



Racconti dal Bar Aonda

— LE ONDE GRAVITAZIONALI E VARI CATACLISMI —



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Racconti dal Bar Ronda

LE ONDE GRAVITAZIONALI E VARI CATACLISMI



L'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) si occupa di ricerca di base nel campo dei costituenti fondamentali della materia e delle interazioni che ne regolano il comportamento.

Conta sulla professionalità di una comunità di oltre 6000 persone, impegnata a far sì che la ricerca fondamentale dia i suoi esiti migliori: ne sono esempio gli storici traguardi raggiunti negli ultimi anni con le scoperte da Nobel del bosone di Higgs e delle onde gravitazionali.

Racconti dal Bar Ronda

LE ONDE GRAVITAZIONALI E VARI CATACLISMI

©Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Aprile 2019

In collaborazione con



Scuola del Fumetto
Passione disegno dal 1979

PROGETTO SCIENTIFICO **Pia Astone (direzione)**

Carlo Bradaschia, Livia Conti, Dario Menasce, Catia Peduto, Piero Rapagnani, Massimiliano Razzano

DIREZIONE CREATIVA **Giuseppe Calzolari e Massimiliano Calzolari**

SOGGETTO **Marco Madoglio e Catia Peduto**

SCENEGGIATURA **Marco Madoglio**

DISEGNO **Ramie**

COLORE **Ramie e Bianca Burzotta**

PROGETTO GRAFICO E LETTERING **Daniela Sanziani e Giulia Livio**

Si ringraziano Nicolas Arnaud, Pia Astone, Marco Drago ed Ettore Majorana, dalle cui idee iniziali sono stati tratti vari spunti per la sceneggiatura.

Si ringrazia il Comitato di Coordinamento della Terza Missione dell'INFN.

STAMPA **Tipolitografia Quatrini**

su carta di pura cellulosa ecologica ECF

CREDITI ICONOGRAFICI

p. 35 ©INFN; p. 36 ©LIGO/Virgo, Fermi, INTEGRAL, NASA/DOE, NSF, EGO, ESA;

p. 37 ©SXS, the Simulating eXtreme Spacetimes (SXS) project (<http://www.black-holes.org>);

p. 38 ©NASA, ESA, NRAO/AUI/NSF and G. Dubner (University of Buenos Aires);

p. 39 ©INFN/Centimetri; p. 40 © M. Perciballi:VirgoCollaboration.

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

...1,3 MILIARDI DI ANNI FA,
NELL'UNIVERSO PROFONDO...



Credo di aver scoperto
qualcosa di nuovo.

una specie di perturbazione
gravitazionale...

L'ho chiamata...

ONDA GRAVITAZIONALE

Coefficiente di Tensione

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi T_{\mu\nu}}{c^4}$$

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$R = R^{\alpha}_{\alpha}$$

ONDA GRAVITAZIONALE



Secondo i miei calcoli potrebbe
venir creata da due grosse
masse che ruotano l'una
intorno all'altra nello spazio.

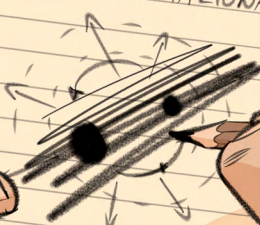
Però... esistono davvero tali corpi?

E poi... si riuscirebbe ad osservare
una tale perturbazione?

$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R$ ONDA GRAVITAZIONALE

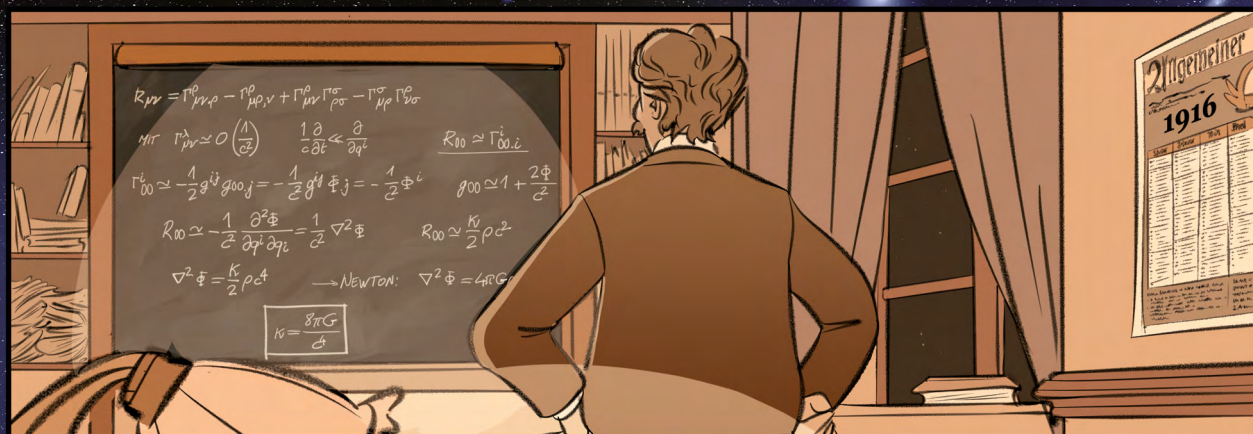
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi T_{\mu\nu}$$

$$R = R^{\alpha}_{\alpha}$$



No! E' impossibile!

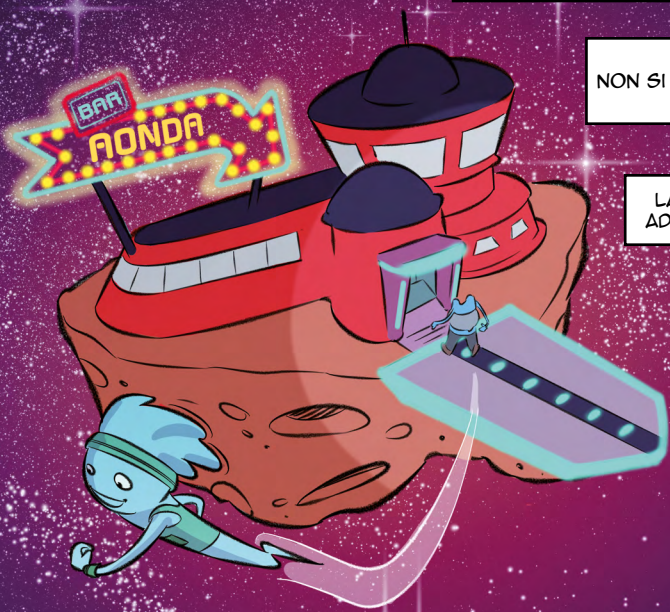
Sarebbe troppo debole per poter essere
osservata sulla Terra da così lontano...



EINSTEIN, QUINDI,
NON ERA AFFATTO CONVINTO.

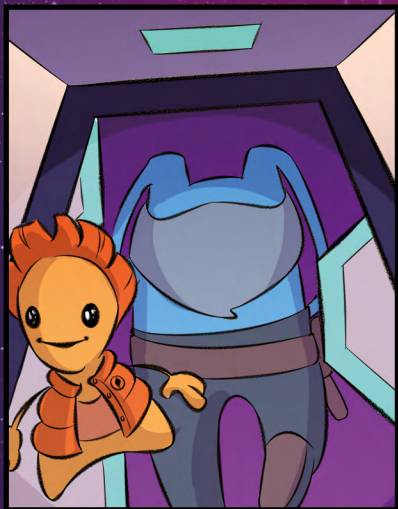
INOLTRE, A QUELL'EPOCA,
NON SI CONOSCEVA L'ESISTENZA NÉ DEI BUCHI NERI
NÉ DELLE STELLE DI NEUTRONI.

LA RISPOSTA ARRIVERÀ MOLTI ANNI, E MOLTI SCIENZIATI, DOPO.
AD UN SECOLO DALLA SUA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE.



*HIGG È IL BOSONE DI HIGGS.

**TAO È UN NEUTRINO.





NERAIS,
COME HANNO FATTO
A VEDERTI?



EH, NO!
PERCHÉ STRANGE*
LO CHIEDE A LEI E MAI
NESSUNO LO HA CHIESTO
A NOI?

NON NE HO IDEA,
AMICA MIA!

*STRANGE È UN QUARK.



SIAMO STATE AVVISTATE SULLA TERRA
MOLTO TEMPO PRIMA DI LEI E QUALCUNO CI HA
MAI CHIESTO COME FOSSE ANDATA?

NESSUNO!
LA PRIMA PROVA INDIRECTA
DELL'ESISTENZA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI,
COSÌ TITOLARONO SULLA TERRA E QUI...
NEANCHE UN BRINDISI!



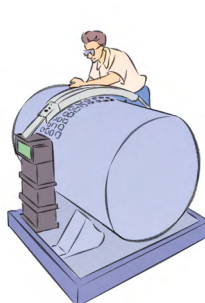
ANDIAMOCENE, PULSY*!
E' ORMAI CHIARO
CHE QUI NON SIAMO
BEN VOLUTE!

*PULSY È LA PULSAR PSR B1913+16

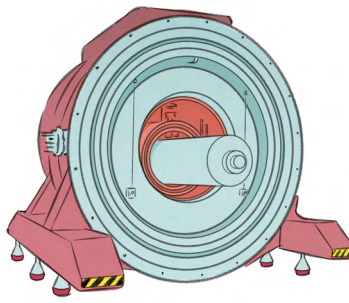


EHM... ECCO...

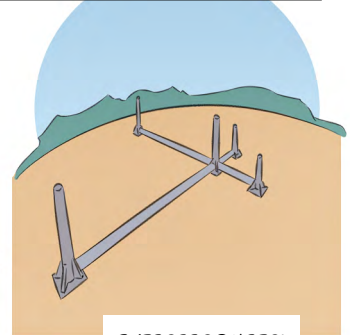
...DOVETE SAPERE CHE GLI UMANI, ALMENO ALCUNI, RITENGONO LE ONDE GRAVITAZIONALI
MOLTO IMPORTANTI. CI STUDIOANO DA MOLTO TEMPO E OGNI VOLTA CI MISURANO
CON STRUMENTI SEMPRE PIÙ SOFISTICATI.



BARRA DI WEBER



ANTENNE RISONANTI
(CRIOGENICHE)



INTERFEROMETRI



PERÒ,
PER SPIEGARVI MEGLIO
LA MIA RIVELAZIONE, VI RACCONTERÒ
DI TRE RICERCATORI TERRESTRI:
DUE FISICI E UN ASTRONOMO.
VOLETE?



CERTO!

ALLORA VE
LI PRESENTO.



