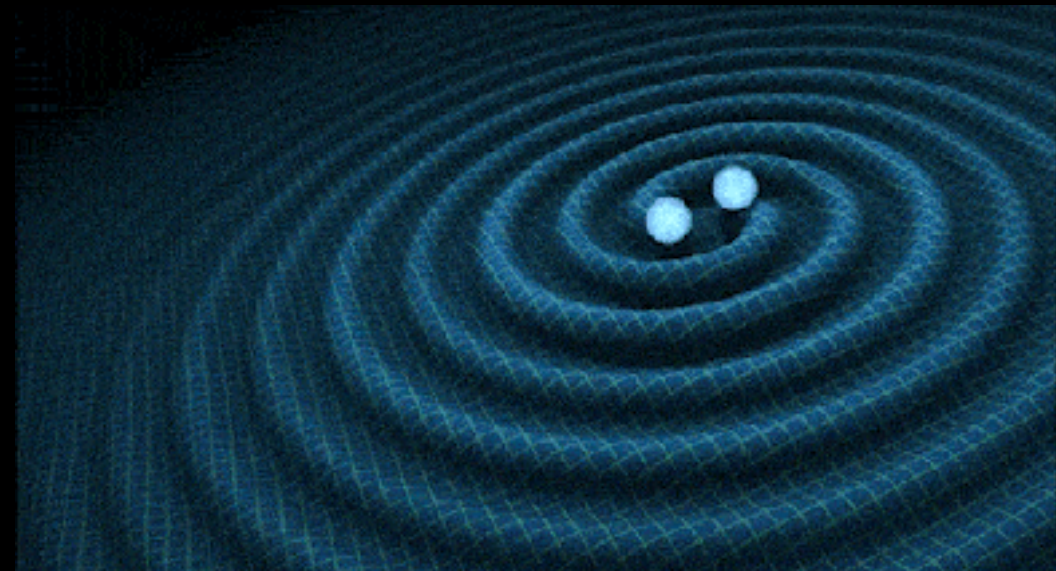
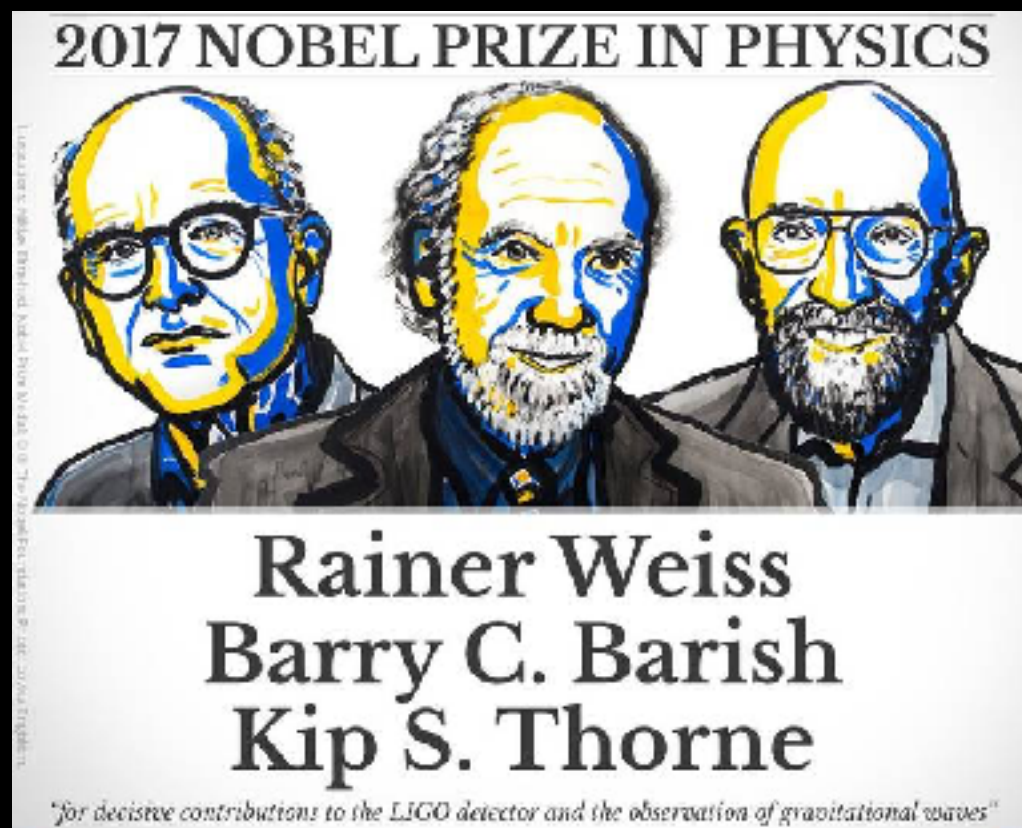


重力波観測は物理学から天文学へ

2017年ノーベル物理学賞解説



真貝寿明（しんかいひさあき）

大阪工業大学

KAGRA サイエンス部門実行委員長

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>

"For the greatest benefit to mankind"
Alfred Nobel

2017 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

Rainer Weiss
Barry C. Barish
Kip S. Thorne



ライナー・ワイス(85)

バリー・バリッシュ(77)

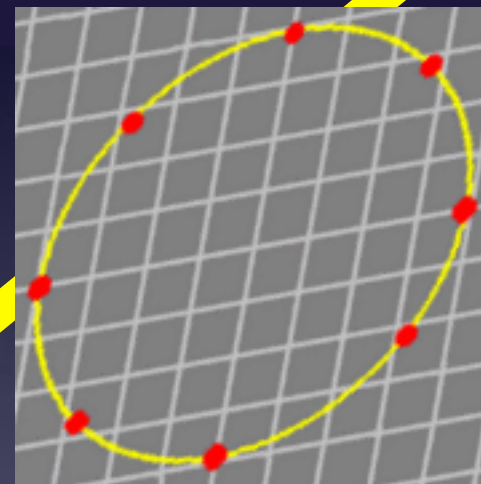
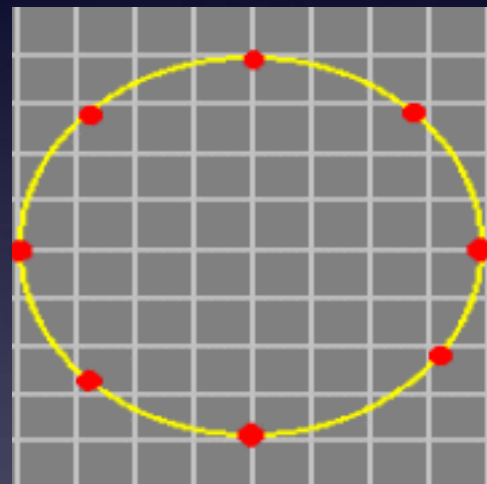
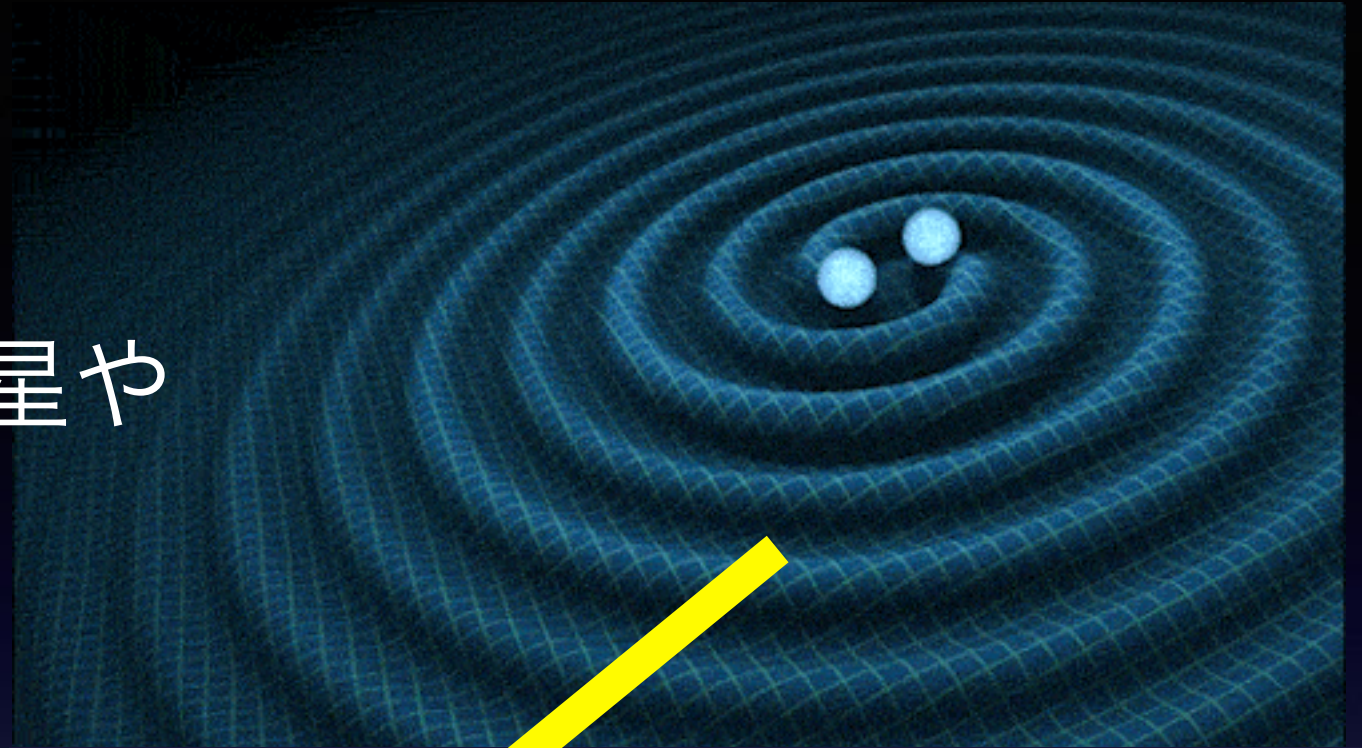
キップ・ソーン(77)

"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"

LIGO検出器への決定的な貢献と重力波の観測に対して

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

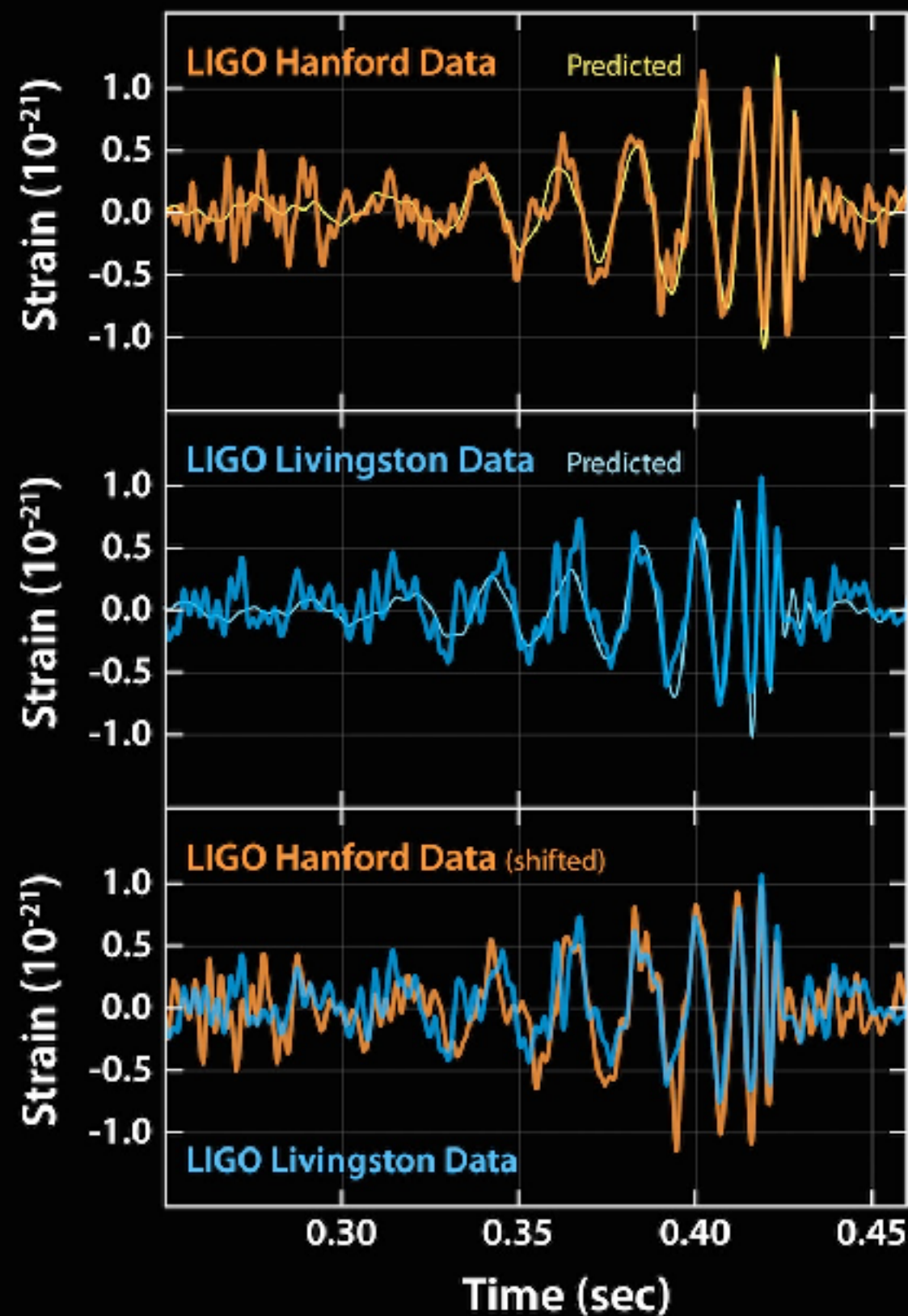
Gravitational-Wave Observatory

[illegible]

2015年9月14日

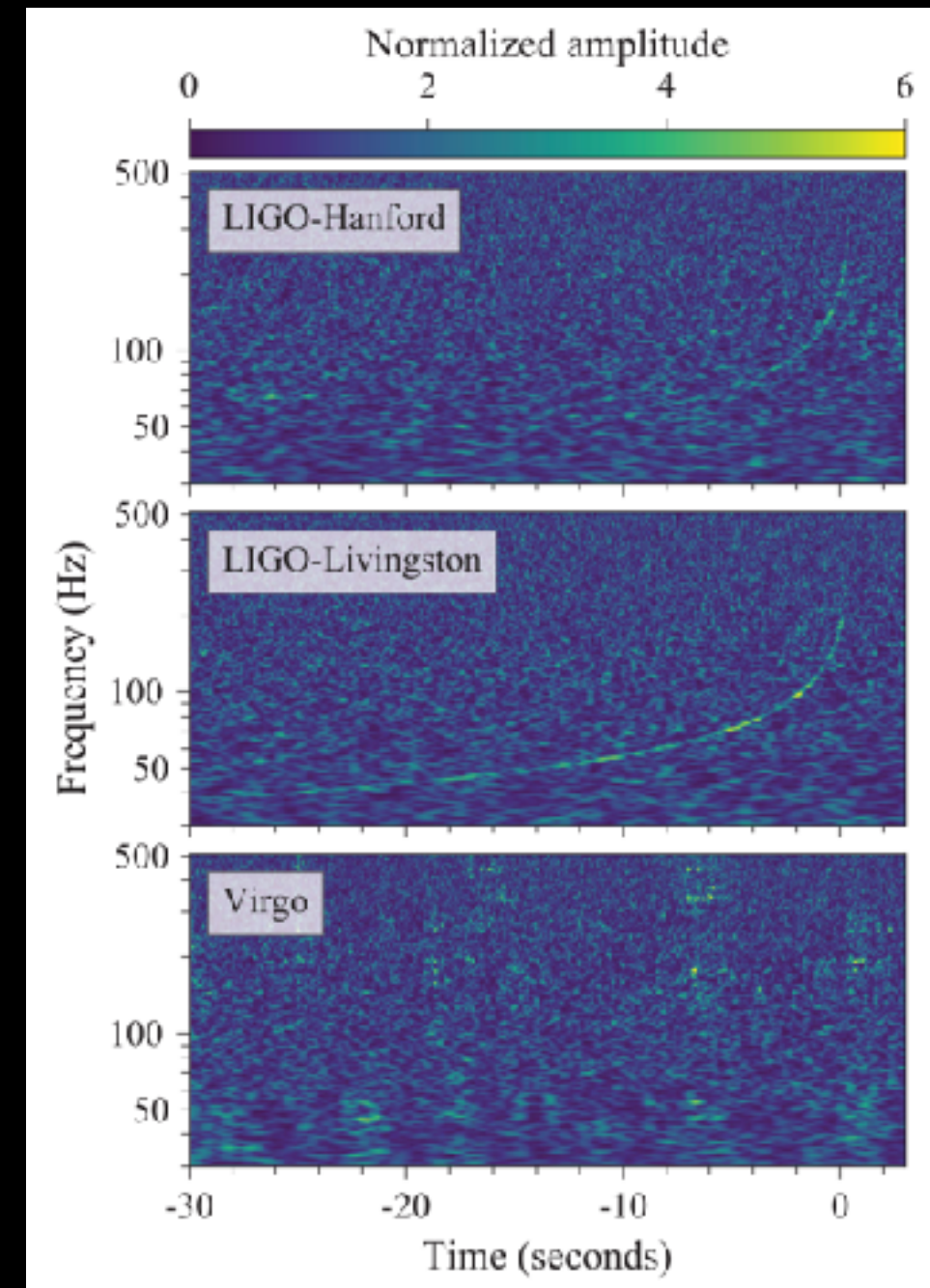


ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった



2017年10月, LIGO/Virgoが中性子星連星の合体によって
生じた重力波を初めて検出した, と発表した

2017年8月17日



本日の内容

1. 重力波とは

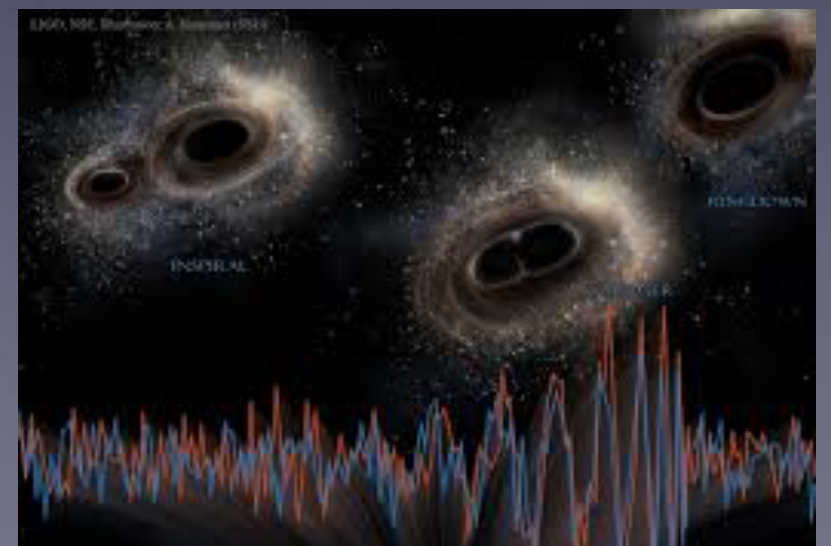
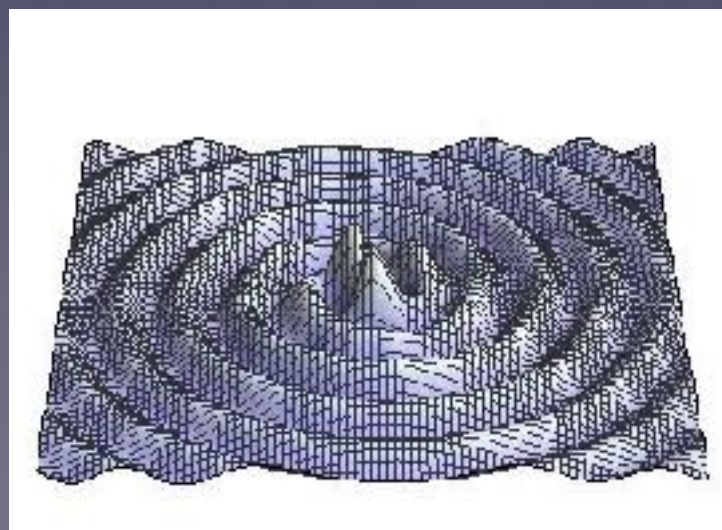
Einsteinが残した100年越しの宿題
重力波の発見まで

2. 直接観測された重力波

レーザー干渉計のしくみ
LIGOグループが発見した5つの重力波イベント

3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測
重力波観測から何がわかるか



本日の内容

1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題
重力波の発見まで

2. 直接観測された重力波

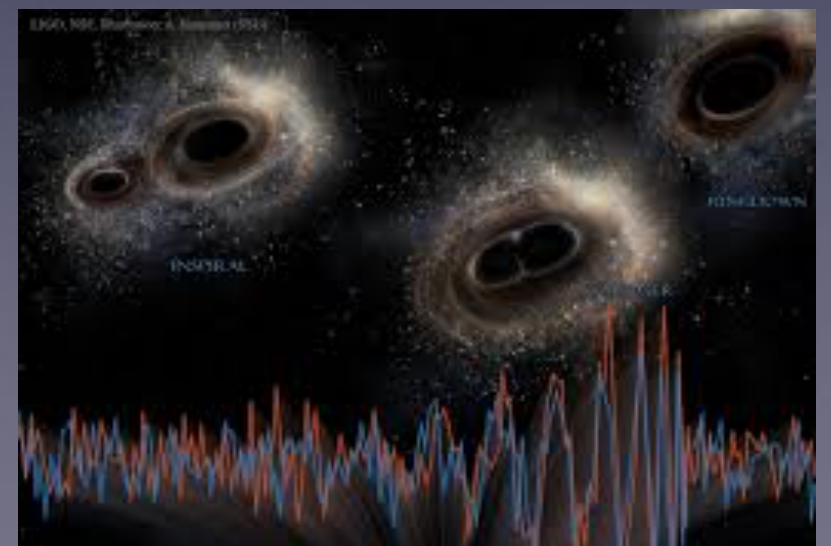
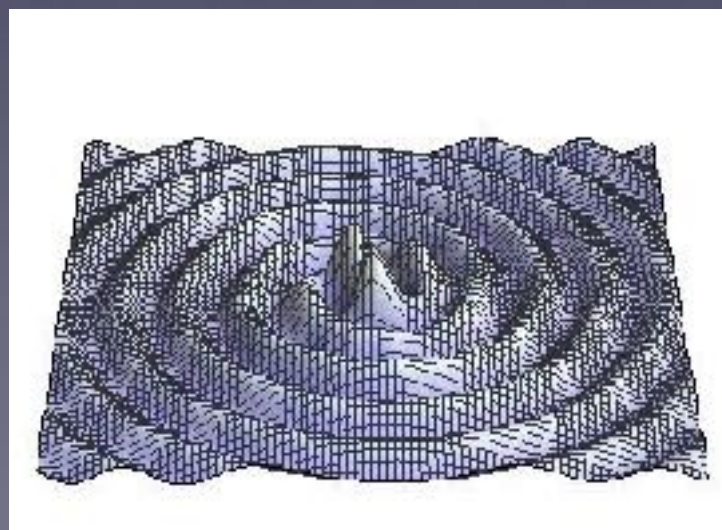
レーザー干渉計のしくみ

LIGOグループが発見した5つの重力波イベント

3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測

重力波観測から何がわかるか



重力の正体は？



by Fritz Ahlfeldt

<http://hikingartist.com/>



by Fritz Ahlfeldt



by Fritz Ahlfeldt



by Fritz Ahlfeldt



by Fritz Ahlfeldt

重力の正体は？



by Felix Ahlertsd

<http://hikingartist.com/>



by Felix Ahlertsd



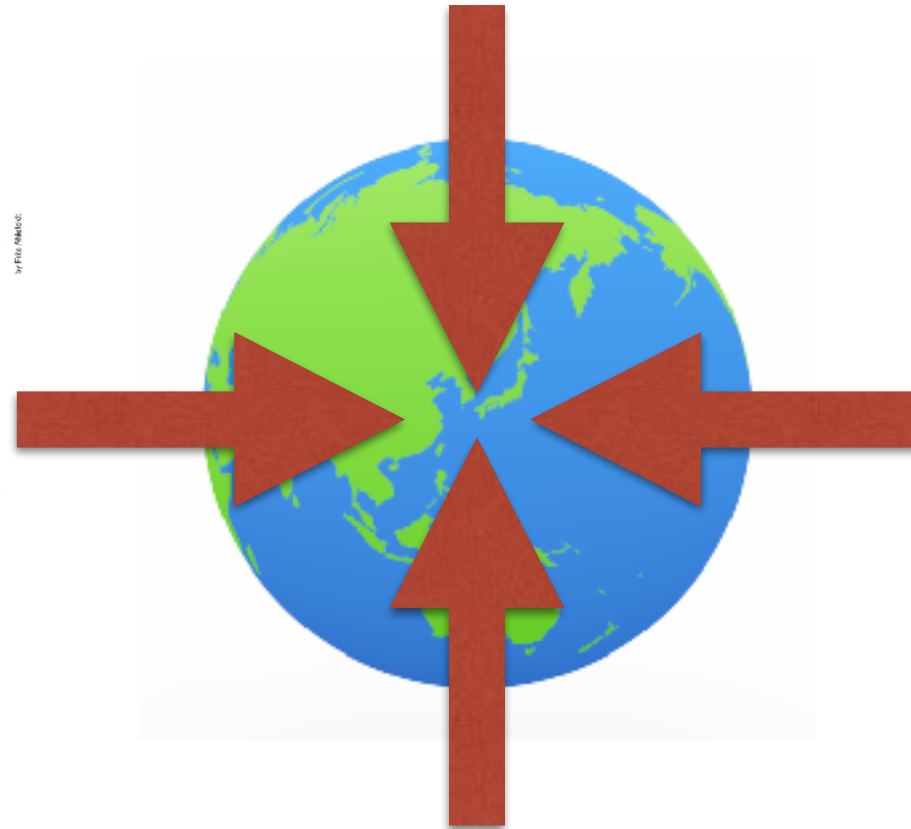
by Felix Ahlertsd



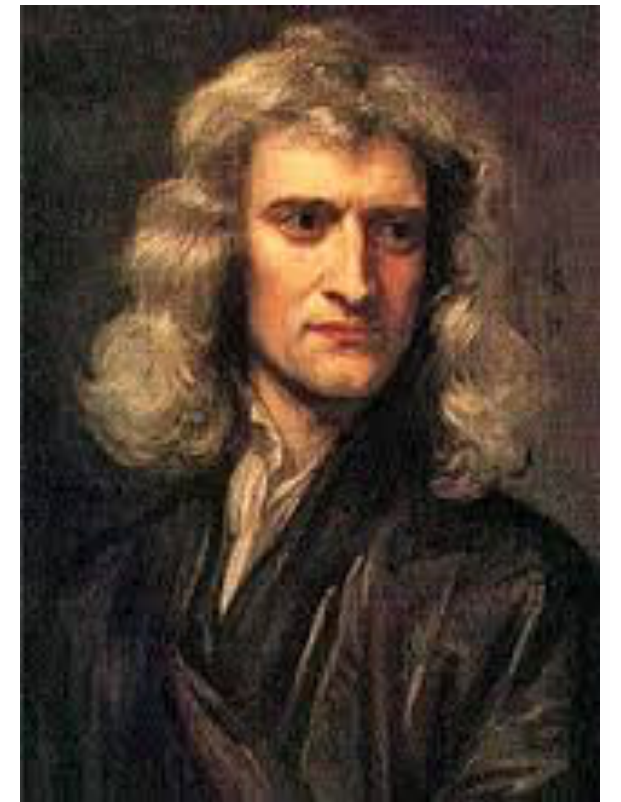
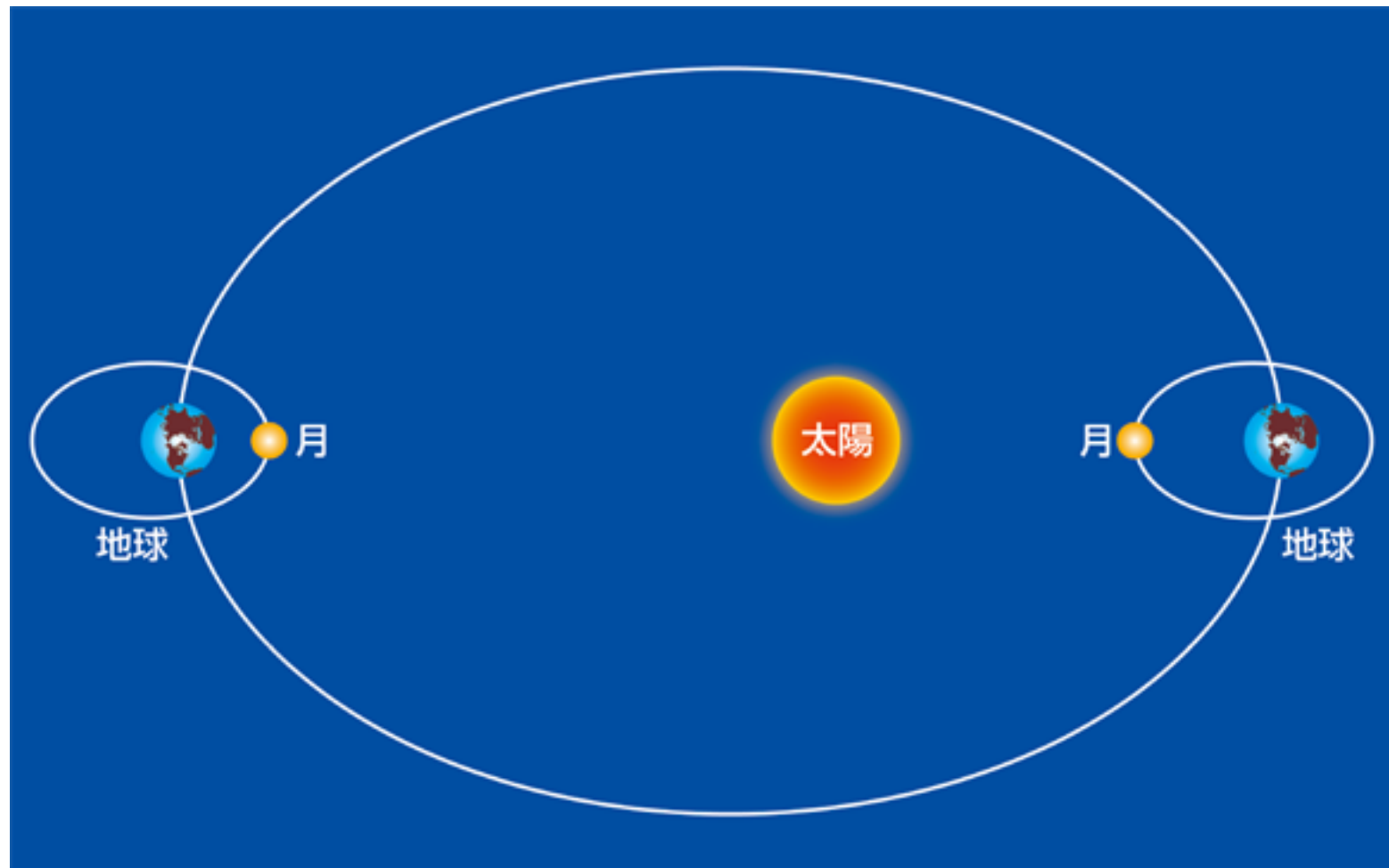
by Felix Ahlertsd



by Felix Ahlertsd



重力の正体は？



ニュートン

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

万有引力

=すべてのものは引力で引き合う

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)

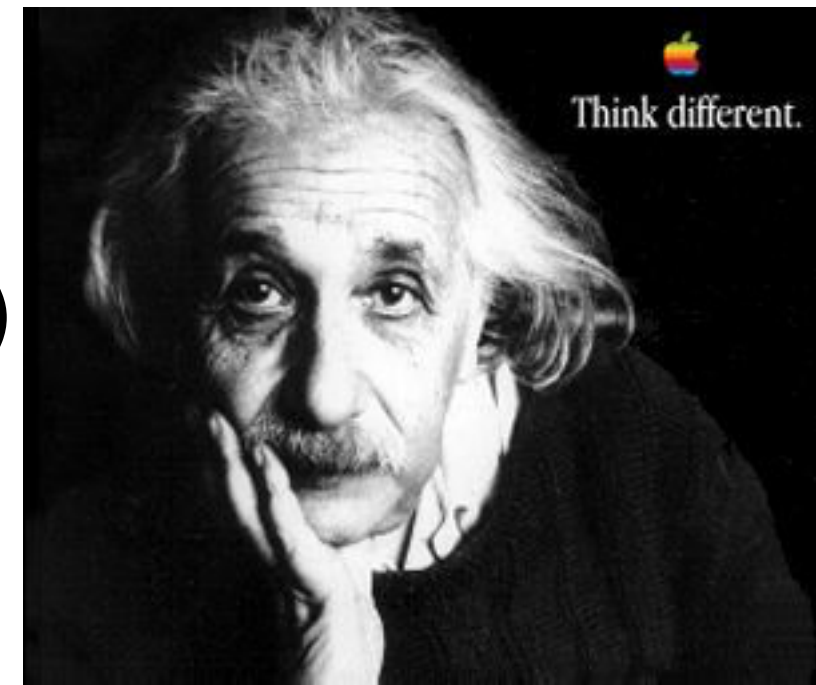
$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

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

「時空のゆがみだ」

(アインシュタイン, 1915)

一般相対性理論



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

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

IT'S A RIPPLE IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

IMAGINE THAT SPACE IS A GIANT SHEET OF RUBBER...

