

## COMUNITA' DELL'ISOLOTTO

Domenica 20 Marzo 2016

(gruppo Elena, Gian Paolo, Giulia, Maria, Roberto, Sergio)

La nuova frontiera della fisica: l'evidenza sperimentale delle  
Onde Gravitazionali previste un secolo fa' da Albert Einstein.

### CITAZIONE CINESE sull'Origine dell'Universo

UOMINI E PROFETI (Radio 3 del 28/02/16)

Testo del VI secolo avanti Cristo di un manoscritto su un bambù trovato in una tomba in Cina alla fine del secolo scorso che tratta dell'origine dell'universo. Testo legato alla dimensione spirituale e religiosa cinese che racconta la nascita dell'Eterno Primigenio e si rifà ai principi guida del Confucianesimo esprimendo l'armonia fra cielo, terra e umanità.

***"L'Eterno Primigenio non è presenza manifesta bensì materia indistinta, quiete, vacuità, materia immensa, quiete, immensa quiete, vacuità, immensa vacuità. Pur bastando a sé stesso l'Eterno Primigenio non è tuttavia saturo e l'incipienza dell'universo da qui prese avvio. All'incipienza seguì il soffio vitale, al soffio vitale l'esistenza, all'esistenza l'inizio, all'inizio il procedere di ogni cosa. Ancora non esistevano cielo e terra né sollecitazione al movimento né era affiorata la vita. Il soffio vitale si genera da sé nella prospettiva dell'eternità, nessuno può generarlo, si genera da sé e da sé si attiva. Nella prospettiva dell'eternità la nascita del soffio vitale non è un fenomeno isolato, fa parte di un sistema di fenomeni correlati. Il soffio vitale torbido ha generato la terra, quello limpido il cielo. Nel suo diffondersi il soffio vitale esprime davvero una potenza luminosa e divina"***

### Campo gravitazionale

Ogni corpo dotato di massa esercita sugli altri corpi una forza di tipo attrattivo, che viene detta "attrazione gravitazionale". Essa è proporzionale al prodotto delle masse dei due corpi (cresce con il crescere delle masse) e decresce con il quadrato della loro distanza (decresce rapidamente con il crescere della distanza). Inoltre è reciproca: i due corpi si attraggono simultaneamente con la stessa intensità (legge di Newton).

Il *campo gravitazionale* di un corpo è la regione dello spazio nella quale si esercita l'attrazione gravitazionale di quel corpo. Quando un altro corpo si trova in un punto, viene attratto verso il primo con una forza tanto maggiore quanto maggiori sono la propria massa e il valore del campo gravitazionale in quel punto. A rigore il campo gravitazionale di un corpo qualsiasi si estende nell'intero universo, ma in pratica l'attrazione che esso esercita rimane significativa solo nelle sue immediate vicinanze, anche se nel caso di un quasar o di una galassia le "immediate vicinanze" possono estendersi a distanze di milioni di anni luce (un anno luce, ovvero la distanza che la luce percorre in un anno, corrisponde a circa 9500 miliardi di Km).

Ma perché l'attrazione gravitazionale della Terra sulla Luna non la fa cadere sulla Terra? Perché la Luna possiede una velocità "trasversale" che la fa girare intorno alla Terra lungo un'orbita circolare.

La **teoria della relatività di Einstein** prevede l'esistenza di corpi celesti chiamati **buchi neri** cioè corpi di densità elevatissima, ad es. massa come quella del Sole compressa in un volume estremamente ridotto (una mela). Il loro campo gravitazionale è talmente intenso che neppure la radiazione elettromagnetica (luce, onde radio, ecc.) può sottrarsi alle loro forze attrattive: la luce può entrare, ma non riesce più ad uscire.

