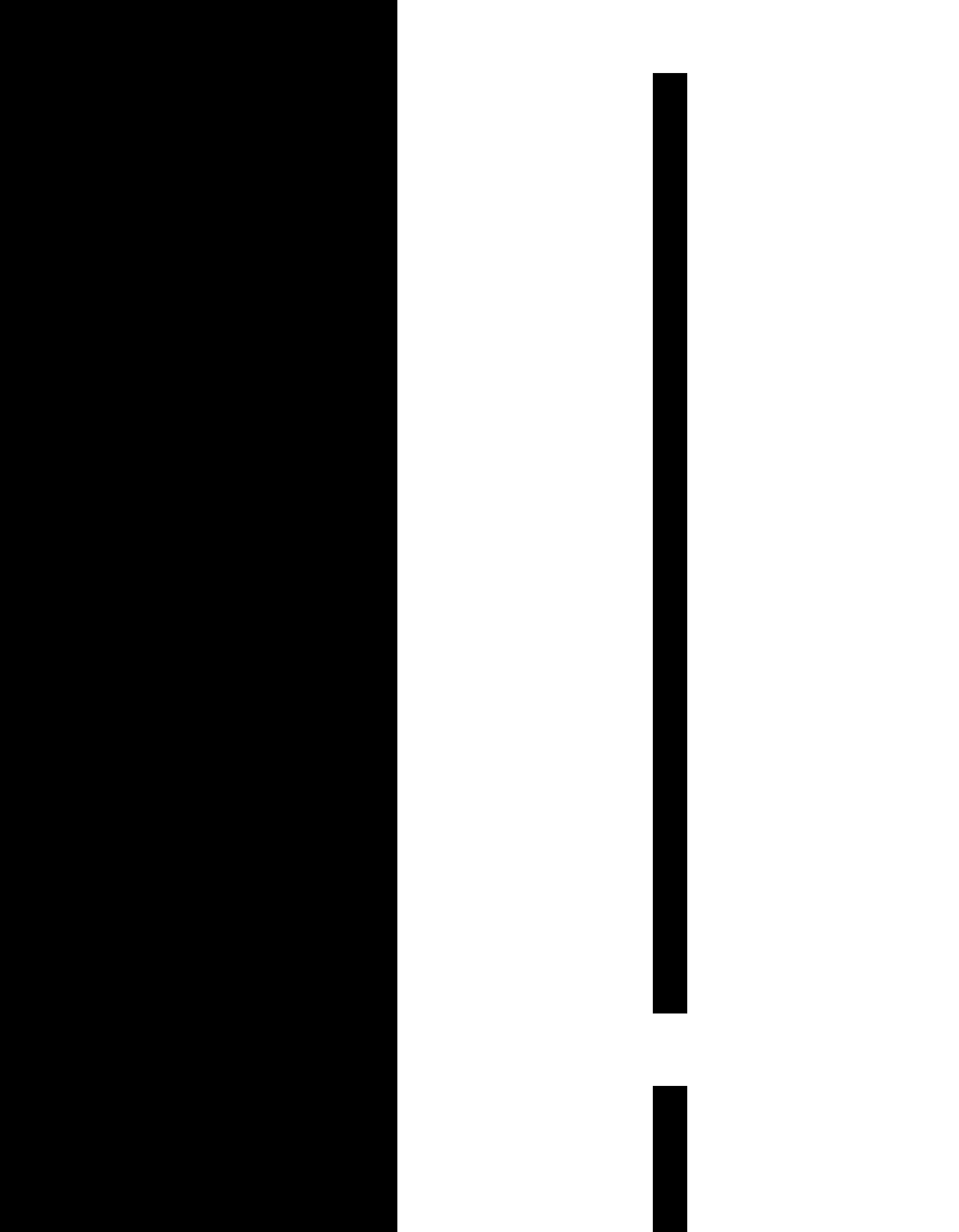


[gravità]

anno 16 numero **30** / 4.21

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Care lettrici e cari lettori,

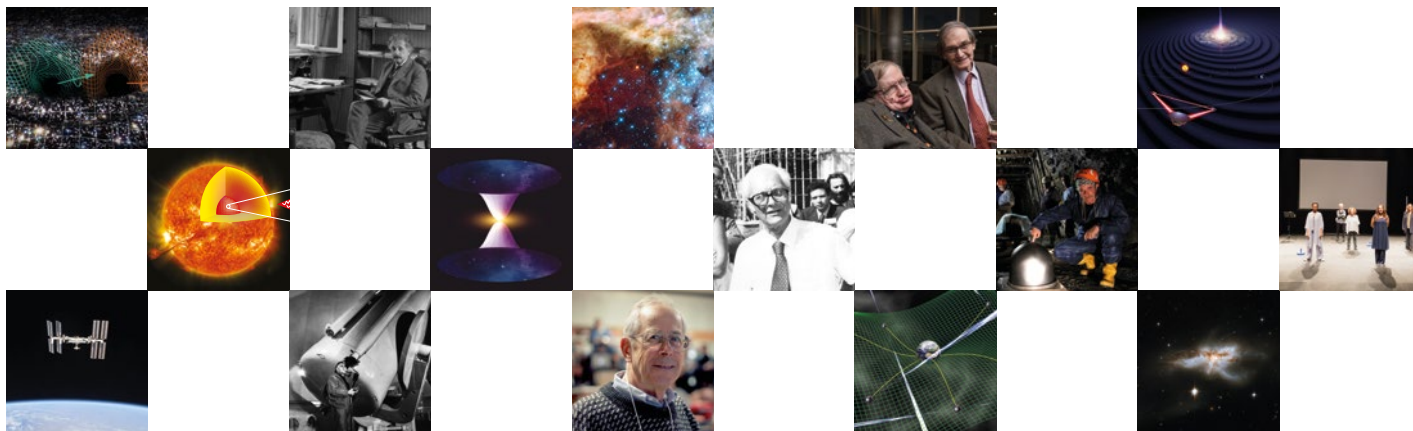
Tra le interazioni fondamentali della natura la gravità è la più antica e, al tempo stesso, la più attuale. La fisica, sorta con gli studi sulla caduta libera (Galileo) e sui moti dei corpi celesti (Newton), dopo la rivoluzione della relatività generale di Einstein, è tornata negli ultimi anni a occuparsi intensamente e con grande successo della forza “che move il sole e le altre stelle”. La scoperta delle onde gravitazionali da parte delle collaborazioni Ligo e Virgo, la nascita dell’astronomia multimessaggera con l’osservazione in coincidenza della radiazione gravitazionale ed elettromagnetica emessa nella fusione di due stelle di neutroni, la “fotografia” del buco nero supermassiccio al centro della galassia M87, realizzata dall’Event Horizon Telescope, sono i risultati più clamorosi conseguiti recentemente, traguardi di straordinarie avventure scientifiche e umane, ma anche punti di partenza per altre affascinanti esplorazioni.

Nuove imprese sperimentali, come l’Einstein Telescope e la missione spaziale Lisa, che vedranno ancora una volta le nostre ricercatrici e i nostri ricercatori in prima fila, sono alle porte: ci aspettiamo di osservare le tracce gravitazionali dei primi istanti di vita dell’universo e di capire meglio quegli strabilianti concentrati di pura gravità che sono i buchi neri, mettendo alla prova le teorie che cercano di incorporare gli effetti quantistici nella gravitazione.

Questo numero di Asimmetrie è una guida alla ricerca presente e futura sulla forza che ci tiene con i piedi per terra, ma che continua a essere per molti aspetti misteriosa. La strada della fisica gravitazionale sarà certamente, negli anni a venire, ricca di risultati e tappezzata di sorprese.

Buona lettura.

Antonio Zoccoli
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 16,
numero 30, aprile 2021

direttore editoriale

Antonio Zoccoli, *presidente Infn*

direttore responsabile

Catia Peduto

direttore comitato scientifico

Vincenzo Barone

comitato scientifico

Nicolao Fornengo
Giuliana Galati
Sandra Leone
Paolo Pani
Paolo Valente

redazione

Matteo Massicci

hanno collaborato

Pia Astone, Eugenio Coccia, Monica Colpi, Mariafelicia De Laurentis, Marialuisa Frau, Michela Mapelli, Cristiano Marcello, Francesca Mazzotta, Alessandro Melchiorri, Filippo Moretti, Alessandro Nagar, Davide Pinci, Michele Punturo, Alberto Sesana, Giovanni Valentini, Francesca Vidotto

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
Piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Mengarelli Grafica Multiservices srl

stampa

Mengarelli Grafica Multiservices srl

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m2

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte
della rivista può essere riprodotta, rielaborata
o diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn,
proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di aprile 2021.
Tiratura 20.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Per abbonarsi compilare l'apposito
form sul sito www.asimmetrie.it

In caso di problemi contattare
la redazione all'indirizzo
comunicazione@presid.infn.it

sito internet

Asimmetrie 30 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono
disponibili anche online su
www.asimmetrie.it

e-magazine

Asimmetrie è anche disponibile
in versione digitale, ricca di ulteriori
contenuti multimediali, come app
di iOS e Android sull'Apple Store
e nel Google Play Store.

crediti iconografici

Foto di copertina ©Sundry Photography//
foto p. 4 ©Siwakorn; foto a p. 5 ©ullstein bild
Dtl. - Gettyimages; fig. b p. 6 ©Asimmetrie-
Infn (Hylab); fig. c p. 7 ©A. Nagar; foto d p.
8 @ Annette Buhl, Nobel Prize Outreach;
foto e p. 10 ©John Cairns // foto a p. 11
©IHES; fig. p. 12 ©Asimmetrie-Infn (Hylab);
fig. p. 13 ©Asimmetrie-Infn (Hylab) // fig. a
p. 14 ©Raul Rubio (www.raulrubio.es) / Virgo
Valencia Group / The Virgo Collaboration;
fig. b p. 15 ©Asimmetrie-Infn (Hylab); fig. c
p. 16 ©NASA, ESA, F. Paresce (INAF-IASF,
Bologna, Italy), R. O'Connell (University of
Virginia, Charlottesville), and the HST Wide
Field Camera 3 Science Oversight Committee
// foto a p. 17 ©Juan Diego Soler/Wikimedia;
foto b p. 18 ©Hale Observatories, courtesy
AIP Emilio Segrè Visual Archives; fig. c p. 19
©Asimmetrie-Infn (Hylab) // fig. pp. 20-21
©Asimmetrie-Infn (Hylab); 2019©EHT,
2015©SXS, 1963©University of Canterbury,
1964 ©NASA/CXC/M.Weiss, 1927-29©
designua/123RF, 1959©Vlad2i/Wikimedia
// fig. a p. 22 ©Asimmetrie-Infn (Hylab);
fig. b p. 22 ©Asimmetrie-Infn (Hylab); fig. c
p. 23 ©Asimmetrie-Infn (Hylab); fig. c p. 24
©Asimmetrie-Infn (Hylab) // foto a p. 25
©Ojan; foig. b p. 26 ©Asimmetrie-Infn (Hylab);
fig. c p. 27 ©Asimmetrie-Infn (Hylab) // fig. a
p. 28 ©Asimmetrie-Infn (Hylab); foto b p. 29
©Claudio Perini; fig. c p. 30 ©Asimmetrie-
Infn (Hylab) // fig. a p. 31 ©Asimmetrie-Infn
(Hylab); foto b p. 32 ©INFN/Schiavon; foto c
p. 33 ©M. Perciballi // foto a p. 34 ©ESA/
Hubble; foto c p. 36 ©David J. Champion //
foto a p. 38 ©AIP Emilio Segrè Visual Archives,
Physics Today Collection; photo appeared
cropped in Physics Today Obituaries, October
2009 WHT page 114.; "Photo for obituary
submitted by Pizzella, Fubini, Weber; foto
b p. 39 ©INFN // foto a p. 40 ©NASA; foto
b p. 41 ©ESA/NASA // foto a p. 42 ©Anna
Parisi; foto b p. 43 ©Anna Parisi // foto a p.
44 ©Aquarium - Archivio Soprintendenza
Archeologia della Sardegna; foto b p. 45
©INFN.

Ci scusiamo se, per cause del tutto
indipendenti dalla nostra volontà, avessimo
omesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

30 / 04.21

[gravità]

Mele, ascensori e buchi neri

di Paolo Pani

4

Paso doble

di Alessandro Nagar

11

Mind the gap

di Michela Mapelli

14

Alta tensione

di Alessandro Melchiorri

17

[as]

Nel segno di Einstein.

20

Uno sguardo all'orizzonte

di Mariafelicia De Laurentis

22

Brividi discreti

di Marialuisa Frau

25

Bolle di spazio

di Francesca Vidotto

28

Antenne in ascolto

di Michele Punturo

31

Sinfonia cosmica

di Monica Colpi e Alberto Sesana

34

[as] traiettorie

Scoperta o scherzetto?

di Catia Peduto

37

[as] radici

Una storia di fede e perseveranza.

di Eugenio Coccia

38

[as] intersezioni

Microgravità.

di Giovanni Valentini

40

[as] spazi

Scienziati sul palco.

di Matteo Massicci

42

[as] riflessi

Cuore di piombo.

di Francesca Mazzotta

44

[as] riflessi

Particle jukebox.

di Cristiano Marcello e Filippo Moretti

46

[as] illuminazioni

Un laboratorio nello smartphone.

di Pia Astone e Davide Pinci

48



Mele, ascensori e buchi neri

La gravità da Einstein in poi

di Paolo Pani

a.

Il padre della relatività generale, Albert Einstein, fotografato nel suo studio a Berlino di fronte al ritratto di Newton alla parete (1927).



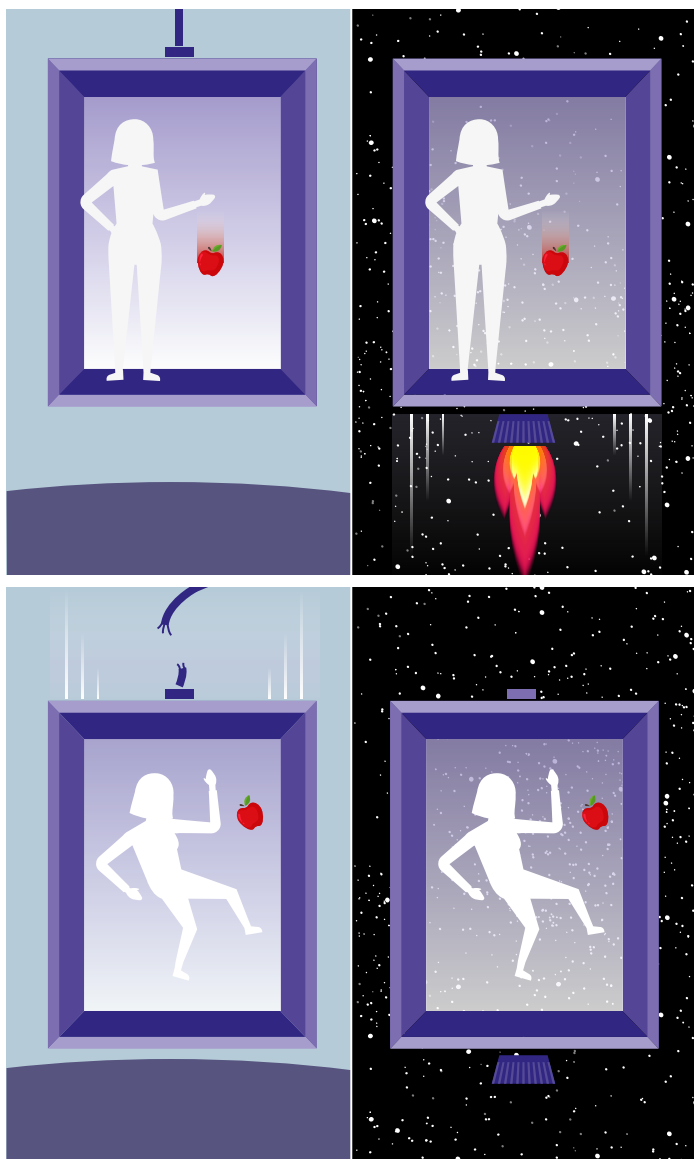
Perché gli oggetti cadono? Per millenni questa domanda, solo all'apparenza banale, ha tenuto impegnate le menti più brillanti, spingendole a formulare teorie della gravità (dal latino *gravitas*, peso) sempre più sofisticate e le cui predizioni sono tanto accurate quanto incredibili. È infatti stupefacente come un fenomeno che ben conosciamo fin dall'infanzia (l'attrazione gravitazionale) sia lo stesso alla base del Big Bang, dell'evoluzione dell'universo, dei buchi neri, delle onde gravitazionali e di alcuni dei più importanti problemi aperti della fisica fondamentale.

Ma facciamo un passo indietro. Secondo Aristotele il moto dei corpi era riconducibile alla tendenza degli stessi a muoversi verso il loro luogo "naturale". Tale visione fu soppiantata soltanto grazie agli studi di Galileo Galilei, il quale identificò una proprietà degli oggetti (quella che oggi chiamiamo "massa inerziale") che ne determina la resistenza a modificare il proprio stato di moto o di quiete. Una generazione più tardi, Isaac Newton formalizzò questi concetti nella sua teoria della meccanica, secondo cui la massa inerziale è la costante di proporzionalità fra la "forza" che agisce su un corpo e la sua accelerazione. Newton si spinse oltre e identificò nella "forza gravitazionale" la causa dell'attrazione terrestre su tutti i corpi, dalla celebre mela (che, secondo una leggenda, gli sarebbe caduta sulla testa) alla Luna, nonché dell'attrazione universale reciproca fra tutti i corpi celesti. Secondo Newton due oggetti qualsiasi si attraggono in maniera proporzionale alle loro masse (quelle che oggi chiamiamo "masse gravitazionali") e in maniera inversamente proporzionale al quadrato della loro distanza. Fu una rivoluzione. Questa semplice teoria, unita alla meccanica, forniva una descrizione incredibilmente precisa di tutti i fenomeni gravitazionali: il moto della Luna attorno alla Terra, le eclissi, le

maree, le leggi empiricamente scoperte da Keplero per il sistema solare, il moto dei proiettili e dei satelliti.

C'erano però due grandi questioni in sospeso nella teoria della gravitazione di Newton. Una era palese fin dagli albori: come i famosi esperimenti di Galileo dalla torre pendente avevano dimostrato, dal punto di vista sperimentale la massa "inerziale" e quella "gravitazionale" sono identiche. Perché due concetti così diversi (inerzia e gravità) fossero in realtà collegati fra loro rimaneva un mistero. Il secondo problema fu posto più tardi da Albert Einstein quando, nel suo *annus mirabilis* (1905), formulò la teoria della relatività speciale, il cui caposaldo è la costanza della velocità della luce nel vuoto e il fatto che essa sia la velocità massima raggiungibile in natura.

La relatività speciale trovò immediatamente svariate conferme sperimentali, ma era in netto contrasto con la teoria di Newton in cui l'interazione gravitazionale si propaga a velocità infinita. Einstein prese in maniera estremamente seria questi problemi (per molti al tempo considerati marginali) e gli ci vollero dieci anni di intensissimo lavoro per arrivare al suo capolavoro: la teoria generale della relatività. Come spesso nei lavori di Einstein, la relatività generale si erge su alcuni principi, ovvero degli assiomi teorici basati su osservazioni empiriche. Superando il concetto galileiano di sistema inerziale, Einstein postulò che tutte le leggi della fisica debbano essere le stesse a prescindere dal moto dell'osservatore (ossia per qualsiasi sistema di riferimento). Inoltre, partendo dalle osservazioni di Galileo, formulò il "principio di equivalenza", secondo il quale la massa inerziale e la massa gravitazionale non sono accidentalmente uguali o molto simili, ma sono proprio la stessa grandezza fisica. Questi semplici principi hanno conseguenze notevolissime, come il fatto (abilmente spiegato da Einstein con l' "esperimento mentale" dell'ascensore



b.
Nel suo famoso esperimento mentale dell'ascensore, Einstein dimostrò che, per un osservatore dentro un ascensore in moto accelerato nel vuoto (riquadro in alto a destra), gli oggetti cadono come se fossero soggetti alla forza gravitazionale terrestre in un ascensore fermo (riquadro in alto a sinistra). Le due situazioni sono indistinguibili. Allo stesso modo, è impossibile distinguere fra il caso in cui l'ascensore è in caduta libera nel campo gravitazionale terrestre (riquadro in basso a sinistra) e quello in cui si trova a riposo nello spazio vuoto (riquadro in basso a destra). Il ragionamento dimostra che, a causa dell'uguaglianza fra massa gravitazionale e massa inerziale, l'attrazione gravitazionale è localmente eliminabile in un opportuno sistema di riferimento. Questo è il contenuto del principio di equivalenza tra gravitazione e inerzia, alla base della teoria della relatività generale.

vd. fig. b) che sia impossibile distinguere localmente se un sistema è soggetto all'attrazione gravitazionale o se si sta muovendo di moto accelerato.

Einstein passò i successivi anni a cercare un opportuno formalismo matematico per la sua teoria e lo trovò nella geometria differenziale, sviluppata nel secolo precedente principalmente da Gauss e Riemann, e nel calcolo tensoriale degli italiani Ricci Curbastro e Levi-Civita. La sua intuizione geniale fu quella di descrivere l'interazione gravitazionale come un puro effetto geometrico: il fatto che la gravità possa essere eliminata localmente è analogo al ben noto fatto che, su piccole scale, la Terra ci appare piatta, nonostante sia sferica. Einstein individuò nella "curvatura dello spaziotempo" la grandezza fisica fondamentale per descrivere la gravità. Localmente lo spaziotempo è piatto e valgono le leggi della relatività speciale, ma globalmente lo spaziotempo è curvo e dinamico: può contorcersi, deformarsi. La sorgente di questa distorsione è l'energia (per la precisione, quello che tecnicamente si chiama "tensore energia-impulso") del sistema, in ogni sua forma, compresa l'energia cinetica. Il fisico John Archibald Wheeler, uno dei pionieri della relatività generale come moderno campo di ricerca, sintetizzò molto efficacemente la questione con uno slogan: "Lo spaziotempo dice alla materia come muoversi, la materia dice allo spaziotempo come incurvarsi" (vd. fig. c). Prendiamoci un momento per riflettere sul fatto che Einstein passò dieci anni della sua vita a ponderare su temi apparentemente banali come ascensori e mele in caduta libera, fino ad arrivare a uno dei più alti costrutti teorici mai formulati dalla mente umana, le cui implicazioni sono disperate e sorprendenti. La nuova teoria della gravità, la relatività generale, fu infatti difficile da accettare anche per i migliori scienziati del suo tempo. Si guardò quindi con grande interesse ad alcuni fenomeni previsti da Einstein e che sarebbero stati invece inspiegabili con la teoria di Newton, i cosiddetti "test classici" della relatività generale. Il più famoso è forse la deflessione della luce. Se la gravità è in fin dei conti moto in uno spaziotempo curvo, tale curvatura deve influenzare ogni oggetto, inclusa la luce, che quindi in prossimità di grandi masse (o di grandi concentrazioni di energia) deve incurvarsi e deviare rispetto alla traiettoria rettilinea che avrebbe in uno spaziotempo piatto. Questo impensabile fenomeno fu effettivamente osservato da Arthur Eddington durante la famosa eclissi del 1919 (vd. in Asimmetrie n. 15 p. 50, ndr) e contribuì a formare nell'opinione pubblica l'immagine di Einstein come "star" scientifica globale. La teoria di Einstein prevedeva inoltre piccole variazioni rispetto alle orbite kepleriane nel sistema solare; in particolare, riuscì a spiegare una piccola discrepanza nell'avanzamento del perielio di Mercurio che arrovellava gli astronomi da decenni. Infine, prevedeva che la frequenza della radiazione emessa da una stella fosse più alta in prossimità della stella che a grande distanza da essa (il cosiddetto "redshift gravitazionale"). Questo fenomeno, anch'esso verificato sperimentalmente, è legato al fatto che il tempo scorre più lentamente vicino a grandi masse ed è un ingrediente fondamentale per il funzionamento dei Gps, che devono tenere conto dell'influenza del campo gravitazionale terrestre sui segnali inviati ai satelliti per la geolocalizzazione. Per quanto straordinari, gli effetti sopra elencati sono piccoli e richiedono osservazioni di precisione: nel sistema solare la gravità newtoniana è un'ottima approssimazione, perché la



curvatura prodotta da una stella come il Sole è modesta e lo spaziotempo del sistema solare è quasi piatto. Ci sono però situazioni in cui la curvatura dello spaziotempo può essere estrema: in quel caso la relatività generale diventa imprescindibile. Il suo primo ambito di applicazione è la cosmologia. Prima di Einstein l'origine dell'universo era un argomento filosofico (e teologico). Ma l'universo nel suo insieme può essere descritto, nel contesto della relatività generale, come spaziotempo che evolve in rapporto alla materia (visibile e invisibile) e alla radiazione in esso contenute, partendo da una configurazione iniziale di densità e curvatura spaziotemporale elevatissime (il Big Bang).

