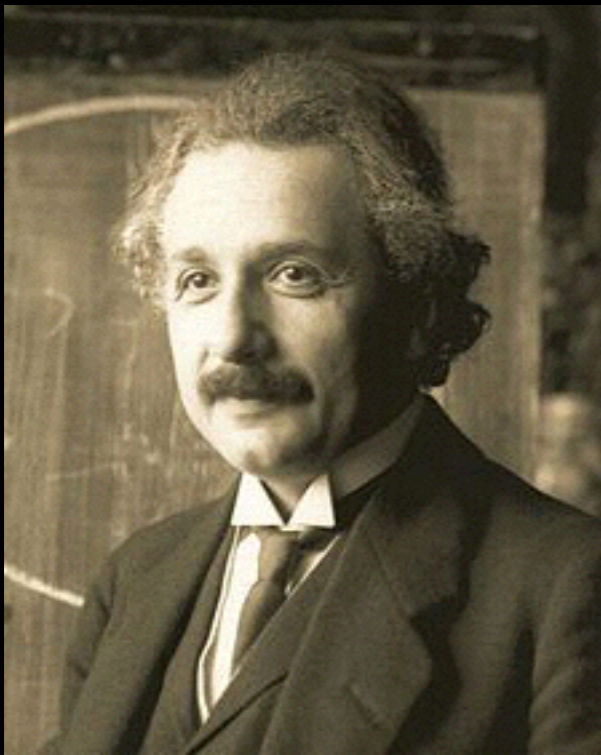


アインシュタインが予言して100年 ついにとらえた重力波



真貝寿明 (大阪工業大学)

しんかい ひさあき



アインシュタインが予言して100年 ついにとらえた重力波

2016年2月，LIGOが重力波を初めて検出した，と発表した



四国新聞だけ
ちがった... 残念 (笑)

重力の正体は？



<http://hikingartist.com/>

「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = F$$

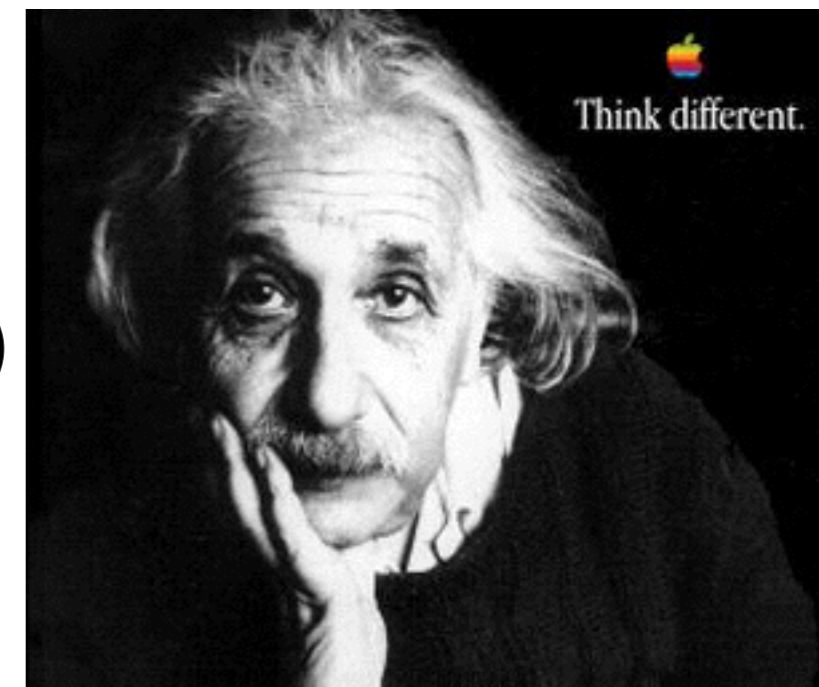
「時空のゆがみだ」

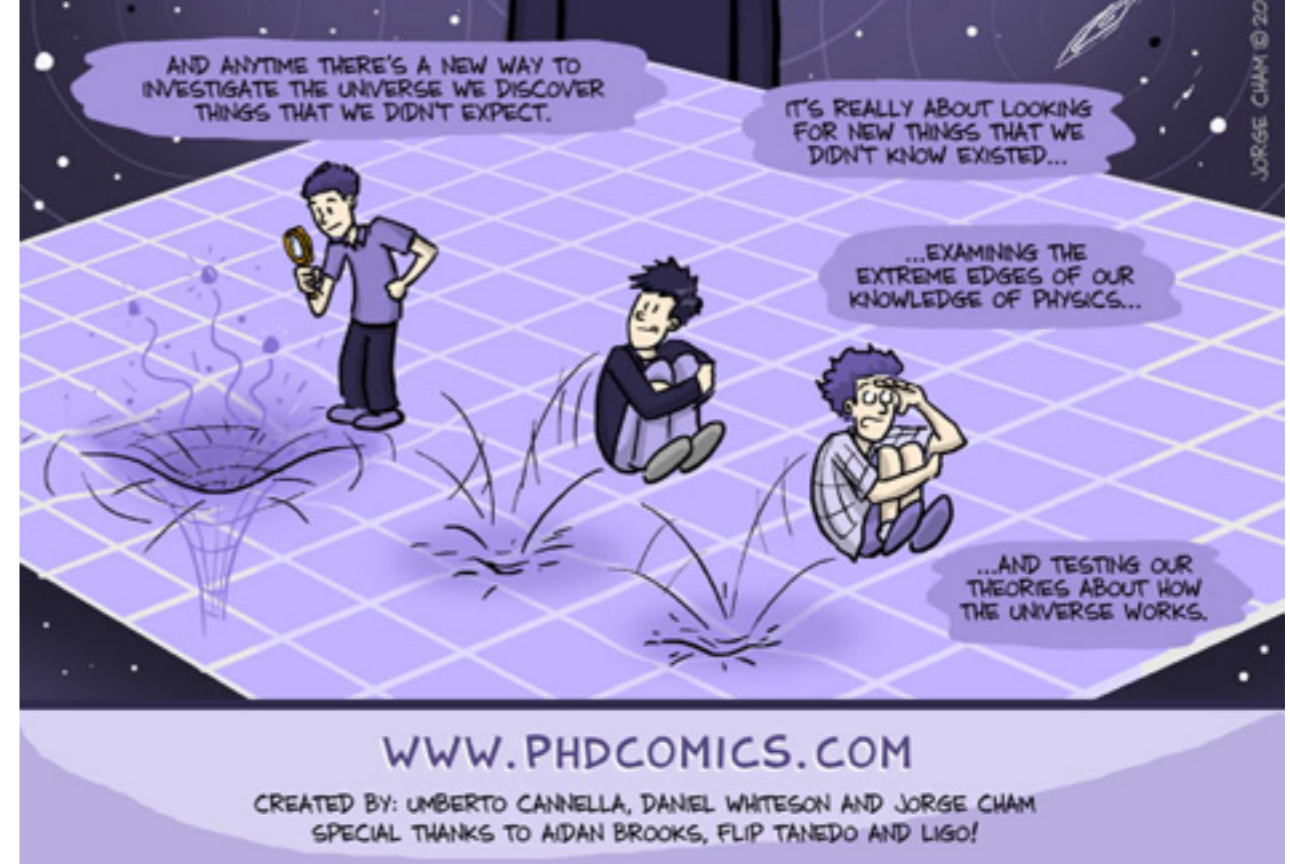
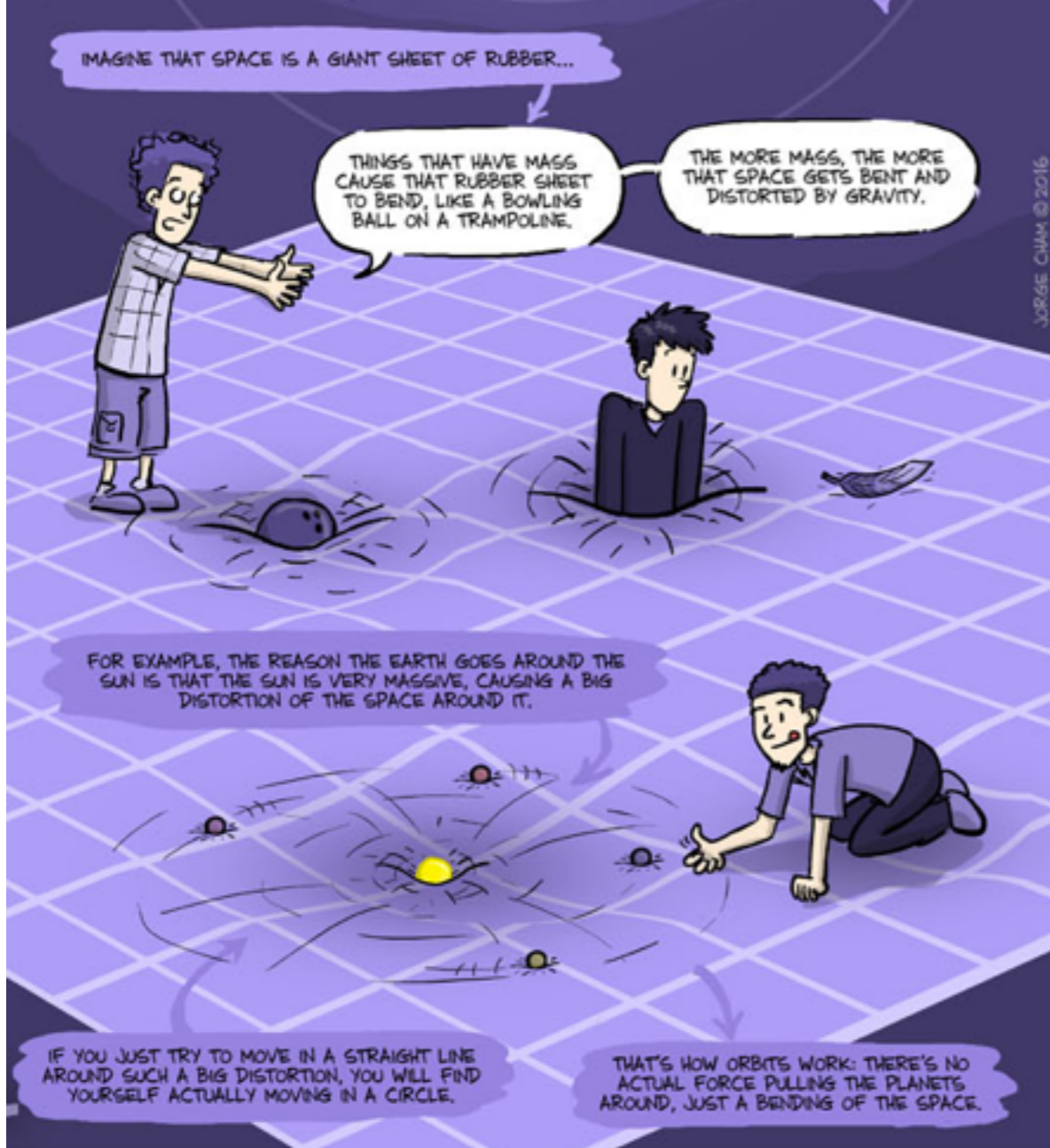
(アインシュタイン, 1915)

一般相対性理論

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

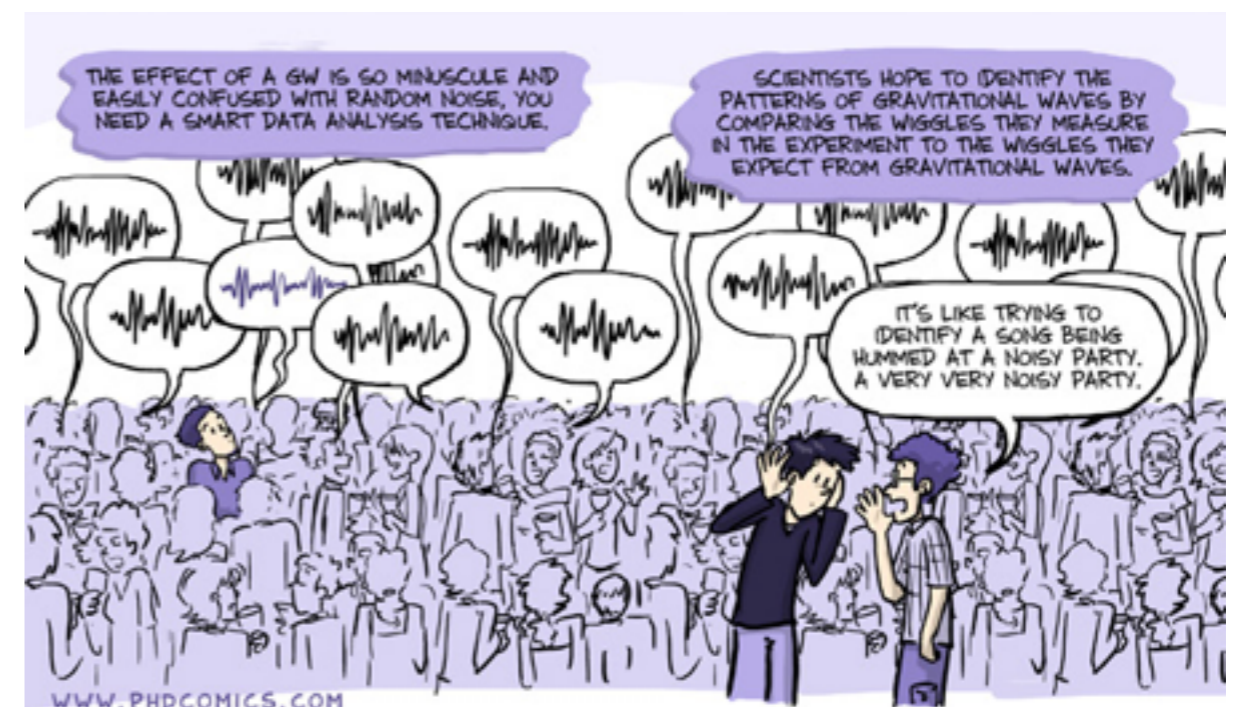
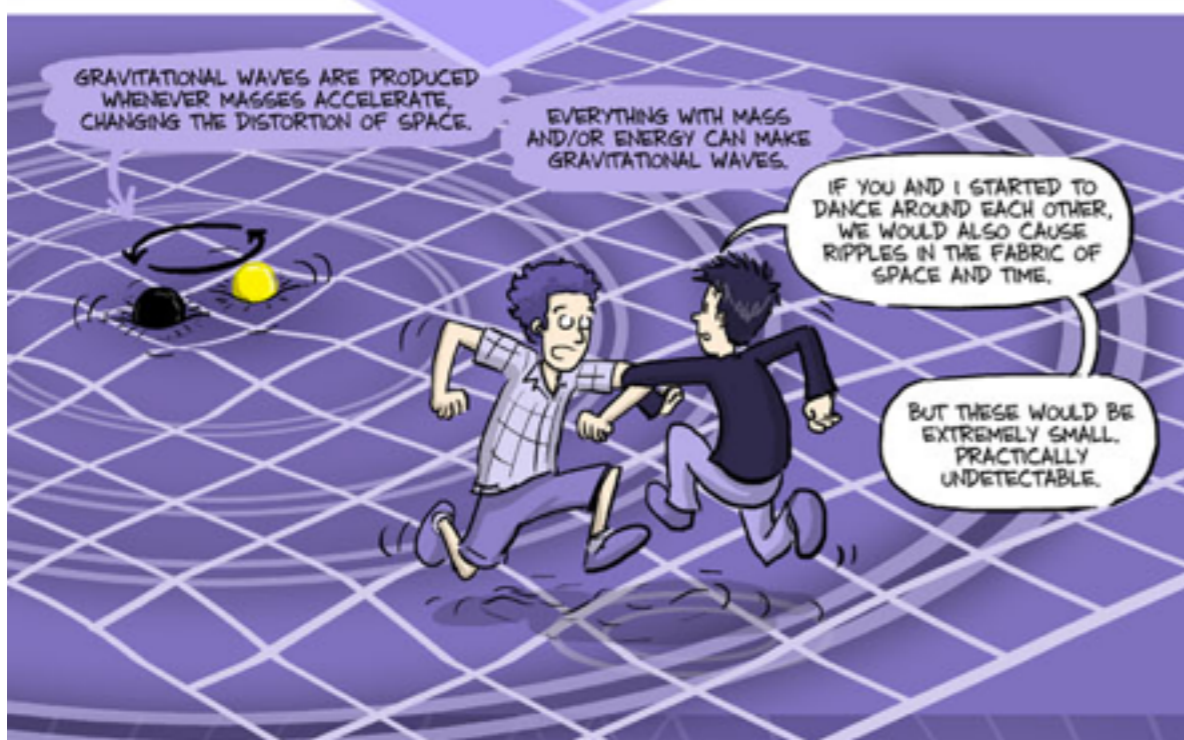
$$\frac{d^2 \xi^\mu}{d\tau^2} = R^\mu{}_{\nu\rho\sigma} \frac{d\xi^\nu}{d\tau} \frac{d\xi^\rho}{d\tau} \xi^\sigma$$





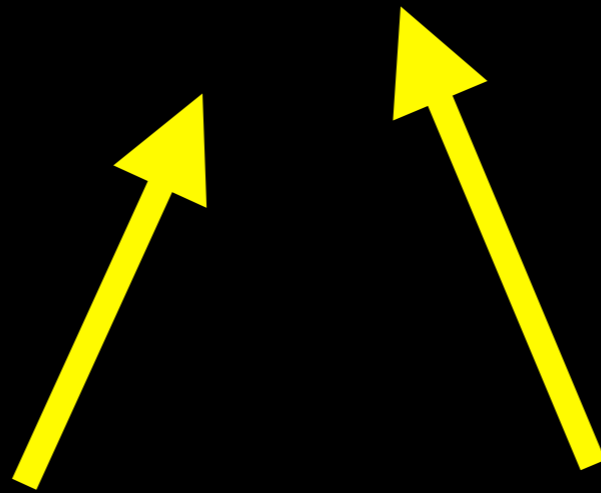
www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”



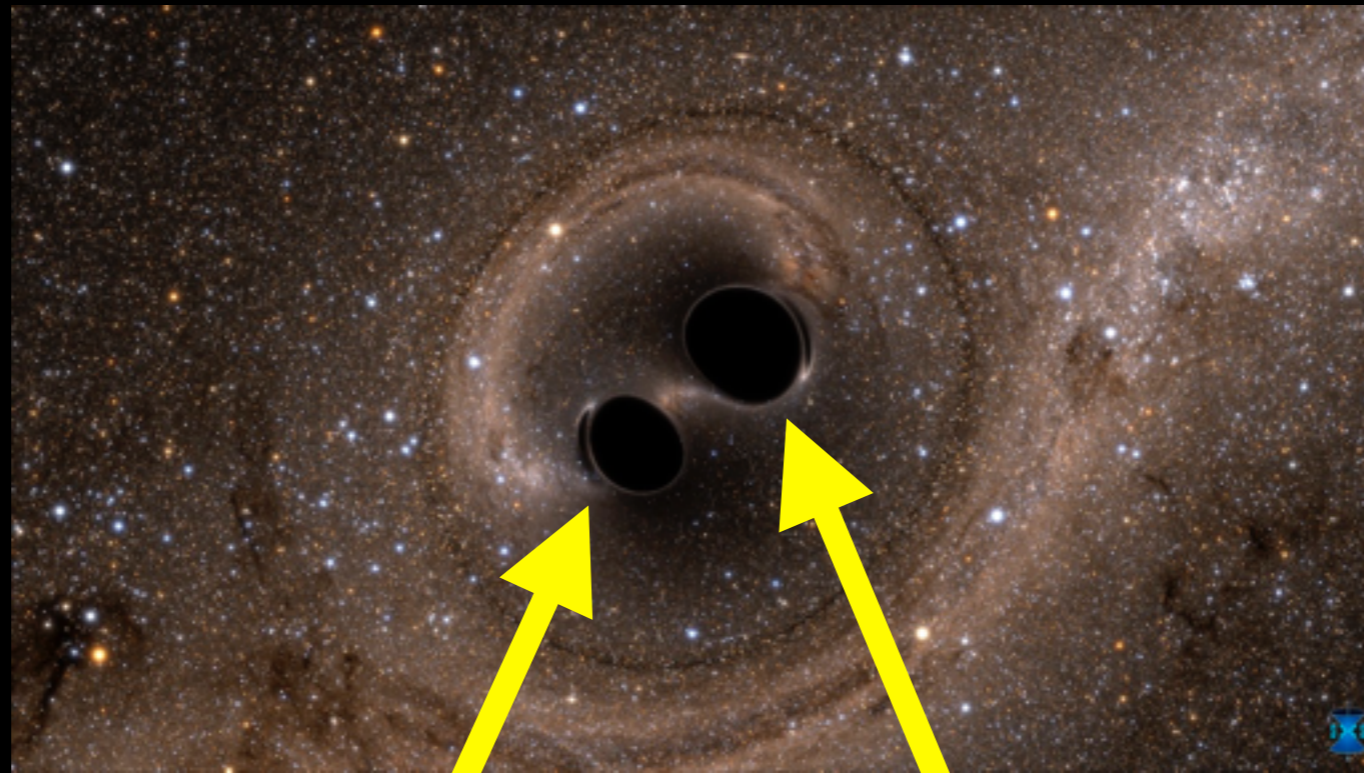
ブラックホール

= 光も抜け出せない重い重い重い星



ブラックホール

= 光も抜け出せない重い重い重い星



天の川銀河 (our Galaxy)

THE MILKY WAY

NATIONAL GEOGRAPHIC

How far from Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or shed their outer layers as beautiful planetary nebulas, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may be a black hole, a region so dense that not even light can escape its gravitational pull. All objects in the Milky Way orbit the galactic center, much like planets in Earth's solar system revolve around the sun. But the scale is staggering: Light from a star at one edge of the galaxy takes about 100,000 years to reach the opposite side.



