

[Le onde  
gravitazionali]

anno 2 numero 5 / 9.07

**asimmetrie**

rivista trimestrale dell'Istituto  
Nazionale di Fisica Nucleare

# asimmetrie

Ricevuto il premio Nobel, nel 1993, Taylor disse: "Hulse ed io nel 1973 non decidemmo di cercare onde gravitazionali e nemmeno di fare esperimenti sulla natura della forza di gravità; iniziammo a fare una mappa del cielo studiando un nuovo tipo di stelle, coscienti solo di star percorrendo una strada mai esplorata prima, e che nuove terre meravigliose potevano apparire oltre l'orizzonte".

La pulsar binaria è un sistema ideale per studiare la gravità che, tra le manifestazioni fisiche della natura, è quella più semplicemente osservata e la più debole, un miliardo di miliardi di miliardi di miliardi di volte ( $10^{36}$ ) più debole della forza elettromagnetica. Newton nel diciassettesimo secolo la descrisse come la forza che agisce tra due corpi massicci e ne dedusse la dipendenza dall'inverso del quadrato della distanza. Il principio d'equivalenza, verificato da Galileo, è un pilastro della fisica ma lo si sfida ancor oggi

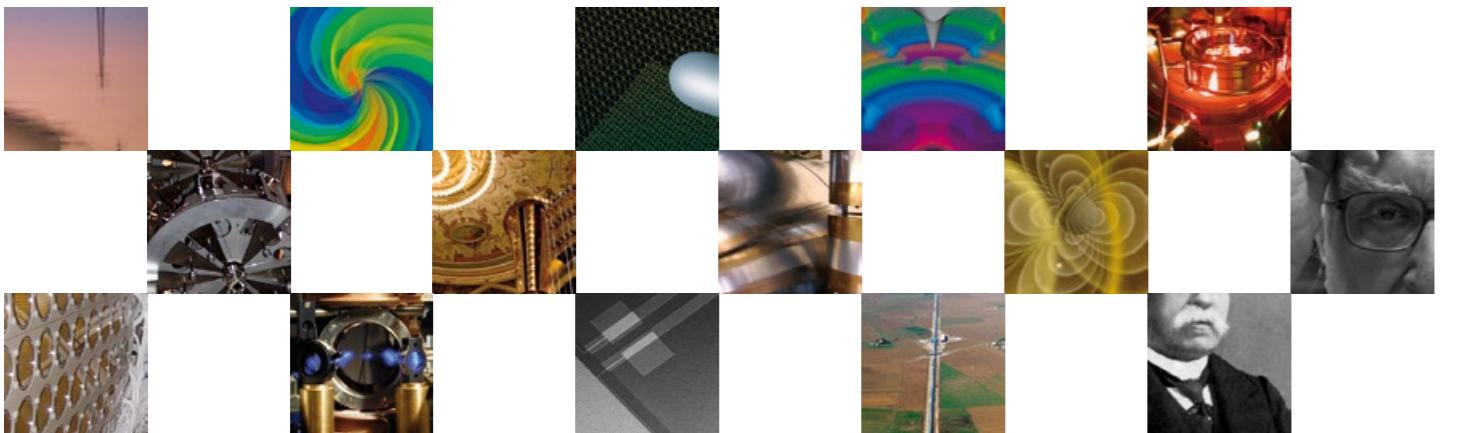
con verifiche accuratissime. Secondo Einstein, la gravità è causata da cambiamenti nella geometria dello spazio e del tempo, questa si curva vicino alle masse.

Nel 1919 Eddington, durante un'eclisse, verificò la deflessione della luce stellare nel passare vicino alla superficie del sole, ed Einstein divenne una celebrità.

La pulsar binaria, scoperta da Hulse e Taylor perde energia, i due astri ruotano sempre più velocemente avvicinandosi.

È una prova indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali previste nel 1916 da Einstein. I fisici lavorano intensamente allo sviluppo di tecnologie avanzate necessarie a osservare direttamente onde gravitazionali emesse in interazioni violente di materia prodotte da corpi celesti. L'astronomia delle onde gravitazionali è il nuovo appassionante traguardo per studiare la nostra galassia e l'Universo: di questo vi raccontiamo in Asimmetrie.

Andrea Vacchi



as

# 5 / 9.07

## [le onde gravitazionali]

<b>asimmetrie</b> Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare	<b>progetto grafico e impaginazione</b> Marco Stulle / S lab	<b>crediti iconografici</b> Copertina ©Marco Stulle // fig. pp. 4-5 ©Marco Stulle; figg. a, b p. 6 ©Markus Poessel (Aei)/Luciano Rezzolla (Aei); fig. c p. 7 ©Markus Poessel (Aei)/ Luciano Rezzolla (Aei); fig. d p. 8 ©Luciano Rezzolla (Aei)/Ralf Kaehler (Zib/Aei) // fig. p. 10 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei) // figg. a, b, c, d p. 11 ©Luca Baiotti (Aei)/Ralf Kaehler (Zib/Aei); fig. e p. 12 ©Luciano Rezzolla (Aei)/Christian Reisswig (Aei); fig. p. 13 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei) // foto a pg. 14 ©Satellite Resurs DK1, Research Center for the Earth Operative Monitoring; foto b, c p. 15 ©M. Perciballi, Collaborazione Virgo; fig. pp. 16-17 ©lnfn/Centimetri; foto p. 18 ©Collaborazione Ego/Virgo // foto p. 19 ©Collaborazione Ego/Virgo // foto p. 21 ©lnfn // foto p. 22 ©Marco Stulle; foto a p. 24 ©Matteo Danesin; foto b p. 25 ©lnfn; foto c p. 25 ©Cern // figg. a, b p. 26 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei su disegno di Michele Bonaldi) // foto p. 28 ©Michael Muck // fig. a p. 29 ©Nasa; fig. b p. 30 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei); foto c p. 31 ©lnfn/Asi; fig. d p. 31 ©Esa // foto p. 32 ©lnfn // fig. a p. 34 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei); fig. b p. 35 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei); fig. 1 p. 36 ©Claudio Federici, Lnf/lnfn // fig. 1 p. 37 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei) // fig. a p. 40 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei su disegno di Asi/Nasa); fig. b p. 40 ©Asimmetrie/lnfn (realizzata da Internosei su disegno Asi) // figg. a, b p. 42 ©Asimmetrie/lnfn (realizzata da Internosei); fig. c p. 43 ©Asimmetrie/lnfn (realizzato da Internosei) // fig. p. 44 ©Salvo Fundarotto (gentilmente fornita da Sellerio) // fig. a p. 46 ©Accademia delle Scienze di Torino; fig. b p. 47 ©Circolo Matematico di Palermo // foto Lhc p. 48 ©Cern; foto Meg pg 48 ©Meg Collaboration; foto Borexino p. 48 ©Borexino Collaboration // foto p. 49 ©Marco Stulle.	<b>Onde di spaziotempo</b> di Luciano Rezzolla	<b>4</b>	<b>La sfida di Lisa nello Spazio</b> di Stefano Vitale	<b>29</b>
<b>Trimestrale, anno 2, numero 5 settembre 2007</b>	<b>coordinamento redazione grafica</b> Sara Stulle / S lab	<b>Chi fa l'onda</b> di Luca Baiotti e Bruno Giacomazzo	<b>11</b>	<b>Una Magia da fisici</b> di Guglielmo M. Tino	<b>32</b>	
<b>direttore responsabile</b> Roberto Petronzio, presidente lnfn	<b>sviluppo webzine</b> S lab con Massimo Angelini	<b>A braccia aperte</b> di Carlo Bradaschia	<b>14</b>	<b>Einstein sotto esame</b> di Danilo Babusci	<b>34</b>	
<b>direttore editoriale</b> Andrea Vacchi	<b>stampo</b> Graphart srl, Trieste	<b>[as] tecnologia e ricerca</b> Pendoli hi tech di Vincenzo Napolano	<b>19</b>	<b>Galileo Galilei va nello Spazio</b> di Anna Nobili	<b>38</b>	
<b>comitato scientifico</b> Danilo Babusci Piera Sapienza Crisostomo Sciacca Amedeo Staiano Andrea Vacchi	su carta di pura cellulosa ecologica ECF Fedrigoni Symbol™ Tatami 250 - 135 g/m <sup>2</sup> Registrazione del Tribunale di Roma numero 435/2005 dell'8 novembre 2005. Rivista pubblicata da lnfn. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'lnfn, proprietario della pubblicazione. Finita di stampare nel mese di settembre 2007. Tiratura 15.000 copie.	<b>[as] incontri</b> Conversazioni di scienza... su Radio Rock di Francesca Scianitti	<b>21</b>	<b>Trascinati dalla gravità</b> di Ignazio Ciufolini, Simone Dell'Agnello, Antonio Paolozzi	<b>39</b>	
<b>redazione</b> Vincenzo Napolano Catia Peduto Francesca Scianitti Antonella Varaschin	<b>hanno collaborato</b> Danilo Babusci, Luca Baiotti, Umberto Bottazzini, Carlo Bradaschia, Andrea Camilleri, Leonardo Castellani, Massimo Cerdonio Chiaromonte, Ignazio Ciufolini, Eugenio Coccia, Simone Dell'Agnello, Bruno Giacomazzo, Anna Nobili, Antonio Paolozzi, Luciano Rezzolla, Guglielmo M. Tino, Stefano Vitale.	<b>Suonando e risuonando</b> di Eugenio Coccia	<b>22</b>	<b>Oltre la quarta dimensione</b> di Leonardo Castellani	<b>41</b>	
<b>come abbonarsi</b> L'abbonamento è gratuito. Tre modi per abbonarsi: Compilare l'apposito form sul sito www.asimmetrie.it Inviare una mail di richiesta a info@asimmetrie.it Contattare la redazione	<b>webzine</b> Da questo numero sarà a disposizione anche la versione on line, appositamente studiata per dare massima agilità e accessibilità all'informazione.	<b>Canto a due voci</b> di Massimo Cerdonio Chiaromonte	<b>26</b>	<b>[as] con altri occhi</b> L'infinito a portata di mano di Andrea Camilleri	<b>44</b>	
<b>redazione</b> Infn Presidenza piazza dei Caprettari 70 I-00186 Roma T +39 06 6868162 F +39 06 68307944 comunicazione@presid.infn.it www.infn.it	Per l'immagine in copertina e di p. 22 si ringrazia Marina Pecchiar, arpista dell'orchestra della Fondazione Teatro Lirico Giuseppe Verdi di Trieste.	<b>[as] benvenuti a bordo</b> Misurare l'incredibilmente piccolo di Antonella Varaschin	<b>28</b>	<b>[as] radici</b> Il linguaggio della relatività di Umberto Bottazzini	<b>46</b>	
		<b>[as] news</b>			<b>48</b>	

# Onde di spaziotempo

di Luciano Rezzolla

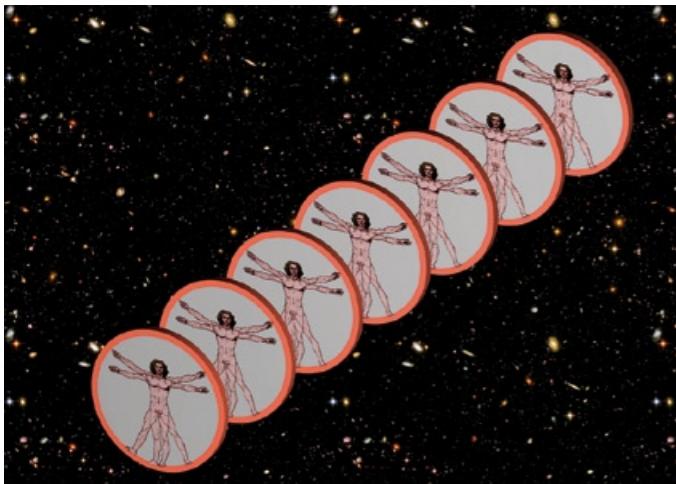
Sono alla fermata dell'autobus 605 qui a Potsdam e controllo nervosamente il mio orologio. Sono le 8:32 e l'autobus delle 8:31 è in ritardo; fortunatamente un pannello luminoso mi avvisa che l'autobus è a solo un minuto da qui e che riuscirò ad arrivare in tempo all'Istituto Albert Einstein, dove lavoro.

Questo episodio potrebbe sembrare un elogio alla puntualità tedesca ma è in realtà un successo della fisica teorica, oltre che della tecnologia, e in particolare un elogio alla teoria della relatività formulata quasi cento anni fa proprio da Albert Einstein. Mentre è probabilmente noto a tutti che l'accurata conoscenza della posizione dell'autobus è garantita dall'ormai diffusissimo sistema di posizionamento globale, il Gps (*Global Positioning System*), pochi però sanno che senza le correzioni introdotte proprio dalla teoria della relatività il Gps non sarebbe in grado di dirmi se l'autobus è dietro l'angolo, oppure a Berlino, a 35 km da qui.

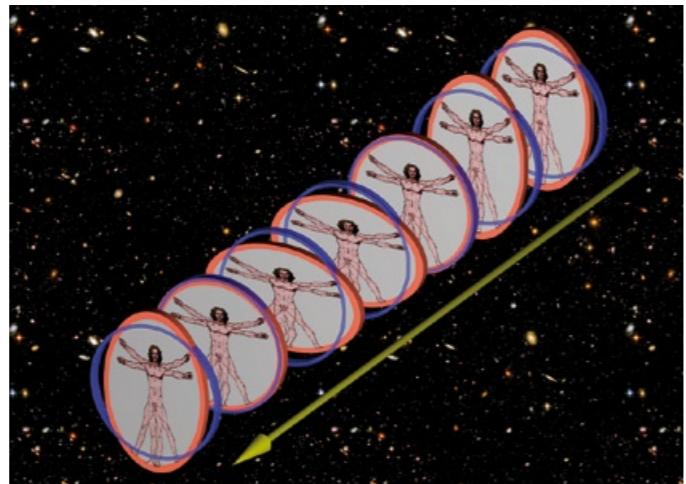
La teoria della relatività è in realtà ben più che un successo per il sistema di trasporto urbano moderno e rappresenta a buon diritto una delle più importanti teorie mai formulate. Essa è una colonna portante della fisica moderna, senza la quale gran parte delle osservazioni provenienti dalla fisica delle particelle, dall'astrofisica e dalla cosmologia risulterebbero inspiegabili. Non pretendo certo di spiegare ora una delle più complesse teorie note in fisica matematica, ma è sicuramente utile ricordare che le equazioni di Einstein ne sintetizzano in un'elegante compattezza l'essenza stessa, predicendo l'equivalenza *massa-energia* e la curvatura dello *spaziotempo*. In altre parole, le equazioni di Einstein affermano che massa ed energia non possono essere considerate entità distinte. In quantità equivalenti, infatti, esse producono esattamente lo stesso effetto: una curvatura nella struttura dello spaziotempo che si manifesta attraverso la forza di gravità. È il campo gravitazionale.

È sufficiente pensare a un lenzuolo teso ad una certa altezza da terra. In assenza di pesi esso appare perfettamente piatto; tuttavia, se vi appoggiamo un oggetto, ad esempio una palla da biliardo, il lenzuolo si incurverà nelle sue vicinanze e qualsiasi altro corpo meno massiccio tenderà a cadere nella buca così prodotta, o a ruotarvi intorno.

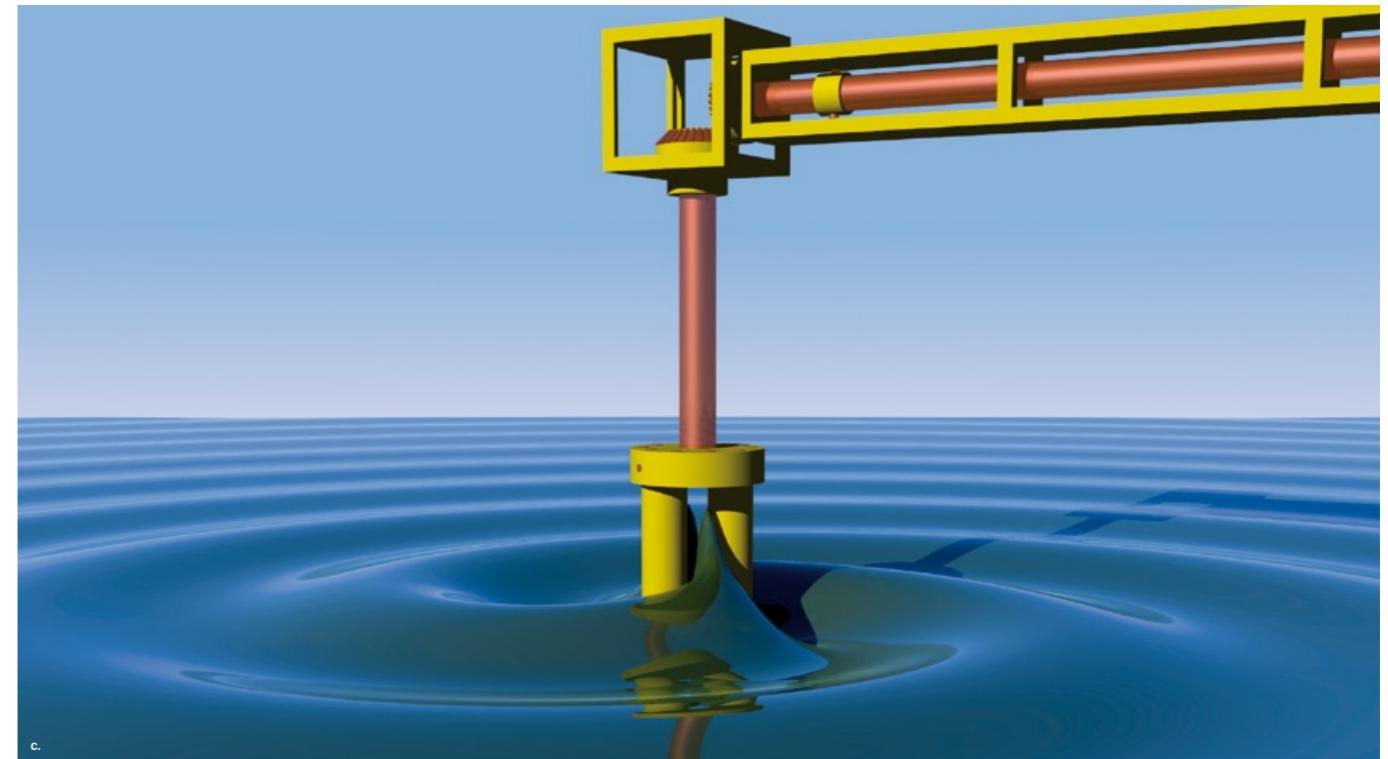
La relatività generale ha superato nel corso degli ultimi novanta anni una grande quantità di verifiche sperimentali ed è ancora oggi la teoria della gravitazione che meglio di qualsiasi altra è in accordo con le osservazioni astronomiche e con gli esperimenti condotti in laboratorio. Sembrerebbe un successo su tutta la linea, e in gran parte lo è. Tuttavia, c'è un aspetto della teoria che finora si è sottratto alla verifica sperimentale, e pertanto rimane un mistero, quello delle *onde gravitazionali*. Se da una parte la teoria ne predice in maniera abbastanza diretta e semplice l'esistenza, dall'altra però nessun esperimento, da quaranta anni a questa parte, è mai stato in grado di rivelarle direttamente. Se la teoria della relatività generale è corretta, come la gran parte delle comunità dei fisici sostiene, le onde gravitazionali non possono non esistere e devono poter essere rivelate in modo diretto, e non solo attraverso effetti secondari che potrebbero essere attribuiti anche a cause diverse.



a.



b.



c.

Ma cosa sono esattamente le onde gravitazionali? Concretamente, esse rappresentano la propagazione alla velocità della luce di deboli *increspature* nella curvatura nello spaziotempo (le piccole pieghe, nell'esempio del lenzuolo). Da un punto di vista più matematico, però, le onde gravitazionali nascono come soluzioni delle equazioni di Einstein in campi gravitazionali deboli, cioè in lenzuoli "quasi piatti". In questo senso la teoria le definisce come "soluzioni delle equazioni di Einstein", cioè relative a piccole curvature dello spaziotempo, esattamente come le onde elettromagnetiche sono soluzioni particolari di altre equazioni, le equazioni di Maxwell, e le onde su una superficie liquida sono soluzioni delle equazioni dell'idrodinamica. In tutti questi casi, le onde sono solo delle piccole perturbazioni che si allontanano dalla sorgente che li ha prodotti, e sono di tipo *trasverso*, ossia producono cambiamenti nella direzione perpendicolare a quella in cui si propagano. Consideriamo il caso, sicuramente più vicino alla nostra esperienza comune, di uno stagno sulla cui superficie stia inizialmente galleggiando un tappo di sughero. La propagazione delle onde d'acqua perturberebbe il tappo e, nel caso di onde di piccola ampiezza, questo comincerebbe a oscillare con moto periodico lungo la verticale,

perpendicolarmente alla direzione di propagazione dell'onda. In maniera del tutto analoga, le onde gravitazionali che si propagano nello spaziotempo lo perturbano modificandone localmente il valore della curvatura (quindi del campo gravitazionale). Durante la loro propagazione, le onde gravitazionali producono così delle *forze di marea* che fanno variare la posizione degli oggetti, in particolare di quelli che non sono soggetti a forze esterne, esattamente come le forze mareali esercitate dalla Luna sulla Terra inducono lo spostamento delle superfici liquide sul pianeta. In generale, le onde gravitazionali sono caratterizzate da due gradi di polarizzazione (il piano sul quale oscilla il tappo di sughero, nell'esempio dello stagno) lungo due direzioni poste a 45 gradi l'una dall'altra. Ognuno dei due induce una forza mareale di tipo "quadrupolare", ossia di compressione in una direzione e di stiracchiamento in quella a essa perpendicolare (fig. a, fig. b). Per nostra fortuna le onde gravitazionali che giungono sulla Terra non producono deformazioni apprezzabili; esse, però, sono anche talmente deboli che tutti i dispositivi finora costruiti non sono ancora stati in grado di rivelarle! Ma come sono generate le onde gravitazionali? In realtà esse sono prodotte in continuazione

a.  
L'uomo Vitruviano di Leonardo in assenza di campi mareali prodotti da onde gravitazionali.

b.  
Deformazione quadrupolare alla quale sarebbe soggetto l'uomo Vitruviano di Leonardo, se attraversato da un'onda gravitazionale. In realtà, le deformazioni sono molto piccole, al limite delle possibilità dei più sofisticati rivelatori esistenti al mondo.

ogni volta che una massa-energia è messa in movimento, quindi anche adesso, nell'atto di sfogliare questo fascicolo. Tuttavia, l'ampiezza di queste onde sulla Terra è in generale infinitesima e onde tali da essere rivelate possono essere generate solo da enormi masse in movimento, a velocità vicine a quella della luce. Chiaramente sulla Terra non c'è nulla che soddisfi queste condizioni ed è necessario rivolgersi a sorgenti di tipo astrofisico per poter sperare di avere un segnale sufficientemente intenso da essere rivelato. Gli oggetti astrofisici in grado di produrre onde gravitazionali rivelabili devono essere estremamente massicci e, per potersi muovere ad alta velocità, devono essere anche molto compatti. Candidati ideali di questo tipo sono i buchi neri e le stelle di neutroni, in prossimità dei quali la curvatura dello spazio tempo raggiunge i più alti valori possibili. La radiazione gravitazionale, inoltre, è particolarmente intensa quando è emessa da un sistema binario di stelle di neutroni, o di buchi neri, che muovendosi a spirale in direzione del comune centro di massa rilasciano enormi quantità di energia e momento angolare (una quantità che dipende anche dalla velocità di rotazione).

