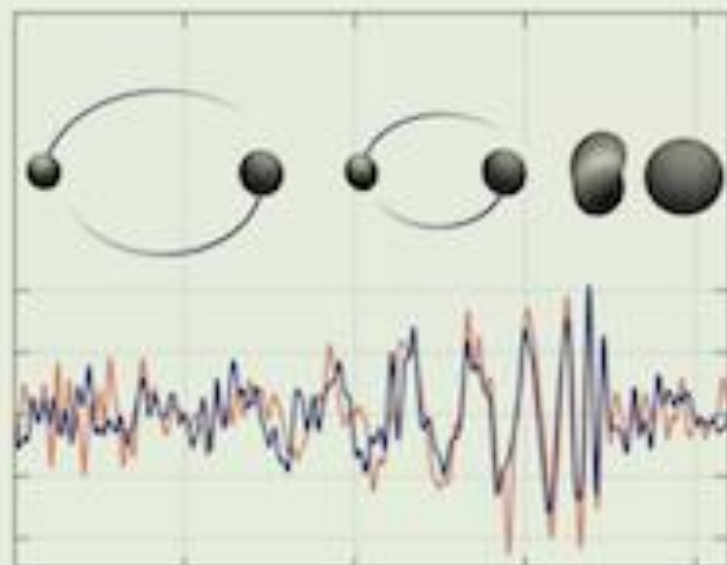


PHYSICAL REVIEW LETTERS[®]

Member Subscription Only
Library or other institutional use prohibited (see page 40)

Articles published week ending

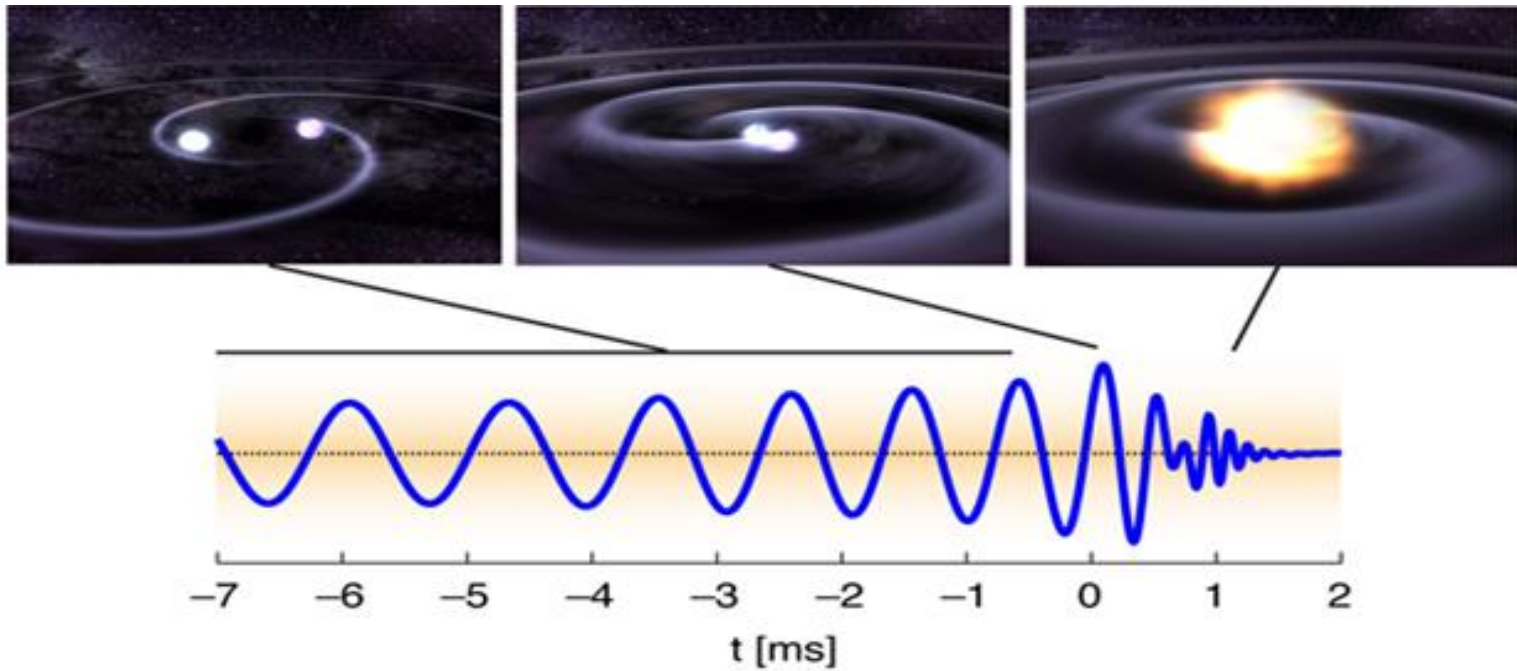
12 FEBRUARY 2016



Published by
American Physical Society[®]



Volume 116, Number 6



GLI INIZI DI UNA STORIA ORIGINATA
DA UNA TESI DI LAUREA NEL 1985
PROSEGUITA POI NEL 1986 E CON
INIZIO UFFICIALE NEL 1987

Le attività di ricerca svolte presso la sezione INFN di Napoli, inizio nel 1987 con il progetto IRAS (Interferometro con Riduzione Attiva del Sisma), una collaborazione, coordinata da Adalberto Giazotto, fra i gruppi INFN e Università di Napoli e Pisa.



studio di fattibilità di un interferometro con specchi sospesi pendolarmente il gruppo di Napoli su studio, realizzazione e caratterizzazione dei sistemi di controllo digitali da utilizzare per mantenere l'interferometro sul proprio punto di lavoro.



I membri del gruppo di Napoli, in questo periodo pioneristico, sono stati, tra gli altri, Salvatore Solimeno, Fabrizio Barone, Innocenzo Pinto e Luciano Di Fiore.

prima proposta di “Antenna
interferometrica a grande base per
la ricerca di Onde Gravitazionali”
1987



gruppi italiani di Pisa, Napoli, Salerno, Frascati (CNR)
e il gruppo francese, guidato da Alain Brillet, del CNRS a
Parigi. Negli anni successivi adesione di Guido Russo e di
Enrico Calloni proveniente dal gruppo di Pisa.



il gruppo di Napoli si è anche occupato dello studio
dell’emissione di onde gravitazionali da sorgenti astrofisiche
,di studio di cavità ottiche e di interferometria e di
implementazione di controlli digitali

Proposta di

Antenna Interferometrica a grande base per la
ricerca di Onde Gravitazionali

Laboratori INFN Pisa e Università' di Pisa:

Carlo BRADASCHIA
Raffaele DEL FABBRO
Angela DI VIRGILIO
Adalberto GIAZZOTTO
Hans KAUTZKY
Vinicio MONTELATICI
Diego PASSUELLO

Università' di Napoli

Fabrizio BARONE
Riccardo BRUZZESE
Antonello CUTOLO
Luciano DI FIORE (INFN)
Massimo LANDINI
Maurizio LONGO
Leopoldo MILANO
Salvatore SOLIMENO

CNR Frascati

Franco BORDONI
Franco FULIGNI
Valerio IAFOLLA

Università' di Salerno

Innocenzo PINTO

Gravitation et cosmologie Relativiste (Orsay-Paris)
CNRS-Univ. Pierre et Marie Curie

J.L. BOULANGER
Alain BRILLET
Oliver CREGUT
C. Nary MAN
Alain MARRAUD
David SHOEMAKER
Philippe TOURENC
Jean-Yves VINET



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA
DIPARTIMENTO DI FISICA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di Pisa

Nel 1989, proposta di esperimento: “The Virgo project”, che vedeva coinvolti, anche altri gruppi di ricerca internazionali, in particolare: L’università di Parigi 6, l’osservatorio di Meudon, l’università dell’Illinois e l’università di San Paolo.



1992, stesura del “Final Conceptual Design” dell’interferometro Virgo. Alla collaborazione internazionale aderivano altri gruppi, sia italiani che francesi, in particolare l’INFN di Perugia, il LAPP di Annecy e l’IPN di Lione e successivamente anche le sezioni di Firenze, Roma 1, Roma 2, Genova e Padova-Trento).

In questo contesto il gruppo Napoletano, con la partecipazione di Aniello Grado, ha realizzato un prototipo di interferometro sospeso pendolarmente con bracci di 3 metri. **L'interferometro, che è stato il primo al mondo ad essere operato con controlli digitali, ha aperto la strada alla tecnologia che è stata poi adottata per tutti i rivelatori interferometrici a larga base.** Il gruppo, a cui si era aggiunto Fabio Garufi, ha inoltre assunto la responsabilità del monitoraggio dei parametri ambientali e dell'archiviazione on-line dei dati dell'antenna Virgo.

Oltre alla ricerca con rivelatori terrestri, il gruppo di Napoli, a partire dal 2003, è impegnato nello sviluppo del rivelatore spaziale di onde gravitazionali LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Quest'attività, in collaborazione con le sezioni di Trento, Firenze e Roma 2, è stata svolta inizialmente nell'ambito della sigla LISA-R&D divenuta successivamente LISA-PF. A questa attività hanno partecipato Luciano Di Fiore, Fausto Acernese, Enrico Calloni, Rosario De Rosa, Aniello Grado e Leopoldo Milano.

VIRGO

Proposal for the construction of a large interferometric detector of Gravitational waves

INFN-Pisa and Università di Pisa

C. Bradaschia
R. Del Fabbro
A. Di Virgilio
H. Kautzky
A. Giazotto
V. Montelatici
D. Passuello

INFN-Napoli and Dipt. Scienze Fisiche, Università di Napoli

F. Barone
L. Di Fiore
L. Milano
G. Russo
S. Solimeno

Dipt. di Elettronica, Università di Salerno e di Napoli

M. Capozzi
M. Longo
M. Lops
I. Pinto
G. Rotoli

INFN-Lab. Nazionale Frascati

F. Fuligni
V. Iafolla
G. Natale

Univ. of Illinois at Urbana

L.E. Holloway

CNRS and Universités Paris VI and XI (GROG-Orsay)

A. Brillet
J. Cachenaud
O. Crégut
J.C. Lucenay
C.N. Man
A. Marraud
M. Pham-Tu
D. Shoemaker

CNRS-LOA (GROG -Palaiseau)

P. Hello
J.Y. Vinet

Université Paris VI and CNRS (GROG-PARIS)

J.M. Aguirregabiria
(+ Universidad del Pais Vasco)
L. Bel
N. Deruelle
J.P. Duruisseau
G. LeDenmat
Ph. Tournenc

Paris Observatory and CNRS (GROG.MEUDON)

S. Bonazzola
T. Damour
E. Gourgoulhon
J.A. Marck

May 1989

Revised version January 1990

1992 PREMIO NOBEL A Hulse a Taylor

Accelerazione approvazione antenne GW
interferometriche , nel giugno del 1994
approvazione definitiva e nel 1997 inizio
costruzione



In queste attività, andate avanti per circa 30 anni, il gruppo ha visto la partecipazione di un gran numero di dottorandi, assegnisti, borsisti e collaboratori a tempo determinato che hanno poi intrapreso altre strade, tra cui

Alessandra Rocco ,Antonio Eleuteri, Ketino Quipiani, Michele De Rosa, Monica Varvella, Iolanda Ricciardi, Saverio Avino, , Salvatore Grasso ,Lara Giordano, Silvio Pardi, Adele La Rana, Alessio Tierno, Simona Mosca, Gianluca Persichetti, Maria Parisi, Luca Antonio Forte, Maria Felicia De Laurentis, Rocco Paolo Croce, Giuliana Russano, Lucia Trozzo, Annalisa Allocca.