1 **Galactic structure**

GUIDE TO THE GALAXY

For beyond the galaxy disk, yet drawn by its gravity, some stars and planetary nebulas roam the galaxy halo. Regions of dark matter—regions that fall through its gravitational effects—stretch beyond that.

Year clouds of interstellar dust block much of our night sky view of the Milky Way, which from our position in the flat galactic disk, appears as a hazy band of light. Interstellar nebulas can see through the dust to reveal the galaxy's structure.

Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.

2 **Coordinate system**

A TURBULENT HEART

A graph based on a radio survey reveals the intergalactic structure of interstellar gas in the inner part of our galaxy. Gas swirling away from Earth (top half) and toward Earth (bottom half). The diagram gas appears white; red shows blue.

Massive amounts of energy are released near the center of the Milky Way, producing

shockwaves that race along rapid paths (red lines), illuminating

neighboring gas clouds. Profound

energy waves cause gas to

condense, a radio image details a

series of hot gas that is falling

toward what may be a black

hole some 2.6 million times as

massive as the sun.

This computer-generated image of the Milky Way—our perspective of a 3-D model—incorporates the actual positions of hundreds of thousands of stars and nebulas.

- Stellar star cluster
- Interstellar gas and dust
- Nebula
- Star-forming region
- Stellar bulge
- Stellar bulge in center
- Star-forming region

PLANETARY NEBULA NGC 6

Earth's habitability on the Milky Way depends on the balance of interstellar dust and star clusters. The dust shields our planet from the harmful radiation of nearby stars, while the stars provide the energy needed for life. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

galaxy, including dark matter

rich in interstellar dust that shields our planet from the harmful radiation of nearby stars, while the stars provide the energy needed for life. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

stars, light from the

hot star is absorbed by the dust, heating it and causing it to glow. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

visible light from the

Multicolor image of the Planetary Nebula NGC 6, showing the different colors of the gas and dust. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

moving stars may have

shaped this surprising pattern. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

in that location

interstellar dust and gas. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

dark, dusty interstellar

clouds of hydrogen gas and dust. The Planetary Nebula NGC 6 is a classic example of a ring of gas and dust that has been ejected from a star.

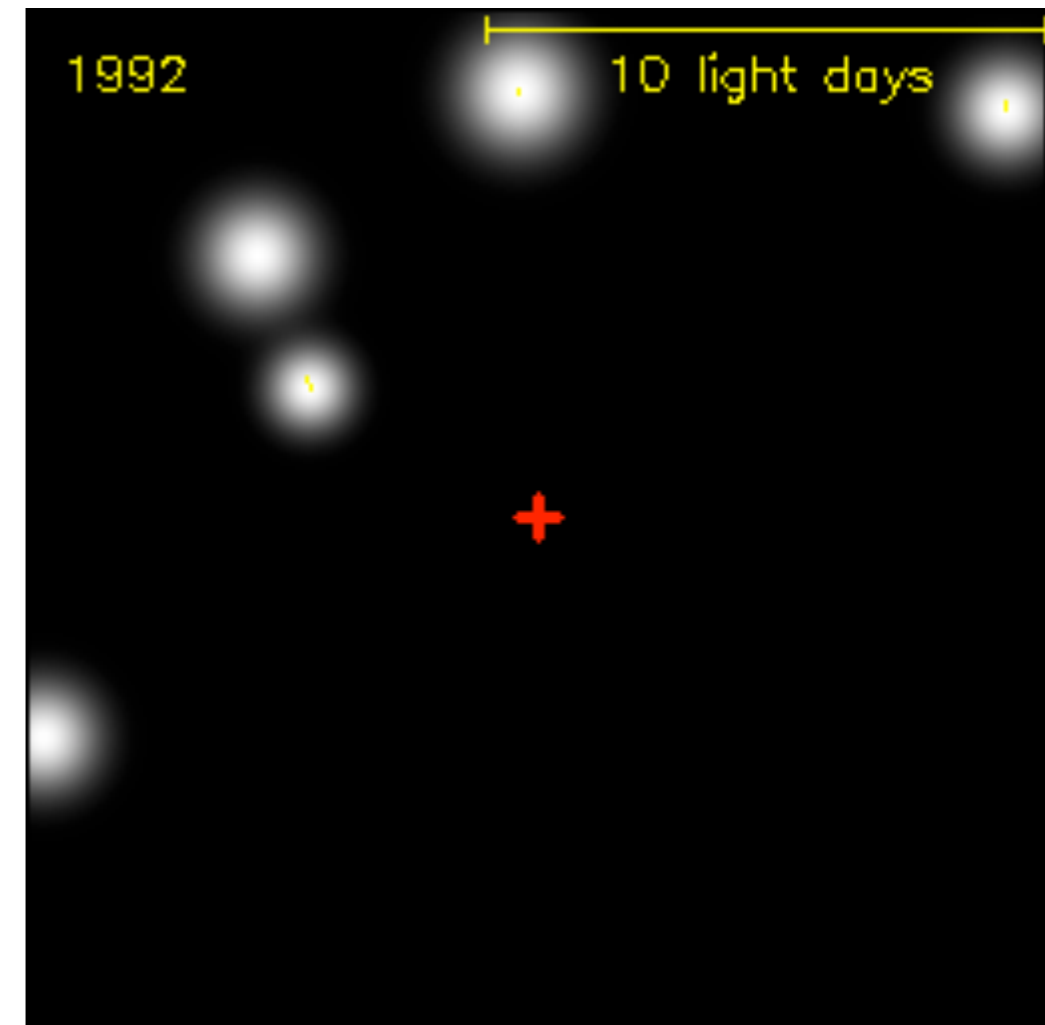
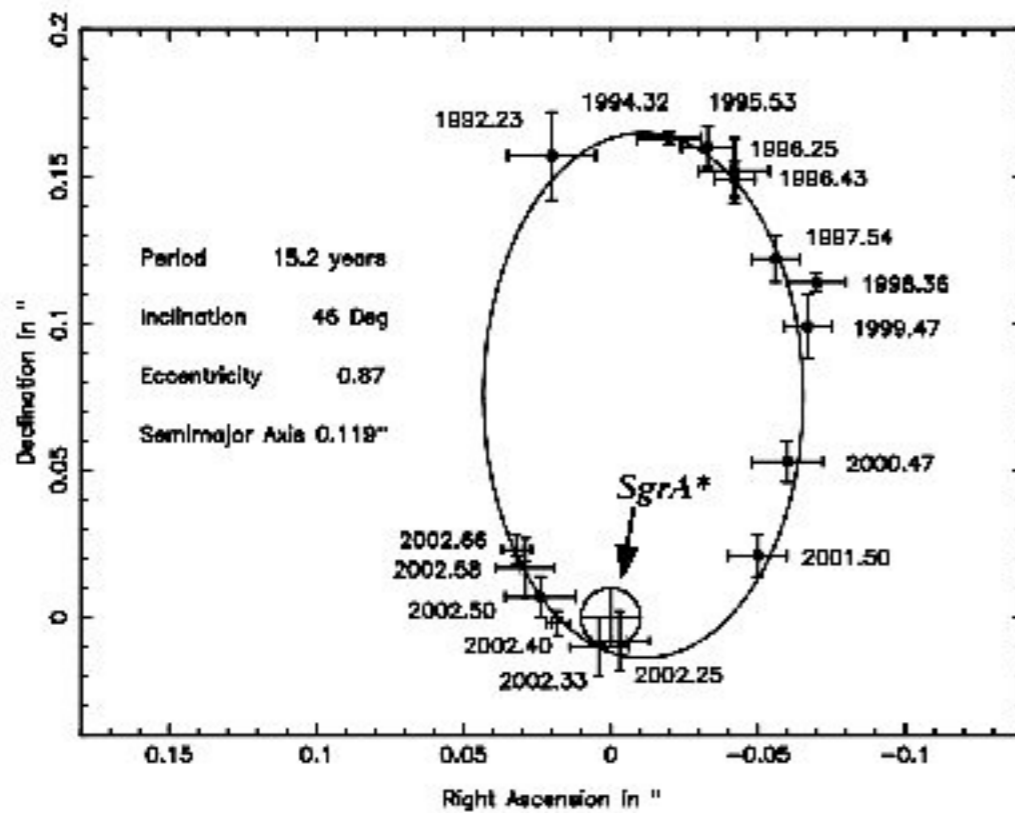
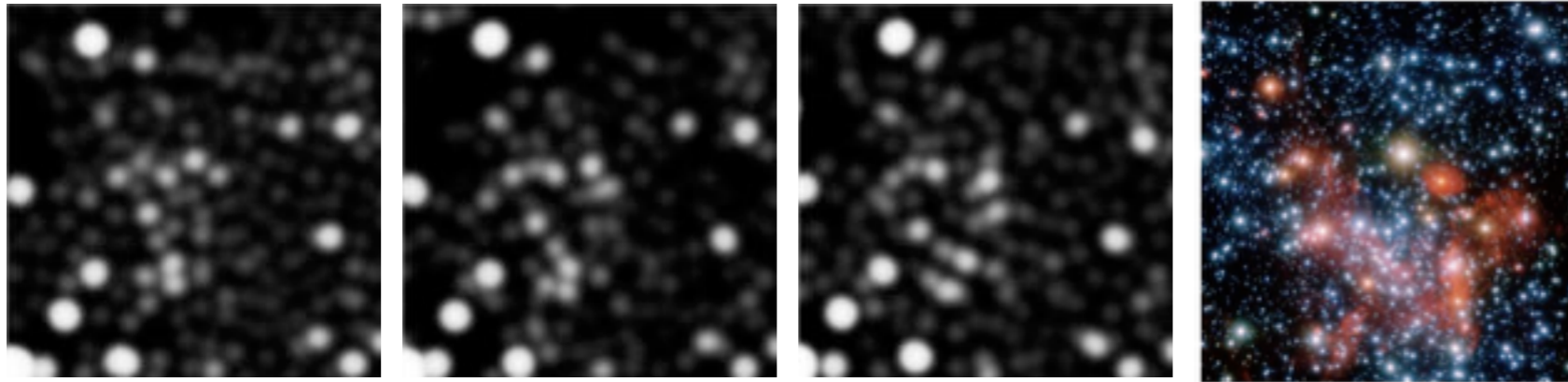
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

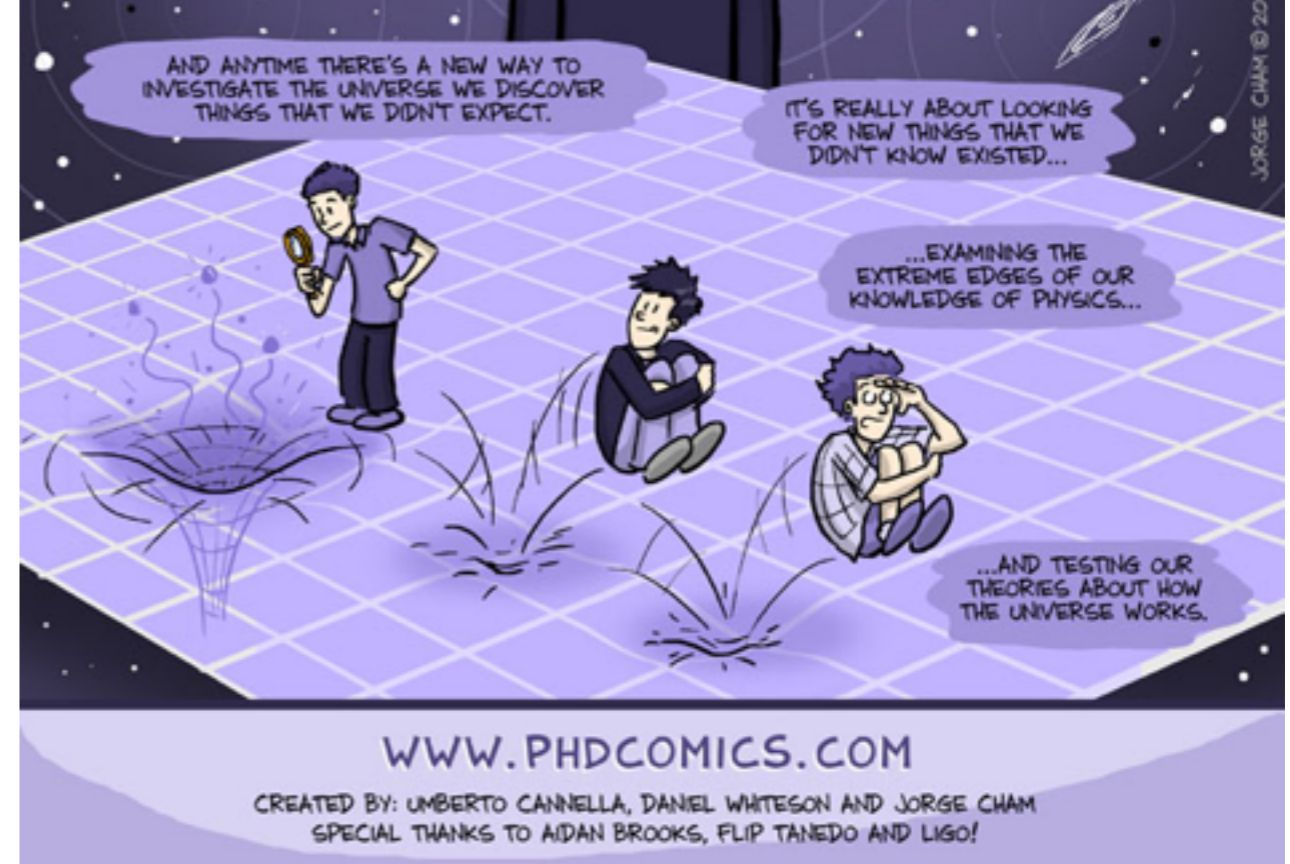
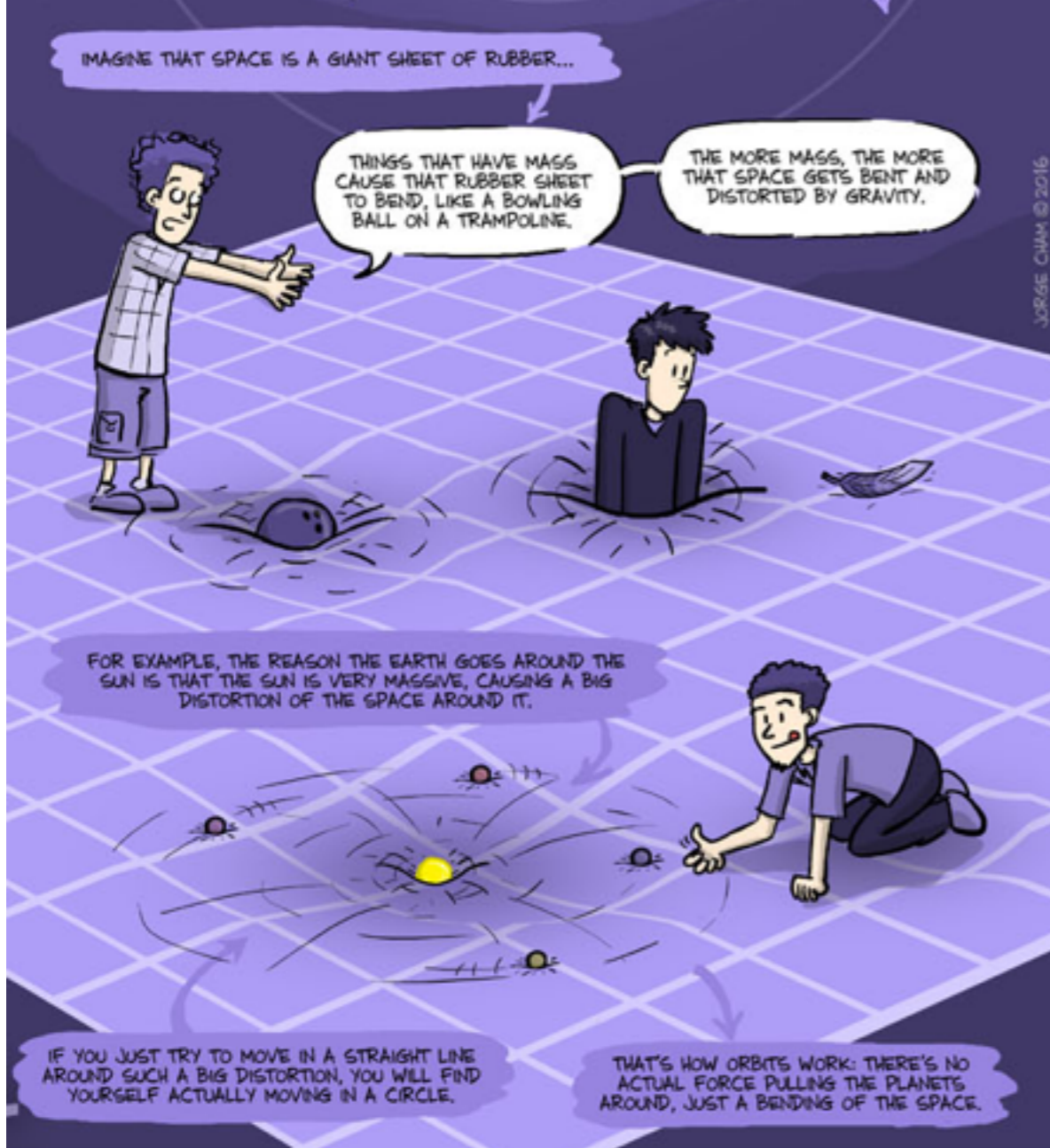
<http://www.youtube.com/watch?v=XhHUNvEKUY8> (1:15)

銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



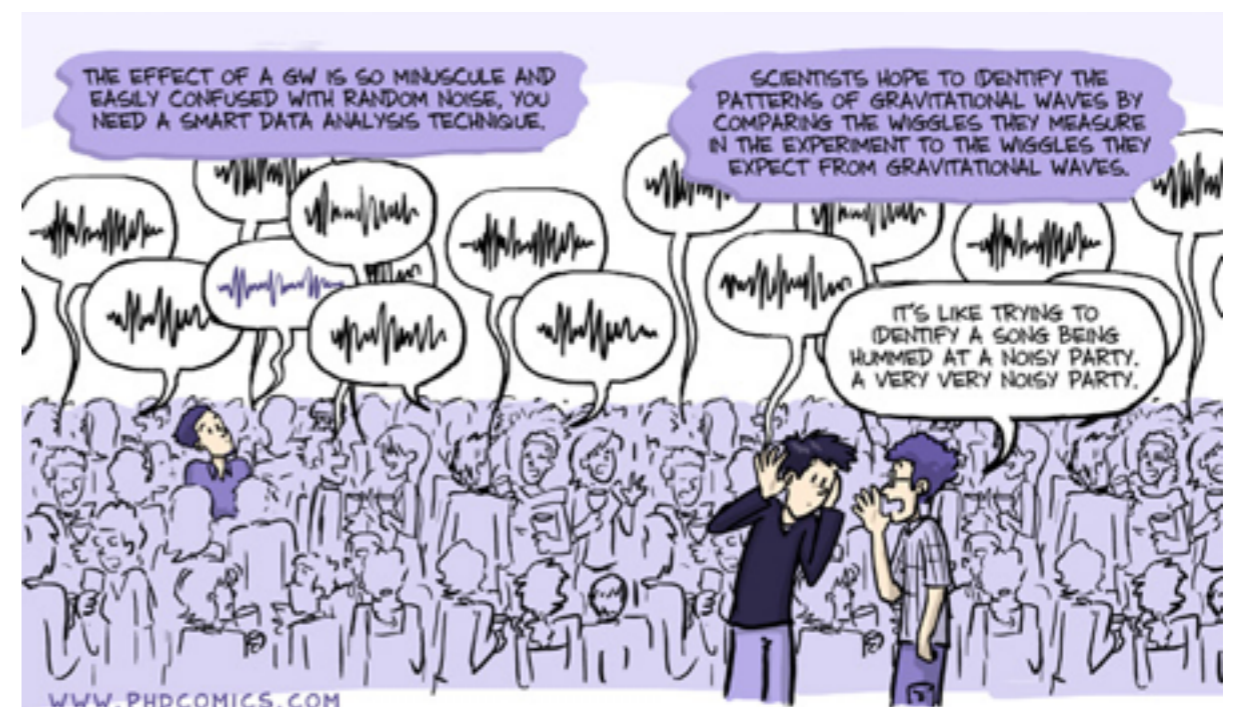
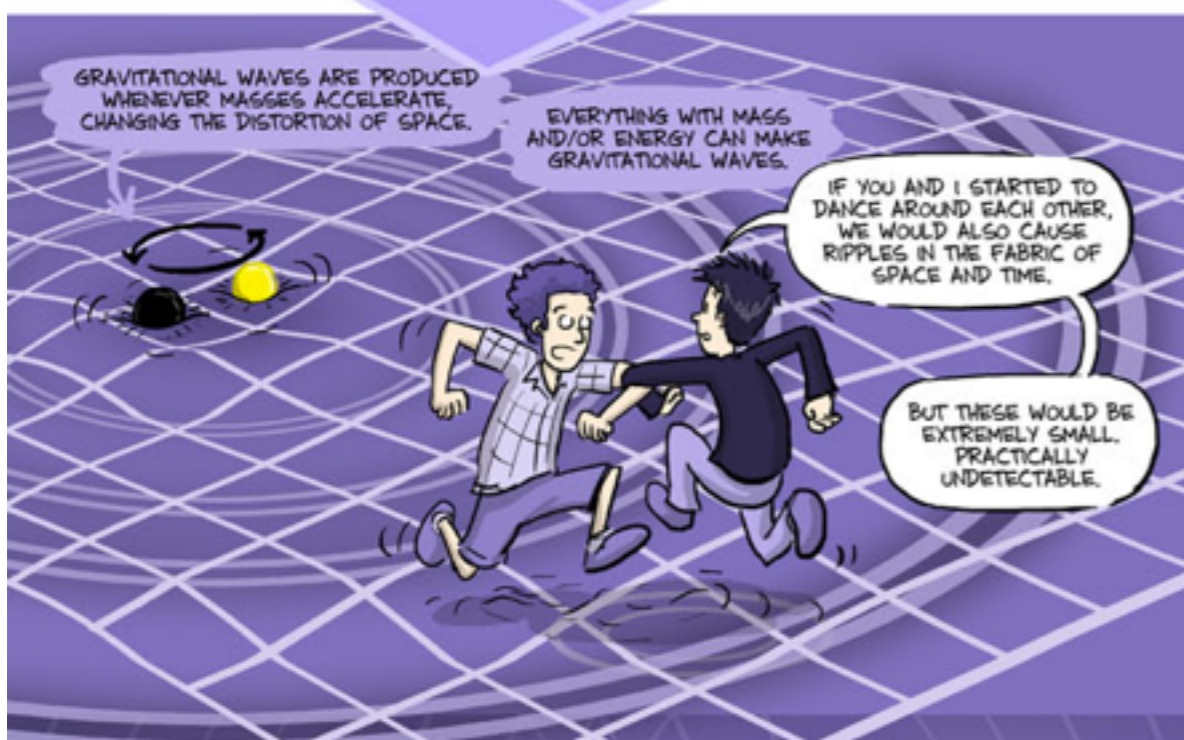
<http://www.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm>

<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

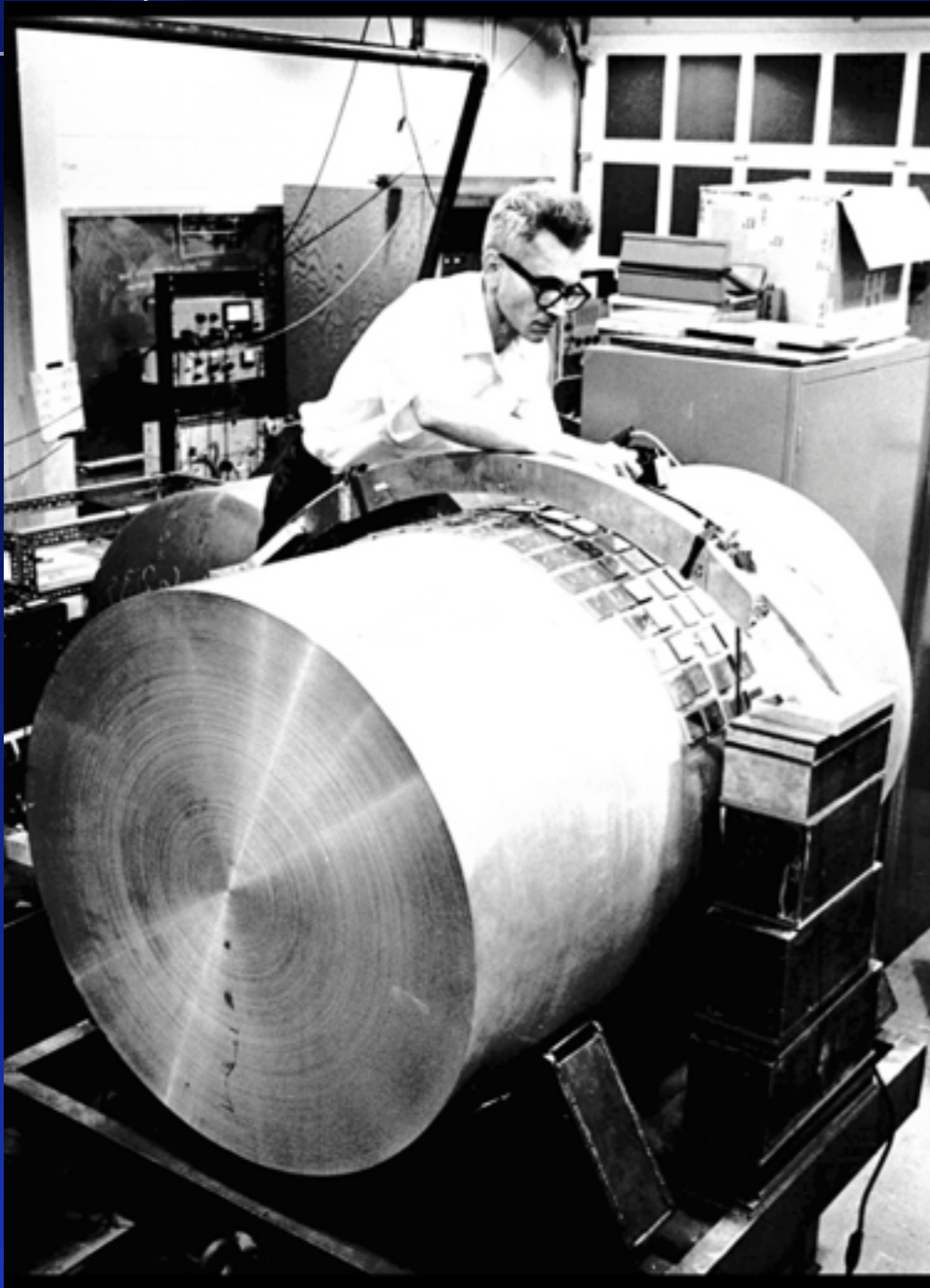


www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”



重力波 幻の発見 (1968/70)



Joseph Weber (**pictured**), a physicist at the University of Maryland in College Park, believed that gravitational waves were real. In 1969, he announced that he had found them with a detector of his own invention: an aluminium cylinder, about 2 metres long and 1 metre in diameter, that 'rang' when it was struck by such a wave². His result was never replicated, and was eventually rejected by nearly everyone except Weber himself. Nonetheless, his work drew many other researchers into the gravitational wave field.

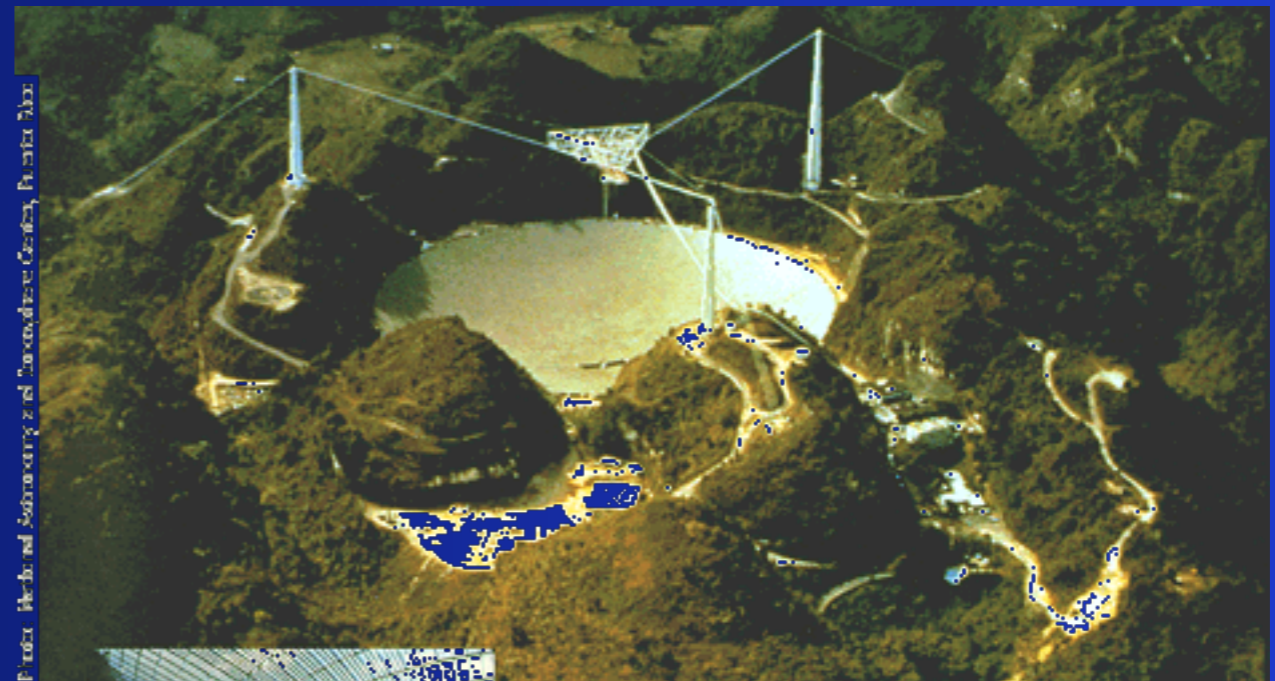
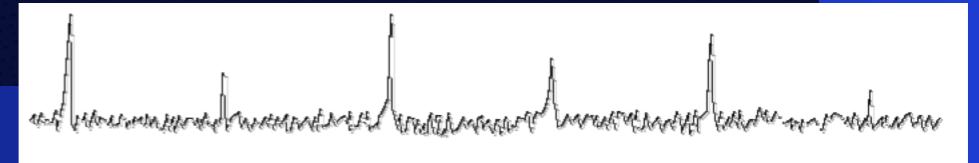
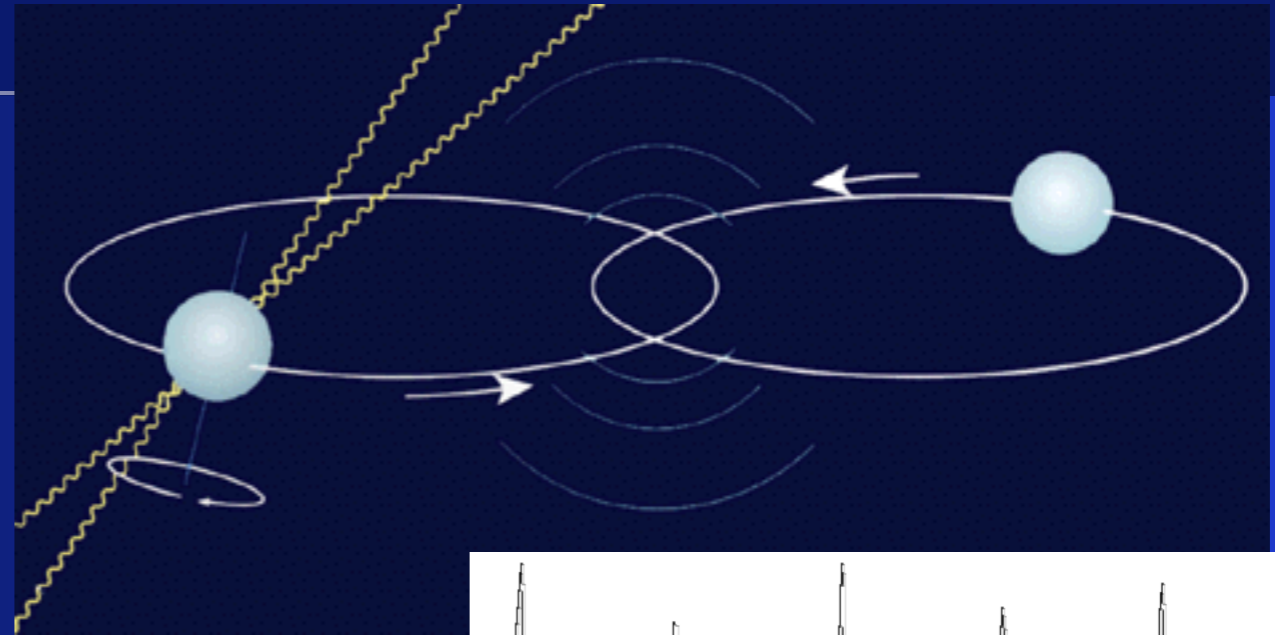
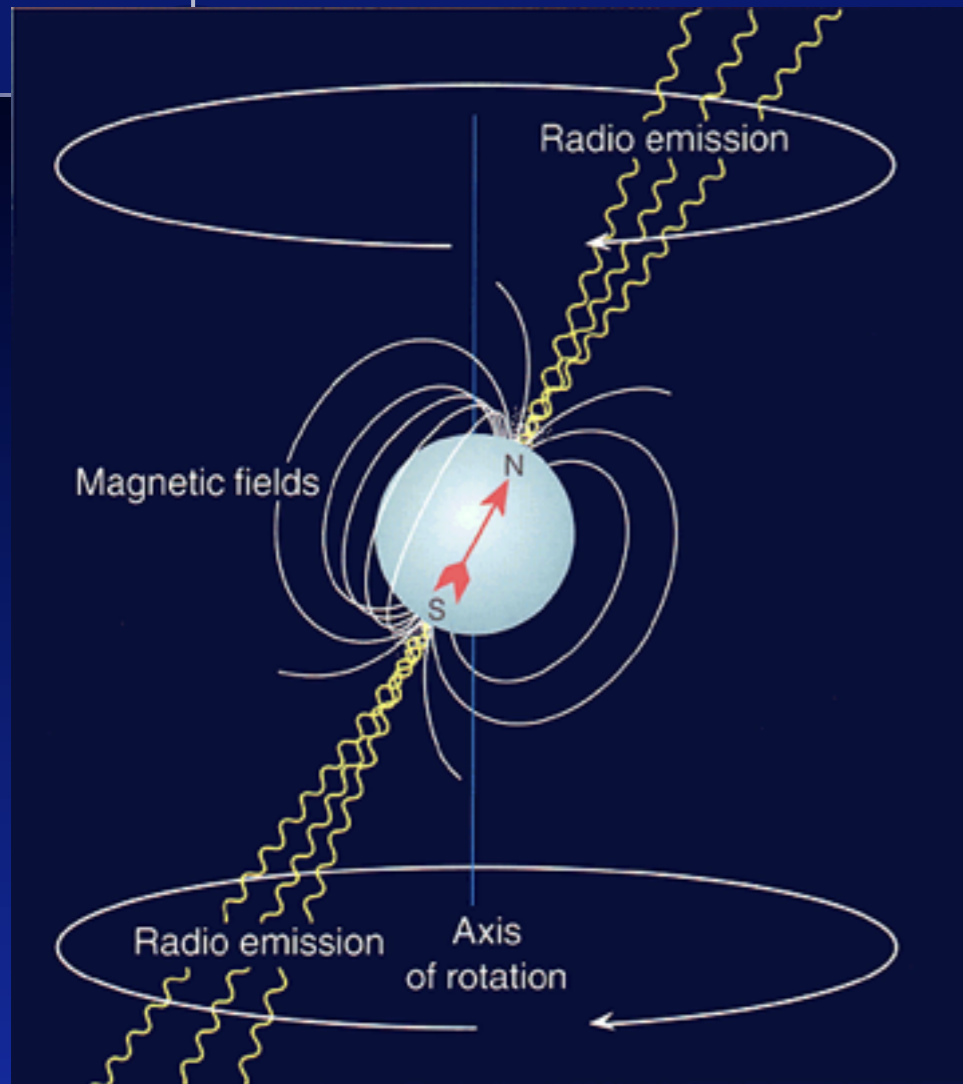
68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

