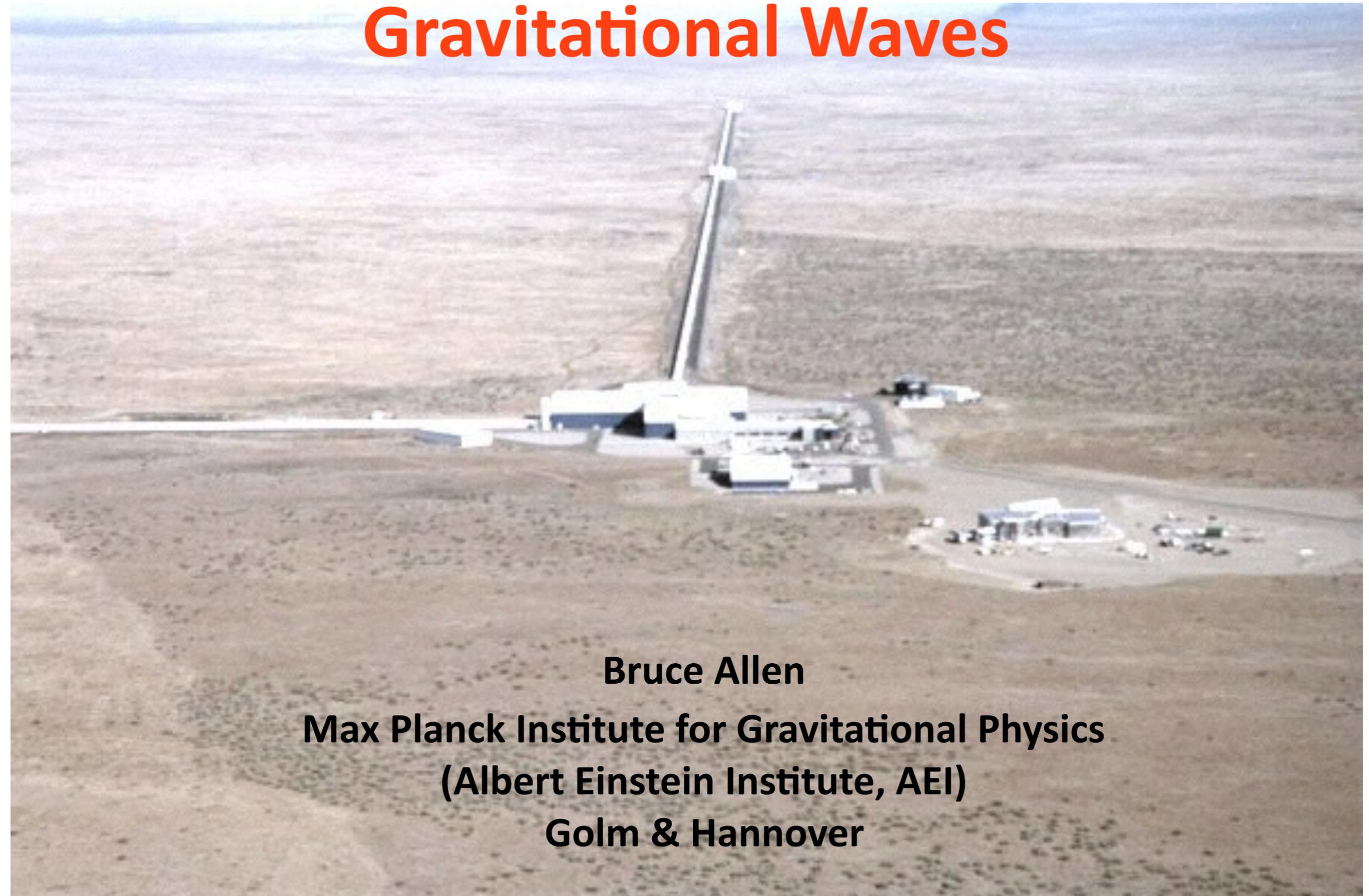




The Discovery of Gravitational Waves



Bruce Allen

Max Planck Institute for Gravitational Physics

(Albert Einstein Institute, AEI)

Golm & Hannover

Neue Zürcher Zeitung

1844 – GEGRÜNDET 1780

Freitag, 12. Februar 2016 · Nr. 35 · 237. Jg.

AZ 8021 Zürich · Fr. 4.90 · € 4.90

Das Universum hat gesprochen

Existenz von Gravitationswellen bestätigt

Forscher haben erstmals die von Albert Einstein postulierten Gravitationswellen nachgewiesen. Es ist ein Meilenstein der Physik, der eine neue Ära in der Astronomie einleitet.

CHRISTIAN SPEICHER

Es war ein Triumph für die Teilchenphysik, als 2012 am Cern das Higgs-Teilchen entdeckt wurde. Mit dem Nachweis bestätigte sich, dass unsere Modellvorstellungen über die Elementarteilchen und ihre Massen auf einem soliden Fundament ruhen. Ebenso solide scheint der zweite Eckpfeiler der modernen Physik zu sein, Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie. An einer mit Spannung erwarteten Pressekonferenz hat eine internationale Arbeitsgruppe am Donnerstag in Washington den ersten direkten Nachweis von Gravitationswellen bekanntgegeben. Nach mehr als hundert Jahren ist damit eine der zentralen Vorhersagen von Einsteins Gravitationstheorie bestätigt worden. Mit dieser Entdeckung beginnt eine neue Ära der Astronomie, die noch für viele Überraschungen sorgen dürfte.

höher und lauter wird. Genau diese Signalform hatten Forscher erwartet, wenn zwei Schwarze Löcher sich auf immer engeren Bahnen umkreisen und schliesslich ineinanderstürzen. Den Daten gemäss hat sich dieses bisher noch nie beobachtete Schauspiel bereits vor 1,3 Milliarden Jahren abgespielt. So lange brauchten die Gravitationswellen, um mit Lichtgeschwindigkeit die Erde zu erreichen. Ein Vergleich mit theoretischen Berechnungen zeigt, dass die beiden Schwarzen Löcher mit 29 beziehungsweise 36 Sonnenmassen ungemein massereich gewesen sein müssen. Das resultierende Schwarze Loch besitzt 62 Sonnenmassen. Das bedeutet, dass im Bruchteil einer Sekunde das Energieäquivalent von drei Sonnenmassen in Form von Gravitationswellen freigesetzt wurde. Trotzdem war der auf der Erde zu spürende Effekt winzig. Die Kilometerlangen Arme der beiden Antennen wurden durch die Gravitationswellen um weniger als den tausendsten Teil eines Protonendurchmessers gestaucht und gestreckt.

Nur ein erster Schritt

Verschiedene Forscher betonten an der Pressekonferenz die Tragweite der Entdeckung. David Reitze, der geschäftsführende Direktor von Ligo, verglich sie mit dem Moment, als Galileo Galilei zum ersten Mal durch ein Fernrohr den Himmel beobachtete. Jetzt habe das Universum in Gravitationswellen zu uns gesprochen. Gabriela González, die Sprecherin der Ligo-Arbeitsgruppe, erklärte, dass nun eine neue Ära in der Astronomie anbreche, die Gravitationswellen-Astronomie.

Der Nachweis der Gravitationswellen ist nämlich nur ein erster Schritt. In Zukunft wird es darum gehen, anhand der Gravitationswellen Prozesse im Universum zu untersuchen, für die optische Teleskope gewissermassen blind sind. Die Schwarzen Löcher, die miteinander verschmelzen, sind ein gutes Beispiel dafür. Ein anderes ist die Explosion massereicher Sterne. Solche Supernovae lassen sich zwar auch mit herkömmlichen Teleskopen beobachten. Da die Gravitationswellen jedoch anders erzeugt werden als Licht, verspricht man sich von ihnen eine komplementäre Sicht der Dinge.

Forschung und Technik, Seite 58



WOHNGEMEINSCHAFTEN – VON ALTERNATIV BIS LUXURIÖS

Und ewig lockt die WG

WOCHENENDE SEITE 49-53

Nato-Einsatz in der Ägäis

Direkte Unterstützung der USA im Kampf gegen den IS

Brüssel - Die Nato-Verteidigungsmuster haben am Donnerstag auf Antwerpen und Ankara grünes Licht für eine Marineoperation in der Ägäis gegeben. Ein ständiger maritimer Einsatzverband soll unverzüglich in Bewegung gesetzt werden. Das in Brüssel erteilte Mandat ist allerdings auf das Sammeln von Informationen über Schlepper beschränkt. Sie sollen den Küstenwachen zur Verfügung gestellt werden. Das nordatlantische Militärbündnis nicht direkt in den Kampf gegen den islamischen Staat (IS) eingreifen. Die Nato-Verteidigungsminister haben sich zu dem Mandat verständigt, die USA mit Aufklärungsflugzeugen zu unterstützen. Die Jets sollen aber nicht über Syrien zum Einsatz kommen. Die Nato will die Vereinigten Staaten vielmehr anderswo entlasten und so amerikanische Kapazitäten für Syrien freimachen.