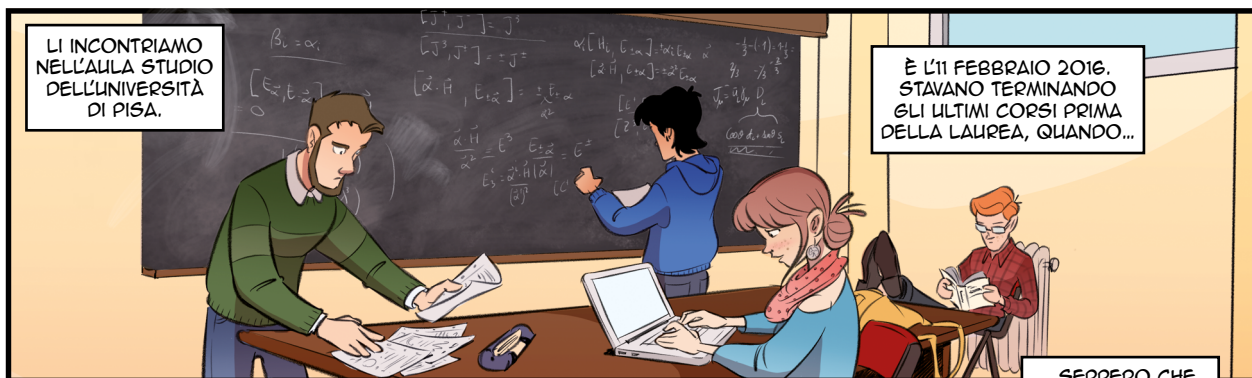
ANDREA È UN BRAVO RAGAZZO,
PORTATO PER LO STUDIO,
SENTIMENTALE, POETICO
E UN PO' CONSERVATORE
RIGUARDO ALLE TEORIE FISICHE.



MARIE È UNA RAGAZZA FRANCESE,
UNA STUDIOSA IN GAMBA
ED È LA FIDANZATA DI ANDREA...
ANCHE SE IL RAPPORTO
È UN PO' SCRICCHIOLANTE.



LUCA, INVECE,
È CURIOSO, PROPOSITIVO
ED IMPULSIVO E, SOTTO
SOTTO, È ATTRATTO
ANCHE LUI DA MARIE.



LI INCONTRIAMO
NELL'AULA STUDIO
DELL'UNIVERSITÀ
DI PISA.

È L'11 FEBBRAIO 2016.
STAVANO TERMINANDO
GLI ULTIMI CORSI PRIMA
DELLA LAUREA, QUANDO...

...SEPPERO CHE
ERO ARRIVATA!

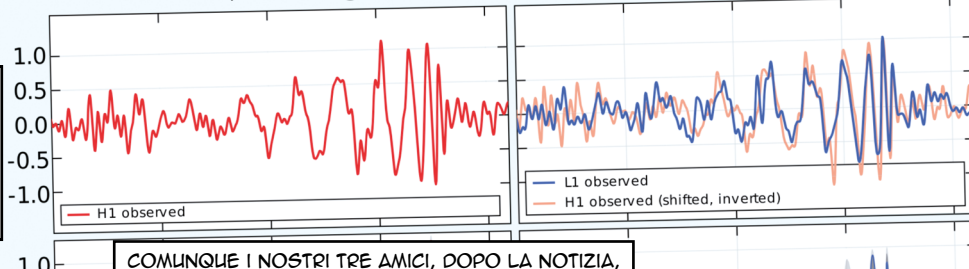
AH, SULLA TERRA NON
MI CHIAMANO NERAI'S
MA GW150914.
SÌ, LO SO, CON I NOMI
NON SONO MOLTO
FANTASIOSI.

OLTRETUTTO ERO
PASSATA IL 14 SETTEMBRE
DELL'ANNO PRECEDENTE
MA A CAUSA DI VARI MOTIVI
DECISERO CHE...
OH... SCUSATE,
STO DIVAGANDO...

GW150914

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



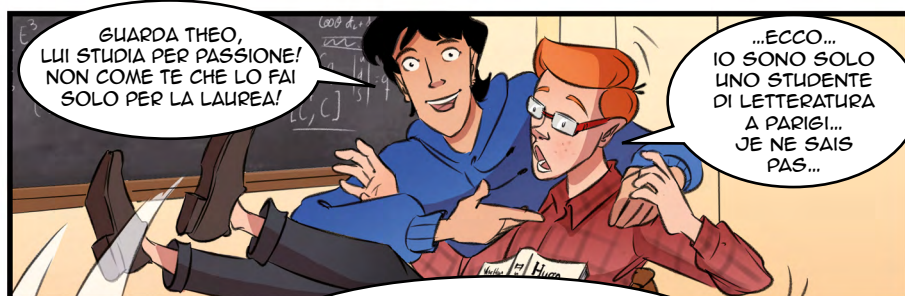
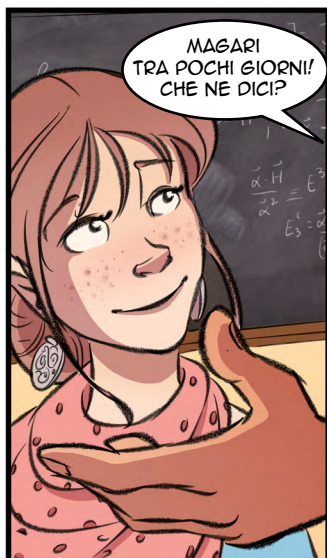
COMUNQUE I NOSTRI TRE AMICI, DOPO LA NOTIZIA,
VIDERO I DATI SUL MONITOR E, COME LOGICO,
REAGIRONO IN MODO DIVERSO...

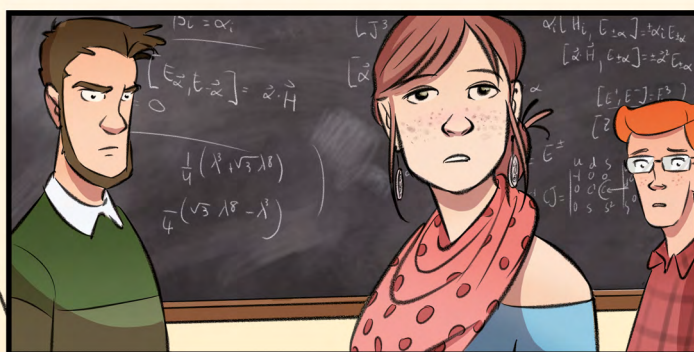
MERAVIGLIOSO!
QUESTO È UN NUOVO
MESSAGGERO
DELL'UNIVERSO!

SÌ,
C'EST INCROYABLE!

AVETE IDEA DI
DOVE CI PORTERÀ
QUESTA COSA?!

"ASPETTA UN ATTIMO, LUCA" ...
DISSE ANDREA...







ABBIAMO
SCOPERTO LE ONDE
GRAVITAZIONALI, ANCORA
NON CI CREDO!

TI RENDI CONTO
CHE QUESTA COSA CONFERMA
ANCHE L'ULTIMA PREDIZIONE
DELLA RELATIVITÀ
GENERALE?!



OSSERVATA GRAZIE
ALLA COLLABORAZIONE
DI LIGO E VIRGO, NON È
CLAMOROSO?

NIENTE SARÀ PIÙ
LO STESSO!



EXCUSEZ-MOI,
MES AMIS MA NON CI STO
CAPENDO NIENTE! IN PRATICA COS'È
QUESTA ONDA? COSA C'ENTRA
EINSTEIN E COSA SONO
LIGO E VIRGO?



HAI RAGIONE,
THEO. EXCUSE-NOUS,
CI SIAMO FATTI TRASPORTARE
DALL'EMOZIONE. PROVO
A SPIEGARTI IN BREVE,
INOLTRE...

...È CURIOSO
CHE CI TROVIAMO
A PARLARE DI QUESTE
COSE PROPRIO ACCANTO
AD UNA FONTANA...

...PERCHÉ PASSEGGIANDO
ACCANTO A QUELLA
DELLA SAPIENZA A ROMA,
I PROFESSORI ALAIN BRILLET
E ADALBERTO GIAZOTTO,
DURANTE UN CONGRESSO
SULLA RELATIVITÀ GENERALE
NEI PRIMI ANNI '80,
DECISERO DI INIZIARE
UNA COLLABORAZIONE
CHE LI AVREBBE PORTATI
ALLA COSTRUZIONE DI VIRGO.

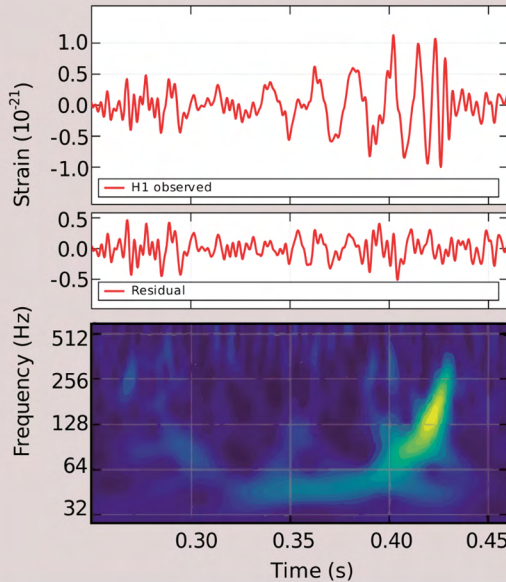


MA ANDIAMO
CON ORDINE.

PRIMA COSA... UN'ONDA GRAVITAZIONALE È UNA PERTURBAZIONE DELLO SPAZIOTEMPO CHE SI PROPAGA CON CARATTERE ONDULATORIO.

GW150914

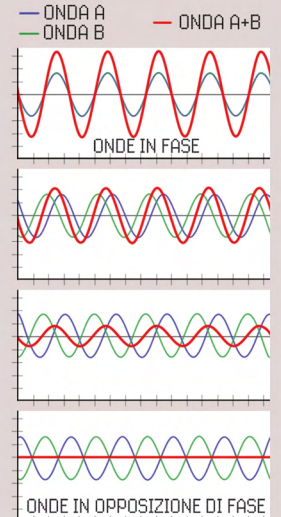
Hanford, Washington (H1)



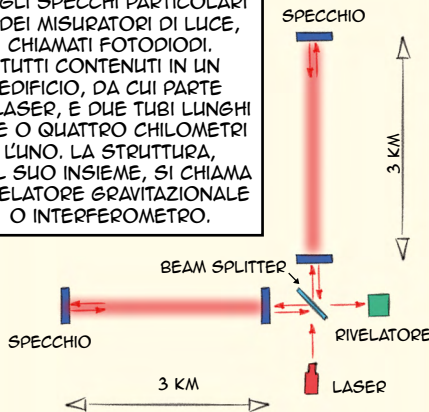
QUESTE ONDE SONO GENERATE DAI PIÙ VIOLENTI FENOMENI ASTROFISICI, COME LA FUSIONE DI STELLE DI NEUTRONI E DI BUCHI NERI, O L'IMPLOSIONE DI STELLE MASSICCE COME LE SUPERNOVAE.

LE ONDE GRAVITAZIONALI SONO UNA DELLE CONSEGUENZE DELLA TEORIA DELLA RELATIVITÀ GENERALE, PUBBLICATA DA ALBERT EINSTEIN CIRCA UN SECOLO FA, ALLA FINE DEL 1915.

LE SI PUÒ RIVELARE TRAMITE UN INTERFEROMETRO LASER CHE SFRUTTA LA PROPRIETÀ DELLE ONDE ELETTROMAGNETICHE DI RICOMBINARSI IN FASE, O IN OPPOSIZIONE DI FASE, TRA LORO.



PER FAR QUESTO SI UTILIZZA UN RAGGIO LASER, DEGLI SPECCHI PARTICOLARI E DEI MISURATORI DI LUCE, CHIAMATI FOTODIODI. TUTTI CONTENUTI IN UN EDIFICIO, DA CUI PARTE IL LASER, E DUE TUBI LUNGHI TRE O QUATTRO CHILOMETRI L'UNO. LA STRUTTURA, NEL SUO INSIEME, SI CHIAMA RIVELATORE GRAVITAZIONALE O INTERFEROMETRO.