THINGS THAT HAVE MASS
CAUSE THAT RUBBER SHEET
TO BEND, LIKE A BOWLING
BALL ON A TRAMPOLINE.

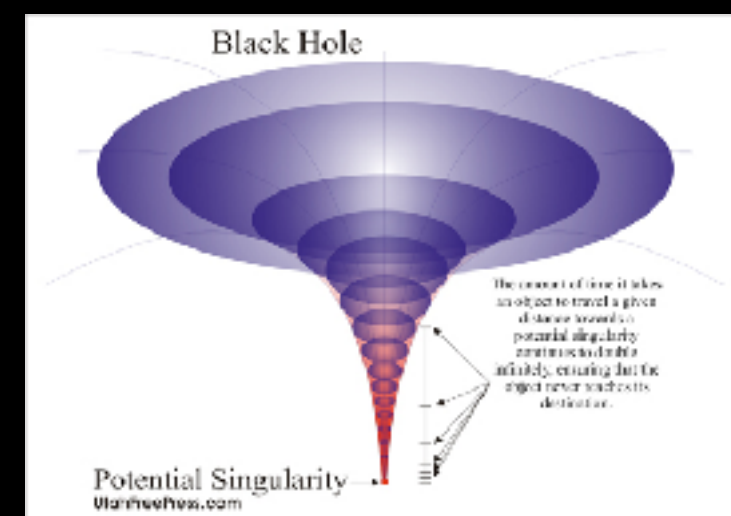
THE MORE MASS, THE MORE
THAT SPACE GETS BENT AND
DISTORTED BY GRAVITY.

JORGE CHAM © 2016

FOR EXAMPLE, THE REASON THE EARTH GOES AROUND THE
SUN IS THAT THE SUN IS VERY MASSIVE, CAUSING A BIG
DISTORTION OF THE SPACE AROUND IT.

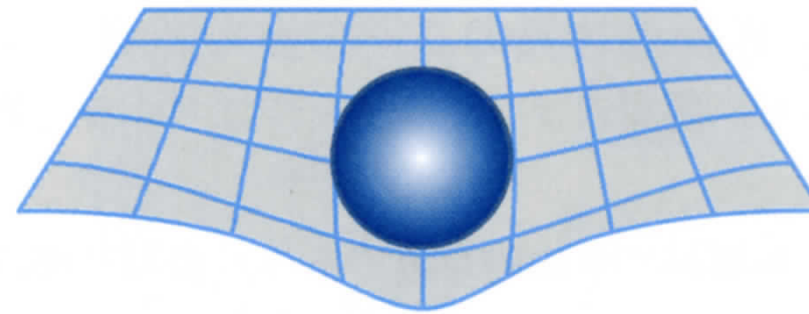
IF YOU JUST TRY TO MOVE IN A STRAIGHT LINE
AROUND SUCH A BIG DISTORTION, YOU WILL FIND
YOURSELF ACTUALLY MOVING IN A CIRCLE.

THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO
ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS
AROUND. JUST A BENDING OF THE SPACE.

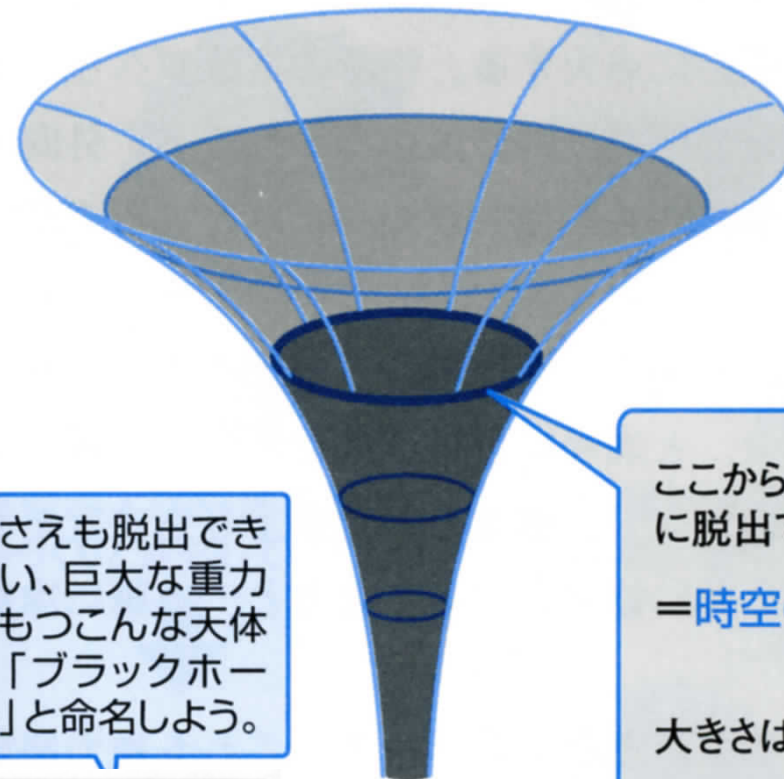


ブラックホール

ブラックホール
= 重力が強すぎて、光さえも
出られない天体
= 因果的に隔離される領域
境界 = 地平面
(ホライズン)



重い物体の周りでは
時空がゆがむ。



非常に重い物体のまわりでは時空が大きくゆがんで、ブラックホールになる。

光さえも脱出できない、巨大な重力をもつこんな天体を「ブラックホール」と命名しよう。

ここから内側からは光さえも外向きに脱出できない。

= 時空の地平面 (event horizon)

大きさはシュワルツシルト半径 r

$$r = \frac{2GM}{c^2}$$

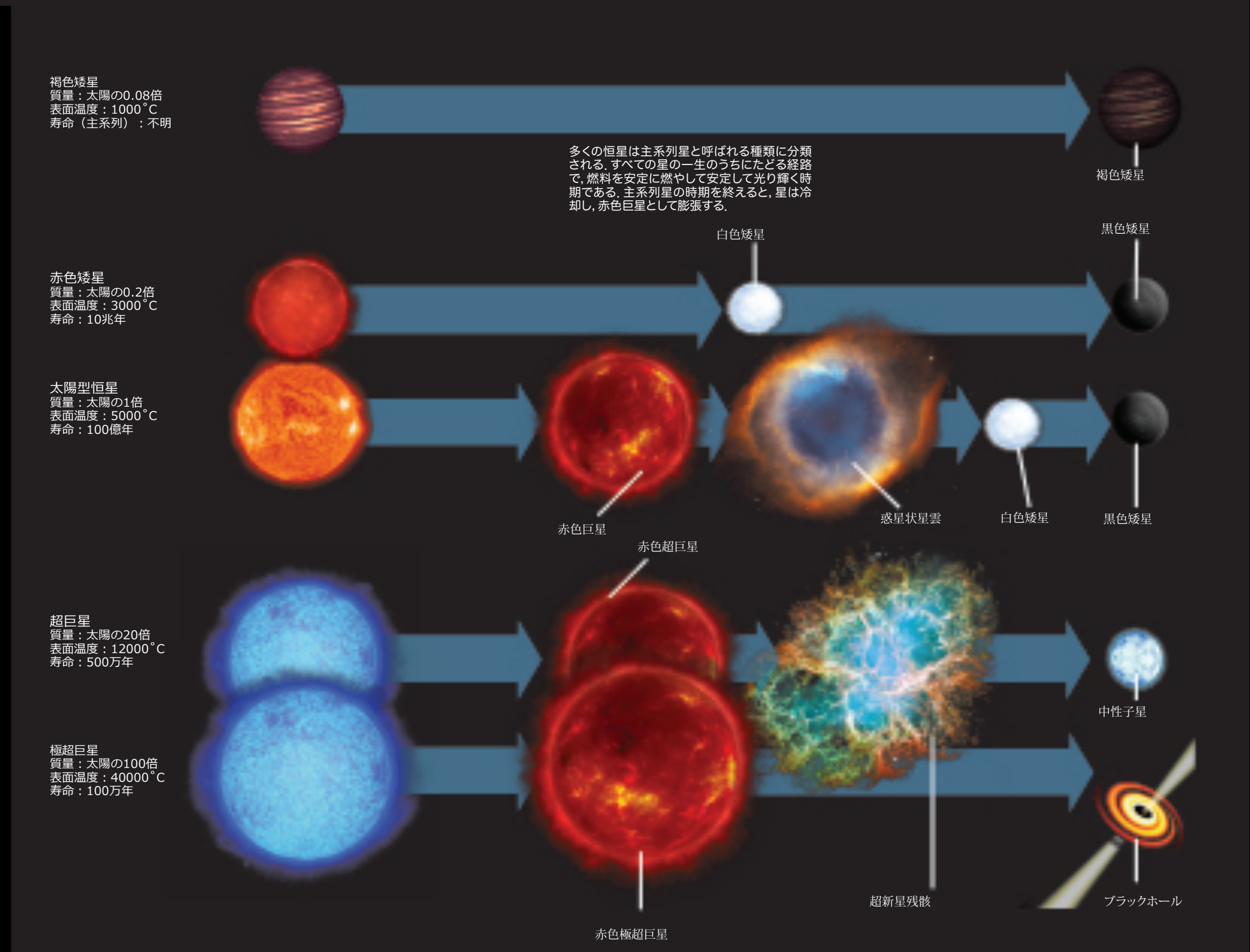
(M : 物体の質量, G : 重力定数, c : 光速)

太陽なら半径3km、地球なら半径9mmにそれぞれの全質量を押しこめば、ブラックホールになる。

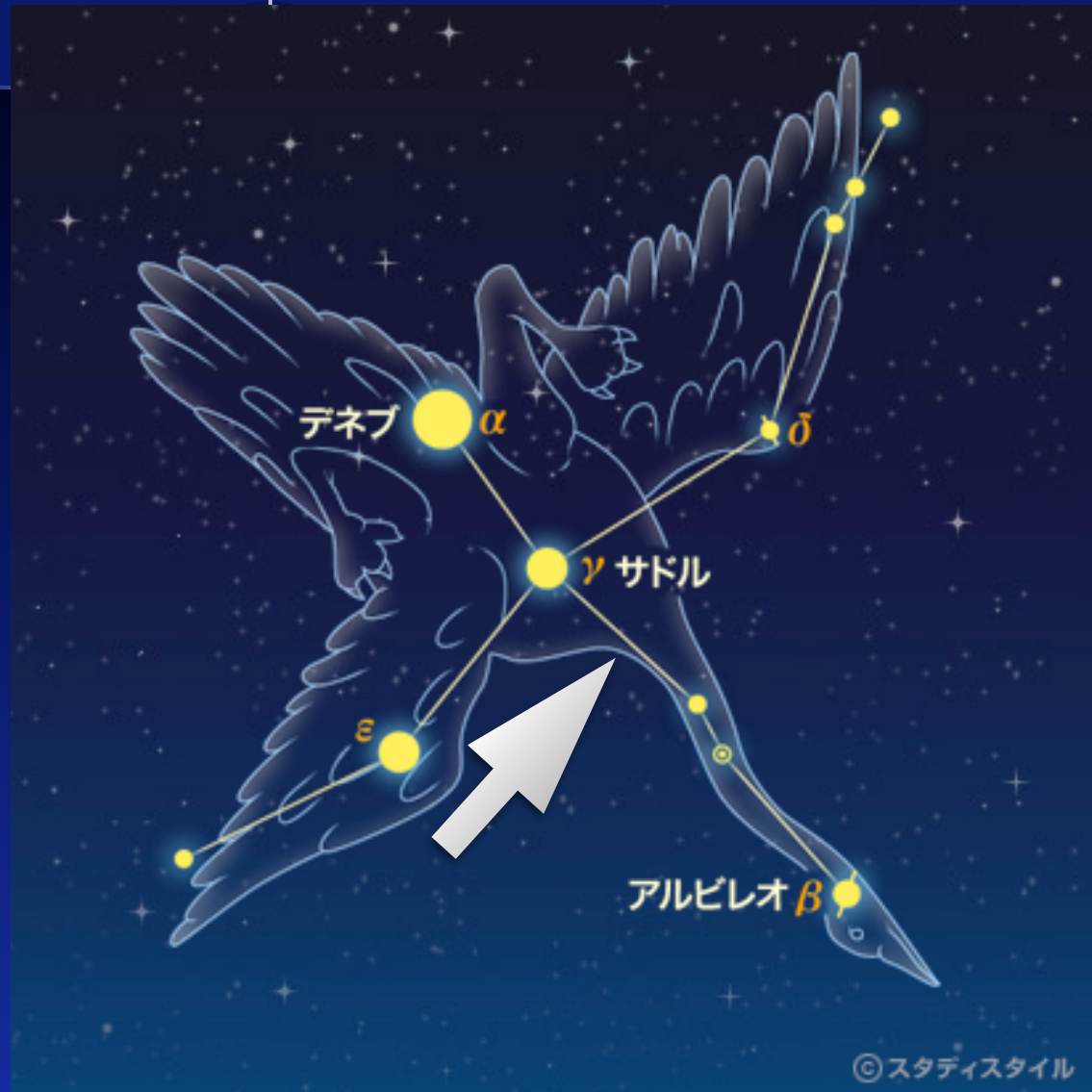


ホイーラー

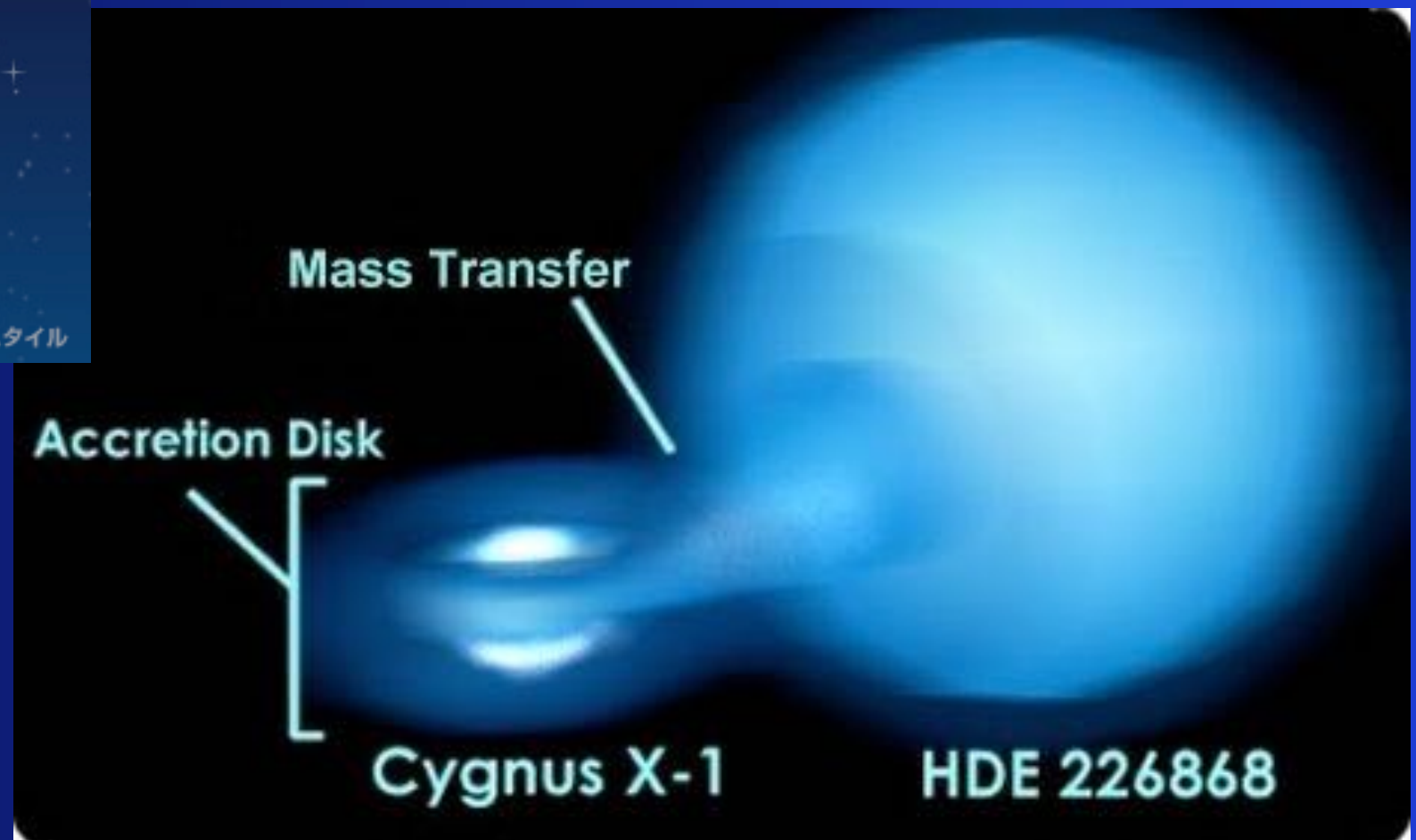
重い星が燃え尽きると 中性子星やブラックホールに



はくちょう座 X-1はブラックホール



6000光年先



はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座



銀河中心

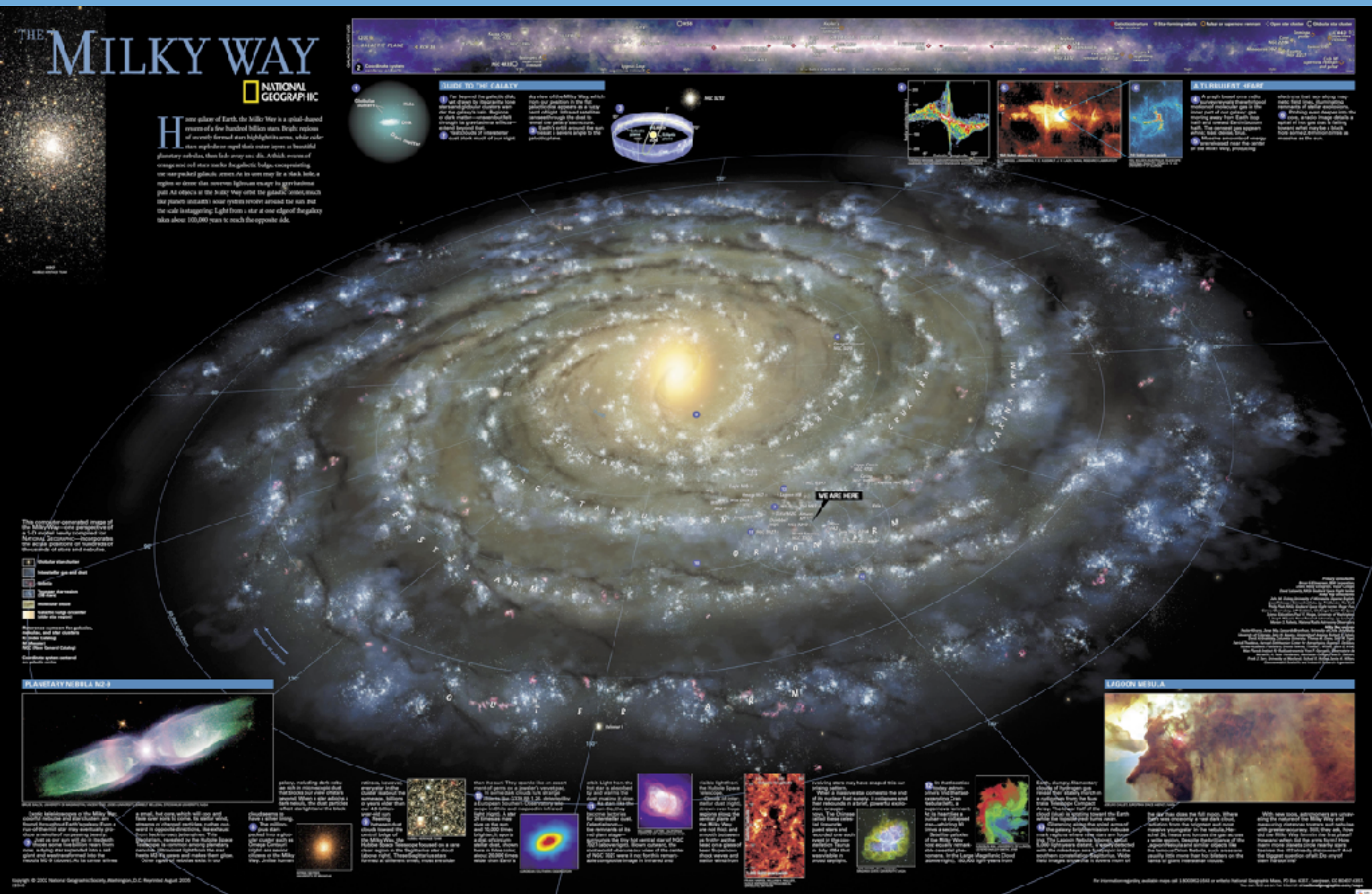


さそり座



いて座

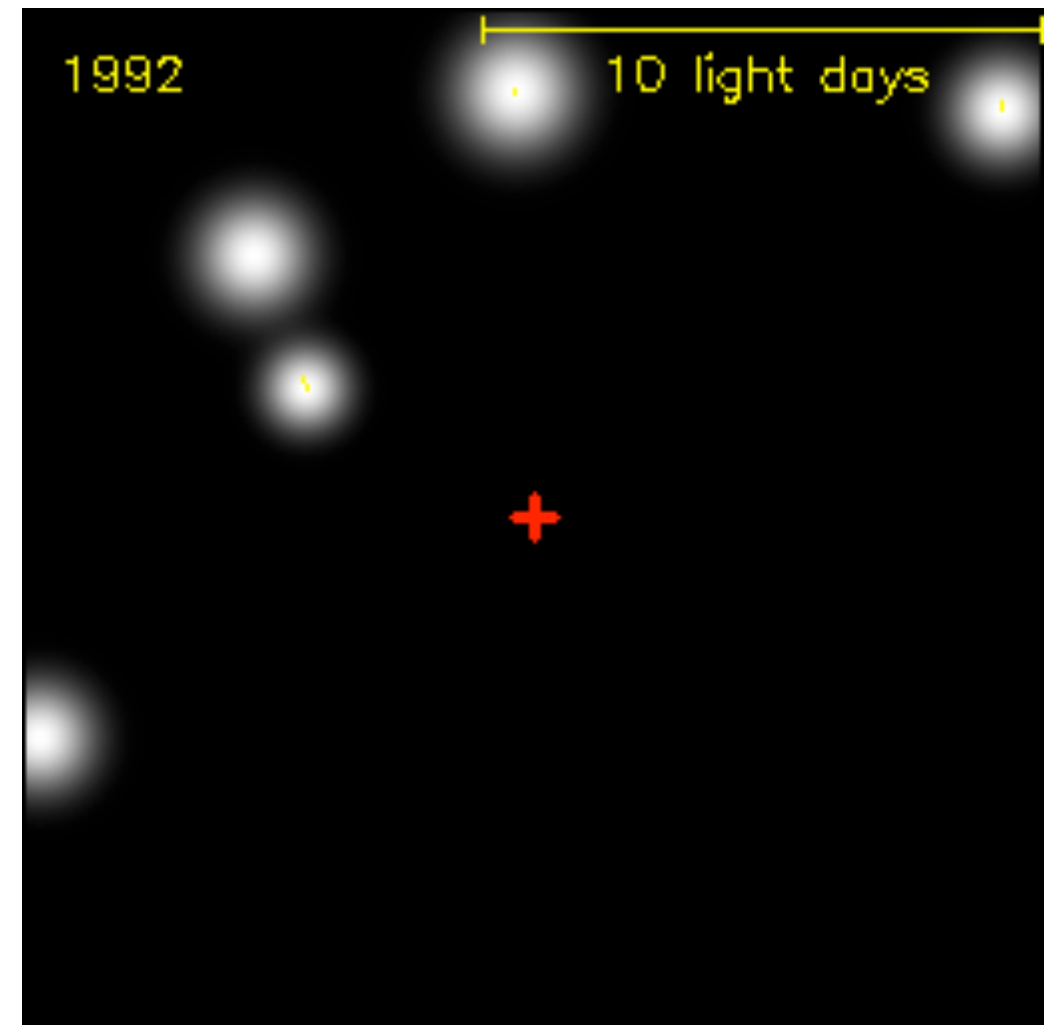
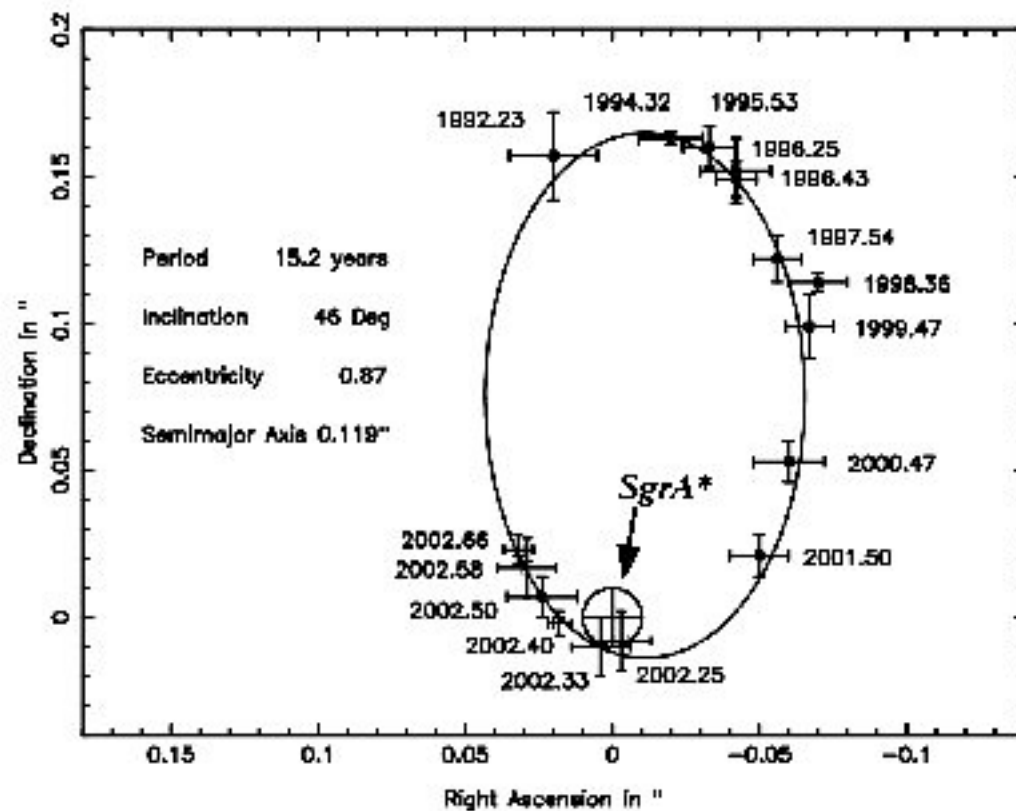
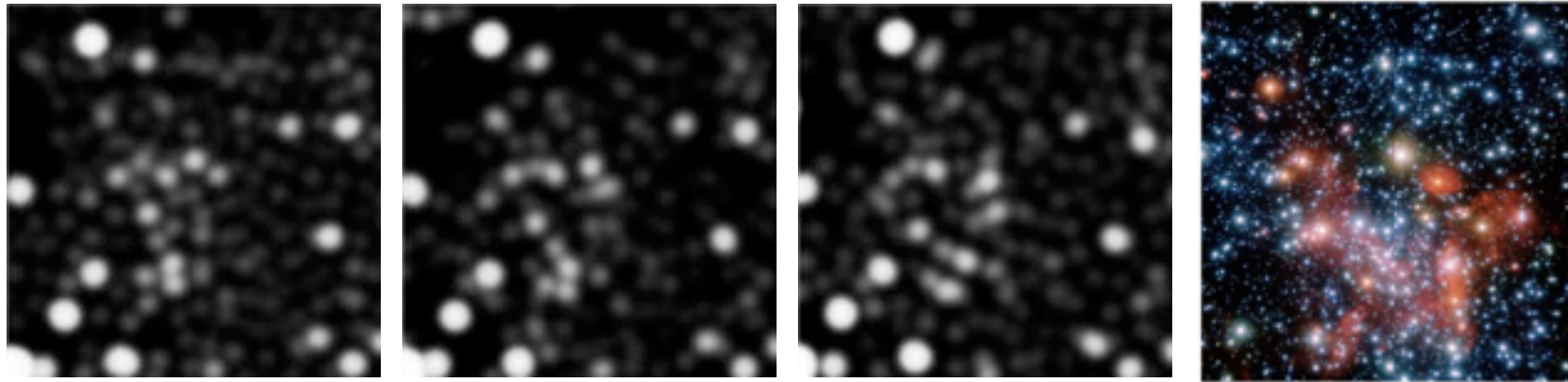
天の川銀河 (our Galaxy)



