di Roma, responsabile scientifico della missione, potrebbe essere associata all'evento Gw170104, e la conferma potrebbe venire dalla rivelazione combinata di più satelliti. Ci stiamo avventurando in un territorio inesplorato: i modelli correnti non favoriscono l'emissione gamma associata alla

coalescenza di buchi neri di massa di qualche decina di masse solari, ma potrebbero esserci condizioni di materia “vestigiale” attorno a uno o due dei buchi neri, o altre condizioni che favoriscono un'emissione gamma prima della coalescenza finale. Dobbiamo esplorare e accumulare dati anche di eventi deboli, intensificando la sinergia tra più satelliti. L'evento visto da Agile nel caso di Gw1701014, se confermato, aprirebbe un fronte di indagine teorica estremamente interessante».

Già. Se confermato. Ed è un 'se' che pesa, in questo risultato che per ora va raccontato tutto al condizionale. A partire dalla sua significatività. La probabilità di occorrenza casuale d'un segnale a ridosso del tempo dell'onda gravitazionale è stimata dal team Agile in 3.4 sigma, tenuto conto delle fluttuazioni statistiche e del tempo di acquisizione dati. «Significa che la probabilità che quel segnale sia finito lì per caso è inferiore allo 0.1 per cento», ricorda Tavani. Dunque molto bassa, anche se non ancora abbastanza, almeno per gli standard della fisica.

C'è poi un altro problema. Il debole segnale, come dice Verrecchia, non è stato individuato subito dal team di Agile, ma solo con di un'analisi approfondita successiva, condotta a seguito della segnalazione da parte della collaborazione Ligo-Virgo. Non è dunque ragionevole supporre che, conducendo un'analisi altrettanto approfondita sul resto dei dati, emergano numerosi altri segnali deboli come questo, indebolendo dunque la possibile correlazione con il segnale di Ligo? «È un dubbio legittimo: è il tema di un capitolo intero dell'articolo, che calcola la cosiddetta *post-trial probability*: ovvero, la probabilità che tiene conto di quante volte un segnale simile sia visto dal minicalorimetro di Agile, e di quante volte lo abbiamo guardato per poter fare una valutazione *post*, come oggi si fa in questi casi», spiega Tavani. «Nel nostro caso, la vicinanza temporale all'evento gioca un ruolo fondamentale: abbiamo una *detection rate* di eventi simili di 1 ogni 10mila secondi, ma il fatto che questo evento sia a 0.5 sec dal tempo di Ligo rende la cosa interessante».

A questo proposito: il mezzo secondo d'anticipo del segnale visto da Agile rispetto a quello di Ligo non dovrebbe suggerire – se la correlazione fra i due segnali fosse confermata – che le onde gravitazionali viaggiano un po' più lente della luce? «No, non avrebbe implicazioni sulla velocità di propagazione secondo il nostro schema di Relatività generale, che ci dice che le onde gravitazionali viaggiano con velocità pari a quella della luce. Non abbiamo al momento prove contrarie al riguardo», ribadisce Tavani. Allora come spiegare quel mezzo secondo? «Le condizioni attorno ai due buchi neri possono essere complesse: si può arrivare all'emissione elettromagnetica di un *flash* prima della coalescenza finale per la presenza di materia residua, che viene sollecitata dall'enorme potenziale gravitazionale dei due buchi neri in avvicinamento sempre più stretto. Il tutto avviene entro qualche decimo di secondo. Agile vede il suo *flash* circa 0.46 secondi prima dell'atto finale della coalescenza. I dati di Ligo ci dicono che hanno cominciato a rivelare un segnale circa 0.1 secondi prima della fine, quindi Agile vede un segnale 0.34 secondi prima del segnale rivelato da Ligo. Questi tempi sono i tempi di dischi viscosi attorno ai buchi neri, quindi la può esserci un fenomeno fisico che anticipa il collasso finale».

Insomma, un'eventuale conferma dell'esistenza di una relazione fra il segnale di Agile e quello visto da Ligo avrebbe implicazioni enormi, rappresenterebbe l'inizio dell'astrofisica di questi oggetti. A questo punto la parola passa agli altri satelliti che quel 4 gennaio erano in grado di cogliere un segnale come quello di Agile. «Ci sono diversi satelliti capaci di vedere un'emissione intorno al MeV, anche se poi le loro orbite, efficienze e altro sono complicate da prevedere: Fermi-GBM, Integral, forse Swift, KONUS-Wind...». E in queste settimane, durante le analisi dati, non c'è stato un confronto? «No, non ci si sente con i team di altri satelliti», risponde Tavani a Media Inaf, «almeno in passato non è successo – che io sappia – per eventi gravitazionali, e non sta succedendo ora. Ognuno è molto impegnato nell'analisi dei dati propri...».

Marco Malaspina

<http://www.media.inaf.it/2017/06/01/agile-gw170104/>

F. Verrecchia, M. Tavani, A. Ursi, A. Argan, C. Pittori, I. Donnarumma, A. Bulgarelli, F. Fuschino, C. Labanti, M. Marisaldi, Y. Evangelista, G. Minervini, A. Giuliani, M. Cardillo, F. Longo, F. Lucarelli, P. Munar-Adrover, G. Piano, M. Pilia, V. Fioretti, N. Parmiggiani, A. Trois, E. Del Monte, L.A. Antonelli, G. Barbiellini, P. Caraveo, P.W. Cattaneo, S. Colafrancesco, E. Costa, F. D'Amico, M. Feroci, A. Ferrari, A. Morselli, L. Pacciani, F. Paoletti, A. Pellizzoni, P. Picozza, A. Rappoldi e S. Vercellone, “AGILE Observations of the Gravitational Wave Source GW170104”, *preprint*, <https://arxiv.org/abs/1706.00029v1> - <https://arxiv.org/pdf/1706.00029v1.pdf>

UNA NUOVA BRANCA DELL'ASTRONOMIA, L'ASTRONOMIA GRAVITAZIONALE

Con la scoperta delle onde gravitazionali si apre una nuova branca dell'astronomia, l'astronomia gravitazionale. Le onde gravitazionali, al contrario dei fotoni, viaggiano indisturbate nello spazio tempo, attraversando tutto ciò che incontrano: messaggere perfette, dunque, dal Big Bang fino a noi.

Esattamente come un sasso in uno stagno perturba lo stato di quiete dell'acqua, le onde gravitazionali riescono a far vibrare il “tessuto” dello spazio-tempo al loro passaggio. Viaggiano alla velocità della luce e