A tutti loro, e a quelli che potremmo aver dimenticato, va il ringraziamento per il lavoro svolto con entusiasmo e dedizione che ha sicuramente contribuito in maniera determinante ai risultati conseguiti

Per esercizio ho fatto una piccola statistica sui tesisti e dottorandi che hanno collaborato col gruppo e il risultato si commenta da sé

Esterno Dipartimento e Sezione

Alessandra Rocco: ricercatrice CNR-INO

Saverio Avino: ricercatore CNR-INO

Iolanda Ricciardi: ricercatrice INO

Simona Mosca: ricercatrice INO (tempo determinato)

Maria Parisi: Assegnista ricerca INO

Antonio Perreca: Caltech RTD (LIGO)

Antonio Eleuteri: Clin. Engin., Royal Liverpool Hospital, UK.

Daniela Pascucci: PhD student, Glasgow (LIGO)

Valeria Sequino: PhD student, Tor Vergata

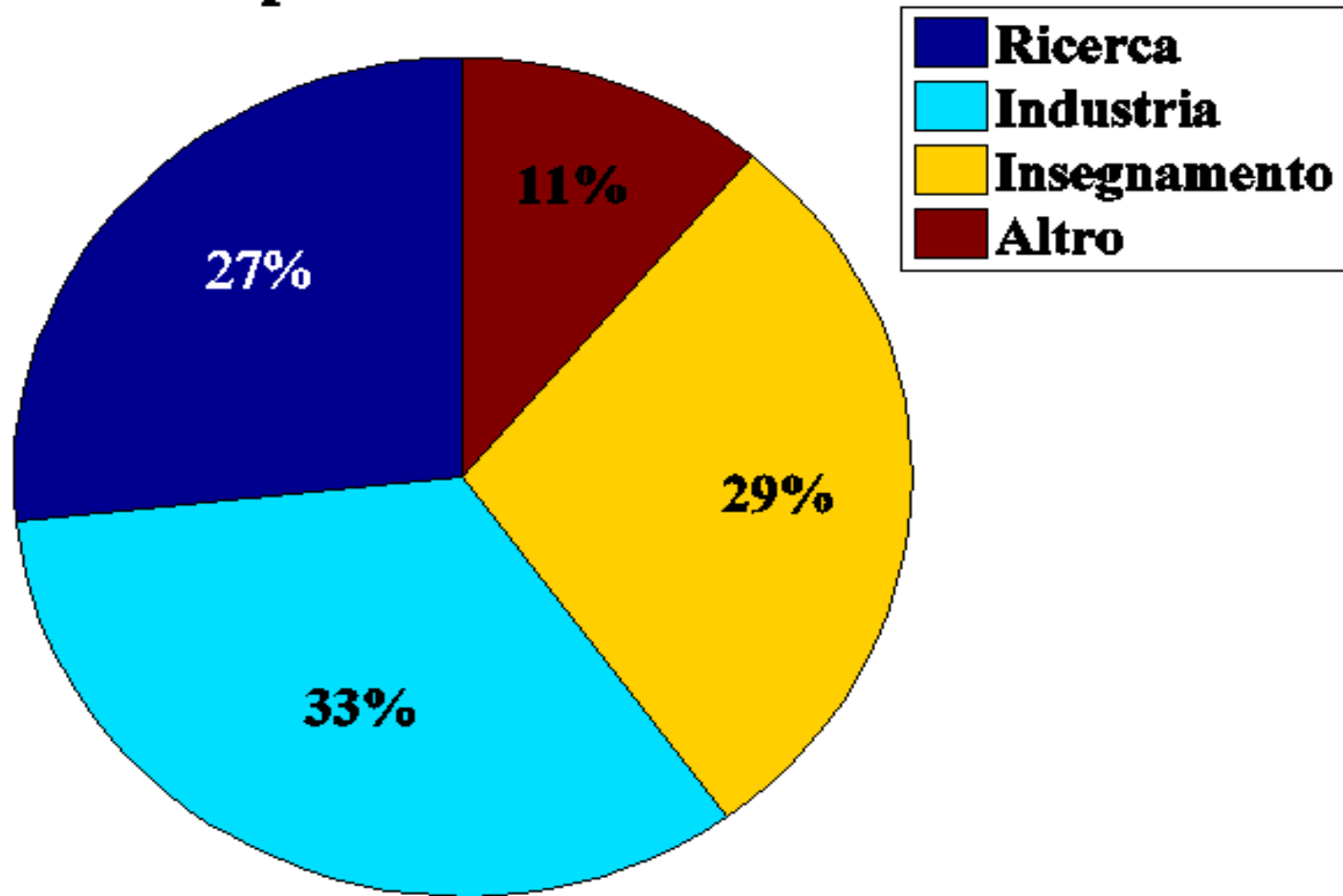
Luca Forte: Ricercatore t.d. St. Louis

Adele La Rana: divulgazione scientifica con fondazione di Amaldi

Annalisa Allocca - dottorato a Siena e ora Post doc a Pisa

Lucia Trozzo dottranda all'università di Siena in Virgo

Un pò di statistica



Dimensione del campione : 45 Laureati

Competenze: Ottica, Laser, Controlli digitali, Sorgenti astrofisiche di GW Programmazione, Analisi Dati



Gruppo LISA + Lisa & Virgo Bosses



Fidecaro

Vitale

Ricci



Attuale composizione del gruppo Virgo della Sezione INFN di Napoli

Coordinatore: **E. Calloni** (Università di Napoli "Federico II")

F. Acernese (Università di Salerno)

F. Barone (Università di Salerno)

M. De Laurentis (Università di Napoli "Federico II")

R. De Rosa (Università di Napoli "Federico II")

L. Di Fiore (INFN - Napoli)

T. Di Girolamo (Università di Napoli "Federico II")

F. Garufi (Università di Napoli "Federico II")

A. Grado (OAC-INAF)

L. Milano (Università di Napoli "Federico II")

R. Romano (Università di Salerno)

SINTESI: Il gruppo di Napoli è uno dei fondatori di Virgo. E' attualmente coinvolto nel commissioning di advanced Virgo, nel monitoraggio ambientale, nei controlli locali, in analisi dati e R&D su luce squeezed. E' coinvolto anche in LISA Pathfinder e nei test a Napoli con un pendolo di torsione per la caratterizzazione in laboratorio del moto geodetico di una massa sospesa

Grazie per l'attenzione ed ora passo la parola a Enrico Calloni

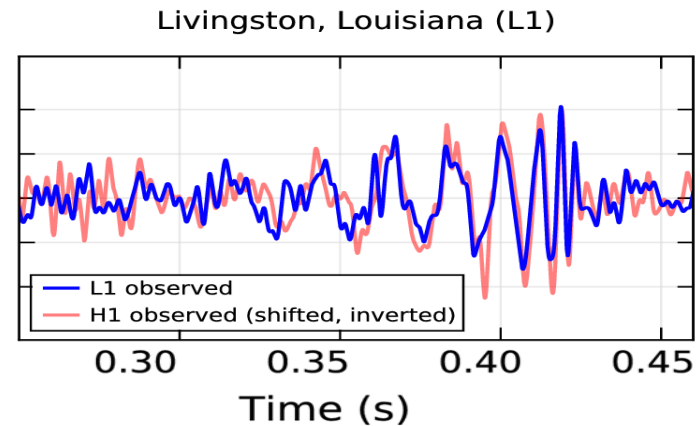
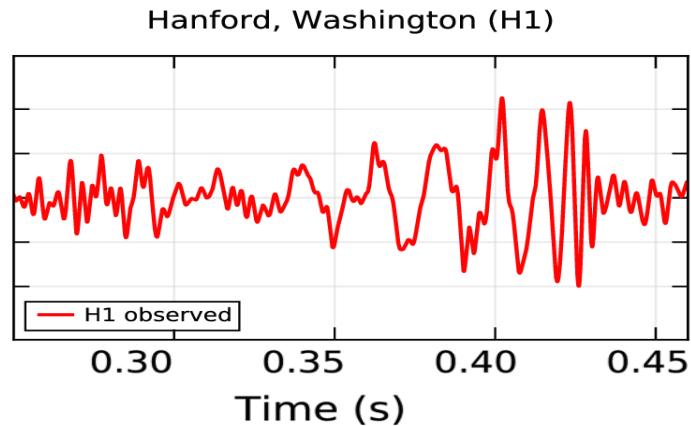
Che ci parlerà della tanto attesa

prima rivelazione *diretta* di onde gravitazionali

EXTRASLIDE

Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

LIGO Scientific Collaboration – VIRGO Collaboration



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration

Il 14 settembre 2015, alle 09:50:45 UTC i due rivelatori del Laser Interferometer Gravitational Observatory (LIGO) hanno rivelato contemporaneamente un segnale di onde gravitazionali.

Il segnale, che cresce in frequenza da 35 a 250 Hz con un'ampiezza adimensionale di picco di 1.0×10^{-21} corrisponde alla forma d'onda prevista dalla relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri.

Il segnale è stato rivelato con un SNR di 24 e un false alarm rate di circa 1 evento su 200000 anni corrispondente ad una significatività maggiore di **5.1σ**

La sorgente si trova ad una distanza stimata di 410 Mpc (redshift 0.09)

Le masse dei due buchi neri sono stimate in 36 e 29 Masse solari e quella del BH finale in 62 Masse solari.