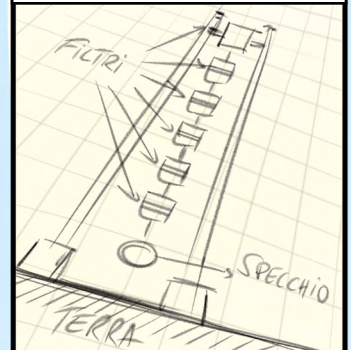
PER ORA CE NE SONO TRE ATTIVI NEL MONDO, I DUE LIGO NEGLI STATI UNITI E VIRGO IN ITALIA.

VIRGO È QUELLO DI CUI PARLAVI PRIMA, QUELLO DEL TIZIO DELLA FONTANA?



EH EH, SÌ, ESATTO. DOPO L'INCONTRO ALLA SAPIENZA, GIAZOTTO, NEL 1987, INSIEME AD ALTRI SCIENZIATI, PRESENTO ALL'INFN IL PROGETTO PER COSTRUIRE IL PRIMO INTERFEROMETRO IN ITALIA. VENNE INCLUSO NEL PIANO QUINQUENNALE, 1989-1993, DELL'ISTITUTO.

MA L'INTERFEROMETRO NON SAREBBE MAI NATO SENZA UN'IDEA DI COME RIDURRE I DISTURBI DI NATURA SISMICA CHE IMPEDIVANO DI ESSERE SENSIBILI ALLE BASSE FREQUENZE FONDAMENTALI PER RIVELARE LE ONDE: IL SUPERATTENUATORE!



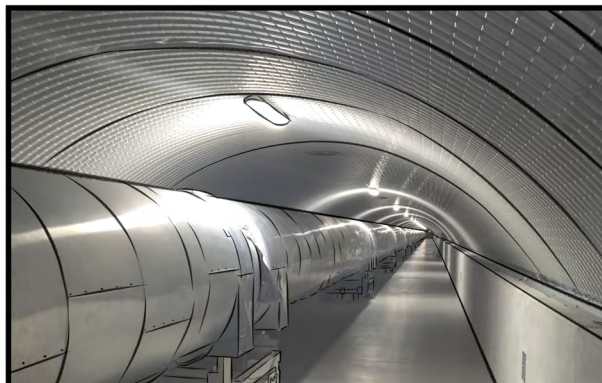
FINALMENTE NEL 1994 VIRGO FU DEFINITIVAMENTE APPROVATO ATTRAVERSO UN ACCORDO INTERNAZIONALE TRA L'INFN E IL CNRS FRANCESE. VENNE COSTRUITO NEL SITO DELL'OSSERVATORIO GRAVITAZIONALE EUROPEO A CASCINA, VICINO A PISA.



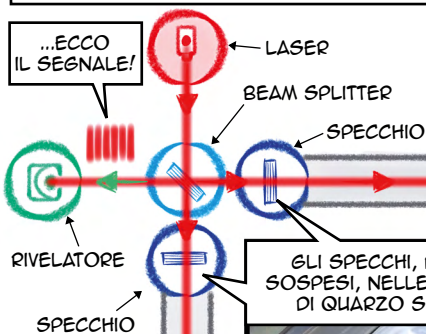
TRÈS BIEN, PERÒ NON HO ANCORA CAPITO
COME FUNZIONA VIRGO. I LASER, GLI SPECCHI
E TUTTO IL RESTO A COSA SERVONO?

LE ONDE GRAVITAZIONALI SI MANIFESTANO COME PICCOLISSIME
DISTORSIONI DELLO SPAZIOTEMPO: QUANDO ATTRAVERSANO
LO SPAZIO ESSO SI COMPRIME IN UNA DIREZIONE E SI DILATA
IN QUELLA PERPENDICOLARE.

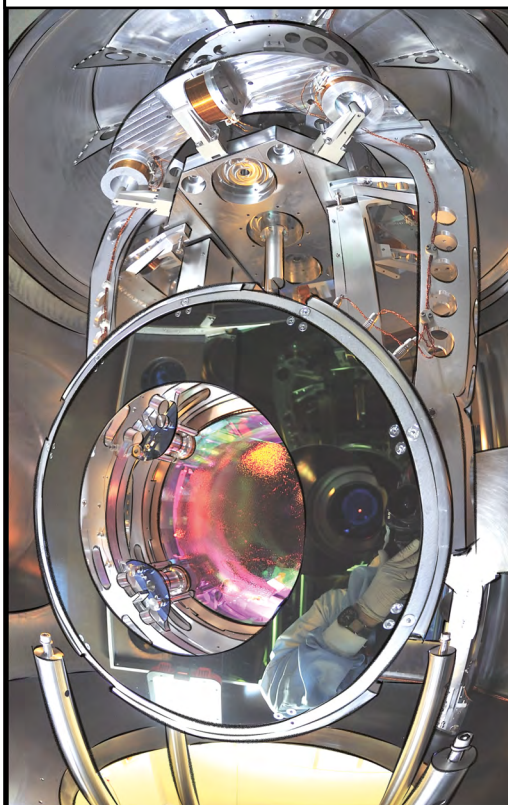
PER MISURARE DISTORSIONI COSÌ PICCOLE, MENO
DI UN DECIMILLESIMO DEL DIAMETRO DI UN PROTONE,
SI USA UN FASCIO LASER CHE VIENE DIVISO IN DUE PARTI.
I FASCI LASER PERCORRONO I BRACCI DI VIRGO DISPOSTI
A L, SONO RIFLESSI DA DUE SPECCHI E SI RICOMBINANO
PRODUCENDO INTERFERENZA. QUANDO LA LUNGHEZZA
DEI BRACCI CAMBIA, L'INTERFERENZA TRA DI ESSI
SI MANIFESTA COME UNO SFARFALIO DI LUCE...



PER CREARE UN RIVELATORE ULTRAPRECISO COME VIRGO
SERVONO TECNOLOGIE DA RECORD.
AD ESEMPIO, NEI BRACCI DI 3 KM È FATTO UN VUOTO
COME QUELLO INTERSTELLARE E GLI SPECCHI HANNO
LA MIGLIORE QUALITÀ OTTICA MAI REALIZZATA DALL'UOMO.

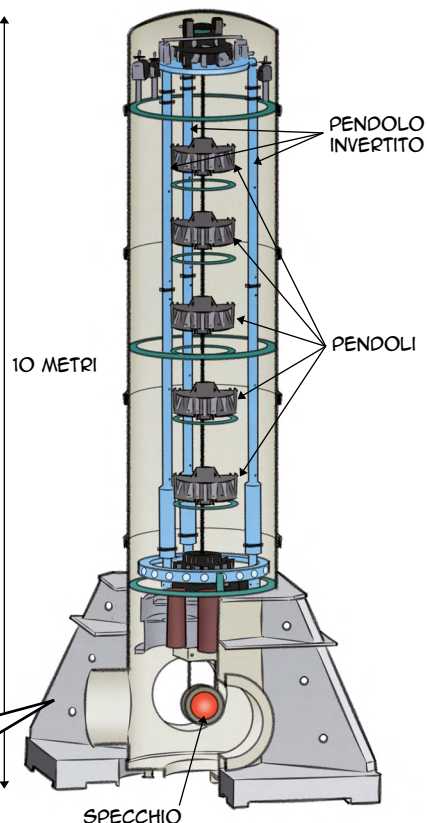


GLI SPECCHI, PESANTI 40 KG L'UNO, SONO
SOSPESI, NELLE TORRI, MEDIANTE QUATTRO FILI
DI QUARZO SOTTILI QUASI COME CAPELLI.



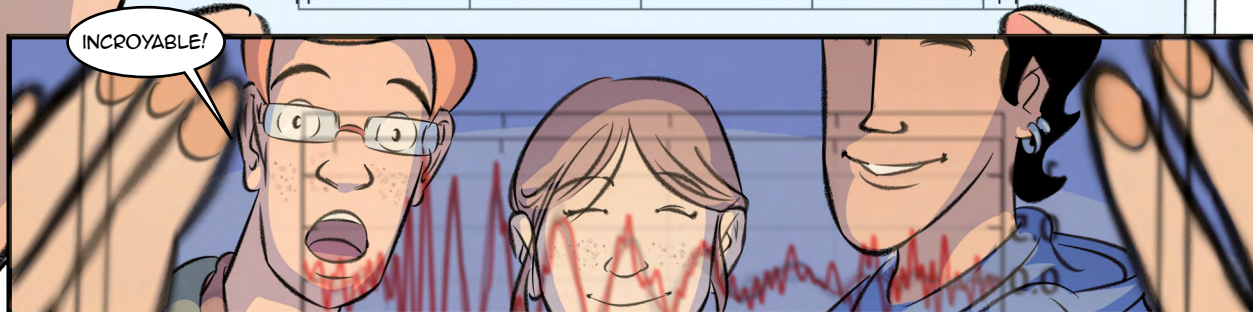
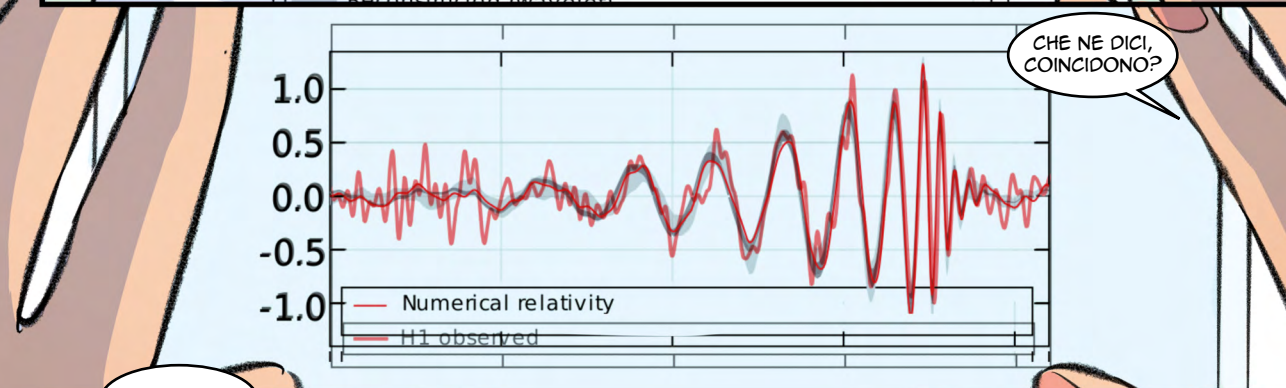
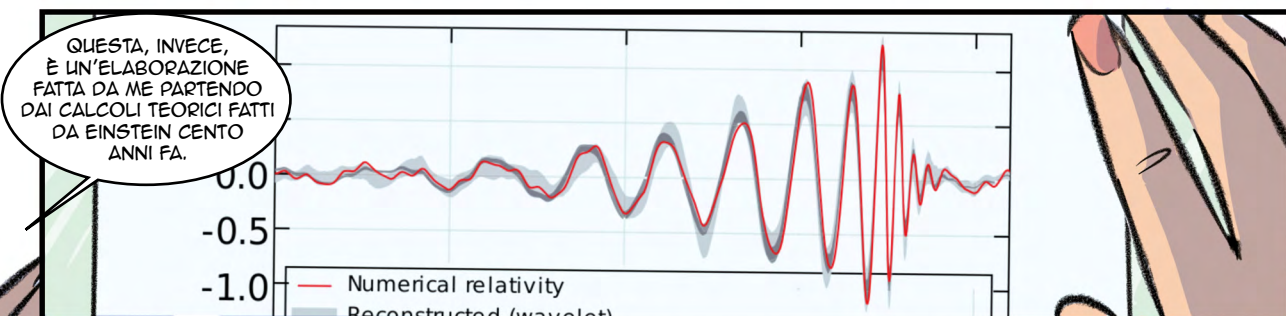
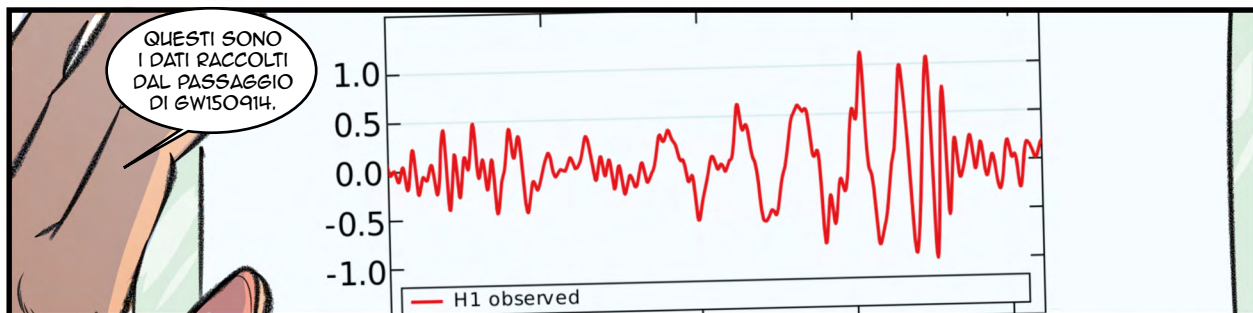
OGNI TORRE CONTIENE UNA CATENA DI SETTE
PENDOLI IN CASCATA, PROGETTATA PER
SMORZARE IL PIÙ POSSIBILE OGNI VIBRAZIONE
DEL TERRENO CHE, PER QUANTO IMPERCETTIBILE,
DISTURBEREBBE COMUNQUE LA MISURA
FINO A RENDERLA IMPOSSIBILE.