<http://shop.nationalgeographic.com/ngs/product/maps/wall-maps/space-maps/the-milky-way-map%2C-laminated>

<http://ernstgraphics.wordpress.com/page/2/>

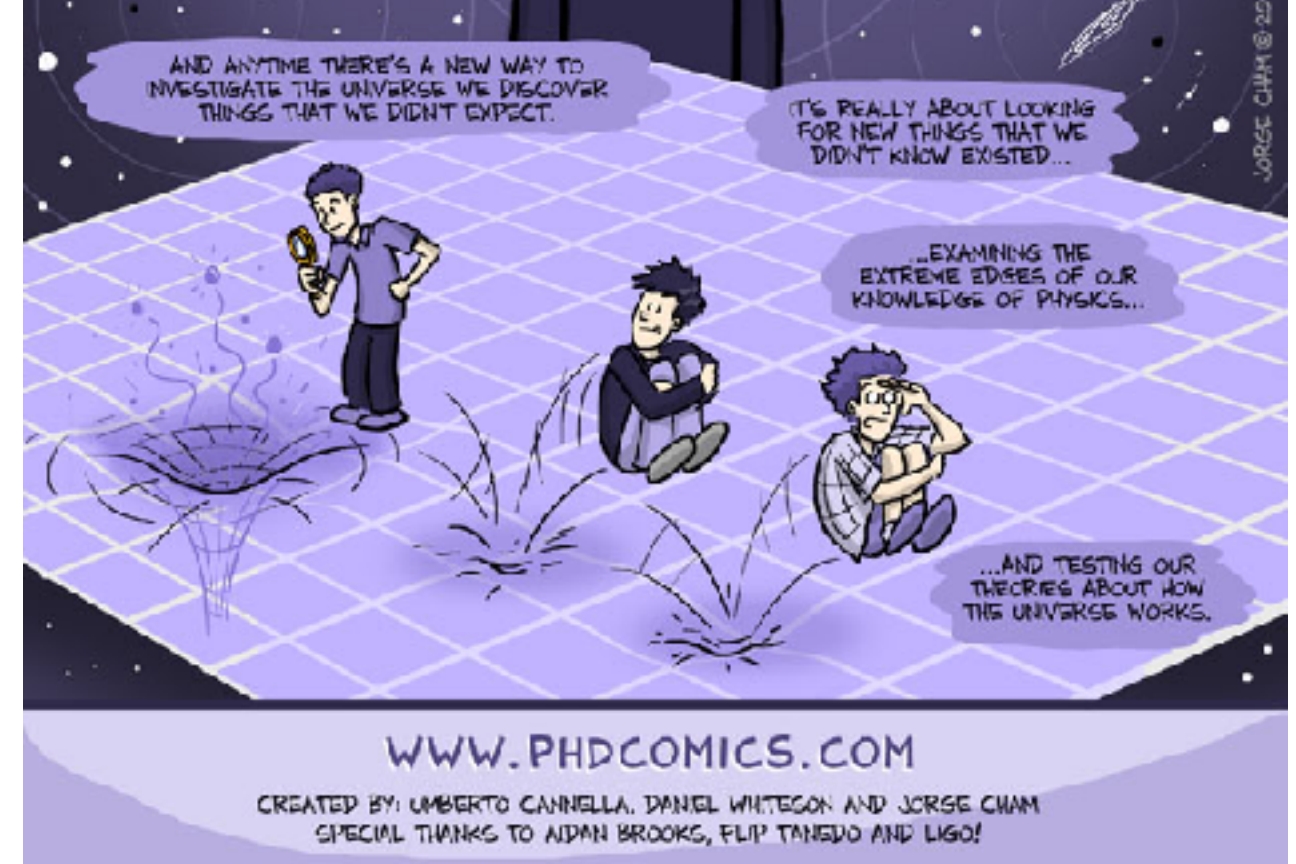
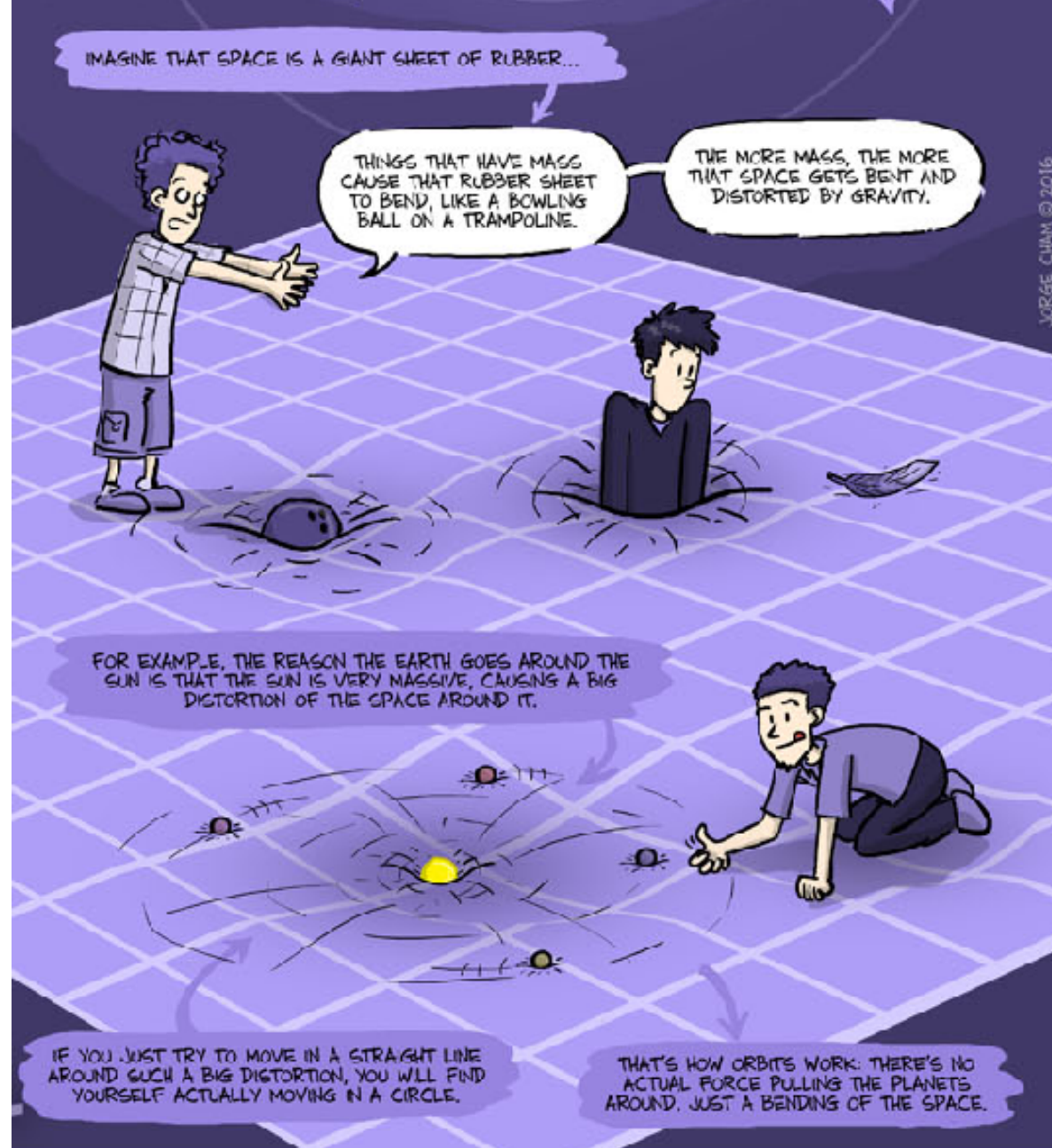
S2 orbit around Sgr A*



我々の銀河中心には、
太陽の420万倍の質量の
ブラックホール！

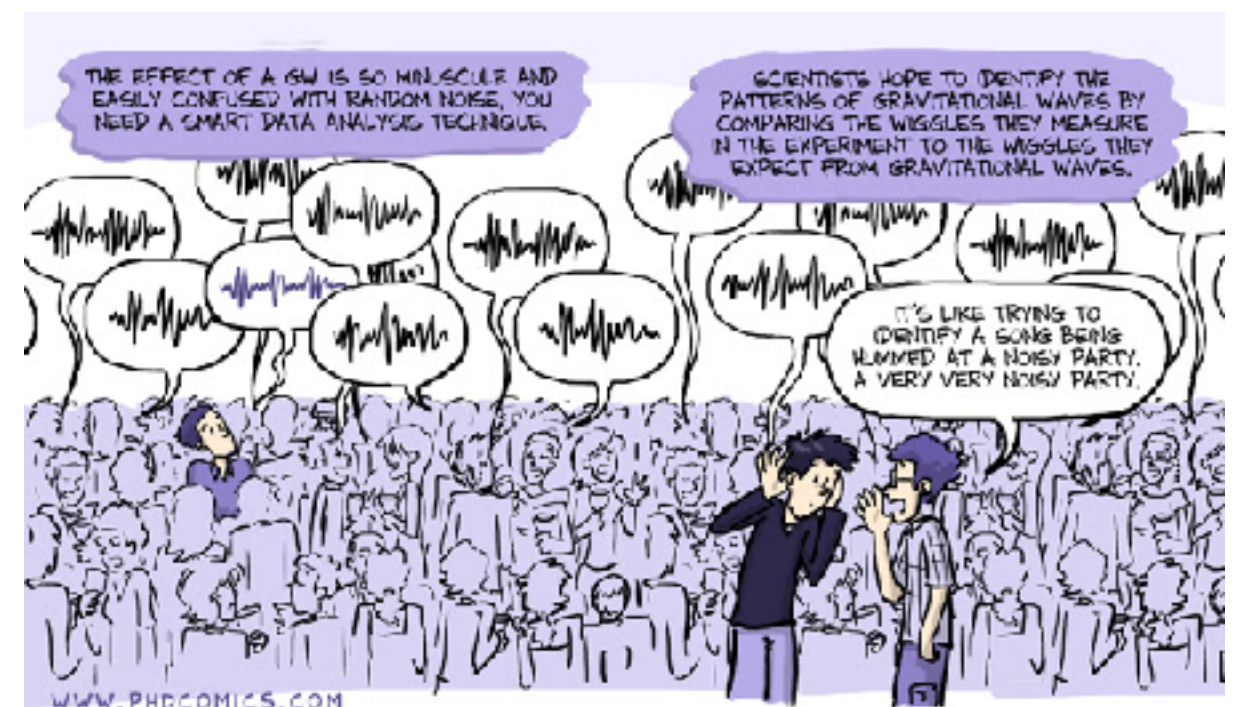
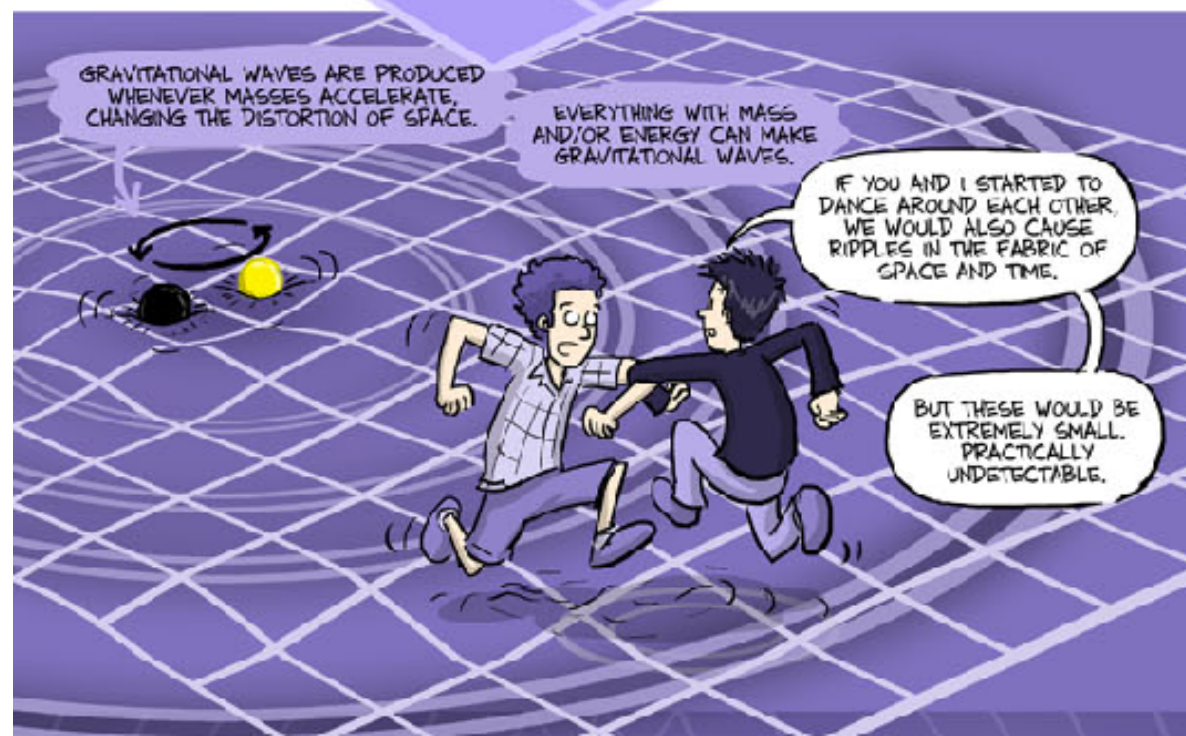
<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

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



www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”



重力波の波源

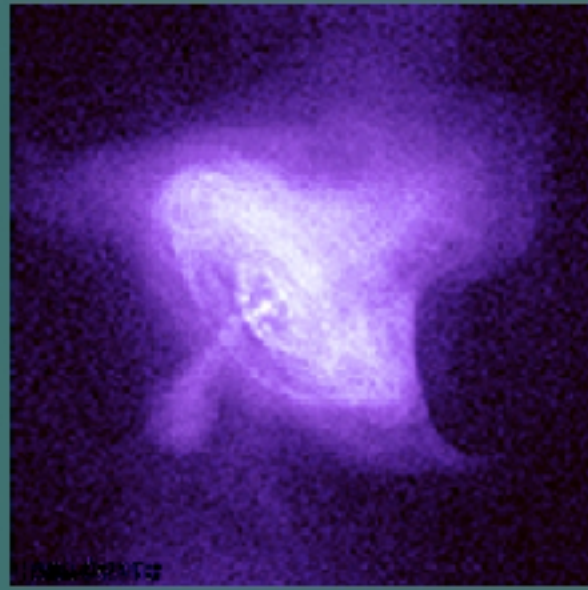
sources of gravitational wave

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

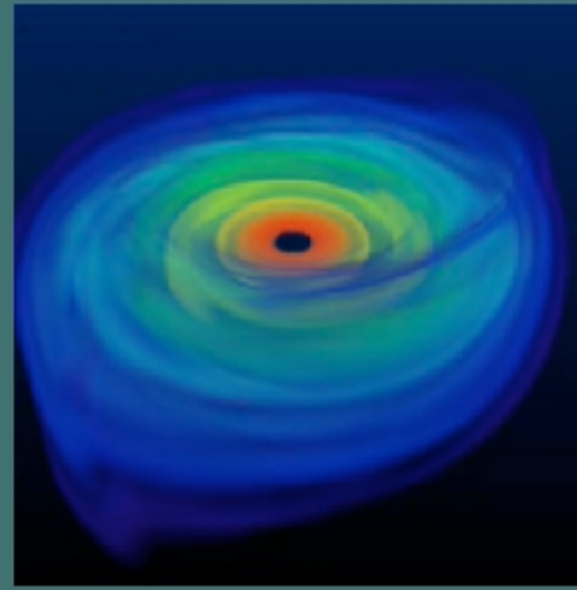
超新星爆発 (写真出典: NASA)



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

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.

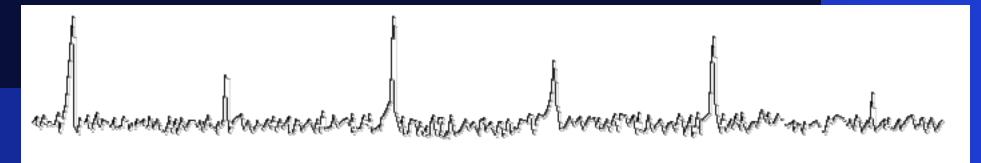
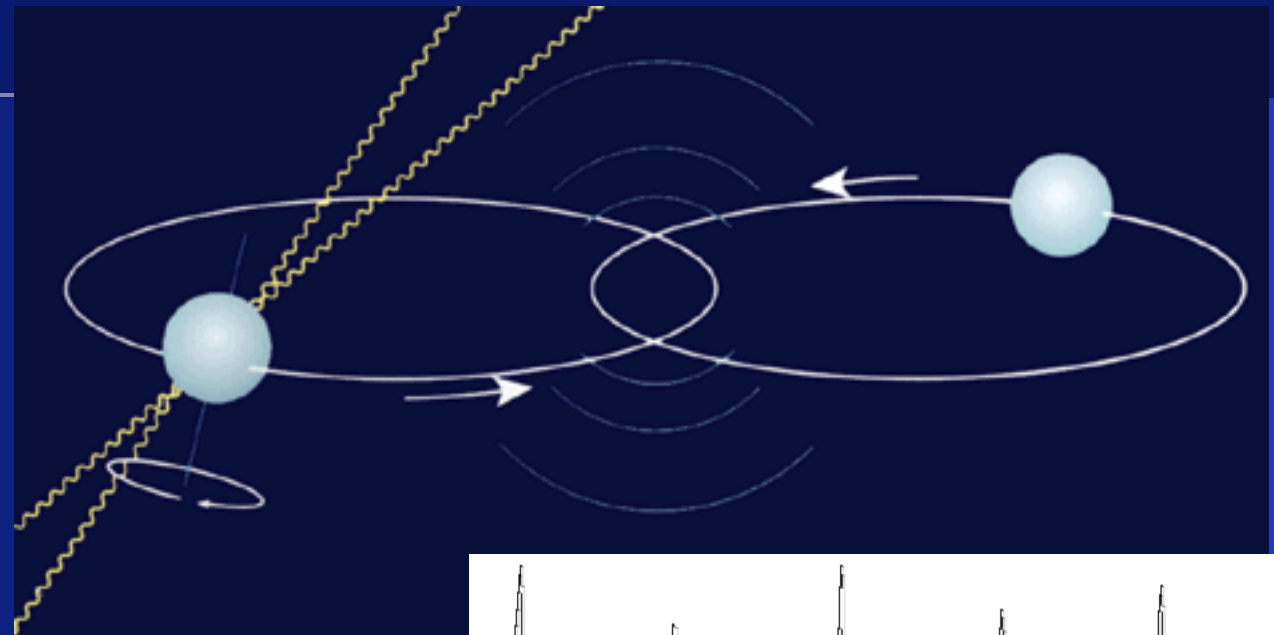
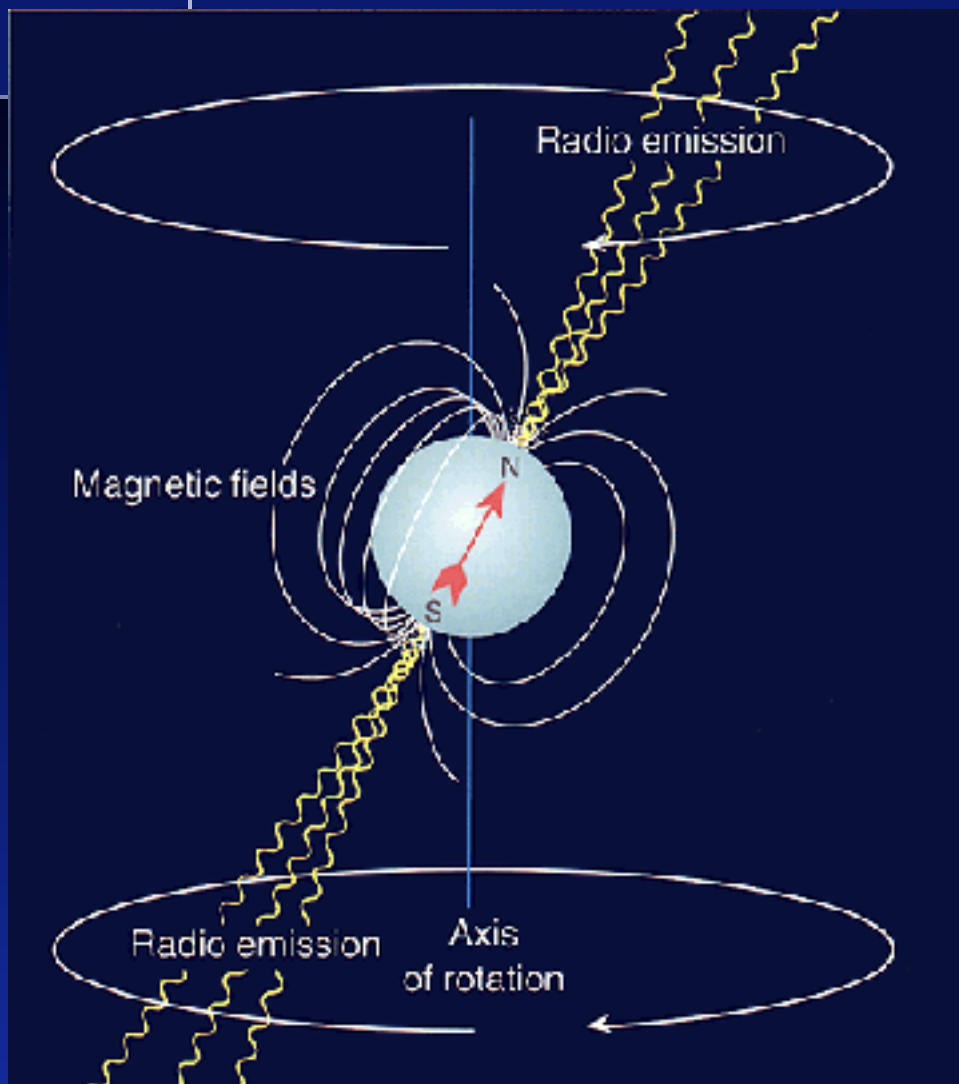
68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

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)

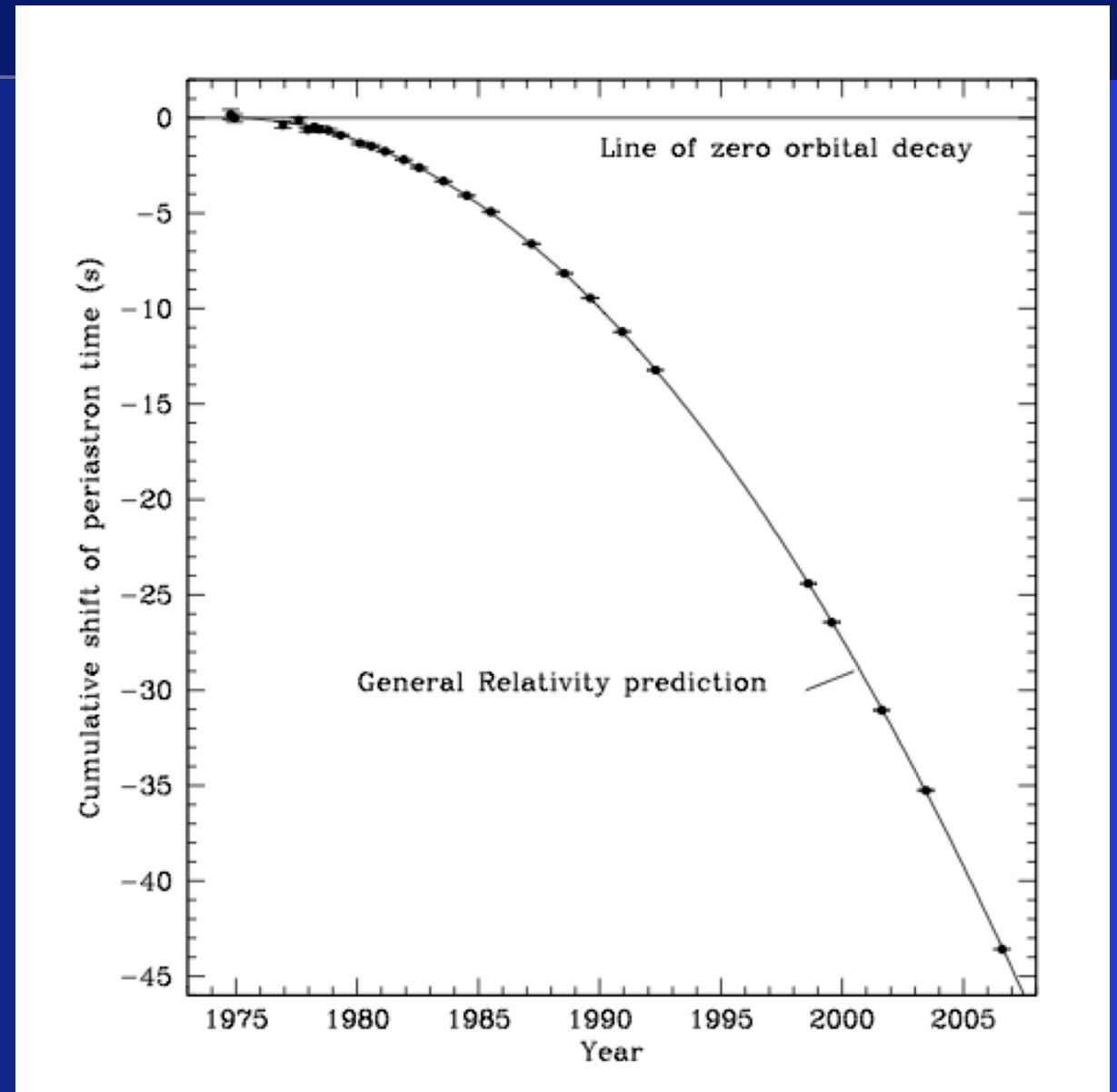
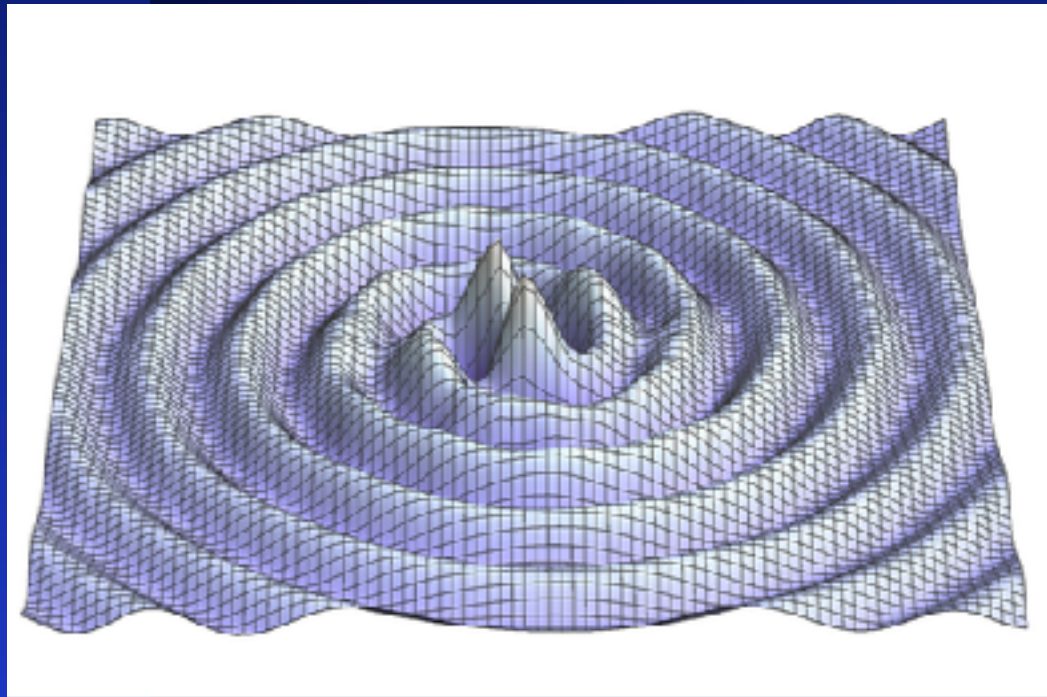
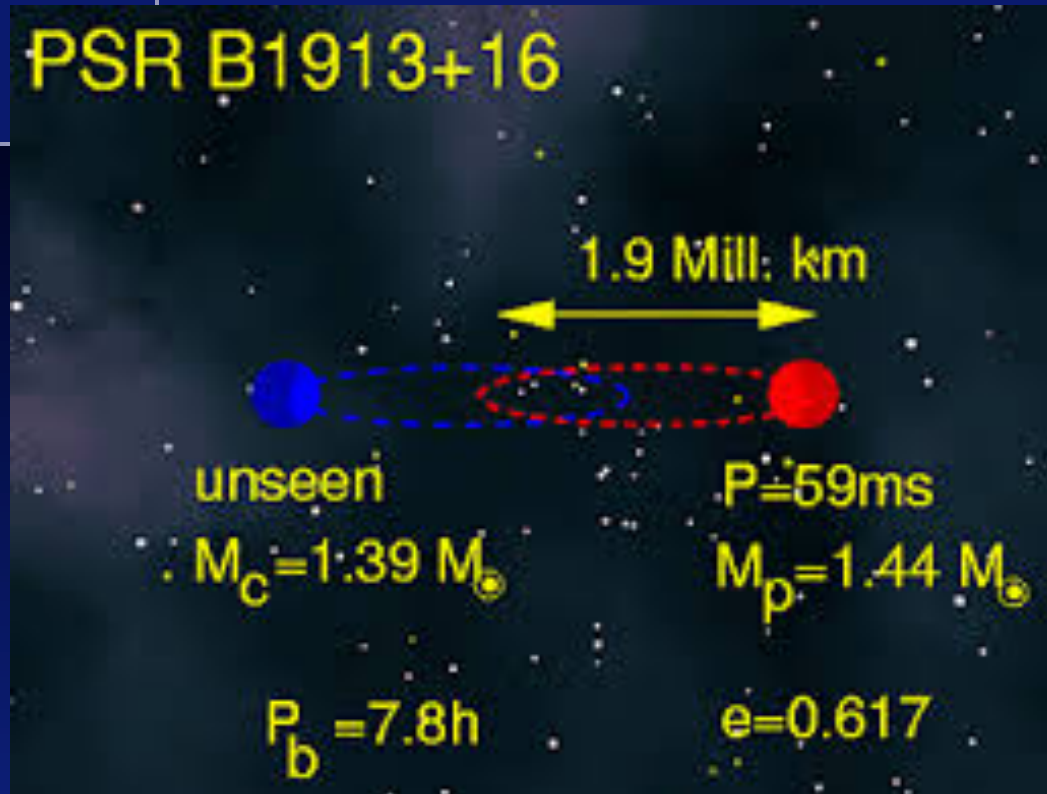