Pentagonchef Ashton Carter forderte anschliessend von allen am Kampf gegen die Terrormiliz beteiligten Staaten ein verstärktes Engagement. Zu einer grösseren militärischen Beteiligung zeigte sich auch Saudiarabien bereit. Den Einsatz von Bodentruppen stellt Riad aber nur in Aussicht, wenn darüber Konsens in der Anti-IS-Koalition besteht. *International, Seite 4*
Meinung & Debatte, Seite 13

Europas Banken unter Druck

Hohe Nervosität am Aktienmarkt

Der Ausverkauf bei den europäischen Bankentiteln geht weiter. Die Anleger befürchten offenbar eine neue Finanzkrise. Die Marktreaktionen sind zwar übertrieben, doch die Probleme im europäischen Bankensektor sind beachtlich. In naher Zukunft werden die Finanzsituationen deutlich mehr Eigenkapital halten müssen als heute. Wie sie ihre Kapitaldecke vergrössern wollen, ist unklar. Angesichts der geringen Profitabilität der Branche werden die wenigsten dafür Gewinne einbehalten können. *Wirtschaft, Seite 25*
Finanzen, Seite 33
Meinung & Debatte, Seite 13

Erfolg in wenigen Monaten

Der Nachweis der Gravitationswellen gelang in den USA mit den beiden kilometerlangen Antennen des Laser-Interferometer-Gravitationswellen-Observatoriums (Ligo). Beide Antennen – die eine steht in Livingston, Louisiana, die andere in Hanford, Washington – sind in den letzten Jahren für viel Geld umgerüstet worden, um ihre Empfindlichkeit zu steigern. Der Aufwand hat sich gelohnt. Obwohl das Beobachtungsprogramm erst vor wenigen Monaten gestartet worden ist, haben die Forscher bereits ein erstes Signal empfangen, das die typischen Merkmale einer Gravitationswelle trägt. Die statistische Signifikanz des Signals ist mit 5,1 Standardabweichungen so gross, dass es selbst nach strengen Massgaben gerechtfertigt ist, von einer Entdeckung zu sprechen. Registriert wurde das Signal bereits am 14. September, und zwar fast gleichzeitig von beiden Antennen. Das nur 0,2 Sekunden dauernde Signal hatte gewisse Ähnlichkeit mit einem Pfeifton, der tief beginnt und gegen Ende hin

KOREANISCHE SPANNUNGEN

Seoul kündigt die Zusammenarbeit mit Pjongjang auf SEITE 8



MOSHE YALON

Der israelische Verteidigungsminister hält Iran, nicht den IS für die grösste Bedrohung SEITE 9, 16

EUROPAPREIS

Wie Saudiarabien den iranischen Aufschwung abbremst SEITE 27

KORRUPTES SYSTEM

Die Regierung in Kiew ist mit dem alten Filz verbunden SEITE 31

DOPINGKONTROLLEURE

Früh aufstehen muss, wer Sportler überführen möchte SEITE 48



BARBIES ENTWICKLUNG

Die amerikanische Puppe erhält nach 57 Jahren endlich Körperformen wie die Frau von nebenan SEITE 39

WETTER
Am Morgen im Flachland etwas Schnee. Dann trocken, zeitweise sonnig. Am Nachmittag wieder bewölkt, am Abend Niederschlag. SEITE 23

TV/Radio 45, Traueranzeigen 30, 44 Sportsergebnisse 46, Kino 10

NZZ www.nzz.ch

Redaktion und Verlag Neue Zürcher Zeitung, Sekundarstrasse 11, Postfach, 8021 Zürich, Telefon +41 43 25 11 11, Leserservice/Abonnemente +41 43 25 10 00, weitere Angaben im Impressum Seite 11

UMSTRITTENER NUNTIIUS
Kantonalkirchen lehnen sich gegen Botschafter des Vatikans auf SEITE 15

FILIPPO LEUTENEGER
Der FDP-Stadtrat macht sich für ein weltoffenes Zürich stark SEITE 19

LE FIGARO
ROYAUME-UNI
LES BRITANNIQUES CÉLÈBRENT 300 ANS DE JARDINS A L'ANGLAISE PAGES 30 ET 31

FUMAROLI
« CE QUE L'AVENIR DOIT À NOTRE PASSE » PAGE 18

ENTRETIEN Bruno Retailleau : « Oui à la déchéance, non à l'apatridie » PAGE 6

SYRIE Les négociations de paix tournent au bras de fer entre Washington et Moscou PAGE 12

JUSTICE La question prioritaire de constitutionnalité, nouvelle arme de la défense PAGE 22

CANNABIS Dans un centre de consultation pour ados accros PAGE 22

RUGBY Guy Novès remanie le XV de France PAGE 22

PÉTROLE Face à la chute des cours, Total résiste mieux que ses concurrents PAGE 25

CHAMPS LIBRES
- Reportage : Kiril, le patriarche mal-aimé de l'Église orthodoxe russe
- Le bloc-notes d'Ivan Rioutov
- L'analyse de Jean-Marie Guénois PAGE 27 ET 28

LE FIGARO OUI LE FIGARO NON

Réponses à la question de jeudi : Laurent Fabius a-t-il été un bon ministre des Affaires étrangères ?

OUI 30% NON 70%

TOTAL DES VOTANTS: 80 246

Votes aujourd'hui sur lefigaro.fr
François Hollande peut-il se relancer après ce remaniement ?

WELLS - REMANIEMENT HOLLANDE
WELLS - REMANIEMENT HOLLANDE

3634
Découvrez au moins 4 raisons qui vous donneront envie de mettre ce numéro dans vos contacts favoris.

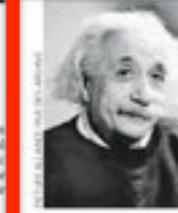
Un dernier replâtrage pour finir le quinquennat

Marqué par l'arrivée de l'écologiste Emmanuelle Cosse et le retour de Jean-Marc Ayrault, le remaniement suscite le scepticisme général.

DES SEMAINES D'ATTENTE ET UN SECRET TRÈS BIEN GARDÉ... L'OPINION RECLAME UN CHANGEMENT DE POLITIQUE PLUTÔT QUE DE MINISTRES... HOLLANDE REPRASSE PAR LA CASE AYRAULT... EMMANUELLE COSSE, LA CAUTION ÉCOLOGIQUE... AÉROPORT DE NANTES... HOLLANDE VEUT UN RÉFÉRENDUM PAGES 2 A 4 ET L'EDITORIAL

Les doutes sur la solidité des banques font plonger les marchés

La défection à l'égard du secteur bancaire, fragilisée par la baisse de la croissance, s'aggrave. Or, les valeurs du secteur ont encore plongé, entraînant la Bourse de Paris (-4,05 %) dans leur chute. Dans un entretien au Figaro, le directeur général de la Société générale, Frédéric Oudot, assure que « nous ne sommes pas face à une nouvelle crise bancaire ». PAGE 27 ET 28



Ondes gravitationnelles: la découverte qui donne raison à Albert Einstein

Cent ans après la publication de la théorie de la relativité générale, des chercheurs ont apporté une nouvelle preuve de l'existence de l'espace-temps qui avait été prévue par l'illustre physicien. PAGE 14

Bienvenue sur le « Titanic » !

C'est rare qu'il est vrai - qui révélaient d'une fin de quinquennat médiocre, transpressive, et moule valent au clair, en secret pour leurs trucs. François Hollande a-t-il calculé, soupesé, suspendu, pour finalement à respecter les petits équilibres de la minuscule majorité qu'il lui reste. Et voilà donc Jean-Marc Ayrault, devenu semi-président après une expérience calamiteuse à Matignon, promu ministre des Affaires étrangères. Cela lui permettra évidemment de revenir à de meilleures dispositions à l'endroit du couple exécutif et l'empêchera par conséquent de distiller de méchantes petites phrases à l'approche de la présidentielle. Et renouvra à la table du Conseil des ministres trois Verts dits « indépendants » (Cressat, Plasson, Fournigault), qui ont la particularité de voter aux généraux le projet d'aéroport de Notre-Dame-des-Landes, ardemment soutenus par le nouveau patron du Quai d'Orsay. Là aussi, Hollande a cru à ce péché originel qu'on lui avait promis et qui se définit ainsi: « Inviter ensemble des pour et des contre, et les sentir... »