I sistemi binari di oggetti compatti sono le sorgenti ideali e maggiormente ricercate dai moderni rivelatori e il tipo di radiazione emesso

può essere illustrato con una semplice analogia meccanica. Si pensi, infatti, a una coppia di barre in rotazione in uno stagno (fig. c): le barre rotanti rappresentano il sistema di oggetti compatti e le onde dello stagno sono associate alle increspature della curvatura dello spaziotempo, cioè alle onde gravitazionali. Spiraleggianto verso il bordo dello stagno, le onde portano con sé energia e momento angolare e diminuiscono in ampiezza, proprio come avviene per i sistemi binari. Sorgenti di questo tipo emettono sotto forma di onde gravitazionali quantità di energia pari a qualche percento della loro massa. In pratica, in un intervallo di tempo di appena qualche millisecondo, sprigionano l'energia che centinaia di stelle simili al nostro Sole emettono in 10 miliardi d'anni, cioè in tutta la loro esistenza. Esse sono mediamente a grosse distanze dalla Terra e di conseguenza l'ampiezza che giunge a noi è estremamente piccola. Per avere un'idea, basti pensare che un sistema binario di buchi neri di massa uguale al nostro Sole, a una distanza di seicento milioni di anni luce, produce onde gravitazionali con un'ampiezza di una parte su mille miliardi di miliardi: prendendo come riferimento una lunghezza pari alla distanza tra la Terra e il Sole, la deformazione causata dall'onda gravitazionale sarebbe delle

c.  
Analogia meccanica delle onde prodotte da un sistema binario di oggetti compatti. Le barre rotanti rappresentano il sistema di oggetti compatti e le onde dello stagno raffigurano le increspature della curvatura dello spaziotempo, ossia le onde gravitazionali.

dimensioni di un atomo. Misure di questo tipo sono chiaramente al limite della nostra tecnologia e la rivelazione di onde gravitazionali rappresenta quindi una vera a propria sfida, non solo per la fisica sperimentale ma, in modo equivalente, anche per quella teorica. Le onde attese, infatti, produrrebbero un segnale confrontabile con il rumore di fondo dei rivelatori, rappresentato dall'inevitabile contributo dell'ambiente, e quindi teoricamente impossibile da rivelare. Tuttavia, se il segnale fosse noto a priori, questo potrebbe essere "estratto" dal rumore di fondo tramite una tecnica chiamata *matched filters* che è abbastanza semplice da comprendere. Si immagini di essere all'ascolto di una trasmissione radiofonica estremamente disturbata ma in cui è comunque possibile udire e distinguere occasionalmente delle parole. Ebbene, se a noi fossero note alcune informazioni di base (come ad esempio la lingua usata, l'argomento discusso, il numero delle voci, e così via) il nostro cervello sarebbe in grado di "estrarre" il segnale dal rumore e ricostruire così, quasi interamente, quanto trasmesso.

Da un punto di vista teorico, quindi, la sfida è quella di predire la forma dell'onda gravitazionale prodotta dalle sorgenti più intense e comuni, al fine di fornire questa informazione ai fisici

sperimentalisti che si occupano di mettere a punto i sistemi per la rivelazione. Sembrerebbe un compito semplice, ma non lo è affatto!

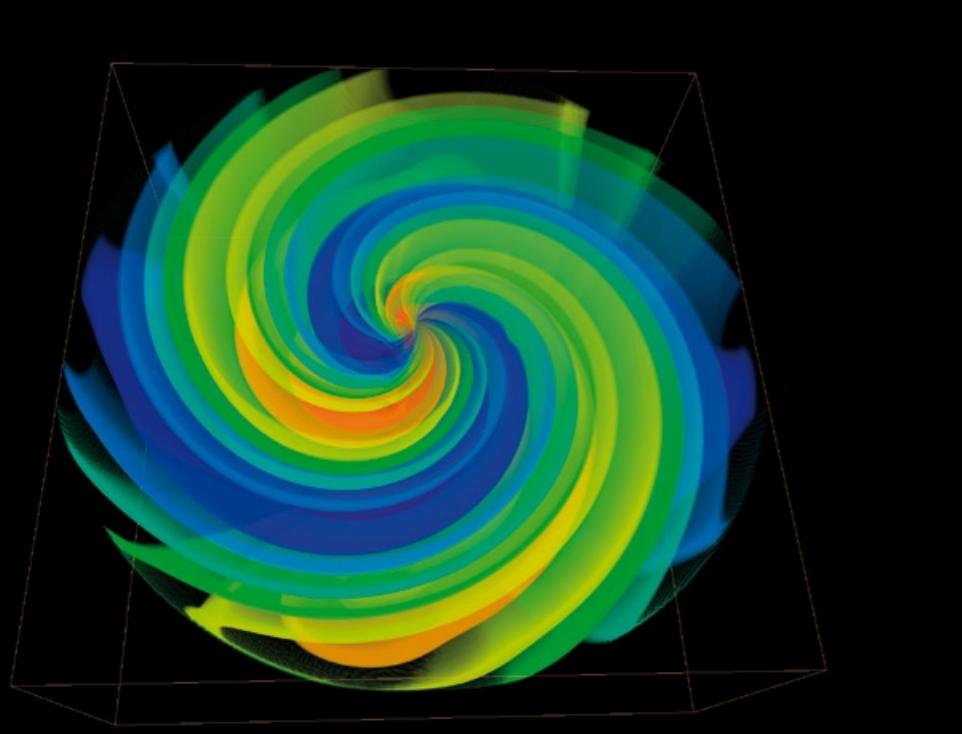
La soluzione delle equazioni di Einstein in assenza di approssimazioni e simmetrie, infatti, è estremamente ardua, poiché le stesse equazioni sono molto complesse. A questo va poi aggiunta la necessità di descrivere il moto della materia attraverso le equazioni dell'idrodinamica e della magnetoidrodinamica, raggiungendo un numero di equazioni accoppiate così elevato, che la loro soluzione è possibile solo sfruttando le risorse dei più potenti supercalcolatori. Nonostante queste difficoltà, sono stati fatti recentemente notevoli progressi e la predizione delle onde gravitazionali prodotte da sorgenti compatte non è mai stata accurata e stabile com'è oggi, rendendo così più efficace la sinergia tra fisici teorici e fisici sperimentali nella ricerca in questo campo.

È certamente utile, a questo punto, spiegare perché sia così importante rivelare le onde gravitazionali. È chiaro che un tale sforzo scientifico e tecnologico non è intrapreso

soltanto per dimostrare che Einstein aveva ragione. Accanto a un'ulteriore verifica della teoria della relatività generale, infatti, la rivelazione di onde gravitazionali consentirebbe

d.

Simulazione al computer delle onde gravitazionali prodotte da un sistema binario di due buchi neri.



## Onde gravitazionali e onde elettromagnetiche a confronto

Esistono differenze radicali tra le onde gravitazionali e quelle elettromagnetiche come la luce visibile, alla cui esperienza siamo abituati sin dalla nascita. Consideriamone alcune:

### onde elettromagnetiche

Sono oscillazioni dei campi elettrici e magnetici che si propagano attraverso lo spaziotempo.

Sono quasi sempre il risultato della sovrapposizione incoerente dei contributi provenienti da milioni di elettroni, atomi o molecole.

Ci mostrano i dettagli di queste concentrazioni.

Le lunghezze d'onda sono generalmente piccole rispetto alle dimensioni delle sorgenti, quindi è possibile ottenere "immagini" delle sorgenti stesse.

Soffrono di fenomeni di assorbimento, deviazione e dispersione ad opera del materiale che incontrano nel loro percorso.

Non possono contribuire a verificare l'esistenza dei buchi neri, in prossimità dei quali rimarrebbero intrappolate a causa del *redshift gravitazionale*.

### onde gravitazionali

Sono oscillazioni dello spaziotempo stesso.

Sono sempre prodotte dal movimento coerente di un'enorme quantità di massa-energia: oggetti astronomici o locali addensamenti di pura energia.

Portano informazione sui movimenti globali di grandi concentrazioni di massa-energia.

Le loro lunghezze d'onda sono confrontabili con le dimensioni delle sorgenti. Di queste ultime non è quindi possibile riprodurre "immagini".

Si propagano pressoché indisturbate, alla velocità della luce, attraverso ogni tipo di materiale.

La rivelazione di un certo tipo di onde gravitazionali fornirebbe l'unica prova possibile e inconfondibile dell'esistenza dei buchi neri.

di aprire una nuova finestra sull'Universo. Dalle onde radio ai raggi gamma, infatti, sono le onde elettromagnetiche a trasportare la maggior parte dell'informazione che oggi riceviamo dal nostro Universo. Esse, però, portano essenzialmente notizie sui dettagli delle sorgenti che le hanno emesse, e molte meno sul comportamento complessivo.

Le onde elettromagnetiche, inoltre, subiscono gli effetti del passaggio nel materiale interposto tra noi e la sorgente, che in parte le assorbe. Le onde gravitazionali, al contrario, si propagano pressoché indisturbate e ci forniscono informazioni sui movimenti globali delle sorgenti, a frequenze che sono assai più basse di quelle delle onde elettromagnetiche. In virtù di questa sorta di "ortogonalità" tra i due tipi di messaggi, l'informazione che sarà registrata attraverso le onde gravitazionali sarà unica e complementare a quella elettromagnetica.

Per queste ragioni, la rivelazione delle onde gravitazionali rappresenta una delle più grandi sfide della fisica moderna, ma offre anche la prospettiva di fornire informazioni che ci sono state finora precluse. Come già successo in passato con l'avvento dell'astronomia a raggi X e di quella gamma, l'astronomia delle onde gravitazionali sarà foriera di grandi scoperte, svelando un Universo che finora è rimasto avvolto nell'oscurità.

### Biografia

**Luciano Rezzolla** è professore di astrofisica relativistica all'Albert Einstein Institute (Aei) di Golm, in Germania, dove dirige il gruppo dedicato alla modellizzazione, con simulazioni numeriche e studi perturbativi, di sorgenti di onde gravitazionali.

### Link sul web

Sul lavoro condotto all'Aei  
<http://numrel.aei.mpg.de/>

Un'introduzione alle onde gravitazionali (in inglese)  
[www.einstein-online.info/en/](http://www.einstein-online.info/en/)

[as]

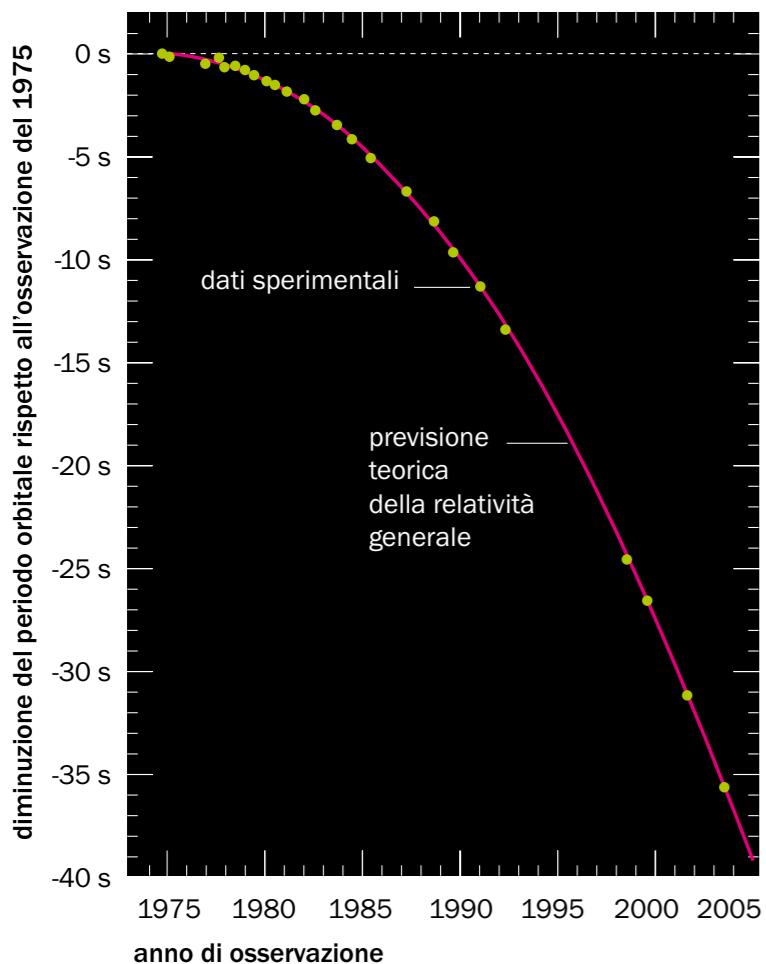
## Un faro gravitazionale

Sebbene non ancora rivelate direttamente, esistono pochi dubbi sull'esistenza delle onde gravitazionali. Questa certezza si deve all'osservazione della pulsar PSR1913+16, appartenente a un sistema stellare binario scoperto nel 1974 dagli astronomi americani Hulse e Taylor con il radiotelescopio di Arecibo, a Portorico. Una pulsar è una sorta di radiofarostellare: una stella di neutroni capace di compiere ogni secondo fino a 1.000 giri su stessa, emettendo onde radio in direzioni ben definite. A periodi regolari, la PSR1913+16 emette segnali anche nella nostra direzione. Tra tutte le pulsar scoperte da Hulse e Taylor, la frequenza dell'emissione di onde radio da parte della PSR1913+16 mostrava alcune anomalie rispetto alle altre pulsar allora note. Il singolare comportamento

poteva essere spiegato solo ammettendo che la stella orbitasse intorno a una compagna, anch'essa probabilmente una stella di neutroni, perdendo energia e rallentando. Fu questa la scoperta del primo sistema binario di stelle di neutroni, che valse a Hulse e Taylor il premio Nobel per la fisica nel 1993.

Per un sistema binario come quello della PSR1913+16, la teoria della relatività generale prevede una considerevole emissione di onde gravitazionali, ancora troppo bassa, però, per essere rivelata direttamente sulla Terra. I suoi effetti, tuttavia, diventano evidenti osservando l'orbita della pulsar. L'emissione di onde gravitazionali, infatti, riduce l'energia del moto orbitale: le due stelle tendono ad avvicinarsi l'una all'altra di alcuni metri l'anno e la periodicità degli impulsi radio

diminuisce di una quantità che possiamo misurare. Nel grafico della figura, la diminuzione è stata registrata lungo un intervallo di circa trent'anni. Per ogni anno di osservazione è riportata la diminuzione del tempo necessario per una rotazione orbitale della pulsar binaria: questo è calato nel corso degli anni di 40 secondi (i punti nel grafico). La curva continua, invece, rappresenta i risultati della previsione teorica, calcolati nell'ipotesi che la variazione nella rotazione sia dovuta all'emissione di onde gravitazionali. Come si può vedere, le misure sperimentali si adagiano perfettamente sulla curva teorica e, a buon diritto, l'osservazione della PSR1913+16 rappresenta la prima prova sperimentale indiretta dell'esistenza delle onde gravitazionali. [Danilo Babusci]



## Due curiosità

Il sistema binario PSR1913+16 si trova a 1.500 anni luce da noi (circa 15 milioni di miliardi di chilometri) nella costellazione dell'Aquila.

PSR significa pulsar. Le cifre seguenti sono le coordinate celesti: 19 ore e 13 minuti di ascensione retta e 16 gradi di declinazione.

La conoscenza della sigla consente agli astronomi di riconoscere il tipo di oggetto celeste e di sapere dove puntare i telescopi per osservarlo.

### Link sul web

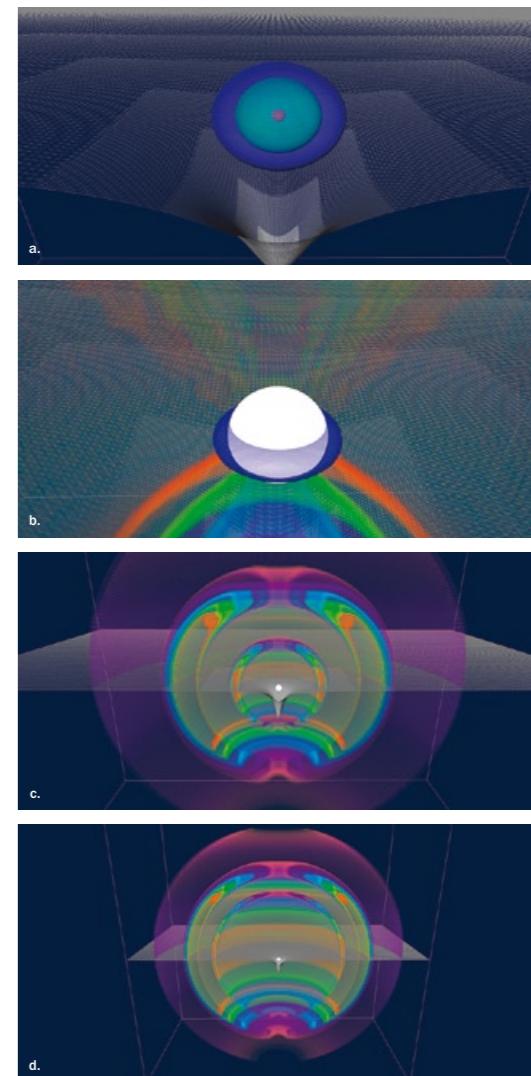
*Il suono delle pulsar*  
[www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html](http://www.jb.man.ac.uk/~pulsar/Education/Sounds/sounds.html)

# Chi fa l'onda

## Tra le stelle, tenori, soprani e bassi.

di Luca Baiotti e Bruno Giacomazzo

Le sorgenti di onde gravitazionali possono essere di natura molto diversa. I segnali che emettono sono tipici e riconoscibili e rappresentano dunque una sorta di impronta della loro origine. Essi sono caratterizzati da una frequenza principale e da un comportamento peculiare che ci permette di classificarli in segnali impulsivi, periodici o stocastici. Un gruppo a sé è costituito dai segnali da *spiraleggiamento*, che combinano caratteristiche diverse e sono prodotti dalla coalescenza di sistemi binari di oggetti molto compatti. Tra i segnali impulsivi più intensi ci sono quelli prodotti dai collassi gravitazionali. Quando una stella esaurisce la sua scorta di combustibile nucleare, essa collassa fino a formare una stella di neutroni o un buco nero. Una stella di neutroni è una stella molto compatta con un raggio di una decina di chilometri e una massa intorno a 1,5 masse solari. La sua densità media è così elevata che un solo metro cubo della materia di cui è fatta equivale, in massa, all'intera catena dell'Himalaya. I buchi neri, invece, sono caratterizzati da un campo gravitazionale ancora più intenso, tanto che neanche la luce riesce ad abbandonare la loro superficie. Quando a collassare è una stella di grandi dimensioni (con una massa pari almeno a 8 masse solari), il collasso scatena e alimenta una successiva esplosione del mantello della stella, la supernova, e nell'esplosione si pensa venga emessa un'onda gravitazionale di durata limitata e di grande ampiezza. Con gli attuali rivelatori possiamo purtroppo aspettarci

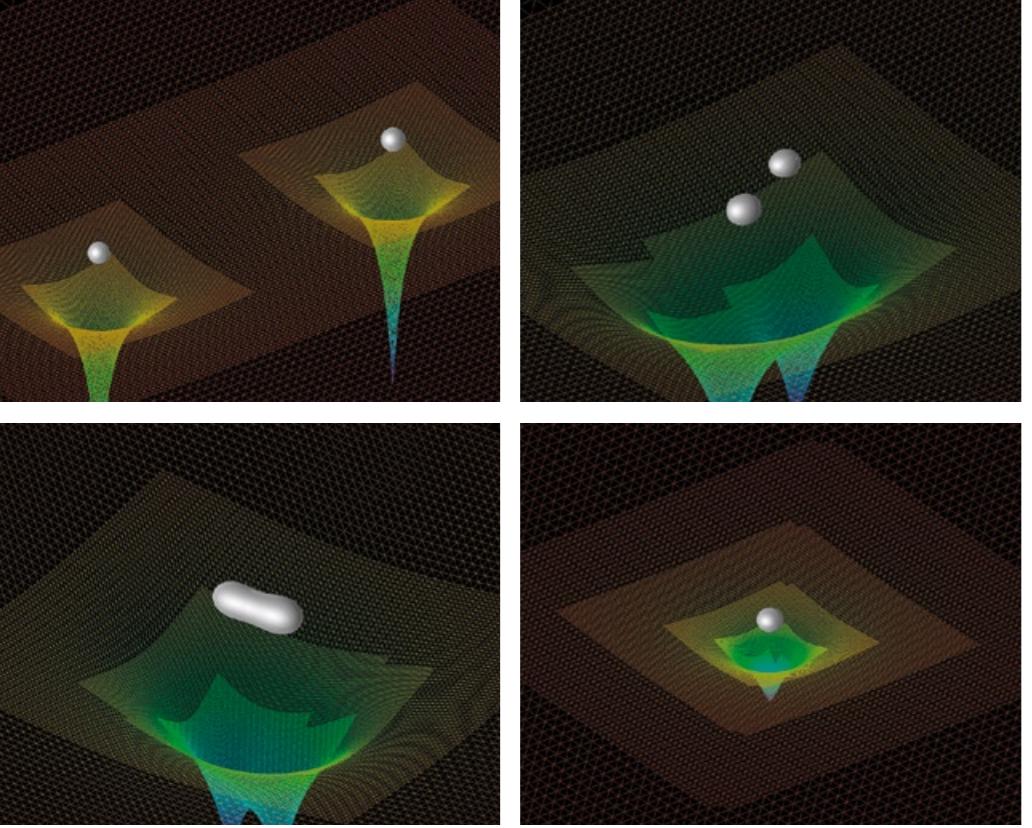


a. / b. / c. / d.  
Simulazione al computer del collasso di una stella di neutroni destinata a evolvere in buco nero.

a. La stella al tempo iniziale: sono visibili le superfici di uguale densità della stella (in blu e verde) e la curvatura dello spaziotempo.

b. La stella collassa producendo un buco nero e si crea l'orizzonte degli eventi (in bianco): la superficie dalla quale niente può più uscire, a causa della grande attrazione gravitazionale.

c. / d. Nel collasso è emesso impulso di onde gravitazionali.



e.  
Simulazione al computer di un sistema binario di due buchi neri (il cui orizzonte è rappresentato in grigio). Sono rappresentate le diverse fasi dell'evoluzione, fino al momento della coalescenza del sistema che produce un singolo buco nero. La griglia rappresenta la curvatura prodotta nello spaziotempo.

e.

di osservare solo eventi prodotti da sorgenti interne alla nostra galassia, la cui frequenza prevista è di circa uno ogni cinquant'anni. Per osservare un numero maggiore di eventi è necessario misurare anche esplosioni avvenute molto più lontano e per questo in tutto il mondo sono in corso grossi sforzi volti ad aumentare la sensibilità dei rivelatori.

Onde gravitazionali di tipo periodico sono emesse da stelle di neutroni in rotazione (ad esempio le pulsar). In questo caso l'onda è tanto più intensa quanto più queste stelle sono asimmetriche, ad esempio a causa del campo magnetico interno, e quanto più alta è la loro velocità di rotazione.

In questo caso, le onde gravitazionali sono caratterizzate da un insieme limitato di frequenze e sono dunque più facili da identificare rispetto alle onde impulsive. Ciò che rende difficile la loro rivelazione, tuttavia, è la loro minore ampiezza.

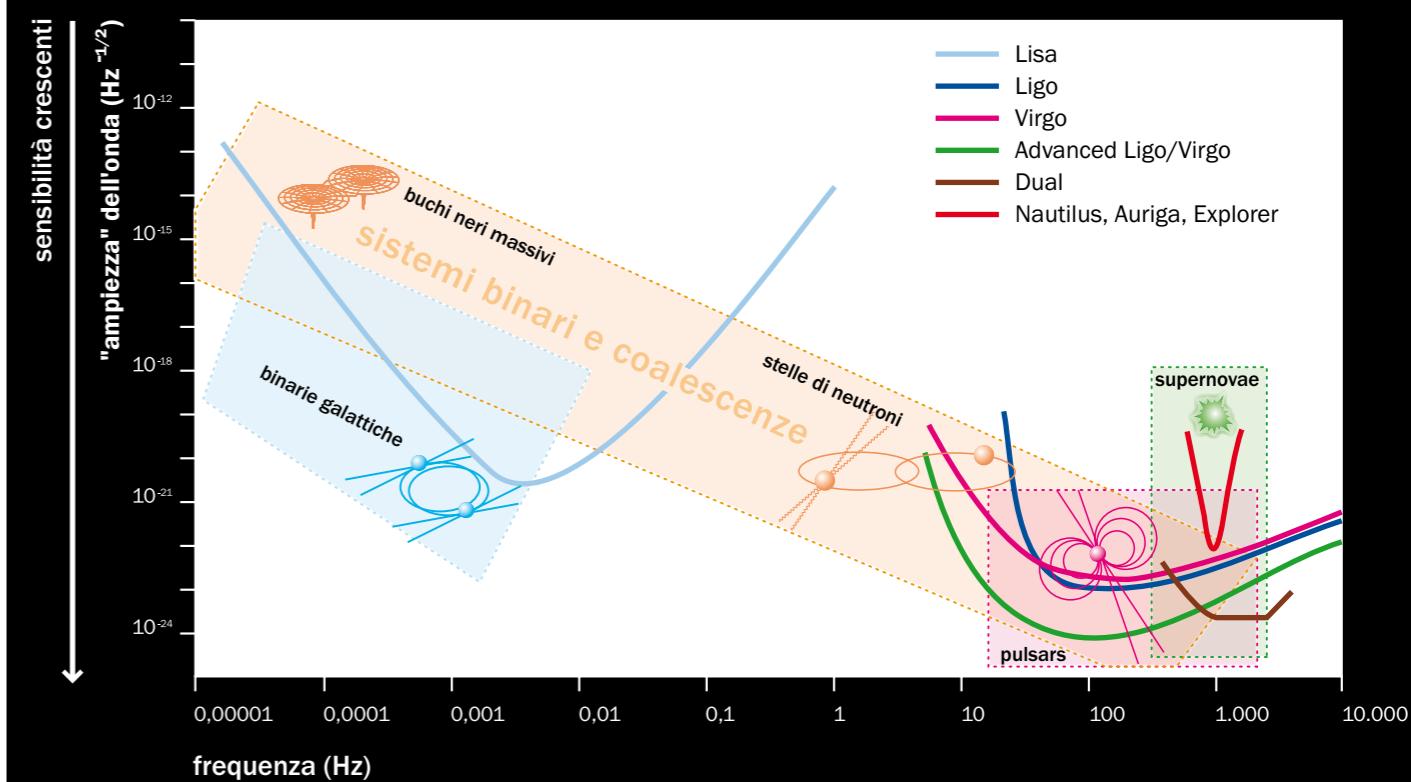
Esiste poi una terza classe di sorgenti che emette onde gravitazionali di tipo stocastico, cioè un segnale in cui non si possono riconoscere elementi ripetitivi e che è percepito come casuale. Sorgenti di questo tipo possono avere origine astrofisica o cosmologica. Un esempio delle prime è il fondo stocastico

che si pensa prodotto da un elevato numero di sistemi binari di stelle meno compatte delle stelle di neutroni, il cui segnale sarebbe troppo debole per poter essere individuato singolarmente. Nel complesso, però, esse produrrebbero un fondo alle basse frequenze, che è possibile rivelare nello spazio. Il fondo stocastico cosmologico fu invece generato dall'esplosione del Big Bang e quindi fornirebbe un'immagine del primo istante di vita dell'Universo.