Arecibo, Puerto Rico

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

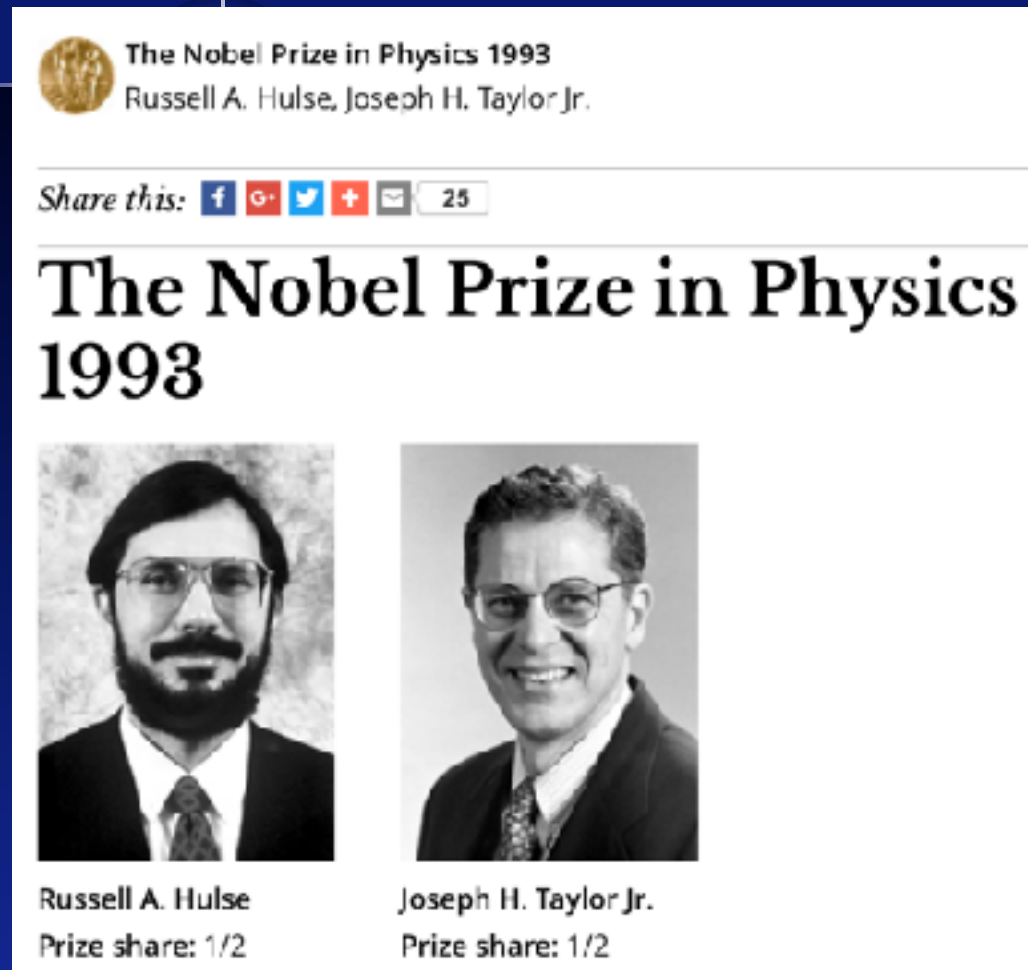
連星中性子星の発見 (1974)



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。

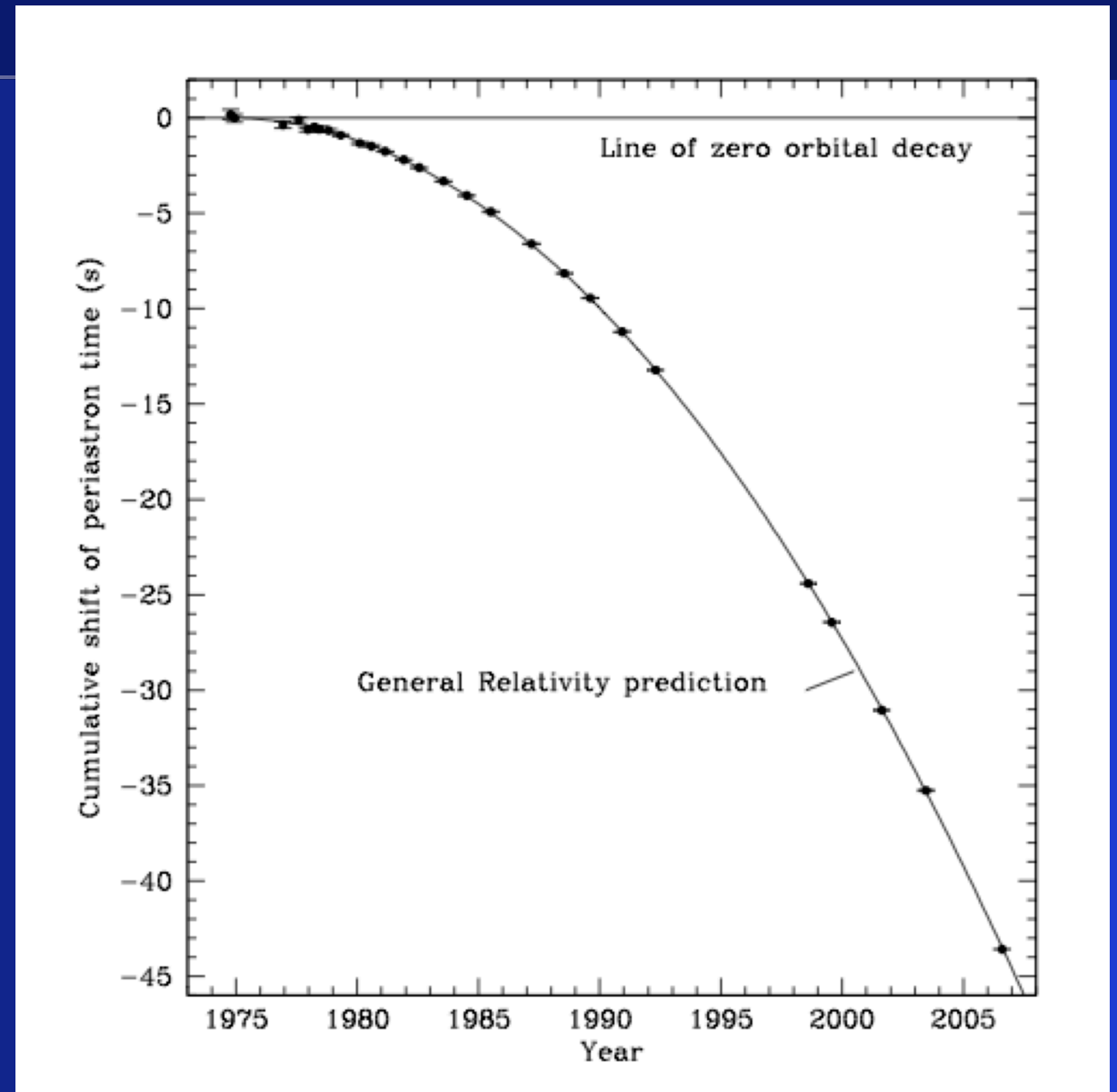
連星中性子星の発見 (1974)



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

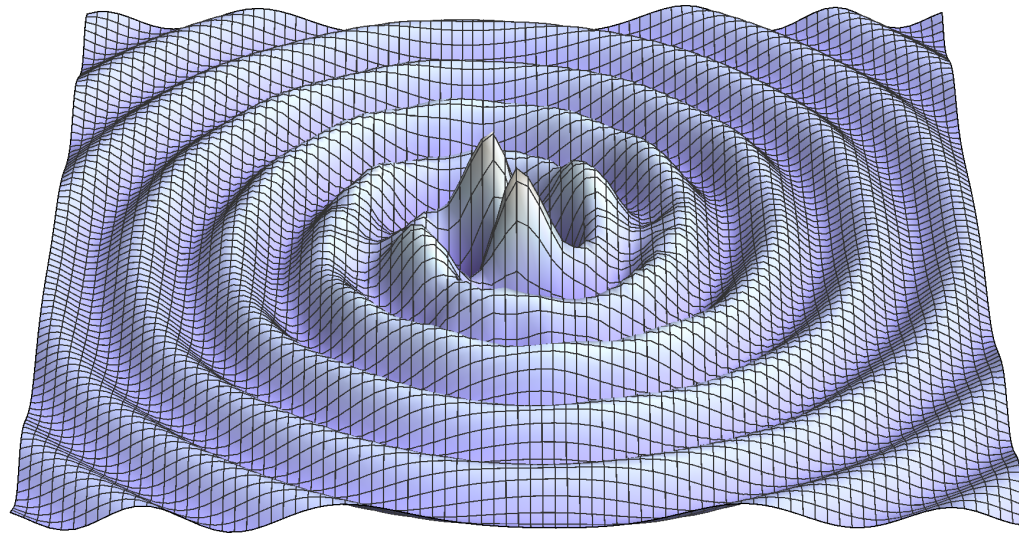
"重力についての新しい研究を開いた, 新種のパルサーの発見に対して"

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！

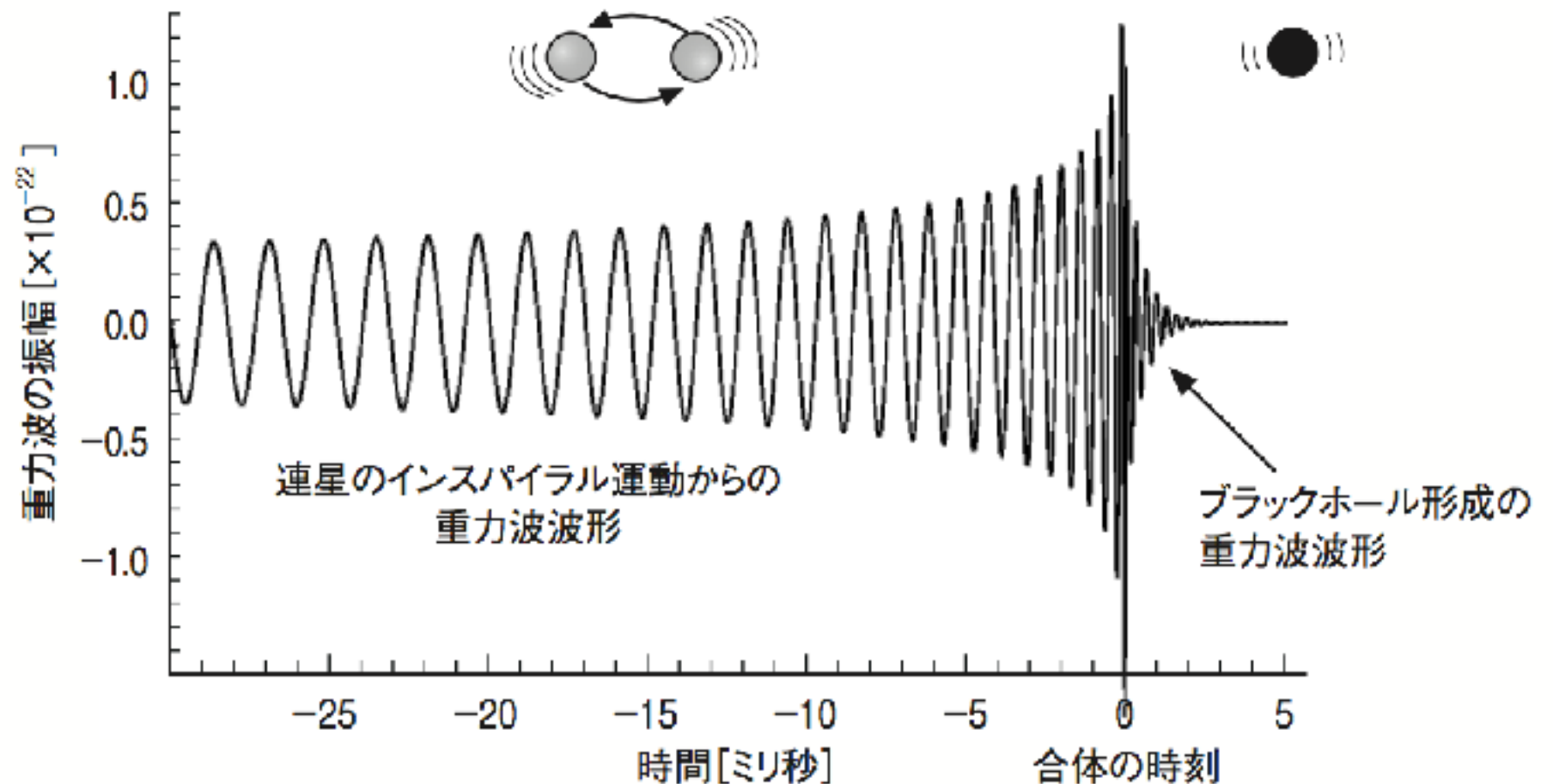


連星中性子星

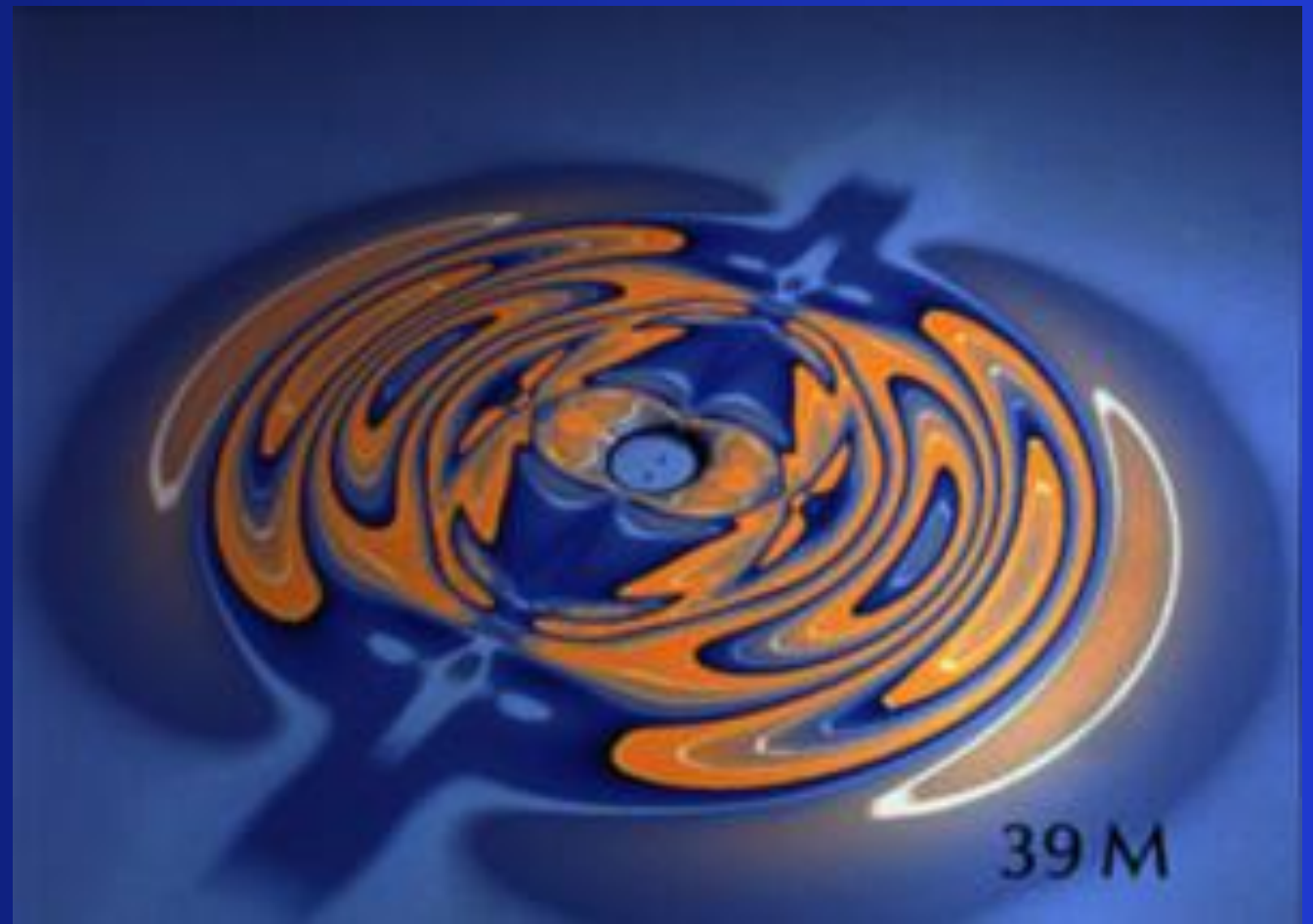
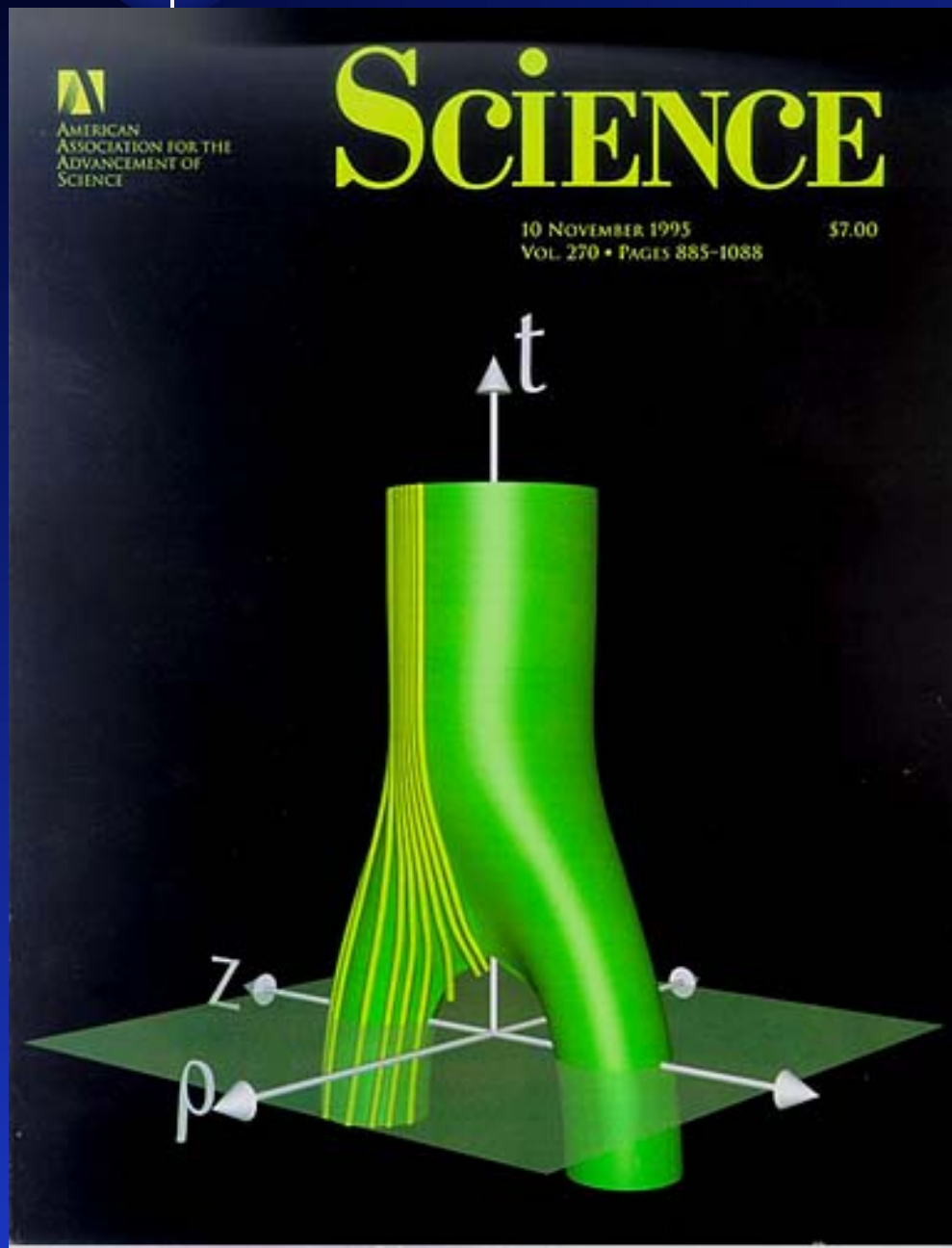
連星ブラックホール

Inspiral

Merger Ringdown

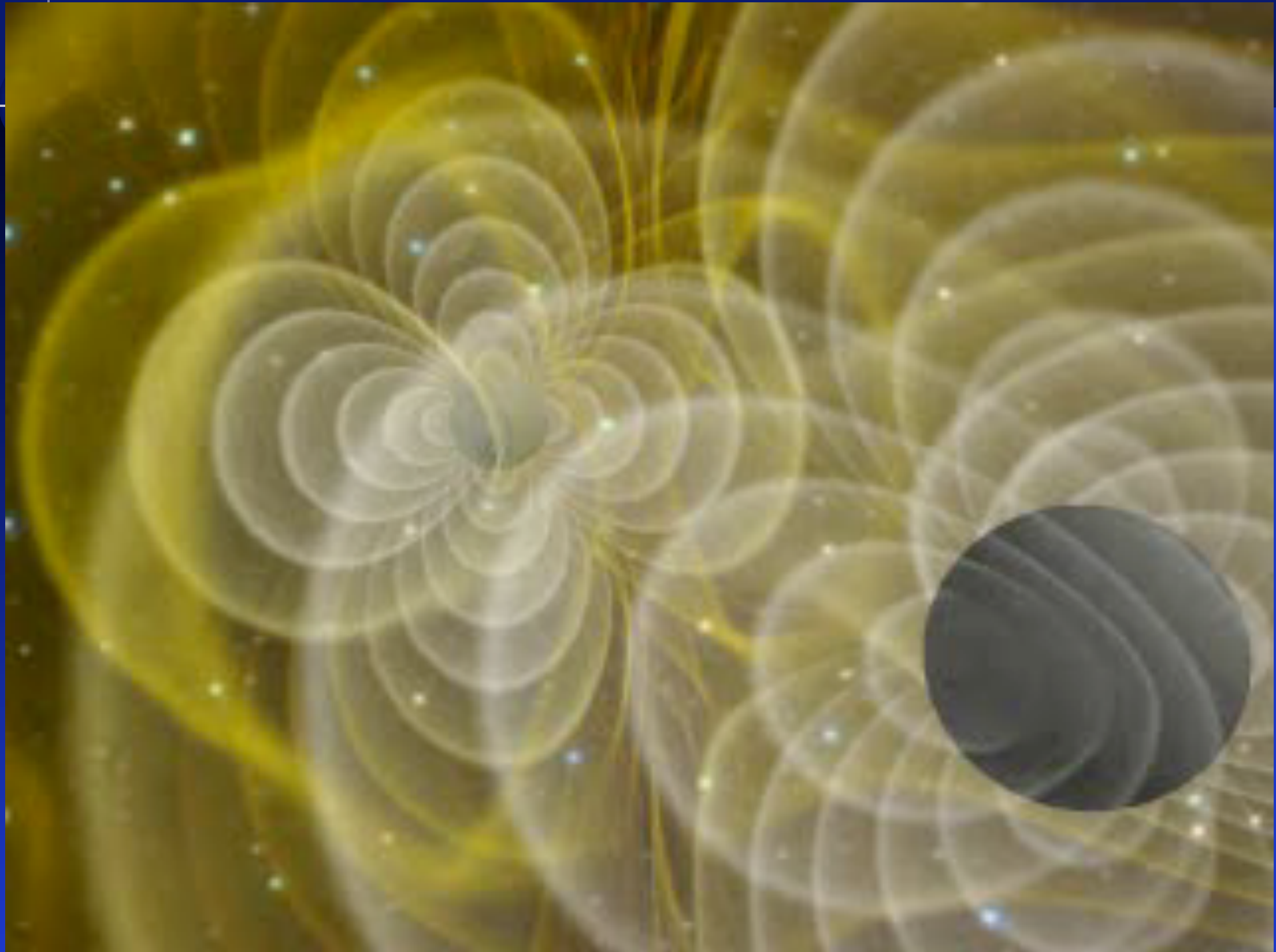


ブラックホールの合体シミュレーション



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)

本日の内容

1. 重力波とは

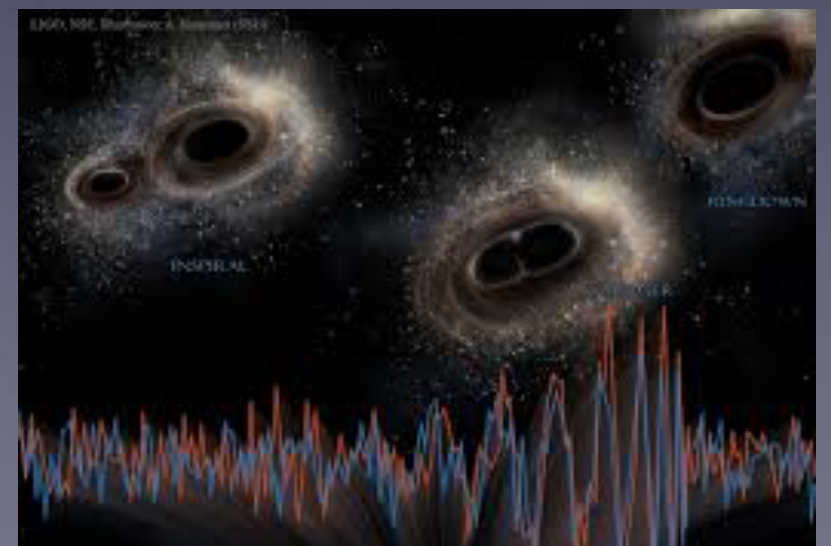
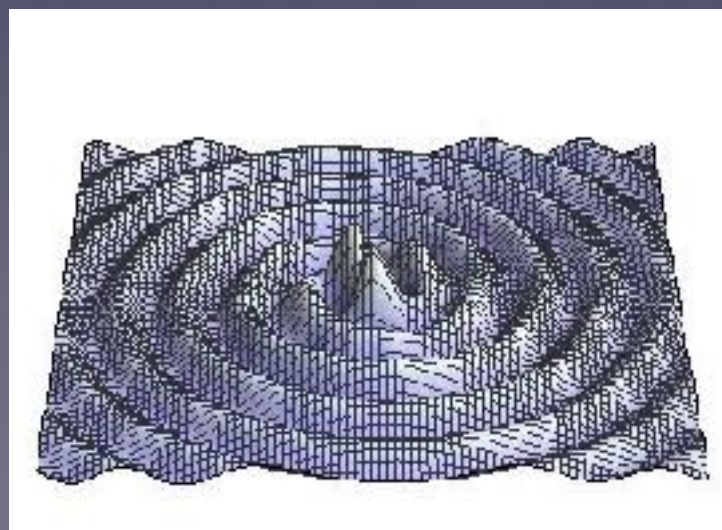
Einsteinが残した100年越しの宿題
重力波の発見まで