Si tratta in assoluto della prima osservazione diretta di Onde Gravitazionali

La collaborazione di Virgo e LIGO

LIGO (USA) 2 interferometri della lunghezza di 4 km

- 2002-2010 presa dati scientifica con 6 run di osservazione
- 2011-2015 fase di upgrade ad Advanced-LIGO,
- settembre 2015-gennaio 2016 primo run di osservazione (O1)

Virgo è nato come un progetto Italo-Francese (cui hanno aderito in seguito Olanda, Polonia e Ungheria) che parte con i primi studi pionieristici nel 1988

- 1994 finanziato da INFN e CNRS Francese
- 2007 fine costruzione e messa a punto a Cascina di un'antenna interferometrica della lunghezza di 3 km
- 2007-2011 presa dati scientifica con 4 run di osservazione,
- dal 2012 in fase di upgrade tutt'ora in corso per la realizzazione di Advanced Virgo.
- 2016 entro fine anno il rivelatore rientrerà in operazione per iniziare la presa dati insieme al prossimo run scientifico di LIGO

dal 2007 Virgo e LIGO sono legati da un accordo di collaborazione che prevede lo scambio dei dati raccolti dai diversi rivelatori e una politica di analisi e pubblicazione comune dei risultati (LVC collaboration)

La collaborazione include:

- lo scambio di informazioni su R&D per le tecniche di rivelazione
- lo sviluppo ed utilizzo congiunto delle pipeline di analisi dati



Hanford (Washington)

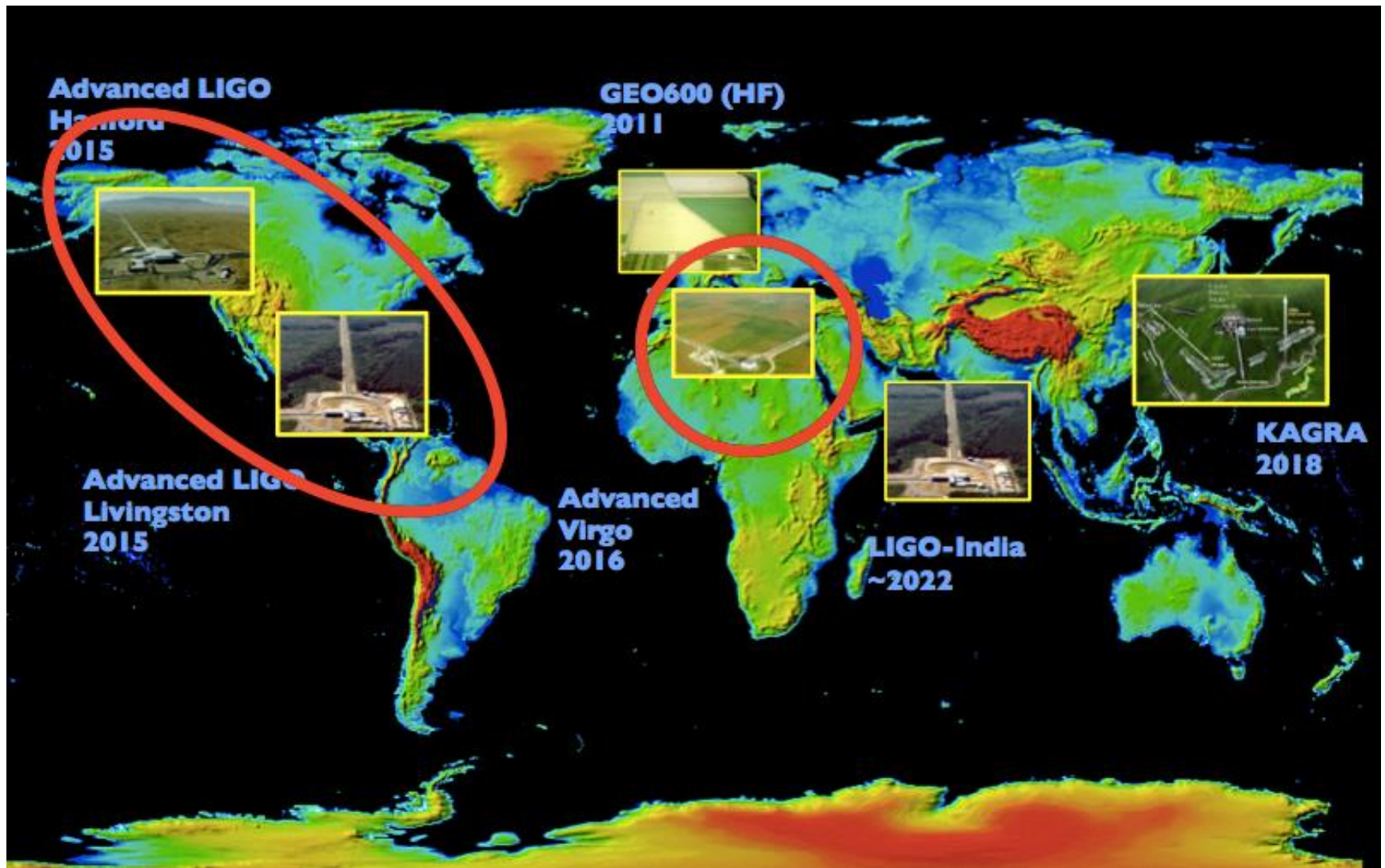


Livingstone (Louisiana)



Virgo (Cascina)

il network internazionale di rivelatori



Contributo della sezione INFN e Dipartimento di Fisica di Napoli alla ricerca delle Onde Gravitazionali

La sezione INFN di Napoli è coinvolta nella ricerca delle onde gravitazionali fin dalla metà degli anni 80, su iniziativa del Prof. Leopoldo Milano, con il progetto IRAS (Interferometro con Riduzione Attiva del Sisma), antesignano di Virgo.

Il gruppo di ricerca della nostra Sezione è stato tra i firmatari nel 1987 della prima proposta di esperimento che ha portato alla nascita della collaborazione italo-francese Virgo

Proposta di

Antenna interferometrica a grande base per la
ricerca di Onde Gravitazionali

Laboratori INFN Pisa e Universita' di Pisa:

Carlo BRADASCHIA
Raffaele DEL FABBRO
Angela DI VIRGILIO
Adalberto GIAZZOTTO
Hans KAUTZKY
Vinicio MONTELATICI
Diego PASSUELLO

Universita' di Napoli

Fabrizio BARONE
Riccardo BRUZZESE
Antonello CUTOLO
Luciano DI FIORE (INFN)
Massimo LANDINI
Maurizio LONGO
Leopoldo MILANO
Salvatore SOLIMENO

CNR Frascati

Franco BORDONI
Franco FULIGNI
Valerio IAFOLLA

Universita' di Salerno

Innocenzo PINTO

Gravitation et cosmologie Relativiste (Orsay-Paris)
CNRS-Univ. Pierre et Marie Curie

J.L. BOULANGER
Alain BRILLET
Oliver CREGUT
C. Nary MAN
Alain MARRAUD
DavidSHOEMAKER
Philippe TOURENC
Jean-Yves VINET



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PISA

DIPARTIMENTO DI FISICA



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Sezione di Pisa

Contributo della sezione INFN e Dipartimento di Fisica di Napoli alla ricerca delle Onde Gravitazionali

L'attività è continuata negli anni con la partecipazioni a tutte le fasi di R&D e successivamente a quelle di costruzione, messa a punto, operazione e analisi dati dell'antenna Virgo

Il gruppo è ora coinvolto nella fase di upgrade ad Advanced Virgo

Tra l'altro ci siamo occupati negli anni di:

- Environmental monitoring,
- Electronic and software coordination
- Controllo locale degli specchi sospesi
- Allineamento automatico delle cavità ottiche
- Analisi dati di segnali da binarie coalescenti e stocastici
- Coordinamento del commissioning di Virgo.

Contributo della sezione INFN e Dipartimento di Fisica di Napoli alla ricerca delle Onde Gravitazionali

Il gruppo è ora coinvolto nella fase di upgrade ad Advanced Virgo ed in particolare:

- Environmental monitoring,
- Controllo locale degli specchi sospesi
- Allineamento automatico delle cavità ottiche
- Analisi dati di segnali stocastici da Virgo e LIGO
- Analisi dati in coincidenza con GRB
- Follow-up elettromagnetico (in collaborazione con INAF)
- Interferometer Global Control
- R&D per la generazione di luce squeezed
- R&D per lo sviluppo di sismometri monolitici
- Partecipazione al joint detection committee di LIGO/Virgo

Attuale composizione del gruppo Virgo della Sezione INFN di Napoli

Coordinatore: **E. Calloni** (Università di Napoli "Federico II")

F. Acernese (Università di Salerno)

F. Barone (Università di Salerno)

M. De Laurentis (Università di Napoli "Federico II")

R. De Rosa (Università di Napoli "Federico II")

L. Di Fiore (INFN - Napoli)

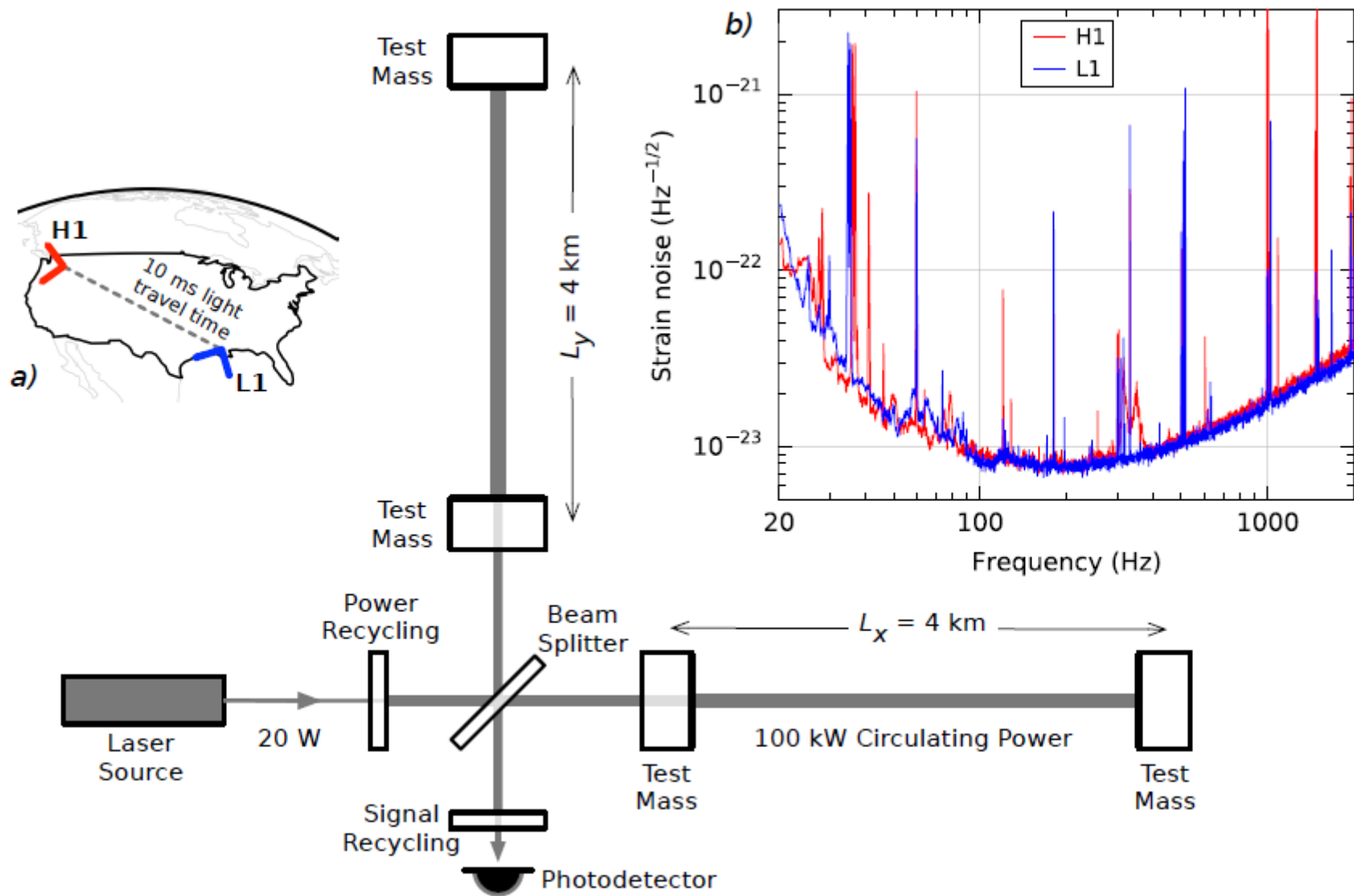
T. Di Girolamo (Università di Napoli "Federico II")