I sistemi binari di stelle di neutroni e/o buchi neri costituiscono una classe a sé stante, perché quando i due oggetti compatti sono molto distanti tra loro producono un segnale, detto di spiraleggimento, approssimativamente periodico, benché di piccola intensità e quindi difficilmente rilevabile. Tuttavia, quando i due oggetti sono più vicini (a causa della perdita continua di energia e momento angolare attraverso la radiazione gravitazionale), l'intensità delle onde emesse aumenta, così come la frequenza, fino al momento dello scontro e dell'eventuale collasso, durante il quale avviene una copiosa e impulsiva emissione di radiazione. Anche in questo caso, come in quello delle sorgenti impulsive, se ci si limita ad osservare una regione

di Universo contenente solo la nostra galassia, le probabilità di rivelazione sono basse: dell'ordine di una ogni centomila anni. Con le nuove generazioni di rivelatori sarà possibile estendere il raggio di osservazione a distanze di circa un miliardo di anni luce, per le quali ci si aspetta di poter rivelare dai due ai venti eventi all'anno, nel caso rispettivamente di sistemi binari di due buchi neri o di due stelle di neutroni.

I sistemi binari di stelle di neutroni e/o buchi neri costituiscono una classe a sé stante, perché quando i due oggetti compatti sono molto distanti tra loro producono un segnale, detto di spiraleggimento, approssimativamente periodico, benché di piccola intensità e quindi difficilmente rilevabile. Tuttavia, quando i due oggetti sono più vicini (a causa della perdita continua di energia e momento angolare attraverso la radiazione gravitazionale), l'intensità delle onde emesse aumenta, così come la frequenza, fino al momento dello scontro e dell'eventuale collasso, durante il quale avviene una copiosa e impulsiva emissione di radiazione. Anche in questo caso, come in quello delle sorgenti impulsive, se ci si limita ad osservare una regione



[as]

## Eventi e strumenti

Nel seguito vedremo gli strumenti per rivelare le onde gravitazionali, di cui riportiamo alcune caratteristiche. Le curve rappresentano la sensibilità, per onde gravitazionali di diversa frequenza, di vari esperimenti, presenti o futuri.

Per ogni strumento è riportata l'ampiezza minima di un'onda gravitazionale di una certa frequenza, che lo strumento è in grado di rivelare. Sull'asse orizzontale sono indicate le possibili frequenze dell'onda, in Hz, e sull'asse verticale è rappresentata la sua ampiezza: quanto più bassa è la curva, tanto più sensibile – quindi migliore – è il rivelatore. Più precisamente, le curve rappresentano per ogni frequenza l'ampiezza

dell'onda gravitazionale in grado di produrre nel rivelatore un segnale uguale a quello prodotto dal rumore, in media e a quella stessa frequenza. Per rumore di un rivelatore si intende il segnale generato da tutti i fenomeni di disturbo presenti ad ogni frequenza. Per un interferometro terrestre come Virgo, o Ligo, ad esempio, un sisma, o qualunque altro tipo di vibrazione, è un rumore che può mascherare l'effetto delle onde gravitazionali. Per Lisa, che è un osservatorio spaziale, le sorgenti di rumore sono naturalmente di tipo diverso.

E diverse ancora sono le cause che generano disturbo nei rivelatori acustici, come Auriga, Dual, Explorer

e Nautilus. In ogni caso non è mai possibile liberarsi completamente del rumore. Data che il rumore è una media statistica, solo i segnali che lo superano di molto in ampiezza potranno essere riconosciuti immediatamente; i segnali di poco superiori ad esso, invece, potranno essere identificati soltanto mediante complesse analisi dei dati.

Le aree ombreggiate rappresentano le possibili ampiezze delle onde gravitazionali prodotte da fenomeni astrofisici, alle diverse frequenze.

Le ampiezze attese possono variare di molto, perché le nostre previsioni sono incerte e perché non sappiamo a che distanza si trova la sorgente. [C. Bradaschia]

### Biografie

**Luca Baiotti** e **Bruno Giacomazzo** sono ricercatori all'Albert Einstein Institute (AEI, Golm, Germania). Hanno sviluppato i codici numerici Whisky e WhiskyMHD per la soluzione delle equazioni di

Einstein e dell'idrodinamica e magnetoidrodinamica relativistica: due laboratori astrofisici "virtuali" attraverso i quali è possibile predire l'emissione di onde gravitazionali da stelle di neutroni e sistemi binari.

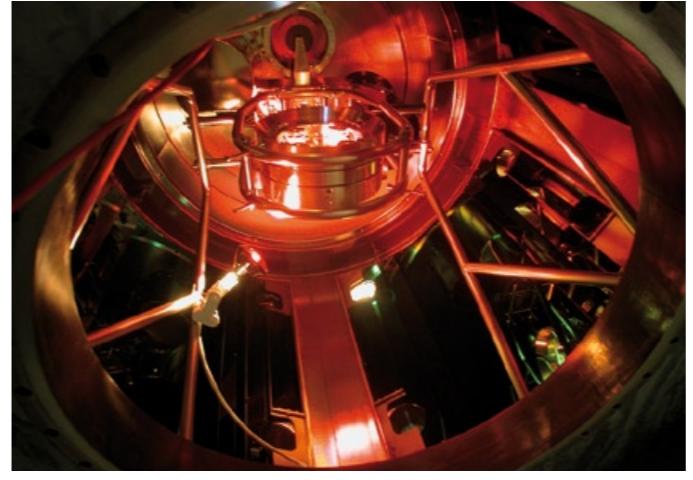
### Link sul web

*Immagini e filmati da simulazioni numeriche di sorgenti di onde gravitazionali*  
<http://numrel.aei.mpg.de/Visualisations/>

# A braccia aperte

Grandi interferometri laser collaborano nella ricerca delle onde gravitazionali.

di Carlo Bradaschia



b.



c.

L'avventura di Virgo ebbe inizio negli anni '80, durante un congresso di relatività generale. In quella circostanza, infatti, Adalberto Giazotto, fisico dell'Infn con un interesse per le onde gravitazionali, che allora progettava prototipi di sospensioni per isolare dai movimenti sismici i dispositivi di test dei futuri rivelatori, ebbe l'occasione di incontrare Alain Brillet, un fisico francese anch'egli interessato alla rivelazione delle onde gravitazionali, ma con un bagaglio di esperienza completamente diverso: l'ottica e i laser. Da questo incontro di esperienze complementari, nacque l'idea di costituire una collaborazione italo-francese per realizzare il Progetto Virgo, un interferometro laser (vd. pp. 16-17, ndr) per rivelare l'eventuale passaggio di un'onda gravitazionale. Seguì circa un decennio di lavoro intensissimo, volto al completamento dei prototipi, alla stesura di un progetto e a ottenere l'approvazione e il finanziamento dell'Infn e del Cnrs, il centro nazionale per la ricerca scientifica francese. Oggi Virgo è diventato uno strumento molto potente. Esso ci permette di controllare con straordinaria precisione la differenza di lunghezza dei suoi due bracci ortogonali lunghi ben 3 km: ciò è fondamentale perché dalla variazione della lunghezza dei bracci possiamo ricavare l'ampiezza dell'onda che li ha investiti. Ai loro passaggio, le onde gravitazionali, infatti, deformano alternativamente lo spazio in due direzioni perpendicolari, producendo così l'allungamento di un braccio e l'accorciamento

dell'altro. Ciò altera lo "sfasamento" tra i due fasci laser che dà luogo a un segnale luminoso sul fotodiodo rivelatore la cui intensità dipende dalla variazione di lunghezza dei bracci. Dal momento che queste deformazioni sono estremamente piccole, è necessario aumentare la sensibilità dello strumento di misura mettendo in pratica ogni possibile accorgimento. Il più naturale per un interferometro consiste nel dotarlo di bracci molto lunghi: quanto più grande è la lunghezza, infatti, tanto più grande è la sua variazione. Sulla Terra, però, si riescono a realizzare bracci rettilinei al massimo di qualche chilometro, considerando i costi, l'ambiente e la curvatura terrestre. Così, per allungarli virtualmente, alle loro estremità sono stati collocati degli specchi di precisione: l'effetto delle variazioni, quindi, viene moltiplicato facendo sì che i fotoni dei raggi laser percorrono avanti e indietro molte volte i bracci, prima di raggiungere il fotodiodo. In Virgo ci attendiamo così di poter misurare delle differenze di lunghezza di  $10^{-19}$  metri, un miliardo di volte più piccole del diametro di un atomo! Nel campo dell'ottica, Virgo utilizza una nuova generazione di laser ultrastabili, mentre per produrre specchi di qualità estrema è stato costruito, a Lione, un laboratorio *ad hoc* per la deposizione sotto vuoto dei vari strati riflettenti che compongono ciascuno specchio. È stata ottenuta una riflettività di oltre il 99,999%, e la superficie degli specchi è così levigata che le dimensioni di eventuali irregolarità sono

a.  
Virgo visto da Pamela: immagine satellitare dell'interferometro Virgo, vicino a Cascina (Pisa). Oltre all'apparato sperimentale Pamela per lo studio dei raggi cosmici (vd. Asimmetrie 4), il satellite russo Resurs ospita una potente strumentazione fotografica, grazie alla quale è stato realizzato questo scatto.

b.  
Lo specchio separatore sospeso nella sua campana da vuoto, visto dal basso.

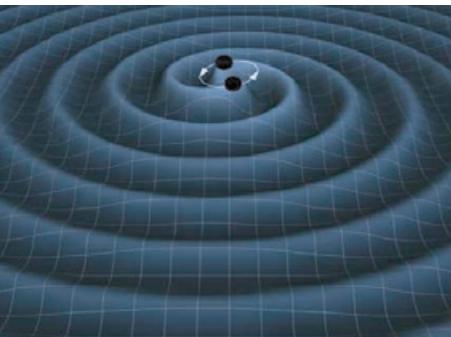
c.  
Uno degli specchi di Virgo in fase di preparazione.

[as]

# Un'antenna larga mezzo mondo per catturare il "fantasma" previsto da Einstein

## Le onde gravitazionali

Stelle doppie, stelle ruotanti, supernovae e, in generale, ogni collasso gravitazionale producono rapidi cambiamenti nello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce: le onde gravitazionali. Queste onde, al contrario di quelle elettromagnetiche, possono viaggiare e trasportare energia su grandi distanze senza essere assorbite dalle stelle. Ma la forza gravitazionale è la più debole dell'Universo, quindi è difficilissimo "vederle".



## L'interferometro Virgo

Per cercare di rivelare questo tipo di onde, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare italiano (Infn) e il Centre National de la Recherche Scientifique francese (Cnrs) hanno creato presso Cascina (Pi) l'Osservatorio Gravitazionale Europeo (Ego). Qui è stato costruito l'interferometro Virgo.



## Com'è fatto Virgo

Virgo è un interferometro laser di tipo Michelson con due bracci di 3 km disposti ad angolo retto.

## Sorgente del fascio laser [1.]

## Specchio separatore [2.]

È uno specchio semitransparente che divide il fascio laser incidente in due componenti uguali mandate nei due bracci dell'interferometro.

## Cavità risonante Fabry-Pérot [3.]

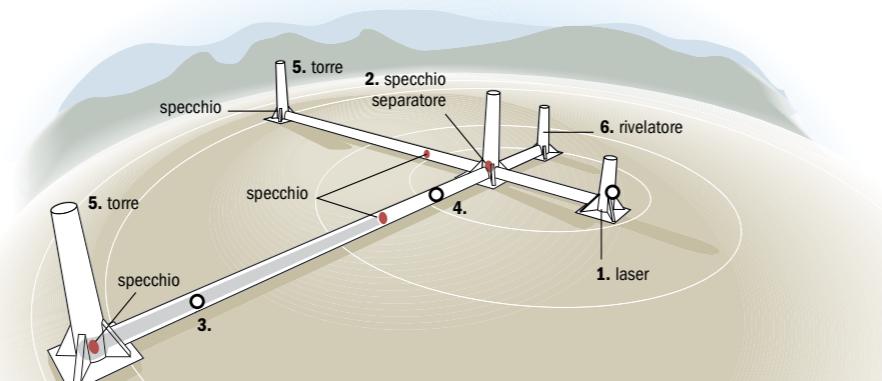
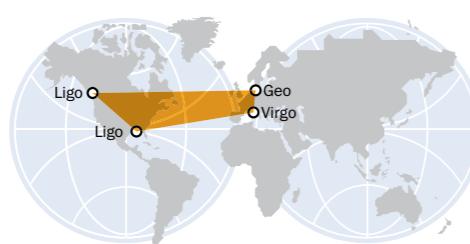
Formata da due specchi, estende la lunghezza ottica in ogni braccio da 3 a circa 100 km per via delle riflessioni multiple della luce. Serve ad amplificare l'effetto del passaggio dell'onda gravitazionale.

## Tubi a ultra alto vuoto [4.]

Siccome la presenza di gas residuo perturberebbe la misura, il percorso del fascio di luce tra gli specchi deve trovarsi alla pressione estremamente bassa di  $10^{-12}$  atmosfere: cioè in ultra alto vuoto.

## Collaborazione

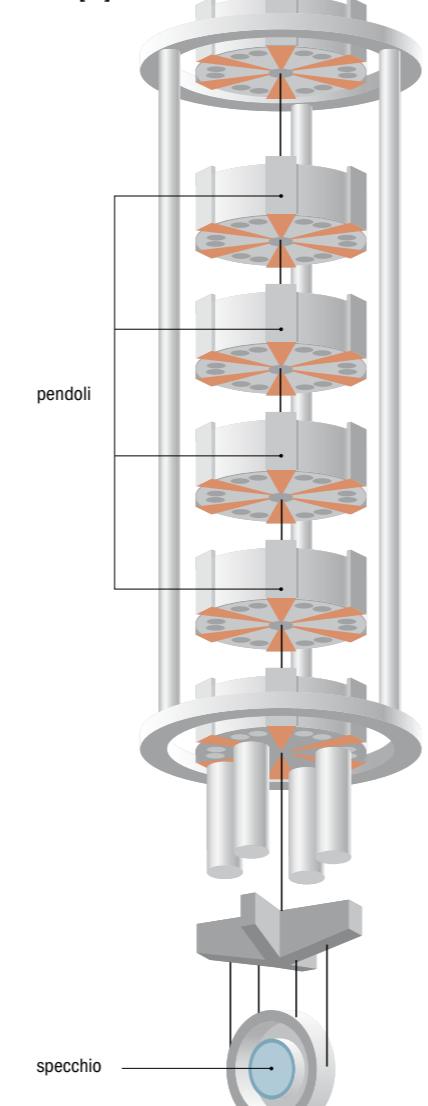
La collaborazione fra Virgo e Ligo (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) dà vita ad un unico grande osservatorio che attraversa l'Atlantico, dall'Europa al Golfo del Messico e arriva fino alle coste del Pacifico. Ne fanno parte Virgo, i due osservatori di Ligo, uno in Louisiana, l'altro nello stato di Washington e Geo600, l'interferometro anglo-tedesco vicino ad Hannover. Sarà così più facile capire se un segnale captato da un'antenna gravitazionale è davvero dovuto ad un'onda di passaggio.



## Le torri [5.]

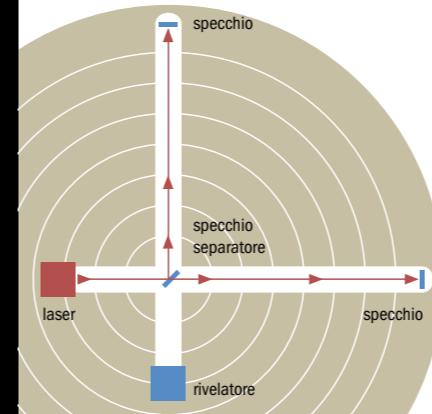
Proteggono al loro interno gli specchi. Ogni specchio è sospeso a un sistema di isolamento sismico realizzato con una catena di pendoli.

## Il rivelatore [6.]

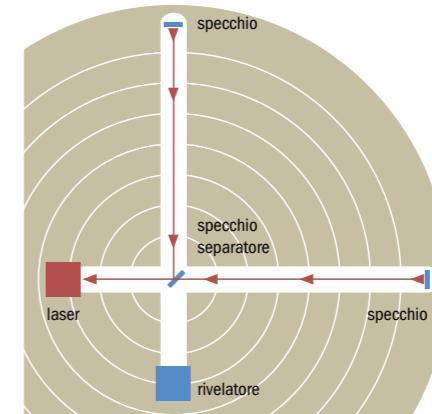


## Come funziona l'interferometro

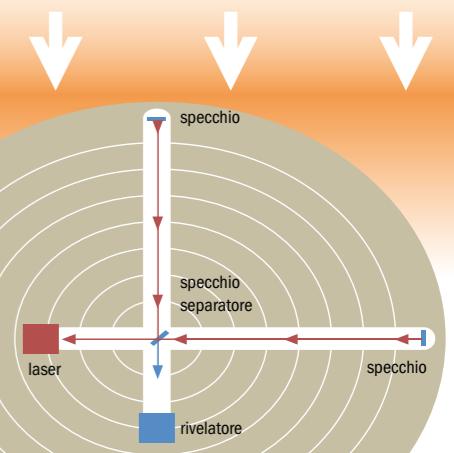
I due fasci di luce laser, provenienti dai due bracci, vengono ricombinati (in opposizione di fase) in maniera che, normalmente, non arrivi luce sul rivelatore.



Quando un'onda gravitazionale arriva produce un'infinitesima variazione (più piccola del nucleo di un atomo) della lunghezza dei due bracci (uno si allunga e l'altro si accorcia).



La variazione, causata dalla distanza tra gli specchi, induce uno sfasamento tra i fasci di luce e quindi dell'intensità di luce osservata dal rivelatore. Il segnale che il rivelatore osserva è correlato all'ampiezza dell'onda gravitazionale.



dell'ordine del nanometro, cioè del miliardesimo di metro. La vera sfida da vincere, però, è isolare lo strumento da tutti i possibili fenomeni che possano coprire gli effetti delle onde gravitazionali.

Le vibrazioni sismiche, sempre presenti sulla crosta terrestre, sono miliardi di volte più grandi degli spostamenti dovuti alle onde gravitazionali. Per isolare gli specchi dal sisma, sono stati messi a punto i "superattenuatori", giganteschi ammortizzatori che sostengono gli specchi mediante complesse catene di pendoli, all'interno di campane da vuoto alte 11 m. Le eccezionali prestazioni dei superattenuatori permettono di estendere la sensibilità di Virgo a basse frequenze, fino a 10 Hz, mentre gli altri interferometri a terra non possono scendere al di sotto di 50 Hz. Ciò dà a Virgo l'esclusività per esplorare un intervallo di frequenze potenzialmente molto interessante, dove si potrebbero "vedere" onde gravitazionali prodotte da pulsar e da stelle binarie coalescenti. Un'altra fonte importante di disturbi sarebbe costituita dalle fluttuazioni dell'indice di rifrazione dell'aria, lungo il cammino dei fasci

di luce. A questo effetto si rimedia in modo concettualmente semplice: facendo propagare i raggi laser nel vuoto. Nella pratica la necessità di un vuoto estremamente spinto ( $10^{-12}$  atmosfere), all'interno di due tubi di 1,2 m di diametro e 3 km di lunghezza, ha richiesto la realizzazione di quello che è, di gran lunga, il più grande sistema da ultra-alto-vuoto d'Europa. Queste e altre esigenze hanno spinto i ricercatori e i tecnici coinvolti nel progetto a sviluppare le più avanzate tecnologie in numerosi campi. Queste tecnologie sono ora a disposizione di altri campi di ricerca e dell'industria. Grazie a un accordo raggiunto recentemente con i gruppi di lavoro di altri interferometri, i due Ligo negli Stati Uniti e Geo600 in Germania, non ci si limiterà a cercare coincidenze temporali fra i vari rivelatori ma, scambiandosi i dati originali, si effettueranno analisi multiple e coerenti di tutti i dati, migliorando così la statistica e l'affidabilità dei risultati. Virgo, che ha raggiunto una sensibilità paragonabile a quella dei due interferometri Ligo, dallo scorso 18 maggio ha iniziato a prendere dati a pieno tempo e continuerà fino a settembre.

[as]

## La collaborazione Virgo ed Ego

La collaborazione Virgo è costituita da 150 ricercatori, provenienti dall'Infn e da alcuni laboratori del Cnrs francese (Centre National de la Recherche Scientifique), a cui recentemente si è aggiunto un gruppo del Nikhef di Amsterdam.

Ego, l'Osservatorio Gravitazionale Europeo, è il laboratorio creato nel 2001 sotto forma di consorzio fra Cnrs e Infn, al fine di prendersi cura di tutte le infrastrutture necessarie al buon funzionamento di Virgo. Attualmente Ego ha raggiunto la sua dimensione di regime, con poco più di 50 dipendenti, fra cui la squadra di operatori che consente il funzionamento dell'interferometro, in particolare durante la raccolta dei dati. Numerosi dipendenti di Ego contribuiscono anche alla messa a punto e al miglioramento del rivelatore.



L'interesse di raccogliere dati in coincidenza con gli altri interferometri è duplice: riconoscere e scartare la maggior parte dei segnali spuri, che hanno origine locale e non possono quindi dare coincidenze temporali fra rivelatori in continenti diversi, contrariamente ai segnali di onde gravitazionali che investono tutta la Terra; inoltre, mediante la differenza di tempo d'arrivo dell'onda ai vari rivelatori, si può individuarne la sorgente, così come noi utilizziamo le due orecchie ai lati della nostra testa per individuare la sorgente di un suono.

La previsione del numero di eventi rivelabili è molto difficile e incerta. Se ci limitiamo ai fenomeni prevedibili con maggiore attendibilità, le coalescenze di stelle binarie, stimiamo che i

rivelatori attuali abbiano una probabilità del 1% di vedere un evento in un anno di presa dati continua. Per questo motivo, l'accordo fra Virgo, Ligo e Geo600 prevede un programma coordinato di miglioramento di tutti i rivelatori in due passi: Virgo+, in cui, mediante tecnologie già in uso, le sensibilità saranno migliorate a tal punto che il numero di eventi rivelabili diverrà dell'ordine di uno all'anno, a partire dal 2010; e in seguito Virgo Advanced, in cui, grazie a tecnologie in fase di sperimentazione, si prevede un miglioramento complessivo della sensibilità di circa 10 volte e il numero di eventi attesi sarà di qualche decina all'anno, a partire dal 2014. Sarà questo l'inizio dell'astronomia gravitazionale.

### Biografia

**Carlo Bradaschia** è dirigente di ricerca all'Infn di Pisa. Fino al 1988 si è occupato di fisica sperimentale delle particelle elementari, successivamente si è dedicato a pieno tempo alla realizzazione di Virgo, contribuendovi dalle fasi iniziali del progetto alla raccolta dei dati, attualmente in corso.