2. 直接観測された重力波

レーザー干渉計のしくみ
LIGOグループが発見した5つの重力波イベント

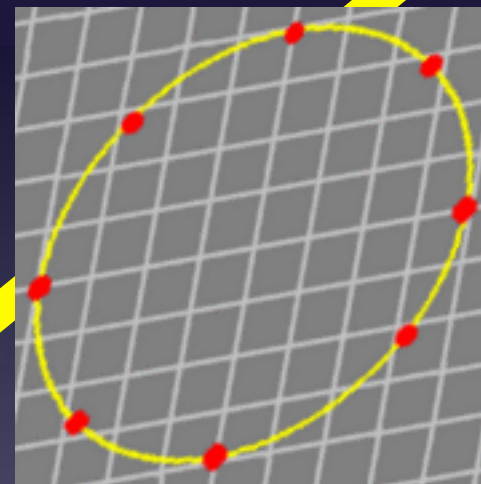
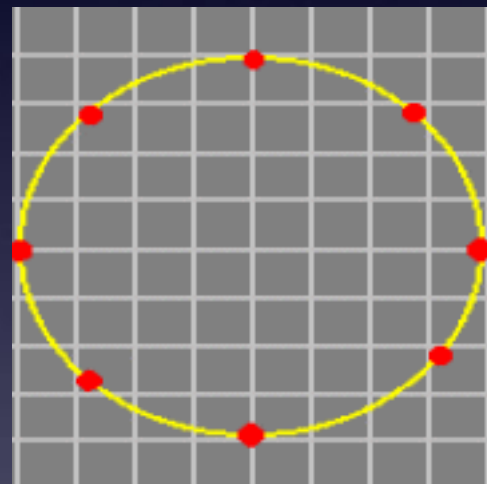
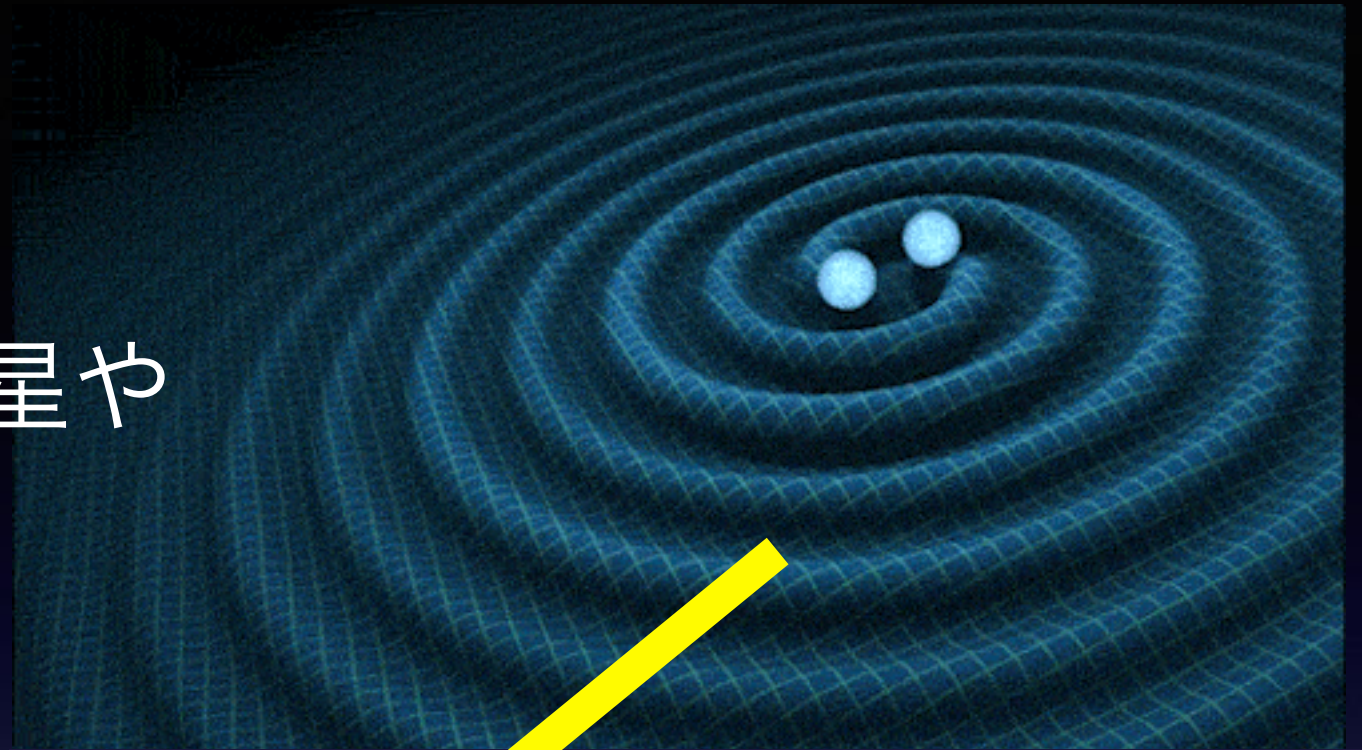
3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測
重力波観測から何がわかるか



重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



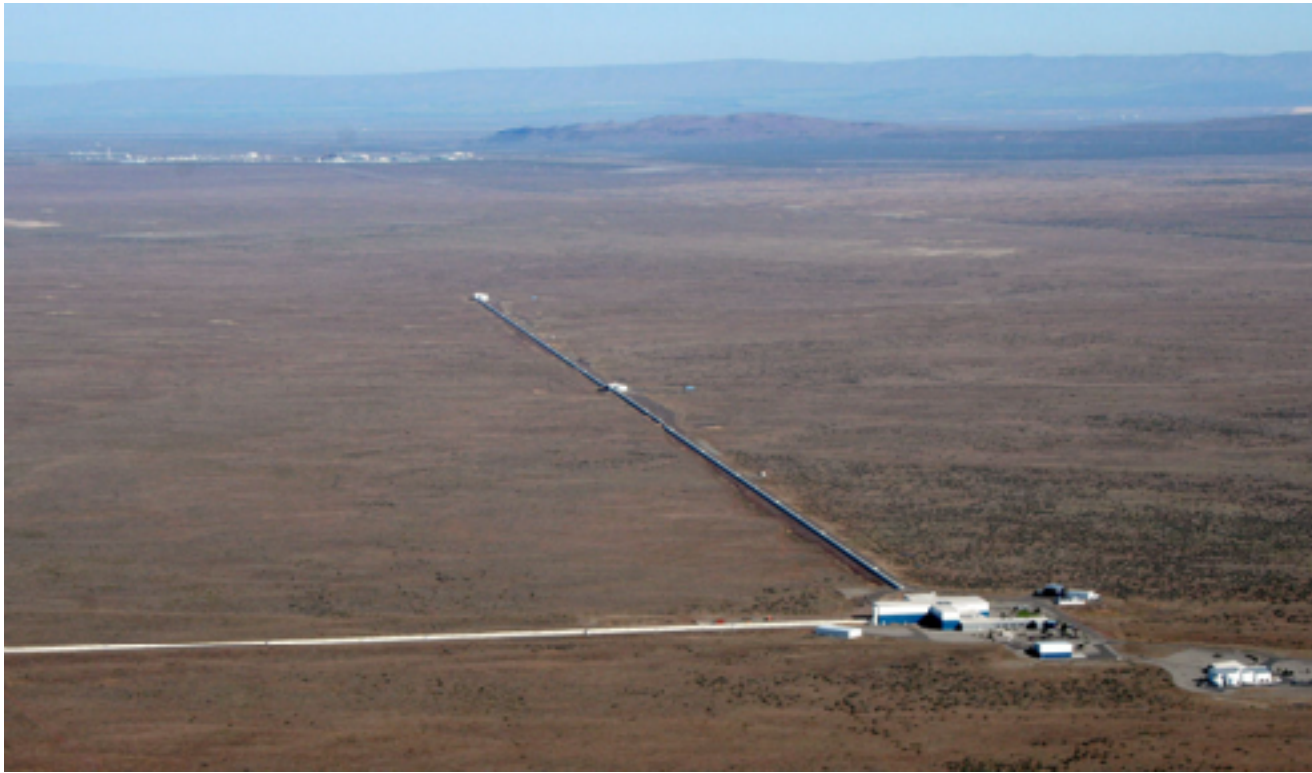
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

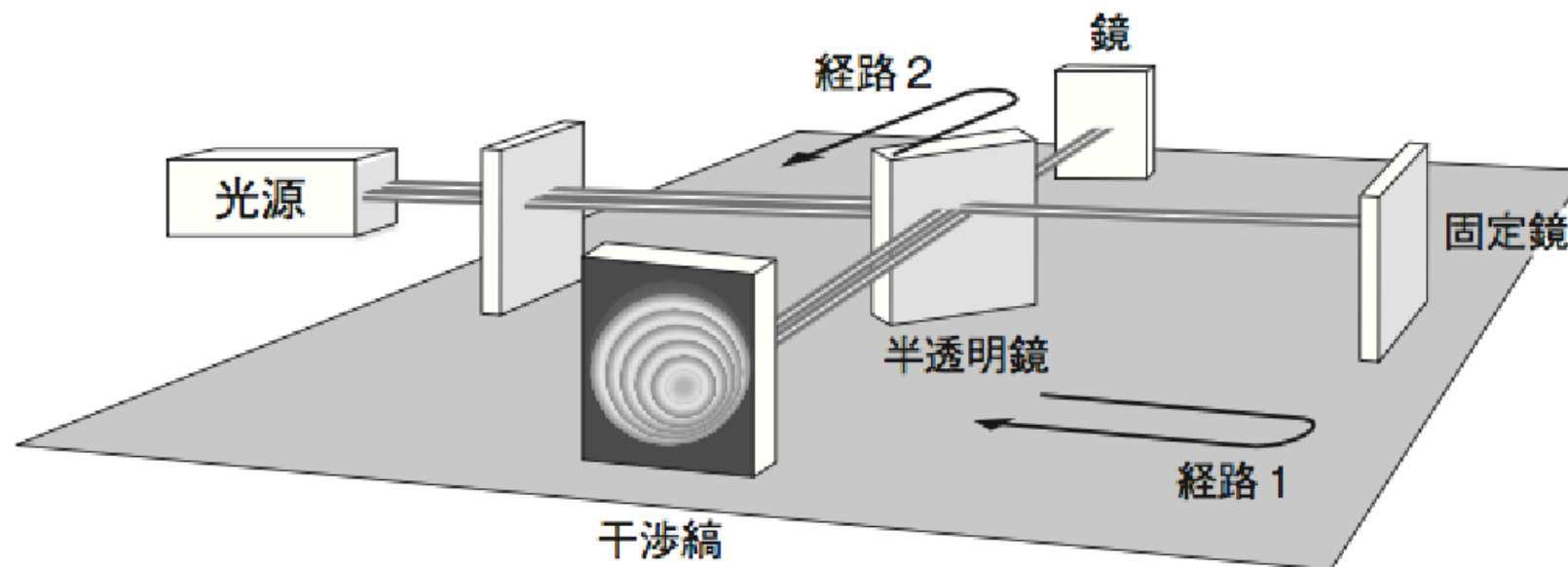
Gravitational-Wave Observatory

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)

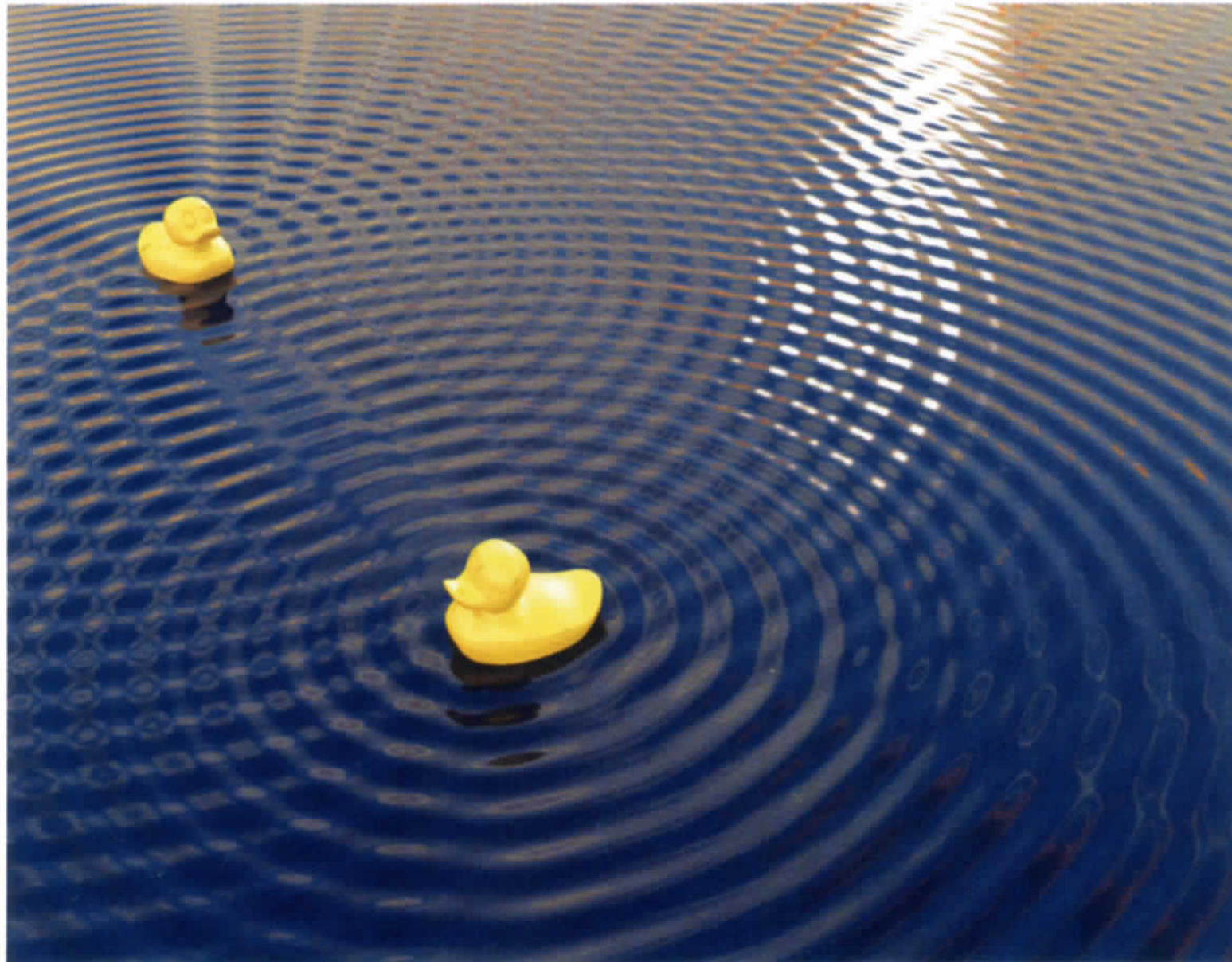


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



干渉計のしくみを理解しよう

波の干渉



Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

重ね合わせ (superposition)

- 同じ位相の波を重ね合わせるとき 波は強め合う.

山 + 山 = 強め合う

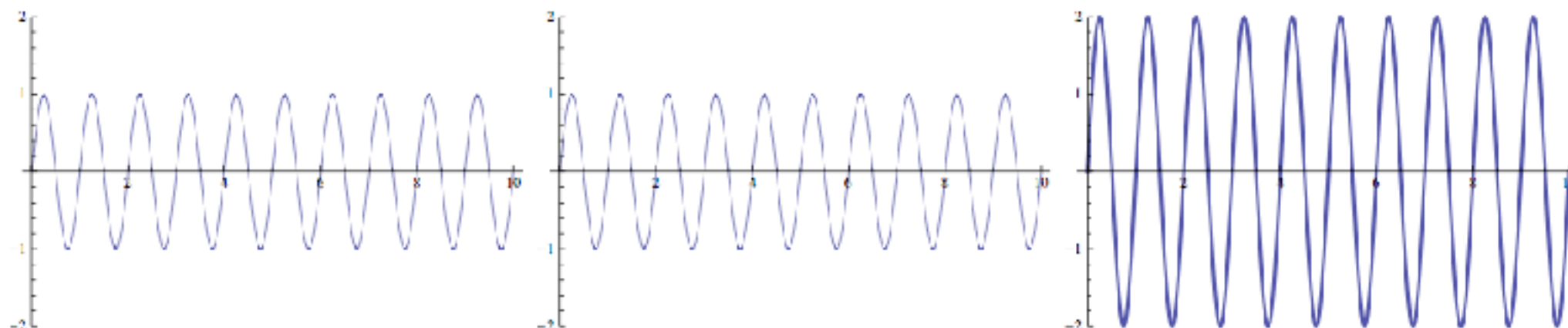


図 31: 左 2 つの波を足すと右の波になる. $y_1(t) = \sin(2\pi t)$, $y_2(t) = y_1(t)$ としたときの, $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図.

- 逆位相の波を重ね合わせるとき 波は弱め合う.

山 + 谷 = 弱め合う

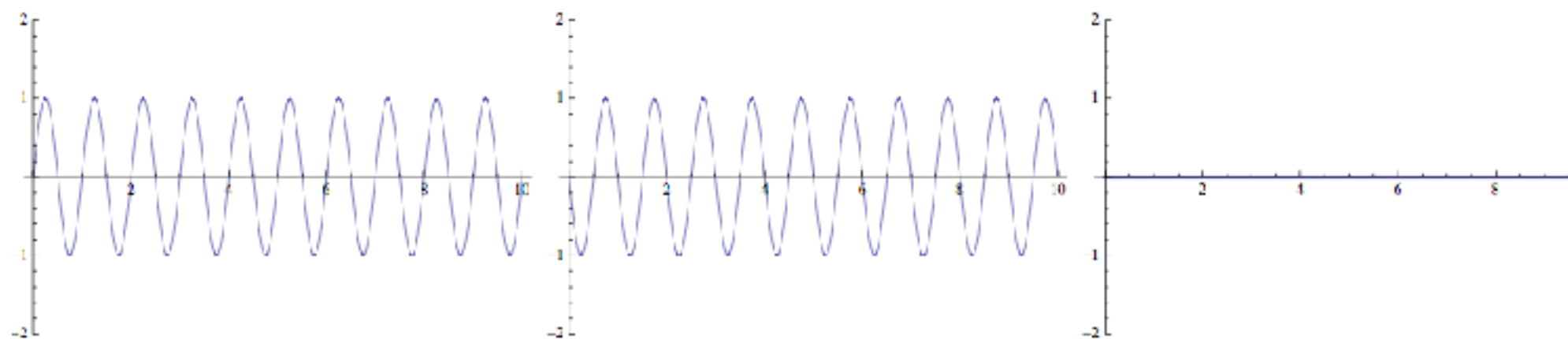
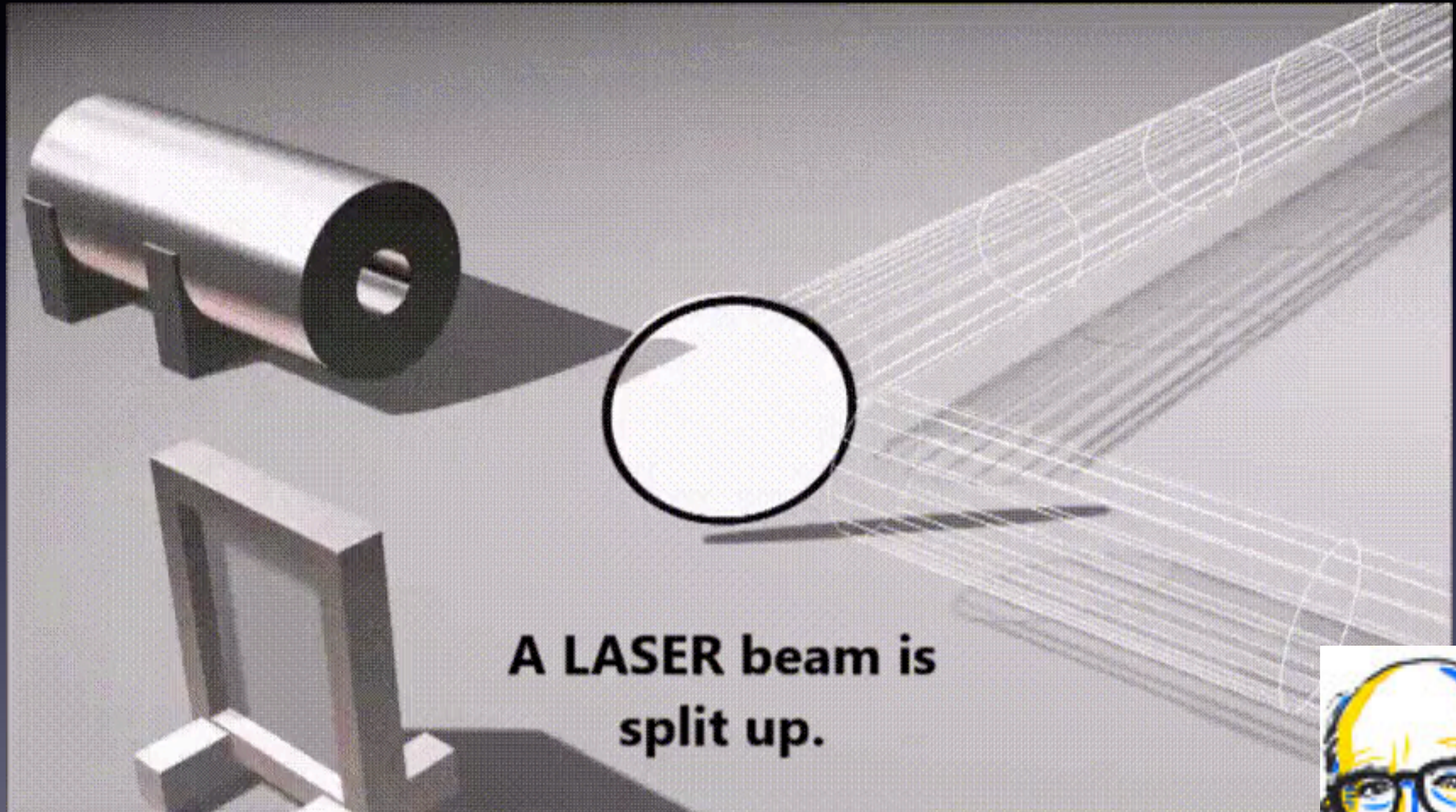


図 32: 左 2 つの波を足すと右の波になる. $y_1(t) = \sin(2\pi t)$, $y_2(t) = -\sin(2\pi t)$ としたときの, $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$ の図.



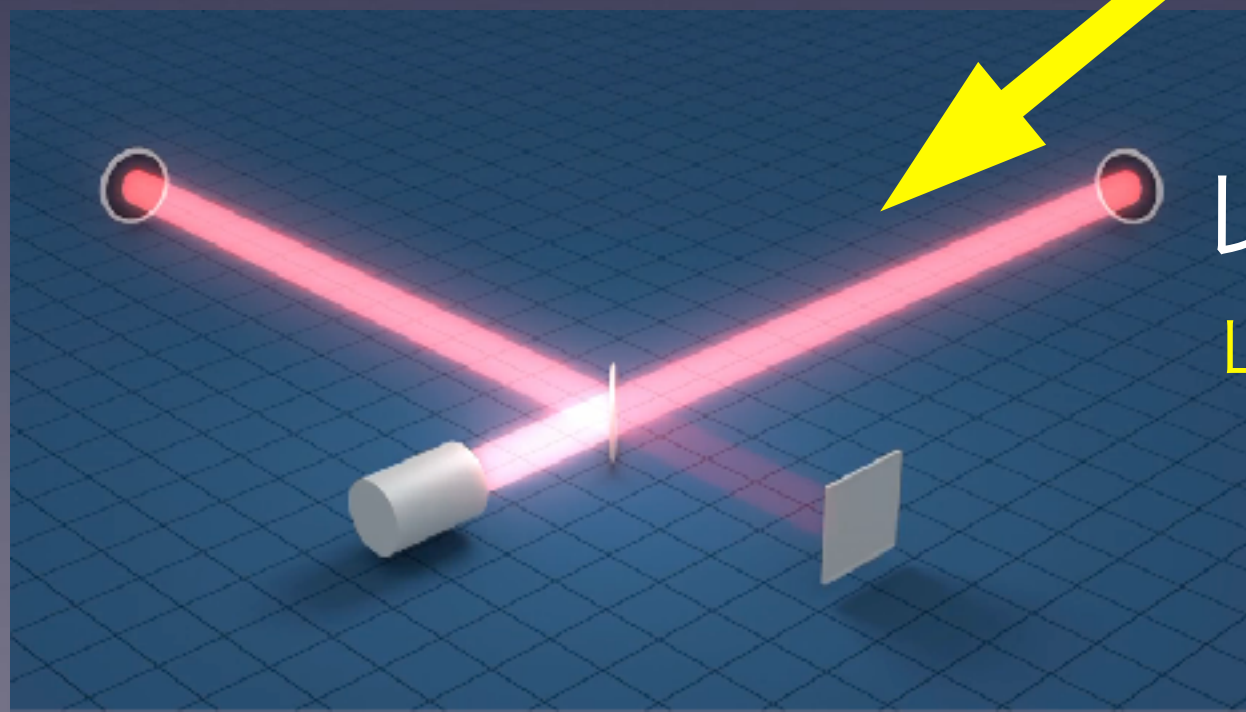
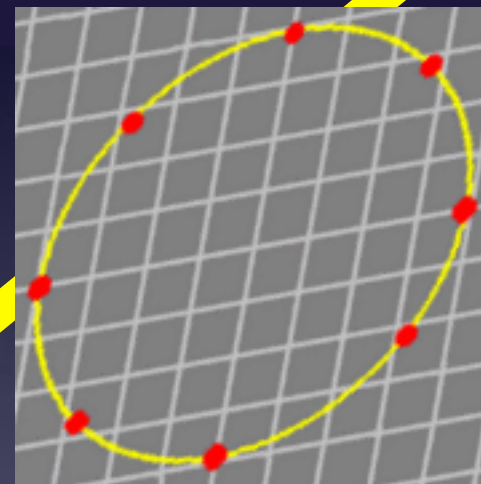
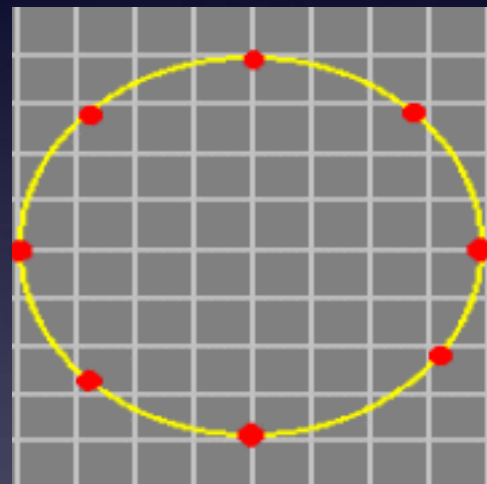
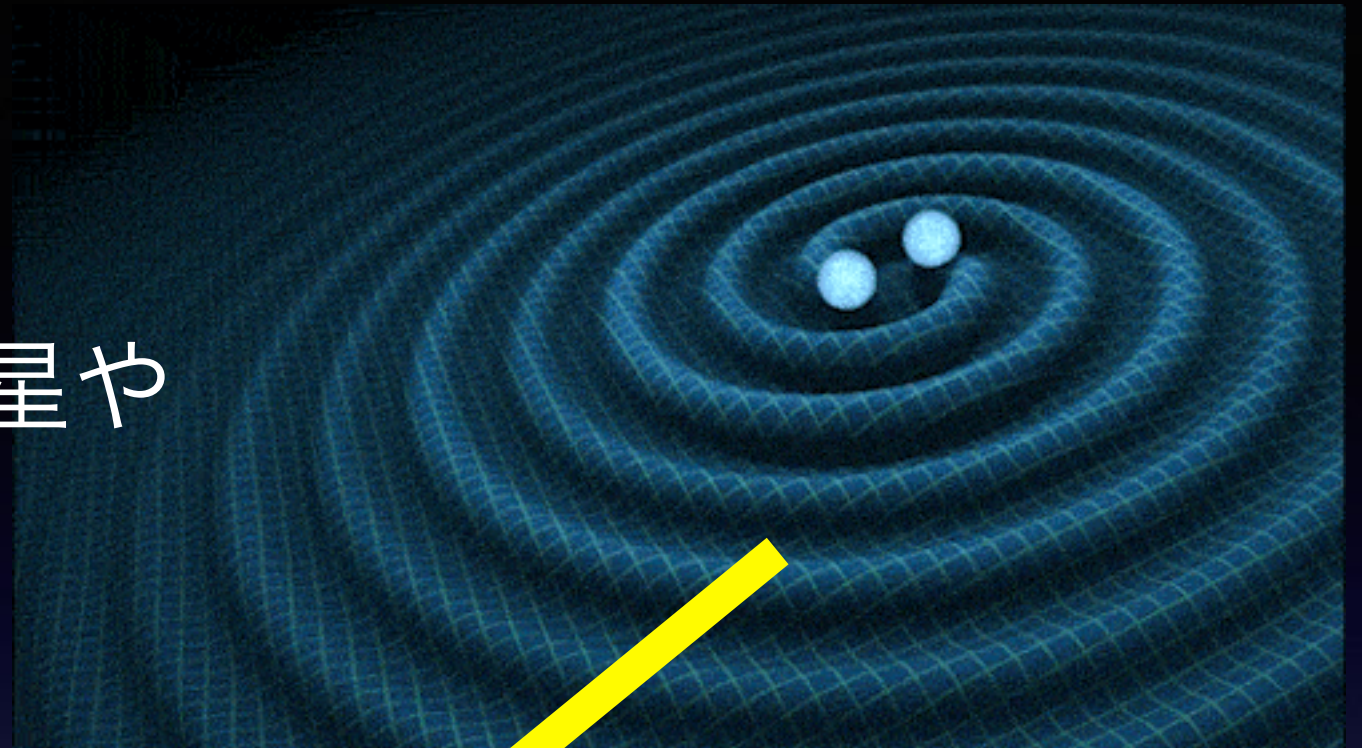
レーザー干渉計による重力波検出のしくみ