### Cosa sono le onde gravitazionali?

Sono oscillazioni dello spazio-tempo (il *tessuto* di cui, secondo la teoria della relatività di Einstein, è fatto il nostro universo, ma a quattro dimensioni: le tre spaziali note, più il tempo), simili alle onde provocate da un sasso in uno stagno, che viaggiano alla velocità della luce (Fig. 1). Se si getta qualcosa di veramente grosso nella quiete dello spazio – ad es. se due buchi neri entrano in collisione o se si verifica la fusione di due stelle pulsar - le onde gravitazionali create dall'evento si propagano alla velocità della luce non solo nella galassia, ma in tutto lo spazio-tempo. È comunque errato, come tanti hanno scritto, scrivere che **la rilevazione delle onde gravitazionali dimostra che "Einstein aveva ragione"**: che avesse ragione lo sapevamo già, questa è solo l'ultima conferma, dato che era stata già trovata una **prova indiretta** della loro esistenza. Queste oscillazioni dello spazio-tempo, anche se dovute a fenomeni astronomici di grandissima energia, sono molto deboli ed occorrono strumenti di grande sensibilità che solo in tempi recenti sono stati costruiti. Nel corso del tempo ci sono stati molti tentativi di trovarle, e molti sono stati gli insuccessi. "È come provare a riconoscere una canzone canticchiata da qualcuno ad una festa molto rumorosa". Cioè **questi segnali devono essere distinti da un intenso rumore di fondo**, che è il rumore dell'universo intorno a noi.

### La storia delle onde gravitazionali.

*"Albert Einstein le aveva predette nel 1915.* Einstein, con la teoria della relatività generale, ipotizzò l'esistenza delle onde gravitazionali e fino alla loro misura sperimentale, annunciata l'11 Febbraio 2016, la caccia alla verifica sperimentale della loro esistenza è andata avanti fra entusiasmi e delusioni.

Dobbiamo aspettare gli anni '60 per una notizia clamorosa: la **conferma indiretta** dell'esistenza delle onde gravitazionali: le osservazioni astronomiche di **Joseph Taylor** e **Russell Hulse** nel 1974. I due astrofisici, con il **telescopio Arecibo** a Portorico scoprono infatti una stella pulsar binaria (e per questo riceveranno il Nobel per la fisica nel 1993). Questa pulsar emette impulsi in modo irregolare, con un periodo che varia e fa capire che sta ruotando intorno a un'altra stella e la sua orbita si **restringe** sempre di più a causa di una **perdita di energia**. La perdita è causata dall'emissione di grandi quantità di onde gravitazionali – era questa l'unica spiegazione possibile.

Restava da misurare l'effetto diretto di un'onda gravitazionale. Si sono progettate "antenne" costituite da **masse metalliche delle quali si cerca di misurare la vibrazione**. Vengono tenute a **temperature più basse possibili** per eliminare i *rumori* di disturbo che possono derivare anche dalla stessa agitazione termica del materiale con cui sono fabbricate. Tra la metà degli anni '80 e i primi anni '90 al **Cern**, a Ginevra, viene realizzata l'antenna criogenica Explorer. Nel 1992 una barra di alluminio, dal peso di 2770 chilogrammi, viene installata nei Laboratori nazionali di Frascati dell'INFN (Istituto

nazionale di fisica nucleare): è il rilevatore Nautilus, la cui temperatura è poco sopra lo zero assoluto. Negli anni '90 si realizza una rete di antenne in Italia e Stati Uniti ma i risultati non ci sono e smette di funzionare nel 2007.

La nuova frontiera degli apparati sperimentali è "l'**interferometria ottica**" che consente di misurare la differenza del tempo impiegato da un fascio laser a percorrere due cammini diversi. Se c'è stato il passaggio di un'onda gravitazionale i due cammini vengono modificati in modo diverso e quindi i tempi di percorrenza sono diversi. Ma questa **deformazione spaziale** a seguito del passaggio di un'onda gravitazionale è molto piccola e per questo gli interferometri hanno bracci, che sono i *binari* dei fasci laser, lunghi anche diversi chilometri.