F. Garufi (Università di Napoli "Federico II")

A. Grado (OAC-INAF)

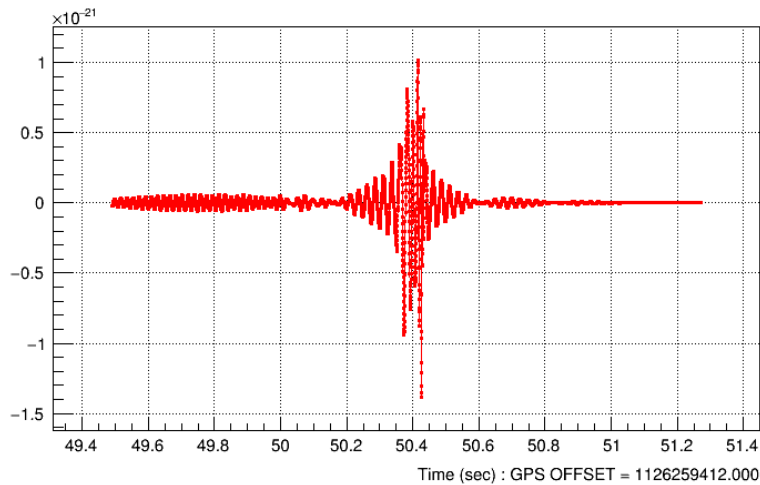
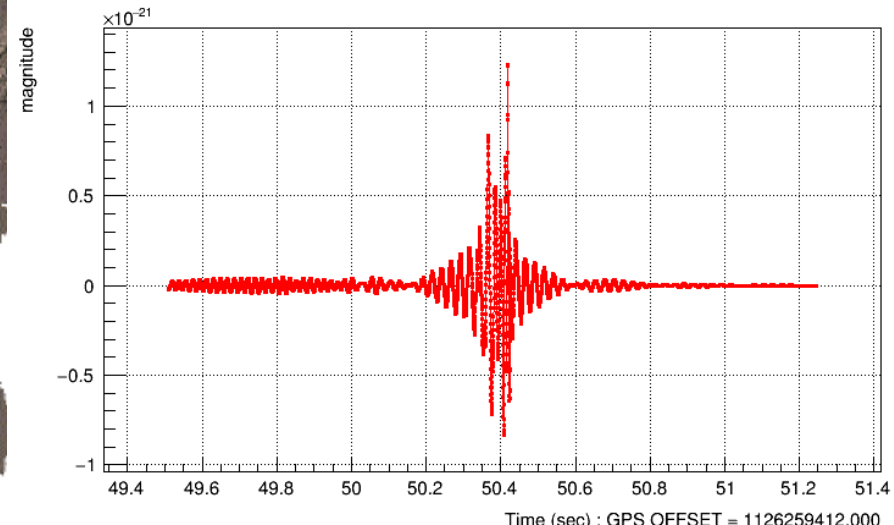
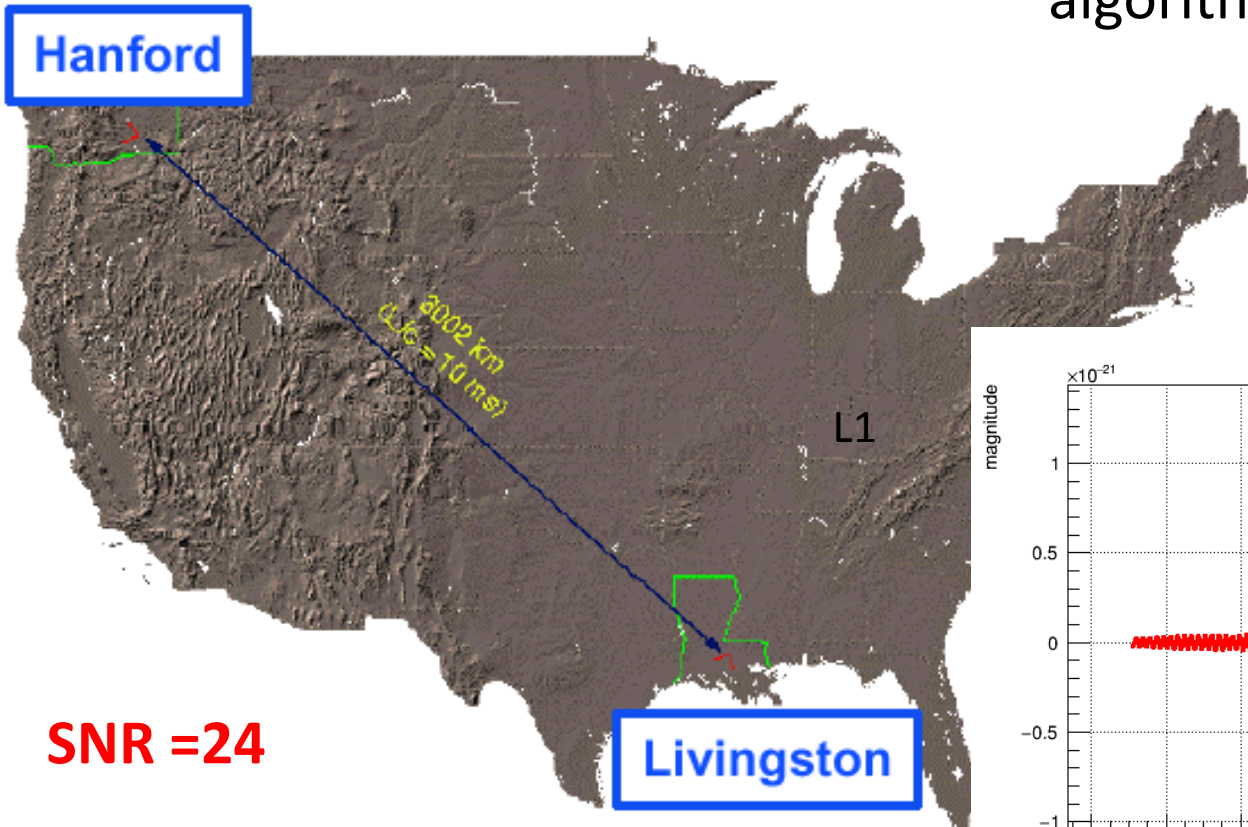
L. Milano (Università di Napoli "Federico II")