Inoltre, l'attuale espansione accelerata dell'universo (la cui osservazione valse il Nobel per la fisica a Saul Perlmutter, Brian Schmidt e Adam Riess nel 1999) è spiegata dalla relatività generale tramite un termine legato alla famosa costante cosmologica. Inizialmente introdotta da Einstein, il quale

poi la rinnegò come uno dei suoi più grandi errori, questa costante è attualmente un ingrediente fondamentale del modello standard cosmologico che, nonostante gli enormi successi osservativi, è oggi al centro di un importante dibattito proprio legato alla velocità di espansione dell'universo e all'origine della costante cosmologica (vd. p. 17, ndr).

Un altro contesto in cui la relatività generale ha un ruolo determinante è quello delle stelle compatte. Se è vero che il Sole distorce poco lo spaziotempo, cosa succederebbe se tutta la sua massa fosse compressa in una stella molto più piccola e densa? In quel caso la curvatura dello spaziotempo sarebbe molto maggiore e fenomeni come la deflessione della luce e la dilatazione gravitazionale del tempo sarebbero enormemente amplificati. Ad esempio, potrebbe succedere che la luce venga deflessa a tal punto da rimanere intrappolata nel campo gravitazionale della stella. Una stella di questo tipo non potrebbe

c. Illustrazione artistica (opera di Alessandro Nagar) delle equazioni di Einstein della relatività generale e dello slogan di Wheeler. Lo spaziotempo (rappresentato dal tensore di Einstein in blu, a sinistra del segno di uguaglianza) determina come la materia (rappresentata dal tensore di energia-impulso a colori, a destra del segno di uguaglianza) si muove. A sua volta, la materia deforma lo spaziotempo producendo un'interazione simbiotica fra materia e spaziotempo, che è il vero cuore della teoria.

emettere nessun tipo di radiazione e apparirebbe come un “buco nero” nel cielo. Inoltre, essendo la velocità della luce la massima possibile in natura, qualsiasi cosa che entri dentro questo buco nero (superando quella regione di non-ritorno nota come l’orizzonte degli eventi) ne verrebbe inghiottita per sempre e non potrebbe più comunicare con l’esterno. L’esistenza dei buchi neri è un’altra grande predizione teorica della relatività generale. Considerati per decenni come mere curiosità matematiche, oggi si pensa che praticamente ogni galassia ospiti un buco nero di milioni o miliardi di masse solari con il quale evolve in simbiosi. Attorno a questi mostri cosmici, la materia e la luce sono fortemente deflesse. Questo fenomeno è alla base delle complesse orbite stellari attorno al buco nero Sagittarius A* al centro della Via Lattea (la cui scoperta è stata premiata col Nobel per la Fisica 2020 assegnato a Reinhard Genzel e Andrea Ghez) e dell’ormai celebre “fotografia” del buco nero nella galassia M87 “scattata” dall’Event Horizon Telescope (vd. p. 22, ndr). Inoltre, a partire dai pionieristici lavori di Subrahmanyan Chandrasekhar, sappiamo che i buchi neri si formano al termine dell’evoluzione di stelle molto massicce, che collassano sotto l’azione della loro stessa attrazione gravitazionale. Questi buchi neri hanno una massa che varia da poche fino a decine di masse solari, anche se recenti osservazioni sembrano riservare qualche sorpresa (vd. p. 14, ndr).

Ma come può essere “osservato” un oggetto che per definizione inghiotte tutto, anche la luce? Oltre allo studio delle orbite (come nel caso di Sagittarius A*) o della materia calda che ci cade dentro (come nel caso della foto di M87), la possibilità di “vedere” i buchi neri è fornita da un’ulteriore strabiliante predizione di Einstein: le onde gravitazionali (vd. Asimmetrie n. 5, ndr). Queste increspature dello spaziotempo vengono generate da grandi masse in movimento, in maniera analoga a come un motoscafo genera onde nel mare, o a come cariche elettriche accelerate generano onde elettromagnetiche, e si propagano alla velocità della luce. Qualsiasi massa in movimento accelerato genera onde gravitazionali, ma queste sono solitamente troppo deboli per poter essere osservate. La collisione cosmica di due buchi neri, invece, genera un’enorme potenza (pari circa ad un miliardo di milioni di volte la potenza del Sole) e le onde gravitazionali così prodotte si propagano indisturbate per miliardi di anni luce. La prima onda gravitazionale prodotta dalla fusione di due buchi neri è stata captata sulla Terra il 14 settembre 2015 dalla collaborazione Ligo-Virgo ed è stata chiamata GW150914 (che sta per “gravitational wave” del 14-09-15). Questo evento storico ha segnato l’inizio di nuova astronomia attualmente in piena espansione.

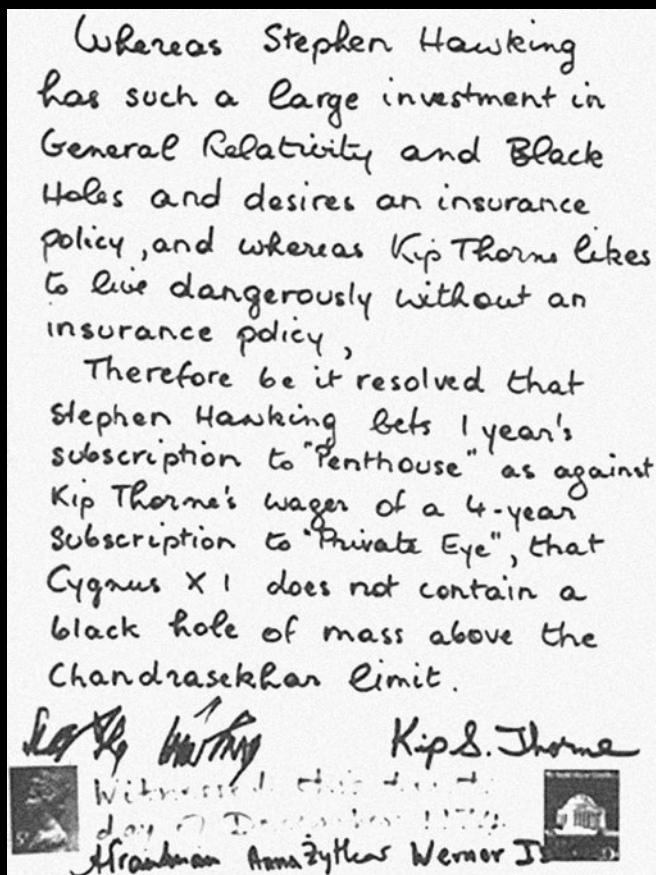
Negli ultimi 5 anni, gli interferometri laser Ligo e Virgo hanno captato circa 50 segnali prodotti dalla fusione di buchi neri e stelle di neutroni. Almeno per uno di essi (la fusione di due stelle di neutroni) è stato possibile osservare in coincidenza una serie di segnali elettromagnetici, dando così vita all’astronomia multimessaggera (vd. Asimmetrie n. 25, ndr). Queste osservazioni richiedono strumenti precisissimi e una perfetta conoscenza teorica del segnale atteso, che può essere ottenuta con una sofisticata combinazione di simulazioni numeriche e calcoli teorici, entrambi basati sulle equazioni di Einstein (vd. p. 11, ndr). La rivelazione delle onde gravitazionali



d.

L’astrofisica Andrea Ghez mostra la medaglia del Premio Nobel per la Fisica che le è stato assegnato nel 2020 per i suoi studi delle orbite stellari attorno al buco nero Sagittarius A* al centro della Via Lattea. A causa della pandemia da coronavirus, Ghez non ha potuto recarsi alla tradizionale cerimonia a Stoccolma e ha ricevuto la medaglia dal console svedese a Los Angeles.

Scommesse



1.

La goliardica scommessa fra Stephen Hawking e Kip Thorne sulla natura di Cygnus X-1. Stipulata nel 1974, la scommessa fu vinta da Thorne solo alcuni decenni dopo, quando Hawking ammise che le evidenze osservative a favore dell'ipotesi di buco nero erano ormai schiaccianti.

La storia delle ricerche teoriche e osservative sui buchi neri è costellata di aneddoti interessanti, a partire dall'origine di questi oggetti e dal loro nome. La prima soluzione esatta della relatività generale, che descrive un buco nero, si deve al tedesco Karl Schwarzschild, il quale la scoprì nel 1916 (pochi mesi dopo la pubblicazione della teoria da parte di Einstein), mentre si trovava al fronte russo durante la prima guerra mondiale. Tuttavia, soltanto decenni dopo la scoperta di Schwarzschild si iniziò a utilizzare il termine "buco nero" (in inglese *black hole*) per descrivere questi oggetti e studiarne in dettaglio le caratteristiche.

Per decenni si è attribuita la paternità del nome all'eminente fisico statunitense John Archibald Wheeler, che la utilizzò in un articolo divulgativo del 1968. Tuttavia, è ormai appurato che qualche anno prima Robert Dicke (famoso fisico e collega di Wheeler a Princeton) iniziò a paragonare il collasso gravitazionale di una stella a una terribile e angusta prigione indiana del XVIII secolo colloquialmente chiamata "Buco nero di Calcutta".

Almeno fino agli anni '60 i buchi neri vennero considerati soluzioni matematiche delle equazioni di Einstein, troppo bizzarre per poter avere un'attinenza con la realtà. La situazione iniziò a mutare con la scoperta delle prime quasar e delle sorgenti astrofisiche di raggi X, fra cui Cygnus X-1, scoperto nel 1964. La natura di Cygnus X-1 è stata oggetto di una scommessa scherzosa tra i fisici Stephen Hawking e Kip Thorne (vd. fig. 1), nella quale il primo scommise che la sorgente non fosse originata da un buco nero. Dopo decenni di incertezze, Hawking dichiarò di aver perso la scommessa quando, a partire dagli anni '90, i dati osservativi confermarono che Cygnus X-1, come molti altri oggetti astrofisici compatti, è proprio un buco nero come previsto dalla relatività generale.

è così un'ulteriore conferma della relatività generale ed è stata premiata col Nobel per la fisica a Rainer Weiss, Barry Barish e Kip Thorne nel 2017.

Tutte queste osservazioni stanno aprendo confini finora inesplorati e potrebbero stravolgere intere aree dell'astrofisica, della cosmologia e della fisica fondamentale. Futuri esperimenti come l'interferometro di terza generazione Einstein Telescope (vd. p. 31, ndr), la missione spaziale Lisa (vd. p. 34, ndr) e le osservazioni di precisione con le radiopulsar, permetteranno di captare onde gravitazionali in bande di frequenza mai osservate

prima. È una rivoluzione che eguaglia la scoperta delle onde radio o dei raggi X e le cui conseguenze ci stupiranno per i decenni a venire. Oltre a raggiungere una comprensione più profonda dell'universo, la speranza è che queste osservazioni portino a scoprire nuovi segnali inaspettati, magari gettando luce su alcune questioni aperte legate alla gravità.

Uno dei problemi aperti più importanti riguarda il destino di un buco nero e che cosa succede al suo interno. Alcuni teoremi dimostrati da Stephen Hawking e Roger Penrose (che ha condiviso il Nobel per la Fisica 2020 per questi studi) mostrano

come all'interno di un buco nero debba necessariamente esistere una "singolarità", ossia una regione dello spaziotempo in cui la curvatura diventa infinita e la teoria di Einstein cessa di funzionare. Ciò che succede vicino alla singolarità è celato dall'orizzonte degli eventi e non ci è quindi possibile osservarlo dall'esterno. Ci aspettiamo però che quando la curvatura vicino alla singolarità raggiunge la scala di Planck gli effetti quantistici della gravità diventino determinanti e modifichino drasticamente la relatività generale. La teoria quantistica della gravità, che dovrebbe risolvere il problema delle singolarità, è il "Sacro Graal" della fisica teorica attuale. Le due proposte teoriche più studiate, la gravità quantistica *a loop* (vd. p. 28, ndr) e la teoria delle stringhe (vd. p. 25, ndr), offrono visioni diametralmente opposte su come incorporare effetti quantistici nella teoria di

Einstein. Solamente le osservazioni sperimentali (ancora di là da venire) potranno sciogliere il mistero. Non c'è dubbio che i buchi neri e le future osservazioni di onde gravitazionali giocheranno un ruolo determinante: come dimostrato da Stephen Hawking, la meccanica quantistica modifica drasticamente l'orizzonte degli eventi, permettendo a un buco nero di emettere una flebile radiazione, che prende il nome dal fisico britannico scomparso nel 2018. A causa della radiazione di Hawking i buchi neri evaporano molto lentamente fino a scomparire. Dove vada a finire l'informazione originariamente contenuta dentro il buco nero è un altro paradosso che la gravità quantistica dovrebbe risolvere (vd. p. 35 in *Asimmetrie* n. 14, ndr). Ancora una volta, forse, la soluzione a questi complessi problemi arriverà dalla solita vecchia domanda: perché gli oggetti cadono?



Biografia

Paolo Pani è professore di fisica teorica all'Università di Roma Sapienza. È il responsabile scientifico del progetto DarkGra finanziato dallo European Research Council. È co-autore del libro di testo "General Relativity and its Applications" e del manuale "Superradiance: New frontiers in black-hole physics", nonché di numerose pubblicazioni scientifiche su tematiche relative alla gravitazione, buchi neri, stelle di neutroni, onde gravitazionali e le loro implicazioni per la fisica fondamentale.

e.

I teoremi dimostrati negli anni '60 dai fisici teorici Stephen Hawking (a sinistra) e Roger Penrose (a destra) hanno rappresentato un contributo fondamentale per la comprensione dei buchi neri e delle singolarità nella teoria della relatività generale. Per questi studi Penrose ha ricevuto il premio Nobel per la Fisica nel 2020.

Paso doble

Il moto di due corpi in relatività generale

di Alessandro Nagar

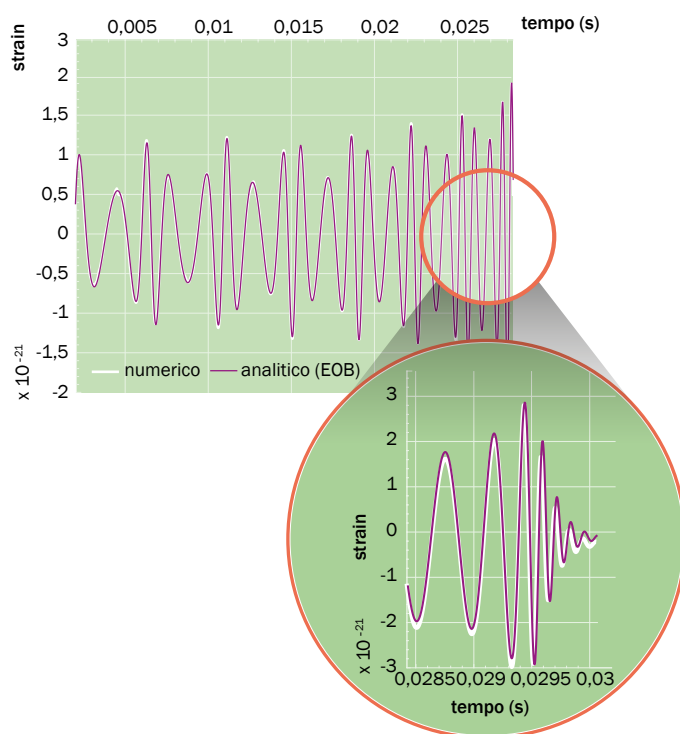
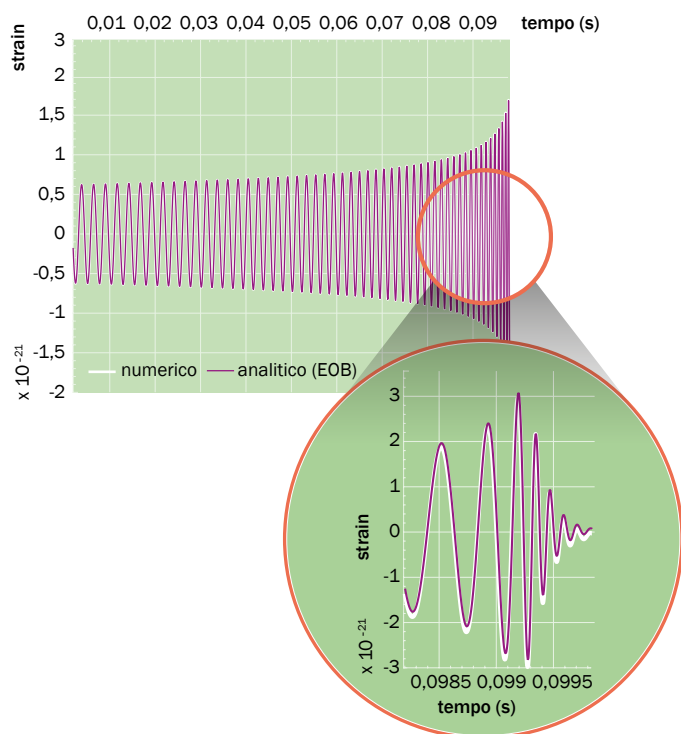


a.
Thibault Damour nel suo studio a Parigi.

Era quasi sera, quel 10 febbraio 2016, quando Thibault Damour, professore di fisica teorica presso l'Institut des Hautes Études Scientifiques nei pressi di Parigi, mi convocò fin davanti al suo computer, in un angolo del grande studio stipato fino al soffitto di libri e manoscritti. Ulysses, il cane, silente testimone di tante discussioni scientifiche, come al solito sonnecchiava sul pavimento. Sullo schermo del computer era visibile una mail, contenente solo due numeri: 29 e 36. Masse solari, pensai! Per dieci anni con Damour avevamo sviluppato gli strumenti teorici necessari per rivelare e analizzare le onde gravitazionali emesse dalla fusione di due buchi neri, ma eravamo rimasti all'oscuro degli eventi frenetici dei quattro mesi precedenti. Il giorno dopo, l'11 febbraio 2016, quando la collaborazione Ligo-Virgo annunciò al mondo la scoperta

della prima onda gravitazionale (GW150914), interpretata come coalescenza di due buchi neri di 29 e 36 masse solari, contemplammo il segnale, mostrato in diretta streaming mondiale, con una stupefatta gratitudine verso la Natura. Quel segnale di 20 millesimi di secondo, in cui tre masse solari vengono radiate sotto forma di energia gravitazionale, era in eccellente accordo con la teoria della relatività generale di Albert Einstein. Anzi, in realtà era stata proprio la conoscenza teorica della forma d'onda che aveva permesso agli scienziati di Ligo e Virgo di concludere che GW150914 era una vera coalescenza e di misurarne le masse.

L'evoluzione di un sistema di due buchi neri consta di tre fasi: la prima è il cosiddetto "*inspiral*", in cui due oggetti si muovono a spirale l'uno attorno all'altro, all'inizio piano, poi sempre più



velocemente, fino a entrare nella seconda, rapida fase in cui accelerano moltissimo fino a fondersi, muovendosi a circa metà della velocità della luce, in un unico buco nero che oscilla in maniera caratteristica (la terza fase, il cosiddetto “*ringdown*”). La forma d’onda è tipica (vd. fig. b): incomincia con un’oscillazione quasi costante, come un’unica nota, la cui frequenza però aumenta progressivamente fino a raggiungere un nuovo valore costante, maggiore, che corrisponde alla nota tipica del buco nero finale. L’ampiezza, crescente, è massima alla coalescenza, per poi decrescere fino a zero durante il *ringdown*.

Tutti i buchi neri binari, sufficientemente antichi da avere un’orbita quasi circolare, concludono la loro esistenza in questo modo, ma i dettagli dell’onda cambiano a seconda del loro rapporto di massa (mentre non dipendono dalla massa totale del sistema) o del loro livello di rotazione su sé stessi. Ognuna di queste caratteristiche fisiche modula in maniera caratteristica l’onda: la sfida è riuscire a misurare correttamente queste proprietà in un segnale che è molto breve e molto piccolo. Per farlo, bisogna calcolare in anticipo la forma d’onda emessa da tutte le configurazioni possibili. Ognuna di queste onde viene poi confrontata con i dati sperimentali fino a trovare quella più

probabile. Questo è un compito titanico, perché servono almeno 10 milioni di forme d’onda per analizzare un segnale come GW150914. È necessario dunque che l’onda sia generata velocemente, in tempi dell’ordine di 0,05 secondi e che il calcolo teorico fornisca un’approssimazione fedele della realtà. Se così non fosse, le stime dei parametri orbitali potrebbero essere errate. O, peggio, un segnale astrofisico potrebbe essere confuso con il “rumore” dell’apparato sperimentale.

La soluzione del problema è nascosta nelle equazioni della relatività generale che descrivono il campo gravitazionale. Ma sono equazioni molto complesse, la cui soluzione più completa è accessibile solo tramite simulazioni numeriche su supercomputer (di cui si occupa la “relatività numerica”). Solo nel 2005 Frans Pretorius riuscì, per primo, a simulare correttamente la fusione di due buchi neri, dopo 40 anni di sviluppi teorici e tecnologici. E ancora oggi, simulare una singola onda gravitazionale richiede settimane o mesi di calcolo.