### Come è stata fatta la rilevazione?

È la "scoperta del secolo": i fisici dell'esperimento statunitense **LIGO** hanno captato il 14 Settembre 2015 il primo segnale delle onde gravitazionali, teorizzate da Einstein un secolo fa e (finora) mai osservate. È stato necessario costruire delle enormi strutture come il LIGO, acronimo che sta per Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory, ossia **osservatorio interferometrico laser per le onde gravitazionali**. In effetti, il LIGO è composto da due impianti gemelli: il primo si trova a Livingston (Louisiana), il secondo a Hanford (Washington) (Fig. 2). LIGO punta a ricevere onde gravitazionali provenienti da coppie di stelle di neutroni o da buchi neri. I due laboratori sono posti ad una distanza fra loro di circa 3.000 km. Per dare un raffronto, è come se uno fosse a Lampedusa e l'altro a Helsinki. Esistono molti eventi che possono disturbare le rilevazioni, ma la possibilità che un evento errato possa essere rilevato contemporaneamente in due luoghi molto lontani fra loro è estremamente bassa.

### Come funziona LIGO?

LIGO ha iniziato a prendere dati nel 2002 e, come tutti gli impianti di questo tipo, utilizza la tecnica dell'interferometria. Attualmente coinvolge 750 scienziati da più di 80 istituzioni scientifiche di 16 nazioni nel mondo, ma fino al 2010 non dà nessun segnale positivo di prove dirette di onde gravitazionali. Dopo il 2010, a LIGO si avviano **lavori di potenziamento**, terminati a Settembre 2015. E' decisamente servito, quindi, migliorare di circa **quattro volte** la sua sensibilità e non osiamo immaginare a cosa potrà portare il suo ulteriore potenziamento nel 2021.

I due bracci di LIGO, disposti come una "ELLE", sono lunghi 4 km: facendo continuamente viaggiare dei fasci di luce laser all'interno di tubi a vuoto spinto è **possibile misurare con una precisione elevatissima la distanza** tra i due specchi su cui si riflettono questi raggi per più volte fino a percorrere oltre 100 Km. Ed è proprio in questo modo che è stata effettuata la rilevazione: se la luce impiega un tempo  $X$  per percorrere un braccio, nel caso che un'onda gravitazionale dovesse comprimere questo spazio il tempo diventerebbe inferiore a  $X$ ; se invece facesse distendere lo spazio il tempo sarebbe superiore a  $X$ . Si tratta, in sostanza, di apparecchiature in grado di misurare la discrepanza nel *cammino* percorso da due onde di luce: in questo modo è possibile capire se lo spazio-tempo si è distorto per effetto di un'onda gravitazionale, *rallentando* un raggio di luce rispetto all'altro. Questa differenza è in realtà incredibilmente minuscola, visto che **stiamo parlando di variazioni** della distanza di quattro chilometri di **meno di un milionesimo del diametro di un atomo**. Per riuscire in questa impresa, prima di tutto hanno cercato le onde più *alte*, i cavalloni, le **onde più potenti**. Per esempio, quelle provenienti da cataclismi cosmici come la **fusione di due**

**buchi neri** oppure l'esplosione di stelle come **supernove**. I dati ottenuti dalle misure del 14 Settembre 2015 sono **consistenti** con quelli predetti dall'equazione della relatività generale di Einstein.