<https://imgur.com/gallery/0VhrXPV>

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



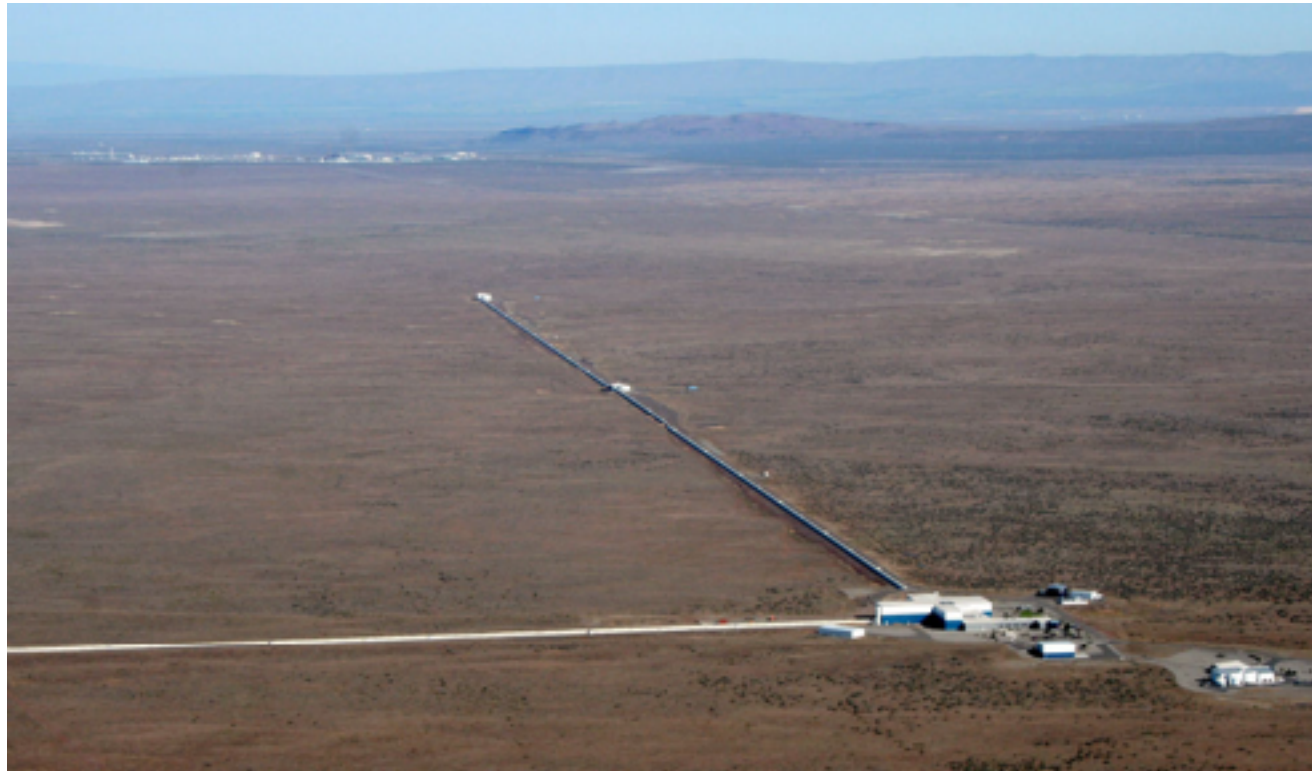
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

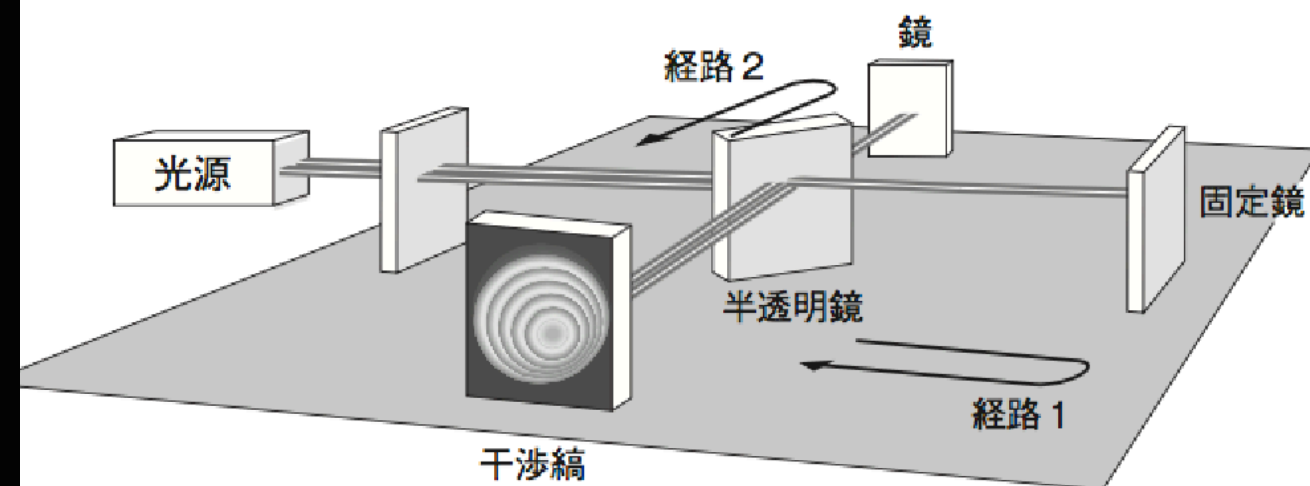
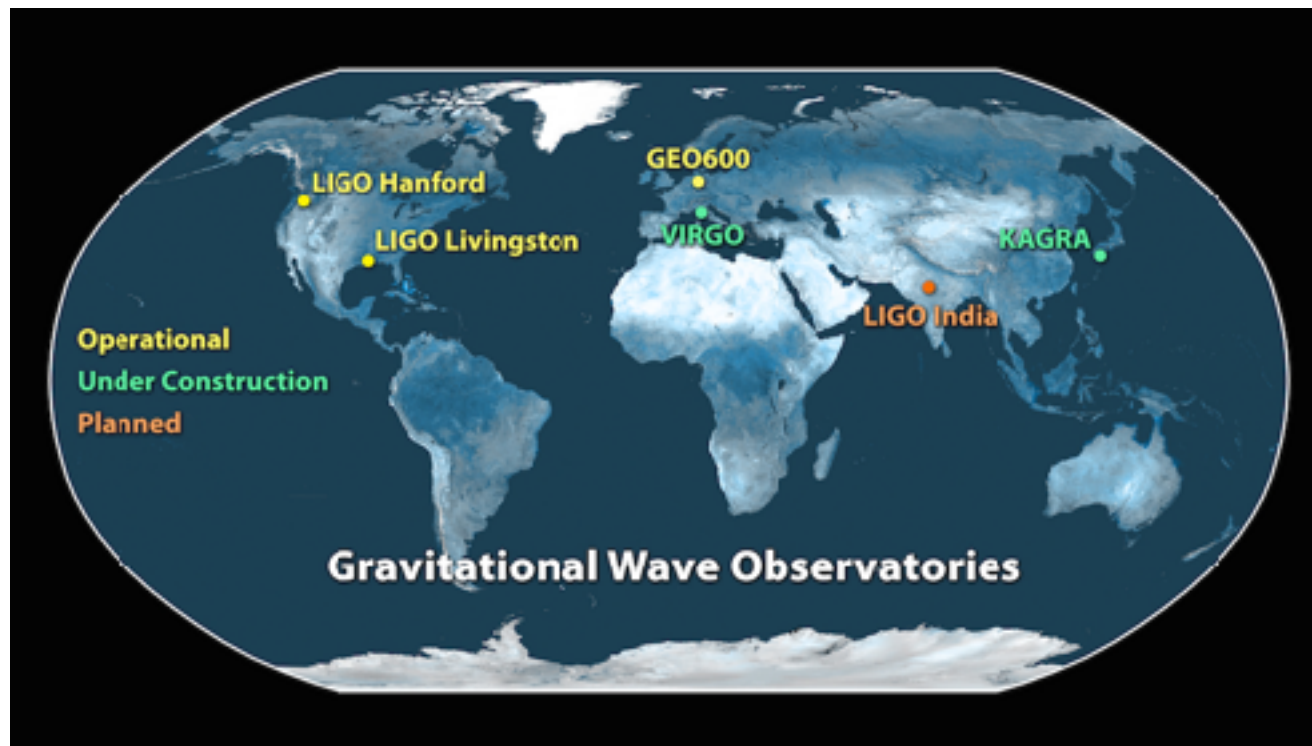
Gravitational-Wave Observatory

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>



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



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

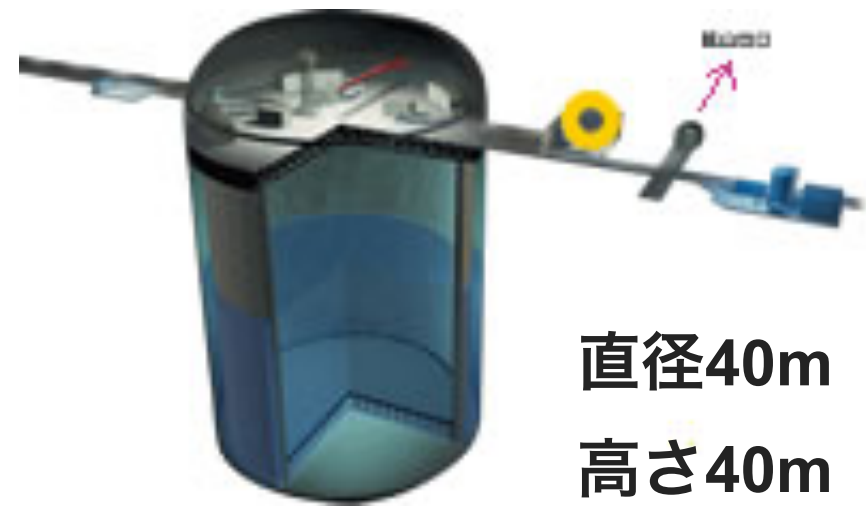
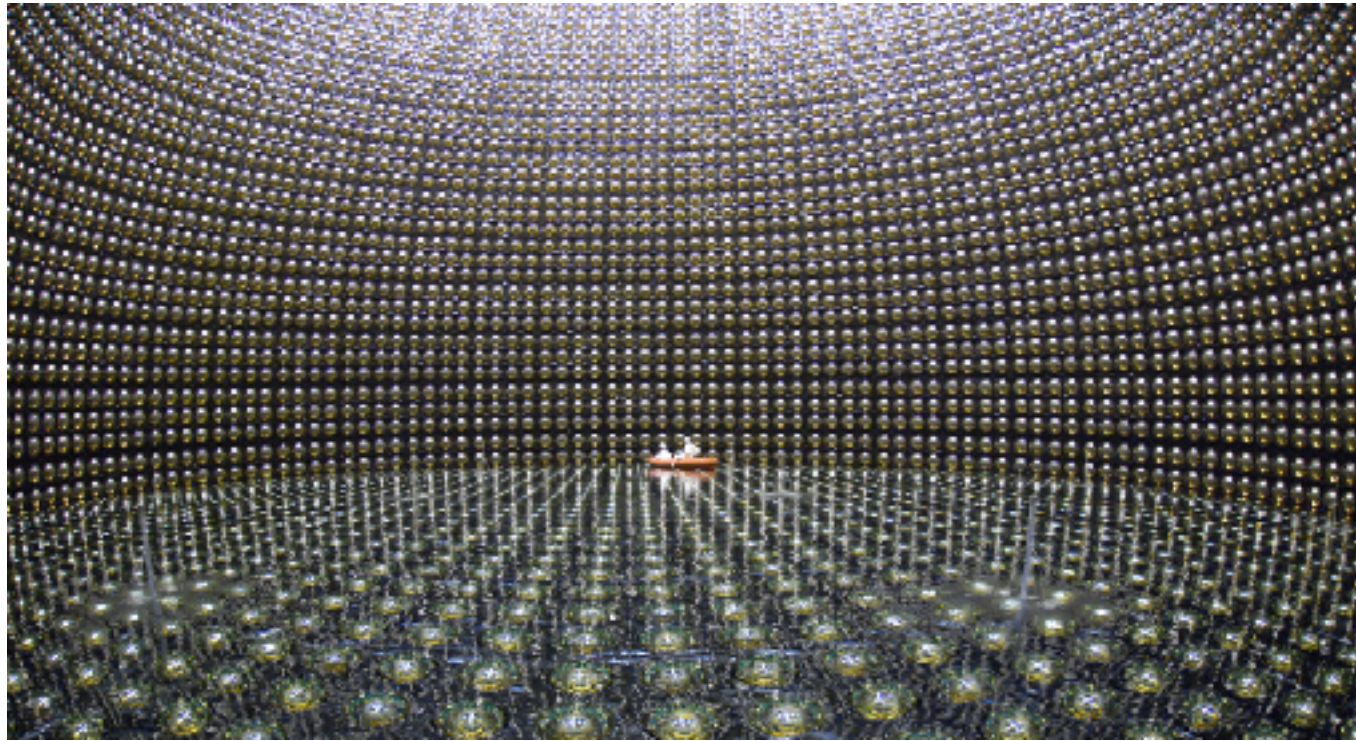
鏡の材質としてサファイア

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)

2016年4月



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

重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

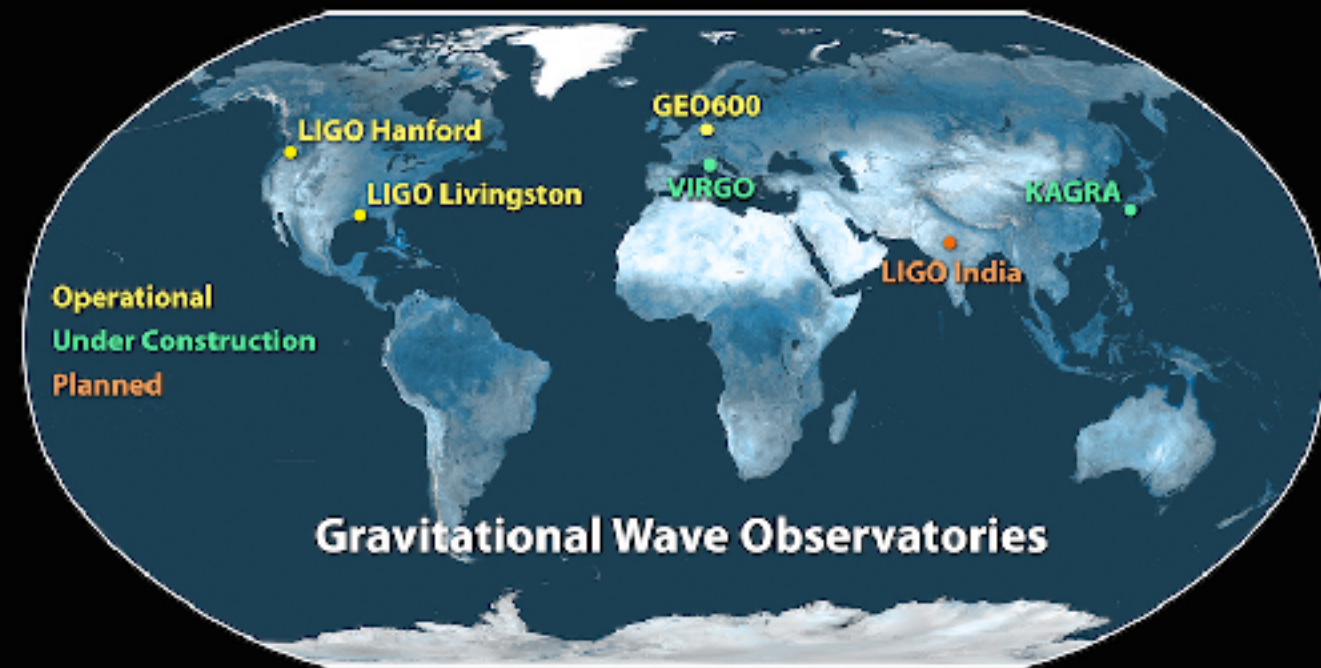
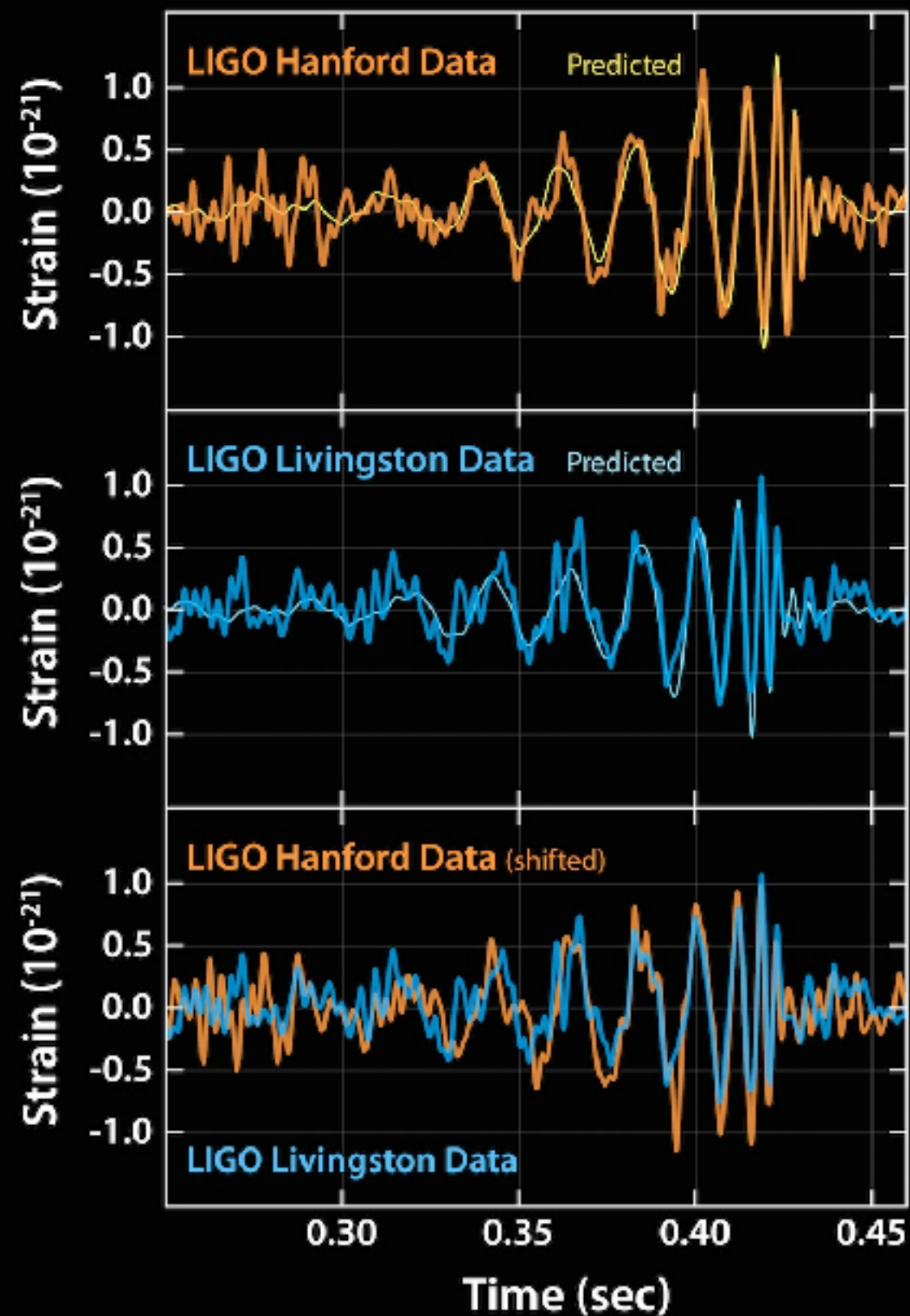


“We had detected gravitational waves. We did it.”

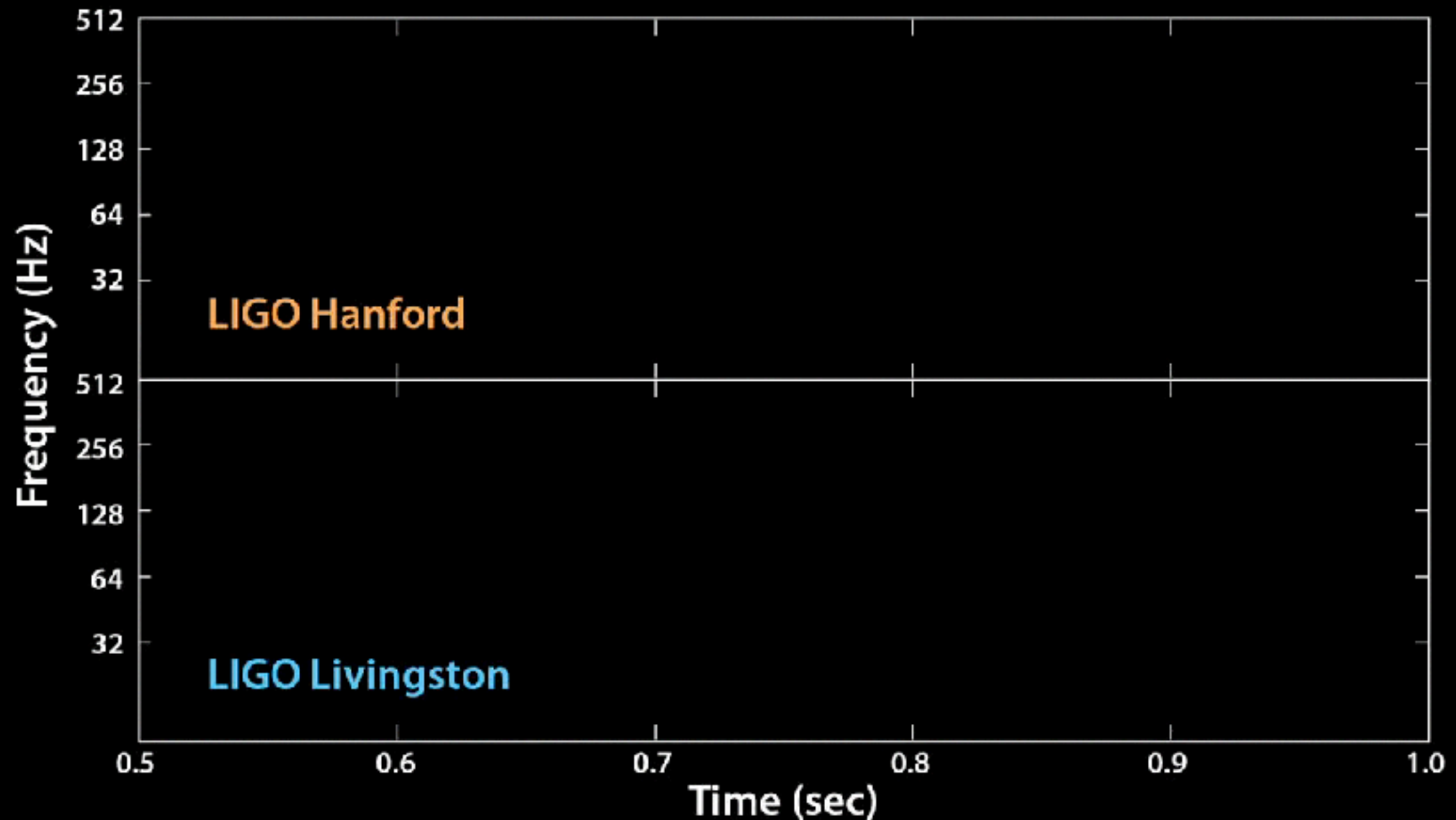
“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”

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

2015年9月14日



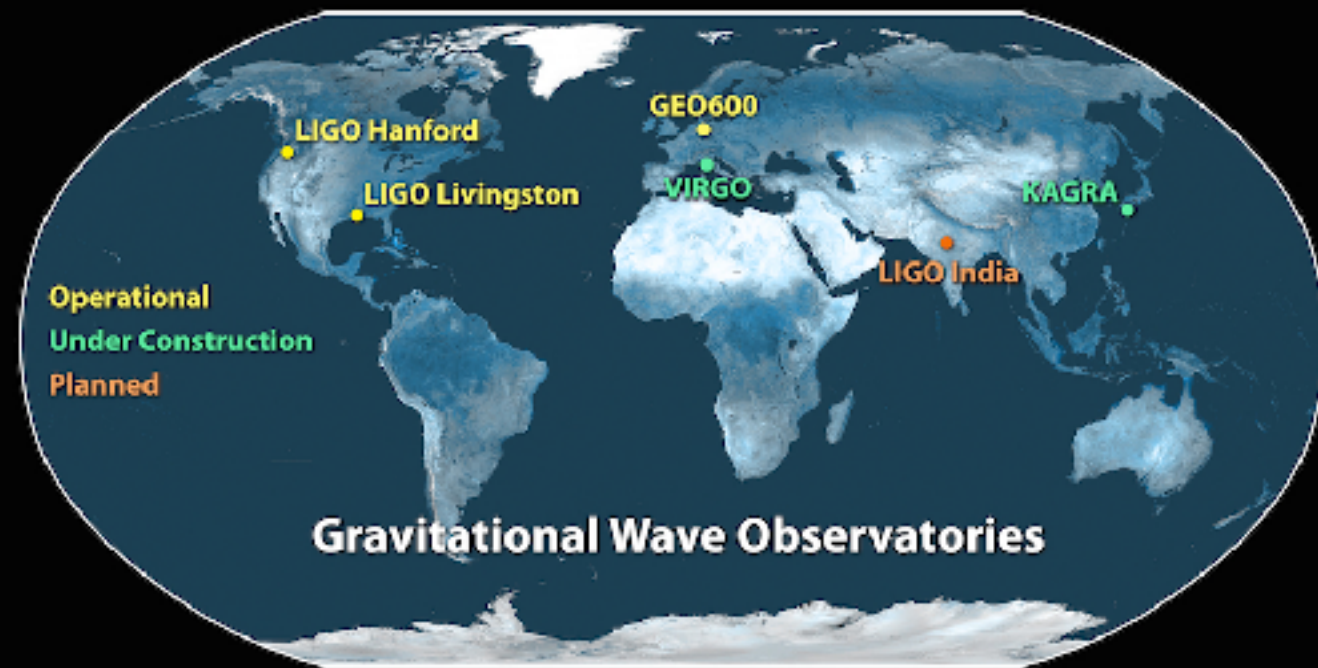
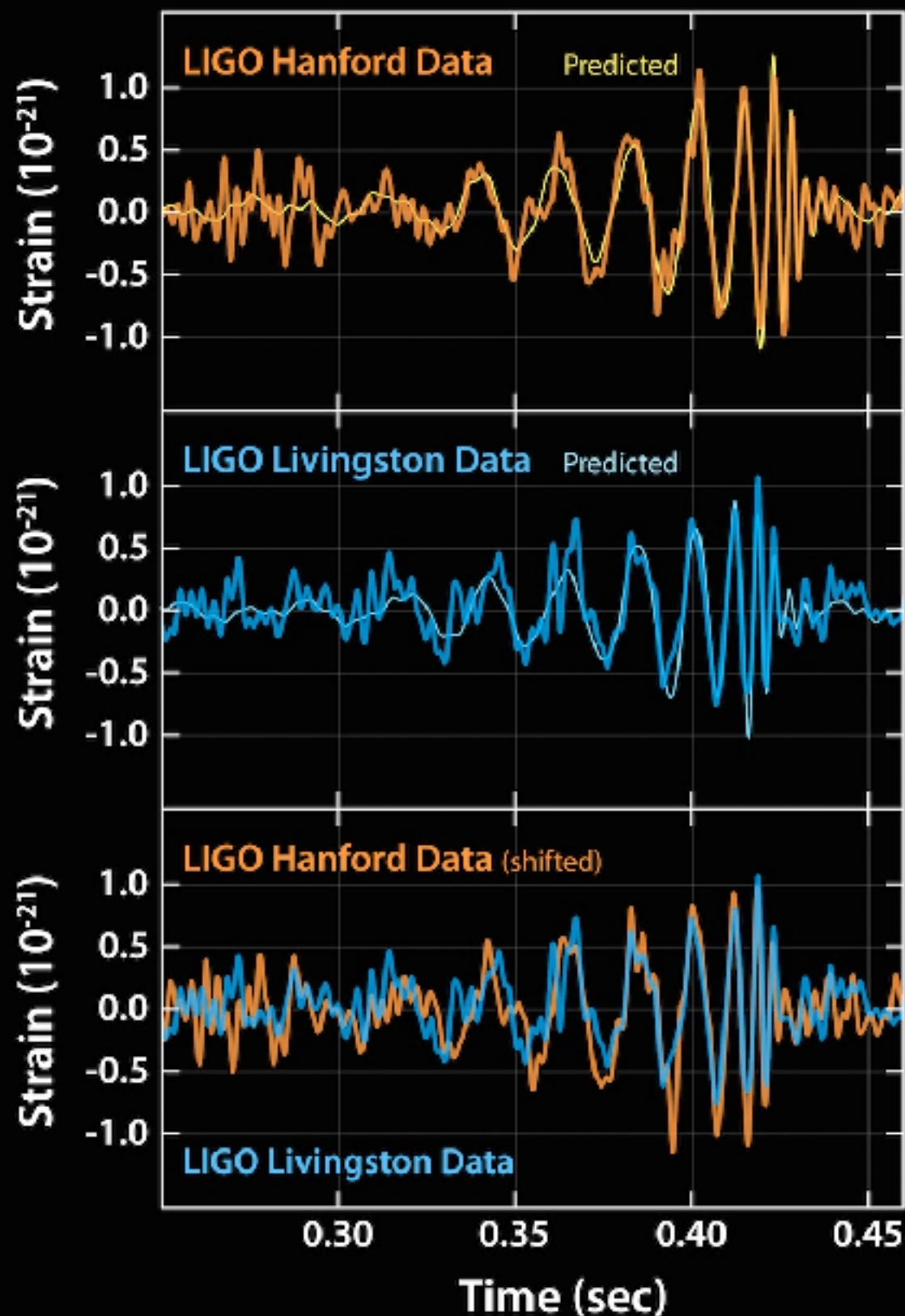
重力波波形を音にすると. . .