Il moto di due corpi in relatività generale, come due stelle o buchi neri, può anche essere risolto analiticamente, cioè con delle formule scrivibili su un pezzo di carta. Un metodo molto efficiente. Purtroppo, le nostre tecniche matematiche, pur

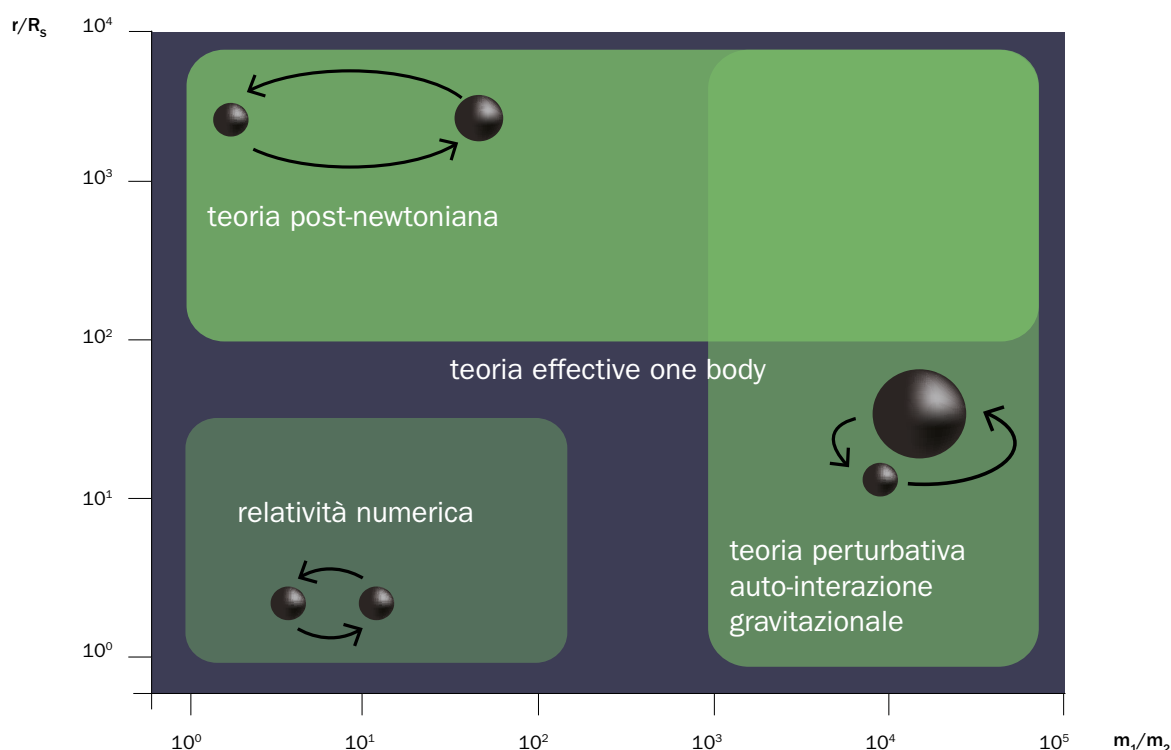
b. Due esempi di forme d’onda gravitazionale da sorgenti lontane: a sinistra il caso di un’orbita circolare, a destra di un’orbita eccentrica. La figura mostra l’andamento nel tempo della variazione relativa di lunghezza (*strain*) dovuta al passaggio dell’onda. Lo *strain* è estremamente piccolo: i numeri sono da intendersi moltiplicati per 10^{-21} . I riquadri si riferiscono alla prima fase (*inspiral*), i tondi mostrano le fasi finali (la coalescenza, seguita dal *ringdown*), simili nei due casi.

sofisticate, sono approssimate: ci permettono di calcolare queste soluzioni solo quando la velocità relativa dei corpi è molto inferiore alla velocità della luce (come nel caso della teoria post-newtoniana), oppure quando uno dei due buchi neri è molto più piccolo dell'altro (come nel caso della teoria perturbativa dell'auto-interazione gravitazionale, in inglese "*self force*"). Sono quindi inadatte a descrivere il sistema fino alla coalescenza, quando gli oggetti ruotano prossimi alla velocità della luce e quando le loro masse sono simili. Ma se si riuscisse a coniugare l'efficienza dei metodi analitici con la completezza delle simulazioni numeriche, il problema sarebbe probabilmente quasi risolto.

Nel 1998, Thibault Damour e Alessandra Buonanno crearono un nuovo formalismo matematico in grado di trasformare il problema del moto di due corpi con masse paragonabili in un problema efficace, in cui una particella puntiforme orbita attorno a un unico corpo fittizio (analogamente all'approccio seguito nella gravità newtoniana). Il moto dei due corpi si rappresenta come una deformazione del moto di una particella puntiforme attorno a un buco nero, un problema, questo, che è risolto

in relatività generale. Questo metodo, denominato *effective one body* (Eob), porta innumerevoli vantaggi: riesce a essere correttamente predittivo fino alla coalescenza; è analitico, quindi efficiente; è flessibile perché può essere completato e migliorato grazie a un numero limitato di simulazioni numeriche; permette di coprire configurazioni della binaria ancora non raggiunte dalle simulazioni; può incorporare effetti di marea gravitazionale, che accelerano il moto orbitale, e quindi permette di descrivere anche binarie di stelle di neutroni fino alla coalescenza, come quella osservata il 17 agosto 2017.

Metodi *effective one body* sono alla base della maggior parte dei modelli d'onda usati per l'analisi dati. Sviluppi recenti riguardano il caso di *inspiral* e coalescenze lungo orbite ellittiche, invece che quasi-circolari, e la cattura gravitazionale dinamica, in cui i due buchi neri si fondono direttamente, senza una precedente fase orbitale quasi-stabile. Ci si aspetta che questo tipo di sorgenti siano osservabili dai rivelatori futuri, come l'Einstein Telescope o Lisa. Per queste configurazioni, ben poche simulazioni numeriche sono al momento disponibili: una sfida aperta per il futuro.



c. Ambiti di validità per le diverse tecniche di soluzione delle equazioni di Einstein nel caso del problema dell'interazione tra due corpi. Sull'asse verticale è riportata la distanza tra i due corpi in unità del raggio di Schwarzschild R_s di un buco nero di massa pari alla somma delle due masse.

Biografia

Alessandro Nagar è ricercatore presso la sezione Infn di Torino. Con il suo gruppo di ricerca, si occupa del problema dei due corpi in relatività generale, all'interfaccia tra approcci analitici, simulazioni numeriche e analisi dati. Dal 2005, collabora con T. Damour su questi argomenti. È membro della collaborazione Virgo.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.2

Mind the gap

Il problema delle masse dei buchi neri

di Michela Mapelli



a. Visualizzazione artistica di GW190521, subito prima dell'evento di fusione dei due buchi neri. Le frecce indicano le possibili direzioni dello spin (ossia dell'asse di rotazione) dei due buchi neri. Come si vede dall'immagine, lo spin giace quasi nel piano dell'orbita della binaria. Questa configurazione degli spin viene interpretata come un indizio della formazione "dinamica" di GW190521, cioè del fatto che i due buchi neri sarebbero entrati a fare parte dello stesso sistema binario per mezzo di incontri ravvicinati tra corpi celesti.

La vita di chi studia buchi neri è diventata molto più movimentata negli ultimi sei anni. L'ennesimo colpo di scena si è verificato il 21 maggio 2019, quando gli osservatori Ligo e Virgo hanno captato il segnale GW190521, che minaccia di provocare una vera e propria rivoluzione.

Già la rivelazione della prima onda gravitazionale, GW150914, ha lasciato fisici e astrofisici di tutto il mondo a bocca aperta, dimostrando che due buchi neri possono ruotare uno intorno all'altro formando un sistema binario e che questo sistema può arrivare a fondersi per emissione di onde gravitazionali. Inoltre, le masse delle due componenti di GW150914, rispettivamente pari a 29 e 36 masse solari, ci hanno dimostrato

che i buchi neri di taglia stellare possono avere massa superiore a venti volte la massa del nostro Sole. Le osservazioni elettromagnetiche, specialmente quelle relative alle cosiddette binarie a raggi X, ci avevano già dimostrato l'esistenza di buchi neri di taglia stellare, ma nessuno di questi era parte di una binaria con un altro buco nero e nessuno di questi aveva massa dell'ordine di 30 masse solari o più. Negli ultimi mesi del 2020, la collaborazione Ligo-Virgo ha presentato i risultati della prima parte della terza presa dati osservativa, svoltasi tra l'aprile 2019 e il marzo 2020. Ad oggi, conosciamo circa 50 eventi di onde gravitazionali, per la maggior parte fusioni di buchi neri. Tra questi, il già citato GW190521

e un evento successivo captato ad agosto (GW190814) hanno nuovamente lasciato a bocca aperta la comunità scientifica. Con una massa totale di circa 150 masse solari, GW190521 è il sistema di buchi neri più massiccio mai osservato attraverso le onde gravitazionali. Ma l'aspetto forse più rilevante di tutti è la massa del buco nero primario, ovvero del più massiccio tra i due buchi neri che componevano il sistema binario prima della fusione. Il buco nero primario di GW190521 ha, infatti, una massa di 85 masse solari, un valore pressoché impossibile da ottenere attraverso l'evoluzione e la morte di una stella massiccia. Vediamo perché.

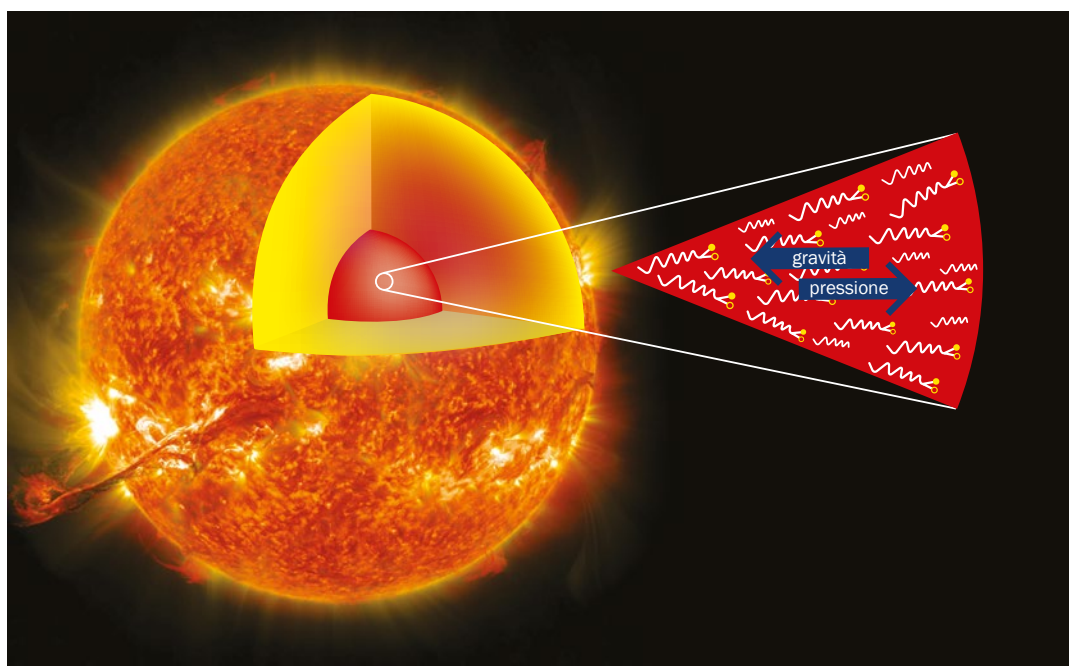
Nel corso della sua vita, una stella rimane in equilibrio grazie al bilanciamento tra forza di gravità e pressione del gas e dei fotoni prodotti dalle reazioni nucleari. Quando una stella massiccia, alla fine del bruciamento del carbonio, produce un nucleo di elio maggiore di circa 30 volte la massa del Sole, la sua temperatura centrale è dell'ordine di un miliardo di gradi. A temperature così elevate, una parte dei fotoni prodotti al centro della stella ha un'energia superiore al milione di elettronvolt. Interagendo con i nuclei presenti al centro della stella, questi fotoni energetici possono portare alla produzione di coppie elettrone-positrone. La trasformazione dei fotoni in coppie elettrone-positrone porta a una riduzione della pressione e quindi a uno sbilanciamento: la gravità degli strati interni della stella non è più bilanciata dalla pressione e la stella diventa instabile. Tale instabilità, detta "instabilità di coppia", perché dovuta alla produzione di coppie elettrone-positrone, ha un impatto cruciale sulle fasi finali della vita della stella e sulla formazione di un buco nero. Per effetto dell'instabilità di coppia, stelle con massa del nucleo di elio compresa tra 30 e 64 masse solari vanno incontro a una serie di pulsazioni, che provocano una riduzione della massa finale della stella. In questo caso, la stella lascia un buco nero

con massa più piccola di quella che avrebbe prodotto se non fosse diventata instabile. Stelle con massa del nucleo di elio tra 64 e 135 masse solari vengono completamente distrutte da un'esplosione di supernova e non lasciano alcun oggetto compatto. Infine, la forza di gravità in stelle con una massa del nucleo di elio maggiore di 135 masse solari è talmente intensa che il collasso non viene mai interrotto e la stella produce un buco nero di massa maggiore di 120 masse solari.

L'impatto di questi processi sulla massa dei buchi neri è notevole: per effetto dell'instabilità di coppia ci aspettiamo un intervallo vuoto (in inglese un *gap*) nello spettro di massa dei buchi neri tra 60 e 120 masse solari. Con una massa di 85 masse solari, il buco nero primario di GW190521 si va a posizionare proprio in mezzo al *gap*, in una regione che veniva considerata proibita.

Ma quello dovuto all'instabilità di coppia non è l'unico *gap* possibile nello spettro di massa dei buchi neri. Il *gap* indotto dall'instabilità di coppia è infatti spesso chiamato "*upper mass gap*", ovvero *gap* superiore, sottintendendo che c'è anche un "*lower mass gap*", un *gap* inferiore. Contrariamente all'*upper mass gap*, il *lower mass gap* non ha motivazioni teoriche, bensì si fonda sui dati di alcune binarie a raggi X osservate nella nostra galassia e in quelle vicine. Una binaria a raggi X è un sistema binario composto da una stella e un oggetto compatto (come un buco nero o una stella di neutroni), in cui c'è trasferimento di massa dalla stella all'oggetto compatto. Il trasferimento di massa provoca emissione di radiazione, parte della quale nella regione dei raggi X. Conosciamo qualche decina di binarie a raggi X per cui è possibile effettuare una misura accurata della massa dell'oggetto compatto, ma nessuno di questi sembra essere nell'intervallo tra le 2 e le 5 masse solari, il cosiddetto *lower mass gap*.

b.
Il grafico visualizza lo sviluppo dell'instabilità di coppia nel nucleo di una stella molto calda e massiccia: la formazione di coppie elettrone-positrone porta a una riduzione della pressione centrale. Ne consegue uno sbilanciamento tra pressione e gravità che porta il nucleo stellare a contrarsi.





c.
Immagine composita della radiazione ultravioletta, visibile e infrarossa proveniente dall'ammasso stellare R136 nella Grande Nube di Magellano. R136 ospita decine di migliaia di stelle giovani, che possono subire incontri ravvicinati l'una con l'altra. È proprio in un ammasso stellare denso come R136 che potrebbero essere nati GW190521 e GW190814.

E qui entra in campo GW190814, con la fusione di due oggetti compatti di massa rispettivamente di 23 e 2,6 masse solari. Il primo dei due oggetti è chiaramente un buco nero, ma il secondo potrebbe essere il buco nero più leggero o la stella di neutroni più pesante che abbiamo mai visto. Di sicuro, la componente secondaria di GW190814 si colloca nel *lower mass gap*. Purtroppo, i dati non ci possono dire di più sulla sua natura, visto che non abbiamo indicazioni forti sulla sua deformabilità e sul suo spin e visto che non è stata osservata alcuna controparte elettromagnetica.

GW190521 e GW190814, quindi, cambiano il nostro modo di guardare allo spettro di massa degli oggetti compatti, mettendo in discussione i due *mass gap*. Tuttavia, c'è una differenza sostanziale tra i due casi. Il *lower mass gap* non ha fondamento teorico, basandosi unicamente sulle osservazioni di un numero limitato di binarie nelle vicinanze del nostro Sole. GW190814 ci suggerisce che ci sono oggetti compatti che popolano l'intervallo tra 2 e 5 masse solari, indipendentemente dalla loro natura e da come si sono formati. La sfida principale a questo punto è capire quanti sono questi oggetti, come si possono formare e quale è la massa massima di una stella di neutroni.

Più delicato è il caso di GW190521. La teoria dell'instabilità di coppia ha infatti robuste basi teoriche. Ma ci sono incertezze in questo modello? Ovviamente sì, come sempre. Le incertezze

principali non riguardano tanto il processo di instabilità di coppia, quanto l'evoluzione delle stelle massicce. Infatti, l'entrata o meno di una stella nell'instabilità dipende da aspetti complessi come il ruolo della rotazione stellare, i processi di trasporto all'interno di una stella e il tasso di reazioni nucleari. Non da ultimo, rimane un'incertezza fondamentale sulla possibilità che l'involuppo esterno della stella partecipi al collasso e diventi parte del buco nero finale. Questi aspetti sono diventati oggetto di numerosi studi pubblicati dopo la scoperta di GW190521 e rappresenteranno probabilmente uno dei campi più vivaci dell'astrofisica stellare nei prossimi anni.

Quali sono i meccanismi alternativi rispetto all'evoluzione stellare per spiegare GW190521? Una possibilità interessante è che il buco nero primario di GW190521 sia il risultato della fusione di due buchi neri più piccoli oppure di due stelle in un ambiente stellare denso, come un ammasso stellare. Questo scenario terrà sicuramente impegnati gli studiosi di dinamica stellare e di ammassi stellari nei prossimi anni. Oppure, GW190521 potrebbe guidarci verso scoperte ancora più esotiche, come quella dei buchi neri formati dal collasso di instabilità gravitazionali nell'universo primordiale.

Di sicuro, le ultime scoperte di Ligo-Virgo aprono la strada a scenari sin qui poco esplorati e promettono un cambio di paradigma nello studio degli oggetti compatti.

Biografia

Michela Mapelli è professoressa all'Università di Padova. Vincitrice di un Erc Consolidator grant e del premio Merac della European Astronomical Society per l'Astrofisica Teorica, studia la formazione delle binarie di buchi neri attraverso modelli dinamici e di evoluzione stellare.

Alta tensione

Le misure della costante di Hubble

di Alessandro Melchiorri



a.

Il fisico canadese, naturalizzato americano, James Peebles, uno dei maggiori "architetti" del modello cosmologico standard Λ cdm.

Nelle ultime due decadi la cosmologia ha sicuramente fatto dei passi da gigante nella comprensione della struttura ed evoluzione del nostro universo. Grazie in special modo alle accurate misure delle anisotropie della radiazione di fondo cosmico effettuate da due satelliti, Wmap (Nasa) e Planck (Esa), si è giunti alla formulazione del modello standard cosmologico, detto in gergo scientifico "modello *Lambda Cold Dark Matter*" (Λ cdm), in grado di spiegare buona parte delle osservazioni. Questo successo, sancito dall'assegnazione di ben sei premi Nobel (l'ultimo, assegnato nel 2019 a James Peebles, uno dei maggiori "architetti" del modello Λ cdm) ha creato una situazione nel campo della cosmologia per certi versi simile a quella

presente nella fisica delle particelle elementari. Analogamente al modello standard delle interazioni fondamentali, il modello Λ cdm è infatti un modello che non solo spiega "tutto", ma che permette anche di fare predizioni accurate che vengono a loro volta puntualmente verificate dai nuovi dati. Tale è il successo del Λ cdm che si è ormai giunti a definire in cosmologia come "nuova fisica" ogni deviazione sperimentale dal Λ cdm stesso. E tali deviazioni sono spesso guardate con sospetto e sufficienza. Di questo tipo, ad esempio, è stata fino a poco tempo fa la reazione di molti cosmologi davanti alla maggiore delle difficoltà attuali del modello Λ cdm: la cosiddetta "tensione" sui valori della costante di Hubble,

vale a dire una discrepanza tra i valori misurati con metodi diretti e indiretti. La legge di Hubble, croce e delizia di ogni cosmologo dal 1929 in poi, stabilisce una proporzionalità diretta tra la velocità di recessione delle galassie e la loro distanza, mediante, appunto, la costante di Hubble H_0 che deve essere determinata sperimentalmente. La storia delle varie osservazioni della costante di Hubble è talmente travagliata e densa di avvenimenti che la sua narrazione potrebbe occupare un lungo romanzo. Basti pensare che il primo a concepirla non fu Hubble ma Georges Lemaître nel 1927 (e per questo, secondo un pronunciamento dell'International Astronomical Union nel 2018, sarebbe più opportuno chiamarla costante di



b.

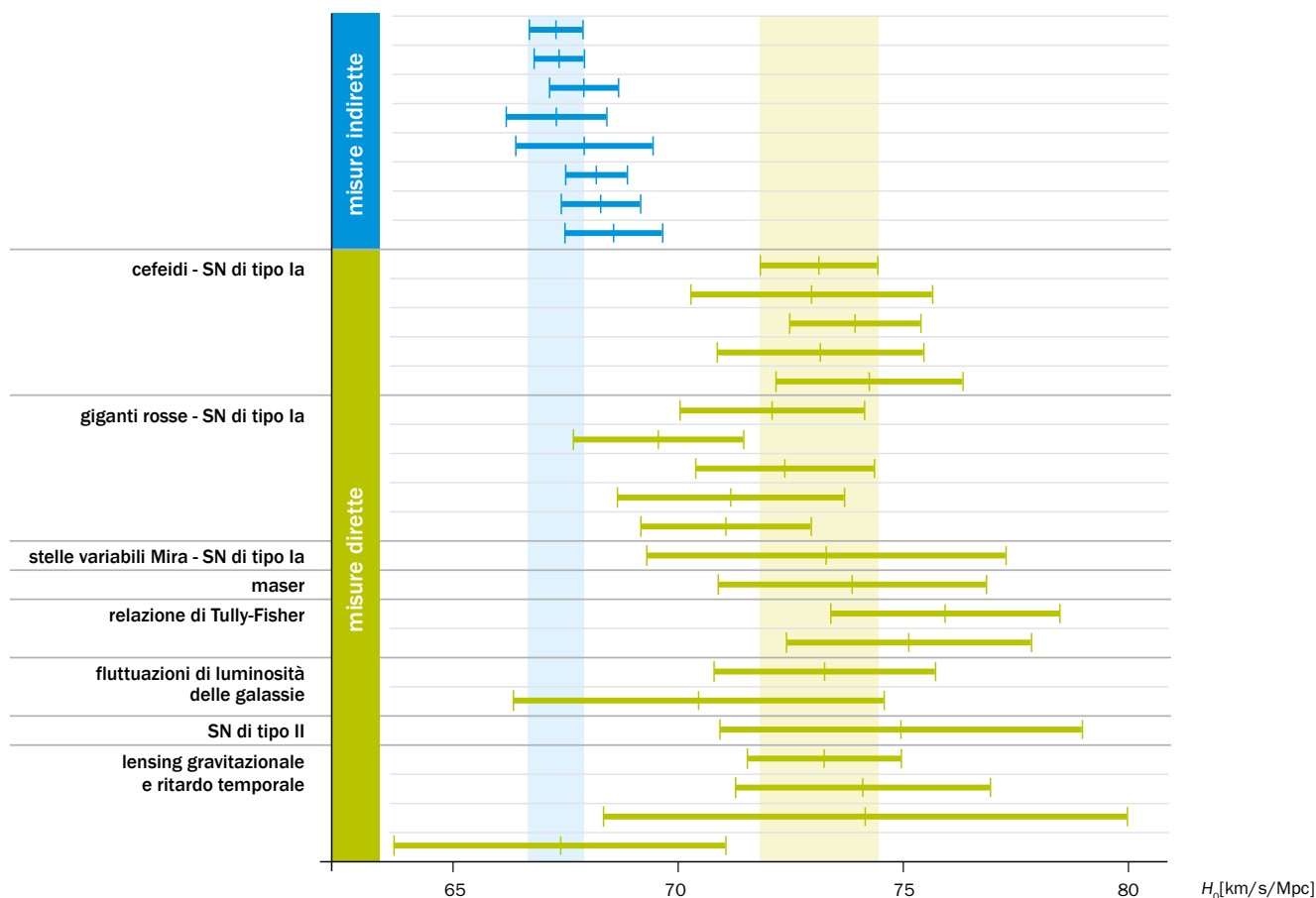
Edwin Hubble osserva il cielo con il telescopio dell'Osservatorio di Monte Palomar, sulle montagne sopra Pasadena, in California.