OGNI CATENA È INGABBIATA IN UNA STRUTTURA
CHE SI COMPORTA COME UN "PENDOLO
INVERTITO" ALTO CIRCA 10 METRI CHE, QUANDO
LA BASE OSCILLA, MANTIENE FERMA LA CIMA
E QUINDI LO SPECCHIO APPESO ALL'ULTIMO
ELEMENTO IN FONDO.



ORA TI È
PIÙ CHIARO?

OUI!
MERCI!





CAPISCI PERCHÉ
SIAMO AFFASCINATI
DA TUTTO QUESTO?



PARFAITEMENT!

QUINDI DOPO
L'UNIVERSITÀ COSA
FARETE?



SE TUTTO VA
COME DEVE ANDARE...
RICERCATORI
A VIRGO!

GIÀ,
SAREBBE
PROPR-



RAGAZZI!

L'UNIVERSITÀ
NON VI BASTA PIÙ
PER STUDIARE?



EH EH EH...
SA, LA NECESSITÀ
AGUZZA L'INGEGNO!

BUONASERA
PROFESSORE, NON
L'AVEVAMO VISTA!

DEDICO CHE
AVETE SAPUTO
DELLA SCOPERTA...



EH EH, ESATTO!
QUESTO RISULTATO RAPPRESENTA
UNA PIETRA MILIARE NELLA STORIA
DELLA FISICA!

ANCOR DI PIÙ... È L'INIZIO
DI UN NUOVO CAPITOLO
PER L'ASTROFISICA!
CONCORDA?



CERTO!
VEDREMO COSE
CHE FINORA PER NOI
ERANO INVISIBILI VISTO
CHE LE ONDE GRAVITAZIONALI
A DIFFERENZA DELLA LUCE
PASSANO ATTRAVERSO LA MATERIA
E INOLTRE FORNISCONO
INFORMAZIONI IN PIÙ.



ALLORA POTRÀ TROVARSI D'ACCORDO CON ME NELL'IPOTIZZARE CHE LA PROSSIMA RIVELAZIONE POTREBBE AVVENIRE A BREVE... PARLO ANCHE DI UN PAIO D'ANNI, E CHE...



...MAGARI, L'ONDA SARÀ GENERATA DA ALTRI CATACLISMI ASTROFISICI... AD ESEMPIO DELLE STELLE DI NEUTRONI!



EH! APPREZZO LA SUA PASSIONE E IL SUO OTTIMISMO MA MI TROVA MOLTO SCETTICO.



SOPRATTUTTO RIGUARDO ALLE TEMPISTICHE, CI SONO TROPPE INCOGNITE.



SI RICORDI CHE I TEMPI DELLA SCIENZA NON LI DECIDE NESSUNO, TANTO MENO LEI!



LE ANDREBBE DI SCOMMETTERE?



AH AH AH! NON SCOMMETTO MAI QUANDO SONO SICURO DI VINCERE FACILMENTE! BUONA NOTTE!



BON, A FORZA
DI PENSARE ALLO SPAZIO
PROFONDO MI È VENUTA SETE.
VADO A PRENDERE DELLE BIRRE
PER TUTTI E TRE.



ANCHE
IL PROFESSORE
LA PENSA COME ANDREA...
AL DIAVOLO! DICI CHE
STO SBAGLIANDO
COSÌ TANTO?



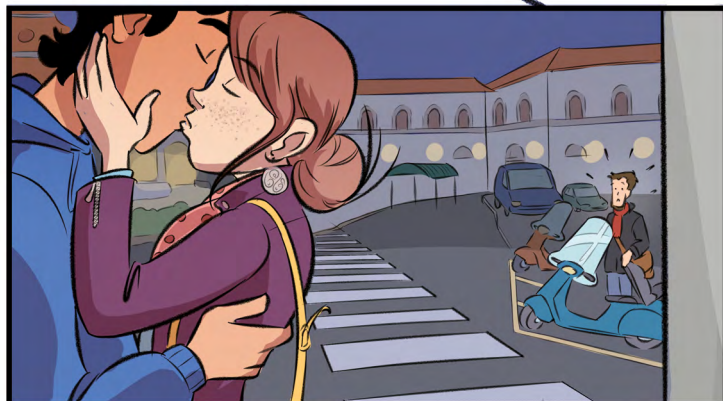
LUCA...

SÌ?



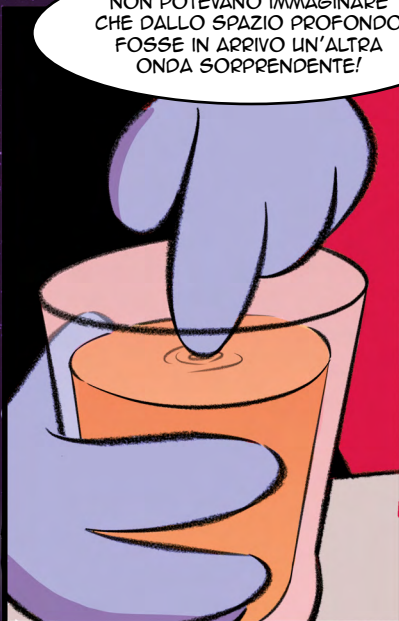
MARIE?

TOUT VA BIEN,
MON COEUR...
BACIAM!





MENTRE
I NOSTRI AMICI
SI STAVANO
SCOPRENDO
A VICENDA...



NON POTEVANO IMMAGINARE
CHE DALLO SPAZIO PROFONDO
FOSSE IN ARRIVO UN'ALTRA
ONDA SORPRENDENTE!



CERTO,
DOPO DI ME ALCUNE ONDE
SIMILI A ME ATTRAVERSARONO
IL LORO PIANETA MA...

...TRA QUELLE CHE
VIDERO QUESTA
ERA ASSOLUTAMENTE
SPECIALE!

ERA LUCIO17!





MENTRE LUI SI AVVICINAVA ALLA
TERRA, LORO SI LAUREARONO...

LUCA E MARIE SI INNAMORARONO
SEMPRE DI PIÙ...



...E INIZIARONO, COME AVEVANO SOGNATO,
IL DOTTORATO IN FISICA A VIRGO...



...MENTRE ANDREA SCELSE UN INDIRIZZO
ASTROFISICO. LA COPPIA NON LO VIDE PIÙ.



TUTTO QUESTO ACCADDE IN MENO DI DUE ANNI
TERRESTRI, CIRCA LA METÀ DEL TEMPO CHE CI METTE LA
LUCE AD ANDARE DA PROXIMA CENTAURI ALLA TERRA.

INFATTI RIPRENDIAMO LA NOSTRA STORIA POCO DOPO L'INIZIO DEL DOTTORATO DI LUCA E MARIE.

SIAMO A VIRGO.

È IL 17 AGOSTO 2017.

È ARRIVATA?

NO.

ADESSO?

LA SMETTI?

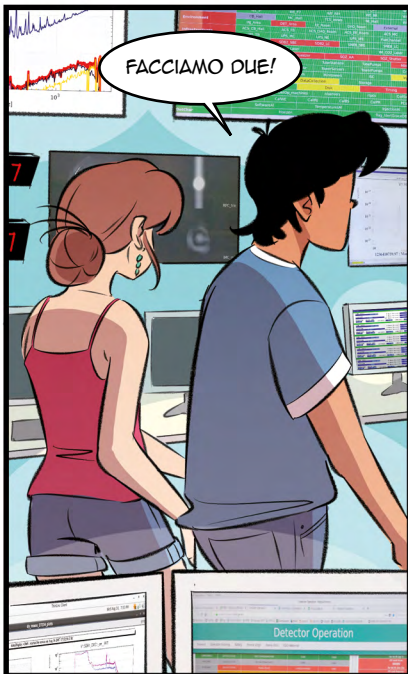
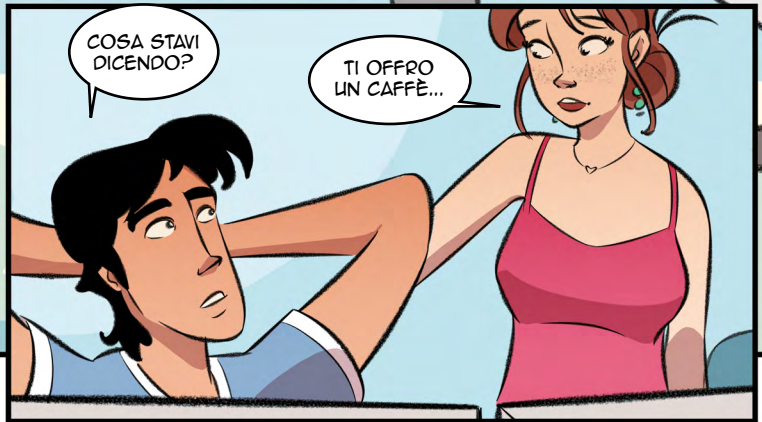
NON SONO IO CHE HO DETTO, E CITO...