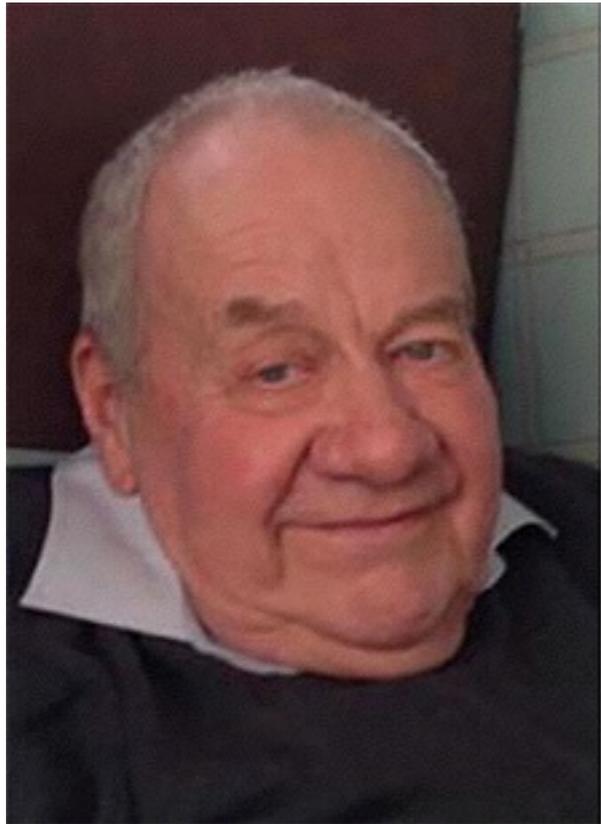
Il y avait mieux à faire

Les 17 Français Hollande n'a eu ni cette hardiesse ni ce jusseur. Le 20ème gouvernement, dont l'angle de glissement est un peu plus chaque jour, continuera donc de s'endormir indéfiniment jusqu'à la fin du quinquennat. Le plus surprenant, finalement, c'est que le chef de l'État ait osé à trouver des volontaires pour monter à bord.

MESSEIERS, J'Z AVANT LA SAINT-VALENTIN !



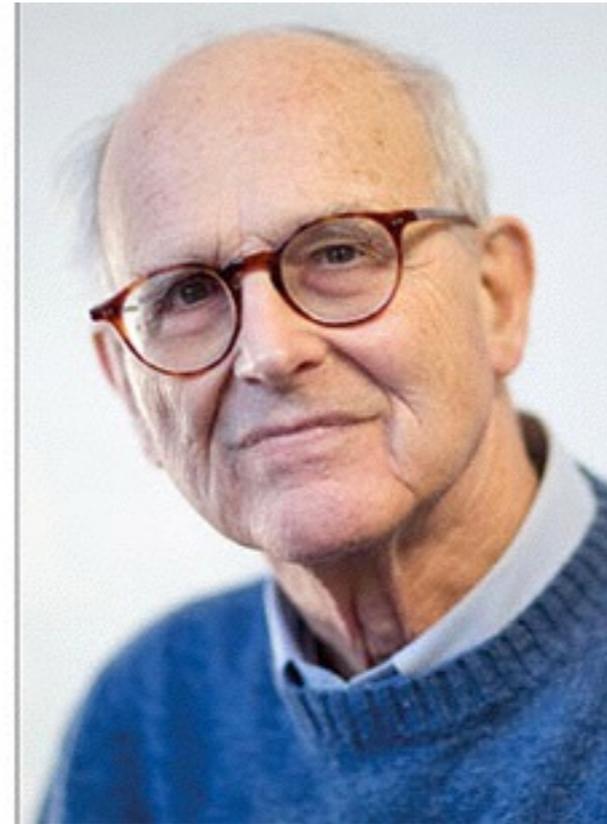
LIGO Founders



Ron Drever



Kip Thorne



Rai Weiss

- May 3, Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics
- May 12, Gruber Foundation Cosmology Prize
- June 1, Shaw Prize in Astronomy
- June 2, Kavli Prize in Astrophysics

Additional prizes to specific individuals, aLIGO engineering team



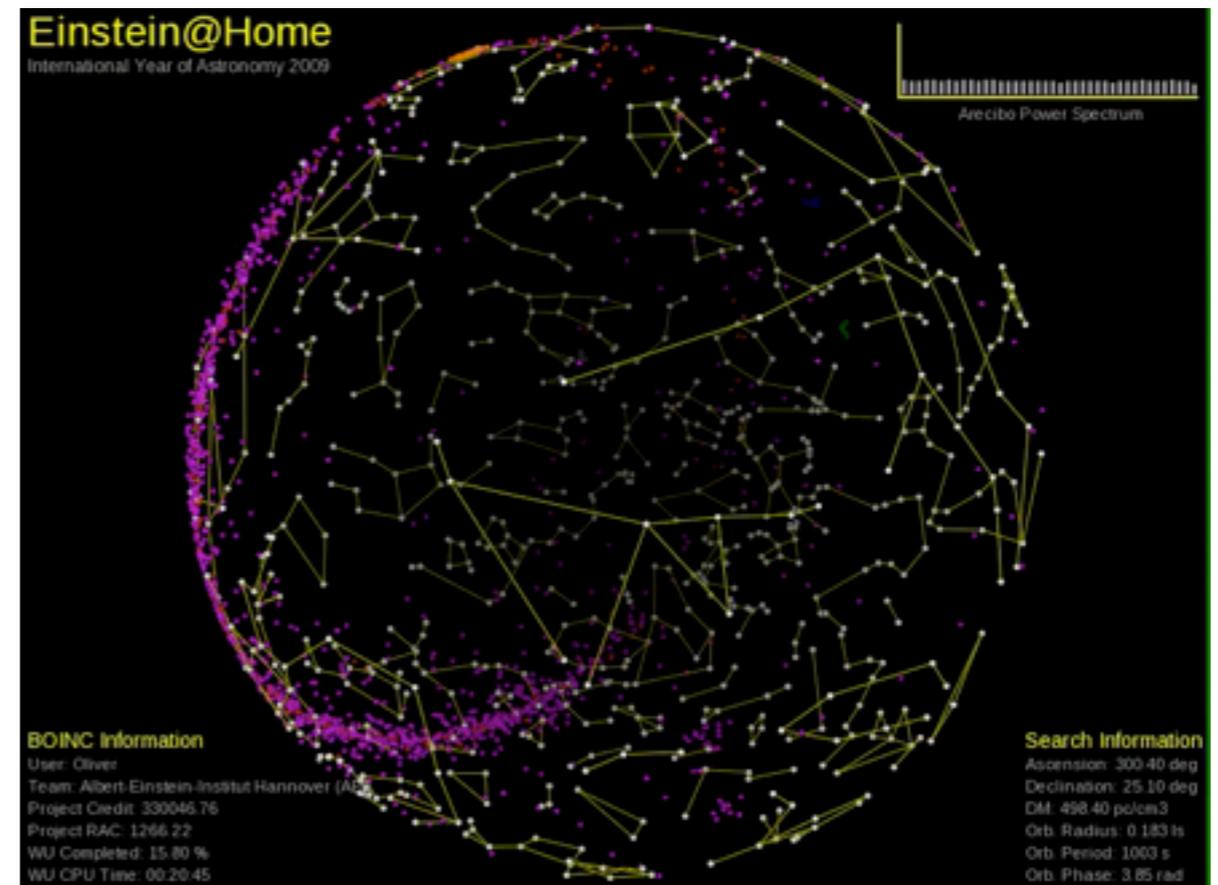
Outline

- On 14 September 2015, 4 days *before* starting its first observational run O1, Advanced LIGO recorded a strong gravitational wave burst
- Source unambiguous. In source frame:
merger of a 29 and 36 solar mass BH
- What did we see?
How do we know it is two black holes?
How can we be sure it is real?
What was going on “behind the scenes”?
What do we know about the system?
[Basic physics arguments: [arXiv:1608.01940](https://arxiv.org/abs/1608.01940)]
- Prospects for the future



Something about myself

- Worked on gravitational wave data analysis since mid-1990s
- About 40 people at AEI
- Atlas is the largest resource world-wide in the LIGO/VIRGO collaboration: 15,000 CPU cores, 2,500 GPUs, 10 PB, 1 MW
- Direct the Einstein@Home volunteer computing project
- Methods and technology also used for conventional (electromagnetic) astronomy: ~100 radio and gamma-ray pulsars discovered so far.





“The statistic that really struck me was that in the first 24 hours, not only was the page for your PRL abstract hit 380,000 times, but the PDF of the paper was downloaded from that page 230,000 times. This is far more hits than any PRL ever, and the fraction of times that it resulted in a download was unusually high. Hundreds of thousands of people actually wanted to read the whole paper! That is just remarkable.”

Robert Garistro, PRL editor

PRL 116, 061102 (2016)
Selected for a Viewpoint in Physics
PHYSICAL REVIEW LETTERS
week ending
12 FEBRUARY 2016

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](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

I. INTRODUCTION

In 1916, the year after the final formulation of the field equations of general relativity, Albert Einstein predicted the existence of gravitational waves. He found that the linearized weak-field equations had wave solutions: transverse waves of spatial strain that travel at the speed of light, generated by time variations of the mass quadrupole moment of the source [1,2]. Einstein understood that gravitational-wave amplitudes would be remarkably small; moreover, until the Chapel Hill conference in 1957 there was significant debate about the physical reality of gravitational waves [3].

