

ASTRONOMIA E ASTROFISICA
DIVULGATIVA

COLLANA DIRETTA DA ENRICO COSTA ED ENRICO MASSARO

Direttore

ENRICO MASSARO ed ENRICO COSTA
Istituto Nazionale di Astrofisica

Comitato scientifico

FRANCESCO BERRILLI
Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"

MAURIZIO BUSO
Università degli Studi di Perugia

GABRIELE GIOVANNINI
Università di Bologna – Alma Mater Studiorum

MARCO SALVATI
Istituto Nazionale di Astrofisica

ASTRONOMIA E ASTROFISICA DIVULGATIVA

COLLANA DIRETTA DA ENRICO COSTA ED ENRICO MASSARO



La più sublime, la più nobile tra le Fisiche scienze ella è senza dubbio l'Astronomia. L'uomo s'innalza per mezzo di essa come al di sopra di se medesimo, e giunge a conoscere la causa dei fenomeni più straordinari.

Giacomo LEOPARDI

Negli ultimi anni si è assistito ad una grande crescita di libri dedicati alla descrizione dei primi istanti dell'universo e delle sue complicate proprietà fisiche o alla scoperta di un sempre crescente numero di pianeti in rotazione attorno a stelle vicine.

Gli argomenti trattati nelle ricerche astronomiche spaziano in un panorama molto più ampio, spesso poco noto alla maggioranza dei lettori. Molti dei risultati recenti devono essere confermati ed ampliati e ciò richiede un numero sempre più grande di osservazioni e di accurate analisi dei dati così ottenuti. Accade spesso che le tecniche e i dettagli di questi lavori non riescono ad essere descritti come meriterebbero nel ristretto spazio di un articolo su rivista.

Questa collana si prefigge di colmare in parte questa lacuna pubblicando testi che forniscano agli specialisti, come a coloro che affrontano queste impegnative ricerche, una documentazione che ne descriva i diversi aspetti.

Ad essi si affiancheranno anche cataloghi e raccolte di dati, un fondamentale *thesaurus* per le ricerche astrofisiche, e testi più semplici di livello introduttivo.

La collana si divide in due sezioni: in questa sono ospitati i volumi con un taglio e un orientamento divulgativo.

Andrea Simoncelli

L'era delle onde gravitazionali

Una nuova finestra sull'universo

Prefazione di
Lorenzo Amati





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXVIII
Giacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.giacchinoonoratieditore.it
info@giacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-1603-6

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: giugno 2018

*a mia moglie Alessandra e ai miei figli Emanuele e Marco,
il mio spazio, il mio tempo, il mio universo*

Indice

- 11 *Prefazione*
Lorenzo Amati
- 15 *Introduzione*
- 19 **Capitolo I**
La forza di gravità
- 1.1. La natura della gravità: Einstein vs Newton, 19 – 1.2. Approfondimento: le potenze di 10, 24 – 1.3. Einstein sotto esame, 24 – 1.3.1. *La precessione del perielio di Mercurio*, 24 – 1.3.2. *La deflessione dei raggi luminosi*, 25 – 1.3.3. *Il redshift gravitazionale delle frequenze*, 29 – 1.4. Altri test, 30 – 1.5. Le onde gravitazionali, 33 – 1.6. Le sorgenti di onde gravitazionali, 37 – 1.7. Approfondimento: la prova (indiretta) della loro esistenza, 42 – 1.8. Onde gravitazionali vs onde elettromagnetiche, 44.
- 47 **Capitolo II**
La ricerca sperimentale delle onde gravitazionali
- 2.1. Il mitico “Gravity Joe”, 47 – 2.2. La ricerca in Italia, 56 – 2.3. Si punta tutto sugli interferometri, 57 – 2.4. Gli interferometri gemelli Advanced LIGO, 64 – 2.5. In Italia c’è Advanced Virgo, 67 – 2.6. Tanto rumore, 72 – 2.7. Approfondimento: Adalberto Giazotto, 75.
- 79 **Capitolo III**
Le prime rivelazioni
- 3.1. Qualche cinguettio di troppo, 79 – 3.2. Una giornata memorabile: 11 febbraio 2016, 80 – 3.3. Approfondimento: Marco Drago, il primo fisico che ha “visto” le onde gravitazionali, 81 – 3.4. Chi è il responsabile?, 82 – 3.5. Approfondimento: scherzare con la gravità, 83 – 3.6. Gli altri eventi, 84 – 3.7. GW151226, 85 – 3.8. GW170104, 85 – 3.9. GW170608, 85 – 3.10. GW170814, 86 – 3.11. Confermati i sistemi binari di buchi neri, 86 – 3.12. I teorici ci hanno azzeccato!, 89 – 3.13. Sempre pronti a cercare la controparte, 93 – 3.14. Entra in gioco Virgo in versione potenziata, 98 –