Hubble-Lemaître) e che la prima determinazione da parte di Edwin Hubble era sbagliata per un fattore dieci, producendo il paradosso di un universo più giovane della nostra Luna e ispirando dunque la famosa frase di Lev Landau "I cosmologi sono sempre senza dubbi e sempre in errore". Dopo un susseguirsi di risultati sperimentali altalenanti, di cui ricordiamo la furiosa diatriba negli anni 70-90 tra gli astronomi Alan Sandage e Gérard De Vaucouleurs, le cui misure differivano di quasi un fattore due, siamo giunti dopo circa cento anni dalla predizione di Hubble e Lemaître a essenzialmente due possibili valori per H_0 . Tali valori differiscono tra loro di solo il dieci per cento, ma sono comunque in disaccordo anche quando si considerino i rispettivi errori sperimentali. Questa differenza sembra essere legata al metodo di osservazione. La costante di Hubble può infatti essere determinata in più modi. Il più naturale e diretto consiste nell'utilizzare la relazione tra magnitudine e *redshift* di oggetti astrofisici come le supernovae di tipo Ia. Il meno diretto, ma più preciso, consiste invece nel determinare il valore del parametro confrontando le misure delle anisotropie della radiazione cosmica di fondo (Cmb) con le predizioni teoriche basate sul modello Λ cdm. Già cinque anni fa le due misure, una derivata dalle misure dirette coordinate da Adam Riess, già premio Nobel nel 2011, e la seconda dai dati della radiazione cosmica di fondo del satellite Planck, risultavano essere in disaccordo appena al di sopra delle tre deviazioni standard. Le prime reazioni al problema sono quindi generalmente state di sufficienza, con le maggiori

critiche rivolte alla possibile presenza di anomalie sistematiche nelle determinazioni dirette. Tuttavia, con il progredire delle misure, la tensione non solo è rimasta, ma è anche aumentata dal punto di vista statistico in modo significativo.

In un recente articolo si è presentata una collezione delle misure attuali, che riportiamo nella fig. c. La differenza tra metodi diretti e metodi indiretti appare ormai piuttosto chiara, con un significato statistico che sfiora (e supera, in alcuni casi) le fatidiche cinque deviazioni standard (i famosi "5 sigma"). Superata quindi la soglia della semplice fluttuazione statistica, ci possono essere solo due spiegazioni: effetti sistematici sperimentali in uno dei due metodi o un problema nel modello Λ cdm.

Molti cosmologi tendono ancora ad attribuire la discrepanza alla presenza di effetti sistematici. Tuttavia, mentre un simile atteggiamento conservativo potrebbe essere ben comprensibile nel caso del modello standard delle particelle elementari, lo è un po' meno nel caso della cosmologia e del modello Λ cdm. Il punto, infatti, è che il modello Λ cdm si basa su tre ipotesi che al momento non sono verificate da nessun altro esperimento di laboratorio. Queste ipotesi sono l'esistenza della costante cosmologica (vd. p. 30 in Asimmetrie n. 18, ndr), della materia oscura (vd. Asimmetrie n. 4, ndr) e di un campo scalare che abbia guidato l'inflazione primordiale (vd. p. 10 in Asimmetrie n. 28, ndr). Se per la materia oscura ci sono buone probabilità per la sua esistenza, data la presenza di validi candidati teorici e di diverse evidenze astrofisiche, come le curve di rotazione delle galassie a spirale, inflazione



e costante cosmologica sono al momento delle pure ipotesi, che si direbbe quasi messe appositamente per far funzionare il modello. Rigirando il coltello nella piaga e seguendo una famosa frase di Edward Witten, potremmo aggiungere che la presenza della costante cosmologica è forse il problema maggiore che abbiamo in fisica fondamentale oggi. Non c'è comunque nessun motivo ragionevole per escludere che il problema sia nel modello Λ CDM. Inoltre, le estensioni del modello che potrebbero risolvere il problema sono tutte molto interessanti e fisicamente plausibili, come possibili interazioni tra materia ed energia oscura o presenza di nuove particelle leggere. In una recente rassegna abbiamo contato almeno una novantina di diverse soluzioni teoriche proposte. La tensione sulla costante di Hubble, inoltre, non è il solo problema presente. Altre anomalie meno significative dal punto di vista statistico, ma che potrebbero fornire altri pezzi del puzzle, sono presenti sia nei dati di Planck che in altre osservazioni, come nel caso delle misure

dell'effetto di lente gravitazionale debole. Facendo tesoro degli errori del passato, l'alternativa è una sola: abbandonare ogni atteggiamento fideistico nella trinità del Λ CDM, mantenere una mente aperta a tutte le soluzioni e aspettarsi meraviglie e/o delusioni (a seconda di come la si pensi) da parte delle osservazioni future.

c. Compilazione di misure recenti della costante di Hubble H_0 , effettuate con diverse tecniche (indicate a sinistra, dove SN sta per "supernova"). Le misure riportate in alto (in blu) sono misure indirette (effettuate con satelliti come Planck e Wmap), mentre le misure in basso (in verde) sono dirette. Figura adattata da un articolo di Di Valentino (2020).

Biografia

Alessandro Melchiorri è professore presso il Dipartimento di Fisica dell'Università di Roma "Sapienza". Si occupa di cosmologia con particolare attenzione verso le misure della radiazione di fondo cosmico. È stato membro delle collaborazioni sperimentali Boomerang e Planck.

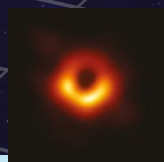
Link sul web:

<https://arxiv.org/pdf/2011.00246.pdf>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.4

[as]

Nel segno di Einstein.



Event Horizon Telescope
immagine del buco nero
supermassiccio al centro
della galassia M87

2019



2017

LIGO-Virgo

osservazione diretta delle
prime onde gravitazionali

2015



1999

Perlmutter, Schmidt, Riess

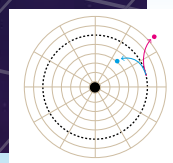
scoperta dell'espansione
accelerata dell'universo

1998



Walsh, Carswell, Weyman
primo esempio di lente
gravitazionale

1979



Hawking

radiazione di Hawking
dei buchi neri

1975



2020

Penrose

teoremi sulle singolarità
di Hawking e Penrose

1969

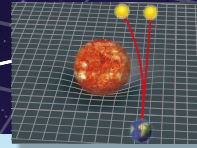


**Bowyer, Byram,
Chubb, Friedman**

scoperta di Cygnus X-1
(buco nero rotante)

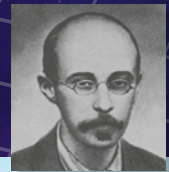
1964

Un secolo
di scoperte,
osservazioni ed
esperimenti sulla
gravità.



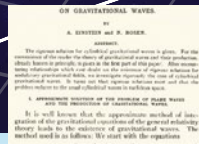
Eddington e Dyson
prima conferma della
relatività generale
(deflessione della luce)

1919



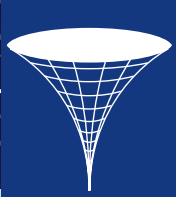
Friedmann
espansione
dell'universo

1922



Einstein
predizione delle onde
gravitazionali

1916



Schwarzschild
soluzione esatta
delle equazioni
di Einstein

1916



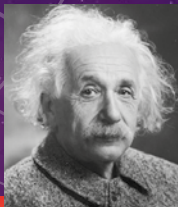
Galileo
universalità
della caduta libera

~1600



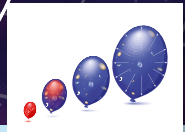
Newton
legge della gravitazione
universale

1687



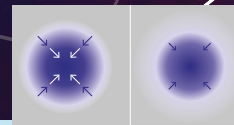
Einstein
teoria della relatività
generale

1915



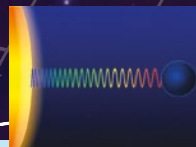
Hubble-Lemaître
legge di recessione
delle galassie

1927-1929



Oppenheimer e Snyder
collasso gravitazionale
e buchi neri

1939



Pound e Rebka
verifica del redshift
gravitazionale

1959



Kerr
buco nero rotante

1963

Uno sguardo all'orizzonte

Immagini di buchi neri supermassicci

di Mariafelicia De Laurentis



Nell'aprile 2019 il mondo scientifico è rimasto a bocca aperta quando il progetto internazionale Eht (Event Horizon Telescope) ha annunciato di aver "scattato" una foto a un buco nero, precisamente al buco nero M87* che si trova al centro della galassia ellittica supergigante Virgo A. La prima foto mai ottenuta di un buco nero non è solo un'immagine affascinante e tecnicamente straordinaria, ma è anche un risultato scientifico di grande importanza che, tra l'altro, fornisce la prova diretta dell'esistenza di buchi neri supermassicci al centro delle galassie e dei nuclei galattici attivi. Questo tipo di osservazioni fornisce un nuovo strumento di indagine della gravità nel suo limite estremo e su una scala di massa finora non accessibile, allo scopo di verificare le varie teorie relativistiche della gravitazione formulate a partire dalla relatività generale. Ma cosa stiamo realmente guardando? Ciò che definisce un buco nero è principalmente il cosiddetto "orizzonte degli eventi", ovvero il limite causalmente connesso dello spaziotempo deformato dalla enorme massa concentrata in un volume molto piccolo, oltre il quale non possiamo ricevere informazioni e da cui né la

materia né la radiazione possono sfuggire. Se un'astronave superasse questo limite puramente geometrico, non osserverebbe in realtà nulla di speciale, almeno fino a quando non si avvicinasse troppo alla singolarità o quando cercasse di tornare indietro. Possiamo immaginare l'orizzonte degli eventi come l'orlo di una cascata: oltre il suo bordo lo spaziotempo cade precipitosamente verso una singolarità che distrugge tutto. Da quel punto in poi le leggi della fisica, così come le conosciamo, non valgono più. Il che significa che tutte le teorie su ciò che sta oltre quel limite sono solo speculazioni. Il destino dell'astronave dipenderebbe in realtà dal tipo di buco nero, distinto da parametri fisici come la rotazione o la carica elettrica. Attualmente sono state osservate tre classi di buchi neri: quelli di massa stellare, formati dal collasso di singole stelle molto grandi, quelli supermassicci e quelli di massa intermedia. I buchi neri supermassicci si trovano al centro della maggior parte delle galassie e possono raggiungere decine di miliardi di masse solari. Essi attraggono le stelle attorno a loro e tendono ad accrescere sempre di più la loro massa. I

a.
I vari fotogrammi del buco nero M87* dell'aprile 2019. Il segmento, di lunghezza pari a 50 milionesimi di secondo d'arco (1 secondo d'arco è uguale a 1/3600 di un grado), mette in evidenza l'incredibile potere risolutivo angolare necessario per ottenere questo tipo di immagine.

buchi neri di massa intermedia si formano attraverso un simile processo di accrescimento su scala minore.

Gli effetti su un osservatore sono più spettacolari nel caso dei buchi neri più piccoli di massa stellare. Essi hanno in realtà un "gradiente" gravitazionale estremo rispetto a quelli supermassicci, cioè si osserva una grande differenza di attrazione gravitazionale tra punti a piccola distanza. Passando vicino a uno di questi oggetti sul quale non cade materia, l'unico indizio della sua esistenza sarebbe l'effetto di "lente gravitazionale" sulle stelle dello sfondo, le cui immagini risulterebbero ingrandite dal percorso della luce lungo lo spaziotempo notevolmente distorto. Avvicinandosi, anche la nostra ipotetica astronave inizierebbe a subire gli effetti del forte campo gravitazionale distorcendosi, senza cambiare il volume, in un modo peculiare, cioè allungandosi in una direzione e schiacciandosi in quella perpendicolare, in un processo detto di "spaghetizzazione". Questo spettacolare fenomeno è stato in realtà osservato nella cattura di stelle che sono poi state compresse e frantumate attraverso il materiale non caduto oltre l'orizzonte degli eventi ma emesso nello spazio.

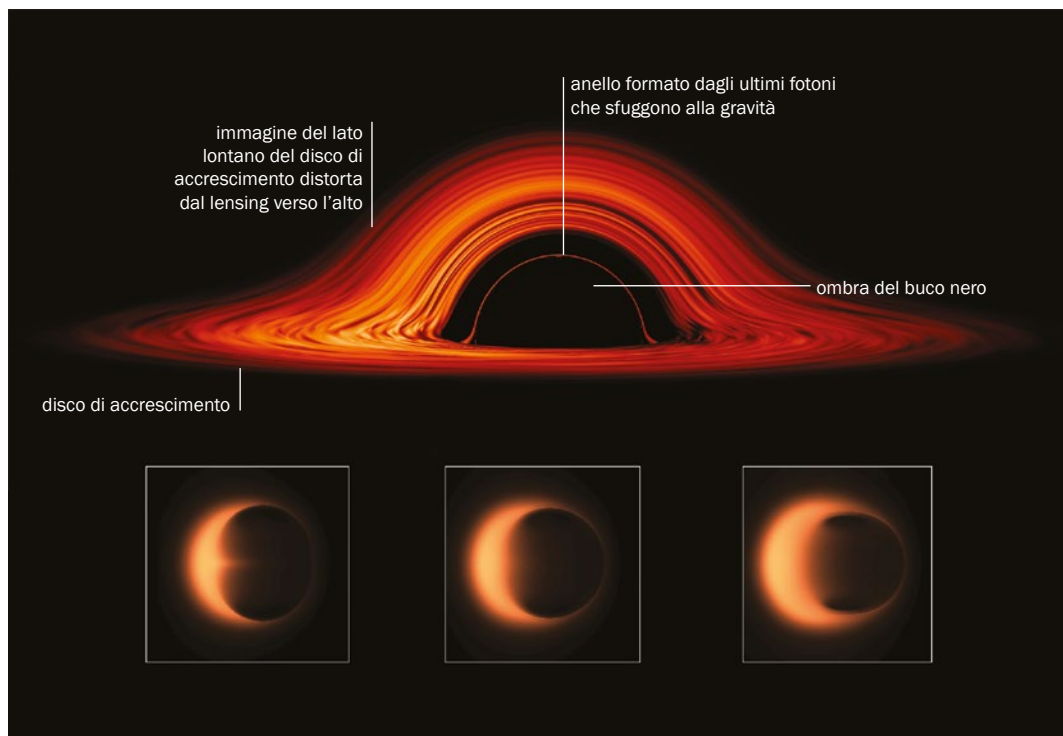
Al contrario, una nostra esperienza di immersione in un buco nero supermassiccio o di massa intermedia sarebbe ben diversa. Poiché la gravità superficiale dei buchi neri è inversamente proporzionale alla loro massa, non sperimenteremmo nulla di speciale superato l'orizzonte: solo un avvicinamento soggettivamente eterno verso un'irraggiungibile regione nera.

E se volessimo osservare questi mostruosi pozzi gravitazionali comodamente dal nostro pianeta? Il forte campo gravitazionale di un buco nero non solo deforma lo spaziotempo, ma causa

anche il surriscaldamento di qualsiasi materiale circostante. Una parte della materia resa così incandescente (nello stato di plasma in cui nuclei atomici e gli elettroni sono separati) cade oltre l'orizzonte degli eventi, scomparendo per sempre, mentre una parte viene espulsa a velocità relativistiche (vicine a quelle della luce) in potenti getti di materia. L'accelerazione delle particelle elettricamente cariche del plasma causa l'emissione di radiazione (detta "di sincrotrone") che crea quindi una regione luminosa appena fuori dall'orizzonte degli eventi, nella quale i fotoni seguono orbite irregolari e le cui dimensioni e forma dipendono dalle proprietà del buco nero. In questa regione luminosa il buco nero dovrebbe risaltare come un'ombra perfetta, causata dalla cattura della luce dall'orizzonte degli eventi: un fenomeno mai osservato fino ad ora.

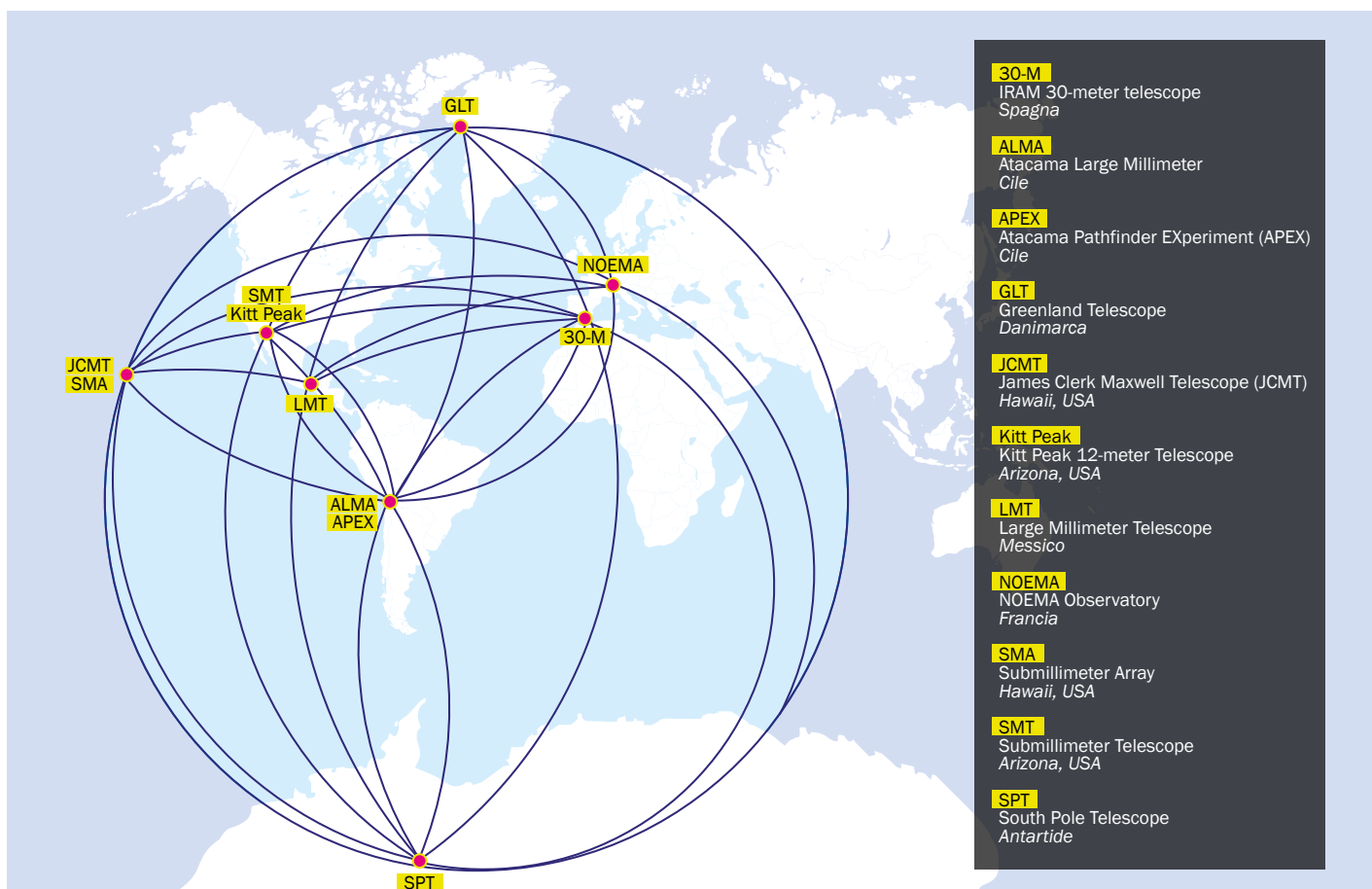
Per osservare una tale immagine occorrono strumenti in grado di distinguere un dettaglio senza precedenti. Eht ne è un esempio ed è stato realizzato per studiare, oltre al buco nero già fotografato M87*, l'ambiente circostante a Sagittarius A*, il buco nero supermassiccio più vicino a noi, che si trova al centro della Via Lattea, la nostra galassia. Eht e il risultato ottenuto rappresentano il culmine di decenni di lavoro tecnico e teorico, un impegno che ha richiesto la stretta collaborazione di oltre 200 ricercatori di tutto il mondo. L'esperimento si basa sull'interferometria radio a lunga distanza e lavora sulla lunghezza d'onda di 1,3 mm, pari a una frequenza di circa 230 GHz. Esso usa uno strumento del tutto nuovo e con il più alto potere risolutivo angolare mai ottenuto. Per capirci, il livello di dettaglio raggiunto è tale da poter leggere la pagina di un giornale a New York stando comodamente seduti in un caffè italiano.

Come abbiamo detto, l'intensa gravità di un buco nero curva



b.

La materia che orbita attorno al buco nero subisce un'intensissima attrazione gravitazionale che la rende incandescente al punto da portarla in uno stato di plasma, in cui nuclei ed elettroni sono separati. Inoltre, la forte accelerazione produce un'intensa emissione di radiazione, che forma un disco luminoso. L'immagine è fortemente distorta dal *lensing* gravitazionale, che proietta il disco anche sopra il piano di rotazione. Tutto quello che si trova oltre l'orizzonte degli eventi non è in grado di emettere luce e dunque produce un'ombra, definita da un sottile anello luminoso costituito dagli ultimi fotoni in grado di sfuggire all'attrazione gravitazionale. L'ombra è asimmetrica a causa della rotazione del buco nero e la sua forma dipende dai dettagli della teoria: osservarla con grande precisione potrebbe permettere di distinguere la teoria di Einstein da teorie alternative della gravità.



lo spaziotempo, agendo come una lente d'ingrandimento e facendo apparire più grande l'ombra del buco nero stesso. Questo rappresenta una formidabile opportunità di verifica per tutte le teorie fondamentali, prima fra tutte la relatività generale, il cui limite principale è di non essere compatibile con la meccanica quantistica alle piccole scale. Alle grandi scale, inoltre, sono richieste enormi quantità di materia oscura ed energia oscura per spiegare la dinamica dell'universo. Poiché tali forme "esotiche" di materia ed energia non sono state finora rivelate, il problema dell'universo oscuro potrebbe richiedere l'estensione o la modifica della teoria di Einstein (vd. p. 25 e p. 28, ndr). In questo contesto, le osservazioni di Eht, con la precisione del microsecondo d'arco, potrebbero fornire un test decisivo di queste nuove teorie. Per il futuro, si tenterà di ottenere anche un'immagine di Sagittarius A*. Sebbene disti da noi "solo" 25.000 anni luce, è in realtà un'impresa resa più difficile dalla presenza di gas e polvere, fortemente concentrati proprio lungo il disco, ovvero lungo la linea di vista con cui osserviamo il centro della nostra galassia. Il "nostro" buco nero, inoltre, ha una massa di

"solo" quattro milioni di masse solari, cioè è 1600 volte più piccolo rispetto a M87*, ed è anche più variabile, poiché la materia cade su di esso in modo turbolento. I primi risultati sono attesi per questo anno, mentre si lavora su altre galassie attive quali Centaurus A, OJ 287 e NGC 1052. Per la "next generation" (ngEht), gli attuali radiotelescopi verranno raddoppiati, per ottenere una migliore risoluzione e quindi vedere con maggiore precisione le sorgenti. Infine, l'ultima frontiera è quella di creare una rete di radiotelescopi formata da satelliti in orbita attorno alla Terra, capaci di restituire immagini cinque volte più nitide.

c.