Also in 1916, Schwarzschild published a solution for the field equations [4] that was later understood to describe a black hole [5,6], and in 1963 Kerr generalized the solution to rotating black holes [7]. Starting in the 1970s theoretical work led to the understanding of black hole quasinormal modes [8–10], and in the 1990s higher-order post-Newtonian calculations [11] preceded extensive analytical studies of relativistic two-body dynamics [12,13]. These advances, together with numerical relativity breakthroughs in the past decade [14–16], have enabled modeling of binary black hole mergers and accurate predictions of their gravitational waveforms. While numerous black hole candidates have now been identified through electromagnetic observations [17–19], black hole mergers have not previously been observed.

The discovery of the binary pulsar system PSR B1913+16 by Hulse and Taylor [20] and subsequent observations of its energy loss by Taylor and Weisberg [21] demonstrated the existence of gravitational waves. This discovery, along with emerging astrophysical understanding [22], led to the recognition that direct observations of the amplitude and phase of gravitational waves would enable studies of additional relativistic systems and provide new tests of general relativity, especially in the dynamic strong-field regime.

Experiments to detect gravitational waves began with Weber and his resonant mass detectors in the 1960s [23], followed by an international network of cryogenic resonant detectors [24]. Interferometric detectors were first suggested in the early 1960s [25] and the 1970s [26]. A study of the noise and performance of such detectors [27], and further concepts to improve them [28], led to proposals for long-baseline broadband laser interferometers with the potential for significantly increased sensitivity [29–32]. By the early 2000s, a set of initial detectors was completed, including TAMA 300 in Japan, GEO 600 in Germany, the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) in the United States, and Virgo in Italy. Combinations of these detectors made joint observations from 2002 through 2011, setting upper limits on a variety of gravitational-wave sources while evolving into a global network. In 2015, Advanced LIGO became the first of a significantly more sensitive network of advanced detectors to begin observations [33–36].

A century after the fundamental predictions of Einstein and Schwarzschild, we report the first direct detection of gravitational waves and the first direct observation of a binary black hole system merging to form a single black hole. Our observations provide unique access to the

^{*}Full author list given at the end of the article.

Published by the American Physical Society under the terms of the Creative Commons Attribution 3.0 License. Further distribution of this work must maintain attribution to the author(s) and the published article's title, journal citation, and DOI.

0031-9007/16/116(6)/061102(16)
061102-1
Published by the American Physical Society



Gravitational Waves 1916

June 1916

Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen.

(It follows that the gravitational field propagates at the speed of light. In connection with these general solutions, we'll investigate gravitational waves and their sources.)

$$L = \frac{G}{5c^5} \left(\frac{d^3}{dt^3} Q_{ab} \right) \left(\frac{d^3}{dt^3} Q_{ab} \right)$$

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Sber Preuss-Akad. Wiss. 1916, I

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen $\gamma_{\mu\nu}$, welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist $\delta_{\mu\nu} = 1$ bzw. $\delta_{\mu\nu} = 0$, je nachdem $\mu = \nu$ oder $\mu \neq \nu$.

Wir werden zeigen, daß diese $\gamma_{\mu\nu}$ in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik.

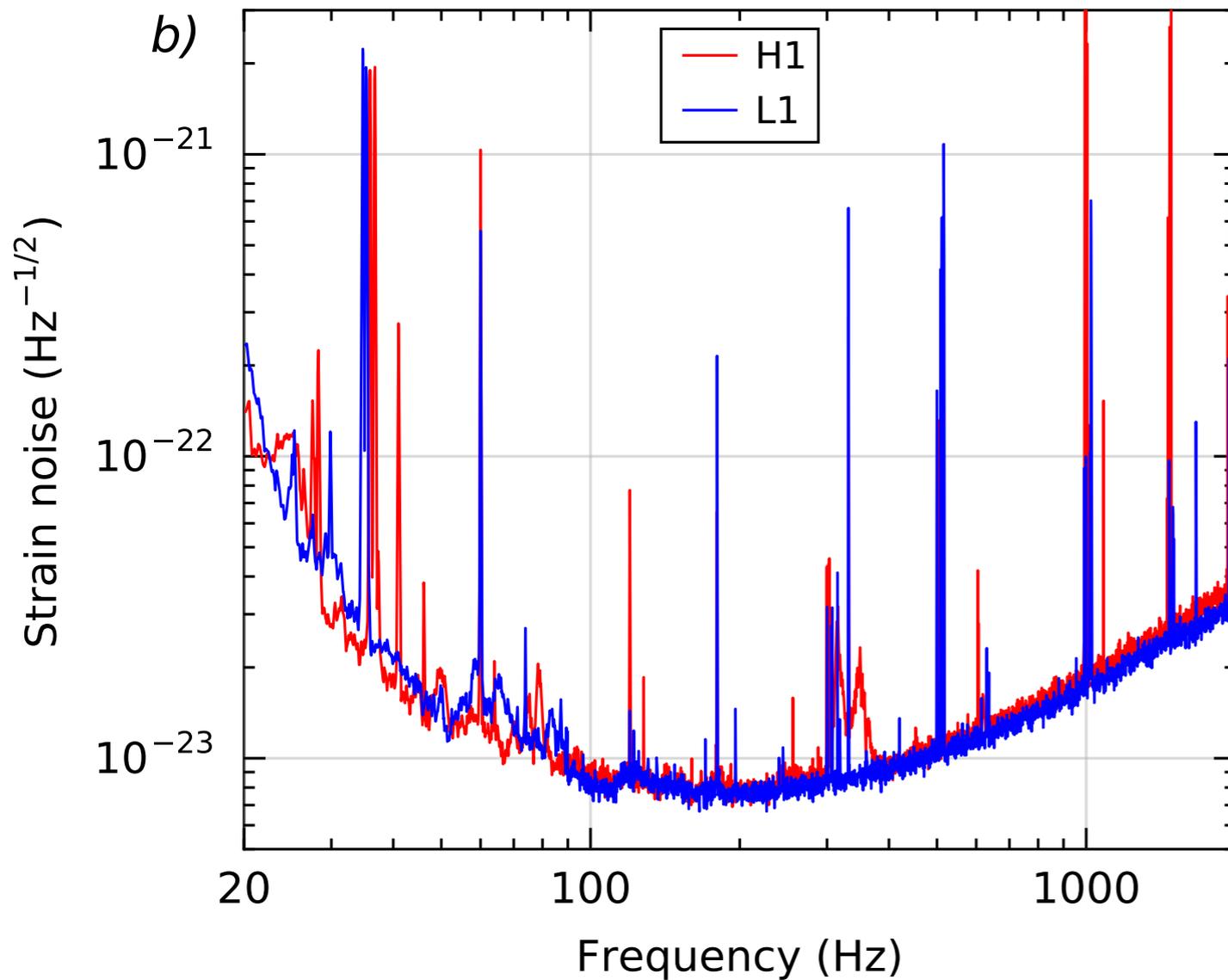
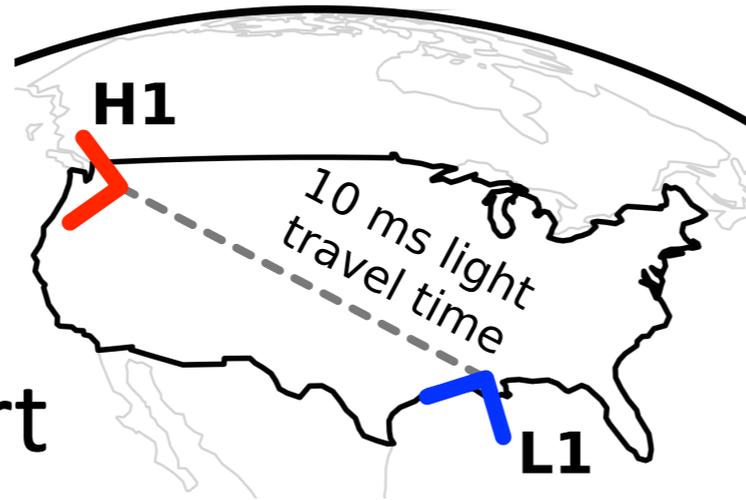
Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung $g = |g_{\mu\nu}| = -1$ für die Berechnung der Felder in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen DE SITTER, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihn früher gegeben hatte¹. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemein invarianten Feldgleichungen.

¹ Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.