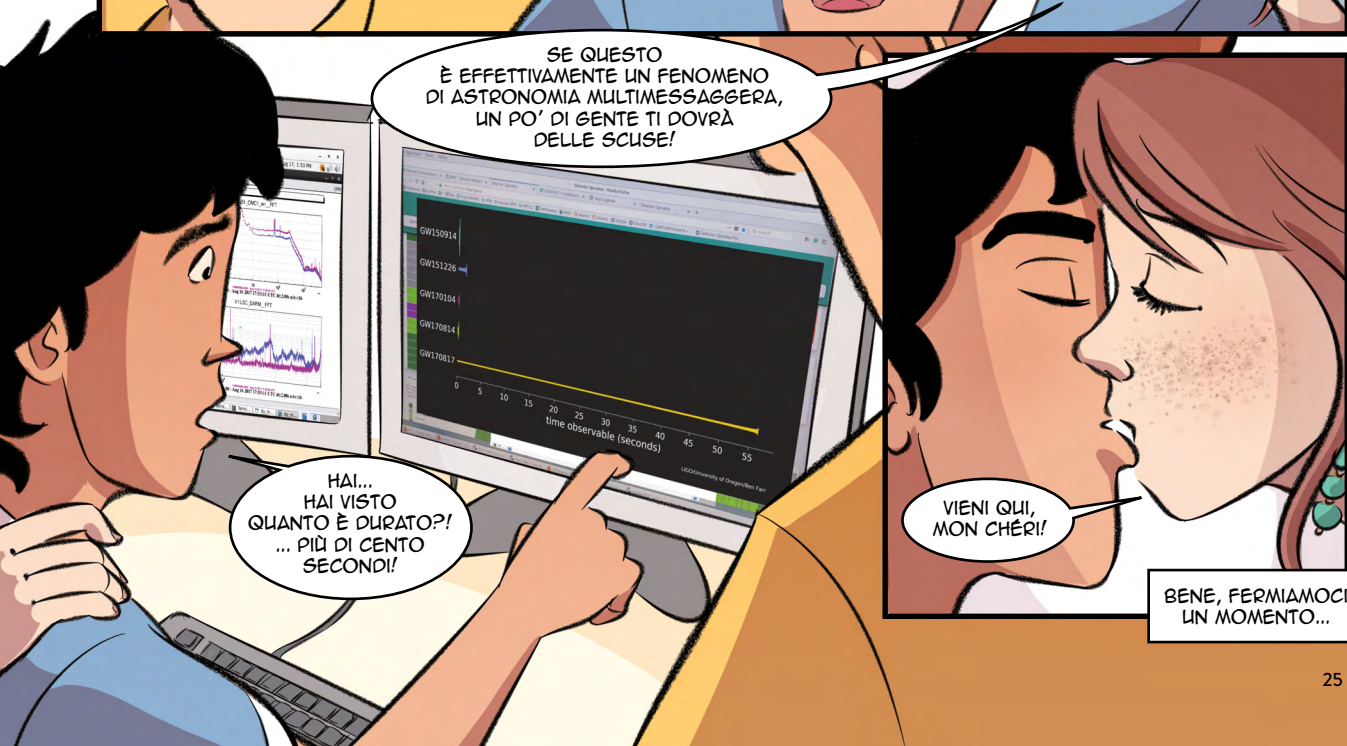
"DOPO 6W150914
ABBIAMO AVVISTATO
ALTRE ONDE PROVENIENTI
DA BUCHI NERI.
LA PROSSIMA CHE
VEDREMO SARÀ
MULTIMESSAGGERA!"

E COM'È CHE
HAI CHIUSO?
...

AH...
"SECONDO
ME ARRIVERÀ
UNO DI QUESTI
GIORNI, TIENITI
PRONTA!"









... E FACCIAMO UN PASSO INDIETRO. LUCIO17, VERRÀ POI CHIAMATO DAI TERRESTRI GW170817, NON È NATO DA UNA COALESCENZA DI DUE BUCHI NERI, COME ME...

...MA DA QUELLA
DI DUE STELLE DI NEUTRONI.

LA LORO UNIONE HA CREATO
UN LAMPO DI RAGGI GAMMA...

...DELLE ONDE GRAVITAZIONALI E DELLE NUBI
DI MATERIALE. UN BEL PO' DI COSE IN PIÙ
RISPETTO A ME, NO?!

PERÒ TUTTO QUESTO
DALLA TERRA NON SI
È POTUTO VEDERE.

ALLORA PERCHÈ MARIE E LUCA
ERANO COSÌ STUPITI?

TORNIAMO A LORO
E VE LO RACCONTERÒ!



ASPETTA, MARIE!
TI RINGRAZIO MA NON CANTEREI
ANCORA VITTORIA. PRIMA SI
DOVRANNO ANALIZZARE
TUTTI I DATI.



!
EHI, DA DOVE VIENE
TUTTA QUESTA PRUDENZA?
ORMAI SI STARÀ
FESTEGGIANDO
OVUNQUE!



INFATTI ANCHE NELLE DUE SEDI DI LIGO
GLI SCIENZIATI ERANO EUFORICI.



LIGO-LIVINGSTON

LIGO-HANFORD

HAI RAGIONE!
PER ORA GODIAMOCI IL MOMEN-

PLI-PLING!



IL MIO
CELLULARE.

OTTIMO TEMPISMO,
CHILUNQUE TU SIA...



Andrea
Aujourd'hui 14:40
Complimenti per
l'osservazione dell'onda!
Anche noi abbiamo
visto qualcosa! Un
segnale, come un
"punto" luminoso
durato pochissimo. Qui
si fa la storia! 🙌

E' DI ANDREA!



LO CHIAMO? E' DA TANTO
CHE NON LO SENTIAMO!



NO,
NON ADESSO...

OK...
COME VUOI!...





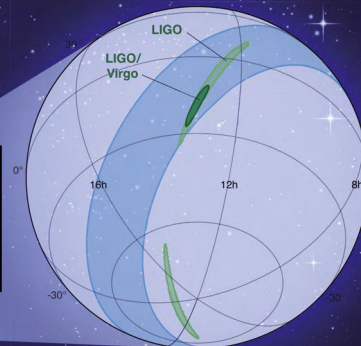
GLI SCIENZIATI INIZIARONO A STUDIARE LUCIO17 E L'EUFORIA INIZIALE FU AMPIAMENTE GIUSTIFICATA!

OSSERVANDO LA FORMA DELL'ONDA RIVELATA CAPIRONO CHE SI TRATTAVA DI UNA COALESCENZA DI DUE STELLE DI NEUTRONI, IPOTESI SUPPORTATA DALLA CONTEMPORANEA RIVELAZIONE DI UN LAMPO DI RAGGI GAMMA, QUELLO ACCENNATO DA ANDREA NEL SUO MESSAGGIO.

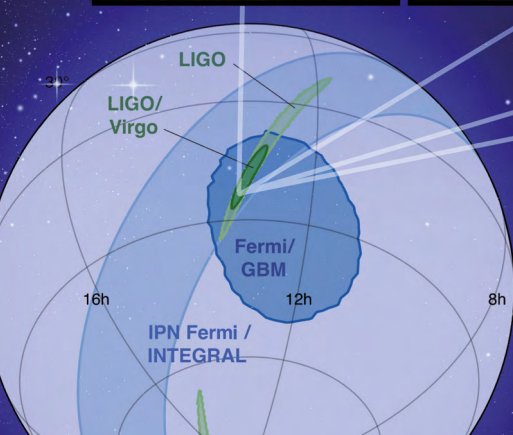
GRAZIE ALL'OSSERVAZIONE FATTA DAI TRE INTERFEROMETRI, I DUE LIGO E VIRGO...



...EFFETTUARONO UNA TRIANGOLAZIONE TROVANDO LA ZONA DOVE SI ERA CREATA L'ONDA GRAVITAZIONALE E ALLERTARONO GLI ALTRI TELESCOPI A PUNTARE IN QUELLA DIREZIONE.



RISPETTO ALLE ALTRE RIVELAZIONI, IN CUI C'ERANO SOLO ONDE GRAVITAZIONALI, IN QUESTO CASO È STATO VISTO ANCHE UN LAMPO DI LUCE, INDIVIDUATO POI DA TANTISSIMI SATELLITI E OSSERVATORI IN TERRA E IN CIELO.



QUESTO SEGNALE, INIZIALMENTE UN LAMPO DI RAGGI GAMMA, VIA VIA AFFIEVOLITOSI A LUCE VISIBILE, CONTRIBUÌ, DEFINITIVAMENTE, A INDICARE LA GALASSIA DOVE AVVENNE LA COALESCENZA.

IN QUEL PUNTO ESATTO TROVARONO IL NUOVO CORPO CELESTE
FORMATOSI DALL'UNIONE DELLE DUE STELLE DI NEUTRONI.
DATA LA SUA ENORME POTENZA, IL FENOMENO VENNE CHIAMATO... KILONOVA!



PER CHIUDERE, BASTA LEGGERE COSA SI ERA APPUNTATO, ORGOGLIOSAMENTE,
LUCA SUL SUO DIARIO IL GIORNO DELLA PRIMA RIVELAZIONE...

Oggi, 17 agosto 2017, per la prima volta delle onde gravitazionali
e delle onde elettromagnetiche sono state osservate da una
singola sorgente astrofisica.

E' NATA L'ASTRONOMIA MULTIMESSAGGERA!!!

INFATTI, COME AVEVA PREVISTO MARIE,
QUALCUNO GLI DOVEVA DELLE SCUSE...



COMPLIMENTI, LUCA!
ALLA FINE AVEVI RAGIONE
CON LA TUA PREVISIONE.
RINGRAZIO IL CIELO DI NON
AVER SCOMMESSO!
AH AH AH!

MA NON SOLO I MESSAGGI
DI LUCIO17 CATTURAVANO
L'ATTENZIONE DI LUCA E MARIE.



ANCHE ANDREA CONTINUAVA
A SCRIVERNE A MARIE.
SEMPRE MENO PROFESSIONALI,
SEMPRE PIÙ PERSONALI.



LEI, PERÒ, LI ELIMINAVA
TUTTI. SENZA DIRE
NULLA A LUCA.





TUTTO QUI?!

E LUCA?
E MARIE?
E ANDREA?



QUEL MUONE
HA RAGIONE!
VOGLIAMO
IL SEGUITO!



ALLORA...

...TORNIAMO SULLA TERRA.
DURANTE IL RICEVIMENTO
PER FESTEGGIARE LA RIVELAZIONE
DI LUCIO17.



NON HO VOGLIA
DI ENTRARE...

NON FARE
IL BAMBINO.

NE ABBIAMO GIÀ PARLATO,
VEDRAI CHE TI DIVERTIRAI.



SARÀ...

LUCA NON VOLEVA ENTRARE PERCHÉ
AVEVA PENSATO CHE GRAZIE ALLA SCOPERTA
DELL'ASTRONOMIA MULTIMESSAGGERA AVREBBE
DOVUTO COLLABORARE CON GLI ASTRONOMI.
E QUINDI CON... ANDREA!



NON SAPEVA BENE PERCHÉ MA AVVERTIVA
DELLA GELOSIA NEI SUOI CONFRONTI,
ANCHE SE NON SI VEDEVANO DA DUE ANNI.

COME AVEVA PREVISTO MARIE, APPENA ENTRATI, LUCA SI IMMERSE IN DISCUSSIONI APPASSIONATE CON I SUOI COLLEGGI RIGUARDANTI ME E LUCIO 17 MENTRE LEI RIMASE SOLA...

...PER POCO...

UN ALTRO?

SÌ, GRAZIE...

BEH, ALMENO QUI HAI RISPOSTO. PERCHÉ AI MIEI MESSAGGI NO?