70年に「重力波信号はおよそ一日に三回の頻度で
検出され、検出装置が銀河の中心に対して垂直方向
に向いているときに検出率が高い」

と発表したか、他のグループで追試されず、

ウェーバー
Joseph Weber

連星中性子星の発見 (1974)

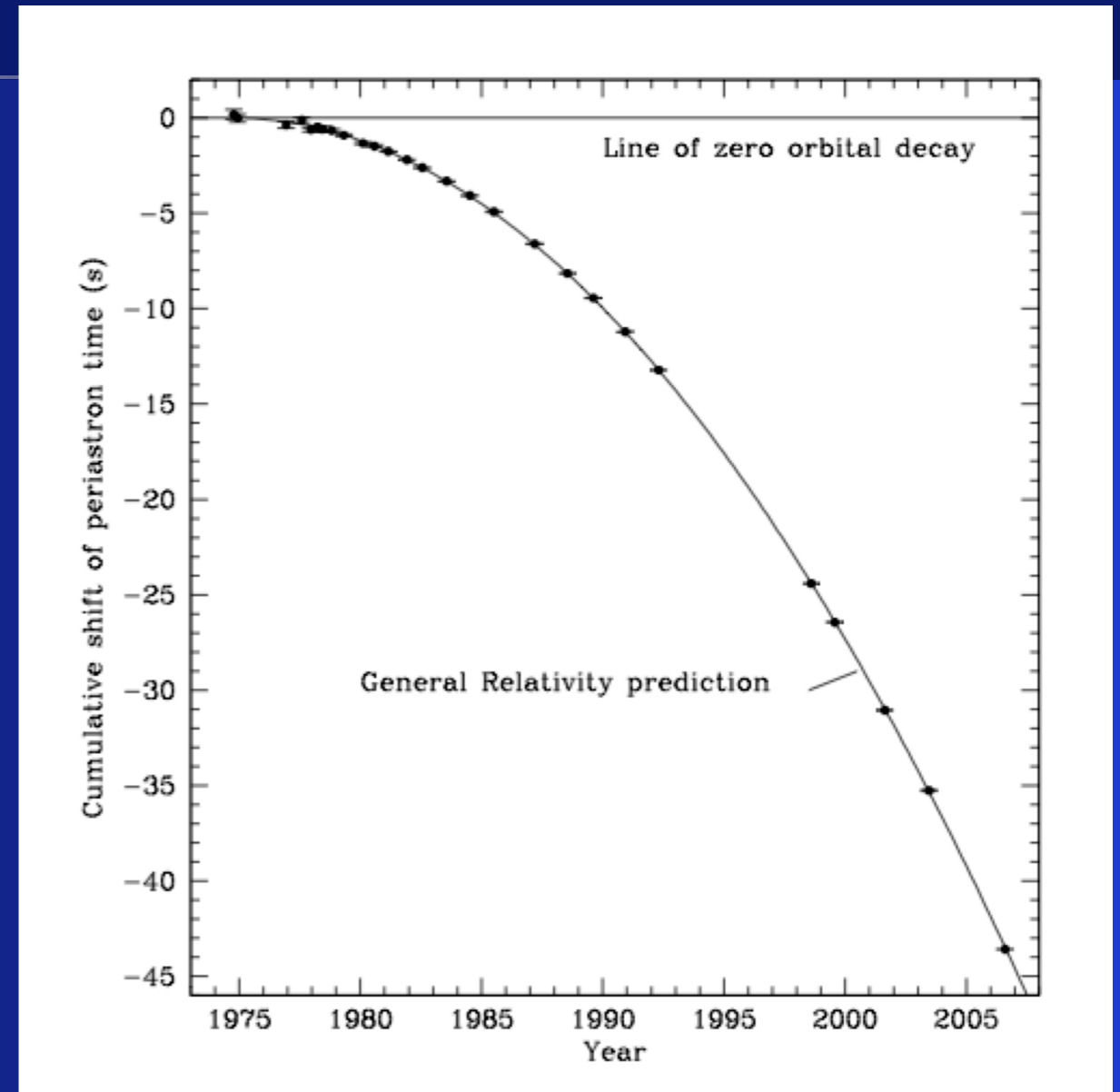
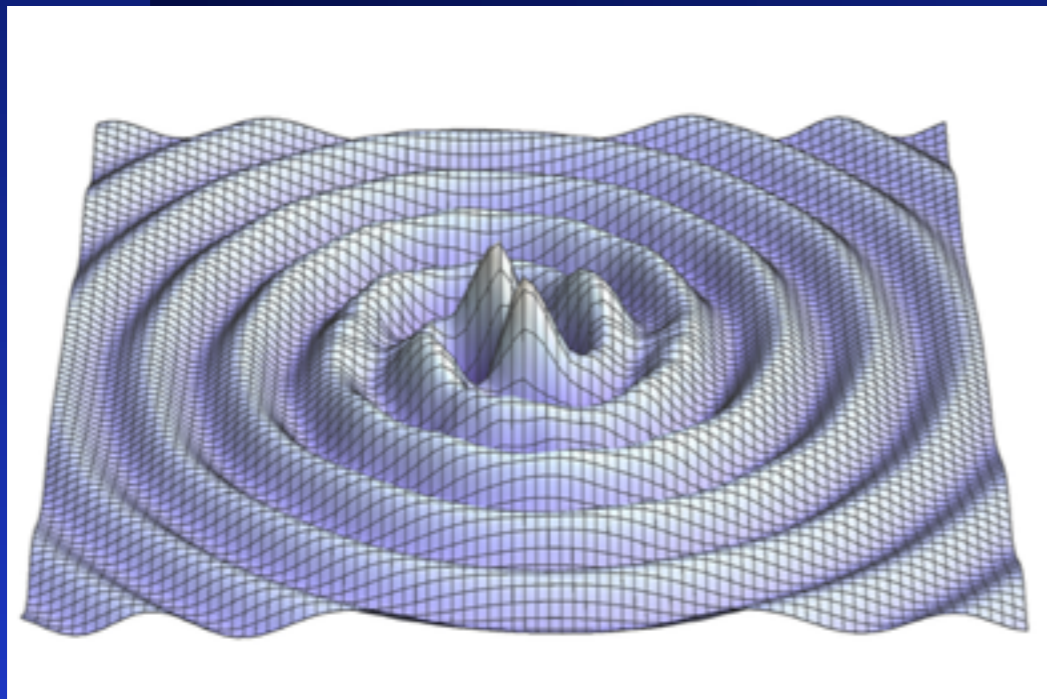
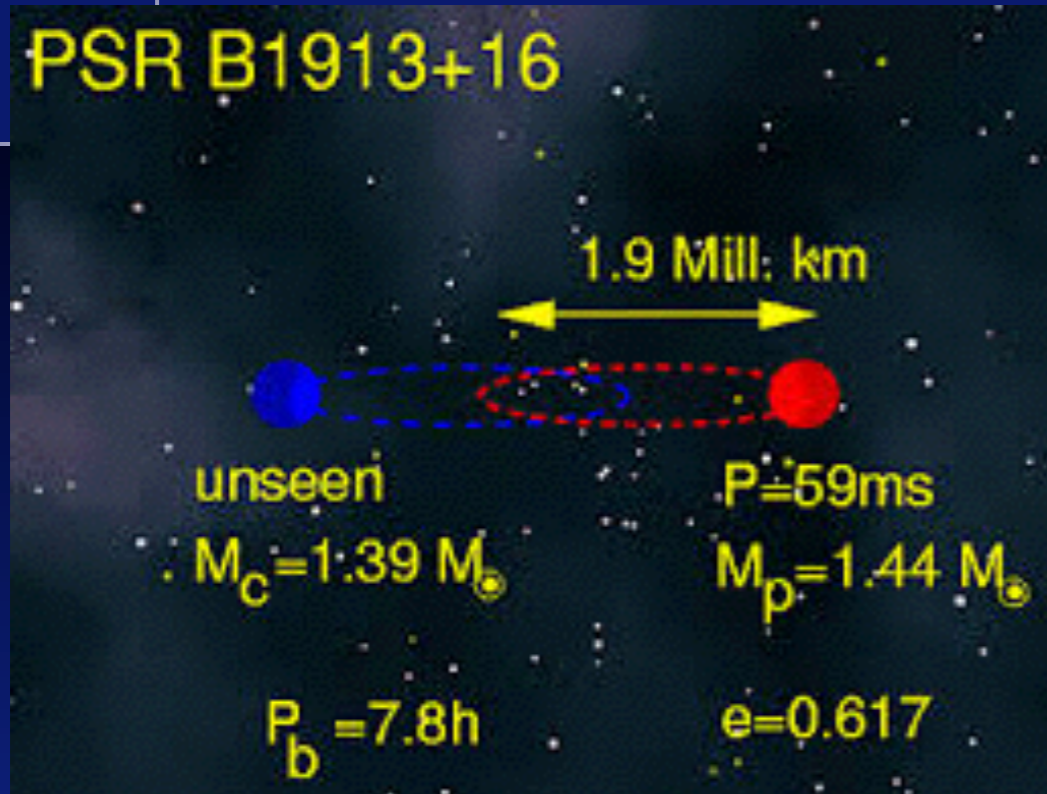


Arecibo, Puerto Rico

パルサー = 中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/illpres/discovery.html

連星中性子星の発見 (1974)







重力波を放出してエネルギーを失うので、星が近づいてゆく。



重力波の存在が**間接的に確かめられた。**

連星中性子星の発見 (1974)

The Nobel Prize in Physics 1993
Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

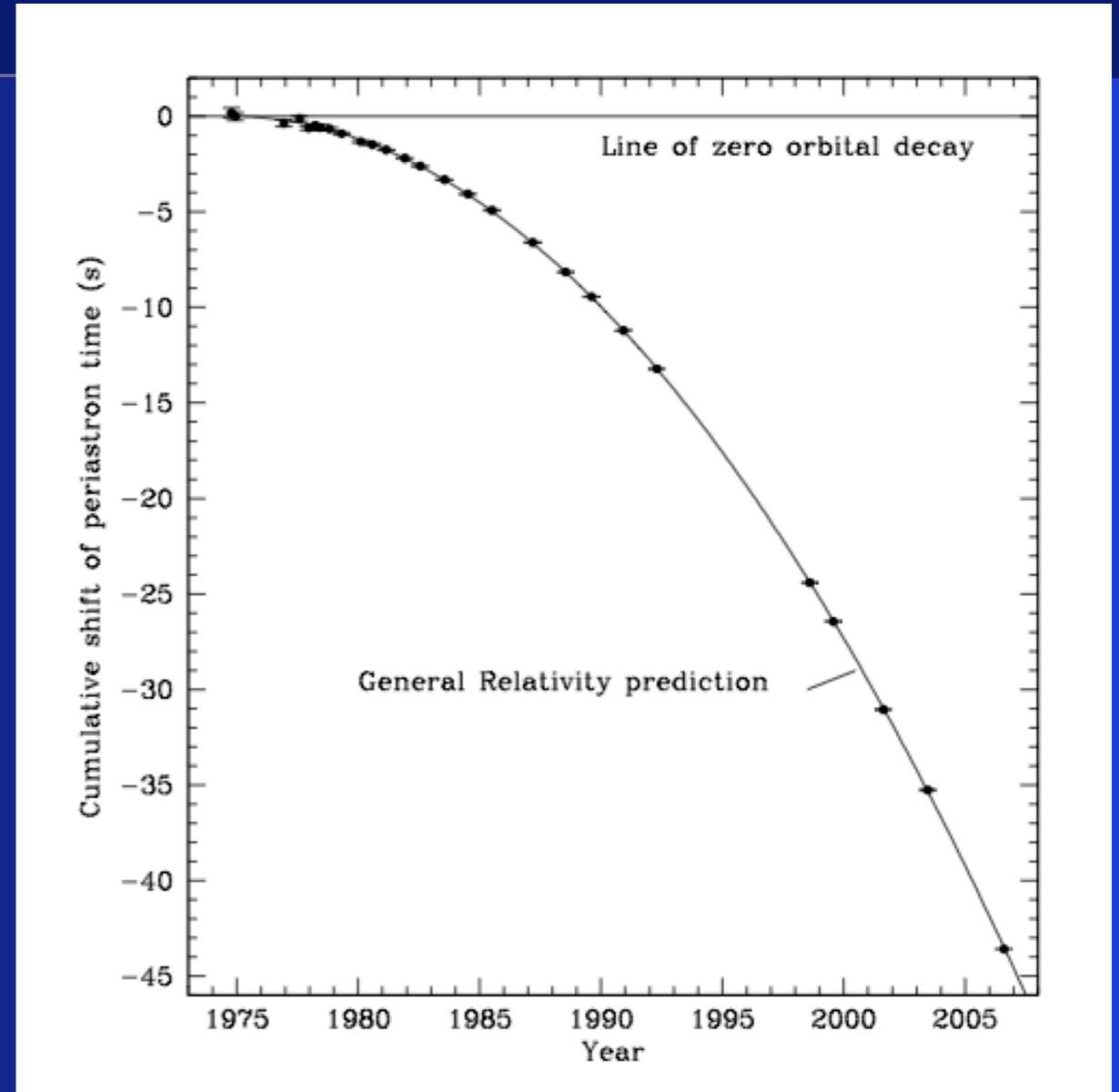
Share this:     25

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2



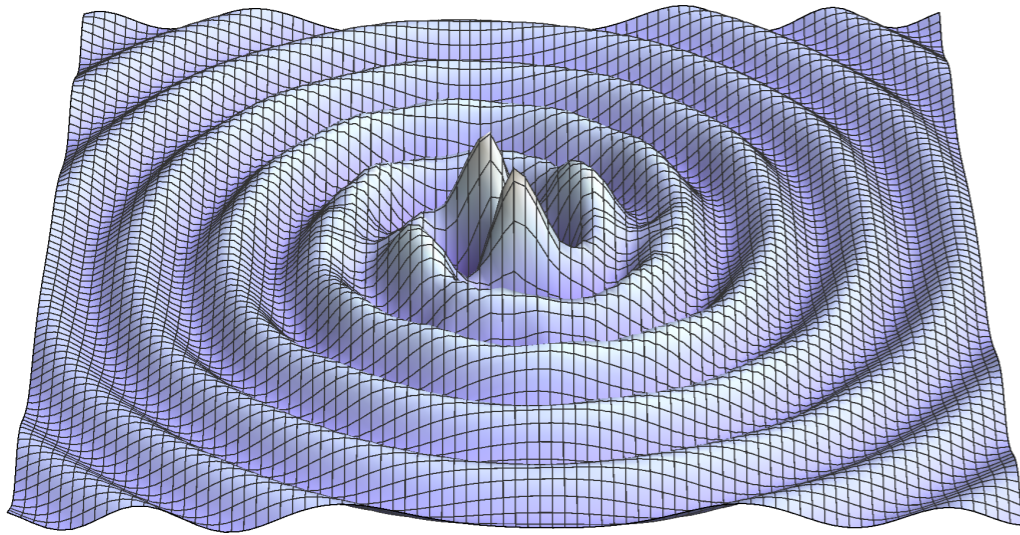
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"重力についての新しい研究を開いた、新種のパルサーの発見に対して"