Advanced LIGO Detectors

Livingston &
Hanford
3000 km apart



- Sensitive from 30 to 2000 Hz
- Strain $h = \Delta L / L$
- In 100 Hz band at minimum, r.m.s. noise $h \sim 10^{-22}$
- O1 noise a factor ~ 3 above design sensitivity



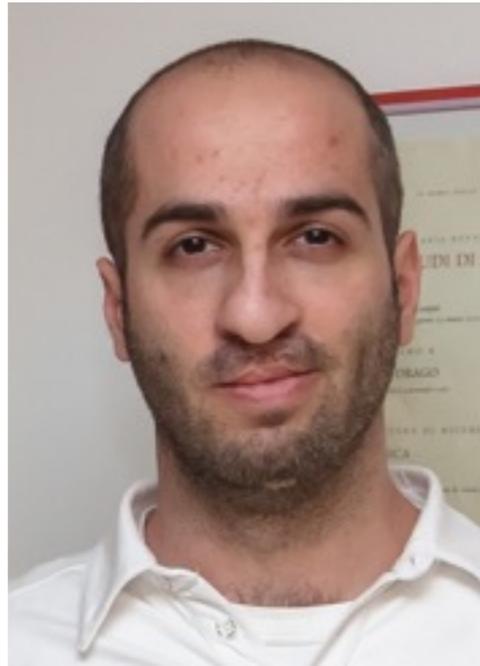
GW150914



- Engineering run had begun 17 August 2015, for tuning, calibration, injection tests, and noise characterisation studies.
- First observing run O1 (“science operations mode”) scheduled to start on **18 September 2015**
- **VIRGO** not operating (under construction)
GEO-600 lost lock 10 minutes before (AND not sensitive at low frequencies)
- **Event before O1 start, at 09:50 UTC on 14 September 2015**
02:50 at LIGO Hanford, WA
04:50 at LIGO Livingston, LA
11:50 in Germany



AEI Hannover, September 14, 2015



Marco Drago

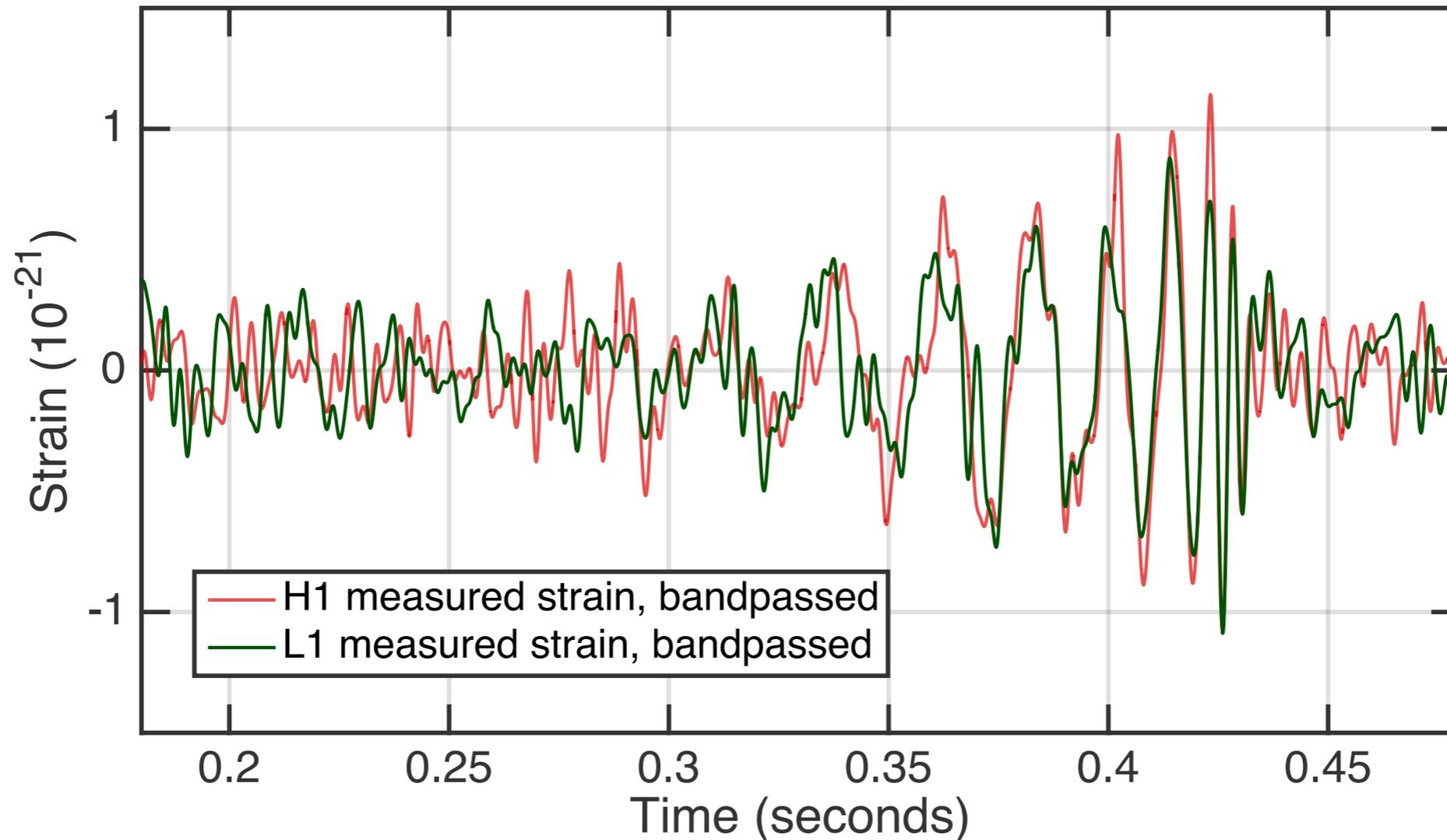


Andrew Lundgren

- Monday morning 11:50
- Coherent waveburst pipeline running at Caltech, event database had ~1000 entries
- Marco and Andy checked injection flags and logbooks, data quality, made Qscans of LHO/LLO data.
- Called LIGO operators: “everyone’s gone home”
- At 12:54, Marco sent an email to the collaboration, asking for confirmation that it’s not a hidden test signal (hardware injection)
- Next hours: flurry of emails, decision to lock down sites, freeze instrument state



The Chirp



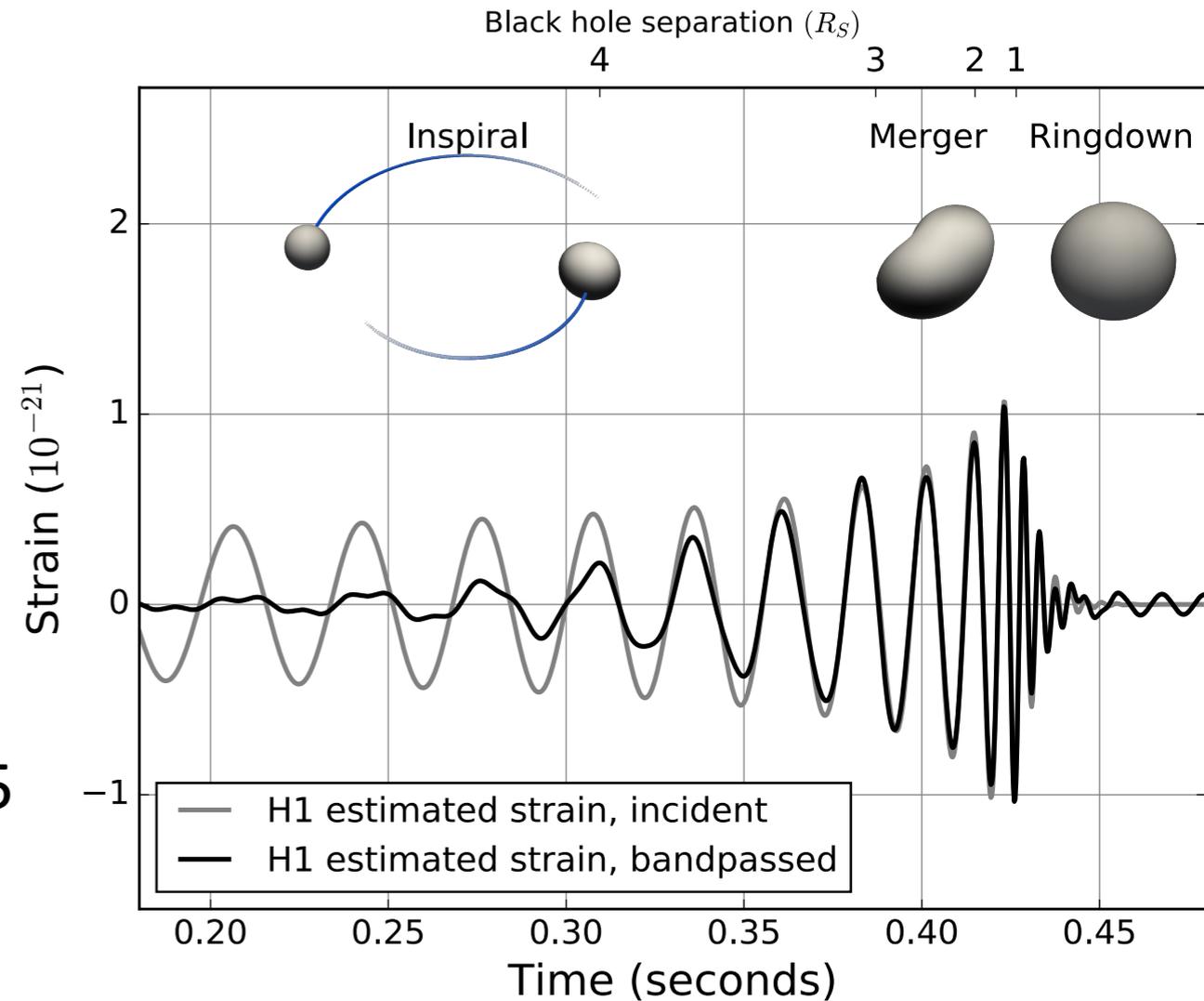
- Bandpass filtered 35-350 Hz, some instrumental and calibration lines removed
- Hanford inverted, shifted 7.1 ms earlier
- Signal visible to the naked eye: ~ 200 ms
- “Instantaneous” SNR ~ 5 , optimal filter SNR ~ 24