SAI, PENSO ANCORA A TE!

!?

DAVERO VUOI PASSARE LA VITA CON UNA PERSONA INNAMORATA SOLO DEL SUO LAVORO?

IO SONO INNAMORATO SOLO DI TE!

FRENA, ANDREA. TI RINGRAZIO PER LA CONFESSIONE MOLTO APPASSIONATA MA ANCHE MOLTO SBAGLIATA. IO HO GIÀ SCELTO CON CHI VOGLIO STARE...

LUCA, HAI VISTO CHI C'È?

CIAO, ANDREA...

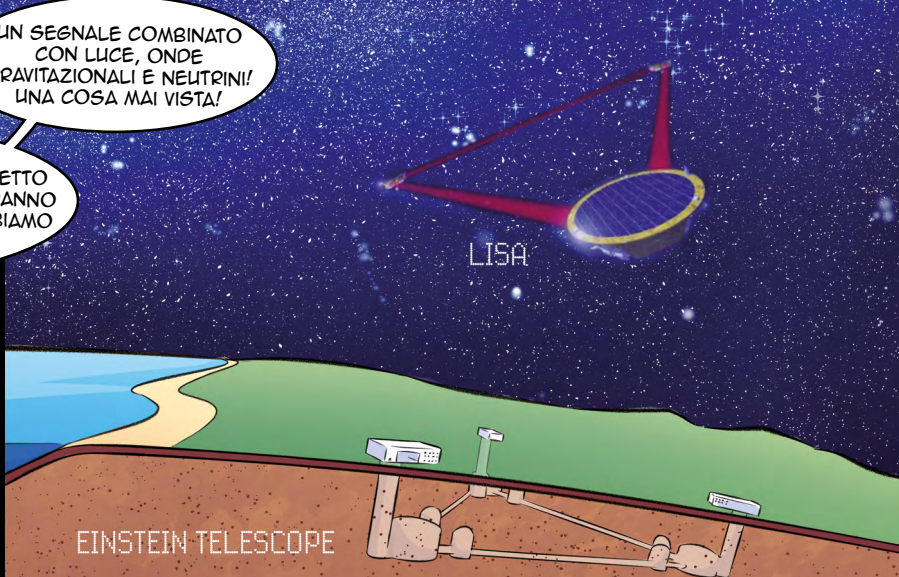
COSA HO DETTO DI MALE?

NON PREOCCUPARTI. LASCIA UN POCO...



UN SEGNALE COMBINATO CON LUCE, ONDE GRAVITAZIONALI E NEUTRINI! UNA COSA MAI VISTA!

MAGARI RIVELATO GRAZIE ALL'EINSTEIN TELESCOPE O AL PROGETTO LISA, DUE PROGETTI CHE RACCOGLIERANNO L'EREDITÀ DELLA SCOPERTA A CUI ABBIAMO PARTECIPATO ANCHE NOI! TI RENDI CONTO?!

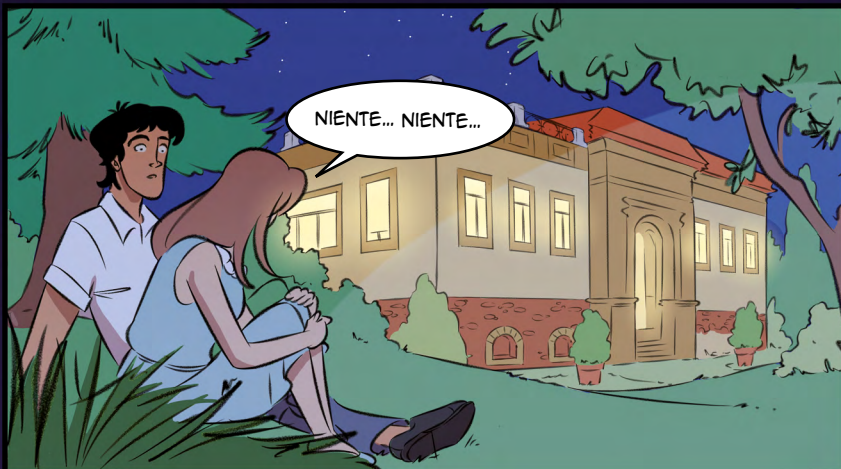


EINSTEIN TELESCOPE





SCUSA,
DICEVI...



NIENTE... NIENTE...



FINE.

MI DISPIACE, RAY*,
MA DI LORO NON SO PIÙ NIENTE.
DOVETE ASPETTARE CHE ARRIVI
QUALCUN ALTRO CHE SIA PASSATO
DALLA TERRA. IO SONO ARRIVATA
A PERCEPIRE LA LORO PRESENZA
E LA LORO STORIA FINO A QUESTO
PUNTO, POI ERO TROPPO DISTANTE
E IL SEGNALE ERA SEMPRE
PIÙ BASSO.



*RAY È UN FOTONE.

LUCIO17 ARRIVERÀ
TRA NON MOLTO E FORSE
SAPRÀ QUALCOSA IN PIÙ.
INOLTRE MI HANNO DETTO
CHE ALCUNI NEUTRINI
SI STANNO AVVICINANDO
AL PIANETA...



COME FINE?!

...CHISSÀ!



L'UNICA COSA
DA FARE È ASPETTARE.

IN FONDO, IL TEMPO E LO SPAZIO
SONO RELATIVI... NO?!



Per i più curiosi...



Storia di una scoperta

di Dario Menasce

La storia delle onde gravitazionali iniziò intorno al 1915, quando Albert Einstein capì che la gravità non è una forza come se la immaginava Newton, qualcosa che, agendo a distanza e in modo istantaneo, costringe le mele a cadere e la Luna e i pianeti a percorrere orbite circolari attorno al Sole. No, Einstein giunse alla conclusione che la gravità è una peculiare geometria dello spaziotempo, una sua distorsione generata dalla presenza di energia e materia. La conferma della sua teoria della gravità, chiamata teoria della relatività generale, arrivò nel 1919, ad opera di Arthur Eddington: durante un'eclisse solare, stelle lontane che si credeva trovarsi in linea con il bordo del Sole furono osservate in posizioni leggermente diverse, in accordo con la teoria di Einstein. Fu un trionfo e convinse la comunità scientifica che Einstein aveva sviluppato una teoria rivoluzionaria. In poco tempo le sue equazioni furono studiate a fondo e si scoprì che, tra le altre cose, predicevano che oggetti molto massicci in rotazione uno attorno all'altro dovessero produrre distorsioni dello spaziotempo attorno a loro, che avrebbero dovuto propagarsi alla velocità della luce in forma di onde. Un nuovo tipo di onde,

variazioni dello spazio e del tempo che avrebbero dovuto deformare i corpi che attraversavano: le “onde gravitazionali”. A seconda della direzione di provenienza, un corpo si sarebbe prima contratto lungo una direzione ed allungato lungo la direzione perpendicolare, per poi rapidamente invertire la direzione di questa distorsione, più e più volte, fino a quando l'onda non avesse completamente attraversato il corpo. Queste deformazioni avvengono su un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda. Il problema era che, facendo i calcoli, Einstein si rese conto che per produrre onde di intensità misurabile sarebbe stato necessario che le masse degli oggetti in rotazione che le avrebbero dovute generare fossero molto, molto più massicce di qualsiasi stella nota alla sua epoca. Gli scienziati si convinsero ben presto che probabilmente le onde esistevano davvero, ma pensavano che sarebbero per sempre state sotto la soglia di misurabilità, in quanto generate da oggetti troppo lenti e leggeri, come i sistemi di stelle binarie ordinarie. Ci vollero più di quarant'anni prima che qualche fisico si intestardisse a voler costruire un apparecchio per misurare queste onde. Fu Joseph Weber il primo a provarci.

Nei primi anni '60 costruì dei cilindri di alluminio di circa un metro di diametro e due di lunghezza, i primi prototipi di “antenne (o barre) risonanti”. L'idea era che se un'onda gravitazionale li avesse attraversati, la distorsione generata avrebbe prodotto un piccolo rilascio di energia che si sarebbe potuto misurare con degli opportuni sensori. Nonostante lui fosse convinto del contrario, la storia ci ha insegnato che i suoi apparecchi non avevano la sensibilità necessaria a rivelare queste onde. Dopo le barre di Weber, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) (e altri enti di ricerca nel mondo) costruirono esemplari sempre più raffinati e sensibili, chiamati AURIGA, EXPLORER e NAUTILUS. Per osservare un'onda gravitazionale fu però necessario ricorrere ad una tecnologia completamente diversa, l'interferometria ottica a laser (vd. p. 39), che permise finalmente di raggiungere la sensibilità necessaria per rivelare onde gravitazionali dalla fusione di due buchi neri, che sono circa un milione di volte meno intense di quelle che Weber avrebbe potuto sperare di osservare (un milionesimo di milionesimo di metro). Agli inizi del nuovo millennio venne dato inizio alla costruzione di due rivelatori di questo tipo: VIRGO, in Italia a Cascina (Pisa)

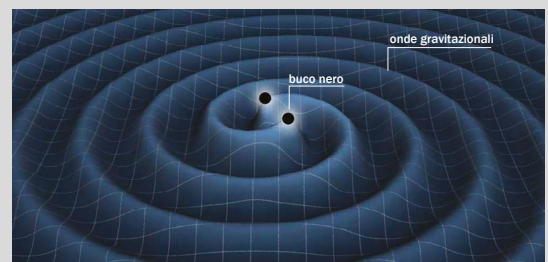
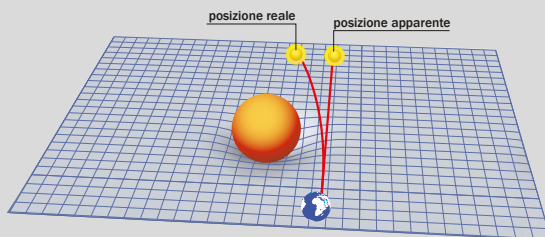
(costruito, grazie ad una brillante e rivoluzionaria idea di Adalberto Giazotto e Alain Brillet, dall'INFN e dal CNRS francese attraverso il consorzio Osservatorio Gravitazionale Europeo -EGO) e i due LIGO negli Stati Uniti d'America, a Livingston, in Louisiana, e a Hanford, nello Stato di

Washington. Il 14 settembre 2015 fu scoperta la prima onda gravitazionale (chiamata GW150914, "gravitational wave" del 14-09-15) dovuta alla fusione (o "coalescenza") di due buchi neri e che in questo fumetto è la voce narrante, Nera15. A questa, nei due anni seguenti, se ne sono

aggiunte altre undici, di cui una sola prodotta dalla coalescenza di due stelle di neutroni (Lucio17, l'altra onda gravitazionale protagonista del fumetto).