La rete di radiotelescopi che costituisce l'Eht, ovvero il grande interferometro a lunga distanza che ha consentito di costruire l'immagine del buco nero: si tratta di 11 osservatori che coprono quasi tutto il globo terrestre, dalla Groenlandia all'Antartide e dalle Hawaii all'Europa.

Biografia

Mariafelicia De Laurentis è professoressa di astronomia e astrofisica presso l'Università di Napoli Federico II e ricercatrice dell'Infn di Napoli. Membro dello Science Council dell'Event Horizon Telescope e coordinatrice del gruppo di Gravitational Physics. La sua attività scientifica è incentrata fondamentalmente sull'astrofisica relativistica e la fisica della gravitazione.

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.5

Brividi discreti

Le stringhe e la quantizzazione della gravità

di Marialuisa Frau



a.
Il fisico teorico e matematico
Edward Witten, uno dei
padri della teoria delle
stringhe.

Una delle più spettacolari ed emozionanti scoperte nel campo della fisica degli ultimi anni è stata la rivelazione delle onde gravitazionali generate dalla collisione di buchi neri, che ha dato, dopo più di 100 anni, l'ennesima e definitiva conferma sperimentale alla teoria della relatività generale di Einstein. Tuttavia, oggi sappiamo con certezza che questa teoria non può dare una spiegazione esauriente di tutti i fenomeni gravitazionali. Infatti, anche se la relatività generale prevede, per esempio, l'esistenza dei buchi neri, essa non riesce a spiegare cosa succede al loro interno, dove lo spaziotempo sembra diventare singolare. Più in generale, la relatività è una teoria puramente classica della gravità e non è valida a piccolissime distanze (per esempio alla scala subatomica), dove necessariamente la meccanica quantistica entra in gioco. Una teoria quantistica esiste per le interazioni elettromagnetiche, deboli e forti, che sono descritte in modo unificato dal modello standard delle interazioni fondamentali. Alla scala subatomica, tali forze sono molto più intense della forza gravitazionale, che quindi può anche essere trascurata, ma a scale ancora più piccole, dell'ordine della scala di Planck (ovvero 10^{-35} m), l'intensità della forza gravitazionale diventa del tutto paragonabile a quella delle altre forze e occorre necessariamente tenerne conto. È quindi logico aspettarsi che una formulazione quantistica per la gravità si possa trovare solo nel contesto di una teoria unificata di tutte le interazioni fondamentali.

Uno dei modelli ad oggi più accreditati per l'unificazione delle interazioni fondamentali è la teoria delle stringhe. La caratteristica più significativa di questa teoria è l'ipotesi che i costituenti fondamentali della materia non siano oggetti puntiformi, come avviene nell'ordinaria meccanica quantistica, ma oggetti unidimensionali, una specie di piccole corde, dette "stringhe", la cui lunghezza tipica è dell'ordine della scala di Planck. A ogni stringa è associata una sequenza infinita di particelle, corrispondenti alle infinite frequenze di vibrazione della corda, di massa e spin crescenti al crescere della frequenza di vibrazione, e tra le particelle più leggere è sempre possibile identificare sia il fotone e le altre particelle di spin 1, responsabili della trasmissione quantistica delle interazioni elettrodeboli e forti, sia una particella di spin 2 identificabile come il "gravitone", la particella mediatrice della forza gravitazionale. Tutte queste particelle risultano mutuamente interagenti e questo mostra come nella teoria delle stringhe l'unificazione quantistica delle interazioni fondamentali avvenga in modo automatico.

Nella sua formulazione odierna, la teoria delle stringhe comprende cinque modelli diversi, tutti interpretabili come aspetti diversi di un'unica teoria fondamentale, detta "teoria M" (madre). Questi modelli si basano su una elegante struttura matematica, che ne vincola molto le caratteristiche e li rende quindi, in linea di principio, molto predittivi. Una predizione, a prima vista sconcertante, è quella che lo spaziotempo non abbia solo le quattro dimensioni descritte dalla relatività generale, ma ne abbia in realtà dieci.

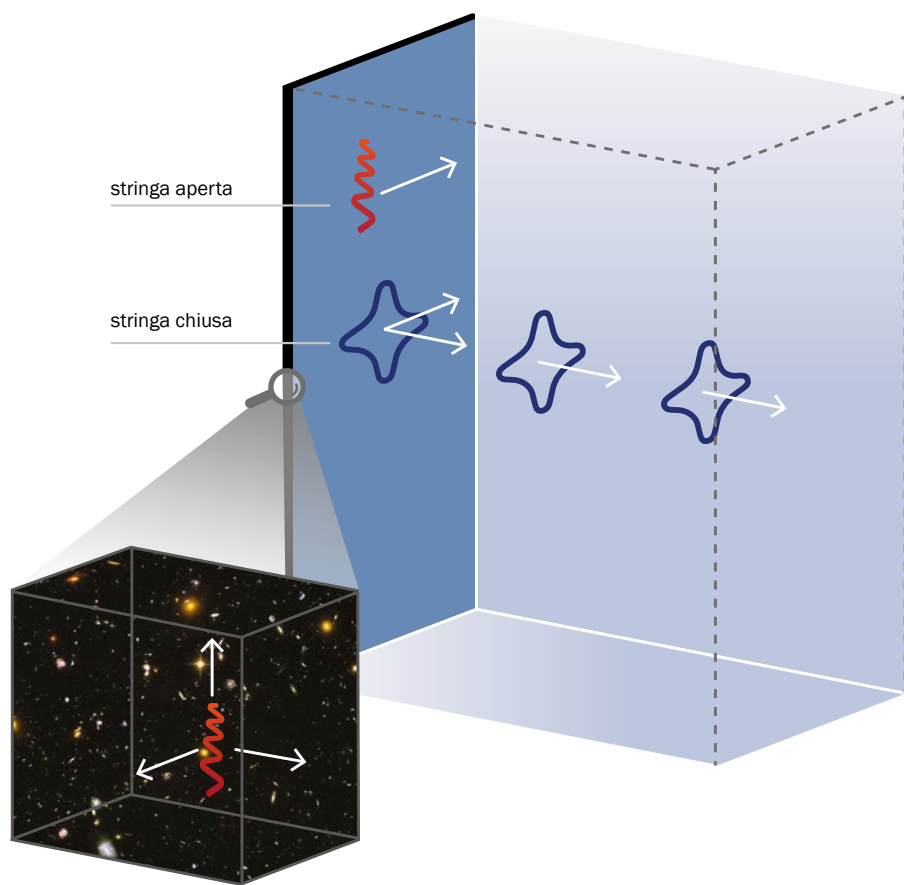
Se la teoria delle stringhe deve spiegare le leggi dell'universo così come lo percepiamo, le sei dimensioni in più non devono essere osservabili nell'esperienza quotidiana. Un possibile meccanismo per spiegare questo fatto è quello della compattificazione, in cui le dimensioni extra anziché essere infinitamente estese come quelle ordinarie, sono di lunghezza finita e arrotolate su cerchi talmente piccoli da essere invisibili se non osservati da molto vicino.

Un'altra possibilità è che l'universo che vediamo sia soltanto un'ipersuperficie a quattro dimensioni, immersa in un universo a dieci dimensioni. L'esistenza di configurazioni di questo tipo, dette "brane" (per indicare che sono generalizzazioni multidimensionali delle membrane bidimensionali), è effettivamente prevista dalla teoria M e permetterebbe di spiegare in modo naturale la differenza che osserviamo fra le

forze elettrodeboli e forti, da un lato, e la forza gravitazionale, dall'altro. Le prime, infatti, avrebbero accesso solo alle dimensioni della "brana" che descrive l'universo, mentre la gravità avrebbe accesso all'intero spaziotempo, rivelando la sua natura multidimensionale.

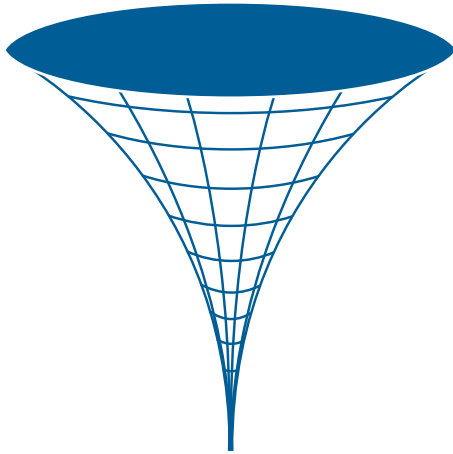
La presenza di dimensioni extra porterebbe non solo a importanti conseguenze sulle caratteristiche delle interazioni gravitazionali a corte distanze, per esempio una deviazione dalla ordinaria legge di gravitazione di Newton, ma avrebbe anche rilevanti implicazioni di carattere cosmologico.

L'esistenza di configurazioni massicce come le "brane" in uno spaziotempo a più dimensioni permette, ad esempio, di studiare le caratteristiche termodinamiche dei buchi neri che, come mostrato da Stephen Hawking negli anni '70, derivano dal considerare correzioni quantistiche alla gravità e non trovano spiegazione nell'ambito della teoria di Einstein. In particolare, è possibile spiegare il fatto che i buchi neri hanno un'entropia proporzionale all'area del loro orizzonte degli eventi e identificare i microstati che questa entropia conteggia. Buchi neri quadridimensionali si possono infatti realizzare tramite sistemi legati di "brane", che si avvolgono in direzioni compatte nello spazio a dieci dimensioni. Queste configurazioni appaiono come un buco nero classico nelle quattro direzioni visibili, ma hanno proprietà che dipendono da come le "brane" si

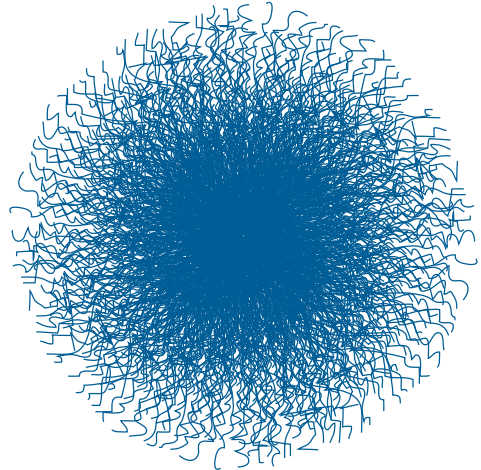


b. Una versione della teoria delle stringhe prevede che esistano, oltre alle tre dimensioni spaziali ordinarie (ridotte qui a una singola linea nera), delle dimensioni extra longitudinali alla nostra brana-universo (qui ne è rappresentata solo una in un piano azzurro), lungo le quali si propagano i mediatori delle interazioni elettrodeboli e forti, descritti da stringhe aperte, e delle dimensioni extra trasversali (qui solo una) lungo le quali si propagano solo i gravitoni, descritti da stringhe chiuse. La materia è confinata nelle tre dimensioni ordinarie.

buco nero



fuzzball



avvolgono nelle dimensioni extra. Esistono quindi diverse configurazioni 10-dimensionali che corrispondono a un singolo buco nero quadridimensionale con una certa area dell'orizzonte, ed è possibile contarle con opportune tecniche matematiche, ottenendo un'entropia che coincide con l'area dell'orizzonte degli eventi, come ipotizzato da Jacob Bekenstein e Hawking.

La ricerca recente ha anche ipotizzato che i buchi neri siano in realtà delle *fuzzball*, ovvero delle "palle disordinate" di oggetti fondamentali unidimensionali, cioè di stringhe. In questo modello, i singoli microstati del buco nero sono descritti a livello classico da soluzioni con una geometria regolare, mentre la geometria singolare dei buchi neri della relatività generale emerge da un processo di media sui possibili microstati, come una sorta di fenomeno collettivo. Un'altra linea di pensiero ispirata dalla teoria delle stringhe ipotizza che l'orizzonte degli eventi, invece di essere solo una superficie che un ipotetico osservatore potrebbe attraversare senza subire conseguenze (se non quella di non poter più tornare indietro!), sarebbe in realtà un *"firewall"*, un muro di energia che distruggerebbe qualunque oggetto cercasse di oltrepassarlo. Queste proposte non sono solamente

speculazioni astratte, ma potrebbero essere sottoposte a controllo sperimentale, poiché le configurazioni ipotizzate danno origine a segnali di onde gravitazionali diversi da quelli calcolati a partire dal modello classico di buco nero.

Gli stessi esperimenti che hanno portato all'ultima conferma della relatività generale potrebbero quindi permetterci nel prossimo futuro di superarla e magari, chissà, di ottenere una verifica sperimentale della teoria delle stringhe!

c. Due rappresentazioni di un buco nero. A sinistra, la deformazione dello spazio con la singolarità al centro, come descritto dalla relatività generale. A destra, l'ipotesi della *fuzzball* che si ha nella teoria delle stringhe, dove il buco nero è visto come una "palla disordinata" composta da stringhe unidimensionali.

Biografia

Marialuisa Frau è professoressa di fisica teorica presso l'Università di Torino. La sua attività di ricerca riguarda la teoria delle stringhe ed è stata membro di numerosi progetti di ricerca internazionali in questo ambito. Partecipa attivamente a varie iniziative volte a promuovere la presenza delle donne nel campo delle scienze.

Link sul web:

<https://www.youtube.com/watch?v=YSWd21z2qqE>

https://www.ted.com/talks/brian_green_making_sense_of_string_theory#t-986706

<https://www.youtube.com/watch?v=OT-WC4D1C0>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.6

Bolle di spazio

La gravità quantistica a *loop*

di Francesca Vidotto

Un secolo fa, la relatività generale ha cambiato il nostro modo di pensare alla forza di gravità. Al cuore della scoperta di Einstein c'è il concetto che lo spaziotempo è il campo gravitazionale. Ma la natura quantistica dei campi ha immediatamente posto il problema di come descrivere le proprietà quantistiche del campo gravitazionale. Il problema, già delineato negli anni '30 da scienziati come lo stesso Einstein e il russo Matvei Petrovich Bronstein, ha trovato la sua prima formulazione moderna nei lavori di John Wheeler e Bryce de Witt alla fine degli anni '60. La gravità quantistica a *loop* continua oggi questa direzione di ricerca. Nata alla fine degli anni '80, a partire dai lavori di Abhay Ashtekar, Lee Smolin e Carlo Rovelli, oggi continua a maturare fornendoci uno scenario coerente su come trattare matematicamente lo spaziotempo quantistico. Si tratta di una teoria compatibile con la nostra conoscenza attuale delle particelle elementari e delle altre forze, ma a differenza della teoria delle stringhe non è una teoria unificata, cioè non pretende di essere la "teoria del tutto" o la teoria finale della fisica. Nella gravità quantistica a *loop* lo spazio è descritto da stati quantistici chiamati "reti di spin" (in inglese *spin network*), i cui nodi corrispondono ai quanti elementari dello spazio, mentre le linee rappresentano la sua struttura generale (vd. fig. a). In questa teoria, lo spazio non è più continuo ma granulare, è formato, cioè, da quanti elementari di spazio di dimensione piccola ma finita. Questo è analogo a quello che succede nella teoria dell'elettromagnetismo con i fotoni: la luce, infatti, è formata da fotoni e il campo elettromagnetico continuo è un'approssimazione degli insiemi di fotoni. Allo stesso modo, lo spaziotempo continuo della relatività generale è un'approssimazione delle reti di quanti di spazio. Ma mentre i fotoni sono particelle che si muovono nello spazio, i quanti di spazio sono essi stessi la grana fine che forma lo spazio fisico. Inoltre, le grandezze associate ai quanti elementari di spazio, cioè per esempio il loro volume e l'area della loro superficie, sono "quantizzate", cioè non possono essere arbitrariamente piccole e possono assumere solo valori particolari, come accade per l'energia degli atomi o per il momento angolare. Questa discretizzazione è una manifestazione tipica della meccanica quantistica. Il nome "reti di spin" deriva dal fatto che i possibili valori che la quantità osservabile "area" può assumere sono analoghi a quelli del momento angolare della meccanica quantistica elementare, chiamati spin.



a.

La gravità quantistica a *loop* descrive il modo in cui i quanti di spazio interagiscono tra loro. Le relazioni tra i quanti sono rappresentate da grafi chiamati "reti di spin". I quanti non sono localizzati nello spazio, ma sono essi stessi lo spazio: sono le loro interazioni a determinare quanto ognuno di essi è vicino a un altro, senza dover fare riferimento a uno spazio esterno.



b.

La collaborazione e l'amicizia di due scienziati, Carlo Rovelli (a sinistra) e Lee Smolin (a destra), sono state il motore per lo sviluppo della gravità quantistica a *loop*. Qui sono ritratti in Messico nel 2007, durante Loops'07, una delle conferenze internazionali biennali della comunità che lavora su questa teoria. Le conferenze di questa serie riuniscono ogni due anni centinaia di scienziati da tutto il mondo.

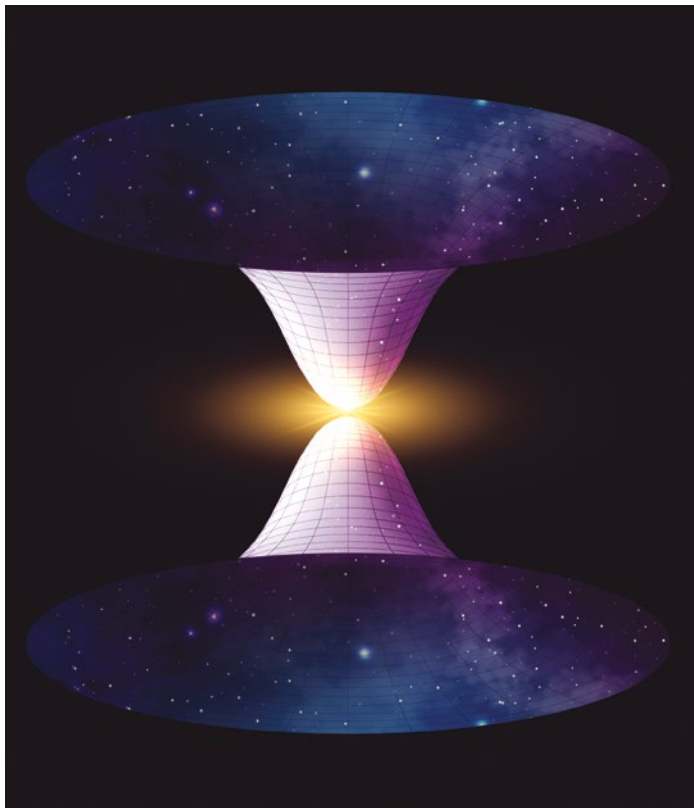
Questa quantizzazione dello spazio implica che la gravità quantistica a *loop* sia radicalmente diversa dalle teorie di campo tradizionali come l'elettromagnetismo, dove le variabili di campo dipendono dalla posizione in uno spazio continuo. Lo spazio continuo non esiste in natura, esiste solo come approssimazione matematica. La matematica della gravità quantistica a *loop* somiglia piuttosto alla formulazione delle teorie su reticolo introdotte nei primi anni '70 da Kenneth Wilson nell'ambito della formulazione quantistica delle interazioni forti (la cromodinamica quantistica) (vd. in *Asimmetrie* n. 14 p. 26, ndr).

Ma è proprio la discretizzazione dello spazio, presente nella gravità quantistica a *loop*, la chiave di volta per andare oltre un ostacolo che aveva reso vani i tentativi precedenti di quantizzare la gravità: l'ostacolo delle "divergenze ultraviolette". Si tratta di quantità infinite che appaiono

con i metodi tradizionali delle teorie di campo: nella gravità quantistica a *loop*, invece, abbiamo solo quantità finite. Questo permette di studiare le equazioni che regolano lo spaziotempo al di là delle approssimazioni alla portata dei metodi di calcolo tradizionali (detti *perturbativi*), aprendo alla possibilità di studiare nuovi fenomeni.

La scomparsa dello spazio assoluto che contiene la materia, sostituito da quanti del campo gravitazionale, è un'eredità della relatività generale, dove lo spaziotempo è esso stesso un campo dinamico, e i campi non sono localizzati nello spazio ma solo l'uno rispetto all'altro. Allo stesso modo, la gravità quantistica a *loop* eredita dalla relatività generale la nozione "relazionale" di tempo. La teoria, cioè, non descrive come le variabili fisiche evolvono "nel tempo", ma solo come evolvono "le une rispetto alle altre".

La matematica delle reti di spin è stata



c.
Nella gravità quantistica a *loop* non ci sono gli infiniti (le singolarità) della relatività generale, quali il Big Bang o il centro di un buco nero. La discretizzazione quantistica previene la loro comparsa. Quando la materia collassa, raggiunge uno stato di densità molto alta ma non infinita. Raggiunto questo massimo, si produce una specie di rimbalzo per cui si avvia il processo contrario e la materia comincia a espandersi. Questo processo implica che il collasso che porta alla formazione di un buco nero sia seguito da una fase di espansione nota come buco bianco. Allo stesso modo, il Big Bang sarebbe quindi in realtà un Big Bounce: il nostro universo che si espande verrebbe da una fase precedente di contrazione.

Biografia

Francesca Vidotto è professoressa alla Western University in Canada. Il suo lavoro spazia dagli aspetti concettuali della gravità quantistica, alle sue applicazioni in cosmologia e per i buchi neri. Nel 2014 ha pubblicato con Carlo Rovelli il libro di testo *"Covariant Loop Quantum Gravity"*.

Link sul web:

<https://youtu.be/x9jYH5VIF9E>
<https://youtu.be/MgwJmWXoWWI>
<https://youtu.be/dW7J49UTns8>

DOI: 10.23801/asimmetrie.2021.30.7

introdotta negli anni '70 da Roger Penrose, che nel 2020 ha ottenuto il premio Nobel per i suoi contributi alla relatività generale. Alla fine degli anni '80, Ted Jacobson, Lee Smolin e Carlo Rovelli, usando una tecnica introdotta da Wilson chiamata "Wilson loops", sono riusciti per la prima volta a risolvere l'equazione principale del campo quantistico gravitazionale, l'equazione di Wheeler-de Witt. A metà degli anni '90, usando le reti di spin di Penrose, Smolin e Rovelli sono riusciti a calcolare i valori discreti che possono assumere l'area e il volume. Questo risultato rappresenta il cuore della teoria ed è il punto di partenza per i successivi sviluppi della teoria della gravità quantistica a *loop*.