重力波の存在が間接的に確かめられた。

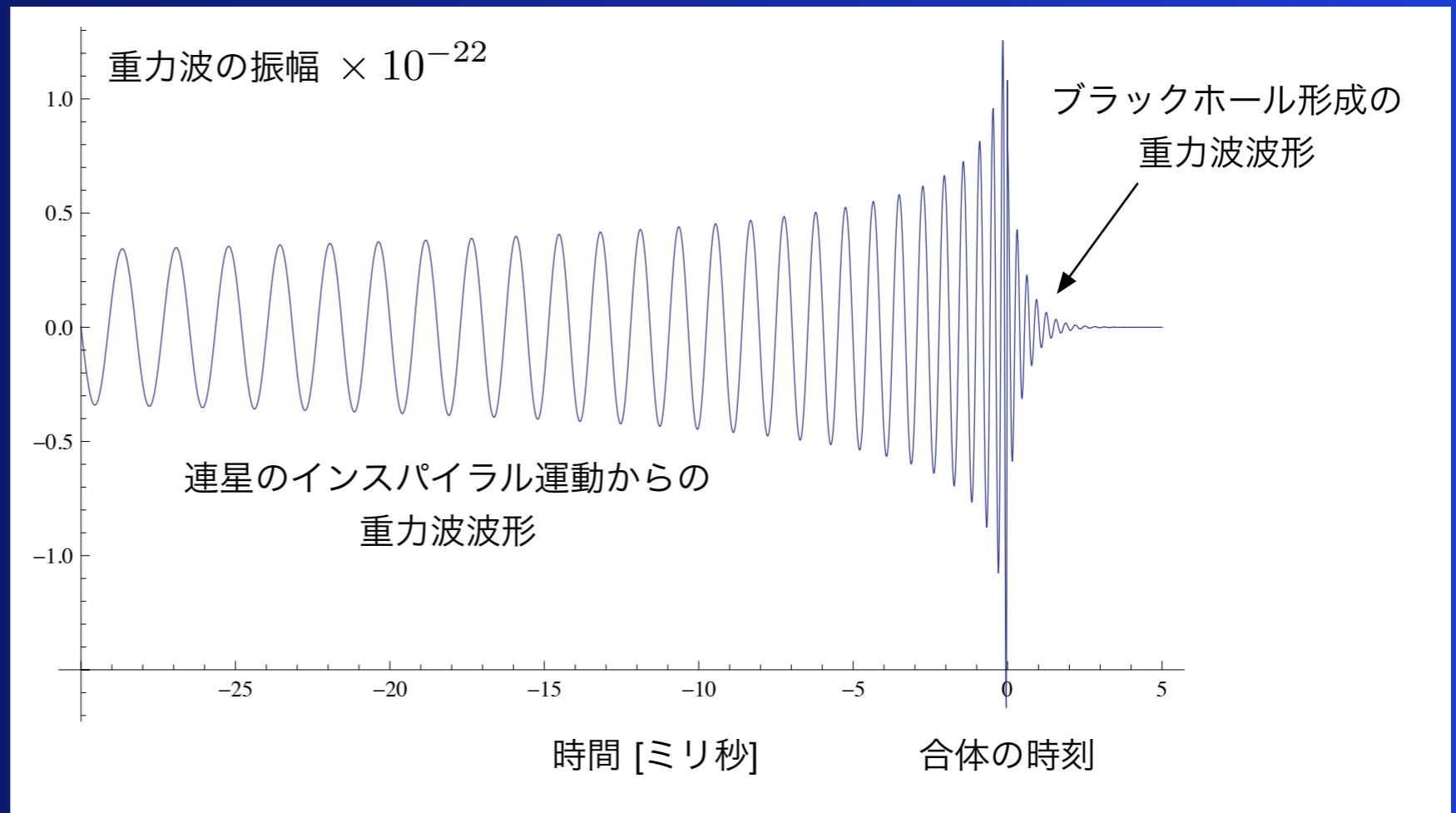
重力波の存在が間接的に確かめられた。

重力波の直接観測をしたい！



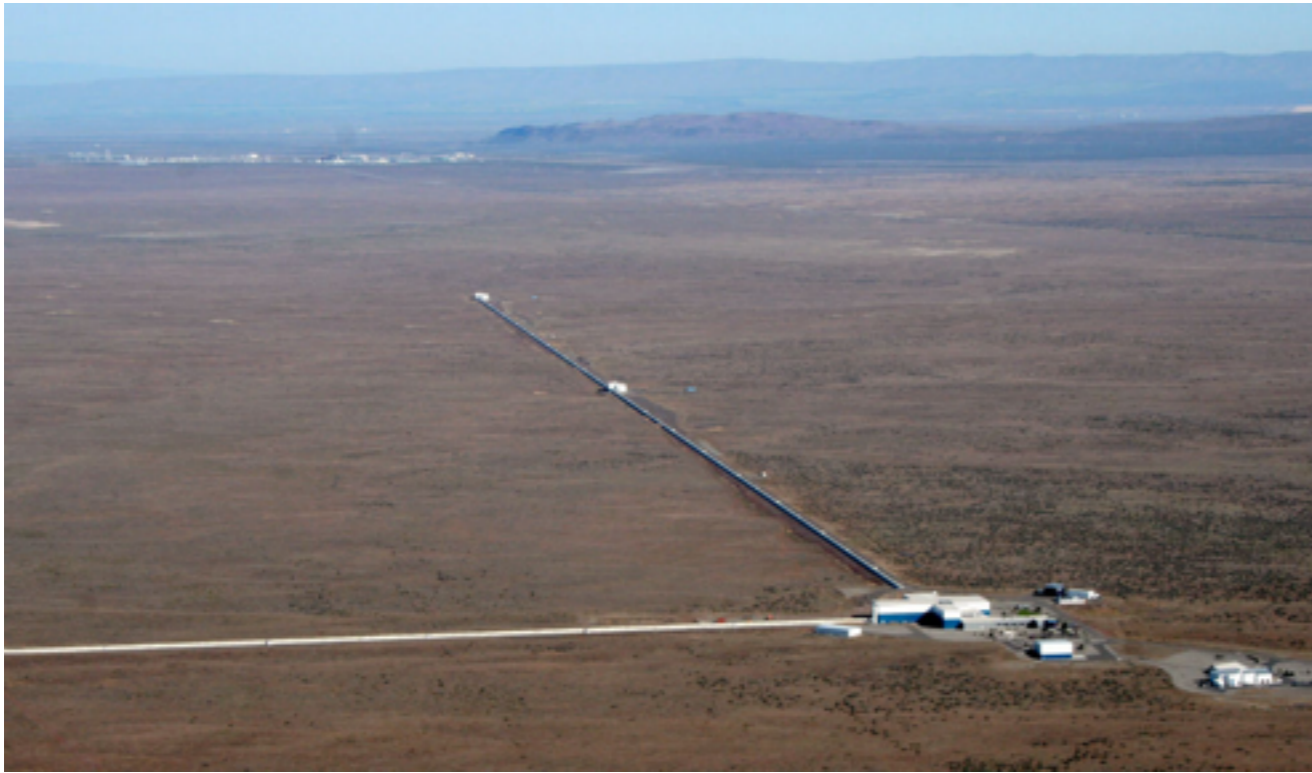
連星中性子星

連星ブラックホール

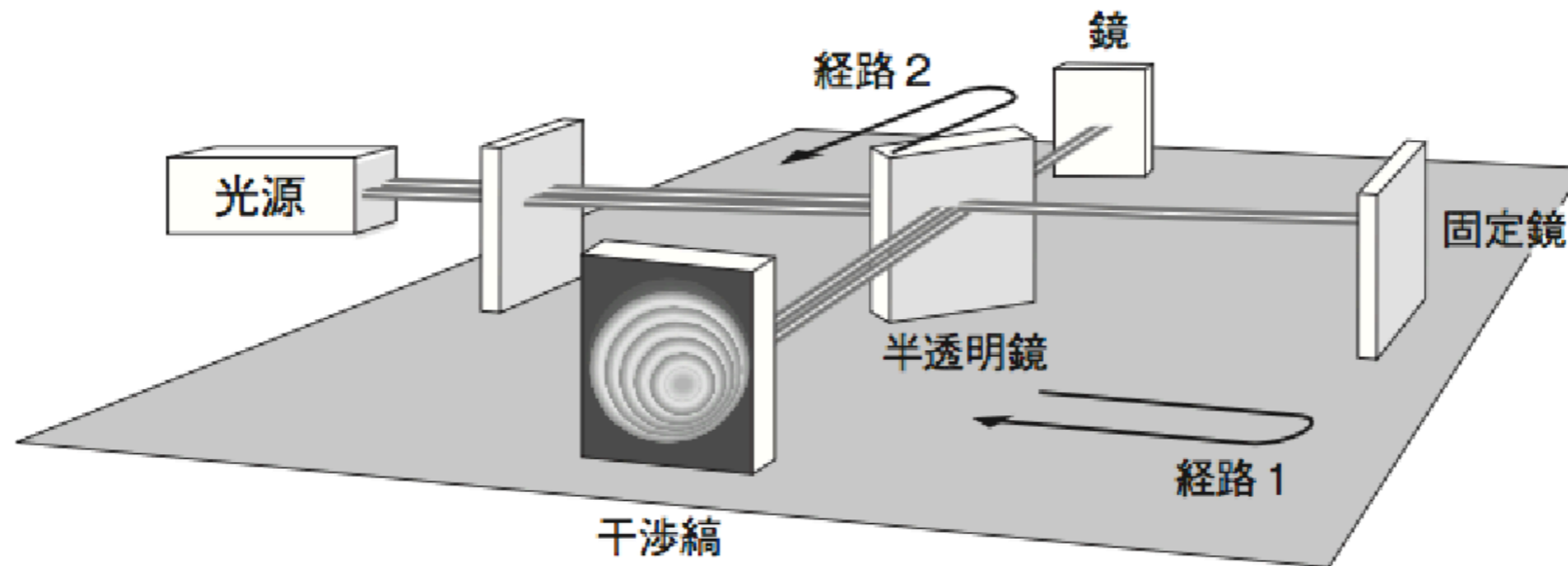


LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

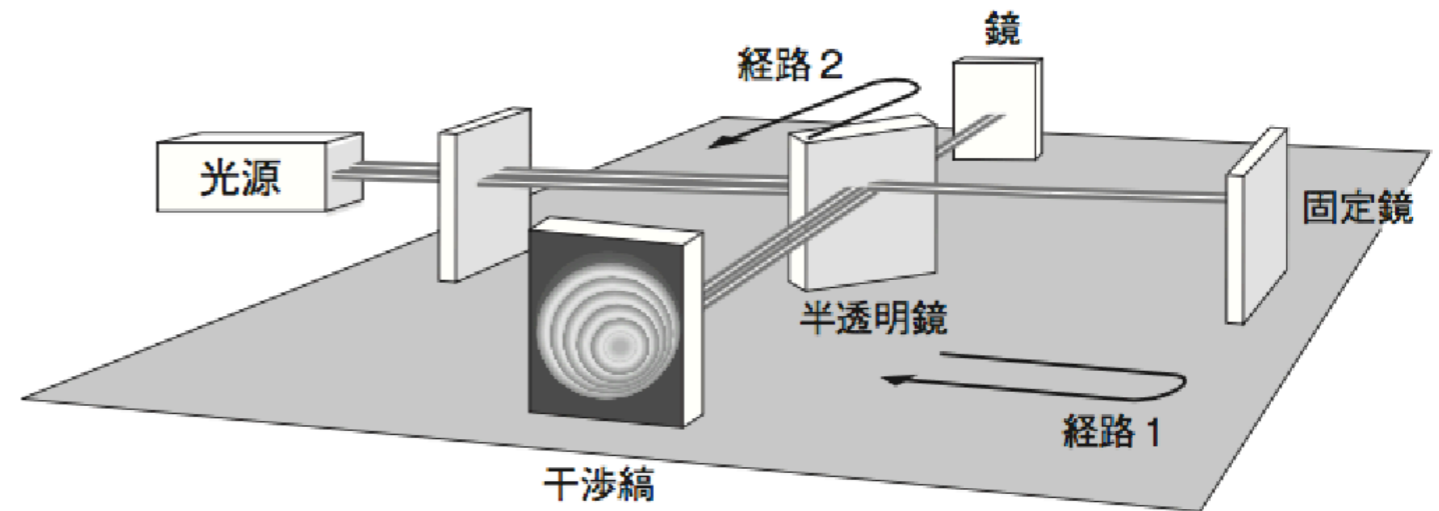
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



干渉計のしくみ

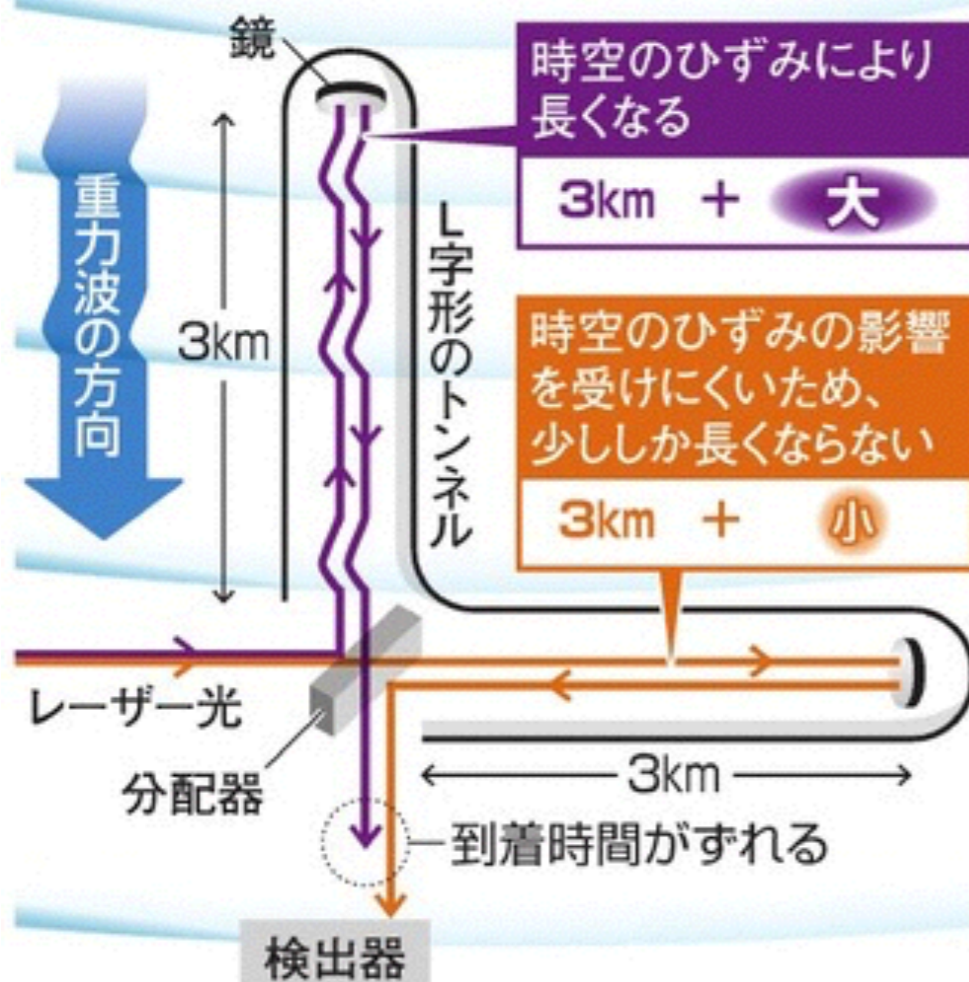


重力波のイメージ
池に石を投げるイメージ

宇宙のかなたの重い星からの重力波

- 時空のひずみが波として伝わる
- 池の水面の波紋のようなもの
- 地球を含む空間もゆがむ

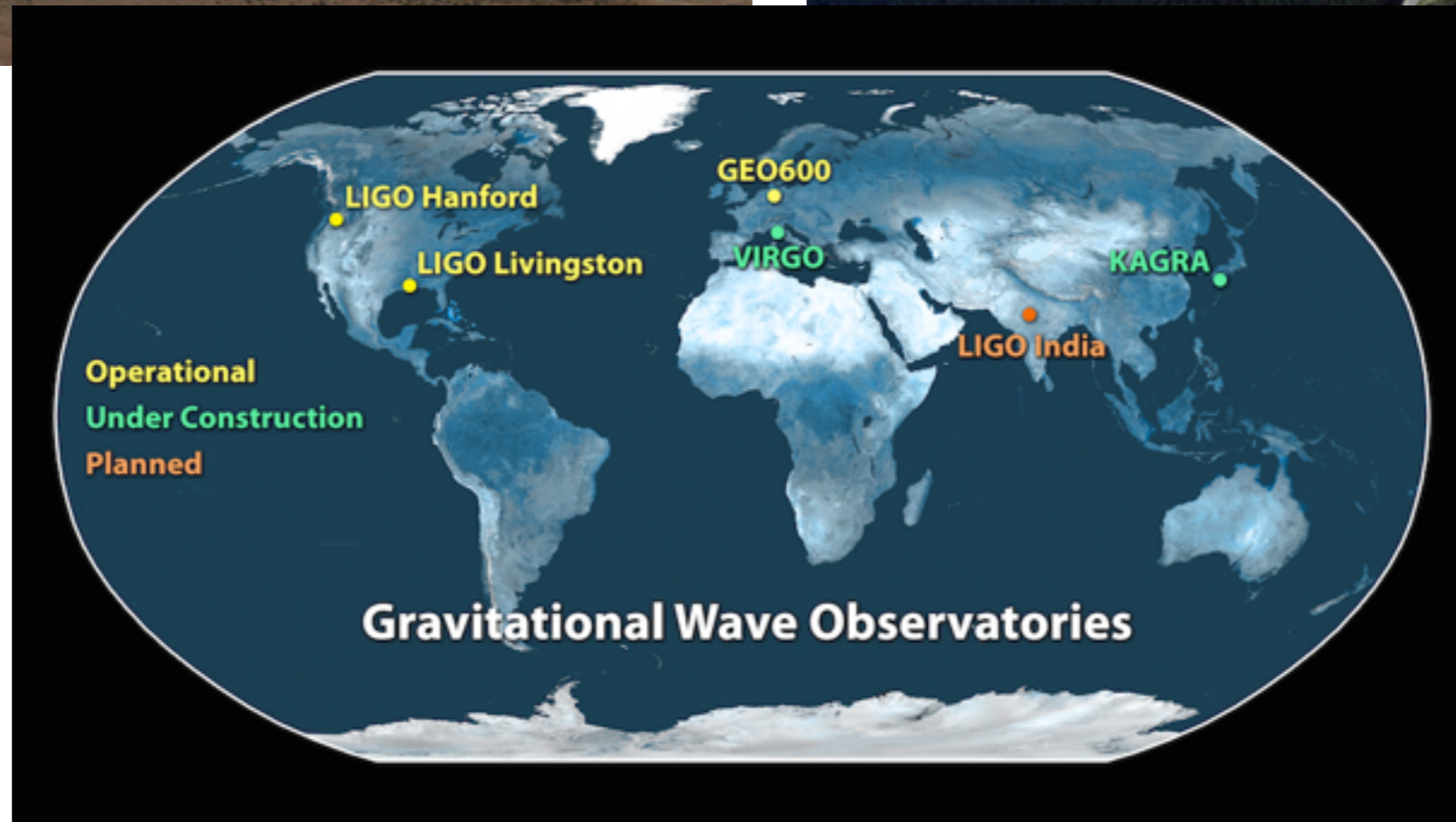
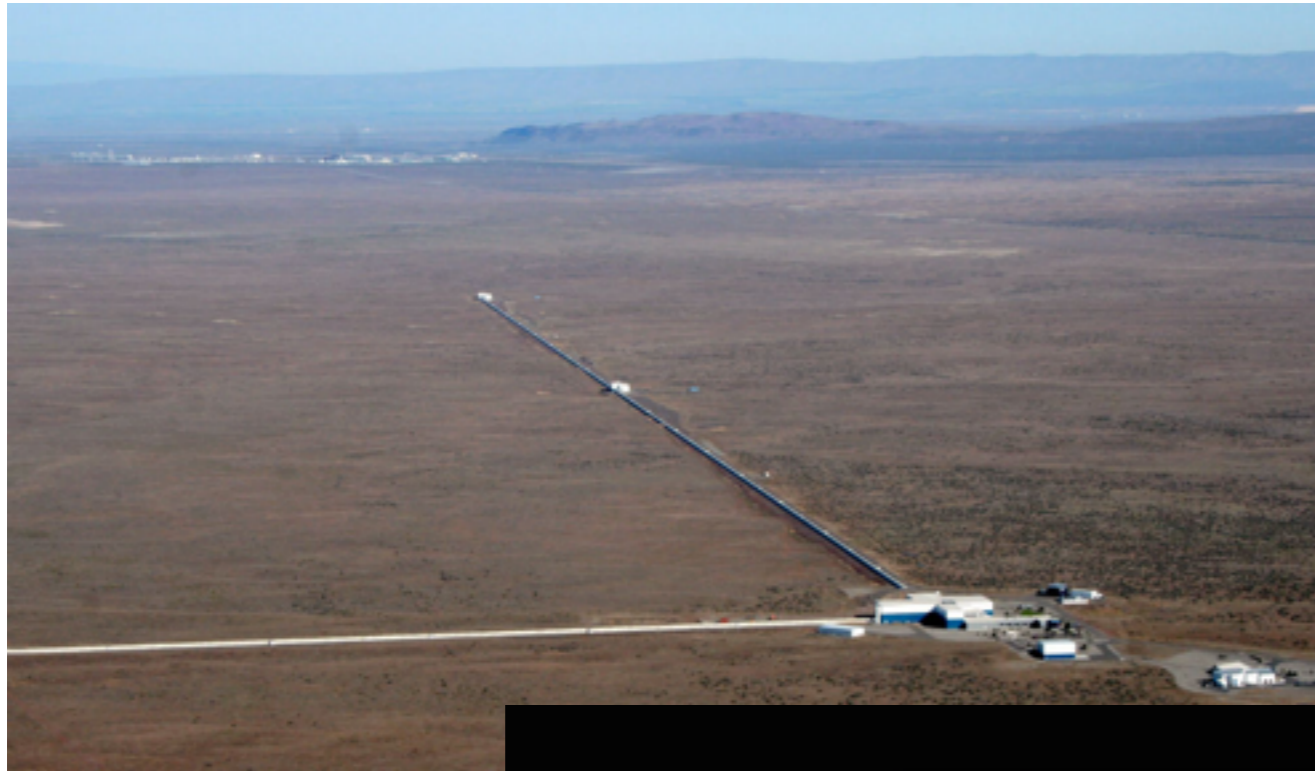
KAGRAのしくみ



光の重ね合わせで強めあったり
弱めあったりする現象（干渉）
を利用して，微小な長さを測る

LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector, (Large-scale Cryogenic Gravitational wave Telescope)