3.15. Un'altra data storica: 16 ottobre 2017, 100 – 3.16. Approfondimento: i lampi gamma, 104 – 3.17. Dalle onde gravitazionali alla kilonova, 105 – 3.18. Approfondimento: le stelle di neutroni, 108 – 3.19. I progenitori dei lampi gamma brevi, 111 – 3.20. La fabbrica degli elementi pesanti, 113.

117 Capitolo IV
 Un brillante futuro

4.1. Prospettive future dal suolo, 117 – 4.2. Dallo spazio LISA, 120 – 4.3. LISA Pathfinder ha detto sì, 122.

129 *Conclusioni*

133 *Ringraziamenti*

135 *Bibliografia*

137 *Sitografia*

Prefazione

« We did it! »

Storia di un amore

LORENZO AMATI*

Chi si appresta a leggere questo interessante libro dell'amico ed esperto divulgatore scientifico Andrea Simoncelli, magari incuriosito dal risalto dato dai media alle recentissime scoperte qui raccontate, si aspetta sicuramente di intraprendere un viaggio in un'affascinante ed intrigante avventura scientifica. Di quelle che qualsiasi scienziato di ogni epoca sogna di vivere e condividere, che alimentano la meraviglia di fronte all'incredibile capacità dell'uomo di esplorare e comprendere, prevedere e misurare, domini della realtà che vanno spesso ben oltre l'esperienza quotidiana e persino la nostra immaginazione. Ma, in realtà, la secolare vicenda scientifica che va dalla teorizzazione dell'esistenza delle onde gravitazionali all'idea e costruzione dei primi rivelatori, fino alla rivelazione diretta (settembre 2015) e alla nascita dell'astrofisica multi-messaggero con la scoperta delle prime controparti elettromagnetiche (agosto 2017) è persino qualcosa di più: è una vera e propria storia d'amore. L'amore dell'uomo per la Conoscenza, che per millenni ha spinto donne e uomini di ogni nazione a dedicare la loro vita allo studio della natura, un amore puro e che prescinde dalle pur fondamentali ricadute tecnologiche delle loro ricerche. L'amore Dantesco che « muove il Sole e l'altre stelle » diventa l'amore che muove l'uomo *verso* il Sole e le altre stelle, verso la comprensione dell'universo e della struttura più intima e profonda della realtà. E quella raccontata qui è la storia di un amore dapprima puramente

* Dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Astrofisica presso l'Osservatorio di Astrofisica e scienza dello Spazio di Bologna, esperto di lampi gamma e astrofisica relativistica, membro della collaborazione GRAWITA per la ricerca di controparti elettromagnetiche di sorgenti di onde gravitazionali.

platonico, utopico, iniziato con le speculazioni e i dibattiti, basati sulla relatività di Einstein, sulla reale esistenza di queste perturbazioni dello spazio-tempo, così concettualmente affascinanti ma ritenute completamente inaccessibili all'osservazione fino ad oltre la metà del secolo scorso.

Poi, pian piano, sotto la spinta del progresso tecnologico e della capacità visionaria di personaggi fondamentali quali per esempio gli statunitensi Joe Weber, Kip Thorne, Rainer Weiss e Barry Barish (questi ultimi tre premiati col premio Nobel per la Fisica nel 2017) e, in Italia, dei gruppi di ricerca di Edoardo Amaldi e di Adalberto Giazotto, la disillusione e il senso di utopia si sono trasformati in un lunghissimo corteggiamento. Un corteggiamento dispendioso e a lunghi tratti frustrante, ma coronato dopo una sessantina di anni da un successo che, sia ai protagonisti sia ai fisici e astronomi di tutto il mondo, sembra per certi versi ancora un sogno. Proprio come un amore che, quando sembrava eternamente irraggiungibile, come per magia viene finalmente corrisposto.