Negli anni duemila, dopo vent'anni di lavoro, una collaborazione internazionale guidata da Rovelli ha sviluppato le equazioni di evoluzione che definiscono la probabilità che una rete di spin possa evolvere in un'altra.

Le conseguenze principali della teoria della gravità quantistica a *loop* riguardano i due fenomeni per i quali supponiamo che gli aspetti quantistici della gravità non possano essere trascurati: l'universo primordiale e la comprensione dei buchi neri. Per quanto riguarda l'universo primordiale ne consegue la possibilità che il Big Bang sia stato solo una transizione da una precedente fase di contrazione dell'universo. Un'intensa attività di ricerca è in corso per studiare le possibili tracce che questo cosiddetto "*Big Bounce*" ("grande rimbalzo") può avere lasciato nella radiazione cosmica di fondo (vd. in *Asimmetrie* n. 17 p. 10, ndr).

Nel caso dei buchi neri, la teoria indica che il collasso che porta alla formazione del buco nero prosegue al suo interno, fino a un massimo della densità di energia e a un massimo della corrispondente curvatura dello spaziotempo. Il raggiungimento di questo massimo porta anche in questo caso a un rimbalzo, in una fase di espansione che è descritta in relatività generale come "buco bianco". I buchi bianchi sono una possibilità prevista dalla relatività generale, ma non ne abbiamo alcuna osservazione ad oggi. Potremmo però in futuro avere indicazioni della loro esistenza, poiché le transizioni da buco nero a buco bianco potrebbero produrre raggi cosmici di alta energia potenzialmente osservabili e i residui di queste transizioni potrebbero essere una componente della materia oscura. Ad oggi, non ci sono osservazioni astrofisiche che supportino direttamente la gravità quantistica a *loop*, ma allo stesso tempo nessuna è in conflitto con essa. Si tratta di una teoria costruita sulla base della relatività generale, rispettandone le proprietà e le simmetrie. La teoria è naturalmente compatibile con l'esistenza di una costante cosmologica positiva, cioè con l'espansione accelerata dell'universo, e con la teoria standard delle particelle elementari. A differenza di altre teorie, non richiede l'esistenza di extra-dimensioni o di particelle supersimmetriche, per le quali finora non ci sono riscontri. Una teoria della gravità quantistica diventerà credibile solo quando avremo conferme sperimentali delle sue previsioni. Dunque, la teoria della gravità quantistica a *loop* è da considerarsi per ora solo ipotetica, ma è una possibile soluzione per la comprensione delle proprietà quantistiche dello spazio e del tempo. Ed è una prova concreta del fatto che mettere coerentemente insieme meccanica quantistica e relatività generale è possibile.

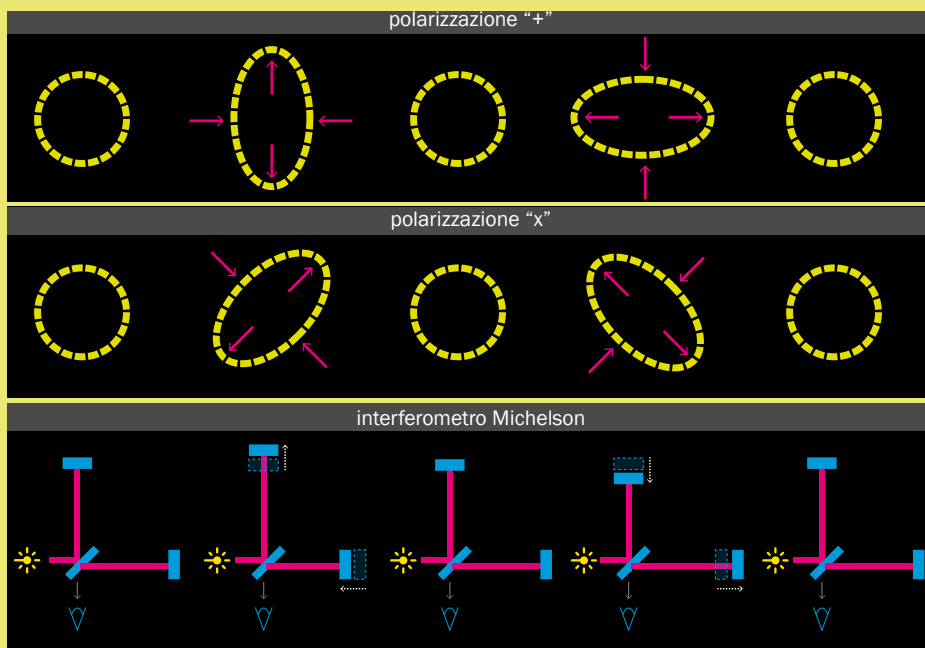
Antenne in ascolto

Presente e futuro dell'interferometria gravitazionale

di Michele Punturo

a.

Effetto del passaggio di un'onda gravitazionale. Un'onda che arriva perpendicolarmente al piano della figura possiede due modi di oscillazione principali (denominati polarizzazione "+" e polarizzazione "x") che inducono le deformazioni mostrate in figura su un anello circolare. Ad esempio, nel pannello superiore, il cerchio viene schiacciato orizzontalmente e allungato verticalmente, poi torna circolare, quindi la direzione di schiacciamento e allungamento si scambiano. Il terzo pannello dall'alto mostra cosa avviene di conseguenza sui due bracci di un interferometro gravitazionale, come Virgo. I bracci (in cui si propaga un raggio laser) sono inizialmente a riposo: quando passa l'onda gravitazionale vengono allungati e accorciati in accordo con quanto descritto sopra. La modifica della lunghezza dei bracci provoca un differente cammino dei raggi laser, e questo modifica la figura di interferenza tra i due fasci laser, mettendo così in evidenza il passaggio dell'onda.



Negli ultimi cinque anni abbiamo assistito a una serie di osservazioni astronomiche senza precedenti, che ci ha fornito il primo catalogo di eventi di onde gravitazionali. Tutto questo è stato possibile grazie alla costruzione e al potenziamento di una rete globale di rivelatori di onde gravitazionali: i due interferometri Ligo, negli Stati Uniti, e l'interferometro Virgo, in Italia, a Cascina (nei pressi di Pisa). Queste incredibili macchine sono il frutto della perseveranza degli scienziati: ideate negli anni '80, sono state realizzate nella loro configurazione iniziale a cavallo degli anni 2000, ma sono stati necessari ulteriori 15 anni di sviluppo e potenziamento per raggiungere la sensibilità necessaria alla rivelazione del passaggio di un'onda

gravitazionale, grazie alle ultime generazioni di interferometri Advanced Ligo e Advanced Virgo. Il principio di funzionamento di Ligo e Virgo è strettamente legato all'effetto fisico prodotto dal passaggio di un'onda gravitazionale. Nella teoria della relatività generale di Einstein, le onde gravitazionali, infatti, sono una perturbazione della curvatura dello spaziotempo che viaggia alla velocità della luce. L'effetto sui corpi immersi nello spaziotempo è la modulazione, seppur quasi impercettibile, della loro dimensione secondo due schemi geometrici (vd. fig.a), definiti dalla polarizzazione delle onde stesse, indicate convenzionalmente dai simboli + e x. L'ampiezza dell'oscillazione della distanza

fra due punti è data dal prodotto fra l'ampiezza dell'onda gravitazionale, che è estremamente piccola, dell'ordine di 10^{-19} - 10^{-23} per eventi di buchi neri stellari, e la distanza originaria fra i due punti stessi. Per dare un'idea delle grandezze in gioco, è come se dovessimo misurare la variazione della distanza Terra-Proxima Centauri (la stella più vicina a noi fuori dal Sistema Solare, circa 260mila volte più distante del Sole) con una precisione pari alla dimensione di capello. Per rendere, quindi, tecnologicamente possibile la misura di tale oscillazione, la lunghezza del rivelatore deve essere la più grande possibile. Sulla superficie terrestre, curva, la dimensione lineare possibile per questi rivelatori è dell'ordine di qualche chilometro o al massimo di

poche decine di chilometri. Virgo è un interferometro con bracci di 3 km, Ligo di 4 km. La variazione, in questo caso, è di appena un milionesimo di milionesimo di metro circa, meno di un milionesimo del raggio di un protone!

Per estendere virtualmente i bracci a una lunghezza equivalente di qualche centinaio di chilometri, guadagnando proporzionalmente sensibilità, si inseriscono nell'interferometro grandi specchi che formano delle cavità ottiche risonanti nei bracci stessi. Essi costringono i fotoni della luce laser a rimbalzare ripetutamente e a spendere un tempo molto maggiore all'interno delle cavità stesse, come se fossero in un interferometro molto più lungo e quindi più sensibile. Una cura maniacale è applicata per isolare gli specchi dell'interferometro da ogni forma di disturbo esterno e interno, realizzando l'approssimazione più vicina alla condizione di un sistema in caduta libera (sul piano orizzontale). Il rumore sismico, dovuto alla vibrazione naturale e antropogenica del suolo, è abbattuto di circa 14 ordini di grandezza grazie a una serie di filtri sismici realizzati con una cascata di pendoli. Il rumore termico, quello dovuto alla vibrazione browniana delle molecole e ad altri meccanismi termo-meccanici e termo-ottici, è ridotto tramite l'opportuna scelta del disegno e dei materiali degli specchi e delle sospensioni. Il rumore dovuto alla natura quantistica della luce laser è evaso attraverso l'iniezione di stati "strizzati" di luce (*frequency independent squeezing*), che permettono di eludere il principio di indeterminazione di Heisenberg per l'ampiezza e la fase del segnale in uscita dell'interferometro.

Grazie alla raccolta dati delle prime tre fasi di osservazione, in pochi anni è stato svelato un universo oscuro, popolato da buchi neri di massa stellare e recentemente di massa intermedia (vd.

p. 14, ndr), è iniziata l'astrofisica gravitazionale in campo forte, con lo studio dei buchi neri, e si è aperta l'era dell'astronomia multimessaggera. E altre migliorie tecnologiche sono già in cantiere, con grandi aspettative per nuove scoperte.

A un certo punto, però, inevitabilmente si giungerà al limite imposto dall'infrastruttura di Virgo, che impedirà ulteriori miglioramenti della sensibilità. Per questo motivo, già da più di un decennio, si sta pensando alla progettazione della terza generazione di osservatori interferometrici di onde gravitazionali, in cui il progetto dell'infrastruttura ospitante l'osservatorio è elemento chiave. Nel 2020, l'Einstein Telescope (Et) è stato proposto come nuova infrastruttura di ricerca di rilevanza strategica. L'Italia si candida a ospitare Et in Sardegna grazie alle condizioni ambientali estremamente favorevoli offerte da tale collocazione: la Sardegna, infatti, presenta un livello di rumore sismico naturale e antropogenico bassissimo, caratteristiche geologiche, idrogeologiche e rocciose adatte a ospitare infrastrutture sotterranee e una tradizione storica nelle imprese minerarie. Un secondo sito è stato candidato nella regione del Mosa-Reno, a cavallo del confine fra Olanda, Belgio e Germania.

L'idea originale di Et consiste nella realizzazione di una infrastruttura di ricerca capace di coprire il più ampio spettro di frequenze misurabili da terra, con una speciale attenzione alle basse frequenze (da pochi Hz fino a 10 Hz), in grado di operare sia in rete con altri osservatori di 2^a e 3^a generazione, sia da solo, e capace di ospitare per molte decadi le evoluzioni della tecnologia dei rivelatori, senza ridurne le potenzialità. Sarà un osservatorio sotterraneo, per ridurre l'impatto diretto e indiretto del rumore sismico, in cui ogni rivelatore sarà



b.

Adalberto Giazotto, uno dei padri dell'interferometro Virgo, davanti a uno dei bracci dell'esperimento nel 2010. Il tubo a vuoto si estende per 3 km e al suo interno rimbalza il fascio laser, riflesso dai due grandi specchi che compongono la cavità ottica di Fabry-Perot.



c. Installazione dei sismometri all'interno della miniera di Sos Enattos (in provincia di Nuoro), per la qualificazione del sito in Sardegna candidato a ospitare l'Einstein Telescope.

composto da due interferometri, uno specializzato sulla bassa frequenza e uno sull'alta frequenza. L'intero osservatorio sarà composto da tre rivelatori disposti sui lati di un triangolo equilatero avente lato lungo circa 10 km.

L'interferometro specializzato per l'alta frequenza porterà al limite le soluzioni tecnologiche attuali, iniettando maggiore potenza laser nelle cavità di Fabry-Perot, realizzando specchi più grandi e pesanti, migliorando le prestazioni termomeccaniche delle ottiche, aumentando il fattore di *squeezing*. L'interferometro per la bassa frequenza, invece, richiederà lo sviluppo di nuove tecnologie, abbattendo il rumore termico attraverso la criogenia e con nuovi materiali per le ottiche e le sospensioni,

sviluppando laser e opto-elettronica che lavorano a una lunghezza d'onda diversa da quella usata nei rivelatori attuali. L'insieme di queste soluzioni tecnologiche e il fatto di avere bracci molto più lunghi dei rivelatori attualmente in funzione consentirà un miglioramento generalizzato della sensibilità di almeno un fattore dieci (e molto di più a bassa frequenza).

L'impatto sulla scienza sarà rivoluzionario: Et potrà accedere a coalescenze di buchi neri di massa stellare (inferiore a 100 masse solari) e intermedia (tra 100 e 10.000 masse solari) in quasi tutto l'universo, fino a raggiungere l'era oscura prima della formazione delle prime stelle. Questo ci fornirà preziose informazioni sull'evoluzione dell'universo, su come si sono formati i buchi neri supermassicci presenti al centro delle galassie, sulla fisica della gravitazione in condizione di campo estremo e potrebbe anche portare sorprendenti soluzioni sulla natura della materia oscura nell'universo. Et ci mostrerà con grande dettaglio e grande statistica la coalescenza di stelle di neutroni, aiutandoci a comprendere la fisica nucleare all'interno di tali corpi compatti. L'osservazione contemporanea dell'emissione di onde gravitazionali e di fotoni (e neutrini) permetterà sia di provare modelli per tali stelle, sia di effettuare misure cosmologiche, sia di provare i modelli di propagazione delle onde gravitazionali sviluppati nell'ambito della relatività generale.

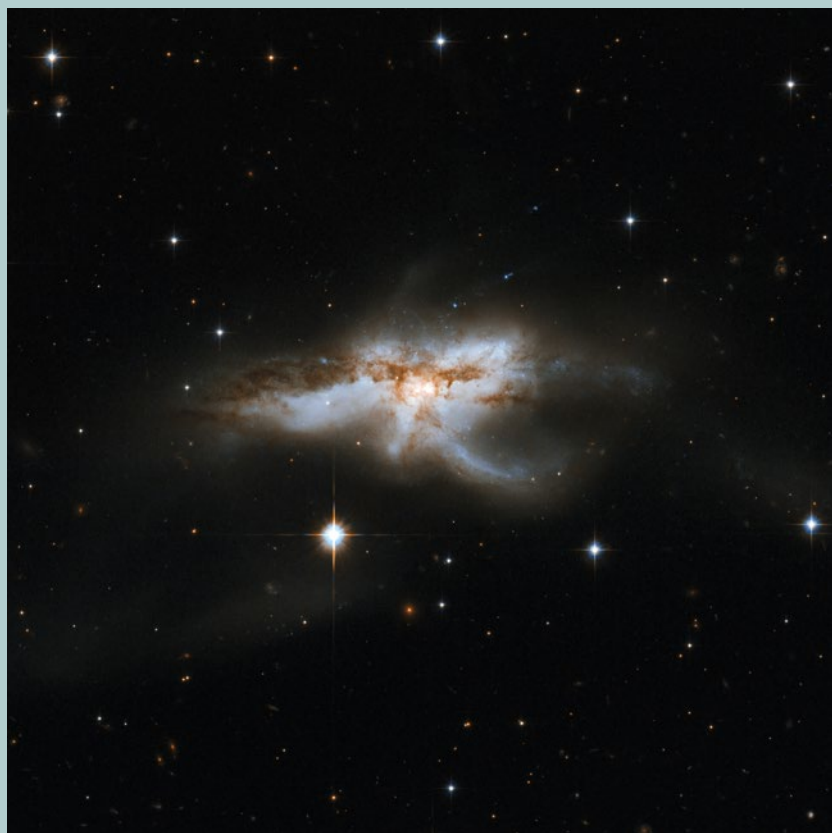
Biografia

Michele Punturo, dirigente di ricerca presso la sezione Infn di Perugia, è stato *detector coordinator* dell'esperimento Virgo, coordinatore scientifico del disegno concettuale dell'Einstein Telescope e coordinatore di diversi progetti europei rivolti alla definizione delle tecnologie abilitanti di Et. Attualmente è responsabile nazionale del progetto Et, coordinatore internazionale della proposta Et presso Esfri (European Strategy Forum on Research Infrastructures).

Sinfonia cosmica

L'universo gravitazionale in tutte le sue frequenze

di Monica Colpi e Alberto Sesana



a.
Immagine ottica di NGC6240, una delle più note fusioni tra due galassie. La geometria irregolare indica che il sistema è composto da due galassie in interazione. Osservazioni a raggi X hanno evidenziato la presenza di due buchi neri supermassicci in accrescimento, separati da poche migliaia di anni luce – meno della distanza tra il nostro Sole e il centro della Via Lattea.

Con la missione Lisa (Laser Interferometer Space Antenna) dell'Agenzia Spaziale Europea (Esa), nello spazio, e l'esperimento Pulsar Timing Array (Pta), da terra, studieremo l'universo attraverso le onde gravitazionali emesse da una varietà di sorgenti, al fine di comprendere da una nuova prospettiva l'origine ed evoluzione delle strutture cosmiche, la natura geometrica della gravità e l'espansione dell'universo. Negli ultimi decenni, con i più grandi telescopi da terra e dallo spazio, abbiamo scoperto che l'universo ospita centinaia di miliardi di galassie, elementi di una ragnatela cosmica complessa (il cosiddetto *cosmic web*), composta da filamenti di gas e materia oscura e da immensi vuoti. Una struttura in evoluzione, dove galassie, luoghi di intensa formazione stellare all'interno di aloni di materia oscura, crescono in massa attraverso l'accrescimento di materia, convogliata

lungo i filamenti della rete cosmica da reciproche collisioni, che avvengono nei punti di intersezione fra i filamenti. Oggi sappiamo che in ogni galassia dell'universo sono presenti milioni di buchi neri, esito del collasso gravitazionale di stelle massicce e che al suo centro si trova un "*massive dark object*" ("un oggetto oscuro e massiccio") di milioni o miliardi di masse solari. Con la scoperta delle onde gravitazionali da parte di Ligo e Virgo, l'esistenza dei buchi neri di origine stellare ha trovato conferma osservativa. In modo analogo, l'esplorazione dell'universo gravitazionale con Lisa e Pta, rispettivamente intorno al milliHz e al nanoHz, ci permetterà di rivelare segnali di *inspiral* (vd. p. 11, ndr) e coalescenza per confermare la natura di questi *massive dark objects*. Sono buchi neri supermassicci?

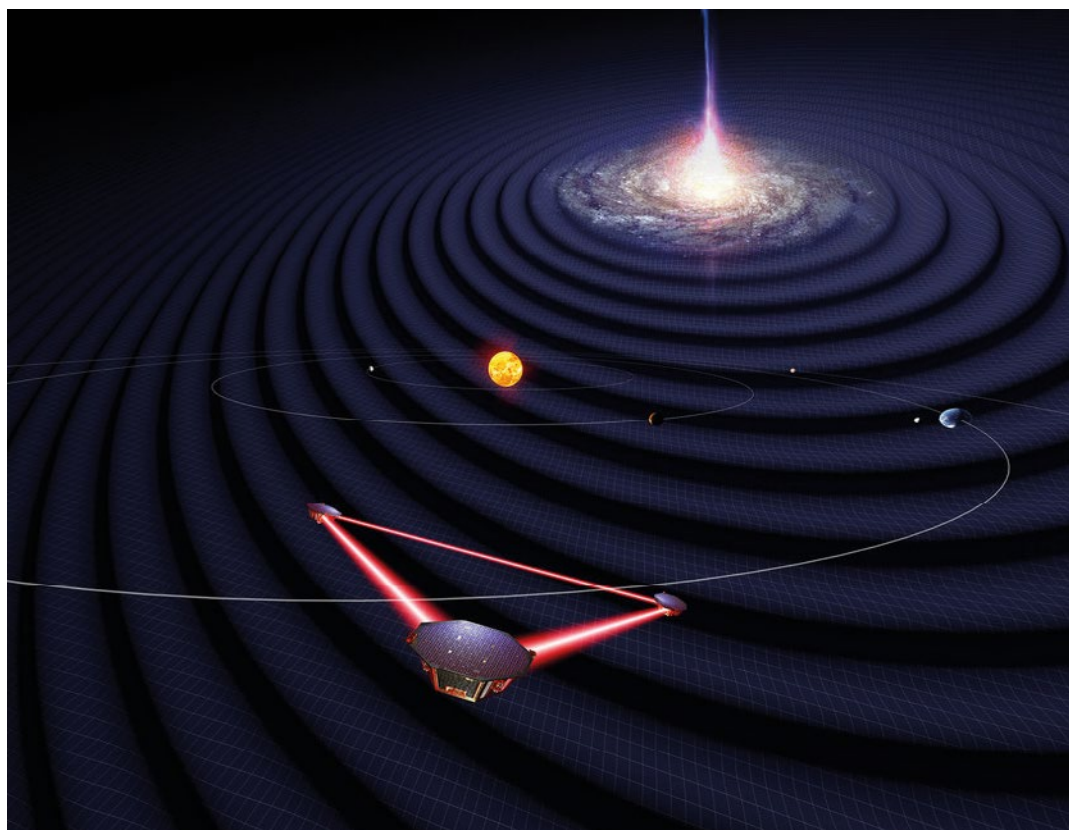
Lisa trasferisce nello spazio il principio dell'interferometria per la rivelazione delle onde gravitazionali sviluppato da Ligo e