Can only be two black holes!

- One orbit => two gravitational wave cycles
- Newtonian approximation =>

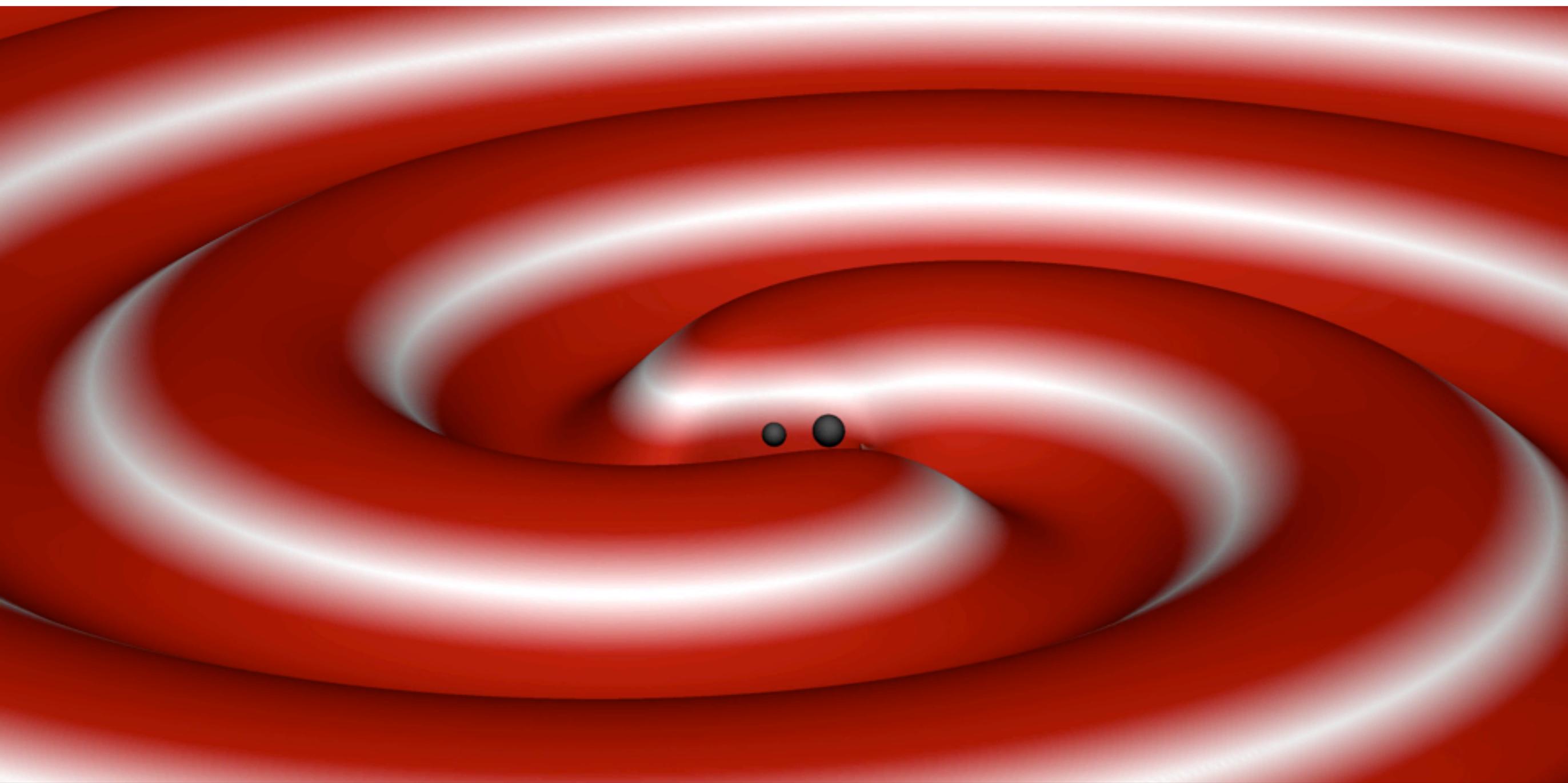
$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G} \left[\frac{5}{96} \pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f} \right]^{3/5}$$
- Chirp mass $\mathcal{M} \sim 30 M_\odot$
- If equal: $m_1 = m_2 \sim 35 M_\odot$
=> Sum of Schwarzschild radii $\geq 206\text{km}$
- At peak $f_{\text{GW}} = 150 \text{ Hz}$, orbital frequency = 75 Hz separation of Newtonian point masses 346km
- **Ordinary stars** are 10^6 km in size (merge at mHz). **White dwarfs** are 10^4 km (merge at 1 Hz). They are too big to explain this!
- **Neutron stars** are also not possible:
 $m_1 = 4 M_\odot \Rightarrow m_2 = 600 M_\odot$
=> Schwarzschild radius 1800km => too big!



**Only black holes
are sufficiently
massive *and* compact!**



The Movie



- Alessandra Buonanno and postdocs Sergei Ossokine and Roland Haas, with the SXS Collaboration



Luminosity Distance Estimate

- Schwarzschild radius ~ 200 km
- Metric strain h is order $h \sim 0.1$ at Schwarzschild radius
- Strain h fall off like inverse of distance d
- At detector, maximum metric perturbation $h \sim 10^{-21}$
- This implies a distance
 - $d \sim 10^{20} \times 200$ km
 - $\sim 2 \times 10^{25}$ m
 - $\sim 2 \times 10^9$ light years (correct to factor of two)



Real? Or a detector artifact?

- Instruments in normal operation and stable since September 12th (apart from deliberate intervention)
- This instrument can see such sources at 6 times the distance => $6 \times 6 \times 6 \sim 200$ times the rate at initial LIGO instruments
- Last scientists left sites 2 hours (LHO) and 15 minutes (LLO) before the event. Operators only.
- Waveform does not resemble instrumental glitches or artefacts
- Susceptibility to radio, acoustic, magnetic, seismic and other external disturbances measured. These external disturbances are monitored: can not explain more than 6% of the observed GW amplitude
- Was not an accidental or malicious hardware injection: recorded control loop signals permit reconstruction of the actuators: no fake signal was added



Robert Schofield and Anamaria Effler, departed the LLO site at 04:35am **15 minutes before the event**