### **Cosa ha prodotto l'onda gravitazionale che è stata rilevata?**

Un evento astronomico sconvolgente: **due buchi neri** con un diametro di 150 km e una massa pari rispettivamente a 36 e 29 volte quella del Sole **si sono "fusi"**, *dopo aver ruotato spiralizzando l'uno attorno all'altro*, collidendo ad una velocità pari alla metà di quella della luce (Fig. 3). Man mano che si sono avvicinati la frequenza delle onde gravitazionali è aumentata per cessare di colpo al momento della fusione che ha dato origine ad un solo buco nero di 62 masse solari. In una frazione di secondo la differenza di 3 masse solari ha dato l'energia per formare le onde gravitazionali, **perturbazioni nello spazio-tempo**. Per ribadire, la difficoltà dell'impresa, basti pensare che l'evento osservato ha causato la deformazione della nostra Terra per circa lo spessore di un nucleo atomico. Una deformazione impercettibile che, però, non è sfuggita agli occhi di LIGO. A rilevarle per primo è stato il rilevatore di Livingston, seguito 7 millesimi di secondo più tardi, da quello di Hanford (questo ha permesso agli astrofisici di stabilire che le onde provenivano dall'emisfero celeste australe).

Tutto questo è avvenuto 1,3 miliardi di anni fa, ossia questo segnale ha percorso 1,3 miliardi di anni-luce prima di arrivare da noi. In effetti, si tratta della voce dell'universo che prova a comunicarci cosa accade. **Il 14 settembre 2015, alle 11:40:45 ora italiana**, per la prima volta siamo stati in grado di ascoltare cosa l'universo ci stesse dicendo. I dettagli della scoperta saranno pubblicati su riviste scientifiche. Pia Astone, ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) è una delle sei persone che hanno redatto l'articolo che descrive la scoperta sulla rivista Physical Review Letters, appena pubblicato online e liberamente accessibile. *Se a scriverlo sono stati in sei, per una necessaria divisione dei compiti, gli autori dell'articolo sono quasi un migliaio*, tanti quanti i ricercatori delle due collaborazioni internazionali LIGO e VIRGO, protagoniste della scoperta.

### **Quale è stato il ruolo dell'Italia?**

Si è trattato di **un ruolo fondamentale**, riconosciuto anche nella conferenza stampa nella quale è stato dato l'annuncio. LIGO fa parte di un network internazionale di osservatori che comprende GEO 600 (Germania), TAMA (Giappone) e VIRGO (situato a Cascina, in provincia di Pisa). L'interferometro **VIRGO** ha i bracci disposti come una "ELLE" e lunghi tre Km ciascuno (Fig. 4). Il primo progetto è del 1987 (ideato da **Adalberto Giazotto**) e inizia a funzionare alla fine del 2003. Sono seguiti quattro anni di test e nel 2007 era pienamente operativo. Ma non aveva ancora la sensibilità sufficiente: avrebbe captato, secondo le stime, solo un evento al secolo. E' il risultato della collaborazione tra l'INFN e il francese Centre National de la Recherche Scientifique (Cnrs). Le onde gravitazionali di cui va a caccia VIRGO dovrebbero provenire da **supernove** e **sistemi binari** nell'ammasso stellare nella costellazione della Vergine (da cui il nome): dovrebbero distorcere i 3 Km di spazio tra gli specchi di meno di un milionesimo del diametro di un atomo.

Il 14 settembre 2015 VIRGO era inattivo per potenziarne l'efficienza, mentre gli altri due (tedesco e giapponese) non avevano una sensibilità sufficiente a rilevare il segnale. La partecipazione italiana si è quindi concretizzata nella non meno importante parte dell'analisi dei dati registrati da LIGO.

*LIGO e VIRGO sono due dei quattro più grandi interferometri al mondo e, dal 2007, lavorano instancabilmente in combinazione alla ricerca delle onde gravitazionali.*