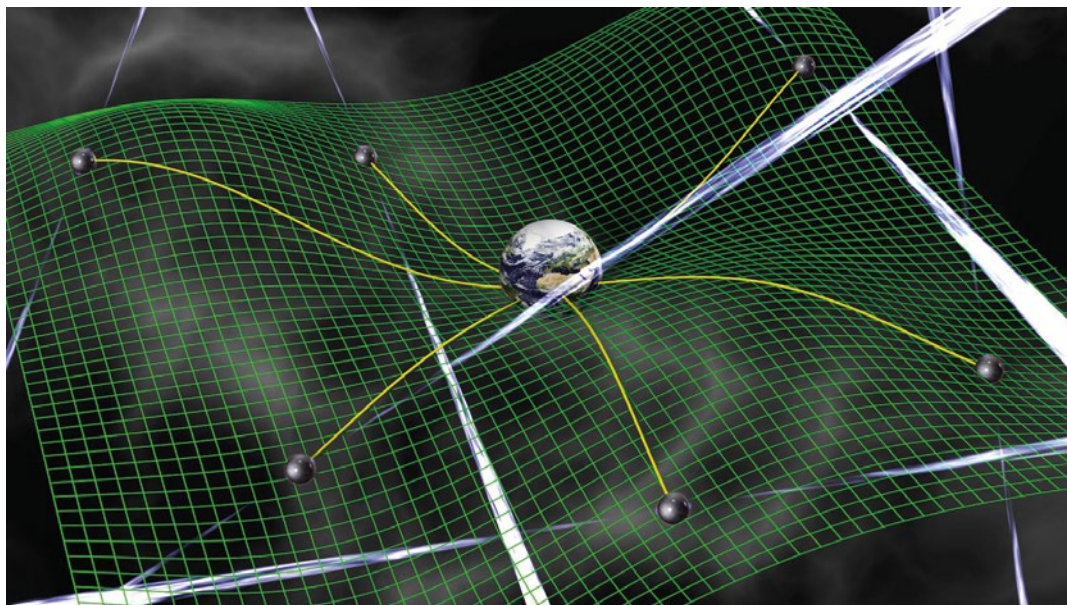
Virgo. L'esperimento è costituito da tre satelliti artificiali in orbita eliocentrica, posti ai vertici di un triangolo equilatero e posizionati a una distanza reciproca di 2,5 milioni di chilometri. Ciascun veicolo spaziale ospita due masse di prova in caduta libera (cioè soggette all'effetto della sola gravità) rivelatrici dell'onda, due telescopi e due laser. Grazie alla quiete dello spazio, in assenza di disturbi ambientali di origine terrestre, come il rumore sismico e quello dovuto alle attività umane, Lisa consentirà la rivelazione di onde di frequenza compresa fra 10^{-4} Hz e 0,1 Hz, misurando oscillazioni della distanza relativa fra le masse di prova dell'ordine del picometro (10^{-12} m). La missione spaziale Esa Lisa Pathfinder (il precursore tecnologico di Lisa che ha fornito dati dal 2015 al 2017) ha verificato con successo le tecnologie necessarie per la costruzione di Lisa, ricreando condizioni di quiete estrema, ovvero riducendo l'ampiezza di accelerazioni spurie fra due masse di prova a livello di frazioni di milionesimo di miliardesimo se confrontate con l'accelerazione

gravitazionale sulla Terra. Lisa potrà rivelare il segnale gravitazionale emesso nella coalescenza di oggetti compatti di milioni di masse solari: ne misurerà masse e spin, confermando l'esistenza dei buchi neri supermassicci al centro delle galassie. Potrà rivelare anche il segnale emesso da buchi neri stellari di decine di masse solari in orbita relativistica attorno a buchi neri supermassicci. Andrà alla ricerca di possibili deviazioni dalla teoria di Einstein o deviazioni legate alla presenza di particelle di materia oscura. Cercherà di scoprire, impressi nella forma dell'onda, segni di fenomeni quantistici che si possono manifestare al bordo degli orizzonti in formazione, per aprire nuove strade verso una teoria di unificazione fra gravità e mondo dei quanti (vd. p. 25 e p. 28, ndr). Una delle domande inevase in astrofisica riguarda l'origine dei buchi neri supermassicci, invocati per spiegare i quasar, sorgenti fra le più brillanti del cielo elettromagnetico. Ci sono evidenze che la crescita ed evoluzione, attraverso

accrescimento di gas e coalescenze, sia avvenuta a partire da "buchi neri seme" di massa intermedia formatisi nei primi 100-500 milioni di anni dalla nascita dell'universo, di cui non abbiamo evidenza osservativa. Insieme all'Einstein Telescope (vd. p. 31, ndr), Lisa potrà ricostruire la storia di formazione di tutti i buchi neri presenti nell'universo. Lisa è un osservatorio a tutto cielo che non permette localizzazioni accurate delle sue sorgenti, né di creare la loro immagine. Risalire all'ambiente cosmico in cui vivono le sorgenti è possibile solo se il segnale gravitazionale è accompagnato da un segnale elettromagnetico. Nel caso di buchi neri in coalescenza, l'identificazione di una controparte permetterà di scoprire la galassia ospite e il suo *redshift* cosmologico (lo spostamento verso il rosso della luce a causa dell'espansione dell'universo) e di misurare la velocità di propagazione dell'onda gravitazionale con una straordinaria accuratezza. Rivelando molteplici segnali di coalescenza accompagnati da segnali elettromagnetici

b.
Rappresentazione artistica dell'osservazione di onde gravitazionali dallo spazio con l'antenna gravitazionale Lisa, in orbita attorno al Sole. Nell'immagine si vede una galassia lontana, sede di una violenta collisione fra due buchi neri supermassicci, accompagnata da un'intensa emissione di onde gravitazionali che si propagano indisturbate attraverso il cosmo. Dopo un viaggio di miliardi di anni luce le onde, propagandosi alla velocità della luce, raggiungono il sistema solare. Lisa sarà pronta a captarle grazie alle minuscole differenze di fase prodotte nei fasci di luce laser che i tre satelliti si scambiano reciprocamente.





c. Raffigurazione artistica di Pta. Il tessuto dello spaziotempo (rappresentato dal reticolo verde), reso oscillante da un fondo cosmico di onde gravitazionali, modifica le traiettorie (in giallo) percorse dai fasci radio inviati a Terra dalle pulsar. La specifica curvatura delle traiettorie induce correlazioni precise tra i ritardi nei tempi di arrivo del segnale pulsante delle diverse pulsar.

si potrà misurare anche la costante di Hubble (vd. p. 17, ndr). Infine, Lisa potrà scoprire se esiste un fondo cosmologico di onde gravitazionali prodottosi nei primissimi istanti di vita dell'universo su scale di energia superiori al TeV.

Se il futuro delle onde gravitazionali a bassa frequenza appartiene a Lisa (la data di lancio è prevista per il 2034), il presente vede i riflettori puntati su Pta. La natura ha infatti creato nello spazio condizioni per permetterci di rivelare onde gravitazionali di bassissima frequenza, comprese fra 10^{-7} e 10^{-9} Hz, disseminando nello spazio interstellare degli orologi cosmici: le pulsar a millisecondo. Si tratta di stelle di neutroni in rapidissima rotazione, i cui impulsi, regolari come la luce emessa da un faro, arrivano all'incirca ogni millisecondo e sono misurati dai più grandi radiotelescopi con precisione confrontabile con quella degli orologi atomici. L'idea di rivelazione è semplice. In assenza dell'onda gravitazionale, i segnali radio di ogni singola pulsar giungono a terra in modo indipendente e non correlato fra loro. Ma se lo spaziotempo è percorso da un'onda gravitazionale, le pulsar e la Terra oscillano all'unisono. Questa oscillazione è impressa nei tempi di arrivo dei segnali radio e più pulsar si osservano (una vera e propria schiera di sorgenti), più elevata diventa la sensibilità del sistema. Pta monitora gli impulsi di alcune decine di pulsar da diversi anni per rivelare onde gravitazionali molto lunghe che si estendono su distanze di alcuni anni luce. Esistono tre progetti che storicamente perseguono questo obiettivo: lo European Pta in Europa, il Parkes Pta in Australia e il NanoGrav in Nord America, che studiano i dati ottenuti da diversi radiotelescopi localizzati nelle varie aree geografiche. Gli sforzi di queste collaborazioni convergono nel progetto denominato International Pta, a cui si sono aggiunti recentemente i due consorzi di Cina e India.

I modelli di formazione delle galassie prevedono che il cielo che può essere investigato con Pta alle bassissime frequenze (dell'ordine del nanohertz) sia dominato da una popolazione cosmica di binarie di buchi neri supermassicci con masse di

miliardi di soli, lontani dalla coalescenza, esito di fusioni fra galassie. È attesa la rivelazione non di un segnale gravitazionale isolato, ma di un fondo cosmico dato dalla sovrapposizione di segnali di onde gravitazionali provenienti da sorgenti lontane. Il fatto più interessante è che la rivelazione di questo segnale è vicino alla portata delle attuali infrastrutture Pta. Recentemente, infatti, NanoGrav ha identificato nei propri dati un segnale comune a tutte le pulsar monitorate, consistente con il segnale gravitazionale previsto dalla teoria. L'osservazione è tuttavia parziale, perché vera discriminante per decretarne l'origine è l'identificazione delle proprietà di correlazione del segnale comune. Nei prossimi anni, ulteriori osservazioni, facilitate dall'utilizzo di nuovi potenti radiotelescopi attualmente in costruzione, come lo Square Kilometer Array, chiariranno la natura di questo segnale che, se confermato, rappresenterebbe una scoperta epocale.

Con Lisa e Pta, e in sinergia con l'Einstein Telescope, esploreremo l'universo gravitazionale nelle diverse frequenze. Osserveremo l'universo ripercorrendo la sua storia, dal Big Bang in poi, comprenderemo la natura degli orizzonti che circondano i buchi neri, la loro origine e, come sempre accade quando si apre una nuova finestra di osservazione, scopriremo sorgenti inaspettate.

Biografia

Monica Colpi e Alberto Sesana, fisici dell'Università di Milano Bicocca e membri del Lisa Consortium in ruoli di coordinamento scientifico, dedicano i loro studi alla comprensione dei buchi neri come sorgenti astrofisiche alla loro fenomenologia. Monica Colpi fa parte della collaborazione Virgo, Alberto Sesana del consorzio Pta.

[as] traiettorie

Scoperta o scherzetto?

di Catia Peduto

15 settembre 2015, ore 11 e 50 minuti e 45 secondi del mattino (ora dell'Europa centrale). Marco Drago, giovane ricercatore italiano della collaborazione Ligo ad Hannover, in Germania, sta osservando lo schermo del suo computer quando vede arrivare la prima onda gravitazionale mai rivelata dall'umanità.

[as]: Cosa hai pensato quando hai visto arrivare il segnale di GW150914?

[Marco]: Varie emozioni tutte insieme: sorpresa, stupore, diffidenza. Personalmente (ma non credo solo io tra i miei colleghi) non ci aspettavamo che la prima rivelazione arrivasse così presto. I rivelatori stavano prendendo dati da appena un mese e il *run* non era ancora ufficialmente iniziato. Che già arrivasse la svolta sembrava improbabile. Ero più propenso a pensare a una *blind injection*: un segnale “finto” inserito nei dati a nostra insaputa per verificare la capacità di rivelarlo. Il problema è che solo pochi sarebbero stati a conoscenza di questa finzione, quindi non era immediato sapere in quel momento se qualcuno avesse “giocato uno scherzetto”.

[as]: Ti sei laureato a Padova, poi hai fatto il post-doc a Trento nel gruppo Virgo, per poi approdare in Germania. Raccontaci un po' della tua “traiettoria”.

[M]: Sì, a Padova, nel 2010, alla ricerca del tema per la mia tesi di laurea specialistica, mi sono imbattuto nel gruppo di Auriga, l'antenna gravitazionale dei Laboratori di Legnaro dell'Infn (vd. p. 38, ndr). Lì mi sono entusiasmato al mondo della ricerca sulle onde gravitazionali. Dopo il *post-doc* a Trento, ho avuto la possibilità di trasferirmi a Hannover, per essere responsabile di una delle ricerche “in tempo reale” delle collaborazioni Ligo-Virgo. A malincuore ho lasciato l'Italia, ma era una scelta importante per la mia crescita professionale. In quel momento non avrei mai pensato che sarei stato il primo testimone di una rivoluzione scientifica epocale! Dopo i tre anni in Germania, sono riuscito a tornare in Italia, sempre nel gruppo Virgo, iniziando un *post-doc* al Gssi, e ora sono ricercatore all'Università “Sapienza” di Roma.



[as]: L'anno scorso hai vinto l'edizione 2020 di Famelab (una competizione di comunicazione scientifica per ricercatori, ndr). La divulgazione è un tuo hobby?

[M]: In realtà ho altri hobby, come la scrittura di libri *fantasy* o suonare il pianoforte. Però dopo la scoperta delle onde gravitazionali mi si è aperto un nuovo mondo: quello della divulgazione! Sono stato invitato a fare lezioni in scuole medie e superiori, a eventi pubblici e conferenze internazionali. Ho imparato quanto sia importante e difficile fare divulgazione scientifica, soprattutto trovare il linguaggio per parlare ai non esperti. Cerco di rendere le presentazioni interessanti, credo mi abbia aiutato il mio passato da animatore per ragazzi, ma soprattutto l'esperienza del TEDx a Padova.

[as] radici

Una storia di fede e perseveranza.

di Eugenio Coccia

rettore del Gran Sasso Science Institute



a.
Edoardo Amaldi, pioniere della
ricerca sperimentale sulla
gravitazione in Italia.

I primi tentativi di rivelare le onde gravitazionali sono dovuti a Joseph Weber (1919 – 2000), fisico americano originale e testardo, uno dei fondatori della fisica dei laser e dei maser, che negli anni '50 aveva cominciato a occuparsi sperimentalmente di relatività generale.

Occorreva una grande fede per iniziare in quegli anni una ricerca sulle onde gravitazionali. Delle loro possibili sorgenti cosmiche si sapeva pochissimo, mentre dai calcoli dello stesso Einstein era noto che le onde hanno un'ampiezza piccolissima e interagiscono in modo trascurabile con la materia, il che rende ovviamente difficilissima la loro rivelazione.

Weber sviluppò le prime antenne risonanti, le “barre” come da sempre vengono chiamate: oscillatori meccanici costituiti da cilindri di alluminio di un paio di tonnellate, opportunamente distanziati, sospesi e messi sotto vuoto per isolarli dai rumori sismici e acustici, che gli impulsi di onde gravitazionali avrebbero dovuto far vibrare all'unisono. Giganteschi diapason, insomma, equipaggiati con ceramiche piezoelettriche per convertire le loro vibrazioni meccaniche in segnali elettrici che venivano opportunamente registrati.

Negli anni '60 Weber iniziò a pubblicare evidenze di segnali provenienti dal centro galattico. Gli annunci furono accolti dalla comunità scientifica con enorme sorpresa, seguita da aspre discussioni e poi da crescente scetticismo. Ma fu così che la fiamma della passione per la possibile rivelazione e lo studio delle perturbazioni dello spaziotempo, voci provenienti da sorgenti cosmiche estreme, iniziò ad ardere in diversi paesi e laboratori. Questa era l'atmosfera nell'Istituto di Fisica dell'Università di Roma, dove lavorava il fisico italiano più influente del dopoguerra: Edoardo Amaldi (1908 – 1989). Negli anni '60 Amaldi cercò di spingere giovani colleghi verso nuove ricerche allora in fase di nascita: la radiazione di fondo cosmica e, appunto, le onde gravitazionali.

L'idea di un esperimento italiano finalizzato a rivelare le onde gravitazionali fu discussa in occasione di un ciclo di lezioni tenuto da Weber alla Scuola Internazionale “Enrico Fermi” di Varenna nel 1961. Il programma, tuttavia, rimase piuttosto vago fino al 1968, quando il fisico di Stanford William Fairbank visitò il laboratorio di basse temperature di Giorgio Careri, alla Sapienza. Fairbank disse a Careri che aveva l'intenzione di sviluppare un'antenna gravitazionale criogenica (cioè a bassa temperatura, per ridurre il rumore termico) e Careri allora lo mise subito in contatto con Amaldi. Questo incontro segnò l'inizio di una lunga collaborazione.

Finalmente, nel 1970 Guido Pizzella, con il pieno supporto di Amaldi, prese le redini di un gruppo sperimentale dedicato allo studio delle onde gravitazionali, di cui fecero parte in quei primi anni Massimo Cerdonio, Renzo Marconero, Gianvittorio Pallottino, Sergio Cantarano, Ivo Modena. Risultati e tecniche sperimentali vennero discussi con alcuni colleghi teorici interessati all'argomento: Bruno Bertotti, Nicola Cabibbo e Remo Ruffini. Fu deciso di realizzare un rivelatore risonante criogenico a bassissima temperatura, di sensibilità senza precedenti. L'Italia entrò così in prima fila in questa ricerca, insieme al gruppo di Stanford e a quello della Louisiana State University. Dopo una decina di anni di prototipi e sviluppi, i primi rivelatori risonanti criogenici entrarono in funzione negli anni '80. L'Infn ha realizzato tre rivelatori di questo tipo: prima Explorer al Cern, poi Nautilus nei Laboratori di Frascati e infine Auriga nei Laboratori di Legnaro. Nautilus e Auriga hanno funzionato fino al 2016.

Questi sensibilissimi diapason criogenici si sono avventurati per più di venti anni in regioni inesplorate della fisica sperimentale. Un costante lavoro di ricerca e sviluppo ha permesso un miglioramento della sensibilità di almeno quattro ordini di grandezza rispetto agli originali rivelatori a temperatura ambiente di Weber.

La caccia agli impulsi prodotti da eventi cosmici catastrofici è stato l'obiettivo tradizionale dei rivelatori risonanti, e Auriga, Explorer e Nautilus hanno costituito per molti anni l'unico network di rivelatori ad assolvere il ruolo di sentinella galattica gravitazionale nel mondo.

A partire dai primi anni del Duemila, la sensibilità dei grandi interferometri, come Ligo e Virgo, sorpassò quella dei rivelatori risonanti e solo questi nuovi straordinari strumenti hanno potuto rivelare finalmente le onde gravitazionali. Ma questa è storia recente.

Vale la pena 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 con l'uso dei più grandi refrigeratori a diluizione ^3He - ^4He mai realizzati (le 2,5 tonnellate di massa sono state raffreddate a 0,1 K e 0,2 K, rispettivamente); lo sviluppo di trasduttori e amplificatori superconduttori 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) fino a 100 Hz con Auriga; la prima rivelazione acustica di raggi cosmici con Nautilus ed Explorer; e, ancora con Explorer, la rivelazione del campo gravitazionale dinamico generato da una sorgente artificiale.

Il lascito maggiore di questa epopea delle barre risonanti è però quello di aver costituito una scuola che ha fatto della perseveranza la sua bandiera e che ha formato almeno due generazioni di fisici sperimentali. L'esistenza di questa scuola ha favorito la nascita del progetto Virgo, dovuto all'iniziativa dell'indimenticabile Adalberto Giazotto. Molti "barristi" hanno raggiunto negli anni i loro colleghi "laseristi", innervando con la loro storia e le loro competenze sia l'attività degli attuali rivelatori interferometrici sia quella dei nuovi progetti in preparazione, come l'Einstein Telescope e l'antenna spaziale Lisa.

b.
L'antenna gravitazionale
Nautilus.



[as] intersezioni

Microgravità.

di Giovanni Valentini

responsabile Asi dell'utilizzazione della Iss



a.
Nella Stazione Spaziale Internazionale (Iss) ci sono particolari condizioni di microgravità, ideali per fare esperimenti non realizzabili sulla Terra.

La Stazione Spaziale Internazionale (Iss) è un laboratorio orbitante intorno alla Terra a circa 400 km di altitudine. Ciò determina al suo interno una particolare condizione di microgravità che consente di effettuare esperimenti – non realizzabili sul nostro pianeta – in molti ambiti della ricerca fondamentale e applicata. Gli studi condotti a bordo della Iss hanno da sempre il duplice obiettivo di fare scienza e di sviluppare nuove tecnologie in vista delle future missioni di lunga durata verso la Luna e Marte, coadiuvando al contempo la ricerca

a terra. In particolare, gli esperimenti nel campo della fisiologia umana, della biologia e delle biotecnologie hanno ricadute molto significative. Data la necessità di monitorare la salute degli astronauti, infatti, nel tempo sono stati sviluppati sistemi di telemedicina poco ingombranti e leggeri, che hanno migliorato l'efficienza dei nostri apparati medici.

Un importante esempio di queste attività è rappresentato da Nutriss, esperimento dell'Asi condotto durante la missione Beyond di Luca Parmitano

nel 2018. L'esperimento consiste nella misurazione della massa e della composizione corporea dell'astronauta durante il suo volo a bordo della Iss. Lo studio prevede la raccolta pre- e post-volo dei dati antropometrici, della composizione corporea e dei parametri ematochimici, nonché dell'introito energetico. Inoltre, durante il volo, a cadenza regolare, sono monitorati e registrati la massa, la composizione corporea e l'introito nutrizionale. I dati così ottenuti sono inviati dall'astronauta a un *team* scientifico presso l'Università



b.
Luca Parmitano alle prese
con uno dei controlli
periodici della sua massa
corporea, svolti nell'ambito
dell'esperimento NutriSS
durante la sua ultima
missione (Beyond) a bordo
della Iss.

di Trieste, che provvede ad analizzarli e fornire all'astronauta indicazioni sulla dieta più adatta da seguire. L'obiettivo è quello di mantenere una composizione corporea ideale, evitando l'aumento del rapporto tra massa grassa e magra dovuto all'inattività da microgravità.

Il monitoraggio regolare e personalizzato della massa e della composizione corporea contribuirà a far luce sulla fisiopatologia dei cambiamenti nella composizione corporea durante i voli spaziali a lungo termine. Sulla base dei risultati ottenuti, verranno fornite raccomandazioni sulle modifiche da apportare nell'assunzione di energia, migliorando le prestazioni fisiche e la qualità della vita dell'astronauta durante il volo spaziale e ottimizzando le fasi di recupero degli astronauti sulla Terra dopo la missione. Inoltre, i risultati sperimentali potrebbero coadiuvare la gestione clinica dei pazienti immobilizzati e di quelli malnutriti od obesi.

Sulla Iss si conducono anche esperimenti con finalità didattiche, alcuni dei quali conseguono anche importanti risultati di tipo scientifico. È il caso di Xenogriss, un progetto selezionato nell'ambito del concorso "Yiss - Youth Iss Science" che l'Asi ha promosso in vista della missione Beyond per coinvolgere gli studenti delle scuole superiori nel processo di ideazione e preparazione di un esperimento da eseguire a bordo della Iss. La caratteristica peculiare di questo progetto è quella di avere scopi sia scientifici sia educativi. L'esperimento è stato progettato, presentato e realizzato congiuntamente da ricercatori del Dipartimento di Scienze farmacologiche e

biomolecolari dell'Università di Milano, dal laboratorio gestito dall'azienda Asa e dal Dipartimento di Scienze Biomediche Sperimentali e Cliniche dell'Università di Firenze, da Kayser Italia e da un gruppo di nove studenti e tre insegnanti dell'Itis "A. Meucci" di Firenze, e ha visto il coinvolgimento degli studenti in un'attività multidisciplinare volta a studiare l'effetto della microgravità sui processi di crescita e rigenerazione di tessuti biologici, utilizzando un modello animale (*Xenopus laevis*, una rana acquatica) che consente di osservare entrambi i processi contemporaneamente.

Dai risultati preliminari, l'esposizione a condizioni di microgravità sembra indurre un ritardo nella rigenerazione dei tessuti e una loro diversa organizzazione strutturale, che potrebbe comportare alterazioni delle proprietà meccaniche e delle funzioni.

Nell'uomo, le alterazioni nel processo di guarigione delle lesioni possono portare a condizioni patologiche che vanno da un ritardo nella chiusura delle ferite e ulcere croniche alla formazione di cheloidi e di tessuti fibrotici. Questi problemi di cicatrizzazione sono spesso legati alla presenza di serie patologie sistemiche, come il diabete o le malattie circolatorie, e rappresentano anche un grave problema socio-economico, oltre a influenzare fortemente la qualità della vita dei pazienti. Un aumento delle conoscenze sui meccanismi di riparazione dei tessuti, grazie a esperimenti come Xenogriss, potrà aiutare a trovare nuove strategie terapeutiche per un migliore trattamento dei pazienti che soffrono di problemi di cicatrizzazione.