始め2回は実周波数, 後の2回は聞えやすいように+400Hz

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

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。

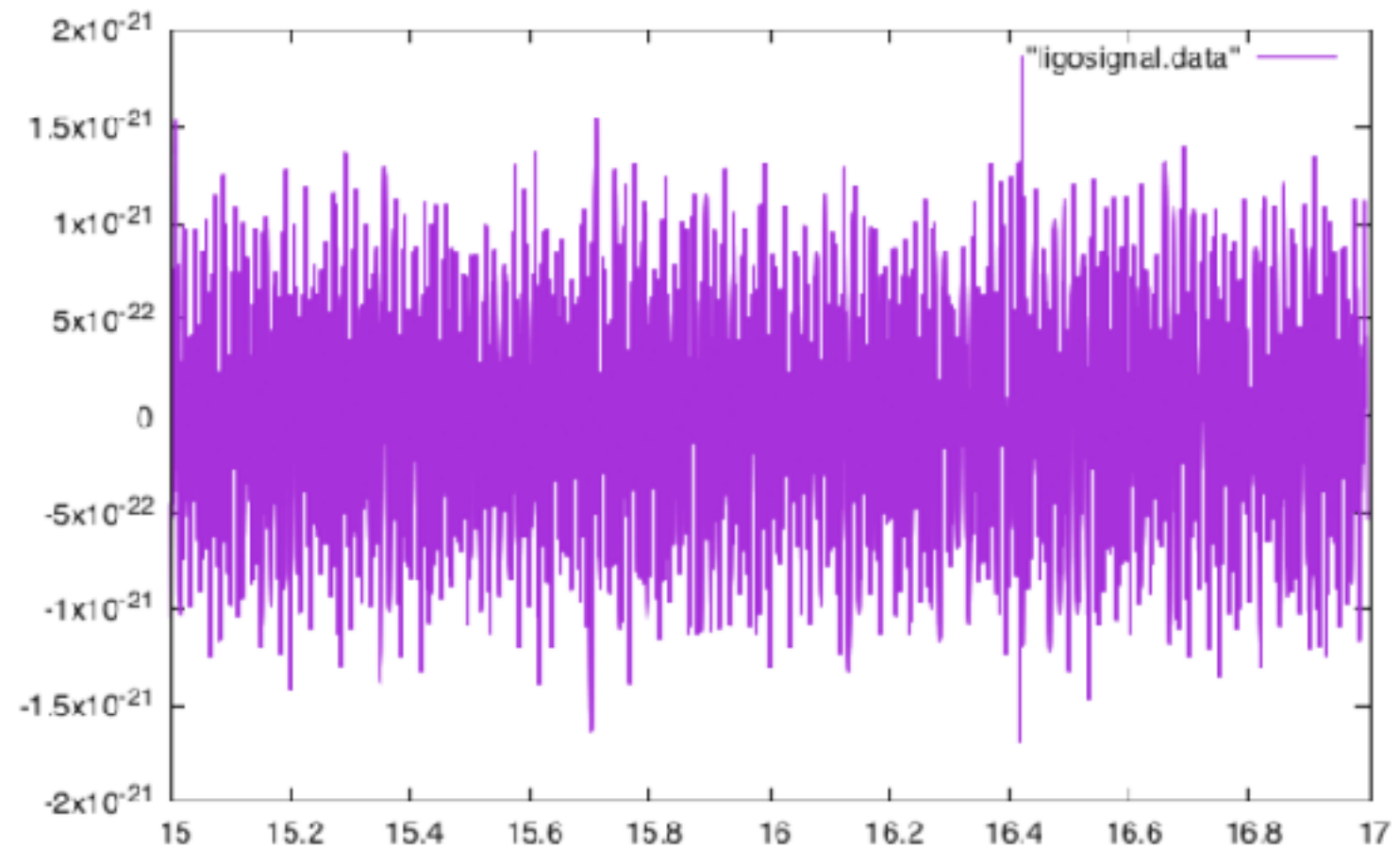
3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

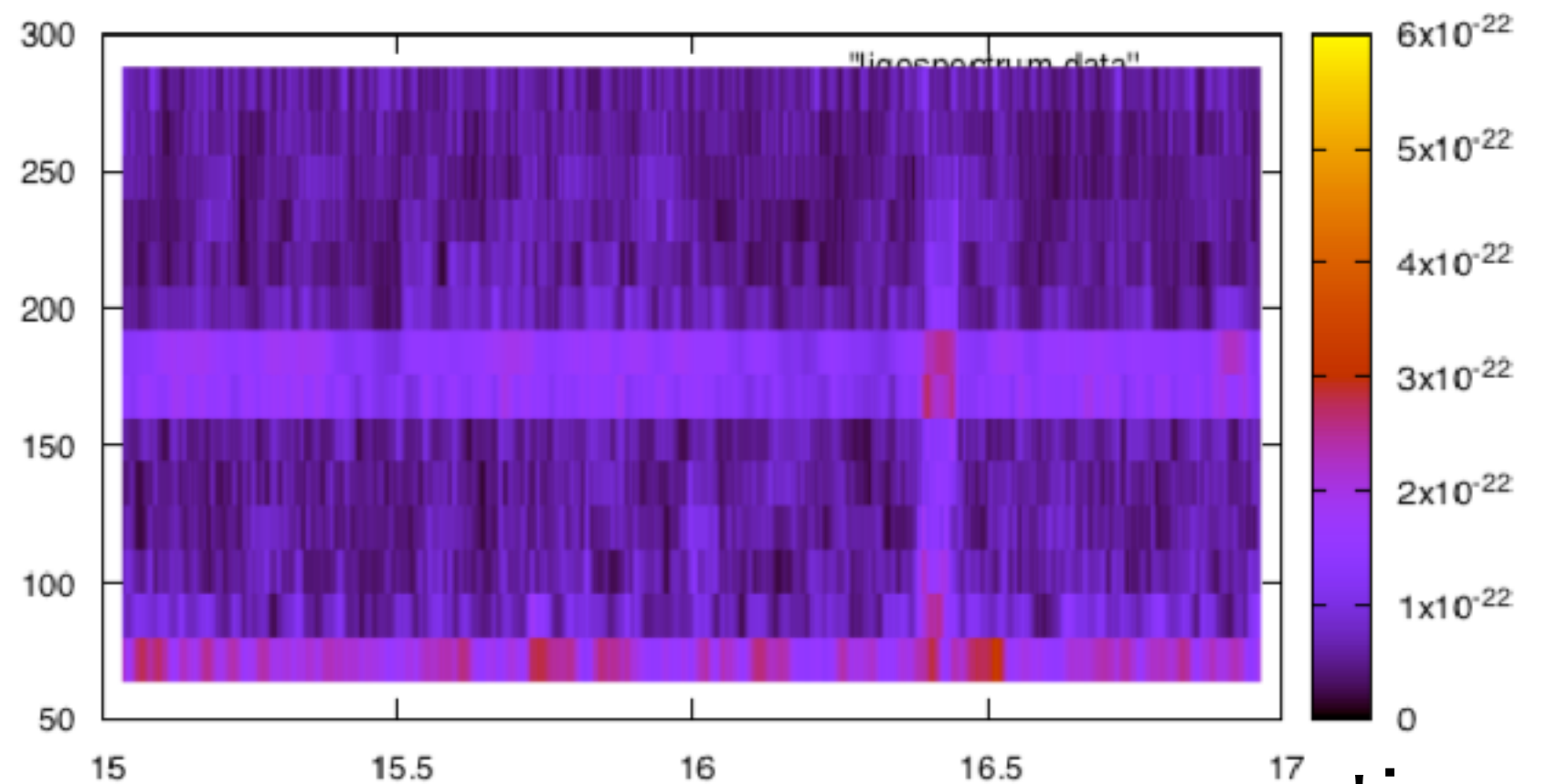
13億光年先

GW150914

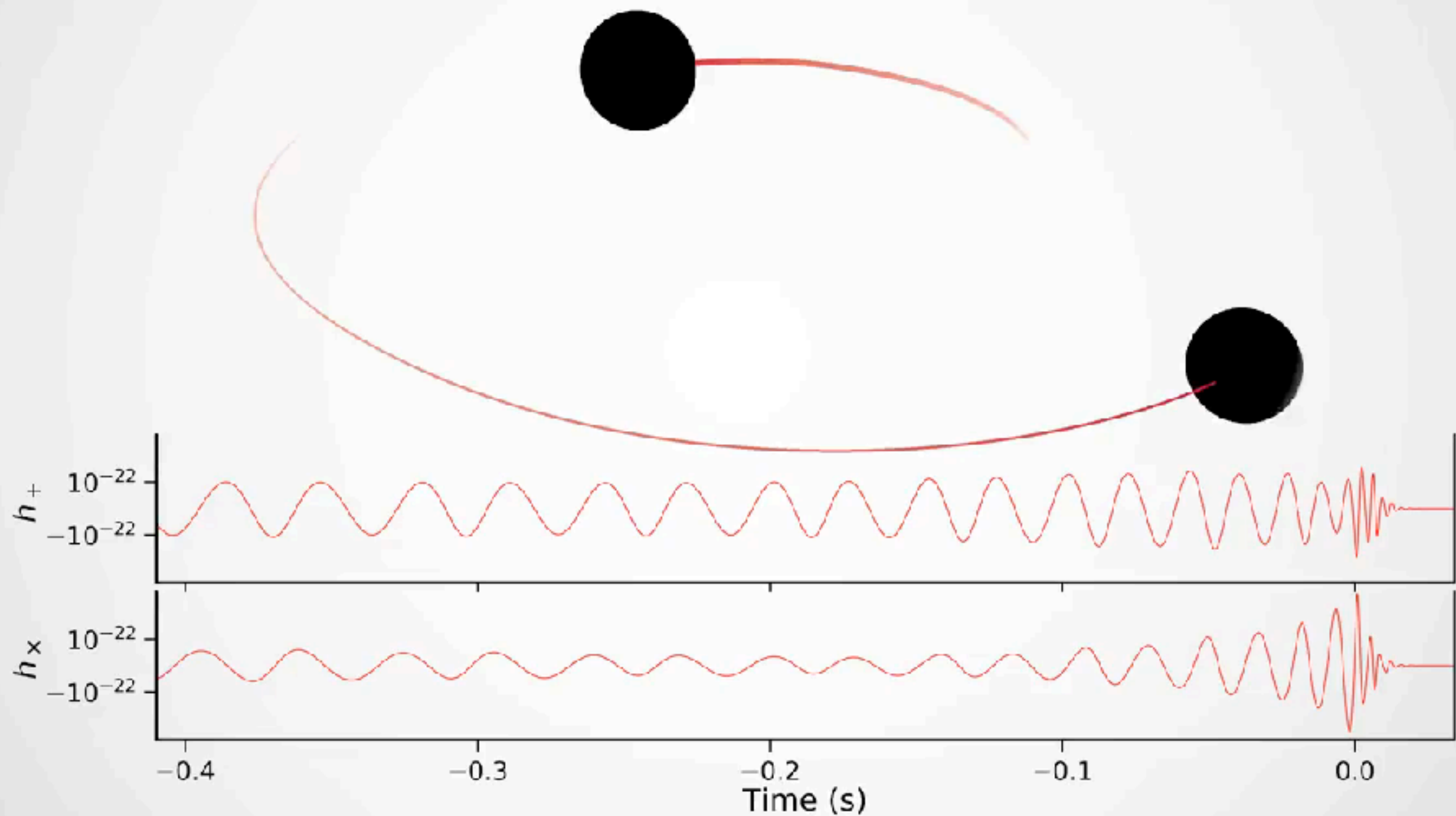
$h(t)$



freq



time



Animation of the inspiral and collision of two black holes consistent with the masses and spins of GW170104. The top part of the movie shows the black hole horizons (surfaces of "no return"). The initial two black holes orbit each other, until they merge and form one larger remnant black hole. The shown black holes are spinning, and angular momentum is exchanged among the two black holes and with the orbit. This results in a quite dramatic change in the orientation of the orbital plane, clearly visible in the movie. Furthermore, the spin-axes of the black holes change, as visible through the colored patch on each black hole horizon, which indicates the north pole.

The lower part of the movie shows the two distinct gravitational waves (called 'polarizations') that the merger is emitting into the direction of the camera. The modulations of the polarizations depend sensitively on the orientation of the orbital plane, and thus encode information about the orientation of the orbital plane and its change during the inspiral. Presently, LIGO can only measure one of the polarizations and therefore obtains only limited information about the orientation of the binary. This disadvantage will be remedied with the advent of additional gravitational wave detectors in Italy, Japan and India.

Finally, the slowed-down replay of the merger at the end of the movie makes it possible to observe the distortion of the newly formed remnant black hole, which decays quickly. Furthermore, the remnant black hole is "kicked" by the emitted gravitational waves, and moves upward. (Credit: A. Babul/H. Pfeiffer/CITA/SXS.) - See more at: <http://ligo.org/detections/GW170104.php#sthash.NZPaW2LT.dpuf>

<http://ligo.org/detections/GW170104.php>



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 $3.0^{+0.5}_{-0.3} M_{\odot} c^2$ 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

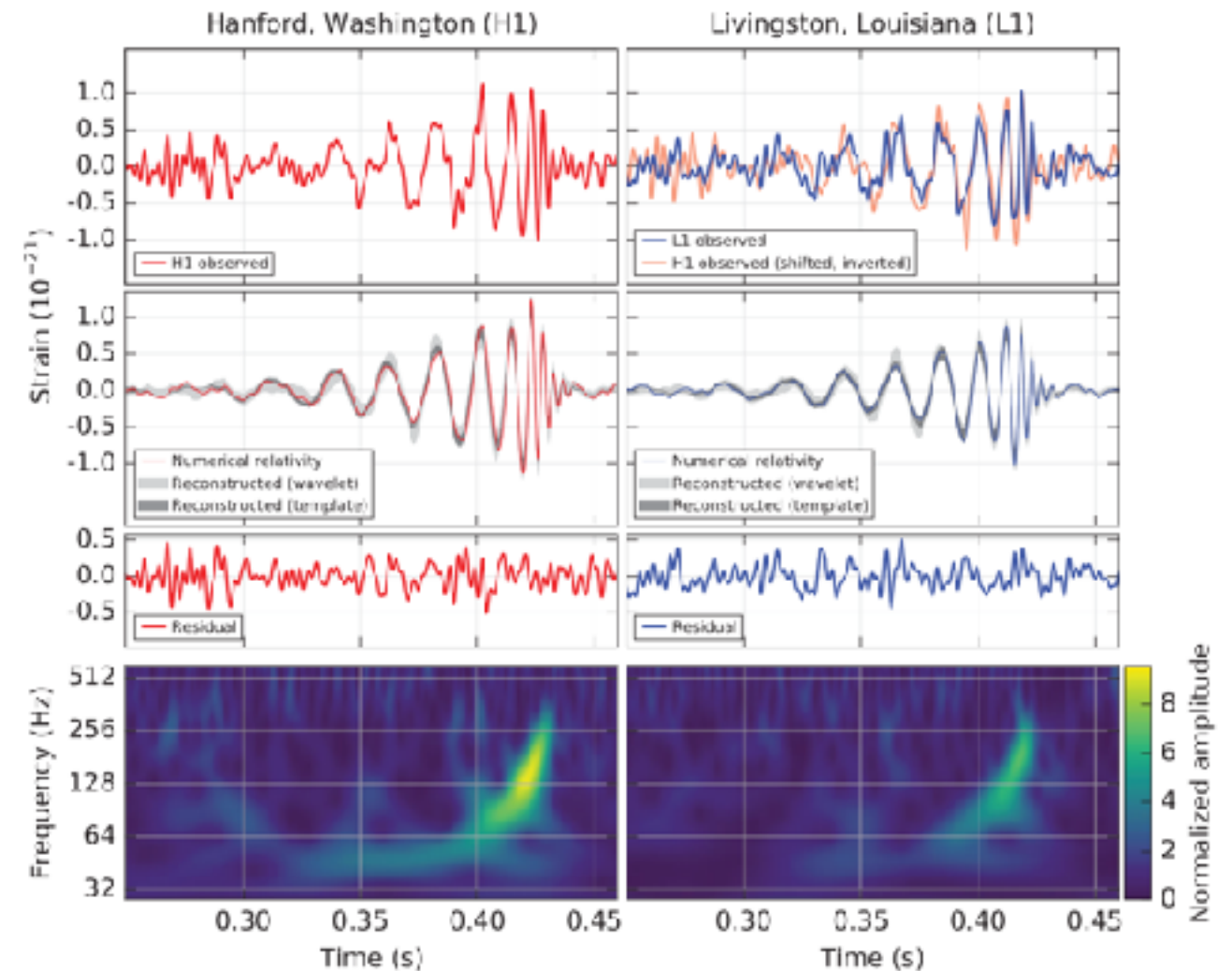
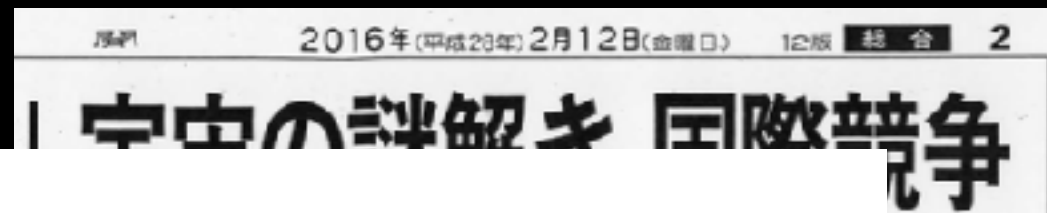


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



本年(二〇一六年)は、アインシュタインが一般相対性理論の本論文を発表してちょうど一〇〇年になる。その一〇〇年を祝うかのように、二月一二日深夜(米国時間一日)、アメリカのLIGO(ライゴ、注1)のグループは、ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

「予想通りで驚いた」
—重力波初観測の報道に接して



真貝 寿明

重力波はアインシュタインが残した百年未の宿題だ。その宿題はブラックホールの観測にもつながる。日本では高精度の大型装置(重力波望遠鏡)をつくらなければならない。



2

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う狙い。学生ら約100人が参加し、熱心な表情で聴き入った。

【嵐山哲郎】

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

が締め切り間際の論文を慌てて書き換えたエピソードを披露すると、会場は笑いに包まれた。

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(28)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り、ためになった」と話していた。

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さ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。

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

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一般向けの緊急解説記事を掲載した。昨年には一般向けの解説書「ブラックホール・膨張宇宙・重力波 一般相対性理論の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。

【嵐山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13

「窮理」 2016/8

第1問 次の文章は、二〇〇二年に刊行された科学論の一節である。これを読んで、後の問い(問1～6)に答えよ。なお、設問の都合で本文の段落に[1]～[13]の番号を付してある。また、表記を一部改めている。(配点 50)

[1] 現代社会は科学技術に依存した社会である。近代科学の成立期とされる十六世紀、十七世紀においては、そもそも「科学」という名称で認知されるような知的活動は存在せず、伝統的な自然哲学の一環としての、一部の好事家による楽しみの側面が強かった。しかし、十九世紀になると、科学研究は「科学者」という職業的専門家によって各種高等教育機関で営まれる知識生産へと変容し始める。既存の知識の改訂と拡大のみを生業とする集団を社会に組み込むことになったのである。さらに二十世紀になり、国民国家の競争の時代になると、科学は技術的な威力と結びつくことによって、この競争の重要な戦力としての力を発揮し始める。二度にわたる世界大戦が科学・技術の社会における位置づけを決定的にしていたのである。

[2] 第二次世界大戦以後、科学技術という営みの存在は膨張を続ける。ブライスによれば、科学技術という営みは十七世紀以来、十五年で(注1)バイソウするという速度で膨張してきており、二十世紀後半の科学技術の存在はGNPの二パーセント強の投資を要求するまでになってきているのである。現代の科学技術は、かつてのような思弁的、宇宙論的伝統に基づく自然哲学的性格を失い、A 先進国の社会体制を維持する重要な装置となつてきている。

[3] 十九世紀から二十世紀前半にかけては科学という営みの規模は小さく、にもかかわらず技術と結びつき始めた科学・技術は社会の諸問題を解決する能力を持っていた。「もつと科学を」というスローガンが説得力を持ち得た所以である。しかし二十世紀後半の科学・技術は両面価値的存在になり始める。現代の科学・技術では、自然の仕組みを解明し、宇宙を説明するという営みの比重が下がり、実験室の中に天然では生じない条件を作り出し、そのもとでさまざまな人工物を作り出すなど、自然に介入し、操作する能力の開発に重点が移動している。その結果、永らく人類を脅かし苦しめてきた病や災害といった自然の脅威を制御できるようになってきたが、同時に、科学・技術の作り出した人工物が人類にさまざまな災いをもたらす始めてもいるのである。科学・技術が恐るべき速度で生み出す新知識が、われわれの日々の生活に商品や製品として放出されてくる。い

(注3) わゆる「環境ホルモン」や地球環境問題、先端医療、情報技術などがその例である。B こうして「もつと科学を」というスローガンの説得力は低下し始め、「科学が問題ではないか」という新たな意識が社会に生まれ始めているのである。

[4] しかし、科学者は依然として「もつと科学を」という発想になじんでおり、このような「科学が問題ではないか」という問いかけを、科学に対する無知や誤解から生まれた情緒的反発とみなしがちである。ここからは、素人の一般市民への科学教育の充実や、科学啓蒙プログラムの展開という発想しか生まれないのである。

[5] このような状況に一石を投じたのが科学社会学者の(注4)コリンズとピンチの『ゴレム』である。ゴレムとはユダヤの神話に登場する怪物である。人間が水と土から創り出した怪物で、魔術的力を備え、日々その力を増加させつつ成長する。人間の命令に従い、人間の代わりに仕事をし、外敵から守ってくれる。しかしこの怪物は不器用で危険な存在でもあり、適切に制御しなければ主人を破壊する威力を持っている。コリンズとピンチは、現代では、科学が、全面的に善なる存在か全面的に悪なる存在かのどちらかのイメージに引き裂かれているという。そして、このような分裂したイメージを生んだ理由は、科学が実在と直結した無謬の知識という神のイメージで捉えられてきており、科学が自らを實體以上に美化することによって過大な約束をし、それが必ずしも実現しないことが幻滅を生み出したからだという。つまり、全面的に善なる存在というイメージが科学者から振りまかれ、他方、(注5)チエルノブイリ事故や狂牛病に象徴されるような事件によって科学への幻滅が生じ、一転して全面的に悪なる存在というイメージに変わったというのである。

[6] コリンズとピンチの処方箋は、科学者が振りまいた当初の「実在と直結した無謬の知識という神のイメージ」を科学の実態に即した「不確実で失敗しがちな向こう見ずでへまをする巨人のイメージ」、つまりC ゴレムのイメージに取りかえることを主張したのである。そして、科学史から七つの具体的な実験をめぐる論争を取り上げ、近年の科学社会学研究に基づくケーススタディーを提示し、科学上の論争の終結がおよそ科学哲学者が想定するような論理的、方法論的決着ではなく、さまざまなコウ(注6)インが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

[7] 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年に(注7)ウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を

ウ(イ)ンが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

- 7 彼らが扱ったケーススタディーの一例を挙げよう。一九六九年にウェーバーが、十二年の歳月をかけて開発した実験装置を用いて、重力波の測定に成功したと発表した。これをきっかけに、追試をする研究者があらわれ、重力波の存在をめぐって論争となったのである。この論争において、実験はどのような役割を果たしていたかという点が興味深い。追試実験から、ウェーバーの結果を否定するようなデータを手に入れた科学者は、それを発表するかいなかという選択の際に、(ウ)ヤツカイな問題を抱え込むのである。否定的な結果を発表することは、ウェーバーの実験が誤りであり、このような大きな値の重力波は存在しないという主張をすることになる。しかし、実は批判者の追試実験の方に不備があり、本当はウェーバーの検出した重力波が存在するということが明らかになれば、この追試実験の結果によって彼は自らの実験能力の低さを公表することになる。

- 8 学生実験の場合には、実験をする前におおよそどのような結果になるかがわかっており、それと食い違えば実験の失敗がセ(エ)ン(エ)クされる。しかし現実の科学では必ずしもそうはことが進まない。重力波の場合、どのような結果になれば実験は成功といえるかがわからないのである。重力波が検出されれば、実験は成功なのか、それとも重力波が検出されなければ、実験は成功なのか。しかしまさに争点は、重力波が存在するかどうかであり、そのための実験なのである。何が実験の成功といえる結果なのかを、前もって知ることはできない。重力波が存在するかどうかを知るために、「優れた検出装置を作らなければならぬ。しかし、その装置を使って適切な結果を手に入れなければ、装置が優れたものであったかどうかはわからない。しかし、優れた装置がなければ、何が適切な結果かということはわからない……」。コリンズとピンチはこのような循環を「実験家の悪循環」と呼んでいる。

- 9 重力波の論争に関しては、このような悪循環が生じ、その存在を完全に否定する実験的研究は不可能であるにもかかわらず(存在、非存在の可能性がある)、結局、有力科学者の否定的発言をきっかけにして、科学者の意見が雪崩を打って否定論に傾き、それ以後、重力波の存在は明確に否定されたのであった。つまり、論理的には重力波の存在もしくは非存在を実験によって決着をつけられていなかったが、科学者共同体の判断は、非存在の方向で収束したということである。

- 10 コリンズとピンチは、このようなケーススタディーをもとに、「もつと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の一

7 ウェーバー——ジョセフ・ウェーバー(一九一九～二〇〇〇)。物理学者。

8 重力波——時空のゆがみが波となって光速で伝わる現象。一九一六年にアインシュタインがその存在を予測していた。

9 重力波の存在は明確に否定された——ウェーバーによる検出の事実が証明されなかったが、二〇一六年、アメリカの研究チームが直接検出に成功したと発表した。

(ウ) ヤツカイ				
3	①	②	③	④
	ゴリヤクがある	ツウヤクの資格を取得する	ヤクドシを乗り切る	ヤツキになって反対する
				ヤツコウがある野草を探す
(エ) セン(エ)ク				
4	①	②	③	④
	上級裁判所へのジョウコク	コクメイな描写	コクビヤクのつけにくい議論	コクソウ地帯
				筆跡がコクジした署名

sport

2016/4/21

Cameron McEvoy wears his passion on his swimming cap

Swimmer and physics student Cameron McEvoy is sporting the signature of a gravitational wave on his cap.



Cameron McEvoy wins a 100m heat with the gravitational wave on his Bond University club cap. Source:AAP

The discovery has made a big impression on McEvoy, 21, whose heroes tend to be scientists rather than swimmers.

“It’s the 100th anniversary of Einstein’s general theory of relativity, which is his theory of gravity and coincidentally, physicists at Advanced LIGO (observatory) discovered gravitational waves, which is the stretching and contraction of space-time itself — everything we move in and pretty much what the universe is,” he said.



2017/10





GRAVITATIONAL WAVES DRESS

★★★★★ 6 reviews

\$179.00

SIZE

X-SMALL SMALL MEDIUM L
XX-LARGE X-SMALL WITH 15" SLEEVES
SMALL WITH 15" SLEEVES MEDIUM
LARGE WITH 15" SLEEVES X-LARGE
XX-LARGE WITH 15" SLEEVES

ADD TO CART

Want to wear the fabric of space time?

Celebrate the [discovery of gravitational waves](#) first glance, you see plaid. Look a bit further into the data from the [LIGO](#) detectors. It's a classic plaid with a gravitational twist.