Nel 2015 LIGO si è dotato di strumenti più potenti e raffinati per la rilevazione. "Sebbene attualmente VIRGO non sia ancora in funzione (inattivo dal 2010 per il suo potenziamento previsto per la fine del 2016), c'è un accordo tra gli scienziati di VIRGO e di LIGO per effettuare insieme l'analisi dei dati e ci sono protocolli severissimi di validazione dei risultati sottoscritti da entrambi", spiega a INAF la dottoressa **Valeria Ferrari**, professoressa di Relatività Generale al dipartimento di Fisica dell'Università Sapienza di Roma e ricercatrice dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). "Quindi anche se i dati attualmente sono presi solo dall'esperimento americano, e in futuro potrebbe accadere l'opposto, questi vengono analizzati dalla collaborazione e sono patrimonio comune". **Fulvio Ricci**, fisico coordinatore dell'esperimento VIRGO, ha dato l'annuncio l'11 Febbraio 2016 alle 16:30 contemporaneamente a quello dato negli Stat Uniti dalla responsabile di LIGO, Gabriela Gonzales: "si apre un nuovo capitolo dell'astronomia". Un po' di amaro in bocca per **VIRGO**, che quel 14 settembre 2015, giorno in cui l'onda è stata registrata, era **spento** per il suo potenziamento e avrebbe potuto, probabilmente, rilevare anche lui l'evento. Ma **il finanziamento per potenziare VIRGO è arrivato con 2 anni di ritardo.**

### **Quanto costa?**

L'INFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) e il Cnrs (Centro nazionale della ricerca scientifica francese) mettono **4,5 milioni di euro all'anno ciascuno**. Quindi la struttura ha un budget di 9 milioni all'anno. Il 30% è per pagare il personale, un altro 30% serve per le spese vive dell'esperimento e il resto serve alla manutenzione dell'infrastruttura. Le spese di personale comprendono gli stipendi e le borse di studio, perché l'osservatorio è anche un centro di addestramento per molti studenti che da qui vanno a lavorare nelle industrie o anche al LIGO, il progetto americano. Il potenziamento dell'interferometro italiano costa circa 23 milioni di euro. Quello dei due strumenti Usa è costato oltre 200 milioni. Il direttore Federico Ferrini fa presente che i vincoli economici hanno portato a adottare particolari soluzioni tecniche. L'interferometro di Cascina è costato complessivamente, dall'inizio a oggi, meno di 200 milioni di euro. I due strumenti americani invece sono costati nell'ordine di un miliardo. A Cascina ci sono circa cinquanta dipendenti fissi, tra scienziati e ingegneri, e una decina a termine. Qui convergono anche i ricercatori francesi, polacchi, ungheresi e olandesi che portano avanti pezzi del progetto nei rispettivi laboratori e periodicamente vengono alla base a coordinarsi coi colleghi. Sono frequenti poi anche le visite dei colleghi del LIGO. I tre interferometri rappresentano il più grande sistema al mondo di ultravacuo (quello di Cascina è di 7mila metri cubi, quelli americani sono un po' più grandi), il che richiede moltissima manutenzione, perché le pompe vanno cambiate continuamente. C'è un vuoto cento volte più spinto di quello del tunnel dell'acceleratore di particelle del Cern di Ginevra.

### **Cosa rende questa rilevazione un evento storico?**

La rilevazione delle onde gravitazionali permetterà agli scienziati di osservare l'universo in un modo completamente nuovo. Essere in grado di rilevare e analizzare le informazioni "trasportate" dalle onde gravitazionali **aprirà un settore completamente nuovo degli studi sull'universo**, permettendoci di comprendere meglio gli eventi che le hanno prodotte, come buchi neri, quasar, stelle di neutroni e supernove. Qualcuno ha parlato dell'inizio di una disciplina interamente inedita: l'astronomia gravitazionale. "Dal momento che le onde gravitazionali non sono modificate dalla materia che

incontrano, viaggiano senza alcun impedimento, **dandoci una visione cristallina dell'universo**", spiegano dal LIGO, porteranno informazioni sulle origini di fenomeni astronomici, libere dalle distorsioni e dalle alterazioni che subisce la radiazione elettromagnetica (luce e onde radio, ecc.). Abbiamo trovato un nuovo linguaggio per parlare con l'universo, ma dobbiamo tradurlo per comprendere ogni parola.