### Link sul web

[www.ego-gw.it/virgodescription/](http://www.ego-gw.it/virgodescription/)

[www.einstein-online.info/en/](http://www.einstein-online.info/en/)

[www.ligo.caltech.edu](http://www.ligo.caltech.edu)

Per un video sul Progetto Virgo

<http://tv.unipi.it/ricerca/>

# [as] tecnologia e ricerca

## Pendoli hi tech.

di Vincenzo Napolano

Fare le cose per bene. È questo il principio che ha guidato per trent'anni il lavoro di Carlo Galli e Mauro Morelli. E ha assicurato - parola dei due imprenditori lucchesi - il successo alla loro impresa. Nata nel 1982, la Galli&Morelli s.r.l., azienda meccanica di alta precisione, realizza oggi sofisticate tecnologie per la ricerca, in collaborazione con laboratori di tutto il mondo. All'interno dei suoi capannoni sono stati costruiti gli attenuatori per il rumore sismico degli interferometri gravitazionali: sia per l'europeo Virgo che per il giapponese Tama300 e un prototipo per lo statunitense Ligo. Ma sono targate Galli&Morelli anche alcune componenti di altri grandi esperimenti di fisica, come i moduli del calorimetro di Atlas per l'acceleratore Lhc del Cern di Ginevra o la griglia di distribuzione delle alte tensioni per il rivelatore di particelle Icarus, nei laboratori sotterranei del Gran Sasso o infine le torri metalliche di Nemo, rivelatore sottomarino di neutrini. D'altra parte che una piccola azienda lucchese (quindici dipendenti per 2 milioni di euro di fatturato) venga inclusa dalla Nsf (National Science Foundation) tra le imprese di interesse nazionale per gli Usa, non è certo cosa di tutti i giorni. "È una sorta di certificazione - ci dice Carlo Galli - necessaria agli enti di ricerca statunitensi, per ricorrere ripetutamente a un'azienda di un altro Paese." "D'altra parte, realizzare un pezzo meccanico, che abbia finalità specifiche e lavorazioni di alta precisione - continua Carlo Galli, indicando le grandi macchine fresatrici e i torni a controllo numerico - è ben diverso

a.  
I pendoli in cascata dei superattenuatori di Virgo a cui sono sospesi gli specchi dell'interferometro.



[as]

Promec

Da una parte ci sono le sfide concettuali e sperimentali della fisica, dall'altra quelle delle tecnologie che riescono a realizzare le condizioni estreme richieste dagli esperimenti. Passare dalle une alle altre è un processo complesso e per nulla lineare: in mezzo c'è l'ingegnerizzazione dei modelli, la ricerca di soluzioni tecniche efficienti e affidabili, il superamento di mille difficoltà tecniche impreviste, che porta spesso a soluzioni tecnologiche originali. Lo sa bene Gianni Gennaro, progettista e responsabile della Promec, azienda che lavora per la ricerca e nata

come spin-off della sezione di Pisa dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. È lui, insieme a Riccardo De Salvo, ex ricercatore Infn che oggi lavora a Ligo, ad avere "scoperto" la Galli&Morelli. Alla metà degli anni '90 Gennaro trasforma in un'impresa le competenze di progettazione e la maestria tecnica sviluppata in trent'anni di lavoro con l'Infn, Promec oltre a divenire partner fissa di Galli&Morelli, partecipa indipendentemente a molti progetti di ricerca internazionali, come l'interferometro spaziale Lisa o l'esperimento Meg a Zurigo.

dal fabbricare un prodotto destinato al commercio. Per me, però, risolvere problemi nuovi, tentando di superare gli standard tecnici diffusi normalmente è stato sempre e di gran lunga l'aspetto più appassionante del mio mestiere." Le prime impegnative commesse dal mondo della ricerca arrivarono alla Galli&Morelli all'inizio degli anni '80 tramite la Galileo Vacuum System, azienda specializzata nella tecnologia dell'ultravuoto, da parte di fisici dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare. Si forma così, a poco a poco, nell'officina meccanica lucchese quella mentalità flessibile e pronta ad aggiornare continuamente le proprie tecniche, che sposa in maniera perfetta le esigenze della ricerca scientifica. Ed è grazie a questa che il progetto dei grandi superattenuatori di Virgo arriva a Lucca. "Questi assomigliano a dei grandi ammortizzatori a cui sono sospesi gli specchi dell'interferometro per isolargli dalle vibrazioni sismiche - ci spiega Franco Frasconi, ricercatore della sezione Infn di Pisa. Il loro principio di funzionamento si basa sulla capacità intrinseca di smorzamento delle vibrazioni

da parte di sei pendoli posti in cascata. Il sistema realizzato, però, è molto più complesso, perché oltre ad avere queste caratteristiche passive in tutti i gradi di libertà (rotazioni incluse), è stato corredata di sensori e attenuatori in grado di correggere, attraverso un controllo attivo, la posizione degli specchi fino a frazioni di nanometri (frazioni di un miliardesimo di metro"). Le complicazioni tecniche per realizzare un oggetto simile, alto 9 m e alla cui sommità è applicato un carico di oltre mille chilogrammi, certo non mancano. "È indispensabile ad esempio ridurre il più possibile le contaminazioni dell'ambiente - continua Frasconi - per questo motivo l'assemblaggio dei vari componenti è stato fatto in una camera pulita allestita appositamente nell'officina. Un'attenzione particolare è stata riservata allo studio e alla produzione dei fili metallici che collegano fra di loro i "pendoli" del superattenuatore sismico, che devono riuscire a sopportare elevati carichi specifici senza reintrodurre nel sistema meccanico altri tipi di rumore". I superattenuatori, smorzando fino a 1000 miliardi di volte le vibrazioni del

terreno, fanno di Virgo l'interferometro gravitazionale più sensibile al mondo alle basse frequenze. Ma l'interazione e la collaborazione con i fisici pisani hanno fatto crescere nell'azienda lucchese un know how e un patrimonio di conoscenze, che oggi si offre sul mercato e non solo per i grandi progetti di ricerca internazionali, da cui deriva comunque oltre la metà del fatturato della Galli&Morelli. "Questo tipo di commesse hanno anche contribuito ad alimentare un piccolo indotto industriale di alta qualità - continua Galli - costituito dalle aziende specializzate alle quali appaltiamo ad esempio la saldatura e il taglio dei diversi materiali, il trattamento delle superfici, l'elettronica... La produzione delle strumentazioni e delle tecnologie per la ricerca, infatti, richiede necessariamente uno standard di elevata qualità, costantemente aggiornato". Quello lucchese è un modello che andrebbe ricercato e coltivato con maggiore attenzione: è un esempio di quanto le nostre piccole e medie imprese spesso sappiano essere efficienti, creative e collaborative e di come ricerca scientifica e tecnologica assieme siano sinonimi di sviluppo economico.

# [as] incontri

## Conversazioni di scienza... su Radio Rock.

intervista di Francesca Scianitti



Sono in coda sul grande raccordo anulare, posso teletrasportarmi a destinazione?

Cosa sono i computer quantistici? E i qubit?

Che cosa c'era prima del Big Bang?

Sono solo alcune delle domande che gli ascoltatori di Radio Rock, giovani e non solo, rivolgono in diretta durante lo spazio dedicato alle loro curiosità scientifiche.

Lo scopo: sfatare miti e fantasie impossibili

e alimentarne di nuovi, non meno incredibili, ma scientificamente corretti.

In una interessante e personale iniziativa di divulgazione, due giovani ricercatori dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, Giovanni Mazzitelli e Catalina Curceanu, come novelli capitano Kirk, accompagnano gli ascoltatori alla scoperta della scienza moderna. Colleghi esperti e domande insidiose contribuiscono al racconto, per capire come si realizza ciò che può apparire inspiegabile. Non mancano i consigli per l'approfondimento: dove e cosa leggere e cosa trovare in internet. Il tutto interrotto da intervalli musicali, naturalmente rock.

**[as] Vi ho sentito trattare di meccanica quantistica cantando. È una risposta al luogo comune che vede gli scienziati noiosi e pedanti?**

Catalina: La capacità di divertirsi è fondamentale per un vero scienziato. In quanto alla pedanteria, beh, anche quella non manca: dovreste vedere con quanto puntiglio prepariamo la trasmissione! Però ci piace molto e così è più facile divertire chi ci segue in queste indagini da 007 della Fisica. Chissà che un giorno proprio uno di loro non decida di entrare nella nostra squadra!

**[as] Catalina, un programma da ascoltare a scuola durante l'ora di scienze o di fisica?**

Catalina: Un programma per tutti i curiosi e per chi ha voglia di imparare divertendosi. E, perché no, anche per la scuola e per i bambini. La loro sete di conoscenza è impareggiabile e noi ci mettiamo a disposizione!

Sarebbe auspicabile che anche chi prende decisioni importanti nell'interesse di tutti ascoltasce programmi di questo tipo.

In fondo, saperne di più aiuta a fare scelte ponderate... e non è poi così faticoso.

**[as] Ma è possibile parlare di temi complessi in poco tempo, senza scoraggiare chi ascolta?**

Giovanni: Partiamo da temi complessi, è vero, ma in realtà vogliamo parlare del metodo scientifico e di come si possono interpretare i fenomeni usando la logica. Spesso si ha l'idea che lo scienziato debba sapere tutto. Non è certamente così.

Cerchiamo di ragionare con gli ascoltatori su quesiti a cui spesso anche noi non sappiamo rispondere con completezza.

L'obiettivo è fare esperienza, per capire quali percorsi siano utili a trovare le risposte, e stimolare la curiosità per la ricerca.

**[as] Come vi spiegate questo interesse per la ricerca fondamentale, apparentemente fine a se stessa e priva di obiettivi concreti?**

Giovanni: Lo sviluppo di una tecnologia attraversa sempre tre passaggi, tutti irrinunciabili.

La conoscenza del fenomeno naturale - è la ricerca fondamentale.

Lo sfruttamento del fenomeno per realizzare qualcosa di concreto - è la ricerca applicata. E lo sviluppo di un'idea per realizzare un prodotto tecnologico utilizzabile da tutti, e commercializzabile - è questa la ricerca tecnologica.

Come vedi, non si può prescindere dalla ricerca, a partire da quella fondamentale.

Catalina: Queste iniziative sono come gocce d'acqua. Nell'insieme, però, fanno oceani e quantità tali da poter dissetare l'intera umanità. La ricerca fondamentale risponde ad una doppia necessità: della società, come motore del progresso, e dell'individuo. A questo proposito, Einstein diceva: "L'esperienza più bella che possiamo avere è il mistero.

È l'emozione fondamentale alla base della vera arte e della vera scienza. Chi non sa cos'è e non sa più sognare o meravigliarsi, è come morto, e il suo sguardo è spento".



# Suonando e risuonando

Grandi diapason per catturare la musica del cosmo.

di Eugenio Coccia

La ricerca sperimentale delle onde gravitazionali è iniziata negli Stati Uniti nei primi anni '60, quando Jo Weber, fisico originale e testardo, si mise in testa di rivelare queste deboli perturbazioni dello spaziotempo per aprire una nuova finestra sul cosmo. Weber sviluppò così il primo rivelatore risonante: un oscillatore meccanico costituito da un cilindro di alluminio di un paio di tonnellate, che gli impulsi di onde gravitazionali avrebbero dovuto far vibrare. Un gigantesco diapason, insomma, equipaggiato con ceramiche piezoelettriche per convertire le sue vibrazioni meccaniche in segnali elettrici che venivano opportunamente registrati.

Egli ne mise in funzione due a 1.000 km di distanza e ne analizzò i dati in cerca di segnali in coincidenza. Infatti un'onda gravitazionale avrebbe messo in vibrazione contemporaneamente i due oscillatori (entro 3 millesimi di secondo, dato che la velocità delle onde gravitazionali è uguale a quella della luce) permettendo di distinguere il segnale dalle possibili cause di disturbo locale. Occorreva grande fede per iniziare questa ricerca: a quel tempo pochissimo era noto sulle possibili sorgenti cosmiche, mentre si sapeva dai calcoli di Einstein che queste onde interagiscono in modo trascurabile con la materia che incontrano. È cioè quasi impossibile assorbirle. Questo, se da un lato vuol dire ottenere messaggi non corrotti o attenuati provenienti dalle sorgenti che le hanno emesse, dall'altro rende difficilissima la loro rivelazione.

Il premio era però notevole: le onde gravitazionali portano informazioni uniche sulla natura delle sorgenti cosmiche che le hanno emesse. Né i tradizionali telescopi che osservano fotoni, né i rivelatori di raggi cosmici o di neutrini possono fornire un racconto così dettagliato del movimento della materia cosmica dove la densità è elevata e i campi gravitazionali molto forti.

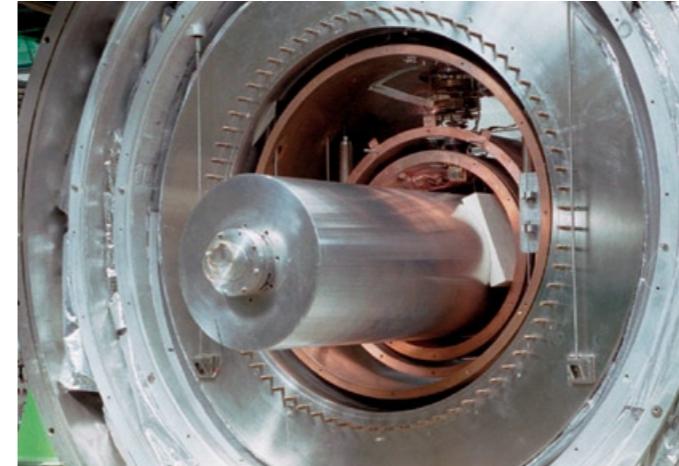
Alla fine degli anni '60, Weber trovò delle coincidenze nei suoi rivelatori e credette di avere rivelato onde gravitazionali provenienti dal centro della nostra galassia. Anche se i suoi risultati non furono confermati, e sono oggi considerati un abbaglio, essi stimolarono la nascita di nuovi gruppi e nuove generazioni di rivelatori. Ormai infatti la passione scientifica era esplosa, la corsa era iniziata e, grazie ai progressi nelle osservazioni astronomiche e nelle previsioni teoriche, la posta in palio appariva sempre più ricca: poter studiare le stelle di neutroni e di quark, i buchi neri, il rumore di fondo proveniente direttamente dal Big Bang e altri oggetti misteriosi del nostro Universo.

Da molti anni, sperimentatori in quattro continenti sono impegnati nella ricerca delle onde gravitazionali, alcuni usando raffinate versioni dei rivelatori risonanti di Weber, altri costruendo grandi rivelatori basati sull'interferometria laser.

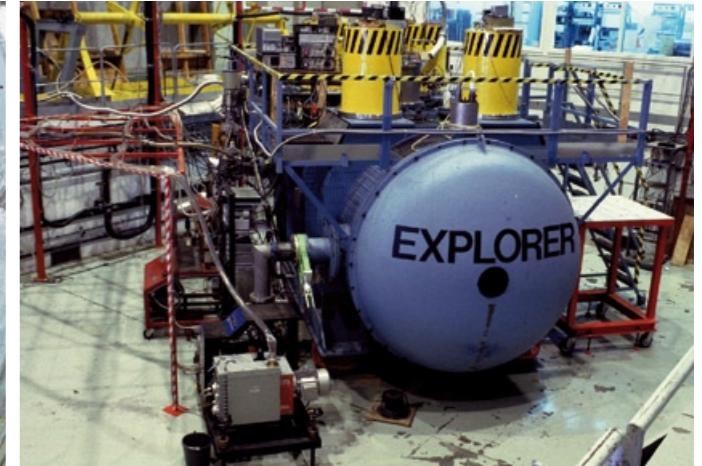
L'Italia e l'Infn occupano da molto tempo un posto privilegiato in questa ricerca. Nel 1970 a Roma Guido Pizzella, con il pieno appoggio di Edoardo Amaldi, prese le redini di un gruppo dedicato allo studio delle onde gravitazionali. Fu deciso di realizzare un rivelatore risonante criogenico (cioè che opera a bassissima temperatura) di sensibilità senza precedenti. L'Italia entrò così subito e in prima fila in questa ricerca, insieme ai gruppi di Stanford e della Louisiana. I primi rivelatori risonanti criogenici entrarono in funzione negli anni '80. L'Infn ha tre rivelatori di questo tipo: Auriga nei



a.



b.



c.

Laboratori di Legnaro, Nautilus nei Laboratori di Frascati ed Explorer al Cern. Sono dei cilindri in lega di alluminio e funzionano effettivamente come dei diapason, messi in vibrazione dall'onda gravitazionale. Per essere più precisi, all'arrivo di un'impulso di onde gravitazionali la barra entra in vibrazione longitudinalmente alla sua frequenza di risonanza, che vale circa 1 kHz. È una frequenza dell'intervallo acustico: questa "nota" può essere "suonata" da varie sorgenti di onde gravitazionali, a cominciare dai collassi stellari tipo supernova. La difficoltà di queste misure è dovuta al piccolissimo effetto previsto. Se esplodesse una supernova nella nostra galassia, il cilindro sarebbe messo in vibrazione con un'ampiezza dell'ordine di un miliardesimo di miliardesimo di metro. Il livello di isolamento da tutte le vibrazioni sismiche e acustiche deve perciò essere elevatissimo. Inoltre occorre ridurre straordinariamente tutte le sorgenti di rumore di fondo, sia nel rivelatore, abbassando la sua temperatura, sia nel sistema di trasduzione che converte la vibrazione meccanica in un segnale elettrico, usando materiali e dispositivi a bassissima dissipazione. I rivelatori risonanti criogenici hanno permesso un miglioramento della sensibilità di almeno un fattore 10.000, cioè di quattro ordini di grandezza rispetto agli originali rivelatori a temperatura ambiente di Weber. Questi miglioramenti sono dovuti in gran parte alla

riduzione della temperatura dei rivelatori vicino allo zero assoluto. La temperatura è una misura dell'energia del movimento disordinato di un sistema: più è bassa più gli atomi si muovono lentamente, fin quasi a fermarsi quando ci si avvicina allo zero assoluto. È grazie a questa riduzione del movimento disordinato all'interno del rivelatore che è possibile apprezzare in teoria anche le piccolissime vibrazioni indotte dalle onde gravitazionali. Inoltre ci si è giovati dell'impiego di nuovi trasduttori meccanici risonanti, molto più efficienti dei vecchi piezoelettrici, e di amplificatori superconduttori (cioè gli Squid, vd. p. 28, ndr) che hanno un rumore elettronico vicino al limite quantistico imposto dal principio di indeterminazione di Heisenberg. Questi sensibilissimi diapason criogenici si sono avventurati da anni in regioni inesplorate della fisica sperimentale. Grazie alla presa dati continua essi possono dare evidenza di fenomeni astrofisici rari o che si ripresentano a intervalli di molti mesi o di alcuni anni. La caccia agli impulsi prodotti da eventi cosmici catastrofici è l'obiettivo tradizionale dei rivelatori risonanti. Questa ricerca è stata raffinata, non soltanto usando algoritmi di analisi dati sempre più elaborati, ma soprattutto grazie a tecniche di coincidenza fra i dati raccolti contemporaneamente. Il metodo delle coincidenze è potentissimo ma richiede la presenza di almeno tre rivelatori, per eliminare

quelle coincidenze spurious che a causa di disturbi locali possono presentarsi tra due rivelatori. Auriga, Explorer e Nautilus costituiscono oggi un network che assolve il ruolo di sentinella galattica gravitazionale.

Negli ultimi anni la sensibilità dei grandi interferometri, come Virgo, ha sorpassato quella dei rivelatori risonanti e certamente questi straordinari strumenti entrando in presa dati continua potranno studiare molte sorgenti provenienti anche da galassie lontane.

Vale la pena di menzionare alcuni risultati che fanno parte del curriculum dei rivelatori risonanti dell'Infn (e dei loro sperimentatori): il raffreddamento di Nautilus e Auriga a temperature ultracriogeniche (le 2,5 tonnellate di massa sono state raffreddate a 0,1 K e 0,2 K, rispettivamente); lo sviluppo di trasduttori e amplificatori in grado di apprezzare eccitazioni di pochi quanti di energia; l'allargamento della banda passante (cioè l'intervallo in frequenza nel quale il rivelatore è sensibile) da pochi Hz agli attuali 100 Hz di Auriga; la rivelazione acustica di raggi cosmici con Nautilus ed Explorer; la rivelazione del campo gravitazionale dinamico generato da una sorgente artificiale con Explorer.

L'attività e i progressi nella ricerca delle onde gravitazionali vanno valutati alla luce della estrema difficoltà della loro rivelazione, cioè della estrema piccolezza degli effetti da misurare. Non per niente la gravitazione è la più debole delle interazioni fondamentali. Famosa è la frase di Kip Thorne, guru teorico americano del settore: "Gravitazione: Paradiso per i teorici, Inferno per gli sperimentali". Sarà pure un inferno, ma è soprattutto una sfida affascinante.

#### Biografia

**Eugenio Coccia**, professore di Astrofisica all'Università di Roma Tor Vergata, è direttore dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn. È responsabile nazionale degli esperimenti Nautilus

ed Explorer e membro della Collaborazione Virgo. Ha fondato la "Edoardo Amaldi Conference on Gravitational Waves", conferenza mondiale di riferimento del settore.

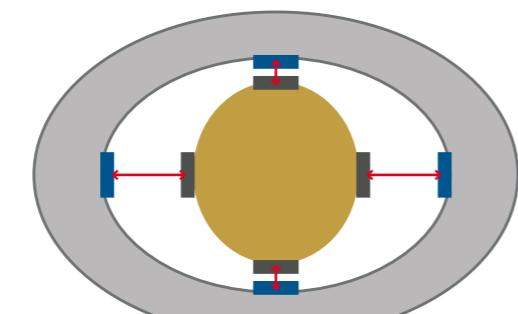
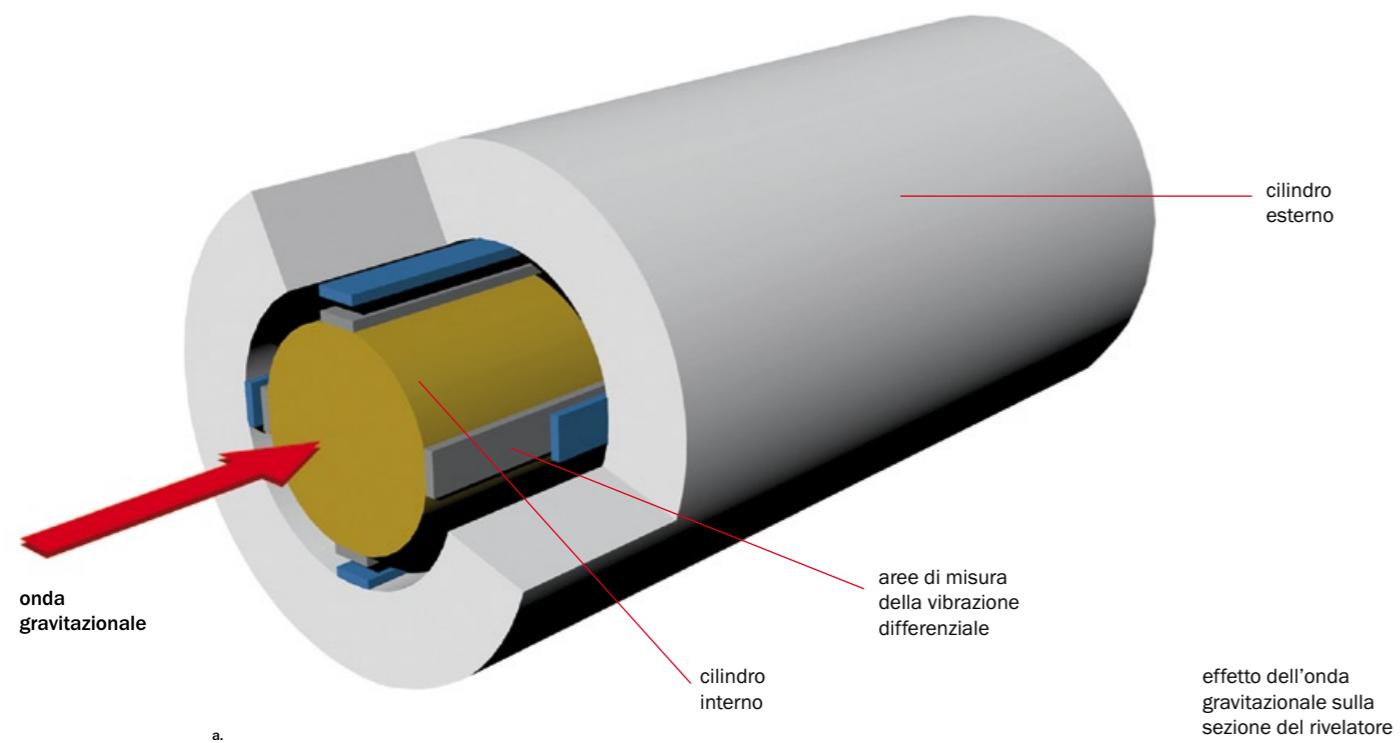
#### Link sul web

[www.auriga.lng.infn.it](http://www.auriga.lng.infn.it)  
[www.lng.infn.it/esperimenti/rog](http://www.lng.infn.it/esperimenti/rog)

# Canto a due voci

Dual, cilindri concentrici  
che vibrano al passaggio dell'onda.

di Massimo Cerdonio Chiaromonte



a.