大型低温重力波望遠鏡



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設
地面振動が小さい岐阜県飛騨市に
ある神岡鉱山

鏡をマイナス250度 (20K) まで
冷却

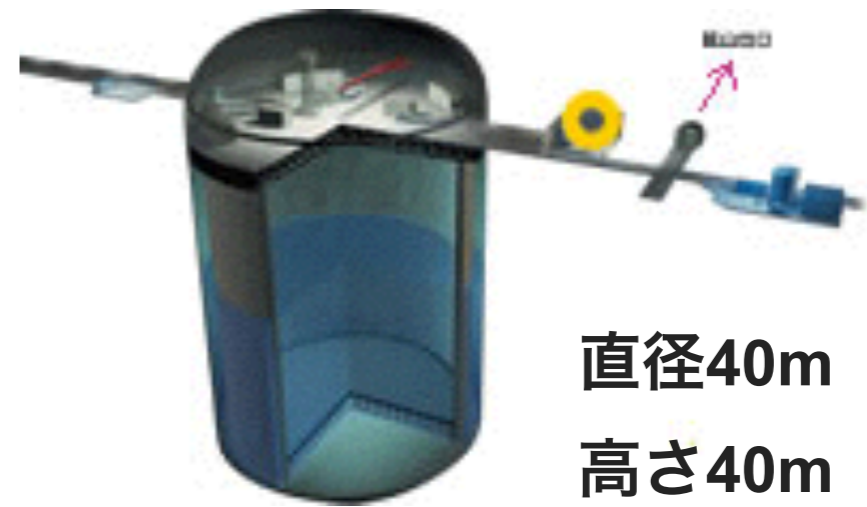
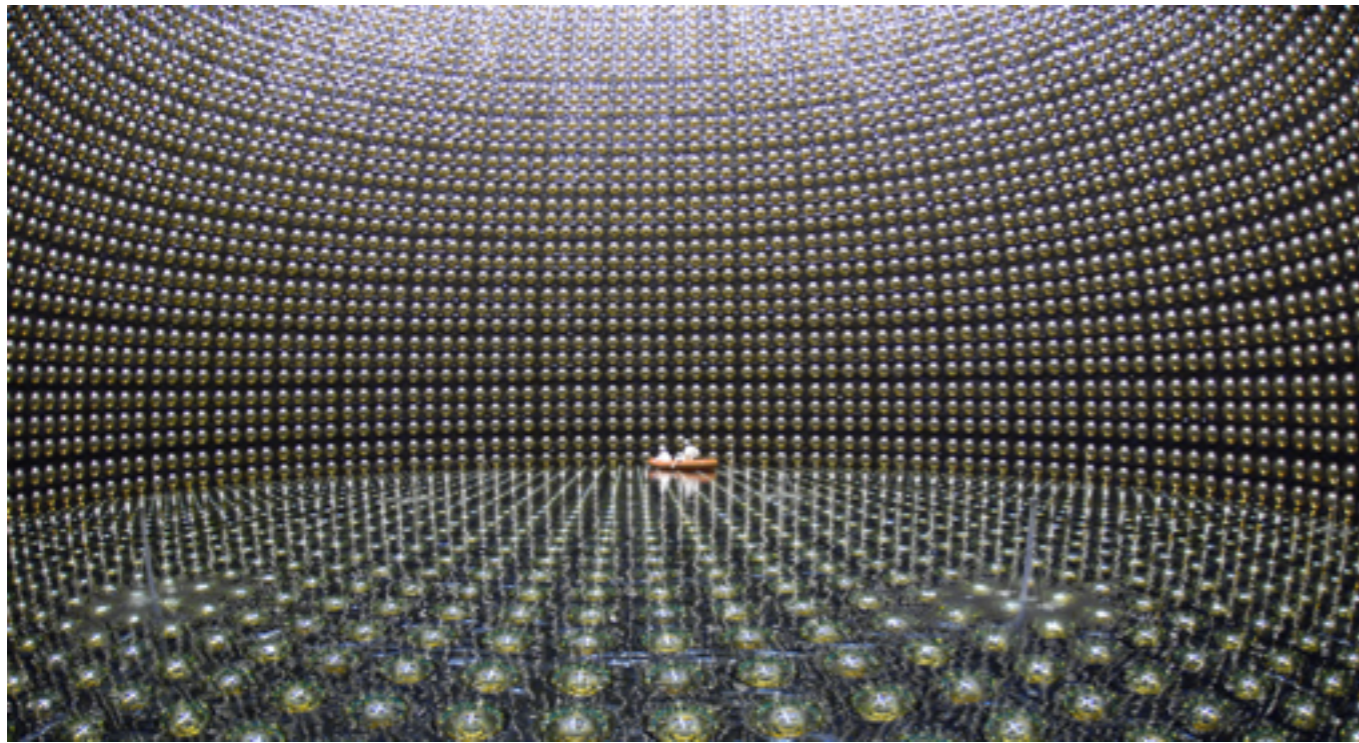
熱雑音を小さくするため

鏡の材質としてサファイア
光学特性に優れ、低温に冷却する
と熱伝導や機械的損失が少なくなる

スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

<http://www-sk.icrr.u-tokyo.ac.jp/sk/>



直径40m

高さ40m

岐阜県・神岡の鉱山跡の空洞に巨大な水槽をつくり、
宇宙から飛来するニュートリノを観測する。



ノーベル物理学賞を受賞

小柴昌俊 (2002年)



梶田隆章 (2015年)



KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

2015年8月



Hisaaki Shinkai



Seiji Kawamura

Kieran Craig

Martynov Denis

KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)

2016年4月



重力波の波源

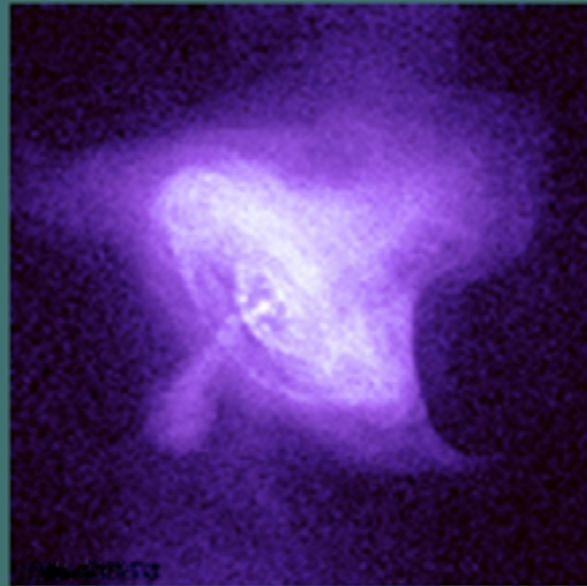
sources of gravitational wave

<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

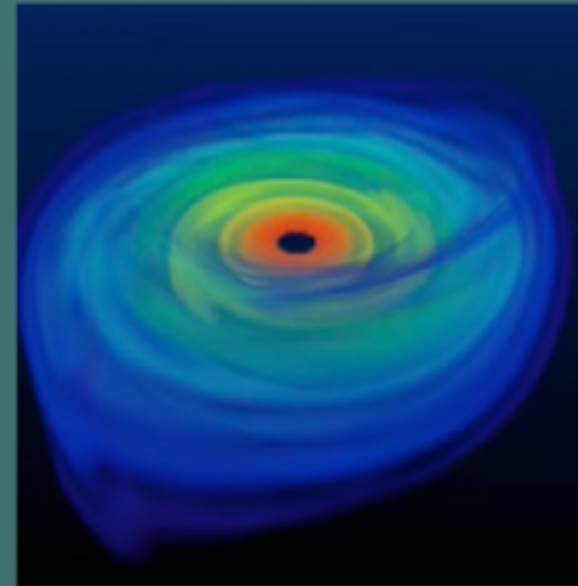
超新星爆発 (写真出典: NASA)



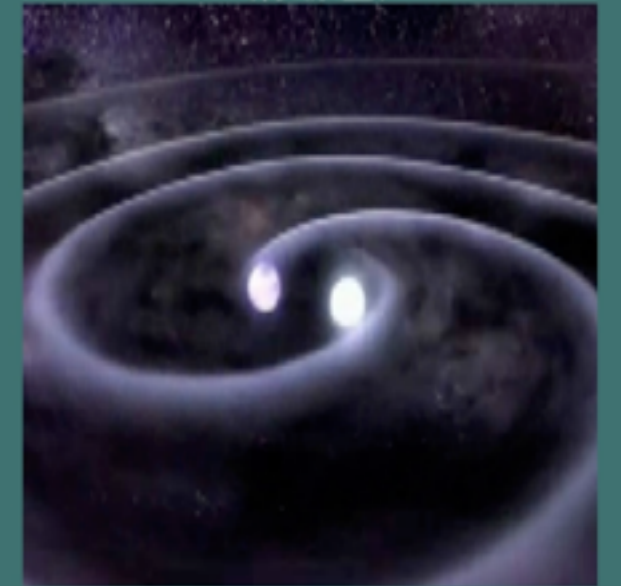
パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



予測が難しい

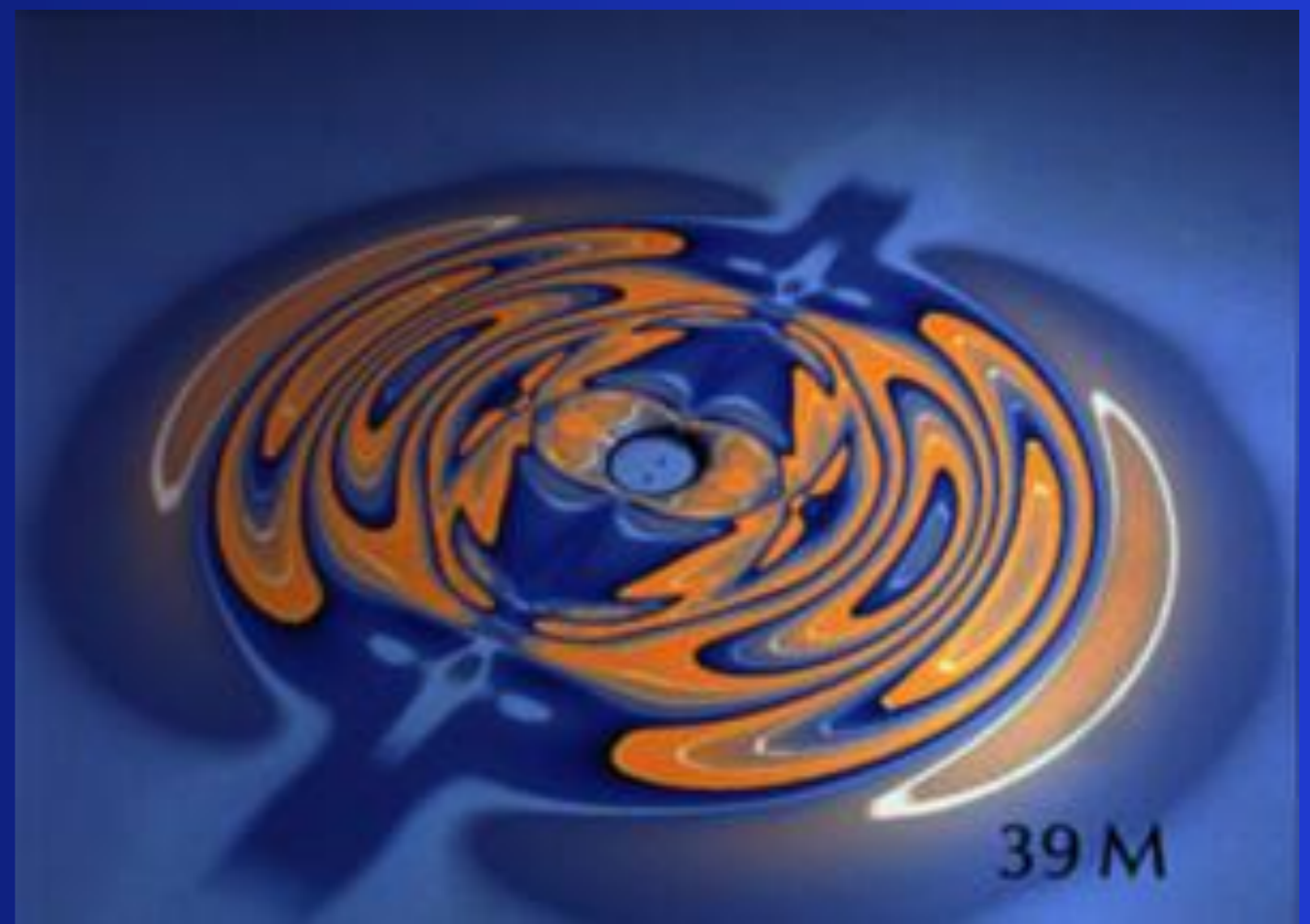
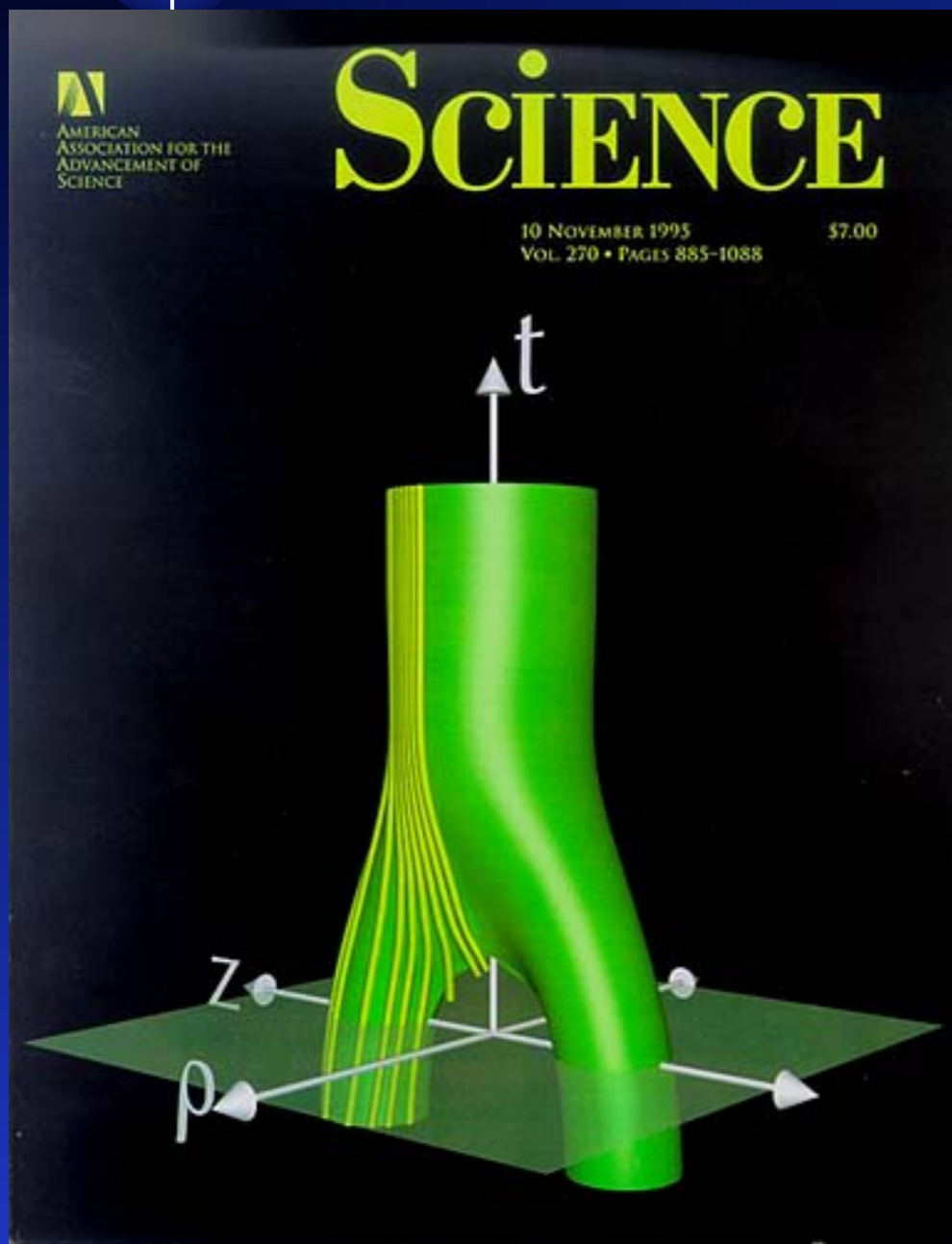
振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を
ターゲットに

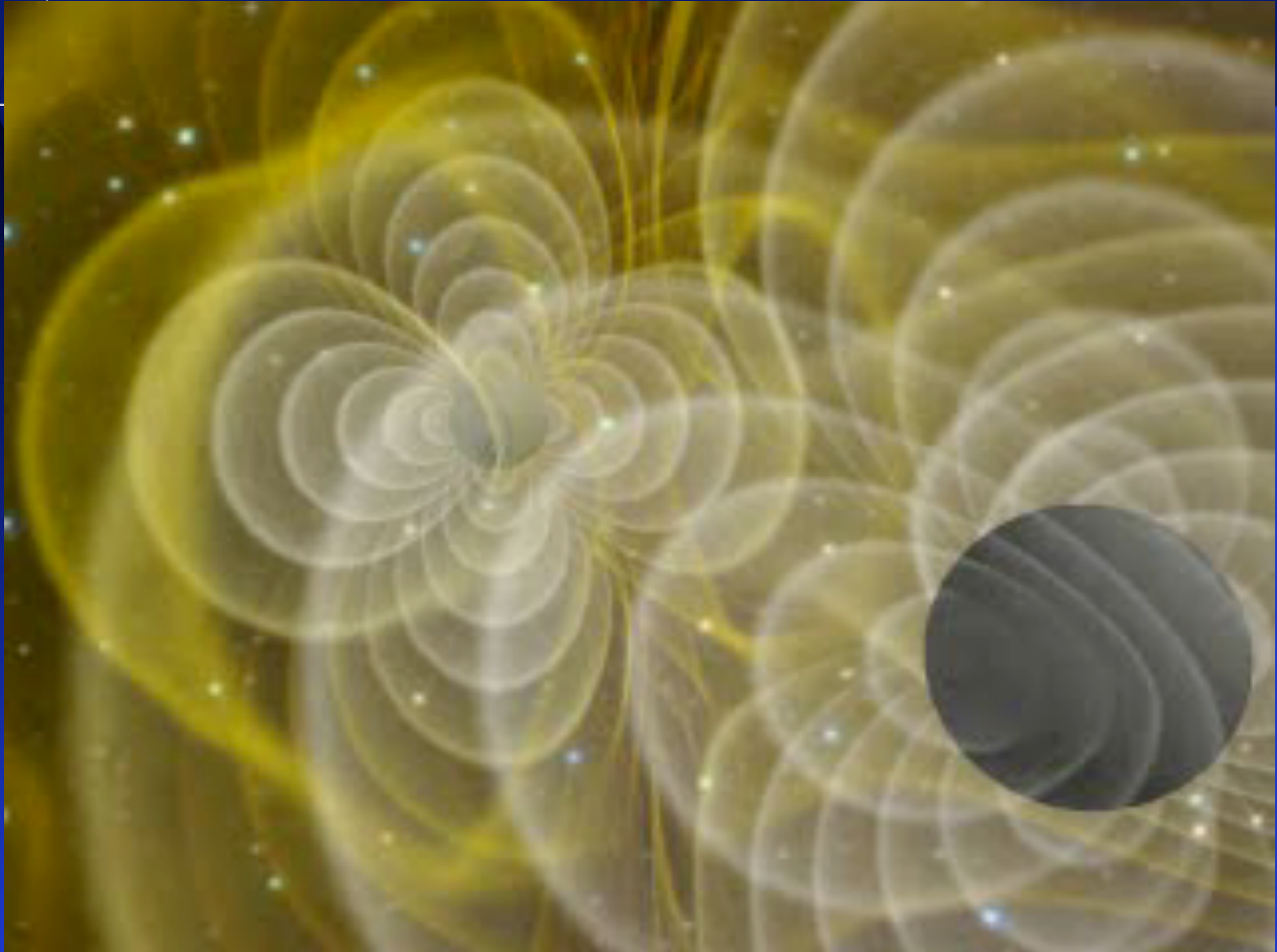
重力波は弱いのであらかじめ、波形の予測が必要
ノイズにまみれたデータに、予測した波形があるか探す