R. Romano (Università di Salerno)

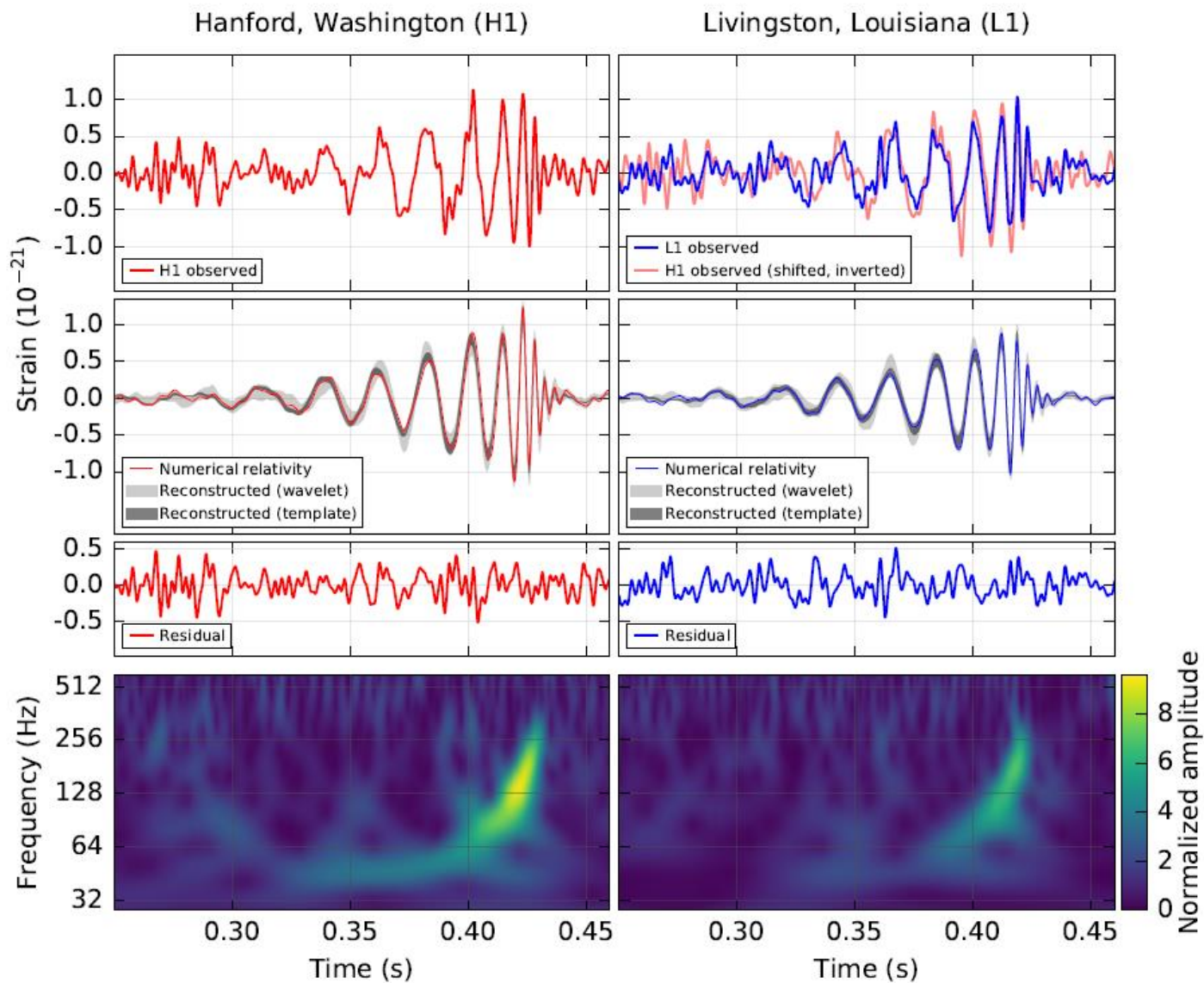


***September 14, 2015 at
11:50:45 in Central
Europe***

Alarm reported by the on-line
algorithm for generic transient
search



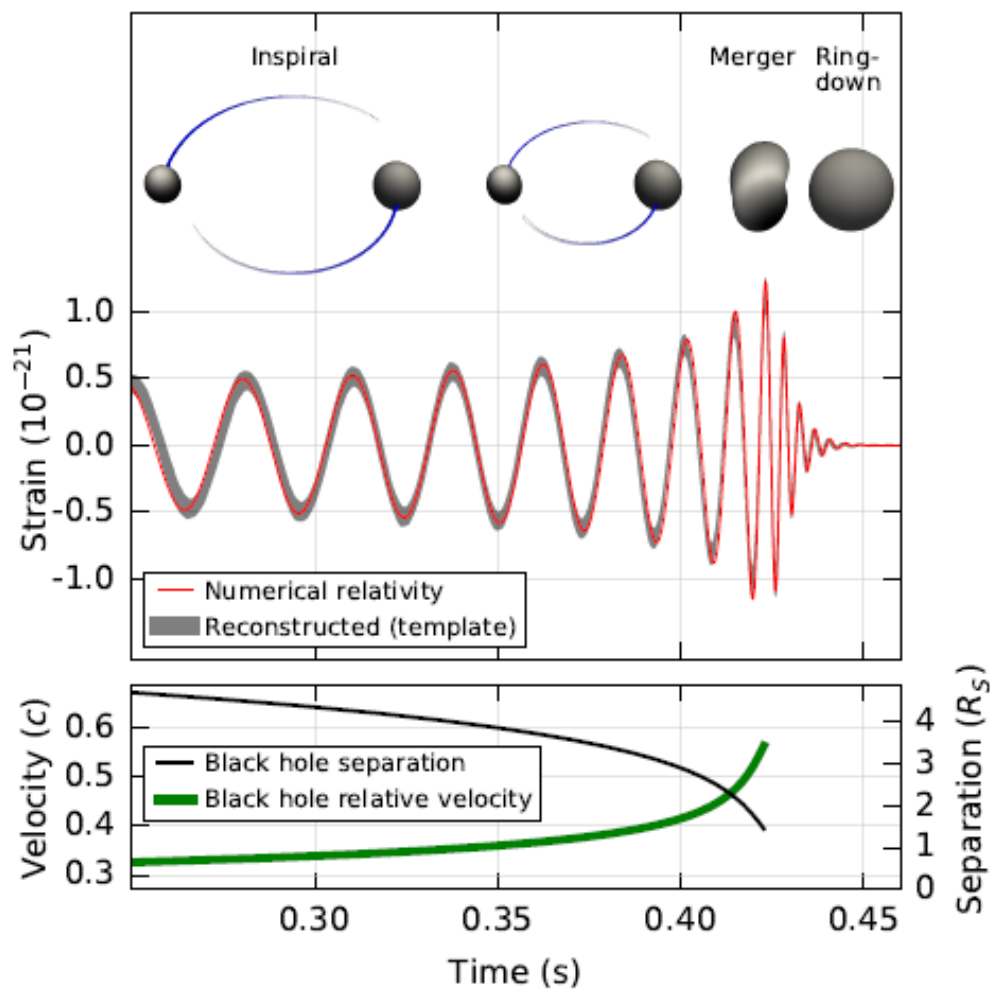
L'evento GW150914



first direct detection of gravitational waves (GW) and first direct observation of a black hole binary

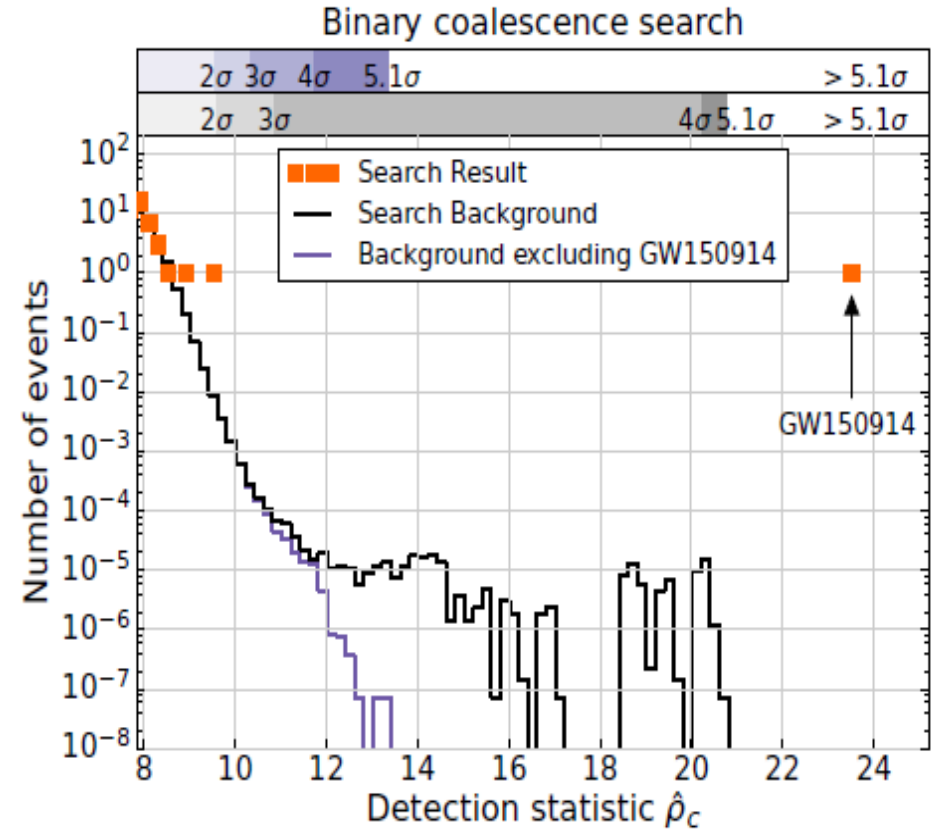
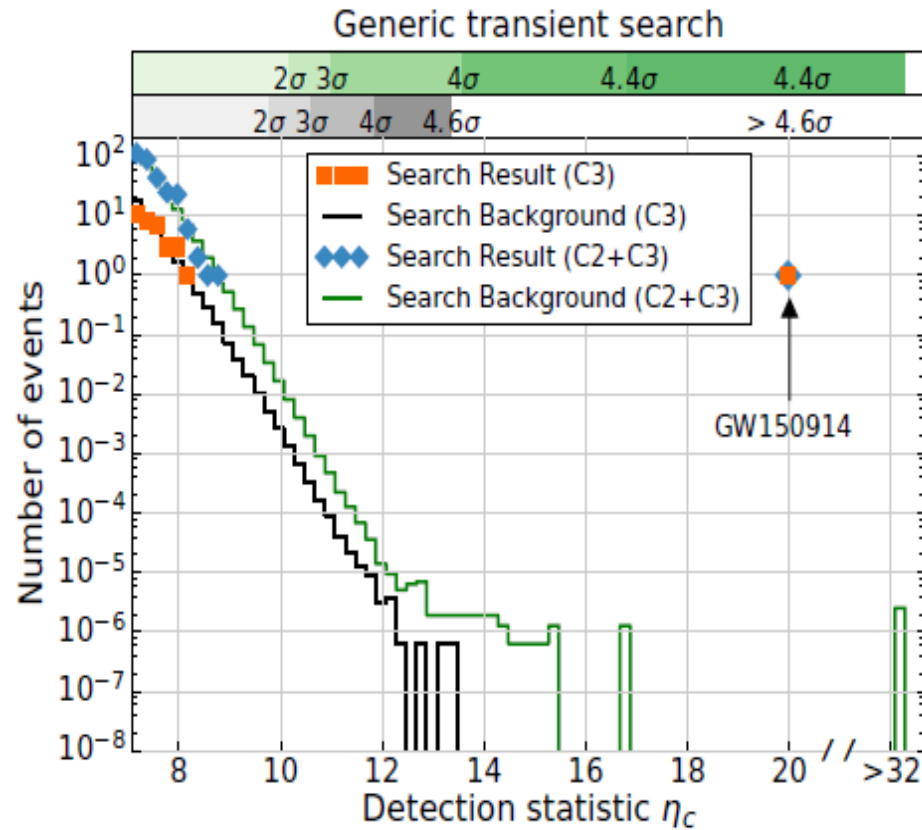
observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 190 to 590 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses	M _⊙	remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
mass ratio	0.6 to 1	online trigger latency	~ 3 min
primary BH spin	< 0.7	# offline analysis pipelines	5
secondary BH spin	< 0.9	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
remnant BH spin	0.57 to 0.72	papers on Feb 11, 2016	13
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely sky position	Southern Hemisphere		
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

GW150914: Il segnale e la sorgente che lo ha generato



$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$

Metodi di ricerca e livello di confidenza



C1 = eventi con morfologia nota del rumore (esclusi)

C3 = eventi con frequenza crescente

C2 = tutti gli altri eventi

> 5.1 σ

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} \text{ M}_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} \text{ M}_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} \text{ M}_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift, z	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$



Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410^{+160}_{-180} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36^{+5}_{-4} M_{\odot}$ and $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$, and the final black hole mass is $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$, with $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$ radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

<http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>

Published on Physical Review Letters

844 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Feldgleichungen der Gravitation. Von A. EINSTEIN.

Ich erziele hier, indem ich die in der letzten Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 25. November 1915

Die Entwicklung der Gravitationstheorie war dabei folgender. Zunächst fand ich Gleichungen, welche die Newtonsche Theorie als Näherung enthalten und beliebigen Substitutionen von der Determinante γ gegenüber kovariant waren. Hierauf fand ich, daß diese Gleichungen allgemein kovariant entsprechen, falls der Skalar des Energieimpulses der „Materie“ verschwindet. Das Koordinatensystem war dann nach der einfachen Regel zu spezialisieren, daß $\gamma = 1$ gemacht wird, wodurch die Gleichungen der Theorie eine einfache Vereinfachung erfahren. Dabei mußte aber, wie erwähnt, die Hypothese eingeführt werden, daß der Skalar des Energieimpulses der Materie verschwindet.

Neuzeitliche Rufe ich nun, daß man ohne Hypothese über den Energieimpuls der Materie auskommen kann, wenn man den Energieimpuls der Materie in einer anderen Weise in die Feldgleichungen einsetzt, als dies in meinen beiden früheren Mitteilungen geschehen ist. Die Feldgleichungen für das Vakuum, auf welche ich die Erklärung der Perihelienbewegung des Merkur gegründet habe, bleiben von dieser Modifikation unberührt. Ich gebe hier nochmals die ganze Beschreibung, damit der Leser nicht geneigt ist, die früheren Mitteilungen unangemessen kennenzulernen.

Aus der bekannten RIEMANNschen Kovariante zweiten Ranges läßt sich folgende Kovariante zweiten Ranges ableiten:

$$R_{\alpha\beta} = R_{\alpha\beta} + S_{\alpha\beta} \quad (1)$$

$$R_{\alpha\beta} = -\frac{1}{2} \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} + \frac{1}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\alpha} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} \quad (2)$$

$$S_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\alpha} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} - \frac{1}{2} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\alpha} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} \quad (3)$$

* Sitzungsber. XLIV, S. 128 und XLV, S. 195, 1915.

Über Gravitationswellen.

Von A. EINSTEIN.

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademienarbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen technischen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals bemerkt ist, muß sich hier auf den Fall, daß das betrachtete astrophysikalische Kontinuum sich von einem „galileischen“ nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{\alpha\beta} = -\delta_{\alpha\beta} + \gamma_{\alpha\beta} \quad (1)$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitätstheorie üblich ist, die Zeitvariable x_4 rein imaginär, indem wir

$$x_4 = it$$

setzen, wobei t die „Lichtzeit“ bedeutet. In (1) ist $\delta_{\alpha\beta} = 1$ bzw. $\delta_{\alpha\beta} = 0$, je nachdem $\alpha = 4$ oder $\alpha \neq 4$ ist. Die $\gamma_{\alpha\beta}$ sind gegen γ kleine Größen, welche die Abweichung des Kontinuums von „galileischen“ darstellen; sie bilden einen Tensor vom zweiten Range gegenüber Lorentz-Transformationen.