E non pensi il lettore che si stia esagerando. Emozione, sogno, magia sono, infatti, le parole più adatte per descrivere le indimenticabili sensazioni che il sottoscritto, come centinaia di altri miei colleghi membri del consorzio LIGO–Virgo o di *team* di astrofisici legati ad esso da accordi di *partnership*, ha provato nelle varie fasi della scoperta. Dal ricevimento della prima mail riservata che annunciava la rivelazione da parte di LIGO di un segnale di onde gravitazionali con alta significatività dalla fusione di due buchi neri (settembre 2015) alle successive entusiaste conferme e alla storica conferenza stampa a Washington nella quale il Direttore Esecutivo di LIGO David Reitze, in contemporanea col Prof. Fulvio Ricci di EGO/Virgo a Cascina, dava l'attesissimo annuncio della scoperta (febbraio 2016) con un indimenticabile e pieno di *pathos* « We have detected Gravitational Waves. We did it! ».

Dalle successive rivelazioni dello stesso tipo di segnali gravitazionali durante il 2016 fino alla prima rivelazione da parte dell'interferometro a *leadership* italiana Virgo nell'agosto 2017 e, infine, sempre nella seconda metà dell'estate del 2017, alla rivelazione del primo segnale gravitazionale dalla fusione di due stelle di neutroni e della radiazione elettromagnetica (raggi X e gamma più luce ottica, infrarossa e onde radio) prodotta dallo stesso cataclisma cosmico.

E poi, ancora, la meraviglia. La meraviglia nel vedere confermate per la prima volta in modo *diretto*, una dopo l'altra, in un incredibile filotto, tutta una serie di previsioni teoriche che attendevano conferma, o smentita, da decenni, alcune delle quali persino un po' "speculative": l'esistenza delle onde gravitazionali (e, dunque, la conferma dello spazio-tempo *Einsteiniano*); l'esistenza dei buchi neri e delle stelle di neutroni; l'esistenza di sistemi binari di buchi neri e di stelle di neutroni che scontrandosi e fondendosi generano un segnale gravitazionale esattamente con le caratteristiche previste; la fusione delle stelle di neutroni come sorgenti dei misteriosi lampi di radiazione gamma "breve" e come "fucine cosmiche" capaci di forgiare gran parte degli elementi più pesanti del ferro. Insomma, la meraviglia di fronte all'incredibile capacità dell'uomo non solo di comprendere, ma anche di *predire* fenomeni naturali così estremi e complessi. E a queste strabilianti conferme si sono aggiunte, come ciliegine sulla torta, anche qualche sorpresa e ulteriori implicazioni: la scoperta dell'esistenza, impreveduta e ostica da spiegare, di buchi neri di massa molto maggiore di quella prevista dai collassi gravitazionali dei nuclei di stelle massicce; le proprietà peculiari dell'emissione di raggi X e gamma associati al segnale gravitazionale prodotto dalla coalescenza di stelle di neutroni; l'utilizzo combinato del segnale gravitazionale e di quello elettromagnetico associato per la misura dell'espansione dell'universo. E tanti altri tesori che vi lascio il piacere di scoprire in queste accattivanti pagine, accompagnati dalla guida esperta, piacevole ed entusiasta di Andrea.

Spero e mi auguro con tutto il cuore che, oltre ad un prezioso aggiornamento su una delle più importanti scoperte e vicende scientifiche della scienza moderna, la lettura di questo libro regali a ciascun lettore anche solo un riflesso delle emozioni e della meraviglia che permeano la storia della scoperta delle onde gravitazionali e che da sempre sono il motore che spinge la Conoscenza oltre i limiti dell'immaginabile, permettendo a noi piccoli uomini di abbracciare l'immensità e la complessità del cosmo.

Modena, 22 gennaio 2018

Introduzione

A Stoccolma, sull'onda del Nobel

Ai miei figli cerco sempre di insegnare che nel gioco e nello sport l'importante è partecipare, non vincere. Per una volta, lo confesso, ho giocato per vincere "facile" (come diceva un famoso spot pubblicitario di qualche tempo fa) con un mio amico che nella vita non si occupa di fisica ma, per quanto possibile, segue le mie pubblicazioni e mostra molto interesse nella scienza in generale.