La relatività

Einstein costruì la sua monumentale opera in due passi. Prima la teoria della relatività ristretta (nel 1905), che aveva svariati conseguenze: a velocità prossime a quella della luce (che è un limite irraggiungibile e invalicabile) il tempo, rispetto ad un osservatore fermo, rallenta, fino quasi a fermarsi del tutto, lo spazio si contrae fino quasi a sparire e il concetto di simultaneità temporale diviene privo di senso. Come coronamento, tutto ciò portava all'equazione $E=mc^2$, che mostra come massa ed energia siano equivalenti. Il secondo passo fu quello di generalizzare la teoria, dopo aver osservato che gli effetti di una forza gravitazionale sono del tutto equivalenti a quelli di un'accelerazione: è la teoria della relatività generale, pubblicata nel 1915. Einstein comprese che la gravità, la misteriosa azione a distanza che costringe la Luna in orbita attorno alla Terra, è in realtà una distorsione dello spaziotempo, analoga a quella generata da un corpo che deformi il pavimento elastico su cui poggia. La sua descrizione della gravità prevedeva che un raggio di luce, seguendo questa distorsione, avrebbe dovuto curvarsi in prossimità di corpi molto massicci, come le stelle, seguendo una traiettoria non perfettamente rettilinea.



Un corpo che procedesse di moto rettilineo in questo spazio incurvato, entrando nella deformazione, dall'aspetto di un imbuto, percorrerebbe una traiettoria circolare attorno al corpo che la genera, apparendo da lontano come se questo generasse un'attrazione. È come il caso di due persone che, partendo dall'equatore, procedano verso nord su due meridiani. Essendo paralleli, i due non dovrebbero mai incontrarsi, ma in realtà si incontrano al Polo Nord. Dal loro punto di vista, dunque, è come se fra di loro abbia agito una forza attrattiva. Ma questa non esiste, è la geometria sferica che genera l'illusione di una forza. Due corpi, molto massicci, che ruotano uno attorno all'altro, quindi, generano deformazioni dello spaziotempo che si propagano, allontanandosi da essi, come onde. Quando Einstein si accorse di queste conseguenze non erano ancora noti corpi sufficientemente massicci nel cosmo per generare onde rivelabili con la tecnologia di allora, per cui suppose che le onde non si sarebbero mai potute osservare. Ipotizzò comunque che dovessero esistere e propagarsi esattamente alla velocità della luce.

L'astronomia multimessaggera

di Massimiliano Razzano

La scoperta delle onde gravitazionali ha inaugurato una nuova era nello studio dell'universo. Finora ciò che sapevamo del cosmo era basato principalmente sull'osservazione della radiazione elettromagnetica, ad esempio luce visibile e raggi gamma (che nella meccanica quantistica si possono descrivere come particelle, dette "fotoni"). Le onde gravitazionali rappresentano ora un nuovo importante "messenger" cosmico, che insieme alla luce e ai neutrini ci aiuterà a studiare più a fondo le sorgenti astrofisiche.

Se un evento come Nera15, prodotto dalla fusione (coalescenza) di due buchi neri, non emette luce, nel caso di Licio17 è stato successivamente possibile osservare un'emissione luminosa all'onda gravitazionale e proveniente dalla stessa porzione di cielo, rendendo la combinazione del segnale gravitazionale e luminoso il primo evento "multimessaggero" mai osservato.

I diversi tipi di radiazione elettromagnetica, come le onde radio, la luce visibile o i raggi gamma, ci aiutano a capire i fenomeni legati alla presenza di campi elettrici e magnetici, mentre le onde gravitazionali ci permettono di determinare la distribuzione di massa

e il campo gravitazionale prodotto dai corpi astrofisici. Combinando lo studio di questi segnali potremo quindi compiere osservazioni di eventi generati contemporaneamente da fenomeni differenti, che ci permetteranno di avere informazioni complementari tra loro e quindi fondamentali per capire le sorgenti astrofisiche di questi messaggeri. Fra le possibili sorgenti di onde gravitazionali ci sono le supernovae, violente esplosioni che avvengono al termine dell'esistenza delle stelle di grande massa, e che finora sono state osservate solo grazie alla luce da loro emessa. Anche la coalescenza di sistemi binari formati da due stelle di neutroni sono sorgenti multimessaggera, come dimostrato dall'evento GW170817 di Licio17, e ci si aspetta anche che i sistemi formati da un buco nero e una stella di neutroni siano capaci di produrre luce e onde gravitazionali (vd. p. 37). Per catturare l'emissione di luce associata alle onde gravitazionali è necessario che la comunità astronomica, di cui nel fumetto fa parte Andrea, compia osservazioni della regione di cielo da cui provengono i segnali rivelati da LIGO e VIRGO con il più breve ritardo possibile, perché i lampi gamma diminuiscono di luminosità

in una manciata di secondi. Queste osservazioni, dette di "follow-up elettromagnetico", sono possibili grazie a una serie di accordi fra le collaborazioni VIRGO, LIGO e la comunità astronomica, che garantiscono uno scambio tempestivo delle informazioni relative ai segnali gravitazionali osservati. Nel caso di Licio17, circa 70 telescopi a terra e nello spazio hanno partecipato alle osservazioni, che hanno condotto alla scoperta di un'emissione luminosa transiente nella galassia NGC 4993 a circa 120 milioni di anni luce da noi. Ma Licio17 ha lasciato aperte molte domande. Non conosciamo ad esempio la natura dell'oggetto che si è formato dalla coalescenza: una stella di neutroni pesante o un buco nero leggero? Per rispondere a questa e altre domande saranno necessarie altre osservazioni di tipo multimessaggero che, grazie alla sensibilità di LIGO e VIRGO, saranno sempre più numerose.

Le sorgenti delle onde gravitazionali

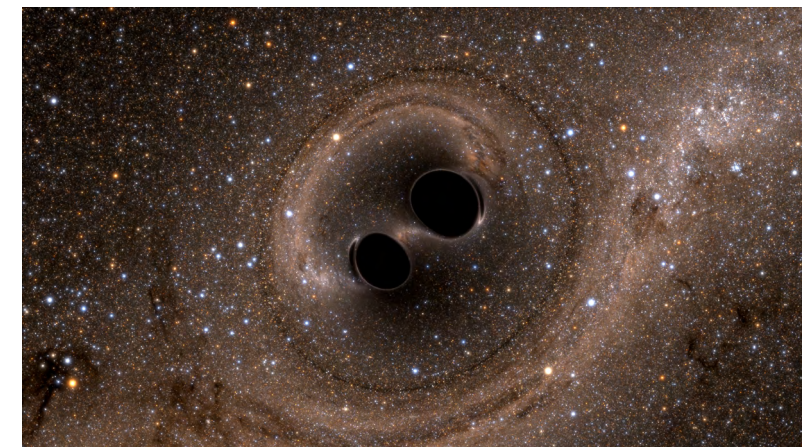
di Pia Astone

Nera15 è stata la prima onda gravitazionale che abbia prodotto un effetto misurabile dagli interferometri terrestri. L'osservazione di fenomeni di coalescenza, ossia la parte finale (da frazioni di secondo a minuti) dello spiraleggiamento e della conseguente fusione di due oggetti estremamente "compatti", a causa della loro intensità e frequenza, è più probabile rispetto all'osservazione di altri fenomeni.

Ma il progressivo miglioramento della sensibilità dei rivelatori e delle tecniche di analisi porterà all'osservazione di onde gravitazionali anche da altre tipologie di sorgenti, ovvero di eventi astrofisici meno "intensi" ma più frequenti.

Vediamo innanzitutto cosa sono gli oggetti compatti da cui hanno avuto origine Nera15 e Lucio17, che rispettivamente sono "nati" dalla coalescenza di due buchi neri e di due stelle di neutroni.

Una stella di neutroni rappresenta uno dei possibili stadi finali nella vita di una stella di massa superiore a circa 8 volte quella del nostro Sole: la stella, terminato il combustibile nucleare, esplode e collassa sotto l'azione della sua stessa gravità, fino a raggiungere uno stato in cui gli atomi sono totalmente disgregati. La densità raggiunta è quella che si



Simulazione della coalescenza di due buchi neri, delle stesse caratteristiche di Nera15, realizzata al computer risolvendo le equazioni della relatività generale. I due buchi neri piegano in modo estremo lo spazio e il tempo e dunque la posizione delle stelle intorno appare distorta (la luce emessa viene curvata).

avrebbe comprimendo tutta la massa del nostro Sole in un raggio di 10 km: un cucchiaino di polvere di una stella di neutroni avrebbe la stessa massa dell' Everest!

Le stelle di neutroni sono oggetti che raggiungono elevate frequenze di rotazione su sé stesse, anche fino a mille volte al secondo. Per sfuggire all'attrazione gravitazionale dalla loro superficie servirebbe una velocità (la "velocità di fuga") pari a circa il 60% della velocità della luce, cioè circa 180.000 km/s. Se la massa residua del collasso di una stella è superiore a 3 masse solari, si forma invece un buco nero. La velocità di fuga da un buco nero supera quella della luce e nulla può quindi più sfuggire dalla sua superficie: è per questo

che Nera15, rispetto a Lucio17, non è accompagnata anche da fotoni. Fu Karl Schwarzschild, nel 1916, ad ipotizzare per primo l'esistenza dei buchi neri.

Tra le undici coalescenze osservate nei primi due "run" scientifici (da settembre 2015 a fine agosto 2017) manca ancora quella prodotta da un buco nero e una stella di neutroni, ossia un misto tra i fenomeni che hanno dato origine a Lucio17 e Nera15, che, data l'estrema diversità dei due oggetti, risulta più raro e maggiormente complesso da rivelare. Fra le sorgenti non ancora osservate, ma la cui rivelazione sarebbe possibile con gli strumenti terrestri attuali, vi è anche l'esplosione di una supernova, l'ultimo atto di vita di una stella di

massa almeno 8 volte quella del nostro Sole, che lascia dietro di sé una stella di neutroni o un buco nero. Si tratta di eventi spettacolari, ma molto rari. Alla attuale sensibilità dei rivelatori potremmo vedere onde gravitazionali da eventi di questo tipo solo se dovessero avvenire nella nostra galassia. Insieme al segnale gravitazionale, ci si aspetta l'emissione di neutrini e di lampi di raggi gamma, di durata superiore a quella che avevano i lampi di raggi gamma che hanno accompagnato Lucio17. Nel 1054 fu osservata una esplosione di questo tipo nella Nebulosa del Granchio, a 6500 anni luce da noi. Se oggi si ripettesse un fenomeno analogo, se ne potrebbero osservare anche le onde gravitazionali. Negli anni '60 la Nebulosa del Granchio tornò a far parlare di sé, quando fu scoperta al suo interno una pulsar. La pulsar è una stella di neutroni simile alle stelle compatte che hanno prodotto Lucio17, ma che si trova in condizioni molto diverse. Una pulsar, ruotando su se stessa a ritmi così vorticosi, emette violenti getti luminosi dai poli, e, ruotando come una trottola, questi getti divengono visibili dalla Terra a intervalli regolari, come se si trattasse di un faro. Emette pertanto onde, elettromagnetiche e gravitazionali, ma su tempi lunghissimi, anche per milioni di anni. Riuscire a rivelare onde gravitazionali provenienti dalla pulsar nella Nebulosa del Granchio è uno degli scopi dei rivelatori gravitazionali come VIRGO e LIGO (e delle loro future evoluzioni).