§ 1. Lösung der Näherungsgleichungen des Gravitationsfeldes durch retardierte Potentiale.

Wir gehen aus von den für ein beliebiges Koordinatensystem gültigen Feldgleichungen

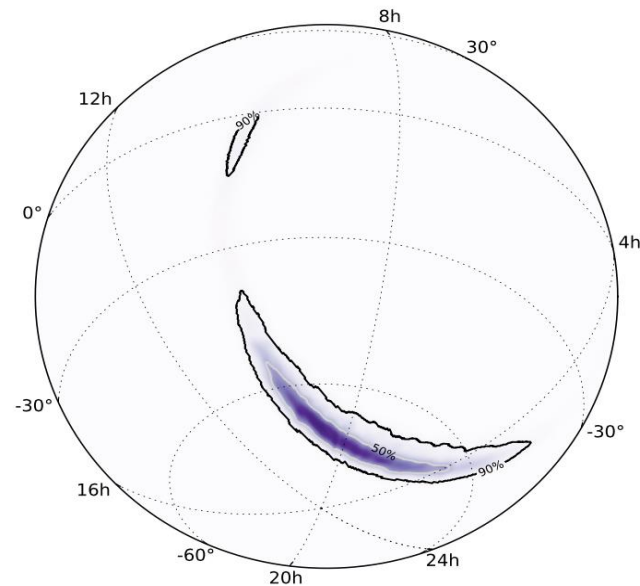
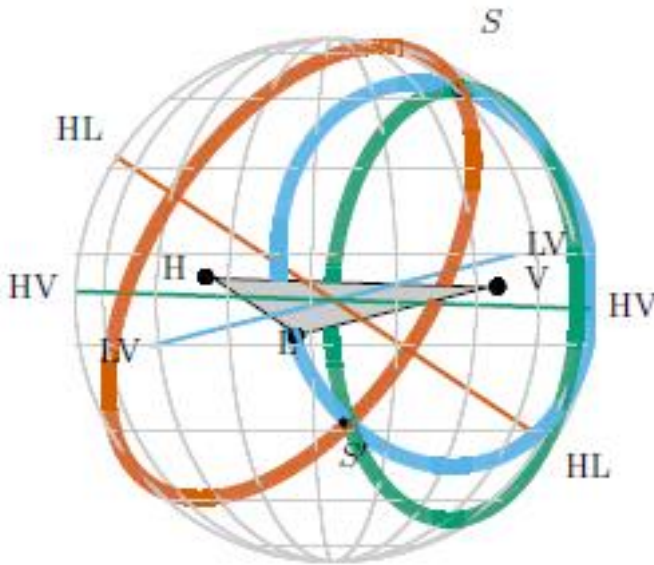
$$-\frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^\alpha \partial x^\alpha} + \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} + \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} - \frac{\partial^2 \gamma}{\partial x^\alpha \partial x^\beta} \frac{\partial \gamma}{\partial x^\beta} = -\kappa \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} T \right) \quad (2)$$

¹ Diese Sitzungsber. 1915, S. 688 ff.

² Von der Einführung des „ γ -Feldes“ (vgl. diese Sitzungsber. 1915, S. 143) ist dabei Abstand genommen.

Sitzungsber. 1915, S. 195.

Localizzazione nel cielo di una sorgente di Onde Gravitazionali



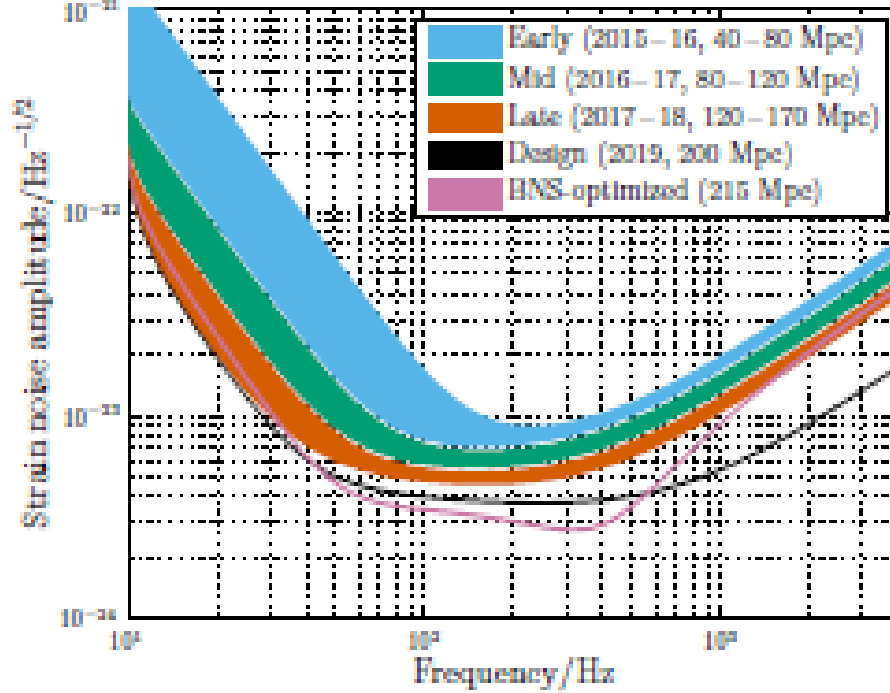
Con un meccanismo di triangolazione ogni coppia di rivelatori individua un cerchio sulla sfera celeste di possibile localizzazione della sorgente. Un terzo rivelatore permette di individuare una sola direzione nello spazio e quindi di facilitare la localizzazione nel cielo e la controparte elettromagnetica

Stato di Virgo

- Il rivelatore è al momento in fase di upgrade
- La costruzione dovrebbe essere ultimata entro il 2016
- Per le parti già assemblate (Beam splitter, sistema di Injection, elettronica di acquisizione e controllo, mirror local controls, environmental monitoring) è già iniziato il commissioning.
- A breve saranno installati gli input mirror (permettendo il commissioning del CTF)
- Subito dopo la costruzione si concluderà con gli end mirrors e il completamento del sistema di detection e thermal compensation
- L'obiettivo è agganciarsi ad O2 (che inizierà a metà 2016) all' inizio del 2017

Grazie per la vostra attenzione

Advanced LIGO



Advanced Virgo

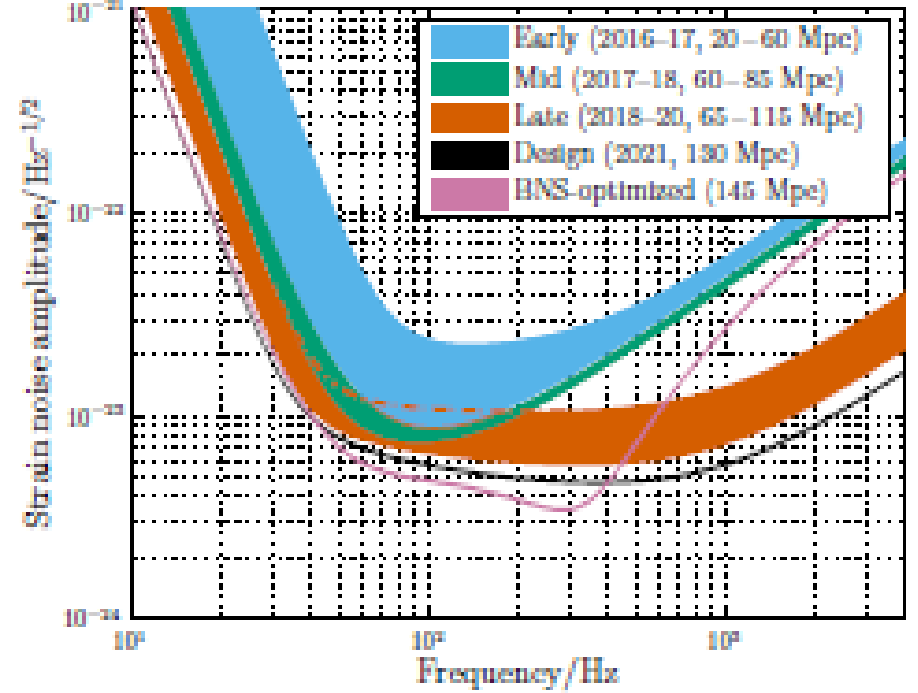
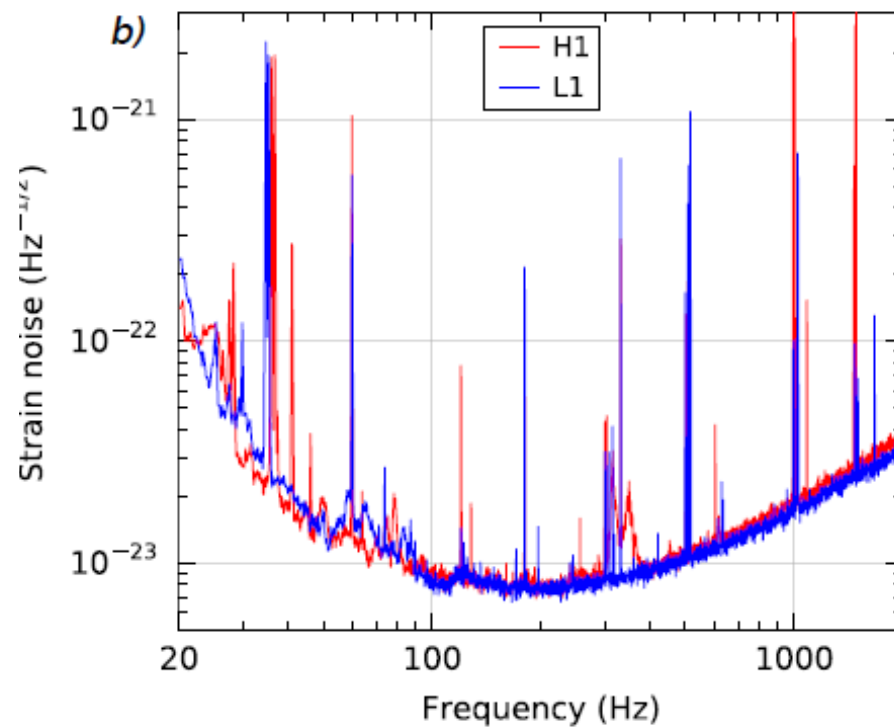
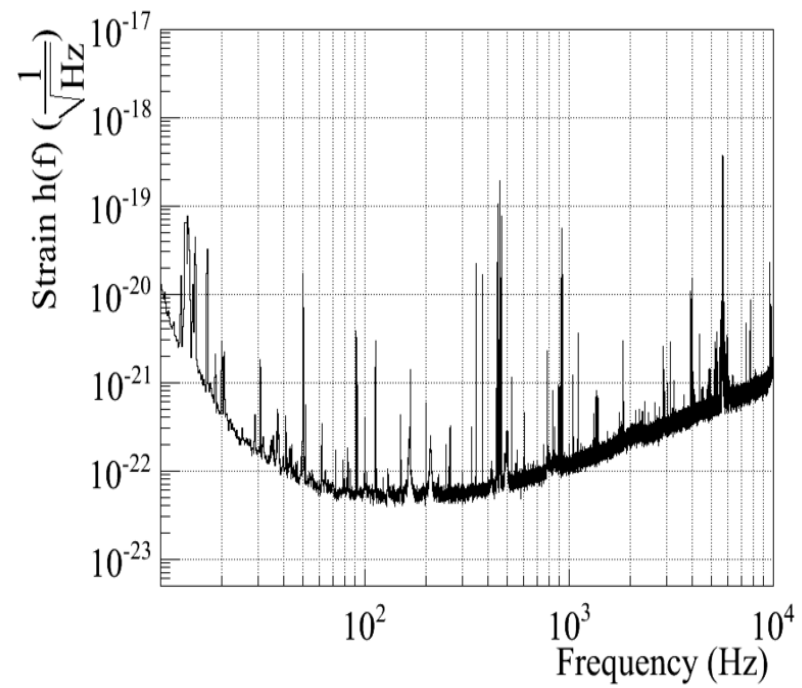


Figure 1: aLIGO (*left*) and AdV (*right*) target strain sensitivity as a function of frequency. The binary neutron-star (BNS) range, the average distance to which these signals could be detected, is given in megaparsec. Current notions of the progression of sensitivity are given for early, mid and late commissioning phases, as well as the final design sensitivity target and the BNS-optimized sensitivity. While both dates and sensitivity curves are subject to change, the overall progression represents our best current estimates.