In una torrida giornata di agosto 2017, incalzato dalle domande di Enrico, sempre interessanti e mai banali, sono giunto a scommettere che il Premio Nobel per la Fisica del 2017 sarebbe stato conferito ai responsabili dei due interferometri gemelli LIGO (Laser Interferometer

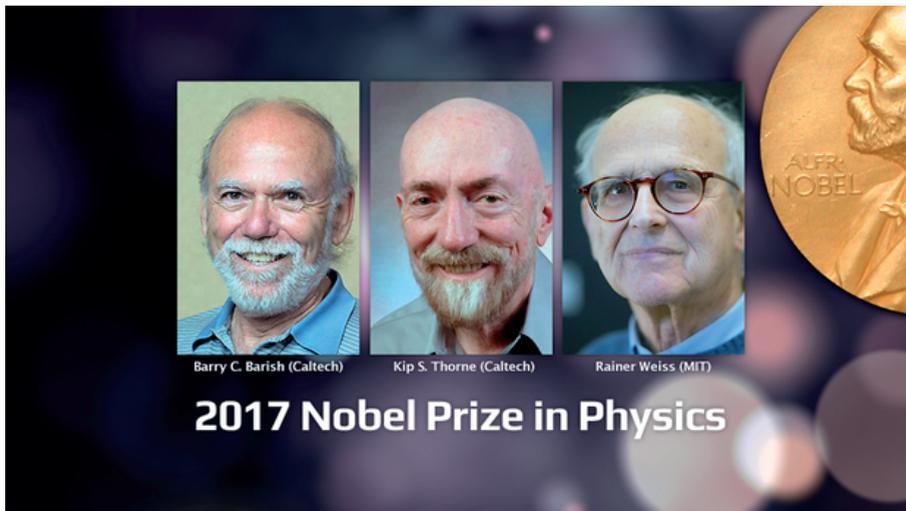


Figura 1. I tre vincitori del Premio Nobel per la Fisica 2017. I fisici Kip Thorne e Rainer Weiss sono considerati i pionieri del progetto LIGO, oggi nella versione potenziata, e Barry Barish è il fisico che lo ha portato a completamento, consentendo così la prima storica rivelazione diretta delle onde gravitazionali del 14 settembre 2015 (<https://www.ligo.caltech.edu/news/ligo20171003>).

Gravitational–Wave Observatory, anche se da ora in poi li chiameremo Advanced LIGO, ovvero LIGO nella versione potenziata), situati negli Stati Uniti. Grazie a questi straordinari strumenti per la prima volta, il 14 settembre 2015, sono state osservate le onde gravitazionali prodotte nella collisione (coalescenza, così la chiamano gli astrofisici) di due buchi neri.

Il risultato è stato annunciato l'11 febbraio dell'anno successivo, dopo una serie di lunghe e scrupolose verifiche, in due conferenze svolte contemporaneamente negli Stati Uniti e in Italia.

A lungo attesa, la prima osservazione delle onde gravitazionali ha conquistato le prime pagine dei quotidiani e delle riviste di tutto il mondo e doveva per forza essere premiata con il più importante riconoscimento scientifico. In molti avevano ipotizzato il Nobel già nel 2016; personalmente, essendo a conoscenza delle regole relative all'attribuzione del premio, ho sempre ritenuto il 2017 come l'anno giusto per premiare questa scoperta. E in effetti così è stato!

Quando ho seguito in diretta l'annuncio dei vincitori, dato il 3 ottobre 2017, ho esultato come un bambino non solo per aver vinto una cena nel mio ristorante preferito (offerta da Enrico, questo era il premio della scommessa) ma soprattutto per la consapevolezza di vivere in un periodo storico, per la fisica e astrofisica, davvero molto interessante ed eccitante, che spesso ho la fortuna e il piacere di raccontare quando sono impegnato nella comunicazione scientifica.

Il Premio Nobel per la Fisica 2017 è stato assegnato per metà al fisico tedesco, naturalizzato statunitense, Rainer Weiss del MIT (Massachusetts Institute of Technology) e l'altra metà congiuntamente ai fisici teorici statunitensi Barry C. Barish e Kip S. Thorne, entrambi del Caltech (California Institute of Technology), per « i contributi decisivi al rivelatore LIGO e l'osservazione di onde gravitazionali ». Questo prestigioso premio, che qualsiasi fisico vorrebbe vincere, sancisce il loro ruolo come promotori e fondatori dei due interferometri LIGO, grazie ai quali è stata realizzata la prima osservazione diretta delle onde gravitazionali, a un secolo dalla previsione teorica di Albert Einstein nella sua teoria della relatività generale.