ブラックホールの合体シミュレーション



2つのブラックホールの合体と重力波放出
(90年代, NCSAグループ)

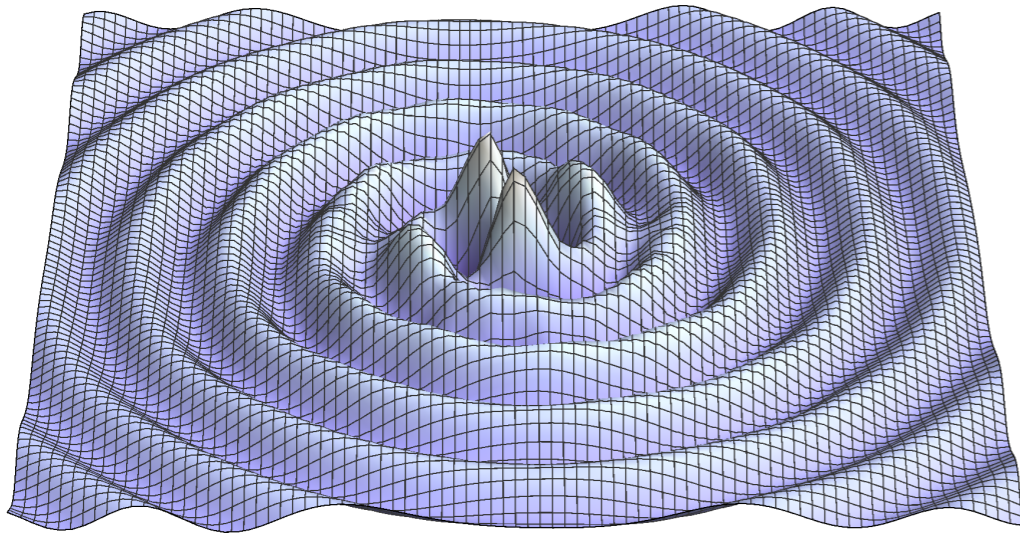
ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

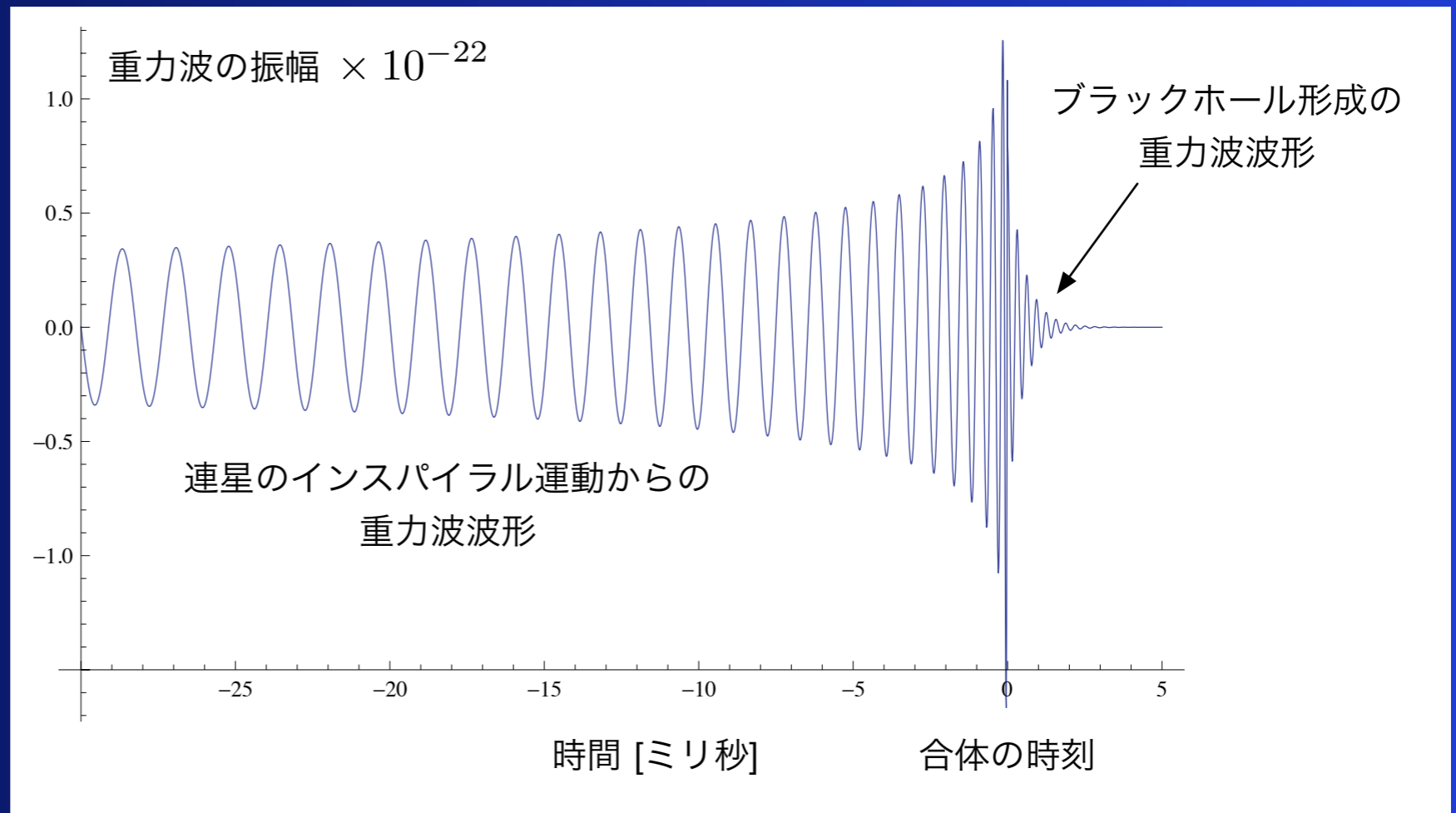
重力波の存在が間接的に確かめられた。

重力波の直接観測をしたい！



連星中性子星

連星ブラックホール




nature International weekly journal of science

Home | News & Comment | Research | Careers & Jobs | Current Issue | Archive | Audio & Video | For Authors

News & Comment > Column > Muse > 2016 > February > Article

NATURE | COLUMN: MUSE



Has giant LIGO experiment seen gravitational waves?

An improbable rumour has started that the observatory has already made a discovery — but even if true, the signal could be a drill.


Davide Castelvecchi

Alexa Kofo

30 September 2015

[Rights & Permissions](#)

On 25 September, a sensational rumour [appeared on Twitter](#): Lawrence Krauss, a cosmologist, reported hearing that the world's largest gravitational-wave observatory had seen a signal, barely a week after its [official re-opening](#).



Lawrence M. Krauss ✓
@LKrauss1


フォロー

Rumor of a gravitational wave detection at LIGO detector. Amazing if true. Will post details if it survives.

635 リツイート 666 いいね

13:39 - 2015年9月25日

2015/9/25



Lawrence M. Krauss ✓
@LKrauss1

フォロー

My earlier rumor about LIGO has been confirmed by independent sources. Stay tuned! Gravitational waves may have been discovered!! Exciting.

3,563 リツイート 2,888 いいね

7:46 - 2016年1月11日

2016/1/11

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

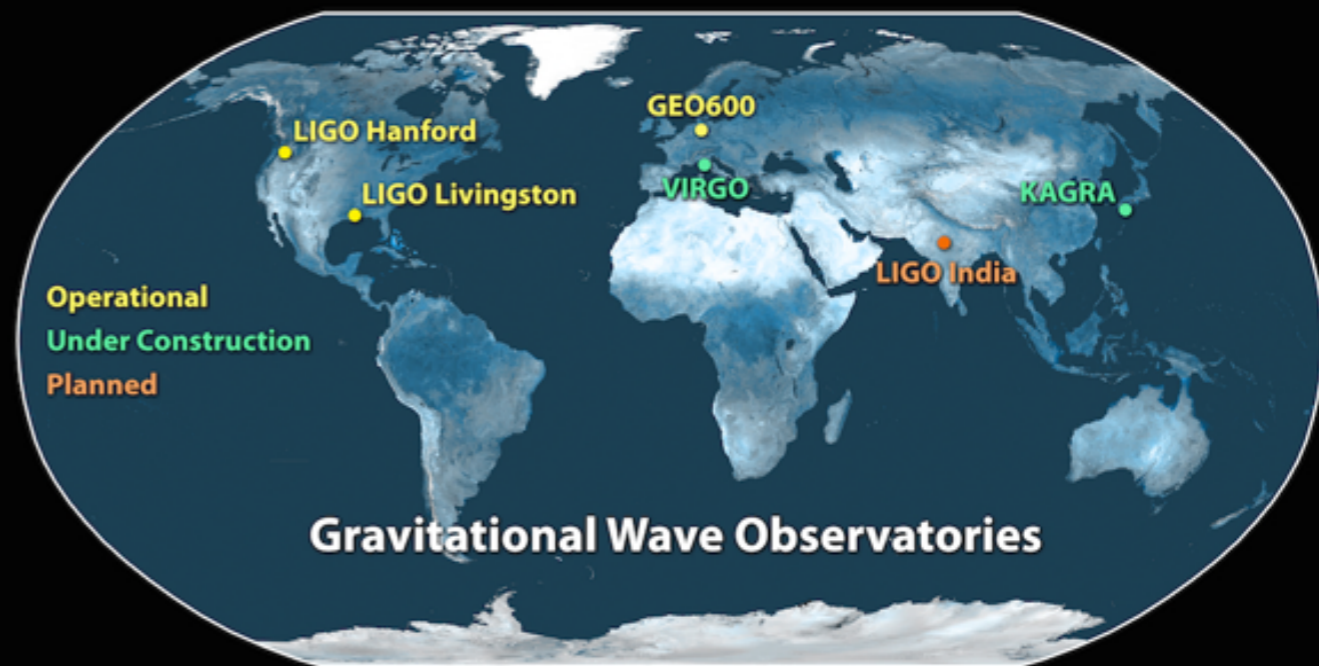
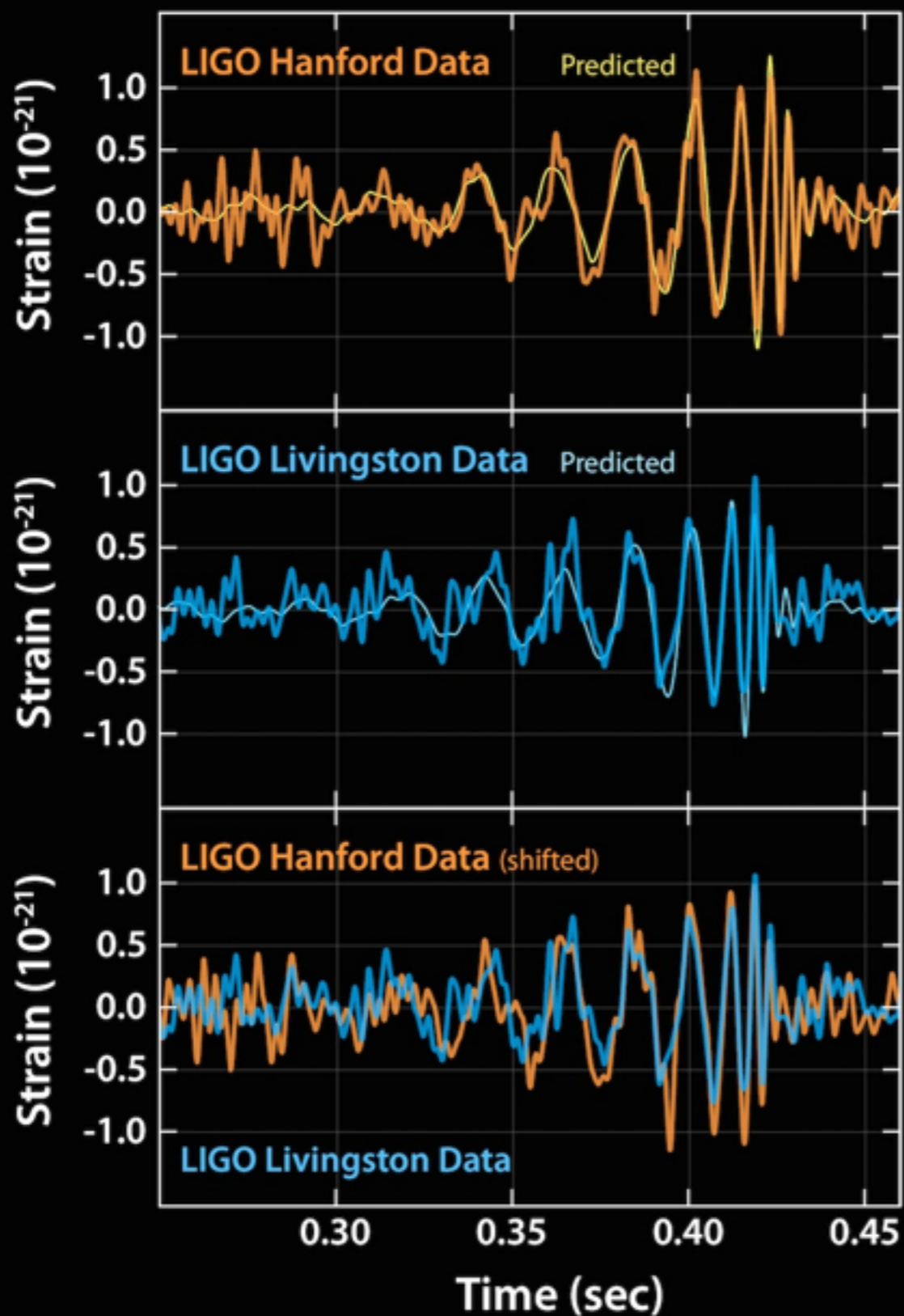


“We had detected gravitational waves. We did it.”

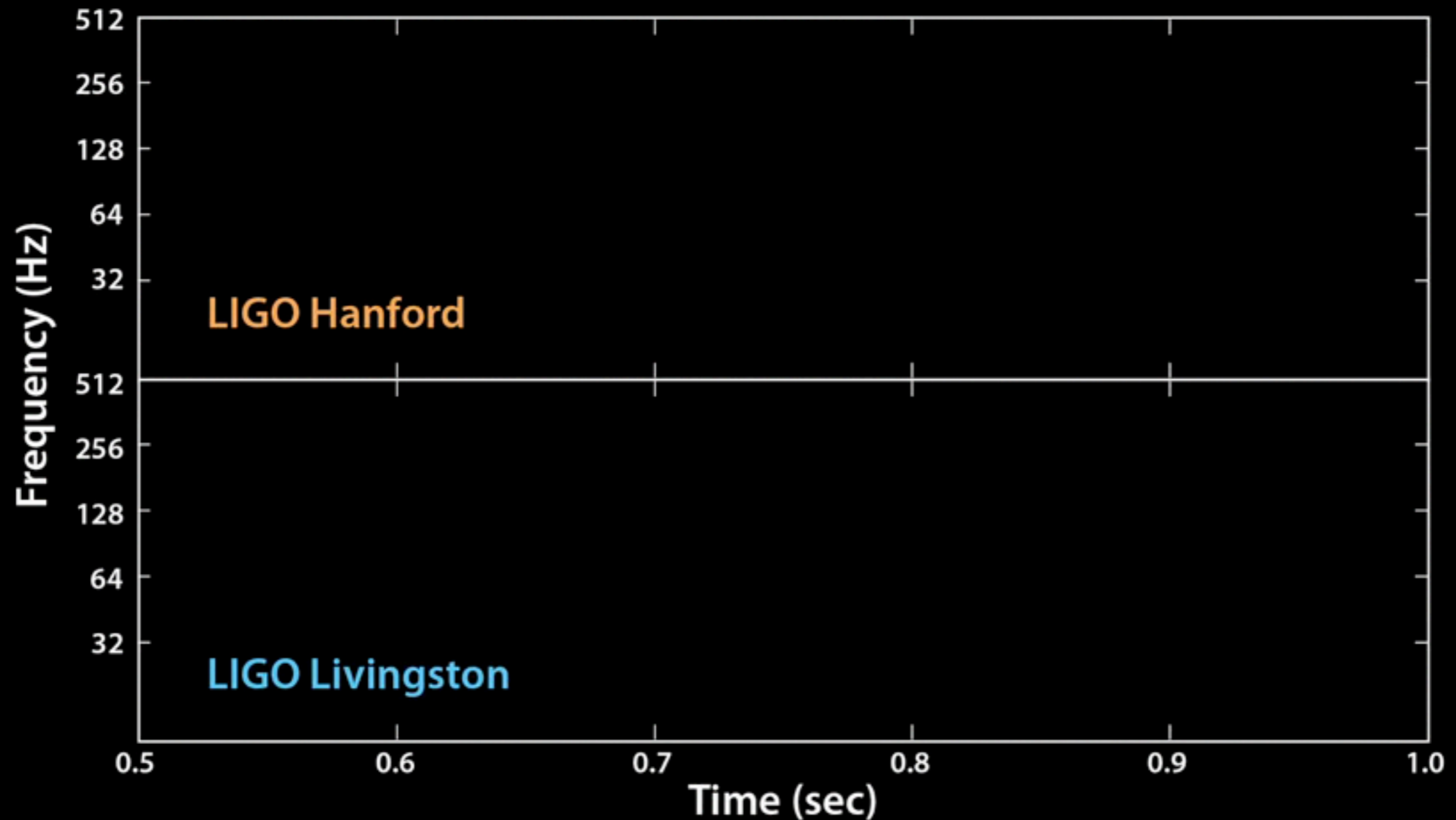
“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”

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

2015年9月14日



重力波波形を音にすると. . .



始め2回は実周波数, 後の2回は聞きやすいように+400Hz

<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



NOW WHAT??



MUTSNEE KLUBUNCHOO © 2016
ANIMATEDWEBCOMICS.COM
TWITTER @MUTV2_CNR



- News
 - Magazine
 - Advanced LIGO
 - LIGO science
 - Educational resources
 - For researchers
 - Multimedia
 - Partners
 - About
- GW-EM alerts
 - Data releases
 - LSC Scientific publications

PREFACE - IMPORTANT!

NOTE: This is an EXAMPLE of the data products that the LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration might release for their first gravitational wave transient detections. **This particular event was not a real detection; it was a "blind injection".** For more detail and background, see the [GW100916 news release](#).