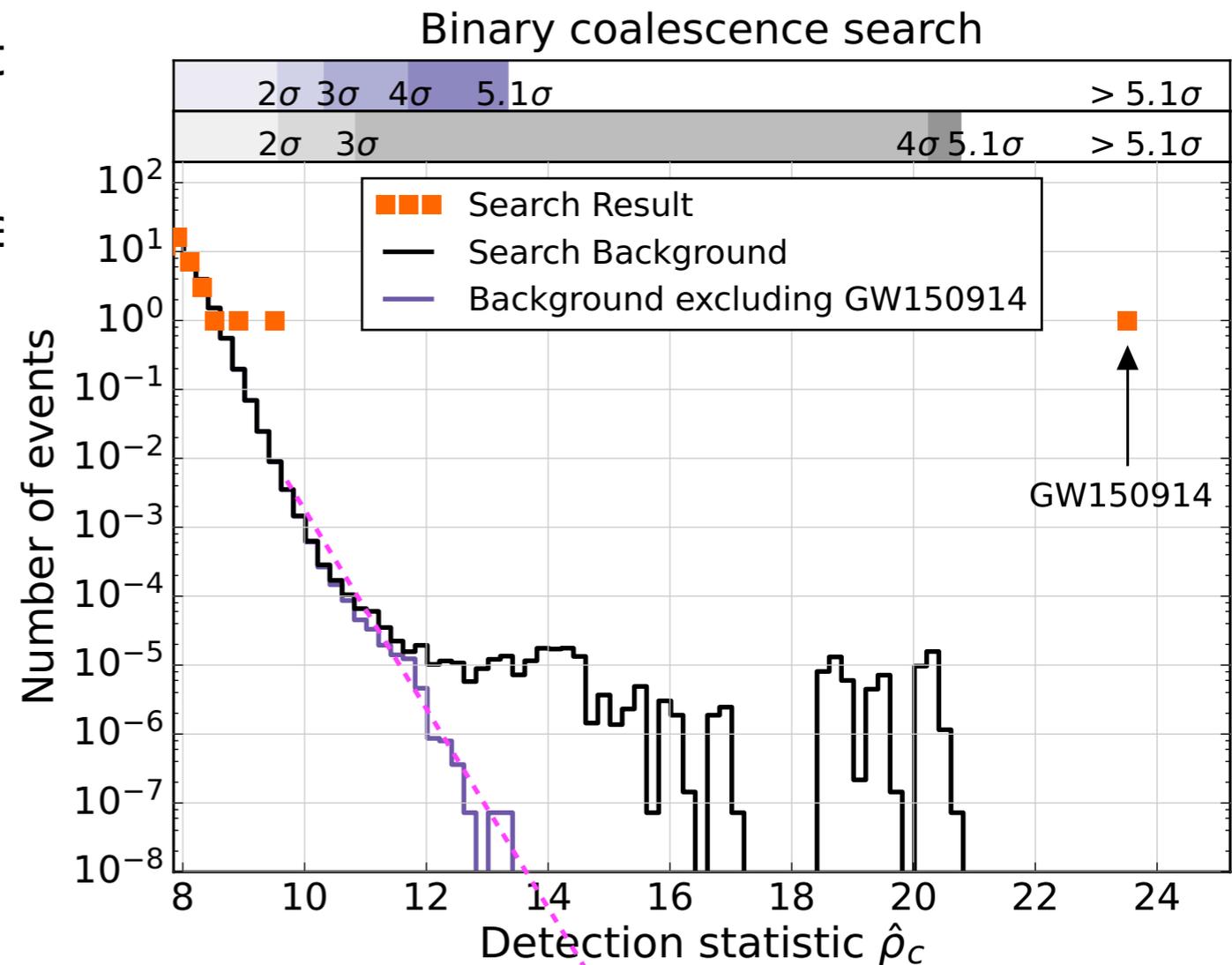


Stefan Ballmer and Evan Hall, departed the LHO site soon after midnight, **2 hours before the event**



False Alarm Probability

- To avoid statistical bias, tuning carried out before discovery, with pre-discovery data
- Orange squares: highest SNR events in the first 16 days of data collected (12 Sept - 20 Oct)
- Estimate background by shifting instrumental data in time at one site in 0.1 second increments ($\gg 10$ msec light-travel time) approximately 2×10^6 times.
- Generate 608,000 years of “artificial” data, search for events
- Including trials factor, false alarm rate < 1 in 203,000 years
- For a Gaussian process, this is $> 5.1\sigma$
- Real false alarm rate much less! **We got lucky, could have confidently detected it 70% farther away.**



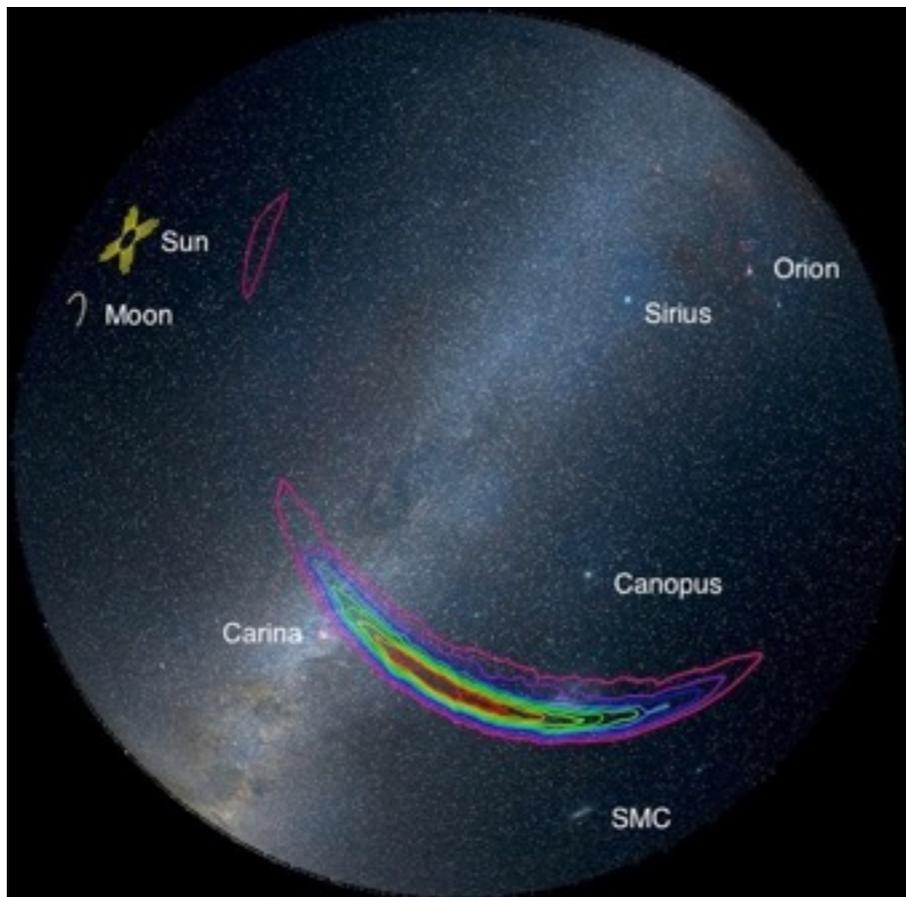


Parameters from fitting (in source frame)

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

- Radiated energy: $3M_{\odot}$ (± 0.5)
- Peak luminosity: $3.6 \times 10^{56} \text{ erg/s}$ ($\pm 15\%$): 200 solar masses per second! (About $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ at detector, $\sim 10^{12}$ millicrab!)
- Spins s_1 and s_2 only weakly constrained: not extreme. Consistent with merger of two non-spinning black holes.
- Final spin of 0.67 is about 6000 rpm