Senza ombra di dubbio è stata premiata quella che, giustamente, tutti definiscono la “scoperta del secolo”, perché è uno dei risultati più importanti nella storia della fisica che ha segnato l'alba di una nuova frontiera dell'esplorazione dell'universo: l'astronomia gravitazionale.

La scoperta è stata realizzata dopo numerosi sforzi sperimentali ed è il giusto riconoscimento a chi, sin dall'inizio, ha inseguito il visionario progetto di riuscire a registrare le flebili onde gravitazionali. Questo Nobel, inoltre, rappresenta una grande soddisfazione e premia il talento e l'incredibile sforzo scientifico e tecnologico di oltre mille fisici, ingegneri e tecnici, provenienti da ogni parte del mondo, che per decenni hanno lavorato duramente per raggiungere questo storico risultato. In questa scoperta l'Italia e l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) hanno avuto un ruolo di primissimo piano grazie al progetto Virgo, nato dall'idea di Adalberto Giazotto e del fisico francese Alain Brillet. Virgo ha rappresentato un notevole passo avanti nella tecnologia degli interferometri: è stato, infatti, il primo rivelatore in assoluto capace di scendere alle basse frequenze, aprendo la strada all'attuale Advanced LIGO.

inoltre, Giazotto è stato l'antesigiano dell'idea della rete globale di interferometri, che da oltre un decennio, grazie alla stretta collaborazione tra LIGO e Virgo, è diventata una solida realtà e ha contribuito in maniera determinante alla scoperta premiata con il Nobel.

Torniamo ancora un attimo all'assegnazione del Nobel, con un'ultima doverosa riflessione. In molti hanno ritenuto che il prestigioso riconoscimento attribuito a Weiss, Barish e Thorne sia arrivato con un anno di ritardo rispetto a quanto atteso, dato che molti lo davano per scontato già nel 2016, ovvero lo stesso anno nel quale è stata comunicata e pubblicata la prima rivelazione diretta delle onde gravitazionali.

In realtà l'assegnazione del Premio Nobel segue delle rigide regole (e non potrebbe essere altrimenti data l'importanza del premio) che non hanno reso possibile l'assegnazione nel 2016. L'annuncio, infatti, è stato dato 11 giorni dopo la scadenza ultima per le nomination! In molti diranno che è giusto rispettare le regole e che, in fondo, si è trattato di aspettare solo un altro anno. Eppure anche solo un anno è stato un lasso di tempo che ha fatto la differenza: infatti, purtroppo nel frattempo, nel marzo 2017, è morto il fisico scozzese Ronald Drever, uno dei tre candidati iniziali al Nobel, colui che diede un enorme contributo al progetto LIGO. Le sue condizioni di salute erano già molto precarie nel 2016, quando tutti noi abbiamo esultato per gli importanti risultati scientifici conseguiti, distrutto da una malattia che alla fine lo ha privato del premio tanto ambito e che avrebbe di certo meritato.

Così alla fine il Nobel è andato a Weiss e Thorne che, nel 1984, con Drever diedero vita alla collaborazione LIGO. Insieme a loro c'è Barish che ha guidato il completamento del progetto LIGO fino alla straordinaria prima osservazione del 2015. Oggi dobbiamo ringraziare loro se finalmente, dopo molti tentativi e sviluppi tecnologici ai limiti dell'impossibile, abbiamo questi strumenti sensibilissimi capaci di captare quelle minuscole deformazioni dello spazio-tempo che sono le onde gravitazionali. Non capita di frequente che questo premio così importante sia assegnato con tempi così brevi rispetto alla scoperta. Il mio ricordo va al 2013 quando il Premio Nobel per la Fisica è stato assegnato a due fisici teorici, il belga Francois Englert e il britannico Peter Higgs per la scoperta del bosone di Higgs ("particella di Dio"), prevista nel 1964, un importante tassello che mancava nel Modello Standard della fisica delle particelle, sfuggito per decenni ai tentativi sempre più sofisticati di individuarlo.

Il 4 luglio 2012 l'italiana Fabiola Gianotti e lo statunitense Joe Incandela, i fisici portavoce delle collaborazioni ATLAS e CMS, hanno annunciato in un seminario congiunto la scoperta della nuova particella; la notizia ha avuto una grande risonanza mondiale.

Che gioia anche in quella occasione!