Durante la loro vita, stelle di neutroni e buchi neri "stellari" vibrano violentemente, generando onde gravitazionali a frequenze del kHz e superiori. Rivelarle ci permetterebbe di sondare in modo diretto la dinamica di regimi estremi della materia che non sarebbero altrimenti osservabili. L'interesse per tali onde quindi è forte, ma la loro rivelazione si presenta più che mai difficile: al crescere della frequenza oltre il kHz, infatti, decrescono sia le ampiezze dei segnali attesi, sia le sensibilità dei grandi interferometri. Le barre, invece, sarebbero più sensibili, ma solo su una esigua banda di frequenze. Per migliorare le loro prestazioni, quindi, dovremmo "accorciare" un interferometro perché non perda sensibilità oltre il kHz, e rendere "a banda larga" una barra. Il rivelatore criogenico Dual, di cui è stato recentemente proposto il progetto, soddisfa ambedue queste richieste. Il principio di funzionamento di Dual si basa essenzialmente su due cilindri concentrici, che vibrano al passaggio di un'onda gravitazionale. Se i due cilindri hanno una dimensione dell'ordine del metro (che implica una massa di alcune tonnellate), quello esterno risuona a una frequenza di circa 1 kHz e quello interno a circa 5 kHz. Sollecitati da onde gravitazionali con una frequenza all'interno di questa banda, i due cilindri rispondono vibrando in controfase, poiché il primo è sollecitato sopra la sua frequenza di risonanza e il secondo sotto: in sostanza, quando quello esterno tende a dilatarsi, l'altro tende a comprimersi e viceversa. L'intercedine tra i due cilindri così si deforma massivamente. Dalla misura di questa deformazione, possiamo risalire all'ampiezza dell'onda gravitazionale che ha attraversato Dual. Dobbiamo però essere in grado di selezionare, tra le vibrazioni, quelle compatibili con un'onda gravitazionale da quelle che possono essere prodotte da altre sollecitazioni.

I sensori (ottici o di altro tipo) disposti a croce sono in grado di farlo perché riescono a misurare la differenza di deformazione tra i due bracci della croce.

Per ogni sensore c'è però un prezzo da pagare, che ne stabilisce il limite. Esso consiste nel cosiddetto "rumore di ritorno" prodotto dalla "forza di ritorno" esercitata dallo stesso sensore. Se usiamo come sensori delle cavità ottiche "riempite" di luce, incastonate nell'intercedine, i fotoni al loro interno esercitano una pressione sulle sue pareti. Poiché il numero dei fotoni non è costante nel tempo, la pressione che essi esercitano varia, modificando la deformazione dell'intercedine. Questa fluttuazione determina appunto il rumore di ritorno, che "inquina" la misura. Il caso di Dual è però speciale: nella banda utile di frequenza, che ha come limiti le frequenze di risonanza dei due cilindri (1 kHz e 5 kHz), poiché essi rispondono in controfase alle sollecitazioni esterne, la deformazione dovuta ad una pressione nell'intercedine è minima. In conclusione, per "effetto Dual", nella banda utile il segnale è massimo e il rumore di ritorno è minimo. Usando come sensori di deformazione cavità ottiche di Fabry-Pérot "corte" (di circa 1 cm), ma estremamente riflettenti e con pochissime perdite di luce dovute ad assorbimento e diffusione (per conservare all'interno della cavità la luce necessaria alla misura il più a lungo possibile), la sensibilità di Dual si manterrebbe costante su tutta la larga banda utile e sarebbe migliore rispetto a quella degli interferometri, anche nella loro versione "avanzata".

Al momento è in corso una intensa attività di ricerca e sviluppo da parte di gruppi dell'Infn rivolta a scegliere la configurazione ottimale di Dual (esso equivale a due interferometri messi a 45°), allo studio delle cavità ottiche, dei laser e del materiale adatto per i cilindri.

## Biografia

**Massimo Cerdonio** ha iniziato con Edoardo Amaldi circa 40 anni fa a sviluppare rivelatori di onde gravitazionali a barra criogenica risonante. Dal 1990

è responsabile nazionale Infn dell'esperimento Auriga. È responsabile nazionale Infn di Dual per la ricerca e lo sviluppo dell'esperimento.

## Link sul web

[www.dual.infn.it/](http://www.dual.infn.it/)  
<http://igec.infn.it/>

# [as] benvenuti a bordo

## Misurare l'incredibilmente piccolo.

di Antonella Varaschin

<  
Uno Squid al microscopio elettronico: il lato del quadrato esterno misura circa 1 millimetro! La serpentina più chiara che si vede in primo piano è la bobina che genera la variazione di campo magnetico, lo Squid invece è "l'anello quadrato" che sta sotto la bobina, di colore più scuro.

Misurare nelle antenne risonanti oscillazioni di ampiezza inferiore a un miliardesimo di miliardesimo di metro, ovvero un millesimo delle dimensioni di un nucleo atomico, è possibile grazie a complessi dispositivi, all'interno dei quali a svolgere un ruolo determinante sono gli Squid. Andrea Vinante è un giovane fisico che attualmente lavora a Trento con un assegno di ricerca post-doc all'Istituto di Fotonica e Nanotecnologie del Cnr ed è associato all'Infn di Padova. Fin dai tempi della laurea, nel 1998, si è occupato dello studio degli Squid (*Superconducting Quantum Interference Devices*), sofisticatissimi misuratori di variazione del campo magnetico.

"Qualsiasi fenomeno induca un campo magnetico, anche molto debole, può essere in linea di principio misurato da uno Squid", ci spiega Andrea. "Gli Squid – prosegue – sono degli anelli superconduttori che, sfruttando effetti quantistici a livello macroscopico, convertono il campo magnetico che li attraversa in un segnale elettrico amplificato". Nelle antenne gravitazionali, lo Squid è collocato in prossimità della barra. Tra i due dispositivi, c'è un sistema, chiamato trasduttore, che fa sì che l'oscillazione meccanica della barra sia tradotta in un segnale elettrico, il quale produce, attraverso una bobina, una variazione del campo magnetico che attraversa lo Squid. Nell'applicazione

degli Squid alle antenne gravitazionali i ricercatori del gruppo di Trento si sono però trovati davanti a un problema: "Questi sono dispositivi estremamente sensibili ma applicati alle antenne gravitazionali – ci racconta Andrea – la loro sensibilità peggiorava di vari ordini di grandezza." Lo Squid, finché funziona da solo, ha un livello di rumore di fondo bassissimo. Questo rumore "inquinante", che è proprio di ogni processo e di ogni strumento di misura, negli Squid è vicino ai livelli minimi consentiti dai principi fondamentali della meccanica quantistica, sui quali essi si basano. Quando, però, si accoppia uno Squid a un particolare dispositivo, come un'antenna gravitazionale, si generano delle instabilità e le prestazioni peggiorano. "Individuare dove fossero i problemi, che erano di vario tipo, e trovare per ciascuno di essi una soluzione, è stato un lavoro che ci ha impegnato per alcuni anni, ma ora Auriga, l'esperimento dell'Infn ai Laboratori Nazionali di Legnaro, al quale io ho lavorato, è operativo con uno Squid che funziona con elevata stabilità al suo livello di rumore ottimale". Gli Squid sono nati negli anni '60 nell'ambito di studi di fisica dei superconduttori. "L'antenna gravitazionale è al momento l'applicazione che richiede le prestazioni più spinte. Attualmente stiamo valutando un possibile utilizzo di Squid nell'esperimento Dual, che rappresenta un'evoluzione delle

antenne risonanti, e per il quale sono richieste prestazioni ancora più spinte. Tuttavia, si tratta per ora solo di uno studio di fattibilità, la cui finalizzazione in un vero rivelatore è ancora incerta. Per questo stiamo anche cercando di capire se possiamo applicare gli Squid ad altri studi di fisica fondamentale", osserva Andrea. Attualmente gli Squid hanno una serie di applicazioni abbastanza variegate ma tutte di nicchia. Le prestazioni sono spesso nettamente superiori a quelle di altri dispositivi concorrenti, ma il fatto di essere superconduttori e di necessitare quindi di temperature molto basse ha limitato la loro diffusione in applicazioni pratiche. Una delle più interessanti riguarda il loro utilizzo in neuroscienze per misurare, in modo non invasivo, le correnti elettriche che si generano all'interno del cervello (magnetoecefalografia). Altre applicazioni riguardano lo studio di proprietà magnetiche della materia, la risonanza magnetica nucleare, le prospezioni geomagnetiche e archeologiche. In fisica fondamentale sono usati in esperimenti di gravitazione, in esperimenti per la rivelazione di assioni (particelle che, se scoperte, potrebbero dare informazioni sulla materia oscura) o forze esotiche, e nei rivelatori di particelle (come nei bolometri e nei microcalorimetri criogenici). "Il settore che però vedo più promettente per questa tecnologia è quello dei computer quantistici", conclude Andrea.

# La sfida di Lisa nello Spazio

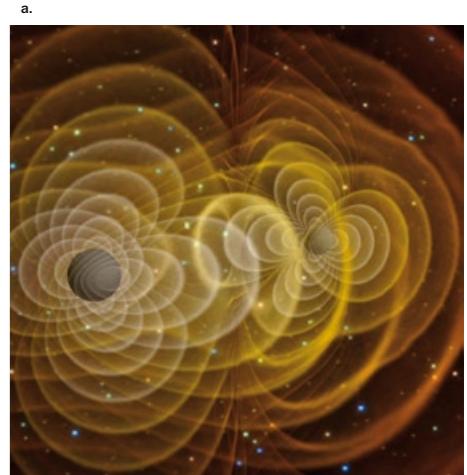
Tre satelliti in orbita intorno al Sole a 5 milioni di chilometri l'uno dall'altro.

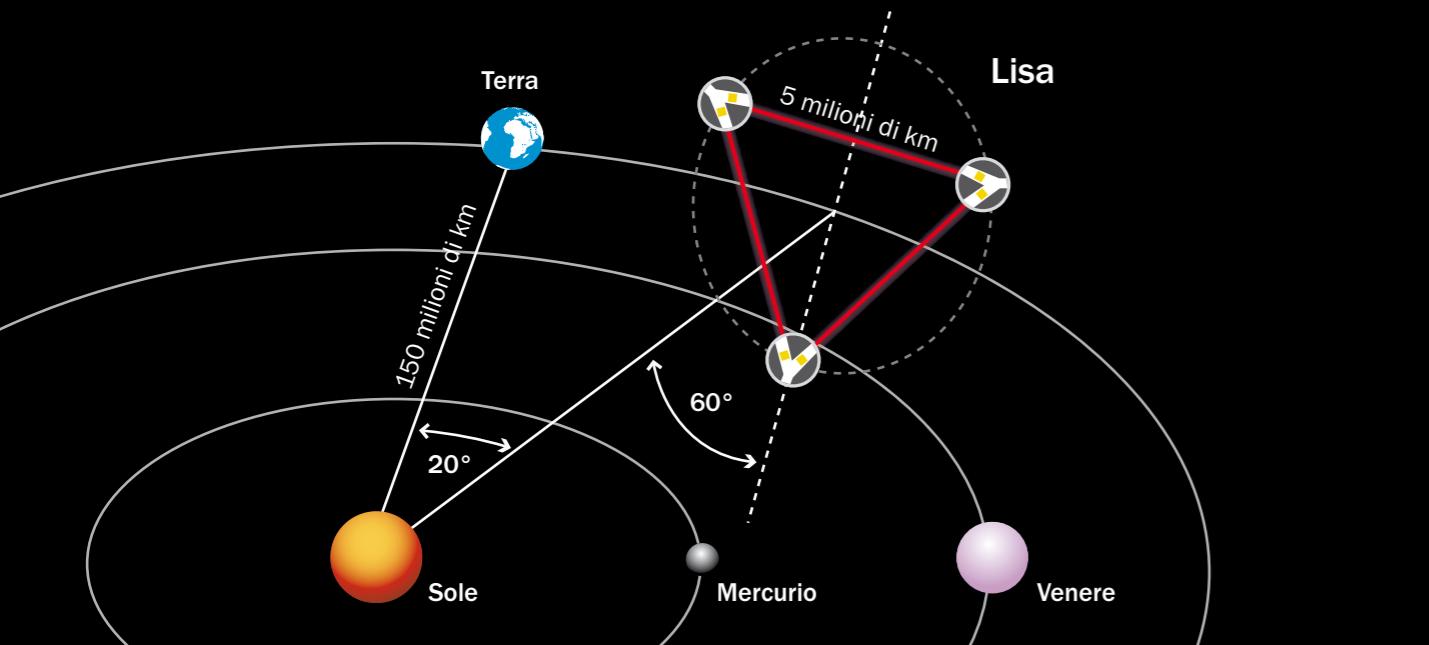
di Stefano Vitale

Se ci vogliamo spingere nel regno dei segnali emessi dalle grandi sorgenti cosmologiche di onde gravitazionali, a frequenze molto più basse di quelle emesse ad esempio dalle esplosioni di supernova, la superficie terrestre non è un buon posto. Le onde gravitazionali impiegano da molti minuti a molte ore per completare un'intera oscillazione e la loro osservazione è perturbata anche dal moto degli alberi mossi dal vento, dal moto dei veicoli o da quello della crosta terrestre. Per studiare le onde gravitazionali di bassa frequenza il luogo ideale è lo Spazio. Lisa (*Large Interferometry Space Antenna*), il futuro osservatorio spaziale di onde gravitazionali, orbiterà intorno al Sole alla stessa distanza a cui si trova la Terra, ma spostato rispetto a essa di alcune decine di milioni di chilometri. Saranno messi in orbita, in realtà, tre satelliti in configurazione triangolare, a una distanza di 5 milioni di chilometri l'uno dall'altro. Concettualmente Lisa è identico ai grandi interferometri laser terrestri, come Virgo, e sarà in grado di misurare lo spostamento tra due masse di prova dovuto al passaggio di un'onda gravitazionale. A differenza degli interferometri terrestri, però, Lisa è dotato di tre bracci interferometrici, e non due: ognuno è costituito da due masse di prova (due cubi di oro-platino di 2 kg), poste su satelliti diversi, e da un interferometro che grazie all'interferenza dei fasci laser riflessi dalle masse permetterà di misurarne

lo spostamento relativo. Come per gli interferometri terrestri, le masse di prova sono in caduta libera, come lo sono la Luna e tutti i satelliti che orbitano intorno alla Terra, o come lo è un uomo all'interno di un ascensore senza cavi. La differenza, nello Spazio, è che la caduta libera non è solo un'approssimazione: qui i cubi di oro-platino galleggiano davvero liberamente all'interno di un satellite, come un astronauta nello Space-Shuttle, senza essere toccati da nulla. Attraverso un misuratore di posizione elettrico, infatti, il satellite può controllare la collocazione relativa delle masse e degli oggetti circostanti, all'interno del satellite stesso, e prevenire il contatto correggendo la sua posizione con dei micropropulsori. Lisa osserverà migliaia di segnali emessi dalle coppie di stelle compatte presenti nella nostra galassia e sarà un osservatorio astrofisico, cosmologico e di relatività generale di enorme ricchezza. Del segnale emesso da una stella binaria, ad esempio, sappiamo prevedere quasi tutto. L'emissione da uno di questi sistemi è quella osservata dalla pulsar binaria PSR1916+13 che ha dato il premio Nobel a Hulse e Taylor per la scoperta delle onde gravitazionali (vd. p. 10, ndr). Di alcune di queste sorgenti sappiamo già tutto perché le osserviamo con i telescopi ordinari. Per una decina di queste, però, ci si aspetta che Lisa possa rivelare il segnale emesso, per misurarne l'ampiezza con grande

a.  
Simulazione numerica del segnale gravitazionale dovuto ad una coppia di buchi neri giganti che spiraleggiano fino a collassare in un unico buco nero.

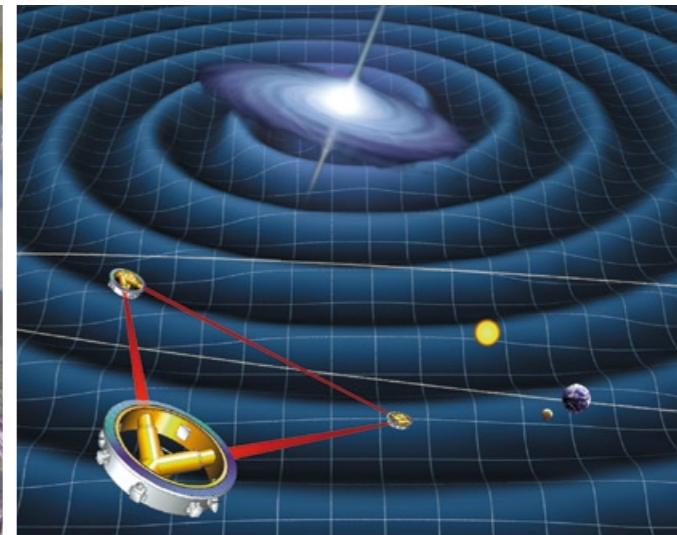




b.



c.



d.

precisione. Delle più brillanti, sarà possibile vedere anche i dettagli più minimi, come il trasferimento di materia dall'una all'altra, la deformazione dovuta all'attrazione reciproca, e così via. Lisa farà dunque di queste sorgenti il più grande catalogo mai visto, osservando i segnali di quelle visibili con i telescopi tradizionali, ma anche di quelle invisibili: un catalogo essenziale per la comprensione della formazione delle galassie.

Tra gli obiettivi di Lisa ci sono anche le onde gravitazionali emesse da sistemi binari di buchi neri: dalla caduta di un piccolo buco nero in un gigantesco buco nero al centro di una galassia, al lento orbitare di due buchi neri galattici l'uno intorno all'altro. Il primo dei due sistemi è il laboratorio di Einstein ideale.

Le onde emesse dal piccolo buco nero durante i suoi ultimi 10.000 giri intorno al buco nero centrale ci permetteranno di ricostruire la mappa dell'“orizzonte degli eventi”, la superficie in corrispondenza della quale la gravità è così intensa che la stessa luce entra in orbita chiusa e il tempo si ferma: un vero strappo nello spaziotempo. Questa osservazione consentirà la prima dimostrazione sperimentale di un famoso teorema secondo il quale i buchi neri “non hanno capelli”, il che significa che non è possibile distinguere un buco nero da un altro se non per la sua massa, la sua carica e la velocità con cui ruota (più precisamente il suo momento angolare). Sempre che il buco nero sia quello che tutti pensiamo e non sia invece un oggetto stravagante di cui non sospettiamo neanche l'esistenza! Ancora più affascinante

è la prospettiva di osservare il sistema binario formato da due buchi neri giganti. Di alcuni di questi potremo osservare tutta l'evoluzione, fino alla coalescenza in un unico buco nero più grande. Di nuovo un incredibile laboratorio gravitazionale. Seguendo tutto l'evolversi del segnale i fisici pensano di poter dimostrare anche un altro teorema: qualunque cosa succeda, l'area dell'orizzonte del buco nero finale è più grande dell'area dei due costituenti. Questo teorema è considerato l'estensione del secondo principio della termodinamica all'Universo: quando un buco nero ingloba dell'informazione fisica la sua superficie cresce sempre, comportandosi come l'entropia della termodinamica classica.

Il segnale gravitazionale di un sistema binario fornisce anche una misura della distanza fra l'osservatore e la sorgente. Quello prodotto da una coppia di buchi neri giganti è visibile a Lisa anche quando questi sono ai confini dell'Universo osservabile: ecco inaugurata la cosmologia gravitazionale, una mappa dell'Universo le cui distanze sono misurate per la prima volta in modo diretto.

Quanti segnali di questo tipo potrà osservare Lisa nei suoi 5-10 anni di operazioni?

La previsione fa girare la testa: in una visione pessimistica saranno centinaia. Ma con una simile capacità di osservazione, chissà quali altre scoperte ci potranno aspettare.

Non vorrei ora raffreddare l'entusiasmo di chi legge, ma a questo punto è lecito domandarsi se Lisa sia tecnicamente fattibile. Se lo sono chiesto anche l'Esa (Agenzia Spaziale Europea) e

**b.**

Il principio di funzionamento di Lisa. Tre interferometri laser misurano continuamente le distanze fra tre coppie di masse di prova che galleggiano liberamente all'interno di tre satelliti. Il sistema orbita intorno al Sole alla stessa distanza a cui si trova la Terra, ma spostato di 20° rispetto a questa.

**c.**

Ognuna delle sei masse in oro-platino è alloggiata all'interno di un sensore di posizione come quello mostrato in figura.

la Nasa (National American Space Agency) che prevedono di realizzare Lisa in stretta collaborazione. In realtà, la domanda corretta da porsi è: “sarà possibile mettere due masse in effettiva caduta libera e misurarne la distanza relativa con la precisione necessaria?” Proviamo a farci un'idea delle quantità in gioco: il peso di un microbo sulla superficie terrestre supera di mille volte il massimo disturbo tollerabile su uno dei cubi di oro-platino, e i 5 milioni di chilometri che li separano devono essere misurati con precisioni del miliardesimo di millimetro! Nulla del genere è stato mai tentato prima, e in laboratorio, a causa dei disturbi a cui è soggetto, i ricercatori sono riusciti a riprodurre solo una situazione da cento a mille volte peggiore del necessario. Per questo, l'Esa, con un contributo della Nasa, ha deciso di dedicare un'intera missione alla dimostrazione della fattibilità di Lisa. Lisa Pathfinder, di cui l'Infn, con il sostegno dell'Asi (Agenzia Spaziale Italiana), ha la responsabilità scientifica, porterà in orbita interplanetaria una versione in miniatura di uno dei bracci di Lisa: due cubi di oro-platino in caduta libera all'interno di un satellite e posti a una distanza, inizialmente di 40 centimetri, continuamente misurata da un interferometro laser con la precisione richiesta. Lisa Pathfinder volerà nel 2010 e se tutto va bene, Lisa inaugurerà la fisica gravitazionale dell'Universo profondo.

**d.**

Visione di artista di Lisa: la formazione triangolare dei satelliti è in primo piano. Sullo sfondo: le onde gravitazionali create da un buco nero al centro di una galassia.

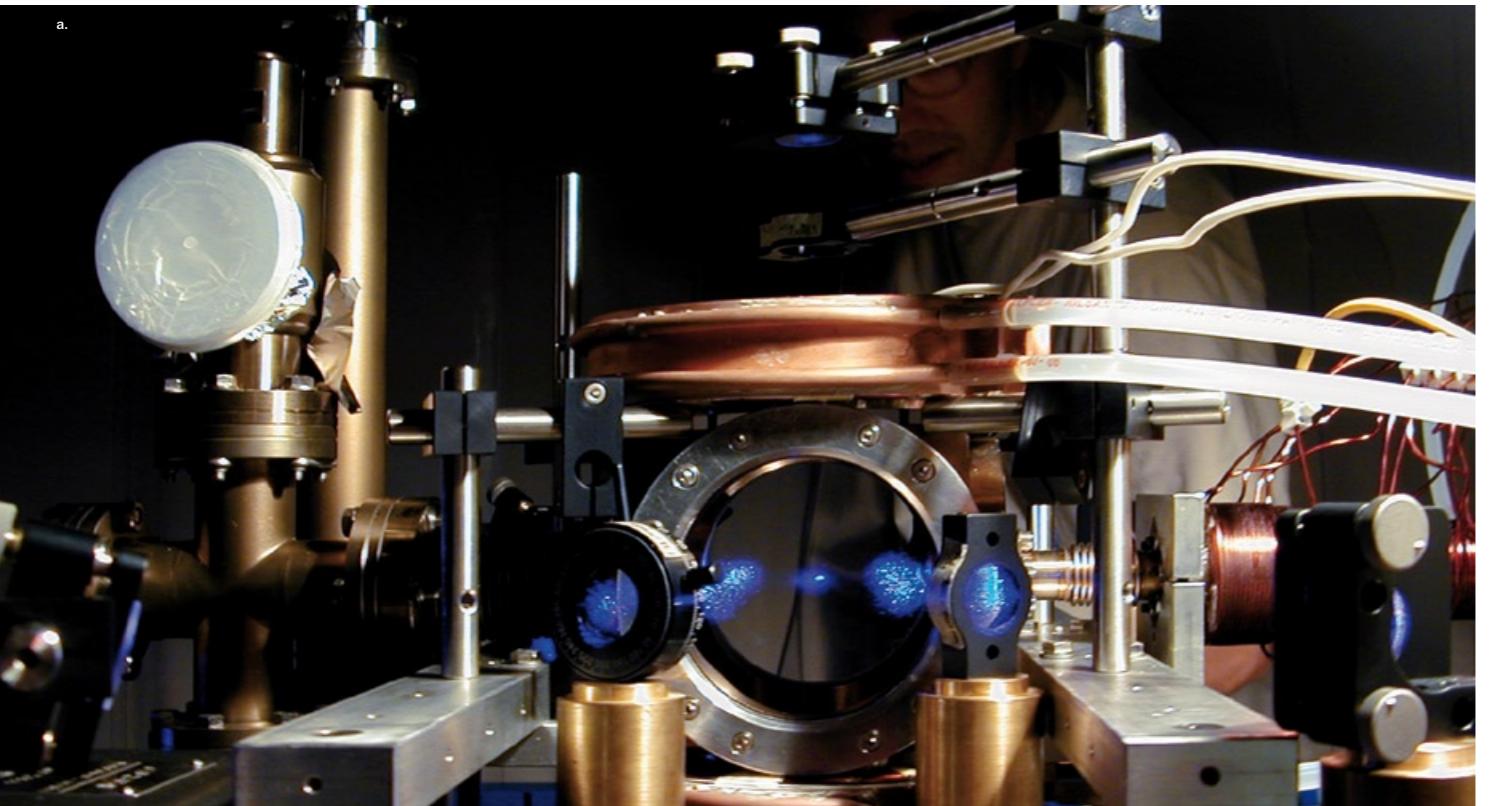
**Biografia**

**Stefano Vitale** è professore di fisica sperimentale alla facoltà di ingegneria dell'Università di Trento. È il Principal Investigator di Lisa Pathfinder ed è membro del Lisa International Science Team.