Il segnale gravitazionale emesso da

una pulsar isolata è molto più debole di quello prodotto da fenomeni simili a quello da cui ha avuto origine Lucio17 (una coppia di stelle di neutroni), ma, a differenza di questi e anche a differenza di quelli di un'esplosione di una supernova, è continuo nel tempo. Poterlo osservare con le prossime misurazioni implica che lo si continuerebbe a vedere per molti anni, anche nelle successive campagne di misura. Questo consentirebbe una sempre migliore precisione e confidenza nello studio del fenomeno e della natura della sorgente stessa. Ma questa pulsar non è sola nel suo genere! Nella Galassia esiste circa un miliardo di sorgenti simili, ossia stelle di neutroni rapidamente rotanti e che ci si aspetta emettano onde gravitazionali in modo continuo. Fra queste, solo alcune, circa 2000, sono state osservate dai telescopi grazie alla radiazione elettromagnetica che emettono. Molte di queste stelle di neutroni vivono in coppia, come quelle che hanno generato

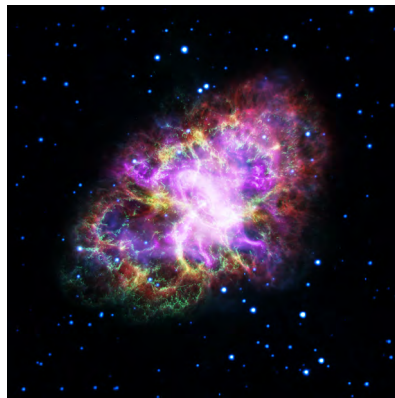


Immagine della Nebulosa del Granchio, ottenuta combinando i dati di cinque telescopi che insieme coprono una larga parte dello spettro elettromagnetico. Al centro una pulsar, una possibile sorgente di onde gravitazionali.

Lucio17, ma sono ancora lontanissime dal momento dello scontro finale, che potrebbe avvenire anche fra centinaia di milioni di anni. Lo studio dell'emissione gravitazionale aiuterà anche a capire meglio come sia distribuita questa popolazione di stelle di neutroni e perché alcune le osserviamo come pulsar ed altre no, oltre a darci informazioni sulla loro composizione.

L'insieme di queste molteplici sorgenti astrofisiche, anche se di natura diversa e singolarmente molto deboli, genera un "rumore di fondo" di onde gravitazionali, un "brusio" cosmico. Avremo bisogno di una maggiore sensibilità di quella attuale per riuscire a misurarlo.

Esiste anche un "rumore di fondo" di natura cosmologica, dovuto ad un'emissione gravitazionale avvenuta nei primissimi istanti di vita del nostro universo. Per riuscire a fare questo tipo di misura bisognerà attendere l'era di rivelatori più avanzati, come ad esempio il rivelatore di terza generazione Einstein Telescope (ET) o l'interferometro spaziale LISA, perché si tratta di segnali davvero deboli e che cadono in una regione di frequenza non accessibile agli attuali rivelatori.

Oltre a queste sorgenti, ci sono altri fenomeni possibili (la caduta di una stella in un buco nero, le stringhe cosmiche) e tante possibilità offerte da ciò che ancora oggi non conosciamo e stiamo cercando di scoprire.

Gli interferometri

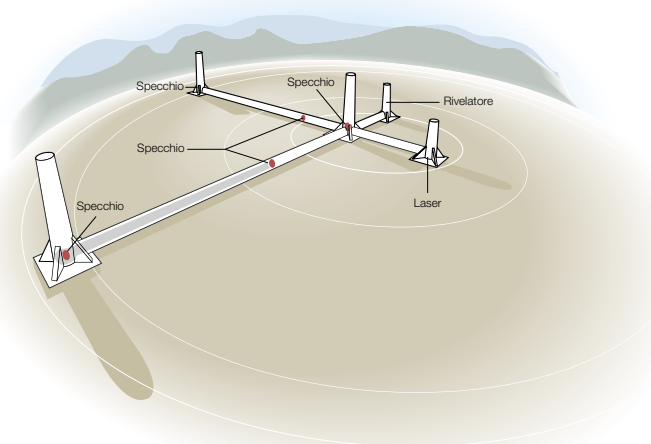
di Pia Astone e Piero Rapagnani

Lo schema base di un rivelatore gravitazionale è quello di un interferometro di Michelson: un raggio di luce monocromatico viene diviso, mediante uno specchio semiriflettente (“divisore di fascio” o beam splitter), in due raggi uguali che vengono fatti viaggiare lungo i bracci dell’interferometro, posti perpendicolarmente tra di loro. All’ingresso e alla fine di ciascun braccio ci sono due specchi che costituiscono una cavità ottica, all’interno della quale la luce rimane intrappolata per un tempo molto più grande di quello che impiega il raggio per andare da uno specchio all’altro una volta sola. In questo modo, qualunque effetto di

allungamento dei bracci, come ad esempio quello dovuto ad un’onda gravitazionale, si accumula e viene amplificato. Per sfruttare al meglio questo intrappolamento della luce nella cavità ottica, gli specchi finali devono avere una riflettività la più elevata possibile (in VIRGO solo un milionesimo della luce incidente non viene riflessa) e le irregolarità della superficie degli specchi devono essere molto ridotte (si parla di frazioni di nanometro, ossia minori di 10^{-9} m). Dopo aver viaggiato lungo i bracci, che in VIRGO sono lunghi 3 km, i due fasci tornano allo specchio semiriflettente, dove si ricombinano, interferendo tra di loro. Se le lunghezze dei due bracci dell’interferometro sono rimaste

uguali durante tutto il tempo di permanenza della luce al loro interno, i due fasci che si ricombinano nel beam splitter sono anch’essi rimasti uguali e la loro differenza (interferenza distruttiva) non darà luce in uscita: la sottrazione dei due fasci tra loro sarà zero. Se però uno dei bracci si è allungato (o accorciato) rispetto all’altro, come avviene ad esempio per il passaggio di un’onda gravitazionale, i due fasci non saranno più esattamente uguali e la loro sottrazione non darà esattamente zero (le due onde saranno lievemente sfasate tra loro). In uscita dell’interferometro si vedrà quindi un po’ di luce (come visualizzato a p. 13 quando Marie dice “Ecco il segnale!”), che verrà raccolta da un opportuno rivelatore, il “fotodiodo”, che converte la luce in un segnale elettrico.

Molti fenomeni, dovuti all’ambiente o allo strumento stesso, causano cambiamenti della lunghezza relativa nei due bracci dell’interferometro e, ovviamente, disturbano l’osservazione fino a poter rendere impossibile la misura del segnale. Questi fenomeni sono quello che chiamiamo rumore. Per esempio il “glitch”, osservato da Marie e Luca in questo fumetto a p. 22, è uno di questi. Per ridurre al minimo gli effetti del rumore



Schema base dell’interferometro VIRGO.

La luce prodotta dal laser viene dapprima divisa dallo specchio centrale semiriflettente (il divisore di fascio), viaggia poi nelle due cavità delimitate ciascuna da due specchi e viene infine raccolta dal rivelatore.

Si notano alcune delle torri, al cui interno gli specchi sono sospesi, ciascuno tramite un superattenuatore.

sulla misura, bisogna utilizzare vari accorgimenti e complicare lo schema di base dell'interferometro. Ne è un esempio il "rumore sismico" (la superficie della Terra infatti è soggetta a continue vibrazioni), il cui effetto sullo spostamento misurato dallo strumento è ben superiore a quello dovuto al passaggio di un'onda gravitazionale. Per questo, tutti gli elementi ottici di VIRGO sono isolati dalle vibrazioni del terreno attraverso un complesso sistema di attenuazione meccanica, il "superattenuatore", costituito da un sistema di pendoli, in grado di ridurre di un fattore di 10^{12} (mille miliardi di volte) l'effetto del rumore sismico (l'idea geniale di Adalberto Giazotto). Un'altra sorgente di rumore molto importante e difficile da abbattere è data dall'agitazione termica delle molecole che compongono gli specchi ed i corpi in contatto con essi, compresi i cavi di sospensione degli specchi stessi. Questo effetto, chiamato "rumore termico", viene ridotto con l'uso di materiali a bassa dissipazione meccanica, specchi i più pesanti possibile (quelli attuali pesano 42 kg, ma in un futuro prossimo si arriverà a 100 kg e poi anche a 200 kg) e sospensioni monolitiche, sottili fili di vetro che sono incollati allo specchio con una procedura speciale che li rende un corpo unico con lo specchio stesso. Infine, è presente anche il "rumore shot", dovuto alla natura corpuscolare della luce. Per attenuarlo si utilizzano varie tecniche, fra le quali l'impiego di laser più potenti. Ciascuno di questi rumori interviene in regioni diverse della curva di sensibilità del rivelatore, ossia

a diverse frequenze (se pur con alcune sovrapposizioni).

Per ridurre gli effetti di dispersione della luce dovuti all'incidenza del fascio sulle molecole dell'aria, effetti che, se pur minimi, renderebbero la misura impossibile, tutta l'ottica del rivelatore si trova in un vuoto molto spinto: 7000 m³ sono posti a circa 10^{-12} atm (cioè 1 su mille miliardesimi della pressione atmosferica). Nonostante gli enormi sforzi e gli importanti successi nella riduzione dei rumori dell'apparato di misura e dell'effetto dei disturbi locali, solo segnali gravitazionali che giungano in quasi completa contemporaneità tra loro a due rivelatori distanti di migliaia di chilometri garantiscono che ciò che si osserva non sia causato da qualche disturbo locale, ma sia il risultato di una stessa onda che li abbia attraversati entrambi, propagandosi alla velocità della luce. Per questo motivo si parla di una "rete di rivelatori gravitazionali", che formano un unico apparato e un'unica

comunità scientifica, che lavora con costante e continuo scambio di dati e di informazioni, nonostante gli enti finanziatori appartengano a nazioni diverse. Attualmente la rete di rivelatori terrestri è formata dal rivelatore VIRGO, a Cascina, in Italia, e dai due rivelatori LIGO negli Stati Uniti. Un quarto rivelatore, GEO in Germania, ha una sensibilità inferiore e viene utilizzato essenzialmente per lo sviluppo di nuove tecniche di riduzione del rumore. A breve comunque si unirà alla rete il rivelatore Kagra, in Giappone, e, nei prossimi anni, IndIGO, in India. Progetti per rivelatori terrestri con sensibilità ulteriormente migliorate e probabilmente operativi dopo il 2030, sono l'Einstein Telescope (ET), un progetto europeo, e Cosmic Explorer, un progetto americano. Nello spazio e sempre intorno al 2030, il rivelatore gravitazionale LISA potrà fare misure complementari a quelle svolte dai rivelatori terrestri.



La collaborazione VIRGO, durante una pausa di uno degli incontri ufficiali, chiamati "VIRGO week", una delle occasioni in cui gli scienziati si riuniscono di persona per riportare risultati e programmare le attività. A questi incontri, due volte l'anno si aggiungono delle riunioni con la collaborazione americana LIGO. Come anche numerosissime teleconferenze, dove, su base tipicamente settimanale, si affrontano tutte le tematiche inerenti il progetto.



Nel 2016 viene annunciata la scoperta delle onde gravitazionali. Un anno dopo, i fisici registrano il primo segnale “multimessaggero” della storia della scienza, aprendo la strada ad una nuova branca della fisica: l’astronomia multimessaggera.

È proprio la prima onda gravitazionale rivelata, chiamata nel fumetto Nera15, a raccontarci la storia di questa scoperta, che si intreccia con le vicende personali di Luca, Andrea e Marie, tre laureandi all’Università di Pisa che diventeranno dottorandi nel progetto VIRGO, il rivelatore di onde gravitazionali che si trova a Cascina, in provincia di Pisa, costruito dall’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dal CNRS francese.

Però, come scopriranno i tre ragazzi, i cataclismi non sono solo quelli di natura cosmica!