[as] spazi

Scienziate sul palco.

di Matteo Massicci

La storia della scienza è afflitta da un sistematico pregiudizio di genere. Troppo spesso non viene dato il giusto credito al ruolo femminile nelle grandi rivoluzioni scientifiche, e al lavoro, le idee e la tenacia delle scienziate nella conquista della conoscenza. Impedire che questo importante lascito vada perduto, rendendolo un esempio da cui le prossime generazioni possano trarre ispirazione, è l'obiettivo de "La forza nascosta", opera teatrale che celebra quattro grandi scienziate del Novecento, ripercorrendo i loro fondamentali contributi alla ricerca scientifica in fisica – che hanno solo in parte ricevuto i giusti riconoscimenti - e le loro storie personali, intrecciate con i complessi mutamenti culturali e politici che hanno contrassegnato il secolo breve.

Nata dal confronto tra un gruppo di ricercatrici del Dipartimento di Fisica dell'Università e della sezione Infn di Torino, di professioniste appartenenti al mondo del teatro e della lirica ed esperte della storia delle donne e di tecnologia, la *pièce* ha esordito il 30 ottobre 2020 con un'anteprima a porte chiuse in occasione della diciassettesima edizione del Festival della Scienza di Genova, per poi debuttare l'11 dicembre, in diretta streaming, al Teatro Baretto di Torino. Il progetto, realizzato in collaborazione con l'Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (Inrim), si propone di dare risalto alle scienziate che hanno lavorato nei campi di indagine dell'Infn, che spaziano dalla fisica subnucleare all'astrofisica. Oltre a fare riferimento alla scarsa rilevanza attribuita al ruolo



a.
L'attrice Elena Ruzza
e la soprano Fé
Avouglan durante una
rappresentazione de
"La forza nascosta" al
CineTeatro Baretto di Torino.



di promotrici del progresso scientifico svolto dalle donne, il titolo dell'opera allude a un significato più profondo, vero filo conduttore dell'intero racconto proposto, ovvero la presenza di una forza aggiuntiva oltre alle quattro forze della Natura descritte dalla fisica, quella femminile: una forza altrettanto fondamentale, che ha origine dal talento, dalla determinazione e dall'amore per la conoscenza, ma che resta nascosta a causa di una rappresentazione prettamente maschile della storia.

Rivolto a un pubblico eterogeneo, lo spettacolo sfrutta la commistione tra linguaggi narrativi diversi, quali la prosa, il canto e le immagini, per offrire una visuale sulla fisica del Novecento attraverso i fondamentali risultati ottenuti da Marietta Blau, Chien-Shiung Wu, Milla Baldo Ceolin e Vera Cooper Rubin, come l'utilizzo delle emulsioni fotografiche nella rivelazione delle particelle prodotte nelle interazioni nucleari da parte di Marietta Blau, la conferma sperimentale della rottura della simmetria di parità nei decadimenti elettrodeboli ottenuta da Madame Wu, le scoperte riguardanti neutrini e mesoni effettuate da Milla Baldo Ceolin e l'associazione tra l'osservazione dell'anomalia di rotazione delle stelle intorno al centro galattico e la presenza di materia oscura a opera di Vera Rubin. Un affresco che non manca ovviamente di sottolineare le

affinità intellettuali tra queste grandi donne di scienza e i pregiudizi contro cui hanno dovuto combattere nel corso delle loro vite.

"L'idea di produrre un'opera teatrale in grado di coniugare scienza e arte, con una narrazione vicina a un vasto pubblico che portasse l'attenzione sulla questione del genere nel mondo accademico contemporaneo, ha sobbolito per un paio d'anni presso la sezione Infn e il Dipartimento di Fisica di Torino, all'interno di un gruppo di donne con diverse provenienze professionali, ma una comune attenzione per il ruolo femminile nella società", spiega Anna Ceresole, ricercatrice Infn e ideatrice de "La forza nascosta", insieme alle colleghe Nadia Pastrone, Nora De Marco, Simonetta Marcello e alle coideatrici Rita Spada ed Emiliana Losma, affiancate dall'attrice e autrice Elena Ruzza, dalla regista Gabriella Bordin e dalla soprano Fé Avouglan.

"Il progetto, che speriamo possa essere in futuro presentato anche nelle scuole e nelle università, si propone di accrescere la consapevolezza, sia del grande pubblico che della comunità scientifica, del ruolo decisivo che molte donne hanno avuto e continuano ad avere nell'avanzamento della fisica. Queste donne, con il loro lavoro di ricerca, hanno contribuito a cambiare la storia scientifica, politica e sociale e possono essere di ispirazione alle giovani generazioni".

b.
Foto di gruppo delle ideatrici, curatrici, autrici e interpreti de "La forza nascosta", scattata al Teatro della Tosse di Genova in occasione dell'anteprima dello spettacolo.

[as] riflessi

Cuore di piombo.

di Francesca Mazzotta



a.
Un sommozzatore etichetta alcuni dei lingotti di piombo che giacciono a 30 metri di profondità.

All'inizio degli anni '90 al largo della costa di Oristano, in Sardegna, è stata ritrovata una nave romana con un ingente carico di piombo, affondata probabilmente dal suo stesso equipaggio, per evitare che finisse in mano al nemico oltre 2000 anni prima (tra l'80 e il 50 avanti Cristo, all'epoca di Cesare e Pompeo). Incomincia così una storia avvincente che ha come protagonista l'archeologia ma anche la fisica. Ce la racconta Ettore Fiorini, professore emerito dell'Università degli Studi di Milano Bicocca e ideatore dell'esperimento Cuore che dà la caccia al "doppio decadimento beta senza emissione di neutrini" (vd. p. 18 in *Asimmetrie* n. 29, ndr) nei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn.

[Ettore]: Non appena ho saputo che un subacqueo aveva trovato una grossa nave romana specializzata nel trasporto di piombo, una *navis oneraria magna*, che trasportava circa 2000 lingotti di piombo da 33 kg l'uno, ho parlato con l'allora presidente dell'Infn Nicola Cabibbo, grande fisico di straordinaria cultura, che ha subito capito l'importanza del ritrovamento. Il carico di piombo era, infatti, un vero tesoro non solo per gli archeologi ma anche per noi fisici.

[as]: Perché per voi fisici questo carico era così interessante?

[E]: Per noi il piombo romano o, più in generale, il piombo antico è un materiale estremamente prezioso. Per osservare

eventi rarissimi, come quelli a cui diamo la caccia, non solo dobbiamo costruire i nostri esperimenti sottoterra per riuscire a bloccare i raggi cosmici, ma anche ridurre al minimo tutta la radioattività naturale. Nei Laboratori del Gran Sasso, ad esempio, arrivano pochissimi raggi cosmici ma le rocce sono radioattive, noi siamo radioattivi, tutto è radioattivo. Quindi dobbiamo schermare i nostri esperimenti dalla radioattività naturale presente nell'ambiente e realizzare uno schermo estremamente radiopuro. Il piombo è un ottimo elemento per schermare gli esperimenti per tanti motivi: è molto denso, ha un peso atomico molto elevato, quindi ferma i raggi X e gamma, ha proprietà meccaniche discrete, così si può

modellare facilmente, e non costa molto. Però, c'è un problema. Il piombo ha vari isotopi, di cui tre sono stabili (non radioattivi), ma, se è recente, contiene anche tracce di un isotopo instabile e radioattivo: il piombo 210. Quindi, il piombo recente non può essere usato come schermo per i nostri esperimenti. Ma c'è una buona notizia: il piombo 210 ha una vita di dimezzamento di 22 anni, ovvero ogni 22 anni si riduce a metà. Di conseguenza, il piombo di epoca romana, o comunque antica, non contiene questo isotopo radioattivo.

[as]: Quindi avete cercato di ottenere parte del carico di piombo romano rinvenuto?

[E]: Certamente. È stato molto difficile ma alla fine siamo riusciti a trovare un accordo con la Sovrintendenza Archeologica di Cagliari, con il parere favorevole della Direzione Generale alle Antichità: l'Infn ha finanziato lo scavo del relitto e del suo carico e sono così stati riportati in superficie 1000 lingotti (la restante metà era sommersa sotto la sabbia), di cui 300 sono stati concessi all'Infn a patto che ne tenesse solo la parte "brutta". Sulla superficie dei lingotti c'erano, infatti, bellissime iscrizioni e decorazioni, che riportavano titoli di famiglia, disegni e addirittura messaggi pubblicitari come *"Emptor salve"*, ovvero *"Salve, compratore"*. Questi lingotti, da cui sono state asportate le iscrizioni per preservarle, costituiscono la schermatura dell'esperimento Cuore, ma sono anche stati impiegati per schermare due esperimenti precedenti che studiavano sempre il decadimento beta, Mibeta, Cuoricino e Cuore0 (vd. p. 18 in *Asimmetrie* n. 29, ndr). A seguito di questi esperimenti si

è giunti già da più di due anni, sotto la direzione di Oliviero Cremonesi, al rivelatore finale Cuore, costituito da quasi mille rivelatori come quelli di Cuore0 e schermato con quattro tonnellate di piombo romano.

[as]: La storia, però, non finisce qui. Non è stata solo l'archeologia ad aiutare la fisica, ma è successo anche il contrario.

[E]: Sì, esattamente. Abbiamo studiato le iscrizioni per cercare di conoscerne l'origine, che era dibattuta. Molti archeologi pensavano, infatti, che il piombo ritrovato venisse dalla Sardegna, dato che era stato ritrovato a un miglio e mezzo dalla costa sarda, ma la mia amica archeologa Donatella Salvi, che mi ha supportato durante tutta questa operazione, era di un'altra opinione. La Sardegna è sì un noto produttore di piombo, ma è anche molto vicina a Roma e i romani non volevano sfruttare in tempi di pace le miniere vicino a Roma. Preferivano avere delle miniere piene vicine, per riuscire a recuperare il piombo in caso di attacco da parte dei barbari. Quindi c'era l'ipotesi che questo piombo potesse venire da Inghilterra, Bretagna o Spagna, e non dalla Sardegna.

Abbiamo allora misurato con altri gruppi i rapporti isotopici in questi lingotti e siamo riusciti a risalire alla loro provenienza. Abbiamo scoperto che venivano dalla Spagna e siamo riusciti a risalire all'esatta origine: una miniera romana a Sierra de Cartagena. Un gran bel risultato, ma anche un ottimo esempio di collaborazione interdisciplinare tra campi di studi all'apparenza lontani come la fisica e l'archeologia.

b.
Iscrizione di uno dei lingotti di piombo ritrovato a bordo della nave romana al largo di Oristano.

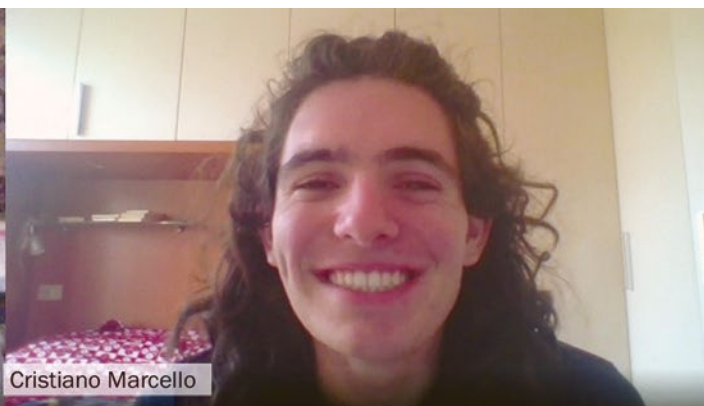
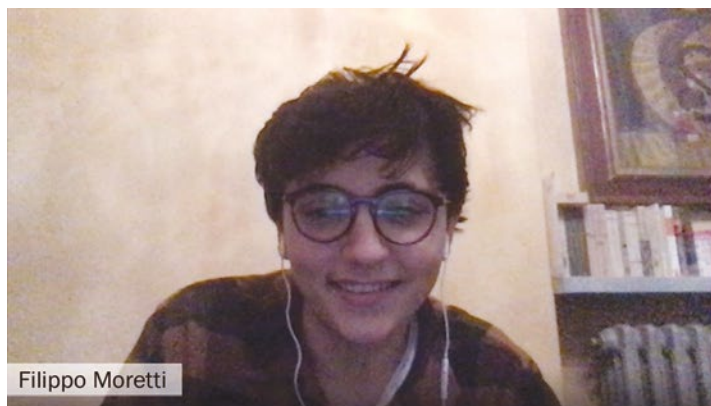


[as] riflessi

Particle jukebox.

di Cristiano Marcello e Filippo Moretti

studenti del Liceo classico V. Alfieri di Torino



Il 4 febbraio scorso, durante la lezione di fisica, ci siamo collegati sul canale YouTube dell'Infn per assistere alla diretta "Particle Jukebox - Fisica e medicina, dai raggi X all'adroterapia", che aveva come relatore il dott. Diego Bettoni della sezione Infn di Ferrara. Il tema fondamentale era il sodalizio tra due discipline apparentemente rivolte ad ambiti di ricerca differenti, e si evidenziava come, nonostante le diversità, il progresso nelle scienze biomediche fosse stato reso possibile in larga parte da alcune scoperte nel campo della fisica fondamentale. Ci teniamo a dire che all'inizio di questa conferenza nessuno di noi due, umili liceali autori di quest'articolo alla ricerca di una facoltà a cui iscriversi, stava pensando a medicina o fisica. Alla fine, uno dei due ha cambiato idea, ma vi assicuriamo che anche l'altro ha decisamente apprezzato la conferenza.

Il legame tra medicina e fisica è stato ripercorso nella conferenza dal 1543 - anno in cui si ha la simbolica pubblicazione coeva del "*De humani corporis fabrica*" di Andrea Vesalio e del "*De revolutionibus orbium coelestium*", ad opera di Niccolò Copernico - fino alla contemporaneità. Tra le personalità di spicco a noi più vicine temporalmente, ci si è soffermati in modo particolare su Wilhelm Röntgen, la cui scoperta dei raggi X non solo gli è valsa il premio Nobel nel 1901, ma ha permesso

di arrivare alle prime radiografie, strumento ancora oggi indispensabile nella diagnostica medica. L'altra parola chiave proposta nella conferenza per comprendere come si è arrivati agli attuali strumenti di indagine medica è "radioattività": in questo caso, i nomi principali sono quelli di Marie e Pierre Curie. Dalla scoperta dei citati fenomeni fisici nascono due tipi di innovazioni in ambito medico-sanitario. Da un lato, infatti, questi fenomeni possono essere alla base di alcune terapie, dall'altro, rappresentano il fondamento per la creazione di strumenti necessari ai processi diagnostici, come la Tac e la risonanza magnetica nucleare. In particolare, quest'ultima, a nostro parere, riesce a rappresentare in modo esemplare il rapporto tra la fisica fondamentale e la medicina. Infatti, essa è basata su una proprietà dei nuclei, lo spin, che li fa ruotare in un campo magnetico, secondo un meccanismo che rende possibile mappare i nuclei stessi. L'aspetto rivoluzionario della risonanza magnetica nucleare, però, è la natura più dinamica di questa tecnica di *imaging*, che, rispetto alla Tac (alla quale rimane comunque complementare), permette l'osservazione del cambiamento di fenomeni interni al corpo umano, tra i quali, ad esempio, il diverso afflusso di sangue in differenti zone, o l'attivazione di diverse zone del cervello a seconda dell'attività

svolta (il che ha aperto numerose porte anche alla ricerca in ambito neurologico). Rimanendo sempre nella famiglia Curie, la figura di Irène (figlia di Pierre e Marie) può essere collegata allo sviluppo di altre tecniche particolarmente innovative, tra le quali la celebre Pet, a seguito della scoperta della possibilità di produzione artificiale di nuclei radioattivi. La Pet (positron emission tomography), infatti, rappresenta un estremo cambio di prospettiva nell'applicazione dei principi fisici: se nella Tac e nella risonanza magnetica, infatti, l'instabilità dei nuclei viene sfruttata esternamente all'individuo, nella Pet le sorgenti di radiazioni provengono dal corpo stesso coinvolto nel processo diagnostico, in seguito all'iniezione di radiofarmaci. L'arco cronologico ricoperto dalla conferenza del dott. Bettoni si chiude con un'ampia trattazione rivolta all'attualità: gli stessi acceleratori adottati per lo studio nella fisica particellare, infatti,

possono essere impiegati sia per la produzione di nuclei radioattivi, sia per vere e proprie terapie, tra le quali spicca l'adroterapia, nel cui Centro nazionale vengono usati fasci di adroni, ossia protoni e ioni carbonato, accelerati da mezzi appositi, per trattare specifici tumori radioresistenti.

Lo sguardo in direzione dell'attualità non poteva non riguardare anche la ricerca scientifica per la lotta alla pandemia che stiamo vivendo, per la quale il centro Sibylla Biotech, costola Infn, conduce studi riguardo al ripiegamento proteico dei recettori cellulari ai quali il Sars-CoV2 tende a legarsi, per neutralizzare gli effetti patogeni del virus. Dalla conferenza e dai numerosi esempi forniti, dunque, è possibile evincere quanto l'interdisciplinarietà e la collaborazione anche tra ambiti differenti nella ricerca scientifica possano condurre a sviluppi reciproci da cui può trarre beneficio l'intera umanità.

b.
La classe 3° D del Liceo classico V. Alfieri di Torino durante la diretta su YouTube "Particle Jukebox - Fisica e medicina, dai raggi X all'adroterapia", organizzata dall'Infn.



[as] illuminazioni

Un laboratorio nello smartphone.

Tutti gli oggetti che ci circondano risentono dell'attrazione gravitazionale della Terra. Se sono in "caduta libera", hanno un'accelerazione costante, l'accelerazione di gravità g , che, a meno di piccole variazioni dovute a disuniformità nella densità della crosta terrestre, è uguale dappertutto. Il suo valore medio sulla superficie terrestre vale $9,80665 \text{ m/s}^2$. Esistono vari fenomeni che dipendono da g e che si possono utilizzare per ricavarne il valore. Uno di questi si basa sulla misura del periodo di oscillazione di un pendolo semplice, un sistema ideale costituito da un oggetto di dimensioni trascurabili, attaccato a un filo inestensibile e lasciato oscillare nel vuoto in assenza di attriti. Quando il pendolo compie oscillazioni di piccola ampiezza, il periodo di tali oscillazioni è legato a g da una semplice relazione. Nota la lunghezza del filo, il valore del periodo consente di ricavare g . La misura risulta accurata anche in condizioni reali, in cui l'oggetto sia ad esempio una pallina, il filo un comune spago e non ci sia il vuoto.

Ma è possibile effettuare misure di g accurate e semplici, misurando il periodo di oscillazione di un pendolo con uno strumento che possediamo tutti? Sì, è possibile, e lo strumento è lo smartphone.

Gli smartphone, infatti, sono dotati di sensori, utilizzati dal telefono stesso, e da alcune sue applicazioni.

Gli accelerometri, per esempio, misurano l'accelerazione e sono usati dalle applicazioni che entrano in funzione quando si scuote il telefono. I sensori di luminosità determinano l'intensità della luce esterna per regolare lo schermo e quelli di prossimità sono usati per passare in modalità viva voce quando allontaniamo il telefono dall'orecchio.

Benché si tratti di dispositivi commerciali, questi sensori sono in grado di effettuare misure molto accurate. Esistono varie applicazioni che permettono di visualizzare i dati mentre vengono raccolti, hanno comode interfacce grafiche e consentono di salvare le informazioni su file. La maggior parte di queste applicazioni sono complete già nella versione gratuita: ad esempio, Phyphox (la cui versione italiana è stata curata da Giovanni Organtini, ricercatore Infn di Roma), Sensor Kinetics oppure Physics Tool Box.

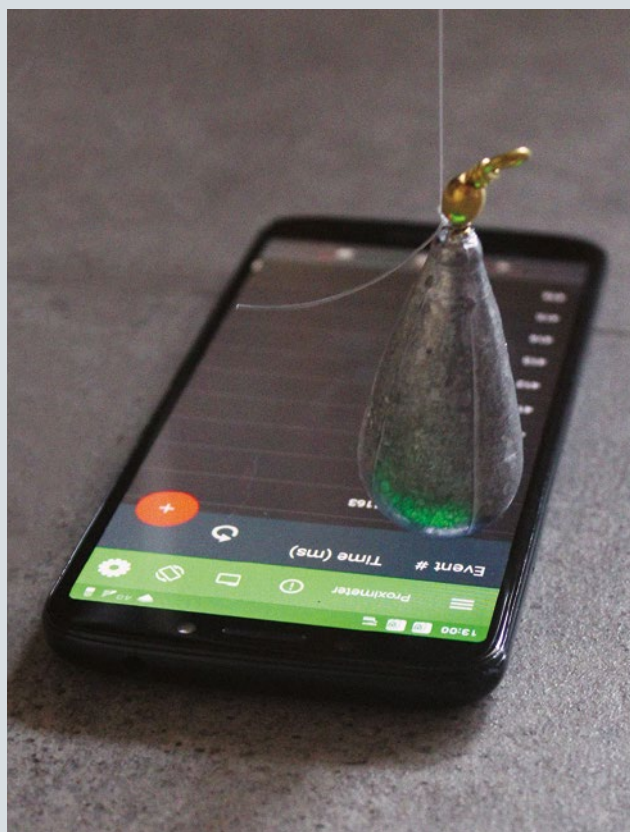
In particolare, per la misura di g dal semi-periodo del pendolo si può usare il sensore di prossimità (vd. fig.), che rileva quando il pendolo passa vicino al telefono, oppure si può usare il telefono stesso come pendolo, misurandone il

periodo con gli accelerometri che registrano le variazioni di accelerazione durante le oscillazioni.

Armandosi dunque di buona volontà, si può ottenere una buona misura di g , divertendosi pure. E chissà se poi non vi verrà voglia di effettuare altri tipi di misure, utilizzando le potenzialità degli smartphone.

[Pia Astone e Davide Pinci]

Istruzioni più dettagliate per la misura di g tramite smartphone: www.asimmetrie.it/un-laboratorio-nello-smartphone





Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono temporaneamente chiusi alle visite per l'emergenza sanitaria Covid-19.

Per contattare
i laboratori dell'Infn:

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

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T +39 0862 437265/450
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068342 356
stage@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

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

www.infn.it



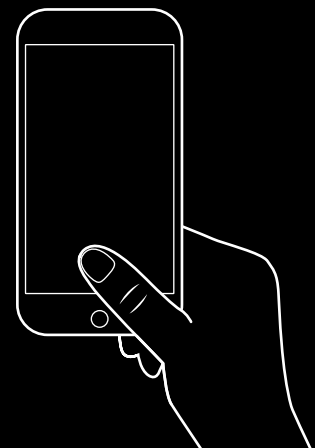
Sul sito **www.asimmetrie.it**
vengono pubblicate periodicamente
notizie di attualità scientifica.

Per **abbonarti gratuitamente** ad Asimmetrie
o per **modificare** il tuo abbonamento vai su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/abbonamento>

Si prega di tenere sempre aggiornato il proprio
indirizzo mail per ricevere le nostre comunicazioni.

Leggi anche le nostre **faq** su:
<http://www.asimmetrie.it/index.php/faq>

Asimmetrie è anche una app,
ricca di nuovi contenuti multimediali.





www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it