See talk by Vivian Raymond





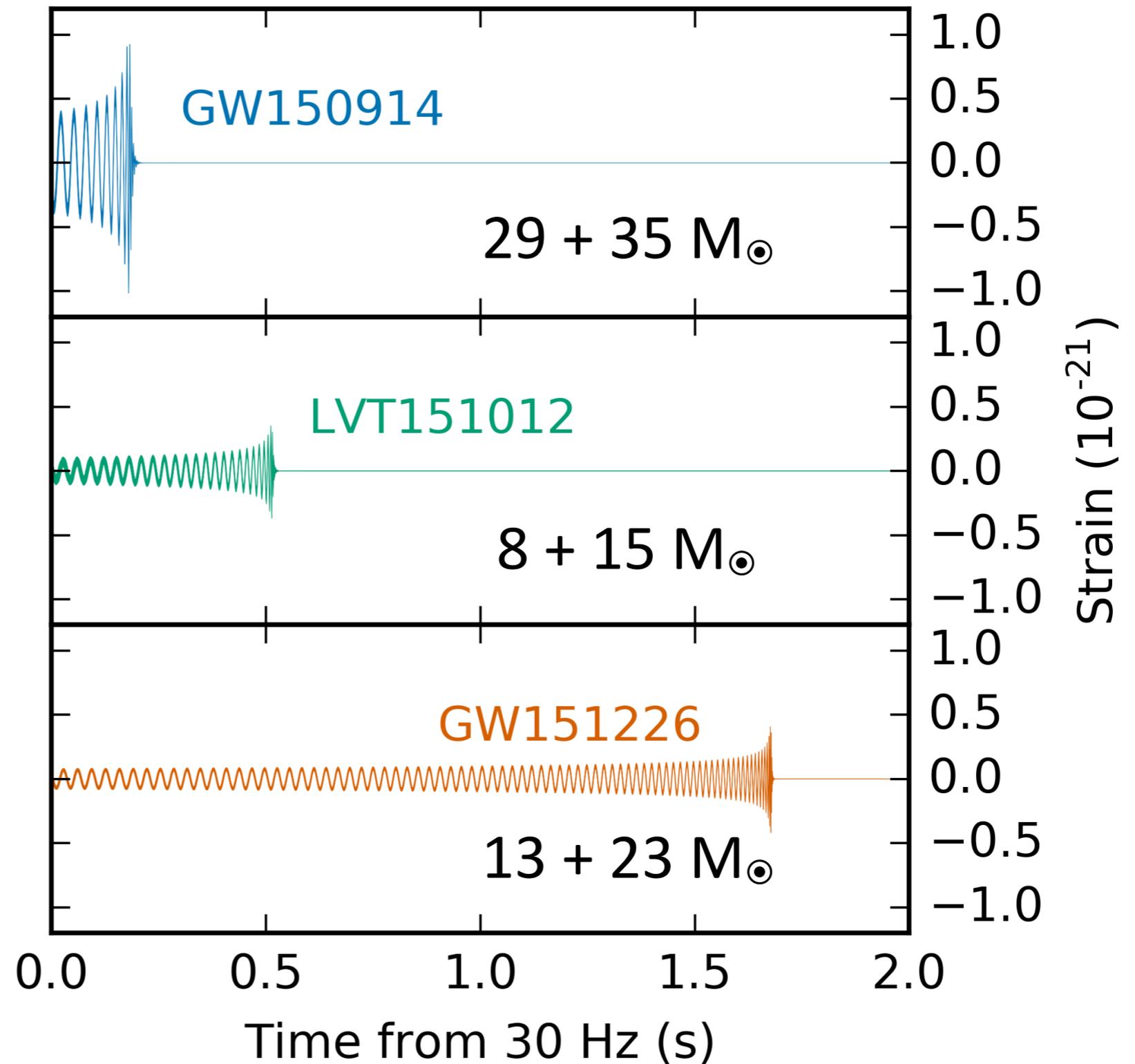
Things I didn't talk about

- Testing GR: everything consistent. New ability to test GR in the strong field dynamic regime. **See talk by Chris Van Den Broeck**
- Second LIGO detection, GW151226
Astrophysical implications: metallicity during star formation that led to these BH could not have been too large. (Broad) limits on rate per cubic Gpc. **See talk by Edward Porter**
- Stochastic “background” from more distant weaker sources: potentially detectable when we reach design sensitivity. **See talk by Giancarlo Cella**
- Report of a weak gamma-ray burst (GBM onboard Fermi satellite) 0.4 seconds after The Event. **See talk by Leo Singer**
- Other potential LIGO sources of gravitational waves. **See talk by Graham Woan**
- Searches for gravitational waves with other instruments and in other frequency bands (LISA, Pulsar Timing Arrays, ...). **See talk by Scott Hughes**



Binary Black Holes in O1

Talk by
Edward Porter





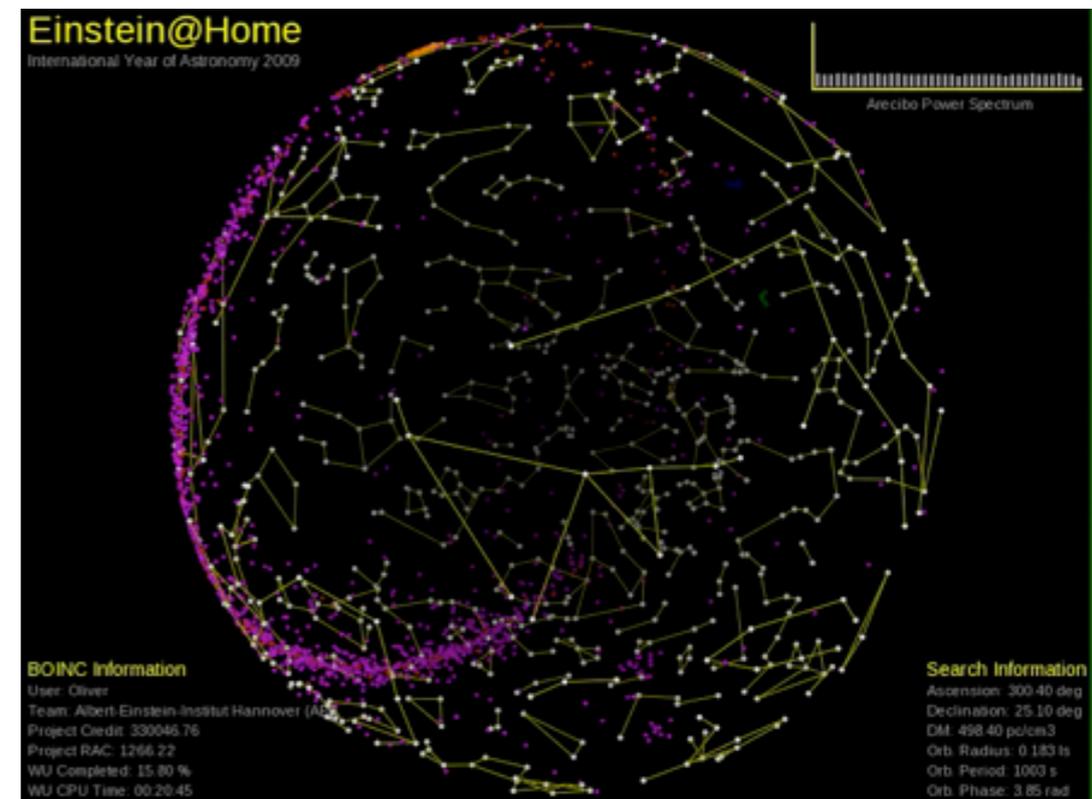
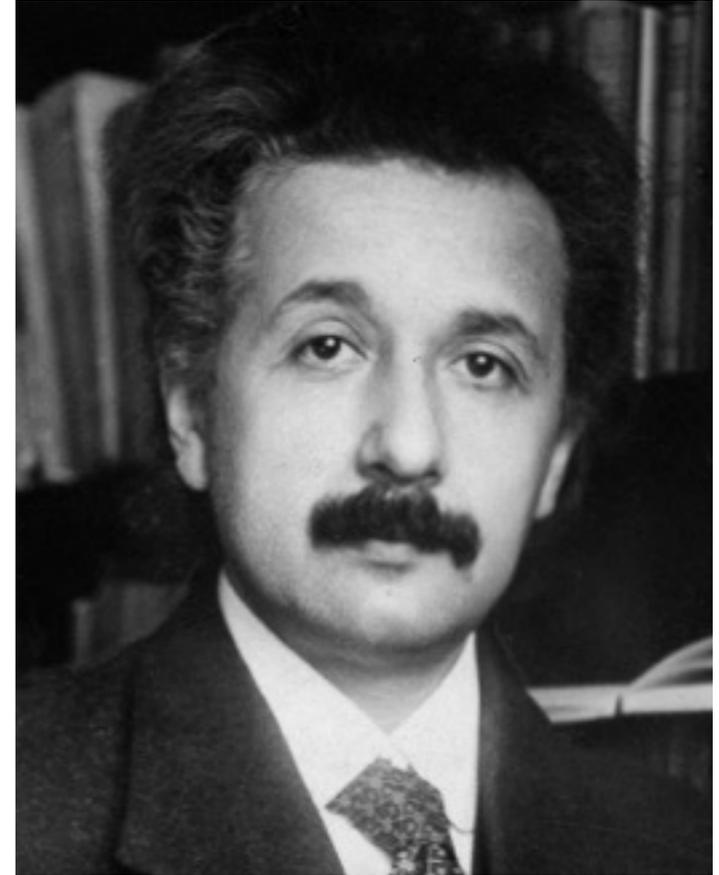
20016-18: a “Golden Age” of GW astronomy

- Next Advanced LIGO Engineering Run starts on 29 September
Second observing run O2 starts about four weeks later
30% strain sensitivity improvement, increase observable volume by a factor of 2.4. **~10 events total**
VIRGO will join at the end, adding better pointing and polarization information
- Advanced LIGO O3 run will start in 2017. Additional sensitivity increase: one event every few days for a year: **~100 events total**
- Within 3 years, we will know the mass and spin distribution of these binary black hole sources
- Expect at least one event strong enough to directly determine the final mass and spin and test the area theorem



Conclusions

- We can detect gravitational waves **directly** (tracking amplitude and phase)
- Existence of stellar mass black hole binaries established (not visible any other way!). Will be our dominant source.
- A golden age for GW astronomy is coming. We will go from 2 detections to 10 to 100 in the next few years.
- Other signal sources (NS/NS, NS/BH, CW, or the unexpected. Please sign up for Einstein@Home





Related TeVPA Talks

- ➔ • **Giancarlo Cella**, *The search for a stochastic background of gravitational waves*
- ➔ • **Edward Porter**, *The detection of binary black holes in Advanced LIGO's first scientific run*
- ➔ • **Vivian Raymond**, *Parameter inference for compact binaries with the gravitational-wave observatory Advanced LIGO*
- ➔ • **Leo Singer**, *Advanced LIGO First Light: Multimessenger Astrophysics at the Birth of Gravitational-Wave Observatory*
- ➔ • **Chris Van Den Broeck**, *Tests of general relativity with gravitational waves*
 - **Graham Woan**, *Searches for continuous gravitational waves in the advanced detector era*