È membro dell'Advisory Committee for Human Flight and Exploration dell'Esa e del S&T Advisory Committee di Virgo. È stato membro fondatore dell'Esperimento Auriga.

**Link sul web**

- <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=27>
- <http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=40>
- <http://lisa.nasa.gov/>
- [http://math.ucr.edu/home/baez/LISA\\_orbit.gif](http://math.ucr.edu/home/baez/LISA_orbit.gif)
- [http://www.physics.montana.edu/LISA/wave\\_animate.gif](http://www.physics.montana.edu/LISA/wave_animate.gif)



# Una Magia da fisici

Una fontana di atomi  
per misurare la gravità.

di Guglielmo M. Tino

La misura di  $G$ , la costante gravitazionale di Newton, è ancora oggi dopo duecento anni dal primo esperimento in cui è stata ottenuta (quello di Cavendish nel 1798), una delle maggiori sfide della fisica sperimentale. La forza gravitazionale infatti è una forza estremamente debole e in più non può essere schermata: non possiamo cioè eliminare le perturbazioni provocate dai corpi vicini agli strumenti di misura.

Le stesse difficoltà riguardano la verifica sperimentale della legge di gravitazione universale di Newton, che ci dice come varia la forza di attrazione gravitazionale che un corpo esercita su un altro in funzione della loro distanza. La legge di Newton descrive splendidamente il moto dei pianeti attorno al Sole, ma potrebbe non valere più a distanze microscopiche, come suggeriscono ad esempio

le recenti teorie delle extra-dimensioni (vd. pp. 41-43, ndr). A causa della sua debolezza, l'interazione gravitazionale infatti non è mai stata misurata a distanze micrometriche. L'esperimento Magia dell'Infn, misurando l'accelerazione dovuta al campo gravitazionale generato da una massa nota, può dare risposte nuove a entrambi questi problemi. Utilizza infatti una tecnica completamente diversa da quelle utilizzate finora: l'interferometria atomica. Sviluppatasi in ambiti della fisica molto distanti da quelli che usualmente studiano la gravità e perfezionatasi straordinariamente negli ultimi anni, l'interferometria atomica è legata alla natura doppia, corpuscolare e ondulatoria, di tutti i costituenti della materia, compresi gli atomi. Così come in un interferometro ottico un'onda luminosa viene separata e ricombinata per osservare le frange di interferenza, anche gli atomi in certe condizioni possono essere trattati come onde. Possiamo allora "dividerli" in più parti che si propagano separatamente e che vengono riflesse e ricombinate, osservando delle "figure" di interferenza atomica. Per fare ciò però è necessario rallentare gli atomi da una velocità di alcuni km/s, tipica di un gas a temperatura ambiente, fino a velocità di pochi mm/s, corrispondenti a temperature bassissime, di qualche miliardesimo di grado kelvin. È tramite la luce laser che gli atomi vengono raffreddati, "intrappolati" e quindi fatti interferire, come hanno dimostrato recenti risultati premiati dal Nobel (nel 1997 a S. Chu, C. Cohen-Tannoudji e W. Phillips e nel 2001 a E. Cornell, W. Ketterle e C. Wieman). Per misurare la costante di Newton, Magia utilizza come sonda gravitazionale una

"fontana" di atomi di rubidio raffreddati e lanciati verticalmente in una camera ad alto vuoto. Una massa di circa 500 kg di tungsteno posta a una distanza di alcuni centimetri dagli atomi, genera una variazione dell'accelerazione degli atomi oltre 10 milioni di volte più piccola dell'accelerazione terrestre  $g$ . Nonostante questo valore sia minimo, esso può essere misurato con elevata precisione, rivelando lo spostamento della "figura" di interferenza atomica in funzione della posizione delle masse. Da questa misura possiamo risalire al valore di  $G$ , con una precisione migliore di 100 parti per milione che rappresenta il limite attuale. Un analogo interferometro, usando questa volta atomi di stronzio, viene impiegato per effettuare una misura accurata del campo gravitazionale di una piccola massa sorgente. Sarà così possibile per la prima volta studiare la forza di gravità a distanza di pochi micrometri e porre dei limiti sull'esistenza e sull'estensione di dimensioni supplementari nel nostro universo. I sensori atomici potrebbero essere utilizzati in futuro anche per altri esperimenti, per esempio, per rivelare le onde gravitazionali a frequenze non raggiunte dagli interferometri ottici (al di sotto di 1 Hz) o per possibili test nello spazio della relatività generale. Con gli stessi gravimetri atomici, sviluppati per la ricerca fondamentale, potrebbero infine essere rivelati i piccolissimi segnali gravitazionali prodotti dai movimenti magmatici del sottosuolo prima di un'eruzione vulcanica, permettendoci di prevederla. È per questo scopo che a Firenze si sta realizzando un interferometro atomico compatto e trasportabile.

a.  
Esperimento Magia. Atomi "intrappolati" nella camera ad alto vuoto tramite la radiazione laser e utilizzati per le misure gravimetriche.

## Biografia

**Guglielmo M. Tino** insegna fisica atomica all'Università di Firenze. È responsabile per l'Infn dell'esperimento Magia. I suoi interessi scientifici riguardano principalmente test di fisica fondamentale. Ha lavorato a Parigi nel laboratorio diretto da C. Cohen-Tannoudji e a Boulder nel Colorado presso il laboratorio diretto da E. Cornell.

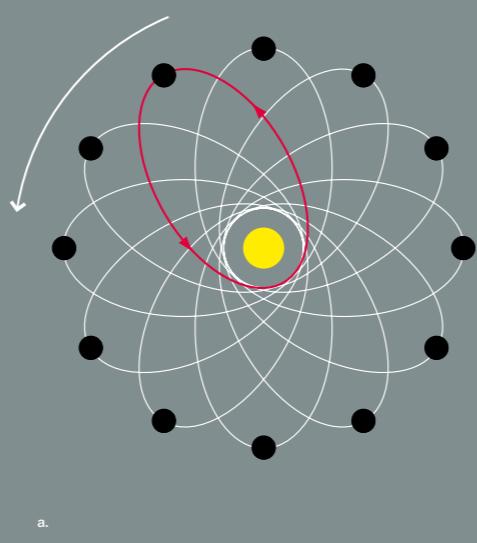
## Link sul web

[www.lens.unifi.it/tino](http://www.lens.unifi.it/tino)

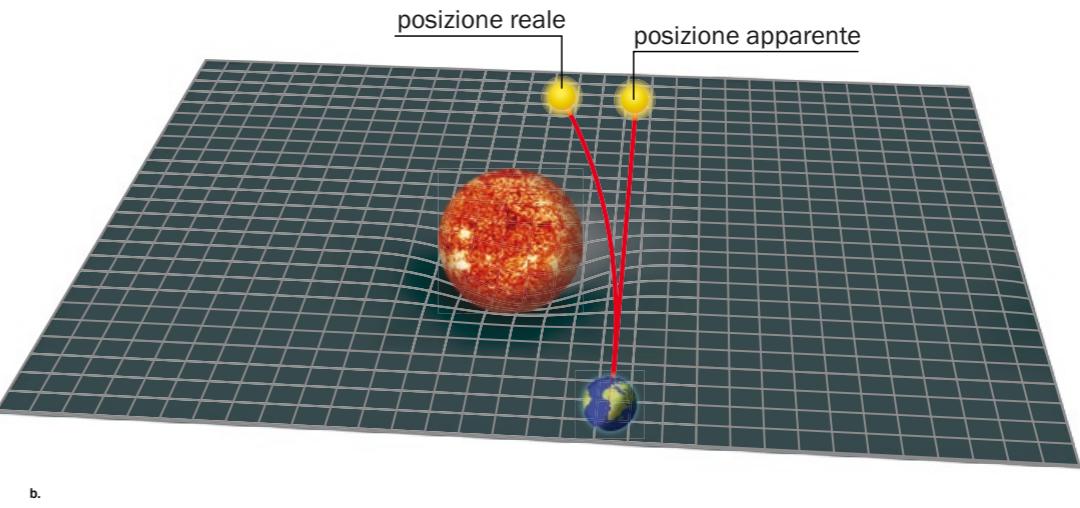
# Einstein sotto esame

Alcune verifiche sperimentali della teoria della relatività.

di Danilo Babusci



a.



b.

a.  
A causa dell'effetto perturbante degli altri pianeti, l'orbita di un pianeta ruota lentamente su se stessa, assumendo la caratteristica forma a "rosetta" riprodotta in figura. L'effetto è molto piccolo: ad esempio, nel caso di Mercurio il tempo necessario perché l'ellisse compia una rotazione completa è di 23.143 anni terrestri.

b.  
La luce viene deviata quando si propaga nella distorsione dello spaziotempo dovuta al campo gravitazionale di un oggetto di grande massa come il Sole. La posizione apparente della stella risulta dunque spostata rispetto a quella reale: questo spostamento è visto dalla Terra sotto un angolo molto piccolo, pari a quello sotto cui vedremmo una moneta di un euro da una distanza di circa 2,5 km.

Nel scorso secolo, con la sua teoria della relatività generale, Einstein ha rivoluzionato la fisica. Come tutte le teorie fisiche, anche la relatività è stata sottoposta a varie verifiche sperimentali. Vediamone alcuni esempi.

## La precessione del perielio di Mercurio

In base alle osservazioni astronomiche, nei primi anni del '600 Kepler fu in grado di stabilire che l'orbita descritta da un pianeta del sistema solare è un'ellisse, con il Sole che ne occupa uno dei fuochi. Assumendo che un pianeta sia soggetto solo all'attrazione gravitazionale del Sole, il risultato di Kepler si ottiene facilmente per via matematica nell'ambito della teoria di Newton.

Ma anche gli altri pianeti esercitano un'attrazione gravitazionale sul pianeta in questione.

Qual è l'effetto della loro presenza? Se si ripete il calcolo tenendo conto di questa complicazione, si scopre che l'attrazione esercitata da tutti gli altri pianeti del sistema solare sul pianeta in questione induce un avanzamento (una precessione), orbita dopo orbita, del perielio (il punto di massimo avvicinamento al Sole dell'orbita del pianeta). Anche la precessione

dell'asse di rotazione terrestre dà luogo allo stesso effetto. Ad esempio, il perielio di Mercurio si sposta leggermente alla velocità di 5.600 secondi d'arco (circa 1,6°) per secolo, nella stessa direzione in cui il pianeta ruota intorno al Sole. Tuttavia, tolto il contributo della precessione terrestre (5.025 secondi d'arco), quello dovuto all'attrazione degli altri pianeti, se calcolato secondo la fisica newtoniana, non è in grado di predire correttamente ciò che accade nella realtà: nel bilancio mancano 43 secondi d'arco.

Gli astronomi del XIX secolo tentarono di spiegare questa discrepanza tramite l'effetto perturbante di un pianeta, Vulcano, fino allora sfuggito all'osservazione, più piccolo di Mercurio e più vicino di questo al Sole. La ricerca di questo pianeta si rivelò, però, infruttuosa.

La svolta si ebbe nel 1915, quando

Einstein applicò la versione definitiva della sua teoria della gravità al calcolo dell'orbita di Mercurio. La relatività generale, infatti, riproduce esattamente la precessione osservata, recuperando i 43 secondi d'arco che mancano alla predizione newtoniana! Oltre a quella di Mercurio, in anni recenti si sono misurate con elevata precisione anche le precessioni di tutti gli altri pianeti

del sistema solare. E i risultati sono in ottimo accordo con la relatività generale.

## La deflessione gravitazionale della luce

Nella relatività generale la gravità è interpretata non come una forza, ma come la manifestazione della geometria dello spaziotempo. La Terra orbita intorno al Sole non a causa di un'imprecisa forza attrattiva, ma perché si muove in uno spaziotempo, distorto dalla presenza del Sole. È naturale quindi ipotizzare che la gravità influenzi non soltanto il moto dei corpi dotati di massa, ma anche la propagazione della luce.

Per confermare questa previsione, Einstein suggerì di misurare la deflessione subita dalla luce proveniente dalle stelle lontane che nell'arrivare a noi si trovano a passare radenti al disco solare. Secondo le sue equazioni questa deflessione doveva essere di 1,75 secondi d'arco.

Ma come possiamo osservare delle stelle vicine al Sole, senza che la sua luce accechi il nostro telescopio? Semplice... basta compiere l'osservazione durante un'eclissi solare, quando la Luna oscura la luce solare e le stelle divengono visibili: il Sole c'è... ma non si vede! L'esperimento consiste, quindi, nel

confrontare la posizione della stella durante l'eclisse con quella reale ottenuta osservando il cielo notturno sei mesi prima o dopo l'eclisse, quando il Sole e la stella si trovano dalla parte opposta rispetto a noi. Una differenza fra queste due posizioni è una prova diretta dell'effetto del campo gravitazionale del Sole sulla propagazione della luce. Le osservazioni vennero condotte nel 1919 dall'astronomo inglese Eddington e dai suoi collaboratori e lo spostamento delle stelle era chiaramente visibile e in accordo con la previsione teorica di Einstein.

Nell'astrofisica moderna le misure della deflessione della luce sono alla base della tecnica delle lenti gravitazionali per determinare la quantità di materia, visibile e oscura, presente all'interno degli ammassi di galassie (vd. n. 4 di Asimmetrie). Un altro test strettamente connesso alla deflessione della luce è quello noto come ritardo temporale di Shapiro, dal nome del fisico americano che lo propose nel 1964, ben 50 anni dopo la teoria di Einstein. Come osservato da Shapiro, secondo la relatività generale un segnale luminoso si propaga all'interno di un campo gravitazionale più lentamente di quanto

faccia nel vuoto. Quindi, se misuriamo il tempo che un segnale radar (radiazione eletromagnetica, al pari della luce) impiega a coprire la distanza tra due pianeti, questo tempo deve essere maggiore se lungo il tragitto il segnale è costretto a passare in prossimità del Sole. (In questa circostanza è trascurabile l'incremento nel tempo di percorrenza dovuto al fatto che la traiettoria, poiché curva, è più lunga). In particolare, per il tragitto Terra-Venere (e ritorno), quando i due pianeti sono da parti opposte rispetto al Sole, si misura un ritardo di circa 200 microsecondi (su un tempo di percorrenza totale di circa 1.000 secondi), in ottimo accordo con il calcolo di Shapiro.

## Il redshift gravitazionale della luce

Il fenomeno del redshift gravitazionale fu inizialmente proposto da Einstein come verifica della sua teoria della gravitazione, ma oggi è considerato, piuttosto, una prova del principio di equivalenza (vd. "Il principio di equivalenza", p. 37, ndr).

Consideriamo una lampada posta sulla punta di un razzo in accelerazione, che irradia (in direzione opposta al moto), ad esempio, un fascio di luce verde, che è osservato da un astronauta

seduto sul pavimento del razzo. A causa dell'accelerazione del razzo, la velocità dell'astronauta aumenterà nell'intervallo di tempo che intercorre tra l'emissione della luce e la sua osservazione. L'esistenza di un moto relativo tra ricevitore (l'astronauta) e sorgente (la lampada) al momento dell'emissione comporta uno spostamento verso il blu (*blueshift*) della luce, ovvero diminuisce la sua lunghezza d'onda e, quindi, aumenta la sua frequenza. L'astronauta vedrà dunque il fascio di luce di un verde un po' più tendente verso l'azzurro! Secondo il principio d'equivalenza, l'accelerazione dell'astronave è indistinguibile da un campo gravitazionale diretto verso il pavimento. Quindi, se sceglieremo per l'astronave un'accelerazione di  $9,8 \text{ m/s}^2$  la situazione che si presenta agli occhi dell'astronauta coincide con ciò che vede un osservatore sulla superficie della Terra che riceve la luce emessa da una lampada posta sul soffitto del laboratorio in cui si trova: la luce che "cade" in un campo gravitazionale, cioè si propaga verso la sorgente del campo, diminuisce la sua lunghezza d'onda. Viceversa, la luce che si "arrampica" in un campo gravitazionale, cioè si allontana dalla sorgente del campo,

[as]

## Tutto è relativo, anche il Gps

1. Illustrazione artistica del Gnss. Nel Gps-2 i satelliti si scambiano fra di loro e con le stazioni a terra fasci di microonde sferiche (in giallo). Grazie al tracciamento laser (in verde, p.es. dalla stazione dell'Agenzia Spaziale Italiana di Matera), alla cui calibrazione contribuisce anche l'Infn con un esperimento tecnologico interdisciplinare presso i Laboratori Nazionali di Frascati (Etrusco - Extra

*Terrestrial Ranging to Unified Satellite COstellations*) la posizione dei satelliti di Galileo sarà misurata con una precisione di circa un centimetro.

### Biografia

**Simone Dell'Agnello**, ricercatore presso i laboratori di Frascati, ha lavorato nella fisica delle particelle per circa 20 anni al Fermilab (nell'esperimento Cdf, tesi di dottorato sulla scoperta del quark top) e poi a Frascati (nell'esperimento Kloe). Dal 2005 si occupa di gravitazione, geodesia spaziale e navigazione satellitare.

### Link sul web

International GNSS Service (IGS)  
<http://igscb.jpl.nasa.gov/>

International Earth Rotation and Reference System Service (IERS)  
[www.iers.org/](http://www.iers.org/)



Se guardassimo la Terra dallo spazio, ci accorgerebbero che nella sua orbita si trovano oggi tantissimi satelliti. Molti di questi fanno parte del *Global Navigation Satellite System* (Gnss), comunemente noto sotto la vecchia sigla Gps (*Global Positioning System*). Questa tecnologia ci permette di conoscere l'esatta posizione di un oggetto sulla Terra, sul quale è installato un ricevitore Gps. Le applicazioni sono ormai note a tutti, ma non tutti sanno che senza la teoria della relatività generale di Einstein la tecnologia alla base del Gps non funzionerebbe correttamente.

Il Gps ha a bordo orologi atomici al cesio e rubidio precisi e affidabili, i cui tempi sono inviati alla velocità della luce ad altri satelliti e alla Terra. Conoscendo l'esatta posizione di quattro satelliti e il tempo impiegato dal segnale per raggiungere il ricevitore,

è possibile determinare la posizione nello spazio del ricevitore stesso. Tale procedimento è chiamato di *triangolazione*. Tuttavia, le triangolazioni non bastano, dato che gli orologi satellitari sono affetti dalle conseguenze della relatività. Il tempo sul satellite, infatti, scorre a un ritmo leggermente più veloce che a terra, perché la vicinanza di una grande massa fa rallentare gli orologi. D'altra parte, il tempo sul satellite, per un osservatore sulla Terra, scorre più lentamente, a causa degli effetti della relatività ristretta. Ma prevale l'effetto della relatività generale, rendendo necessaria una correzione automatica da parte dell'elettronica a bordo del satellite. Altrimenti, a causa della differenza tra lo scorrere del tempo sul satellite e sulla Terra, il calcolo della distanza tra il satellite stesso e il ricevitore introdurrebbe un errore

di quasi 25 m dopo due minuti e di quasi 18 km dopo un giorno (equivalente a due orbite complete del satellite)! Dato che l'effetto relativistico rilevato è esattamente corrispondente a quello calcolabile teoricamente, almeno nei limiti di accuratezza forniti dagli strumenti di misura attualmente disponibili, il Gps ci fornisce dunque un'ulteriore verifica sperimentale dell'esattezza della teoria della relatività. Attualmente sono operative due costellazioni di satelliti: il Gps-2 (statunitense) e il Glonass (russa) con 24 satelliti, rispettivamente all'altitudine di 20.000 e circa 19.000 km. A esse si aggiungerà nel 2012 l'europeo Galileo (30 satelliti) e più tardi ancora un rinnovato sistema di satelliti statunitense, il Gps-3. Gps, Glonass e Galileo formano il sistema di navigazione satellitare globale Gnss. [Simone Dell'Agnello]

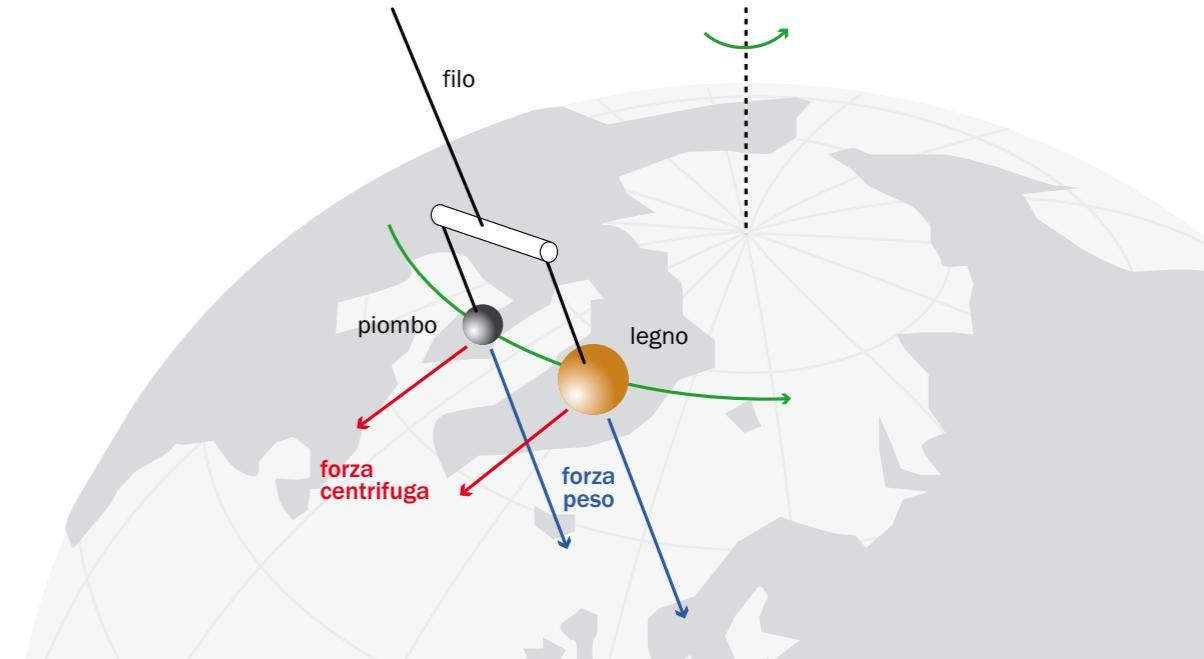
è spostata verso il rosso (redshift), ovvero aumenta la sua lunghezza d'onda e si parla di redshift gravitazionale della luce (la luce si "arrossa"). La verifica sperimentale dell'esistenza di tale redshift è stata eseguita per la prima volta dai fisici americani Pound e Rebka nel 1959. Nell'esperimento vennero usate due sorgenti radioattive ( $^{57}\text{Fe}$ ), che emettono fotoni di una energia fissata. Queste due sorgenti erano poste una in cima e l'altra alla base di una torre alta 22,5 m situata all'interno del campus dell'università di Harvard. Se non esistesse il blueshift gravitazionale, i fotoni che emette la sorgente in cima alla torre dovrebbero cadere nel campo gravitazionale terrestre

ed essere completamente assorbiti dalla sorgente posta alla base (tramite il processo inverso del decadimento). Ma questo non accadde. Si osservò, invece, che questo processo di assorbimento si verificava soltanto imprimendo alla sorgente in cima alla torre una certa velocità. Veniva così prodotto uno spostamento Doppler che compensava quello gravitazionale. Dalla velocità che occorreva impartire alla sorgente affinché si verificasse l'assorbimento fu poi possibile risalire al valore dello *shift* (spostamento) gravitazionale. Questo risultò in perfetto accordo con la previsione fornita dalla relatività generale, fornendo una sua ulteriore verifica sperimentale.

### Biografia

**Danilo Babusci** è ricercatore presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Ha speso parte della sua carriera scientifica nel campo della rivelazione delle onde gravitazionali sia con rivelatori risonanti (Nautilus ed Explorer) che interferometrici (Virgo).