### **Perché portare avanti una ricerca tanto impegnativa?**

Se vogliamo capire di più sull'origine dell'universo (13 Miliardi di anni fa) l'astronomia tradizionale, tramite luce e onde radio, non può guardare ai primi 400mila anni della storia dell'universo perché a quel tempo era così denso e vischioso che la luce non riusciva a liberarsi dalla materia primordiale. Le onde gravitazionali però venivano prodotte fino dall'inizio. Le domande si moltiplicano. Perché l'universo visibile è fatto di materia e di antimateria? E perché il 96% è invisibile e impossibile da rilevare, composto di materia oscura e dell'ancora più misteriosa energia oscura? La conferma definitiva delle teorie di Einstein può dare una risposta a molte domande, ma può aprire un'altra serie di misteri da risolvere.

La ricerca di base non ha ricadute immediate ma porta cambiamenti nella vita quotidiana, come è accaduto per il web o i telefonini che senza la meccanica quantistica non esisterebbero, perché questa è la base di tutta la miniaturizzazione. Anche le nuove lampade a LED (Light Emitting Diode), che consentono un risparmio energetico di sei volte rispetto alle lampade ad incandescenza, derivano da questi studi e ci avviano verso una società "libera dalle sorgenti fossili". Le tecnologie impiegate in VIRGO hanno coinvolto industrie ad alta tecnologia del territorio come la "Gestione Silo" (ottica di precisione) di Scandicci o la "Ceccanti" (meccanica) di Bientina. Questo tipo di sviluppo delle industrie con il coinvolgimento di giovani crea competenze indispensabili per svolgere attività che consentono produzioni di alto valore tecnologico da impiegare in Italia e da esportare.

Ma la ricerca sulle onde gravitazionali non finisce qui. Nel 2034 sarà infatti lanciato il satellite artificiale **eLisa** (evolved Laser Interferometer Space Antenna) primo osservatorio spaziale al mondo dedicato a queste sfuggenti onde. Il satellite europeo Lisa Pathfinder è decollato a dicembre 2015 dalla base di Kourou nella Guyana francese allo scopo di studiare la fattibilità tecnologica di un osservatorio spaziale di questo tipo. La caccia, semplicemente, si sposta nello spazio.

« "O frati," dissi, "che per cento milia  
perigli siete giunti a l'occidente,  
a questa tanto picciola vigilia

d'i nostri sensi ch'è del rimanente  
non vogliate negar l'esperienza,  
di retro al sol, del mondo senza gente.

Considerate la vostra semenza:  
fatti non foste a viver come bruti,  
ma per seguir virtute e canoscenza". »

(Inferno, *Canto XXVI*, vv. 112-120)