Virgo sensitivity. GPS: 0996606422, UTC: Fri Aug 5 19:06:47 2011



ASTROFISICA SOLARE E STELLARE

Ricercatori: F. Barone*, L. Di Fiore*, M. Landini, S. Mancuso, C. Marmolino, L. Milano, G. Russo, L. A. Smaldone.

Le ricerche proposte rappresentano il naturale sviluppo di quelle che i singoli membri svolgevano, negli anni scorsi
Attualmente i temi di fondo possono essere raggruppati come segue:

OMISSIS

- b) determinazione dei parametri fondamentali delle stelle pulsanti e dei sistemi stellari multipli (con particolare riferimento alla evoluzione dei sistemi binari.
- c) studio di sorgenti astrofisiche potenziali emettitrici di onde gravitazionali
- d) Implementazione di sottosistemi per la realizzazione di un'antenna interferometrica a larga base per la rivelazione di onde gravitazionali a basse frequenze.

4. Rivelazione di onde gravitazionali.

Nel corso del 1986/87 l'attività del gruppo si è aperta a due nuovi temi:

a) diagnostica di fasi evolutive stellari in connessione con la possibilità di rivelazione di onde gravitazionali (teorico/sperimentale) che prevede:

- i) studio dei meccanismi di variazione di periodo e di momento angolare orbitale rotazionale e totale dei sistemi binari, in connessione con la possibile emissione di onde gravitazionali da parte di tali sistemi.
- ii) studio del fondo di radiazione gravitazionale da pulsar note, in funzione dei loro modelli strutturali, e studio del fondo di radiazione gravitazionale da binarie con orbite eccentriche.

b) rivelazione di onde gravitazionali aperiodiche e periodiche da sorgenti astrofisiche che prevede:

- i) analisi critica di sistemi di rivelazione di onde gravitazionali.
- ii) studio (teorico/sperimentale) delle varie fonti di rumore per un'antenna interferometrica a larga base per la rivelazione di onde gravitazionali nella banda da 10 a 5000 Hz.

B. ASTROFISICA SOLARE E STELLARE

(F. Barone*, L. Di Fiore*, M. Landini, S. Mancuso, C. Marmolino, L. Milano, G. Russo, L. A. Smaldone)

OMISSIS

- b) determinazione dei parametri fondamentali delle stelle pulsanti e dei sistemi stellari multipli (con particolare riferimento alla evoluzione dei sistemi binari.
- c) studio di sorgenti astrofisiche potenziali emettitrici di onde gravitazionali
- d) implementazione di sottosistemi per la realizzazione di un'antenna interferometrica a larga base per la rivelazione di onde gravitazionali a basse frequenze.

4. Rivelazione di onde gravitazionali.

Nel corso del 1988 l'attività del gruppo é proseguita sui due temi:

- a) diagnostica di fasi evolutive stellari in connessione con la possibilità di rivelazione di onde gravitazionali (teorico/sperimentale):
 - i) sono stati studiati i meccanismi di variazione di periodo e di momento angolare orbitale rotazionale e totale dei sistemi binari, in connessione con la possibile emissione di onde gravitazionali da parte di tali sistemi.
 - ii) si é studiato il fondo di radiazione gravitazionale da pulsar note, in funzione dei loro modelli strutturali, e il fondo di radiazione gravitazionale da binarie con orbite eccentriche e da binarie cataclismiche.
 - b) possibilità di rivelazione di onde gravitazionali aperiodiche e periodiche da sorgenti astrofisiche :
 - i) é stata eseguita una analisi critica di sistemi di rivelazione di onde gravitazionali.
 - ii) é in atto lo studio(teorico/sperimentale) delle varie fonti di rumore per la implementazione di un'antenna interferometrica a larga base per la rivelazione di onde gravitazionali nella banda da 10 a 2000 Hz(progetto VIRGO).In questo ambito é stato implementato il laboratorio di interferometria laser e si é avviata la sperimentazione del sottosistema di puntamento per un'antenna interferometrica a larga base(3 Km).
- I risultati già ottenuti sono buoni e nel corso del 1989/90 si prevede di continuare questa sperimentazione. Questa ricerca é effettuata in collaborazione con S.Solimeno.

1992

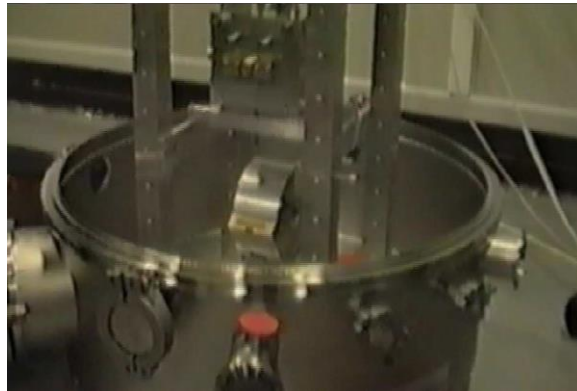
B. ASTROFISICA SOLARE E STELLARE

(Andretta V.*, Calloni E.*, F. Barone*, L. Di Fiore*, S. Mancuso, C. Marmolino, L. Milano, G. Russo, L.A. Smaldone)

- a) studio dei fenomeni fluidodinamici nelle atmosfere stellari (convezione, onde, pulsazione) e dell'attività solare a livello cromosferico e coronale;
- b) determinazione dei parametri fondamentali delle stelle pulsanti e dei sistemi stellari multipli (con particolare riferimento alla evoluzione dei sistemi binari.
- c) studio di sorgenti astrofisiche potenziali emettitrici di onde gravitazionali
- d) implementazione di sottosistemi per la realizzazione di un'antenna interferometrica a larga base per la rivelazione di onde gravitazionali a basse frequenze.

PREMIO NOBEL A Hulse a Taylor
Accelerazione approvazione antenne
GW interferometriche

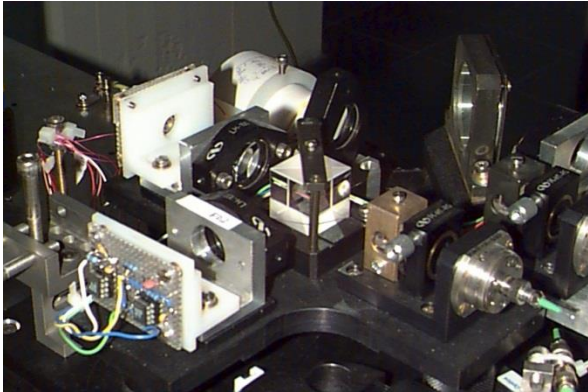
Questo documento portò, nel giugno del 1994, all'approvazione definitiva del progetto Virgo, da parte dell'INFN e del CNRS per la costruzione e l'operazione di una antenna interferometrica con bracci di 3 km, da realizzarsi nel comune di Cascina, presso Pisa. All'approvazione del progetto è seguita una fase di R&D, da parte di tutti i gruppi coinvolti nell'esperimento che ha portato alla definizione di tutti i dettagli tecnici e costruttivi dell'interferometro. In questo contesto il gruppo Napoletano, che aveva intanto visto la partecipazione di Aniello Grado, ha realizzato un prototipo di interferometro sospeso pendolarmente con bracci di 3 metri. L'interferometro, che è stato il primo al mondo ad essere operato con controlli digitali, ha aperto la strada alla tecnologia che è stata poi adottata per tutti i rivelatori interferometrici a larga base. Il gruppo, a cui si era aggiunto Fabio Garufi, ha inoltre assunto la responsabilità del monitoraggio dei parametri ambientali e dell'archiviazione on-line dei dati dell'antenna Virgo.



Una delle sospensioni del prototipo di interferometro realizzato a Napoli

Queste attività di sviluppo hanno portato la collaborazione alla stesura, nel 1997, del "Virgo Final Design Report" (VIR-TRE-1000-13) a cui ha fatto seguito l'inizio della costruzione dell'interferometro.

In questa fase, oltre alla costruzione ed installazione dei sistemi di archiviazione dei dati e di monitoraggio ambientale, il gruppo, al quale si era aggiunto Rosario De Rosa, ha contribuito alla realizzazione delle sospensioni di Virgo e alla loro caratterizzazione. In quest'ambito, tra l'altro, è stato sviluppato a Napoli un dispositivo interferometrico per la misura on-site delle funzioni di trasferimento meccaniche dei superattenuatori dell'antenna. Successivamente è stato sviluppato e realizzato il sistema ottico per i controlli locali degli specchi di Virgo.



dispositivo interferometrico per la misura on-site delle funzioni di trasferimento meccaniche dei superattenuatori di Virgo

Parallelamente il gruppo ha partecipato attivamente allo studio delle tecniche di analisi per l'estrazione dei segnali gravitazionali immersi nel rumore. In particolare sono state sviluppate tecniche che non richiedono la conoscenza a priori della forma d'onda attesa. Negli anni compresi tra il 2000 ed il 2003, parallelamente alla costruzione del rivelatore, sono iniziate le attività di commissioning dell'interferometro a cui il gruppo di Napoli, al quale si era aggiunto Fausto Acernese, ha partecipato attivamente contribuendo, in particolare, alla messa a punto dei sistemi di controllo e di monitoraggio dell'antenna. Il 18 maggio 2007 ebbe inizio il primo run scientifico di Virgo (VSR1). Questa prima presa dati, in coincidenza con le antenne statunitensi LIGO ebbe una durata di circa quattro mesi. Negli anni successivi altri tre run scientifici si sono alternati a periodi di commissioning e upgrade dell'antenna. In questo modo è stata raggiunta la sensibilità di progetto che, tra l'altro, è risultata di gran lunga la migliore al mondo alle

basse frequenze. I risultati di fisica conseguiti dalla collaborazione hanno permesso di fissare alcuni importanti limiti superiori alla emissione di onde gravitazionali da diverse classi di sorgenti (fondo stocastico e pulsar). Durante questa fase il gruppo di Napoli ha avuto varie responsabilità nell'ambito della collaborazione tra cui, in particolare, quella del Commissioning Coordinator. In questi anni al gruppo si è aggiunto Rocco Romano. Il rivelatore Virgo, al quale negli anni avevano aderito anche gruppi olandesi, polacchi ed ungheresi, ha terminato la propria attività a fine 2011. E' seguita la fase di decommissioning e la costruzione del suo successore di seconda generazione Advanced Virgo, attualmente in fase di realizzazione.