1.



## [as] Il principio di equivalenza

1. La bilancia di torsione è costituita da due corpi di uguale massa gravitazionale (quindi dello stesso peso) e diversa composizione, allineati lungo un parallelo terrestre.

A causa della rotazione della Terra, i due corpi sono soggetti a una forza di tipo centrifugo proporzionale alla loro massa inerziale: se le due masse inerziali fossero diverse, anche le forze centrifughe

lo sarebbero e la bilancia sarebbe sottoposta a una torsione ruotando così attorno al filo. Questo violerebbe il principio di equivalenza: massa inerziale e massa gravitazionale non sarebbero uguali, né tra loro proporzionali.

Lasciate la penna: questa cade a causa della presenza del campo gravitazionale terrestre. Tale semplice osservazione non desta alcuna sorpresa. Immaginiamo ora di essere all'interno di un'astronave molto lontana da qualunque sorgente di gravità. Il motore è acceso e l'astronave sta viaggiando con accelerazione  $g$  uguale a quella dovuta alla gravità sulla superficie della Terra. Se lasciate la penna questa cadrà nella direzione opposta a quella in cui è diretta l'astronave con la stessa accelerazione che avrebbe sulla Terra. È quello che vi sareste aspettati? Stare seduti sul divano di casa vostra può essere esattamente uguale a essere seduti all'interno di un'astronave che viaggia con accelerazione costante.

Vediamo un altro esempio. Supponiamo di essere all'interno di un ascensore nella non auspicabile circostanza che il cavo si rompa. L'ascensore e il suo contenuto (voi compresi) sarà in caduta libera con accelerazione  $g$ : il pavimento non eserciterà alcuna forza su di voi e voi non eserciterete alcuna reazione su di esso, divenendo così privi di peso.

Se lasciate ciò che tenete in mano, questo rispetto a voi semplicemente non cadrà. È come se nel vostro sistema di riferimento la gravità fosse scomparsa, poiché tutto il sistema è sottoposto alla stessa accelerazione, pari a  $g$ . Il principio di equivalenza ci dice in effetti che una forza inerziale (ovvero una accelerazione costante) è in grado di simulare una forza gravitazionale e che d'altra parte un sistema di riferimento in caduta libera è del tutto equivalente a uno inerziale, in cui non sono presenti forze esterne. Il principio di equivalenza non costituisce un'acquisizione recente nella storia della scienza. Già Galileo ne aveva dato una prima formulazione dicendo che *tutti i corpi, indipendentemente dalla loro composizione,*

*cadono con la stessa accelerazione sotto l'influenza della gravità*. Ciò afferma implicitamente l'uguaglianza tra massa inerziale, ovvero la resistenza che un corpo offre alla variazione del suo stato di moto e massa gravitazionale, che è la "carica" o sorgente del campo gravitazionale. Infatti solo se queste due masse, che chiameremo  $m_i$  ed  $m_g$  sono uguali, la forza che l'attrazione gravitazionale esercita su corpi di natura diversa è tale da imprimer loro la stessa accelerazione (come si deriva dalla seconda legge di Newton  $F = ma$ ). Einstein elevò poi al rango di principio questa equivalenza, mostrando come ne derivasse che un sistema di riferimento in caduta libera è del tutto indistinguibile da uno inerziale.

Galileo fu quindi il primo a sostenere l'indipendenza della caduta dalla natura dei corpi e a porsi il problema di determinare *fino a che punto*  $m_i$  fosse numericamente uguale a  $m_g$ , ovvero di accrescere la precisione sperimentale a cui il principio di equivalenza risulta verificato.

Da Galileo e Newton, che effettuarono esperimenti con pendoli di diversa composizione, fino a von Eötvös, che alla fine dell'800 utilizzò invece delle bilance di torsione (vedi figura), l'accuratezza con cui la differenza tra  $m_i$  e  $m_g$  era misurata passò da una parte su mille a una parte su un miliardo. La stessa tecnica perfezionata è stata utilizzata fino ai giorni nostri, arrivando attualmente ad una precisione sperimentale della misura di una parte su 10.000 miliardi.

La verifica del principio di equivalenza d'altronde assume oggi un'ulteriore importanza, poiché ad esso viene ricondotta l'inconciliabilità tra la teoria della relatività generale di Einstein e il Modello Standard delle particelle elementari, che formano assieme la nostra attuale visione del mondo fisico.

# Galileo Galilei va nello spazio

Un piccolo satellite in orbita per provare le basi della relatività generale.

di Anna Nobili

Il principio di equivalenza viene verificato sperimentalmente sia utilizzando delle bilance di torsione, sia con misure di distanza Terra-Luna mediante raggi laser, grazie alle quali è possibile dedurre se la Terra e la Luna "cadono" nel campo gravitazionale del Sole allo stesso modo. I risultati indicano che la Terra attrae le masse sospese sulle bilance di torsione con uguale accelerazione, e così il Sole attrae la Terra e la Luna con uguale accelerazione. "Uguale" in queste misure significa che in ciascun caso il rapporto tra le accelerazioni differisce da uno per un valore piccolissimo: un numero preceduto da 13 o 14 zeri. Verifiche molto più precise sono possibili eseguendo l'esperimento all'interno di un satellite in orbita bassa attorno alla Terra: le masse di prova (che in questo caso sono dei cilindri) sarebbero analoghe a quelle di Galileo nel leggendario esperimento dalla torre di Pisa, salvo che in questo caso la "torre" sarebbe di altezza infinita! A causa dei brevi tempi di caduta, in realtà, lo stesso Galileo non lasciò cadere i corpi, ma usò dei pendoli e ne osservò le oscillazioni, come fece anche Newton dopo di lui.

Nei tre esperimenti spaziali proposti recentemente, l'americano Step (*Satellite Test of Equivalence Principle*), il francese Scope (*microScope*), in costruzione, e l'italiano GG (*Galileo Galilei*), i cilindri sono coassiali e concentrici, e dotati

di un sistema di lettura degli effetti di accelerazioni relative, quindi dell'uno rispetto all'altro. Tra queste ci si aspetta di rivelare anche quella dovuta ad una possibile violazione del principio di equivalenza, cioè al fatto che uno dei due cilindri sia attratto dalla Terra più o meno dell'altro a causa della diversa composizione. Un tale effetto si verificherebbe con la stessa frequenza con cui il satellite orbita attorno alla Terra, cioè una volta ogni 6.000 secondi circa. Perché la sensibilità dello strumento sia alta, occorre che i due cilindri siano "accoppiati" il più debolmente possibile, cioè risentano il meno possibile l'uno della presenza dell'altro (per molte ragioni usare cilindri totalmente liberi è svantaggioso). L'assenza di peso nello spazio permette accoppiamenti debolissimi, e quindi sensibilità molto maggiori che a terra. Lo strumento deve ruotare a frequenza maggiore di quella con cui il satellite orbita intorno alla Terra. In questo modo, un'eventuale violazione del principio di equivalenza si manifesta come un segnale di frequenza diversa da quella dei disturbi connessi al moto orbitale, e più alta, in modo da ridurre l'inevitabile rumore introdotto dall'elettronica di controllo dello strumento. Per questo, in GG l'asse di simmetria dei cilindri coincide con l'asse di simmetria di tutto il satellite che, ruotando velocemente su se stesso (completa un giro ogni mezzo secondo),

si stabilizza senza bisogno di controllo esterno. Tutto il sistema ruota insieme e i cilindri di prova sono sensibili nel piano perpendicolare all'asse, che è anche approssimativamente il piano dell'orbita. L'alta frequenza della rotazione consente così di eliminare molti disturbi. GG punta a verificare il principio di equivalenza con la precisione di una parte su  $10^{17}$ , il che richiede di misurare spostamenti tra i cilindri di circa un miliardesimo di millimetro. La sua struttura ha permesso la realizzazione di un prototipo a terra, in scala reale, dello strumento studiato per il volo. Si chiama GGG (*GG on the Ground-GGG*) ed è stato costruito alla sezione INFN di Pisa. I risultati sono significativi (si è arrivati a misurare spostamenti di circa un miliardesimo di metro) e verranno migliorati nei prossimi due anni con il supporto dell'ASI, l'Agenzia Spaziale Italiana, in preparazione del satellite GG.

## Biografia

Anna Nobili, docente di meccanica celeste e meccanica spaziale all'Università di Pisa. Responsabile nazionale degli esperimenti Galileo Galilei e Galileo Galilei on the Ground.

## Link sul web

<http://eotvos.dm.unipi.it/ggproject.html>

# Trascinati dalla gravità

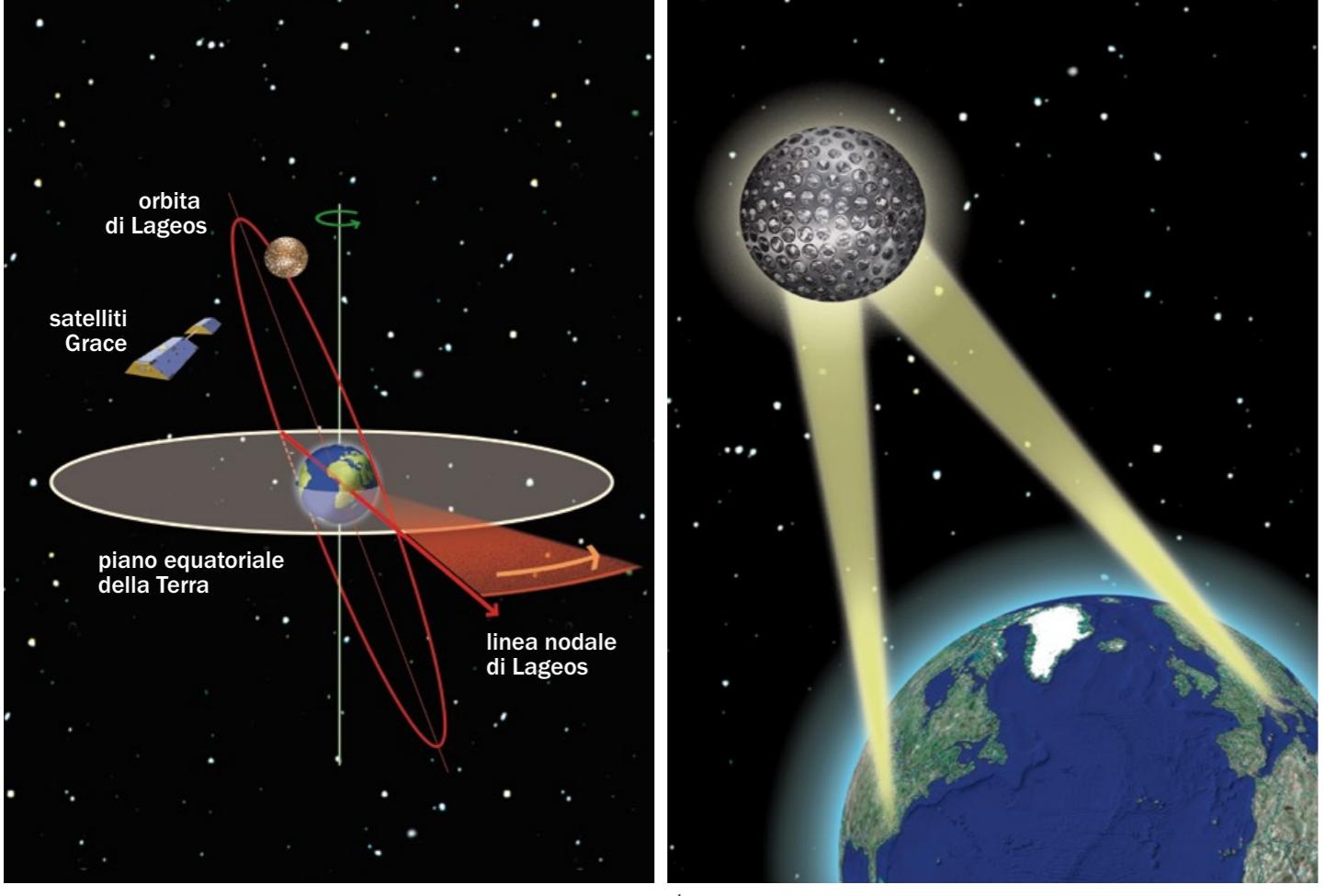
Grandi sfere ricoperte da specchi orbitano intorno alla Terra inseguite da fasci laser.

di Ignazio Ciufolini, Simone Dell'Agnello, Antonio Paolozzi

Nella meccanica di Galileo Galilei ed Isaac Newton i sistemi di riferimento inerziali sono completamente indipendenti dai corpi celesti (mentre il concetto di spazio assoluto è dovuto a Newton). Nella teoria della relatività generale di Einstein non ha senso parlare di un sistema di *riferimento inerziale assoluto*, ma soltanto di sistemi di riferimento inerziali *locali*. Inoltre, questi sistemi di riferimento locali sono influenzati dalle masse presenti nell'Universo ed i loro assi ruotano e cambiano orientazione a causa delle masse in movimento. La relatività generale e gli esperimenti ci insegnano che viviamo in uno spaziotempo curvo. Questa curvatura è generata dalle masse presenti nell'Universo, e quindi anche dalle masse del Sole e della Terra. La relatività generale, oltre a spiegare l'attrazione gravitazionale con la curvatura dello spaziotempo, prevede anche che un corpo ruotante come la Terra, proprio in virtù del suo momento angolare, generi una curvatura dello spaziotempo in aggiunta a quella dovuta alla sua massa. Come una carica elettrica in movimento genera un campo magnetico, che a sua volta può esercitare una coppia torcente su un momento di dipolo magnetico posto nelle vicinanze, così nella relatività generale una massa in rotazione genera un potenziale gravitazionale, che si aggiunge alla normale attrazione gravitazionale che tiene ad esempio la Luna e i satelliti artificiali in

orbita intorno alla Terra. Questo ulteriore potenziale produce una forza torcente, chiamata *gravitomagnetica*. Essa può esercitarsi su una massa posta nelle vicinanze e dotata di momento angolare orbitale (che ruoti come un satellite in orbita attorno alla Terra) o di momento angolare di spin (cioè rotante attorno al proprio asse). Il gravitomagnetismo, conseguenza matematica della relatività generale di Einstein del 1915-16, è stato formalizzato in maniera completa e precisa per la prima volta dai fisici Lense e Thirring nel 1918. Si racconta che Lense, descrivendo il fenomeno ad Einstein, conclusesse che questo confermava le sue idee (di Einstein) sul *trascinamento dei sistemi di riferimento inerziali* da parte delle masse in rotazione (*frame dragging*, come lo chiamava Einstein). Lense però pensava che nessuno potesse misurare questo effetto a causa della sua estrema piccolezza. Einstein, invece, osservò che, essendo l'effetto inversamente proporzionale al cubo della distanza, forse un giorno si sarebbe potuto misurarlo mediante un oggetto artificiale molto più vicino alla Terra. Ancora una volta Einstein aveva ragione: quest'oggetto è il satellite artificiale Lageos (*Laser GEodynamics Satellite*) della Nasa ( lanciato nel 1976), insieme al suo gemello Lageos II costruito dall'Alenia e lanciato dall'ASI, Agenzia Spaziale Italiana, e dalla Nasa nel 1992 (fig. a). I Lageos sono delle sfere metalliche

la cui superficie è coperta da specchi retro-riflettori. Essi sono seguiti da Terra da stazioni laser (fig. b a p. 40), come quella del Centro di Geodesia Spaziale dell'ASI a Matera, che ne calcolano la posizione misurando il tempo di andata e ritorno di impulsi laser (*laser ranging*), con un errore di circa 1 cm. Le loro orbite hanno un'altezza da Terra di circa 6.000 km ed è come se fossero effettivamente trascinate dalla rotazione della Terra lungo il piano equatoriale terrestre, con un effetto però di appena 2 metri l'anno. L'effetto Lense-Thirring è stato misurato coi Lageos nel 2004 con una precisione del 10% (risultato pubblicato su *Nature*). Un altro esperimento sofisticatissimo della Nasa, costato in tutto 760 milioni di dollari e concluso nel 2006, Gravib Probe B (GP-B), sta cercando di compiere la stessa misura utilizzando un giroscopio, ovvero una massa ruotante attorno al proprio asse, su un satellite artificiale. L'ASI, l'INFN e la Scuola d'Ingegneria Aerospaziale dell'Università La Sapienza di Roma (Sia) hanno in preparazione un nuovo esperimento a basso costo, Lares (*LAser RElativity Satellite*), complementare al Lageos, che misurerà il gravitomagnetismo con un errore relativo dell'1%. I contributi dell'INFN e della Sia sono la progettazione del satellite Lares e la completa caratterizzazione delle sue prestazioni ottiche e termiche in ambiente spaziale presso la "Space Climatic Facility"



a.

b.

dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. Lares effettuerà anche altri importanti test della gravità, come la rivelazione di ipotetiche nuove forze di debole intensità e a lungo raggio, diverse dalla gravitazione newtoniana, seppure questa sia valida con grande precisione per i satelliti artificiali, la Luna ed i pianeti del sistema solare.

Infine, due applicazioni tecnologiche importantissime dei LAGEOS sono la definizione della posizione del centro di massa della Terra (il geocentro) e di una scala delle lunghezze assoluta per le distanze planetarie, costituita dal raggio dell'orbita dei due satelliti. Il ruolo dei LAGEOS (e presto anche di Lares) in questo campo è quindi insostituibile.

#### Biografie

**Ignazio Ciufolini** professore dell'Università di Lecce è attualmente il Principal Investigator della missione spaziale Lares e ha misurato l'effetto Lense-Thirring con i satelliti LAGEOS. Assieme al fisico americano J. A. Wheeler ha scritto il libro "Gravitation and Inertia" (Princeton University Press, 1995).

**Antonio Paolozzi** è professore associato presso la Scuola di Ingegneria Aerospaziale dell'Università di Roma La Sapienza. Si occupa di sensori in fibra ottica, progettazione di satelliti e analisi delle vibrazioni delle strutture spaziali. Attualmente è associato all'Infn-Lnf dove lavora all'esperimento Lares e all'esperimento Cms.

#### Link sul web

Sito web dell'International Laser Ranging Service (Itrs)  
<http://ilrs.gsfc.nasa.gov/>

Sito web Nasa sulla misura del gravitomagnetismo con i LAGEOS  
[www.nasa.gov/vision/earth/lookingearth/earth\\_drag.html](http://www.nasa.gov/vision/earth/lookingearth/earth_drag.html)

Sito web dell'esperimento della Nasa Gravity Probe B  
<http://einstein.stanford.edu/>

# Oltre la quarta dimensione

Gravità quantistica, superstringhe ed extra dimensioni per raccontare l'universo dell'infinitamente piccolo.

di Leonardo Castellani

La forza di gravità è di gran lunga la più debole delle quattro interazioni fondamentali: a distanze atomiche o molecolari risulta quindi del tutto trascurabile rispetto alle forze nucleari ed elettromagnetiche. Tuttavia, a distanze macroscopiche la gravità diventa la forza dominante, determinando il nostro peso, la forma e la struttura del sistema solare, delle galassie e, più in grande ancora, del nostro Universo.

Su dimensioni che vanno dalla scala cosmica al decimo di millimetro, tutti i fenomeni gravitazionali noti sono magnificamente descritti dalla teoria della relatività generale di Einstein, che si riduce alla teoria classica di Newton (le leggi della meccanica a cui facciamo normalmente riferimento) per velocità molto minori di quella della luce e campi gravitazionali deboli. La stessa teoria, però, non ci dice che cosa succede a scale estremamente piccole o, il che è equivalente, a energie estremamente alte: per questo è necessario costruire una teoria quantistica del campo gravitazionale. Lo stesso percorso ha guidato la quantizzazione delle altre interazioni fondamentali (elettromagnetica, debole e forte) fino alla costruzione del cosiddetto Modello Standard delle particelle elementari, che descrive con successo tutti i "mattoni

fondamentali" della materia e i mediatori dell'interazione nucleare forte ed elettrodebole.

Ma perché ci interessa la gravità su scala ultramicroscopica? La risposta è proprio nella teoria della relatività generale, che prevede situazioni in cui l'Universo stesso è racchiuso in dimensioni microscopiche con un'elevatissima densità di energia. Una condizione simile, ad esempio, è quella del nostro Universo subito dopo il Big Bang, circa 13,5 miliardi di anni fa, e gli effetti di gravità quantistica sono essenziali per spiegarne l'evoluzione.

In tutte le teorie quantistiche, i processi che descrivono le interazioni tra particelle sono di tipo probabilistico e le probabilità, per avere significato fisico, devono assumere valori finiti, al massimo pari a uno (la teoria, cioè, deve essere *normalizzata*). Tuttavia, il carattere puntiforme delle interazioni tra particelle elementari porta a delle divergenze, ossia probabilità di valore infinito, che per il Modello Standard è possibile eliminare con la cosiddetta procedura di *rinormalizzazione*. Nel caso della teoria quantistica del campo gravitazionale, però, le divergenze sono ineliminabili. Come già proposto da Gabriele Veneziano, fisico italiano al Cern di Ginevra, buona parte dei fisici teorici ritiene che il

problema delle divergenze possa superarsi con la teoria delle stringhe: oggetti unidimensionali, come lacci chiusi o aperti, di estensione molto piccola, le cui interazioni non sono puntiformi e non provocano quindi la comparsa di infiniti. Le stringhe possono vibrare (fig. b a p. 42) come le corde di un violino e a ogni "nota" vibrata corrisponde una particella elementare: un singolo modo vibrazionale di un unico oggetto fondamentale, la stringa. Il passaggio da particella puntiforme a stringa implica quindi l'unificazione di tutte le particelle elementari. Tra i diversi modi di vibrazione compare anche il gravitone, il quanto del campo gravitazionale, che risulta così compreso in una teoria quantistica che unifica la gravitazione alle altre forze fondamentali.

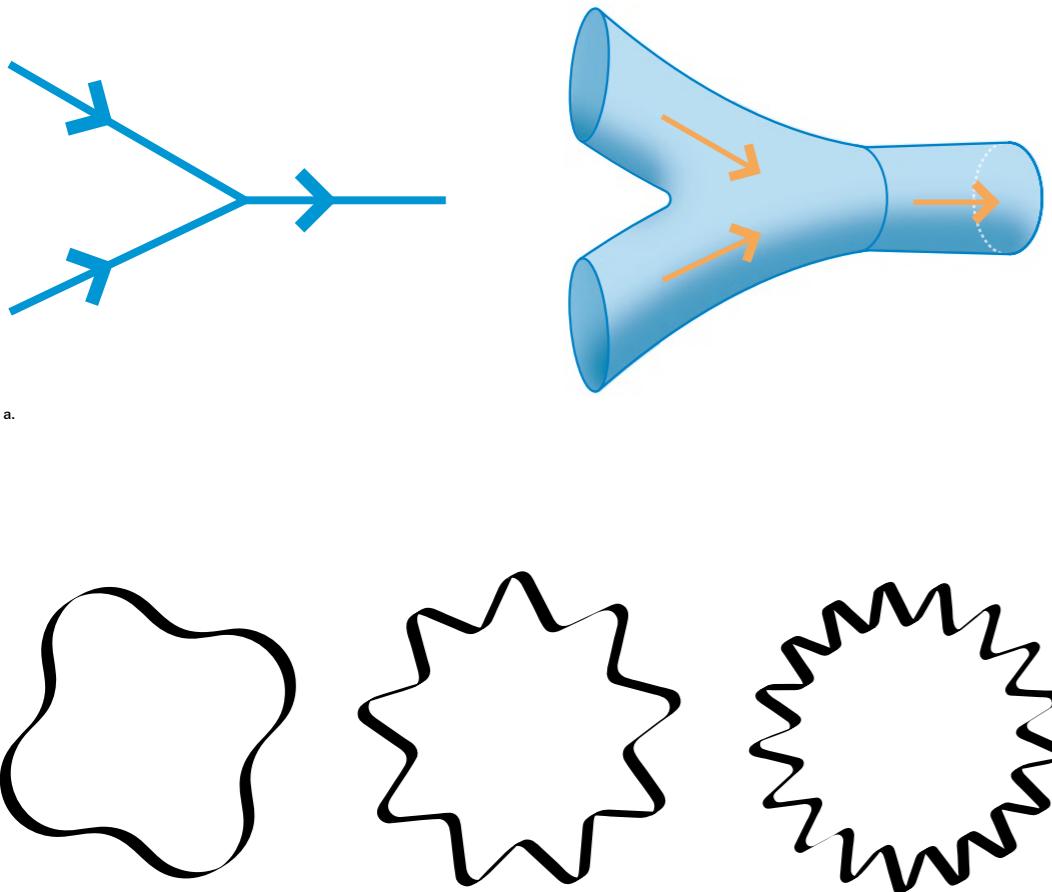
Avendo un'estensione estremamente ridotta (dell'ordine della lunghezza di Planck, pari a  $10^{-36}$  m), le stringhe appaiono come particelle puntiformi anche ai nostri microscopi più potenti, cioè i grandi acceleratori capaci di sondare distanze fino a un miliardesimo di miliardesimo di metro. Che cosa prevede la teoria delle stringhe a questa scala? Le stringhe, che appaiono puntiformi, riescono a riprodurre correttamente l'insieme di particelle e di interazioni del Modello Standard?