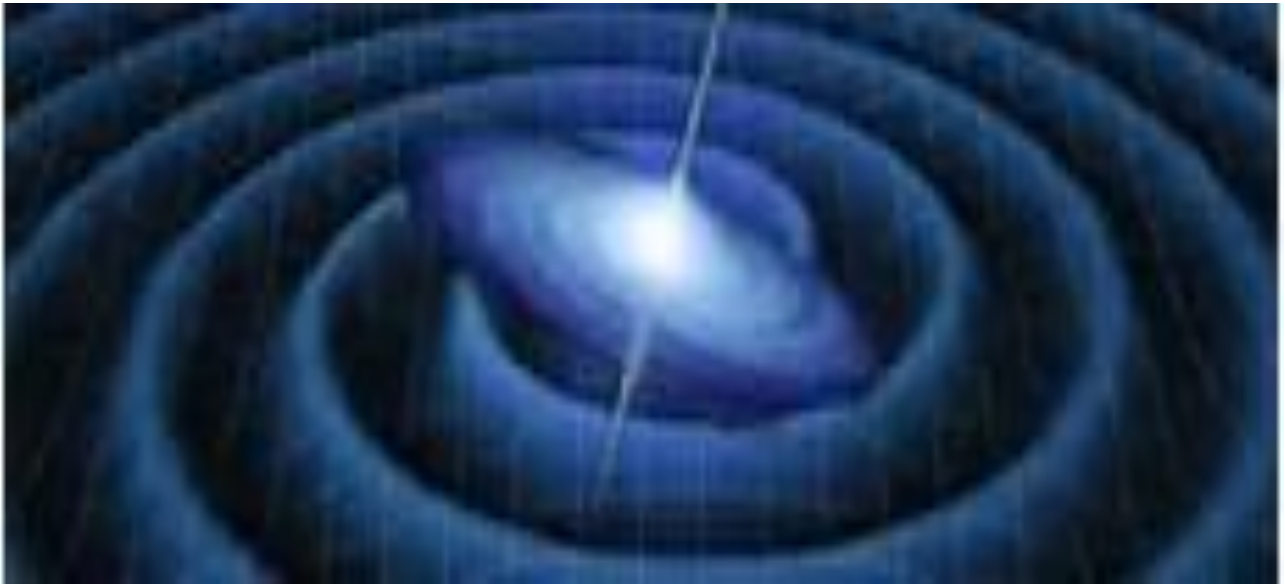


Fig. 1 Rappresentazione di un'onda gravitazionale



Fig. 2. Il laboratorio LIGO di Hanford (Washington)

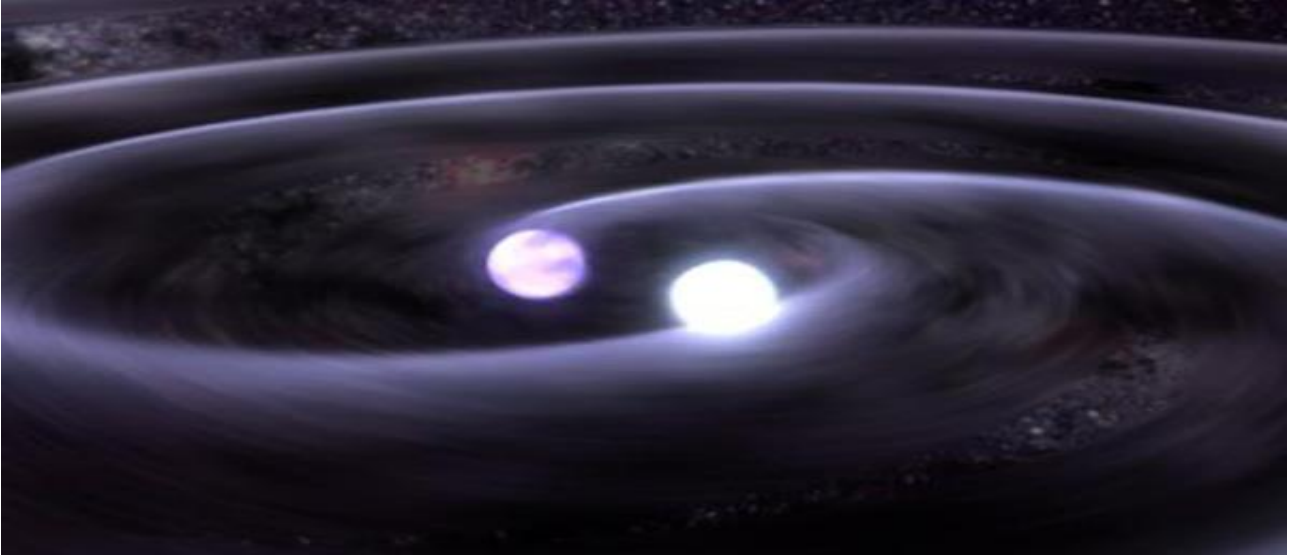


Fig. 3. Due buchi neri che si attraggono spiraleggiando



Fig. 4. L'interferometro VIRGO di Cascina (PI)- INFN