Il gruppo napoletano è anche impegnato nelle attività, finanziata nell'ambito del settimo programma quadro della comunità europea, di sviluppo di un rivelatore di terza generazione denominato Einstein Telescope (ET) che ha portato alla stesura del design study: "Einstein gravitational wave Telescope conceptual design study" (ET-0106A-10). Questa attività di sviluppo è tuttora in corso con il supporto della comunità europea.

Oltre alla ricerca con rivelatori terrestri, il gruppo di Napoli, a partire dal 2003, è impegnato nello sviluppo del rivelatore spaziale di onde gravitazionali LISA (Laser Interferometer Space Antenna). Quest'attività, in collaborazione con le sezioni di Trento, Firenze e Roma 2, è stata svolta inizialmente nell'ambito della sigla LISA-R&D divenuta successivamente LISA-PF. A questa attività hanno partecipato Luciano Di Fiore, Fausto Acernese, Enrico Calloni, Rosario De Rosa, Aniello Grado e Leopoldo Milano.

Il gruppo di Napoli, in quest'ambito, ha sviluppato e caratterizzato un sistema di lettura ottica, per il controllo drag-free del sensore inerziale di LISA. Tale tecnologia è stata applicata con successo anche ad altri sistemi, quali le facility a pendolo di torsione sviluppate a Trento e Firenze.

In queste attività, andate avanti per oltre 25 anni, il gruppo ha visto la partecipazione di un gran numero di dottorandi, assegnisti, borsisti e collaboratori a tempo determinato che hanno poi intrapreso altre strade, tra cui Antonio Eleuteri, Ketino Quipiani, Michele De Rosa, Monica Varvella, Iolanda Ricciardi, Saverio Avino, Lara Giordano, Silvio Pardi, Adele La Rana, Alessio Tierno, Simona Mosca, Gianluca Persichetti, Maria Parisi, Luca Antonio Forte, Maria Felicia De Laurentis, Rocco Paolo Croce, Giuliana Russano. A tutti loro, e a quelli che potremmo aver dimenticato, va il ringraziamento per il lavoro svolto con entusiasmo e dedizione che ha sicuramente contribuito in maniera determinante ai risultati conseguiti.

Tesi di Laurea.

Guido Russo, Fabrizio Barone, Rosario De Rosa, Aldo Augurio, Fabio Solarino, Immacolata Capriolo, F. Fusco, Aniello Grado, Andrea Bove, Annamaria Canciello, Carmine Gargiulo, Gianfranco Spirito, Mariangela Mone, Alfredo Tripicchio, Bruna Varrone, Gianluca Imbriani, Aniello Castaldi, Alessio Tierno, Alessandro Spadola, V. Scotti di Carlo, Claudio Nuzzolo, Costantino Loprete, Monica Varvella, Marino Maiorino, Giuseppe Cavallo, Ferdinando Silvestri, Sergio Greco, Ferdinando Ammendola, Mariafelicia De Laurentis, Antonio Perreca, Spagnuolo Viola, La Rana, Adele, Izzo Luca, Silvestri Ferdinando, Scarpato Salvatore, Russano Giuliana, Marchese Luigi, Liccardo Vincenzo, Sequino Valeria, Scaldaferri Ornella, Antonio Eleuteri, Michele De Rosa, Angelo Ciaramella, Fausto Acernese

TESI DOTTORATO

Fabrizio Barone, Enrico Calloni, Acernese Fausto, Avino Saverio, Eleuteri Antonio, Giordano Gerardo, Giordano Lara, La Rana Adele, Mosca Simona, Pardi Silvio, Ricciardi Iolanda, Riccio Filippo, Aniello Grado, Parisi Maria



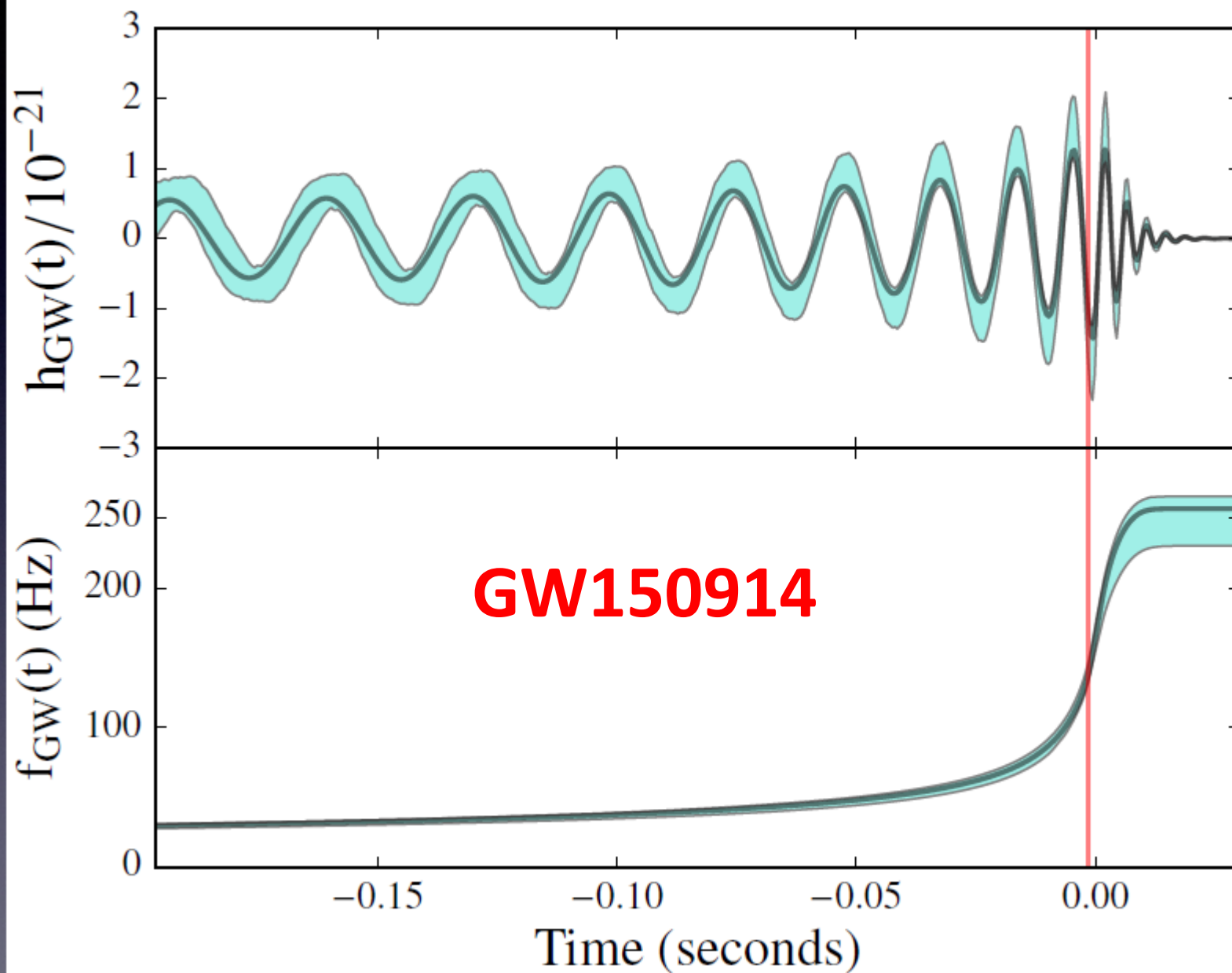
Paesi fondatori 
paesi aggiunti dopo realizzazione 

[CNRS](#) ([France](#)), [INFN](#) ([Italy](#)), [NIKHEF](#) ([Netherlands](#)),
[POGRAW](#) ([Poland](#)) e [RMKI](#) ([Hungary](#))

Circa 320 tra ricercatori e tecnici → **2016**

**2007→ Memorandum of
Understanding Virgo-Ligo rinnovato
nel 2014 per Advanced Virgo and
advanced Ligo**





GW150914

signal and source

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 200 ms
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 30 Hz	~10
date	14 Sept 2015	peak GW strain	1×10^{-21}
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	± 0.002 fm
likely distance	0.75 to 1.9 Gly 230 to 570 Mpc	frequency/wavelength at peak GW strain	150 Hz, 2000 km
redshift	0.054 to 0.136	peak speed of BHs	~ 0.6 c
signal-to-noise ratio	24	peak GW luminosity	3.6×10^{56} erg s ⁻¹
false alarm prob.	less than 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M _⊙
false alarm rate	1 in 200,000 yr		
Source Masses	M _⊙	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
total mass	65	remnant damping time	~ 4 ms
chirpmass	28	remnant size, area	180 km, 3.5×10^5 km ²
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< 1.2×10^{-22} eV
remnant BH	62		
mass ratio	0.6 to 1	coalescence rate	2 to 400 Gpc ⁻³ yr ⁻¹
primary BH spin	< 0.7	online trigger latency	~ 3 min
secondary BH spin	< 0.9	# offline analysis pipelines	5
remnant BH spin	0.7	CPU hours consumed	~ 50 million (=20,000 PCs run for 100 days)
signal arrival time delay	arrived in L1 7 ms before H1	papers on Feb 11, 2016	13
likely sky position	Southern Hemisphere	# researchers	~1000, 80 institutions in 15 countries
likely orientation resolved to	face-on/off ~600 sq. deg.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameters with a range (e.g. distance) are 90% credible bounds; fractional error on parameters without a range is less than 10%. Acronyms: L1=LIGO

GW150914 Papers

Discovery paper

"Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger"

Published in PRL 116, 061102 (2016)

Companion papers:

"Astrophysical Implications of the Binary Black-Hole Merger GW150914"

Published in ApJL 818, L22 (2016)

"Observing gravitational-wave transient GW150914 with minimal assumptions"

"GW150914: First results from the search for binary black hole coalescence with Advanced LIGO"

"Properties of the binary black hole merger GW150914"

"The Rate of Binary Black Hole Mergers Inferred from Advanced LIGO Observations Surrounding GW150914"

GW150914 Papers

Companion papers:

"Tests of general relativity with GW150914"

"GW150914: Implications for the stochastic gravitational-wave background from binary black holes"

"Calibration of the Advanced LIGO detectors for the discovery of the binary black-hole merger GW150914"

"Characterization of transient noise in Advanced LIGO relevant to gravitational wave signal GW150914"

"High-energy Neutrino follow-up search of Gravitational Wave Event GW150914 with IceCube and ANTARES"

"GW150914: The Advanced LIGO Detectors in the Era of First Discoveries"

"Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914"