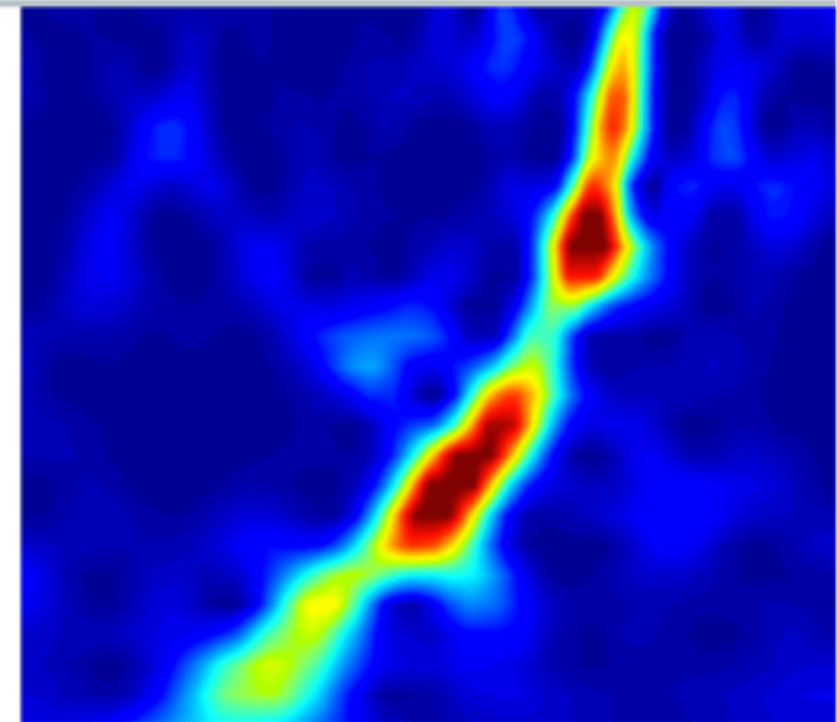
This page, and all the documents and information linked therein, are intended for release to interested scientific colleagues. We welcome your comments on what is useful to have on a page such as this. Please send your feedback to datainfo@ligo.org.

INFORMATION ABOUT GW100916

This page has been prepared by the LIGO Scientific Collaboration (LSC) and the Virgo Collaboration to inform the broader community about an interesting event observed in the gravitational-wave detectors, and to make the data around that time available for others to analyze.

SUMMARY OF OBSERVATION

Data from the gravitational-wave detector network is analyzed in several ways. This page concerns an event identified by multiple analysis pipelines which search for gravitational wave events at all times in the available gravitational-wave data. The event time is 968654557.955 GPS == Sep 16, 2010 06:42:22.955 UTC, and thus it has been assigned the name "GW100916". At that time, the 4-km LIGO Hanford and LIGO Livingston detectors, the 3-km Virgo detector, and the GEO 600-m detector were all collecting data in "science mode" as part of the LIGO-GEO S6 and Virgo VSR3 science runs. Analysis revealed a highly significant event consistent with the coalescence (inspiral and merger) of two black holes or a black hole and a neutron star.



Note: This event was a "blind injection", i.e. a simulated signal inserted into the data streams of the detectors. This page is provided as an example of how a real gravitational wave event may be presented in the future.

GW100916 "Big Dog"



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_{-180}^{+160} Mpc corresponding to a redshift $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$. In the source frame, the initial black hole masses are $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$ 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

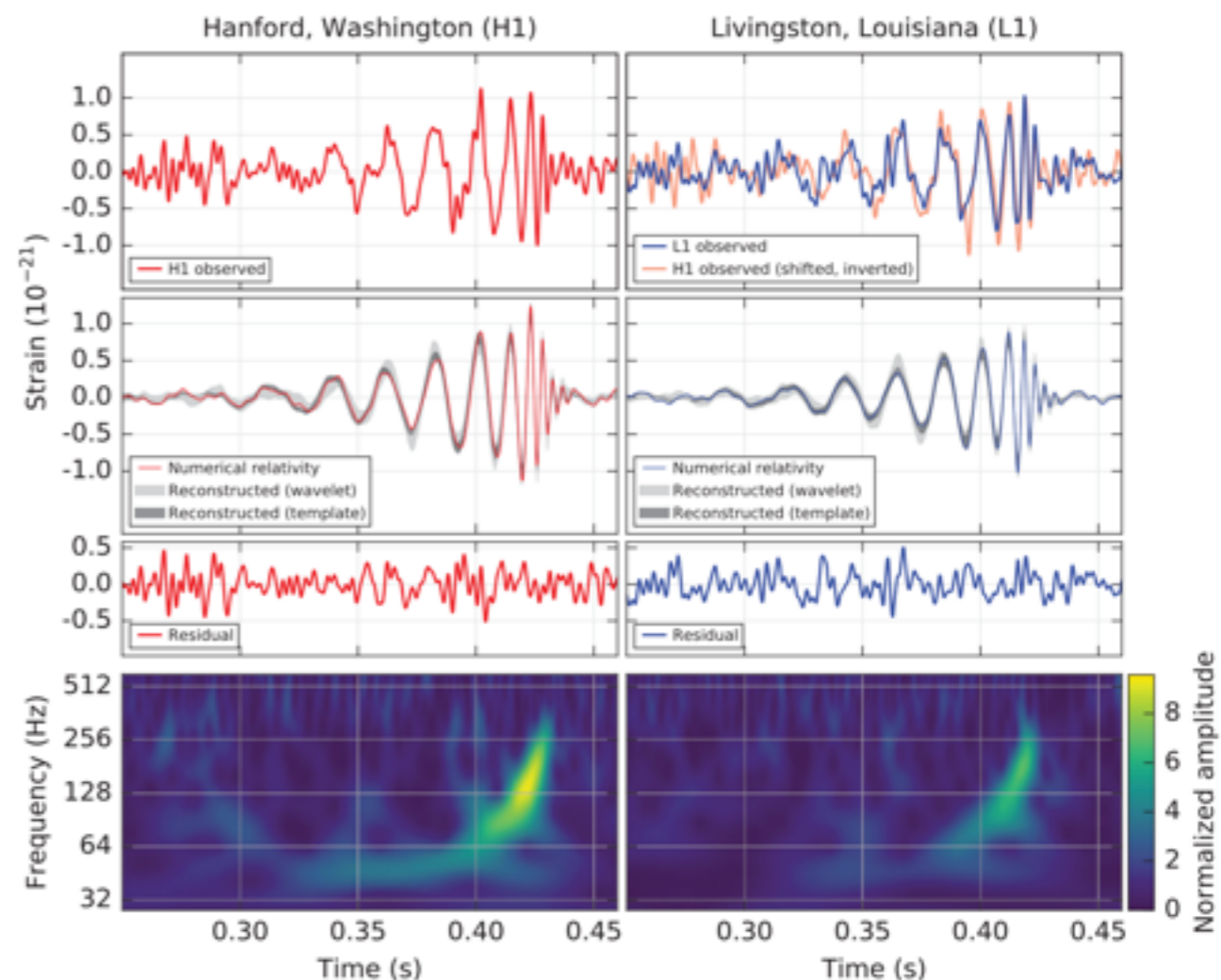
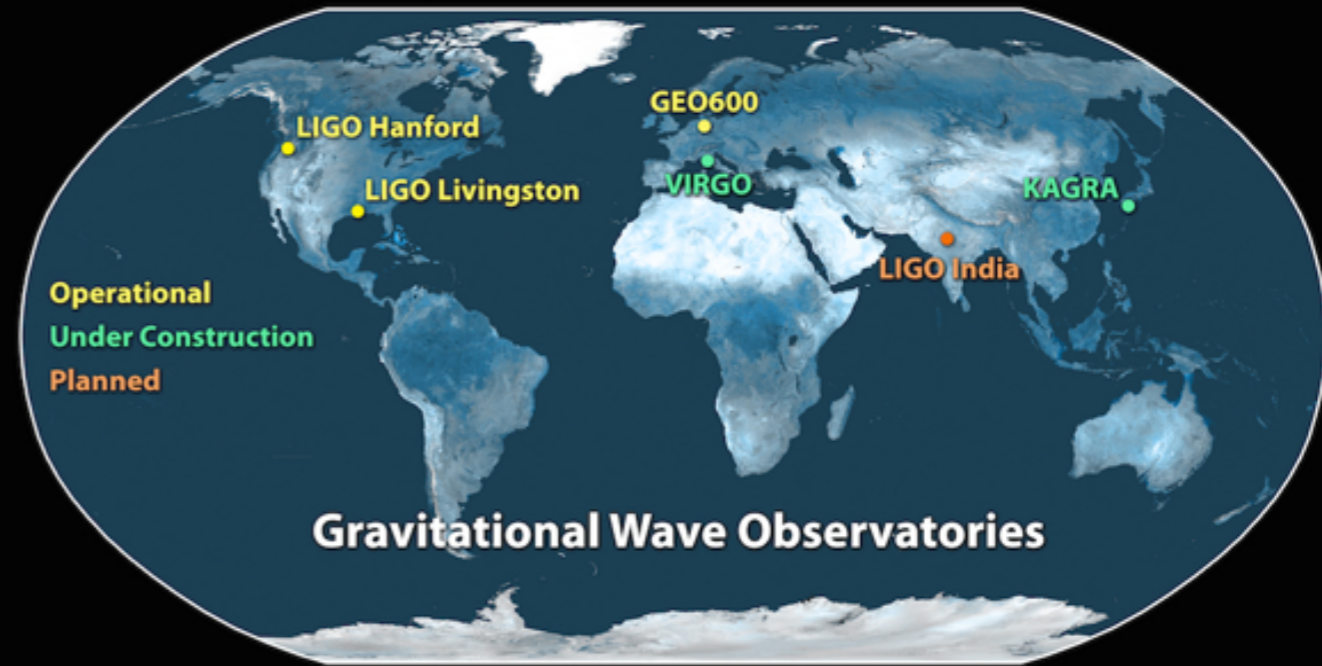


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered

2015年9月14日

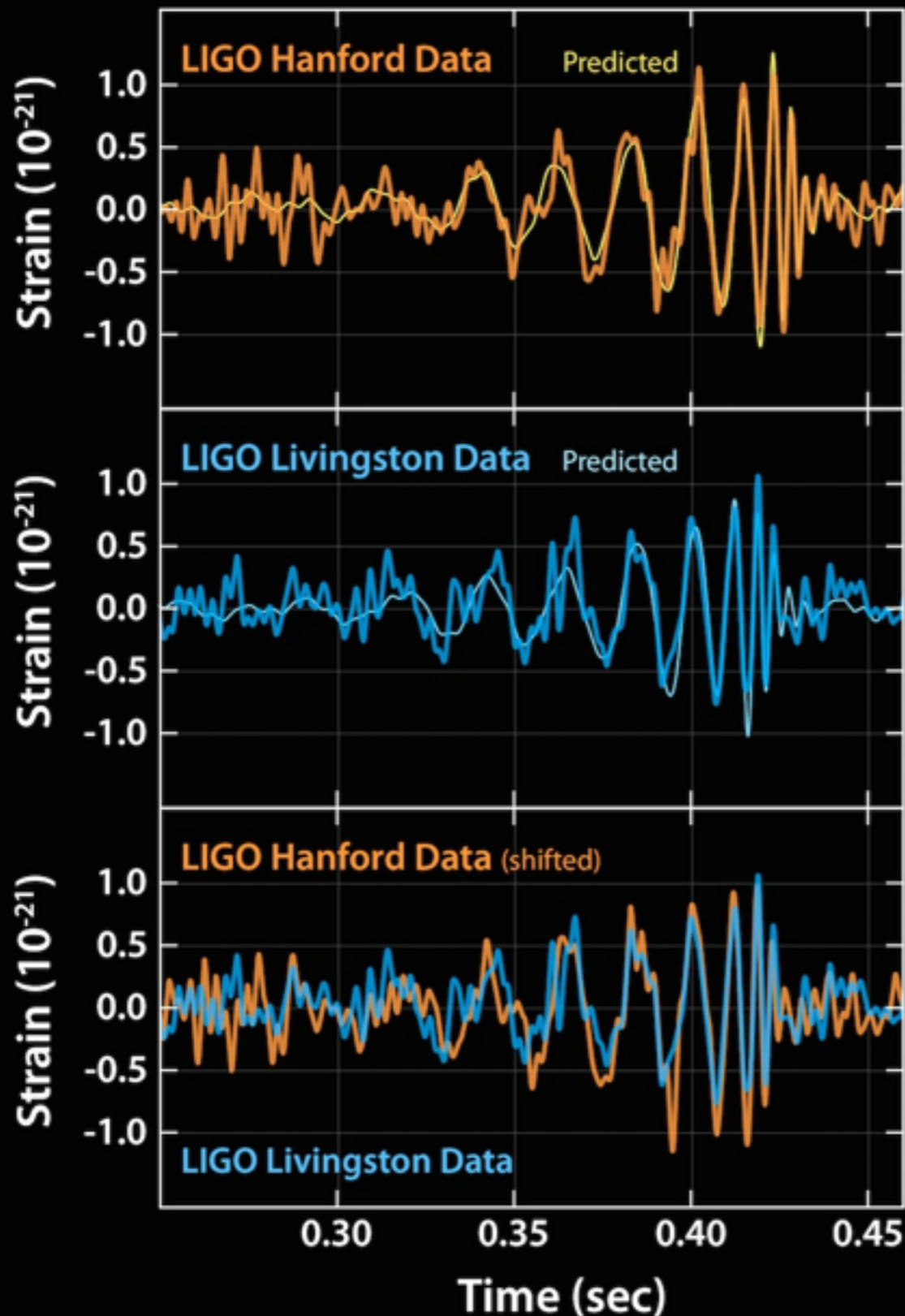


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



重力波 初の直接観測

「研究者勇気づけた」

大阪市大院・神田教授 学生らに解説

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらおう狙い。学生ら約1000人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【畠山哲郎】



重力波観測について解説する大阪市立大学大学院理学研究科の神田展行教授—大阪市住吉区で、川平愛撮影

神田教授は、岐阜県飛騨市の大型低温重力波望遠鏡「KAGRA」のプロジェクトでもデータ管理グループのリーダーを務める。説明会では観測されたデータの見方などを解説し、「我々にとっても勇気づけられるものだった」と語った。発表を受けて、研究室の学生

同大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(23)は「重力波だけでなく、ブラックホールも直接観測したことになる」と分かったため、「話しているうちに重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさざ波のように宇宙空間に伝わる現象。物理学者のアインシュタインが「一般相対性理論」で存在を予言し、世界中の研究者が観測に挑戦していた。

ブラックホール 解明に期待

る精度を目指す。実現すれば七億光年の範囲にある連星からの重力波を捉えられる。一年で十回ほどキヤッチできる計算だという。



重力波の大きな特徴はブラックホールからも放出されること。連星が合体してブラックホールが生まれる瞬間を観測できると期待される。時間と空間をねじ曲げてすべてをのみ込むブラックホールは、光も電波も出さないため直接には観測

大阪工業大の真貝寿明教授(理論物理学)は「重力波を天文学に使うには、発生した場所を割り出す必要がある。それには望遠鏡が四力所必要だ。KAGRAを含めた世界的なネットワークが重要」と話す。

東京新聞 2016/2/12

重力波が検出された！
重力波が検出できた！
ブラックホールが存在した！
ブラックホール連星が存在した！
相対性理論、正しかった！

大阪工大「予想通りで驚いた」
大阪工業大情報科学部の真貝寿明教授(一般相対性理論)は「祝・重力波の直接検出」と題して、研究室のウェブページに

100年と展開」を出版している。「こんなにも予想通りのものが見つかるのかと驚いた。素晴らしい発見だ」と感想を語った。今後の研究については「日本でもKAGRAを使い、改めて重力波を確認したり、海外のチームと協力して重力波がどこから来たものなのかを調べたりしていくことが重要だ」と話した。
【畠山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13

重力波天文学で何がわかる？

対応する天体の姿

→ 天体物理学

ブラックホールの存在する強い重力場

→ 一般相対性理論の検証

中性子星連星合体のふるまい

→ 原子核の状態方程式

イベント頻度・統計

→ 星形成モデル・銀河中心ブラックホール
宇宙論パラメータ

背景重力波の存在

→ 星形成モデル・宇宙初期モデル

重力波天文学で何がわかる？

とんでもないこと？ → 世の中、実は5次元... とか

ブレンワールド型 タイムマシン1

～膜宇宙に生じる近道～

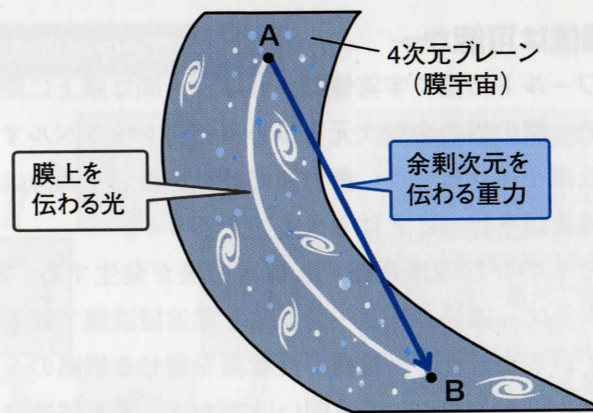
ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

ランドールとサンドラムによって提案されたモデルのように、4次元の膜は平らである必要はなく、膜上にブラックホールなどの強い重力源がある場合、重力の伝わる

力は余剰次元を伝播できるかも速く2点間を結んで伝わるから重力が重力波として伝わり、間の距離を光速で伝わって届いた重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力

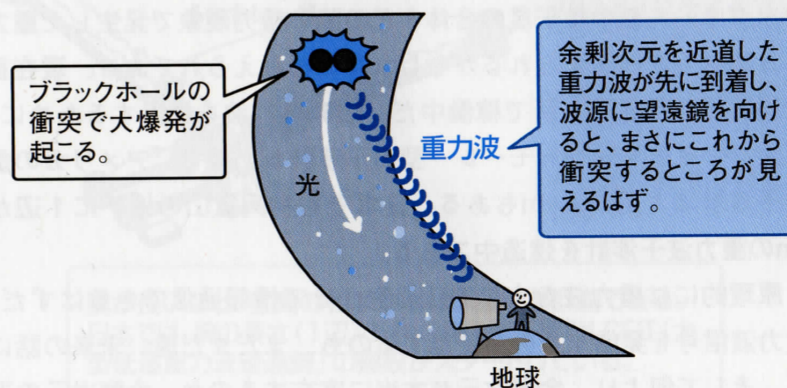
は余剰次元を伝播できるかも速く2点間を結んで伝わるから重力が重力波として伝わり、間の距離を光速で伝わって届いた重力波が伝わることも可能だ。望遠鏡で見るよりも、重力

余剰次元を通過して近道をする



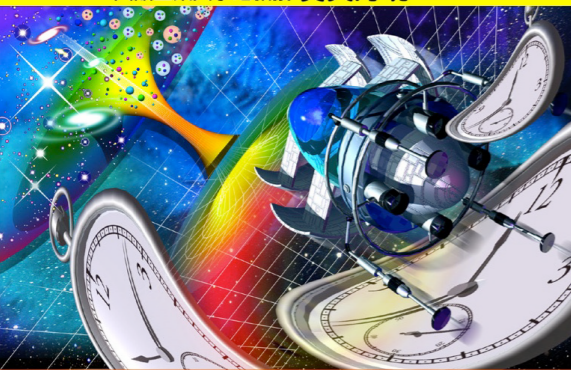
重力は余剰次元を通過することで、膜上を通る光よりも速く伝わるることができる。

重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??



図解雑学 タイムマシンと 時空の科学

大阪工業大学准教授 真貝寿明 = 著



タイムマシンに関連する最新の物理学研究を紹介し、タイムトラベルの可能性と問題点をやさしく解説します。物理や宇宙の不思議な世界へご招待!

2016年 重力波天文学の幕開け

重力波が検出された！
重力波が検出できた！
ブラックホールが存在した！
ブラックホール連星が存在した！
相対性理論、正しかった！



光学天文学の幕開け
ガリレイ 1605年

100年もかかったのか。