Su questo problema stanno lavorando molti gruppi di ricerca, e i risultati ottenuti, seppure incoraggianti, non permettono ancora una risposta definitiva.

A bassissime energie, nel *limite classico* in cui spariscono gli effetti quantistici, la teoria delle stringhe contiene effettivamente il campo elettromagnetico (con le sue generalizzazioni, previste dal Modello Standard) e il campo gravitazionale della relatività generale. In questo limite, la teoria ha ispirato la costruzione di nuovi e interessanti modelli cosmologici. In quanto teoria quantistica, essa soffre del fatto (comune anche al Modello Standard) che le sue predizioni possono essere calcolate solo in modo approssimato, tramite la cosiddetta *teoria delle perturbazioni*. Pur con queste difficoltà, tuttavia, la teoria delle stringhe ha potuto dare una prima spiegazione microscopica della termodinamica dei buchi neri. Essa, inoltre, prevede fenomeni nuovi, i cui effetti potrebbero essere rilevati con il nuovo acceleratore di particelle Lhc (*Large*

*Hadron Collider*) che entrerà in funzione al Cern di Ginevra nel 2008. Le previsioni della teoria delle stringhe includono:

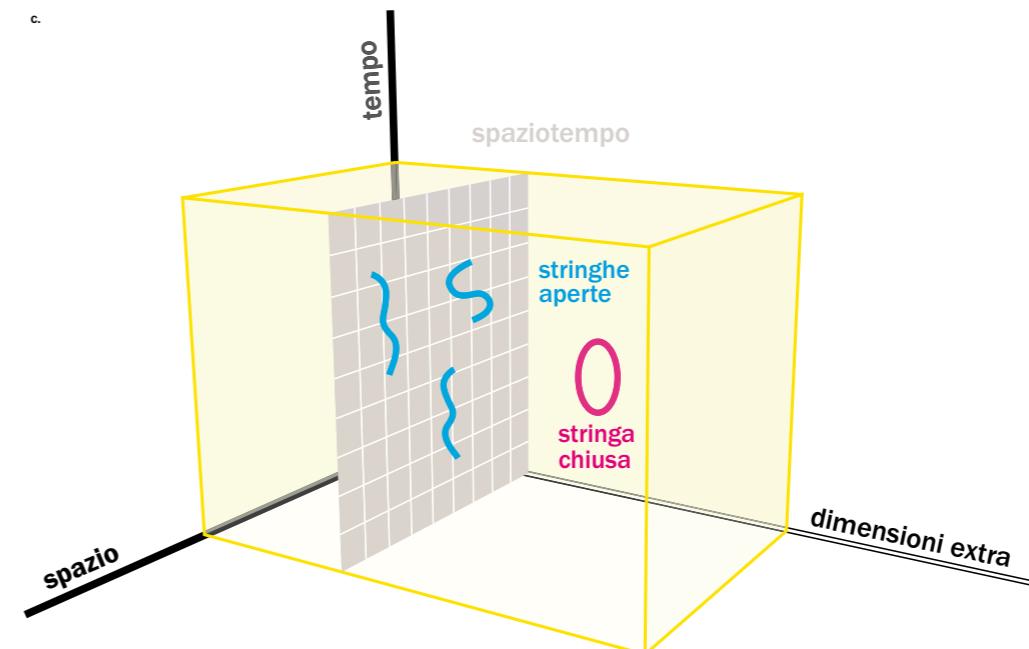
**1.** Una nuova simmetria della natura, chiamata *supersimmetria*. Essa agisce tra *bosoni* (ad esempio i fotoni e i gluoni, mediatori rispettivamente dell'interazione elettromagnetica e forte) e *fermioni* (come quark e leptoni, i mattoni fondamentali di tutta la materia) scambiando gli uni con gli altri: se la simmetria fosse esatta, per ogni bosone dovrebbe esistere un fermione di uguale massa. Tuttavia, questo non si verifica per le particelle elementari descritte dal Modello Standard e osservate negli esperimenti, il che implica una rottura della supersimmetria, come succede già per altre simmetrie del Modello Standard. Il meccanismo di questa rottura rappresenta una delle principali difficoltà nel confronto con i dati sperimentali. Pur non verificata sperimentalmente, la supersimmetria è un ingrediente matematico



b.

a.  
A sinistra: interazione puntiforme di tre particelle.  
A destra: la zona d'interazione di tre stringhe è estesa e non puntiforme.

b.  
Modi di vibrazione di stringhe chiuse.



necessario nella teoria delle stringhe (da qui il termine "superstringhe"): essa prevede l'esistenza di nuove particelle, compagne *supersimmetriche* di quelle descritte nel Modello Standard, che potremo forse rivelare alle energie accessibili a Lhc. A basse energie le superstringhe riproducono la *supergravità*, che generalizza la gravità di Einstein con l'aggiunta del *gravitino*, il fermione partner supersimmetrico del gravitone.

**2.** Dimensioni "nascoste" dello spaziotempo. Per essere matematicamente consistente, la teoria quantistica delle superstringhe deve avere 6 dimensioni spaziali "extra" oltre alle 4 dello spaziotempo usuale. Queste dimensioni extra sono compatte, cioè arrotolate su se stesse: per esempio possono descrivere dei piccolissimi cerchi o sfere, ma anche infiniti altri spazi compatti, osservabili solo a energie molto elevate o a distanze infinitesime. A tutte queste "compattificazioni" corrispondono particolari proprietà per le particelle a basse energie, ed è possibile trovare particolari spazi 6-dimensionali a cui corrispondono proprietà molto simili a quelle del Modello Standard. È però ancora del tutto ignoto il meccanismo con il quale la teoria "sceglie" un particolare spazio 6-dimensionale.

**3.** Modifiche alla legge di Newton. La teoria delle stringhe include anche altri oggetti estesi multidimensionali, le cosiddette p-brane (membrane p-dimensional), e recentemente è stata avanzata l'ipotesi che lo spaziotempo usuale sia proprio una 4-brana fluttuante in uno spazio a 10 dimensioni, nel quale le 6 dimensioni extra siano "permeabili" solo alla forza gravitazionale. In questo caso, si prevedono deviazioni dalla legge di Newton su scala submillimetrica, che sono attualmente sotto investigazione da parte di numerosi gruppi sperimentali.

#### Biografia

**Leonardo Castellani** è professore di fisica teorica presso l'Università di Torino e presso la facoltà di scienze dell'Università del Piemonte Orientale, di cui è preside dal 2004. Ha conseguito il Ph.D. in fisica teorica presso l'Institute for Theoretical Physics dell'Università di Stony Brook (New York) e ha lavorato al Lauritsen Lab del Caltech e al Cern di Ginevra.

#### Link sul web

<http://scienzapatutti.Inf.infn.it/string/percorso/isola.swf>  
<http://superstringtheory.com/>



# [as] con altri occhi

## L'infinito a portata di mano.

di Andrea Camilleri

Con grandissimo dispiacere di mio padre, che era fisico-matematico, arrivai alla terza liceo che ancora non sapevo memorizzare le tabelline. Figuratevi se potevo affrontare la trigonometria o la fisica! La mia professoressa, rendendosi conto che ero assolutamente negato, fece con me un patto: mi avrebbe dato la promozione col sei se in tutte le altre materie scolastiche avessi avuto almeno sette. Rispettai il patto e lei lo rispettò. Fortunatamente non dovetti sostenere il terribile esame di maturità perché, nell'aprile del 1943, gli eserciti alleati erano alle porte della Sicilia, sentivamo il rombo delle cannonate su Lampedusa, e quindi fummo giudicati per scrutinio. Venni promosso e da lì a due mesi, chiamato alle armi con un anno d'anticipo, mentre gli alleati sbucavano, sostenni il mio vero esame di maturità alla vita. Devo confessare che, col trascorrere degli anni, ho sempre più rimpianto di non essere mai riuscito a capire nulla di matematica e fisica. Ho persino tentato di leggere libri divulgativi che anche un bambino di sette anni riusciva a comprendere, niente da fare. Con l'età, ho cominciato a giudicare questa mia incapacità come una vera e propria menomazione connaturata, una malformazione di nascita, un brutto handicap che m'impediva una più ampia comprensione del mondo. La discreta conoscenza letteraria della quale sono in possesso riesce infatti solo a spiegarmi, in parte, i comportamenti umani, i loro complessi rapporti con gli altri e con la società, ma non riesce minimamente a illuminarmi su elementari fenomeni quotidiani come il sole, l'aria, la luce, la terra, il fuoco. Sono insomma un rappresentante mezzo cieco di una delle due culture, per parafrasare un titolo di Snow, che anela ormai invano a conoscere un minimo, un qualcosa, dell'altra cultura perché pensa che ne uscirebbe enormemente arricchito. Così, per rifarmi, assiduamente leggo le pagine scientifiche dei giornali e, per quel poco che riesco a capirci, m'entusiasmo ad ogni nuova scoperta, a ogni

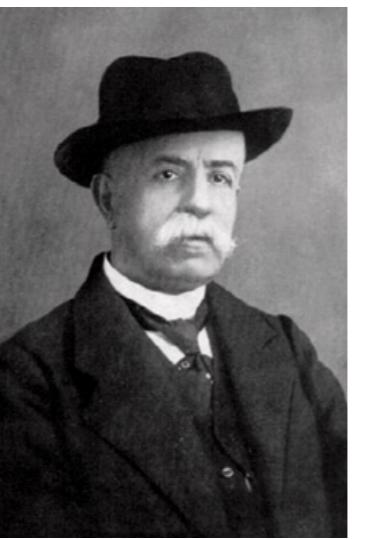
nuova avventura scientifica. Sono come un tifoso che esulta a bordo campo ma non saprebbe calciare un pallone. Perciò la prima volta accolsi con entusiasmo l'invito a visitare i laboratori del Gran Sasso. Ci entrai, lo confesso, con un certo batticuore che si accentuò non appena mi resi conto della vastità incredibile di quei laboratori sotterranei. La prima impressione che ne ebbi fu quella di vedere tre enormi cattedrali viventi messe l'una accanto all'altra. Io, che non sono credente, ne ebbi come un senso di religiosità laica. Tanto che, fumatore accanito come sono, spontaneamente, per rispetto, mi passò la voglia d'infilarmi una sigaretta in bocca, non avevo bisogno d'obbedire ai grandi cartelli sui quali c'era scritto ch'era vietato fumare. Mentre mi parlavano delle ricerche in corso, tra le quali una che avrebbe spedito dei neutrini da Ginevra, io mi incantavo dietro agli stupendi nomi coi quali venivano designate le varie ricerche, nomi certamente attinenti alle diverse specificità, ma che mi aprivano la fantasia, me la liberavano, mi trasformavano le grandi apparecchiature in immense suggestioni in grado di trasportarmi in un fantastico viaggio verso il Sole e le stelle, assai più che delle comuni astronavi. Da lì a poco mi trovai commosso fino alle lacrime. Fu quando mi venne spiegata l'importanza fondamentale di una certa quantità di piombo ritrovata in una nave romana affondata oltre duemila anni fa: quell'antico piombo aveva permesso di studiare meglio i neutrini. In quel momento compresi che dentro quel laboratorio era il tempo stesso a concretizzarsi, a rappresentarsi interamente nel suo passato, nel suo presente e nel suo futuro. Ci sono tornato una seconda volta, mi hanno fatto vedere la gigantesca apparecchiatura per la ricerca dei neutrini ormai in pieno corso, ancora una volta non ho avuto nessuna voglia di fumare. Mi sono ripromesso di tornarci almeno una terza volta. Perché? Perché mai come lì, sottoterra, in un ambiente chiuso, ho provato la sensazione vertiginosa di avere l'infinito a portata di mano.

# [as] radici

## Il linguaggio della relatività.

di Umberto Bottazzini

Professore di Storia della Scienza  
all'Università di Milano



a.



b.

Con una contemporaneità non rara nella storia della scienza, e non priva di ironia, visto che i loro lavori mettevano tra l'altro in discussione l'idea di simultaneità di eventi, nel 1905 Poincaré e Einstein hanno pubblicato articoli che, ancora in tempi recenti, hanno giustificato contrapposte interpretazioni sul loro ruolo nella scoperta e nella formulazione della teoria della relatività (ristretta). Se per alcuni controversa è la priorità, per tutti non c'è dubbio che l'idea di onda "gravifica" (o gravitazionale, come si dice oggi) venga per la prima volta formulata da Poincaré in quell'occasione. Basta leggere quanto egli scrive in quei due articoli *Sur la dynamique de l'électron*.

Dapprima mostra che le trasformazioni di Lorentz formano un gruppo, sottogruppo di quello che Wigner ha proposto di chiamare "gruppo di Poincaré", e che la forma quadratica  $x^2 + y^2 + z^2 - t^2$  è invariante per trasformazioni del gruppo. Se si pensa all'importanza delle proprietà gruppali delle trasformazioni di Lorentz, dimostrate da Poincaré e asserte da Einstein, si capisce perché Pauli abbia detto una volta che "il concetto di gruppo sta alla base della teoria della relatività

ristretta". Il concetto di gruppo sta anche alla base della geometria. Anzi, tutta la geometria non è altro che una faccenda di gruppi, come aveva affermato Poincaré nel 1880. Di gruppi di trasformazioni e dei relativi invarianti. Come lo è quella forma quadratica per il gruppo di Lorentz. Nell'ipotesi che tutte le forze, qualunque ne sia l'origine, comprese quelle gravitazionali, siano soggette alle trasformazioni di Lorentz, Poincaré indaga quali modifiche questa ipotesi comporti per le leggi della gravitazione.

Ed è a questo punto che introduce l'idea di onde "gravifiche", che si propagano alla velocità della luce. Annunciata nella breve nota del 5 giugno all'Accademia delle scienze di Parigi, la questione è ripresa con maggiore ampiezza nella lunga memoria del successivo 23 luglio, inviata per la pubblicazione nei Rendiconti del Circolo matematico di Palermo. Ma per essere decisa, aveva detto Poincaré in chiusura della sua nota, richiede una discussione approfondita. Come quella intrapresa qualche anno dopo da Einstein. "Al momento mi sto occupando esclusivamente del problema della gravitazione e ora credo che riuscirò

a superare tutte le difficoltà grazie all'aiuto di un amico matematico di qui. Ma una cosa è certa, in tutta la mia vita non ho mai lavorato tanto duramente, e l'animo mi si è riempito di un grande rispetto per la matematica, la parte più sottile della quale avevo finora considerato, nella mia dabbenaggine, un puro lusso. In confronto a questo problema, l'originaria teoria della relatività è un gioco da bambini". Siamo nell'ottobre del 1912 e Einstein è alle prese con i difficili problemi incontrati nel tentativo di giungere a una teoria relativistica della gravitazione. Da un paio di mesi Marcel Grossmann, l'"amico matematico", gli sta spiegando gli elementi di uno speciale calcolo, il "calcolo differenziale assoluto", per mezzo del quale Einstein, come confida a Arnold Sommerfeld, conta di riuscire a superare "tutte le difficoltà". L'impresa richiederà comunque ancora anni di duro lavoro. Quando, all'inizio del 1916 Einstein dà finalmente alle stampe *I fondamenti della teoria della relatività generale*, nella prefazione sottolinea che "i mezzi matematici necessari per la teoria della relatività generale erano già pronti nel 'calcolo differenziale assoluto'" che

da anni era stato elaborato ed "eretto a sistema" da Gregorio Ricci Curbastro. Lavorando in condizioni di relativo isolamento scientifico, Ricci si era dedicato a ricerche di geometria, ispirate all'opera di Riemann sugli spazi a più dimensioni, spazi in cui la metrica è definita da una forma differenziale del secondo ordine i cui coefficienti variano (in generale) da punto a punto.

Nei suoi lavori Ricci aveva sottolineato i vantaggi che i suoi metodi "offrono nelle ricerche, in cui si tratti di proprietà indipendenti dalla scelta delle coordinate".

Come avviene appunto nella relatività generale. Il calcolo differenziale assoluto "conduce a formule ed equazioni, che si presentano sempre sotto identica forma per qualunque sistema di variabili", dirà in un'altra occasione. Nel 1900, insieme all'allievo Tullio Levi-Civita, Ricci pubblica un articolo nei *Mathematische Annalen*, che può essere considerato un vero e proprio manifesto del nuovo calcolo, il calcolo tensoriale come si chiama oggi. "Poincaré ha scritto che nelle scienze matematiche *una buona notazione ha la stessa importanza filosofica di una buona classificazione nelle scienze naturali*", affermano Ricci e Levi-Civita. "Evidentemente, e a maggior ragione, lo stesso si può dire dei metodi, perché è proprio dalla loro scelta che dipende la possibilità di costringere una moltitudine di fatti senza alcun legame apparente tra loro a raggrupparsi secondo le loro affinità naturali". Con una serie di esempi Ricci e Levi-Civita mostrano i vantaggi che i metodi tensoriali presentano "quando si tratti di teorie generali, e quando lo scopo sia un'esposizione sistematica di queste teorie".

È l'articolo che finisce nelle mani di Grossmann e fornisce ad Einstein il provvidenziale soccorso matematico – altrettanto provvidenziale quanto quello avuto poi nel contatto diretto con Levi-Civita. Quando la teoria della relatività generale trova conferma nelle osservazioni di Eddington durante l'eclisse solare del maggio 1919, la notizia rimbalza sulle prime pagine dei giornali di tutto il mondo. L'improvvisa e immensa fama che circonda Einstein si riflette sul nome di coloro che, come Ricci e Tullio Levi-Civita, hanno fornito i necessari strumenti matematici. Oggi, il nome di Ricci Curbastro è familiare solo a una ristretta cerchia di specialisti. Eppure, come scriveva ancora Einstein, "la teoria della relatività è un meraviglioso esempio di come la matematica ha fornito lo strumento teorico per una teoria della fisica, senza che il problema di fisica abbia avuto un ruolo risolutivo per le corrispondenti creazioni matematiche. I nomi di Gauss, Riemann, Ricci, Levi-Civita e le loro opere apparrebbero ai contributi importanti del pensiero occidentale anche se questi non avessero portato al superamento dei sistemi inerziali".

a.  
Ritratto di Gregorio Ricci Curbastro.  
b.  
La biblioteca di Giovan Battista Guccia, prima sede del Circolo Matematico di Palermo. Guccia fondò nel 1884 il Circolo e nel 1885 i "Rendiconti", rivista che si affermò in breve a livello internazionale. Il Circolo diventò una delle principali associazioni di matematici: nel 1914, contava 924 soci, dei quali 618 stranieri, tra cui figuravano molti tra i maggiori matematici del tempo.

# [as] news

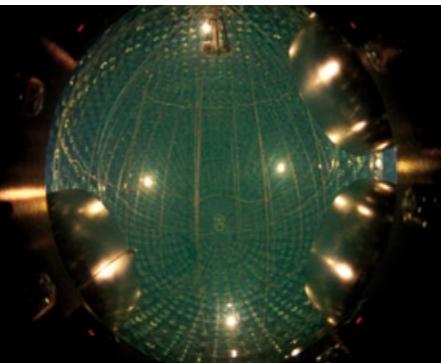
**Appuntamento per il 2008 con il signore degli anelli** È stata rinviata ai primi mesi del prossimo anno la partenza di Lhc (*Large Hadron Collider*) per consentire il perfezionamento di alcune componenti. Sarà il più potente acceleratore di particelle al mondo: collocato in un tunnel circolare sotterraneo lungo 27 km, al suo interno si scontreranno fasci di protoni a velocità prossime a quelle della luce. Le particelle, per viaggiare a velocità così alte e all'interno del percorso stabilito, e per scontrarsi esattamente nel cuore degli esperimenti dislocati lungo l'anello allo scopo di studiare i prodotti di questi scontri, sono guidate nella loro corsa da potentissimi magneti. Per focalizzare i fasci vengono utilizzati magneti a quattro poli (quadrupoli) in gruppi di tre (triplette). Dopo l'assemblaggio in superficie, la prima tripletta è stata calata lo scorso marzo nel tunnel dell'acceleratore. Durante la fase di test però le cose non sono andate secondo i programmi: la struttura su cui è stata ancorata la tripletta non ha retto sotto sforzo. La causa del malfunzionamento è stata individuata dagli ingegneri del Cern e del Fermilab che ora stanno lavorando per porvi rimedio. Questo imprevisto ha però contribuito a posticipare di qualche mese l'avvio di Lhc, ma "quando si lavora a dispositivi così complessi è 'fisiologico' che si presentino problemi imprevisti. L'importante è trovare le soluzioni: questo è parte integrante del nostro lavoro" ha commentato Umberto Dosselli, membro della Giunta Esecutiva dell'Infn. [a.v.]



**Cercasi SuSy disperatamente** Non è una citazione errata del titolo di un noto film degli anni '80, ma è la missione dell'esperimento Meg, frutto di una collaborazione italiana, svizzera e giapponese, cui partecipano anche fisici russi e americani, che inaugurerà a settembre ai laboratori Paul Sherrer di Zurigo. I muoni hanno vita molto breve: di solito essi decadono quasi subito in un elettrone e due neutrini. Meg, che sta per Mu in Elettrone e Gamma, cercherà, invece, di "vedere" il decadimento raro del muone in un elettrone e un fotone (la particella che costituisce i raggi gamma), previsto dalla teoria Supersimmetrica (SuSy). Non vedere questo decadimento non sarebbe un risultato negativo, ma imporrebbe dei vincoli stretti alle nuove teorie. Meg sarà più sensibile di circa 100 volte rispetto agli esperimenti del passato grazie alla grande precisione nella misurazione degli elettroni e dei fotoni prodotti nei decadimenti del più potente fascio di muoni al mondo. Gli elettroni saranno seguiti nella loro traiettoria in un campo magnetico da particolari rivelatori, chiamati camere a deriva, e infine saranno arrestati in un mix di scintillatori plastici e fibre ottiche, che ne misureranno il tempo di arresto. Il rivelatore di fotoni è invece costituito da un innovativo calorimetro che contiene 800 litri di xenon liquido. In esso sarà registrata la luce di scintillazione, emessa nell'interazione dei fotoni, prodotti nel decadimento dei muoni, con lo xenon, per vedere la quale servono 846 sofisticati occhi tecnologici, dei fotomoltiplicatori sensibili alla luce ultravioletta. Quando la misura di un elettrone e quella di un fotone coincidono temporalmente, allora sono compatibili con lo stesso decadimento. Frutto della collaborazione con l'industria italiana sono il criostato del calorimetro e il suo sistema di calibrazione, il rivelatore del tempo degli elettroni e il trigger, cioè l'elettronica che seleziona gli eventi rilevanti. [a.v.]



**Una sfera scintillante cattura i messaggeri dal Sole** L'esperimento internazionale Borexino, ai Laboratori del Gran Sasso, sta osservando, con un ritmo di circa 35 eventi al giorno, neutrini di bassissima energia provenienti dal Sole. È la prima volta che si osservano in tempo reale neutrini solari con un'energia uguale o inferiore a 1 MeV (mega elettronVolt) prodotti cioè da reazioni nucleari che avvengono frequentemente all'interno del Sole: i fisici analizzano così il comportamento della nostra stella, per mezzo di questi particolari "messaggeri". Il funzionamento di Borexino si basa sul fatto che gli elettroni del liquido scintillatore che si trova al suo interno, quando sono "colpiti" con i neutrini che arrivano dal Sole, producono un lampo luminoso che viene "visto" da 2.200 fotomoltiplicatori. L'apparato consente di misurare l'energia e la posizione degli urti provocati dai neutrini incidenti. L'esperimento, a cui lavorano circa 100 persone tra fisici, ingegneri e tecnici, è stato realizzato con un finanziamento sostanziale dell'Infn. [a.v.]



I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.

I laboratori organizzano, su richiesta e previo appuntamento, visite gratuite per scuole e vasto pubblico. La visita, della durata di tre ore circa, prevede un seminario introduttivo delle attività dell'Infn e del laboratorio e una visita alle attività sperimentali.



Per visitare i laboratori dell'Infn:

**Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)**  
T + 39 06 94032423  
/ 2552 / 2643 / 2942  
sislnf@lnf.infn.it  
www.lnf.infn.it

**Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)**  
T + 39 0862 4371  
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)  
visits@lngs.infn.it  
www.lngs.infn.it

**Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)**  
T + 39 049 8068547  
schiavon@lnl.infn.it  
www.lnl.infn.it

**Laboratori Nazionali del Sud (Lns)**  
T + 39 095 542296  
sislns@lns.infn.it  
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina [www.infn.it/educational](http://www.infn.it/educational)



**www.infn.it**

rivista on line  
[www.asimmetrie.it](http://www.asimmetrie.it)