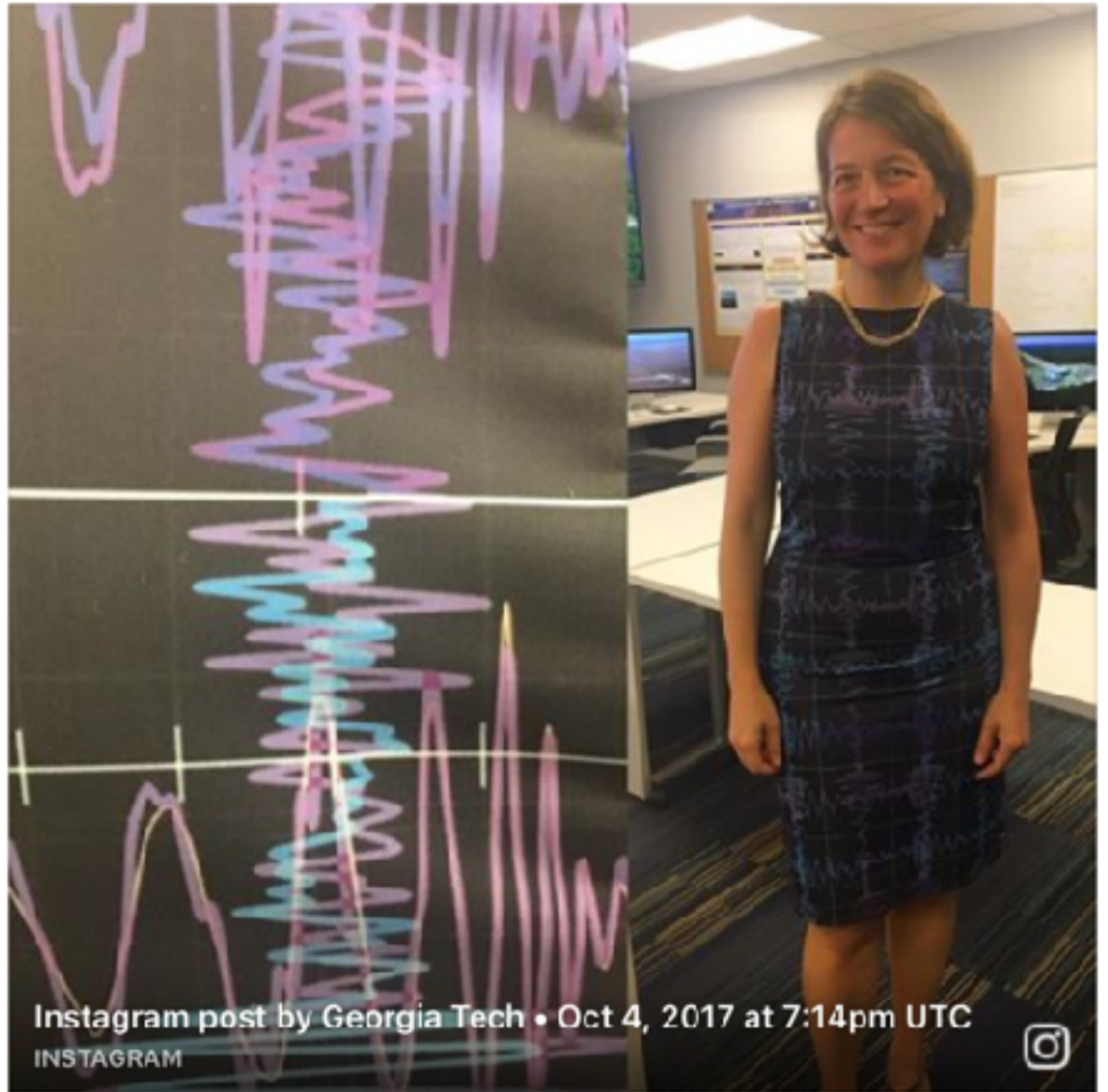
MATCHING PLAID TIE AND ACCESSORIES AVAILABLE



Laura Cadonati

10月11日 1:22

Posting for a bit of comic relief: "It's like a better version of Ms Frizzle!!" Thanks to [Gabriela Gonzalez](#) for the dress, a rite of passage of sort?



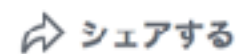
Instagram post by Georgia Tech • Oct 4, 2017 at 7:14pm UTC



いいね！



コメントする



シェアする



あなた、 Jorge Pullinさん、 Deirdre Shoemakerさん、 他83人

Accessories > Ties

Gravitational Waves Tie

★★★★★ 4.4 (1254)

\$44.30
per tie

Qty: 1

Add to Cart

15% Off with code CREATIVEDEAL



Designed for you
by Shenona by Zazzle

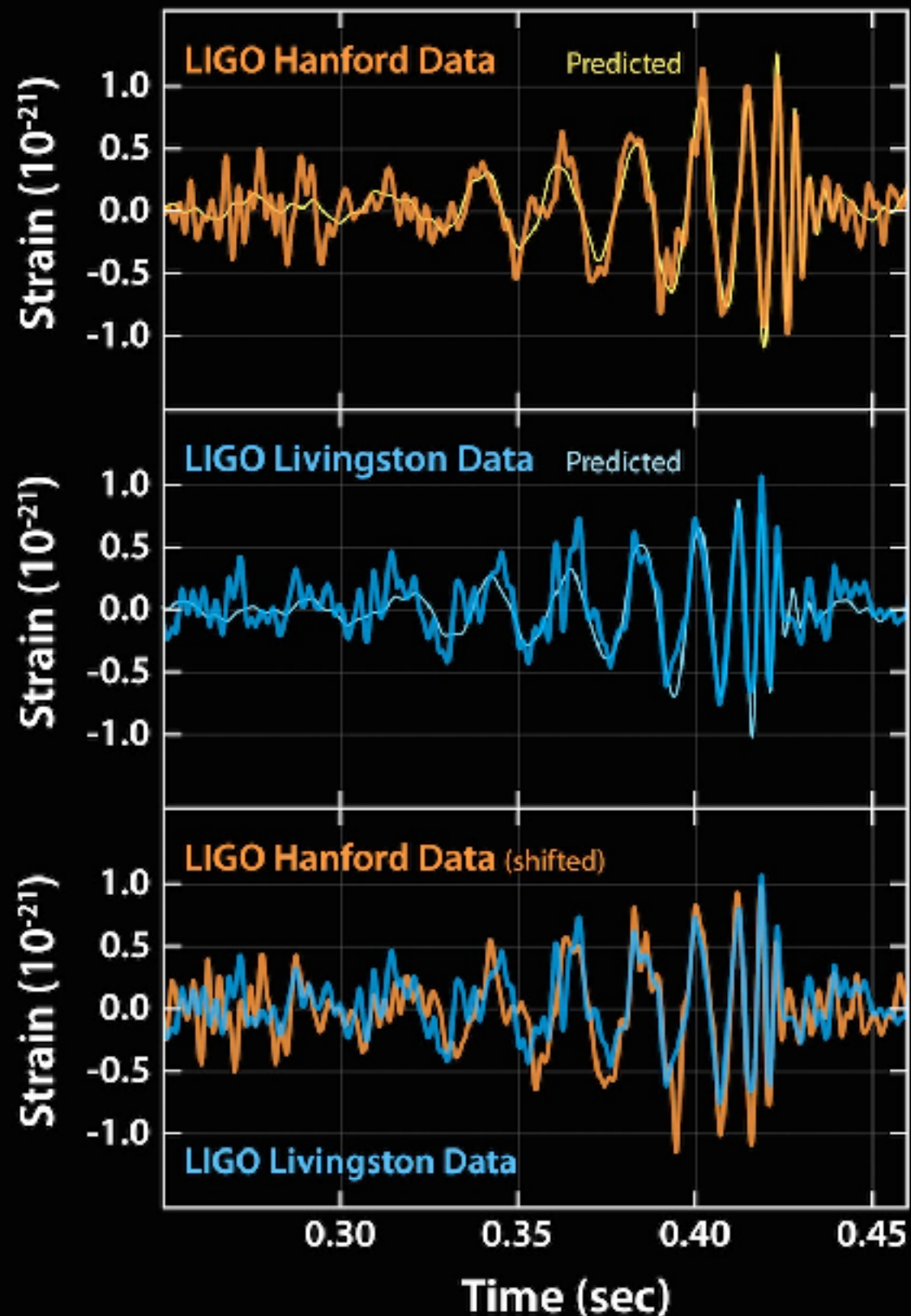
Customize



Independent artist's content may not match model depicted, RealView™ technology. Illustrates fit and usage only.



GW150914



GW150914:FACTSHEET

BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; SIMULATION OF BLACK HOLE HORIZONS (MIDDLE-TOP), BEST FIT WAVEFORM (MIDDLE-BOTTOM)

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 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.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M $\odot$
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
Source Masses M $\odot$		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.		

Detector noise introduces errors in measurement. Parameter ranges correspond to 90% credible bounds.
 Acronyms: L1=LIGO Livingston, H1=LIGO Hanford; Gly=giga lightyear= 9.46×10^{12} km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= 10^3 Mpc, fm=femtometer= 10^{-15} m, M $\odot$ =1 solar mass= 2×10^{30} kg

GW151226

14Msun + 7.5 Msun
のBHが合体して 21 Msun
(1 Msun分の質量が消失)

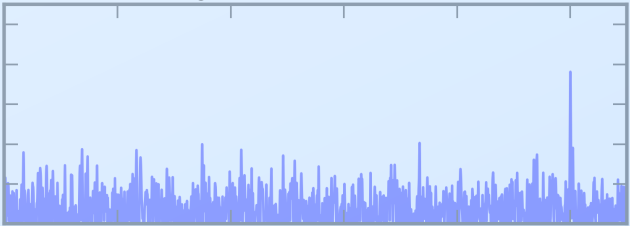
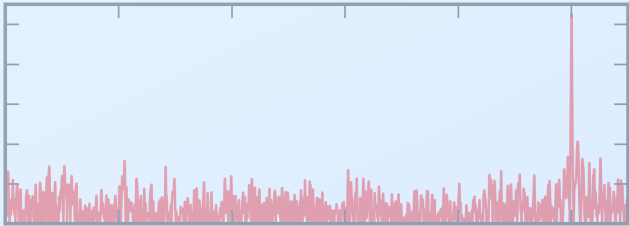
15億光年先
(440±190 Mpc)
(z=0.05—0.13)

GW151226:FACTSHEET

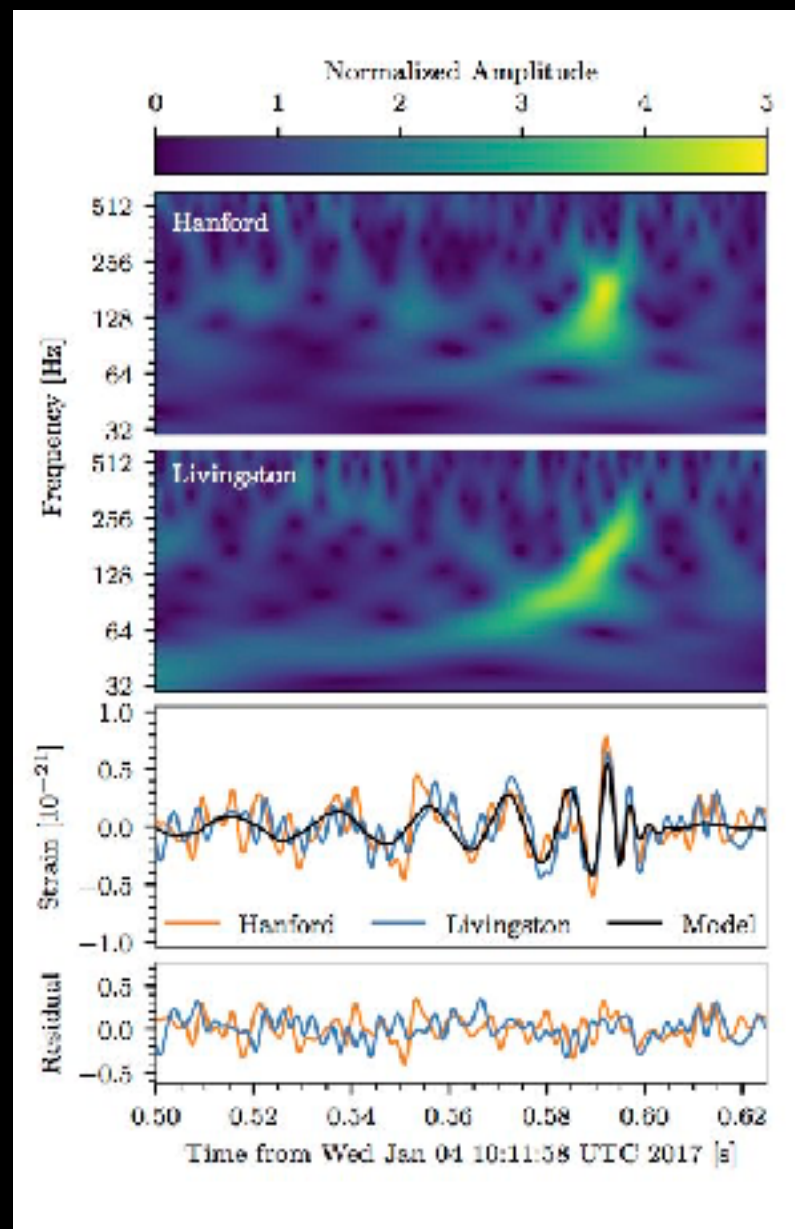
BACKGROUND IMAGES: TIME-FREQUENCY TRACE (TOP) AND SIGNAL-TO-NOISE RATIO TIME-SERIES (BOTTOM) IN THE TWO LIGO DETECTORS; EXAMPLE WAVEFORM (MIDDLE)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 35 Hz	~1 s
source type	black hole (BH) binary	# cycles from 35 Hz	~55
date	26 Dec 2015	signal arrival time	arrived in H1 1 ms after L1
time	03:38:53 UTC	delay	L1
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	~ 3.4 x 10 ⁻²²
redshift	0.05 to 0.13	peak displacement of interferometers arms	~ ±0.7 am
signal-to-noise ratio	13	frequency/wavelength at peak GW strain	420 Hz, 710 km
false alarm prob.	~ 1 in 10 million	peak speed of BHs	~ 0.6 c
Source Masses M_⊙		peak GW luminosity	2 to 4 x 10 ⁵⁶ erg s ⁻¹
total mass	20 to 28	radiated GW energy	0.8-1.1 M _⊙
primary BH	11 to 23	remnant ringdown freq.	~ 750 Hz
secondary BH	5 to 10	remnant damping time	0.00 ~ 1.3 ms
remnant BH	19 to 27	remnant size, area	60 km, 3.5 x 10 ⁴ km ²
mass ratio	> 0.28	online trigger latency	~ 67 s
spin of one of the black holes	> 0.2	# offline analysis pipelines	2
remnant BH spin	0.7 to 0.8		
resolved to	~850 sq. deg.		

Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer=10⁻¹⁸ m, M_⊙=1 solar mass=2 x 10³⁰ kg



GW170104



GW170104:FACTSHEET

Background Images: time-frequency trace (top), H1 and L1 time series and maximum-likelihood binary black hole model (middle top), residuals between data and best-fit model (middle bottom), reconstructed waveforms from wavelet and binary black hole analyses (bottom)

observed by	LIGO L1, H1	duration from 30 Hz	~ 0.25 to 0.31 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 14 to 16
date	04 Jan 2017	signal arrival time delay	arrived at H1 3 ms before L1
time	10:11:58.6 UTC	credible region sky area	1200 sq. deg.
signal-to-noise ratio	13	peak GW strain	~ 5×10^{-22}
false alarm rate	< 1 in 70,000 years	peak displacement of interferometer arm	~ ± 1 am
probability of astrophysical origin	> 0.99997	frequency at peak GW strain	160 to 199 Hz
distance	1.6 to 4.3 billion light-years	wavelength at peak GW strain	1510 to 1880 km
redshift	0.10 to 0.25	peak GW luminosity	1.8 to 3.8×10^{56} erg s ⁻¹
total mass	46 to 57 $M_{\odot}$	radiated GW energy	1.3 to 2.6 $M_{\odot}$
primary BH mass	25 to 40 $M_{\odot}$	remnant ringdown freq.	297 to 373 Hz
secondary BH mass	13 to 25 $M_{\odot}$	remnant damping time	2.5 to 3.2 ms
mass ratio	0.36 to 0.94	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH mass	44 to 54 $M_{\odot}$	graviton mass combined bound	$\leq 7.7 \times 10^{-23}$ eV/c ²
remnant BH spin	0.39 to 0.7	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	123 to 150 km		
remnant area	1.9 to 2.8×10^5 km ²		
effective spin parameter	-0.42 to 0.09		
effective precession spin parameter	unconstrained		

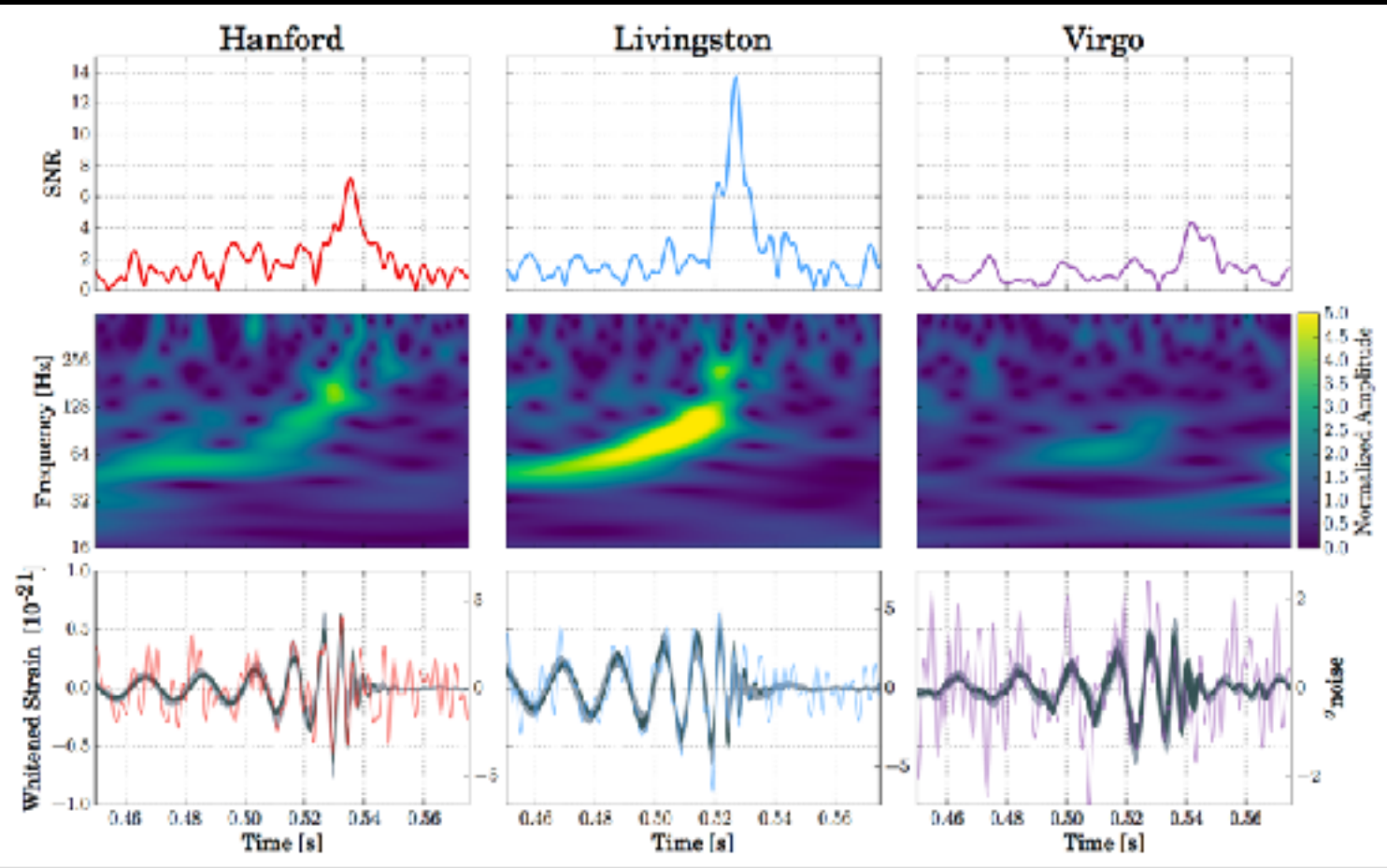
Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

Acronyms:

L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, am=attometer= 10^{-18} m, $M_{\odot}$ =1 solar mass= 2×10^{30} kg

GW170814

GW170814: FACTSHEET

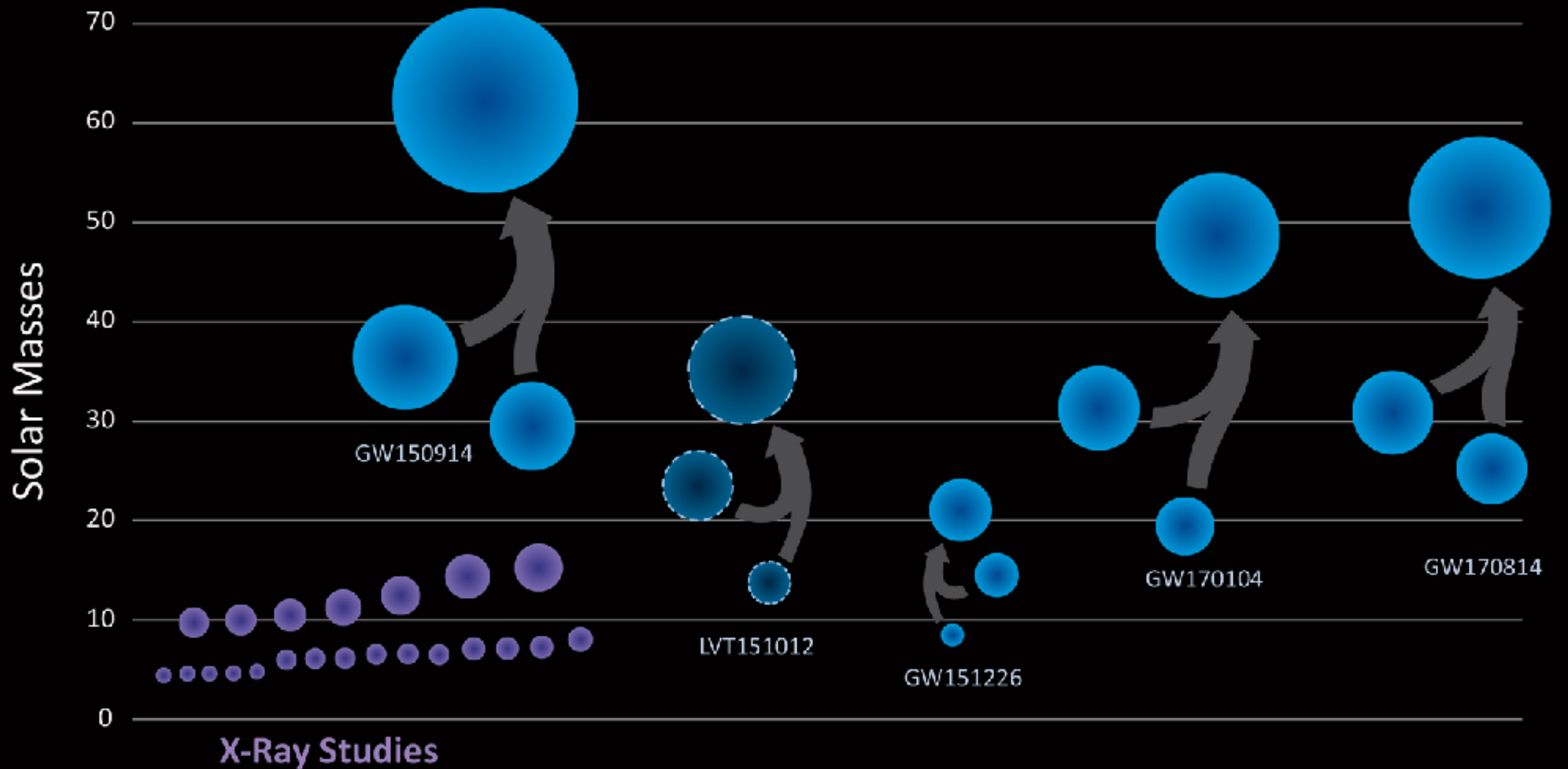


observed by	H1, L1, V1	duration from 30 Hz	~ 0.26 to 0.28 s
source type	black hole (BH) binary	# of cycles from 30 Hz	~ 15 to 16
date	14 Aug 2017	credible region sky area (with V1)	60 deg ²
time	10:30:43 UTC	credible region sky area (without V1)	1160 deg ²
online trigger latency	~ 30 s	latitude, longitude (at time of arrival)	45° S, 73° W
signal arrival time delay	at L1 8 ms before H1 and 14 ms before V1	sky location	in direction of Eridanus constellation
signal-to-noise ratio	18	*RA, Dec	03 ^h 11 ^m , -44°57 ^m
false alarm rate	≤ 1 in 27 000 years	Peak GW strain (10 ⁻²²) (H1, L1, V1)	~ 6, 6, 5
probability of noise producing V1 SNR peak	0.3%	peak stretching of interferometer arm (H1, L1, V1)	~ ± 1.2, 1.2, 0.8 am
distance	1.1 to 2.2 billion light-years	frequency at peak GW strain	155 to 203 Hz
redshift	0.07 to 0.14	wavelength at peak GW strain	1480 to 1930 km
total mass	53 to 59 M _⊙	peak GW luminosity	3.2 to 4.2 × 10 ⁵⁶ erg s ⁻¹
primary BH mass	28 to 36 M _⊙	radiated GW energy	2.4 to 3.1 M _⊙ c ²
secondary BH mass	21 to 28 M _⊙	remnant ringdown freq.	312 to 345 Hz
mass ratio	0.6 to 1.0	remnant damping time	3.1 to 3.6 ms
remnant BH mass	51 to 56 M _⊙	consistent with general relativity?	passes all tests performed
remnant BH spin	0.65 to 0.77	evidence for dispersion of GWs	none
remnant size (effective radius)	139 to 153 km		
remnant area	2.4 to 2.9 × 10 ⁵ km ²		
effective spin parameter	-0.06 to 0.18		
effective precession spin parameter	unconstrained		

アメリカ LIGO 2台と、
ヨーロッパ Virgoの3台の
同時観測に成功

Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.
L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, V1=Virgo, am=attometer=10⁻¹⁸ m, M_⊙=1 solar mass=2 × 10³⁰ kg
Background Images (H1, L1, V1 from left to right): time-frequency trace (top), sky maps (middle), and time series with reconstructed waveforms from modeled and un-modeled searches (bottom)
* Maximum a Posteriori estimates

Black Holes of Known Mass

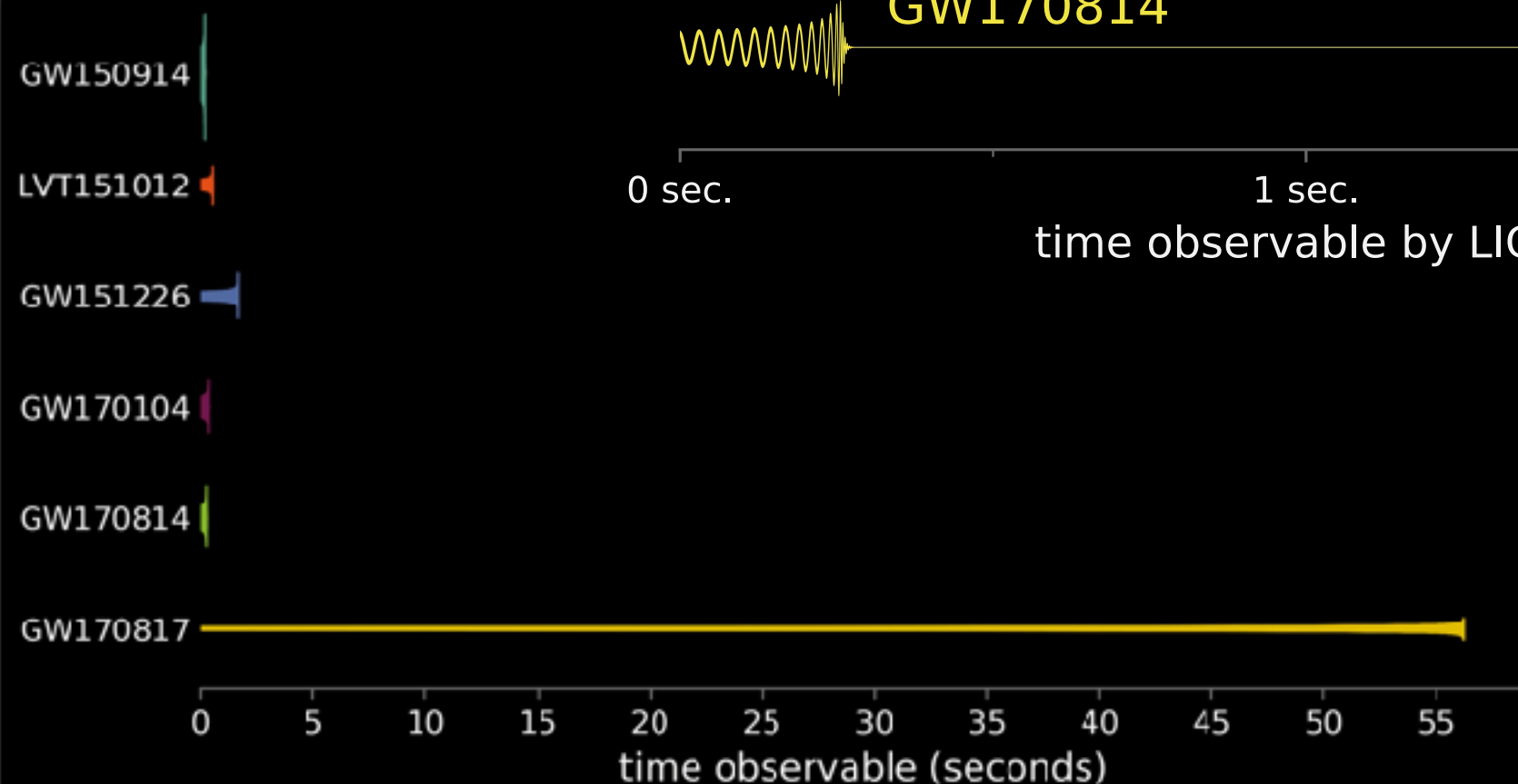
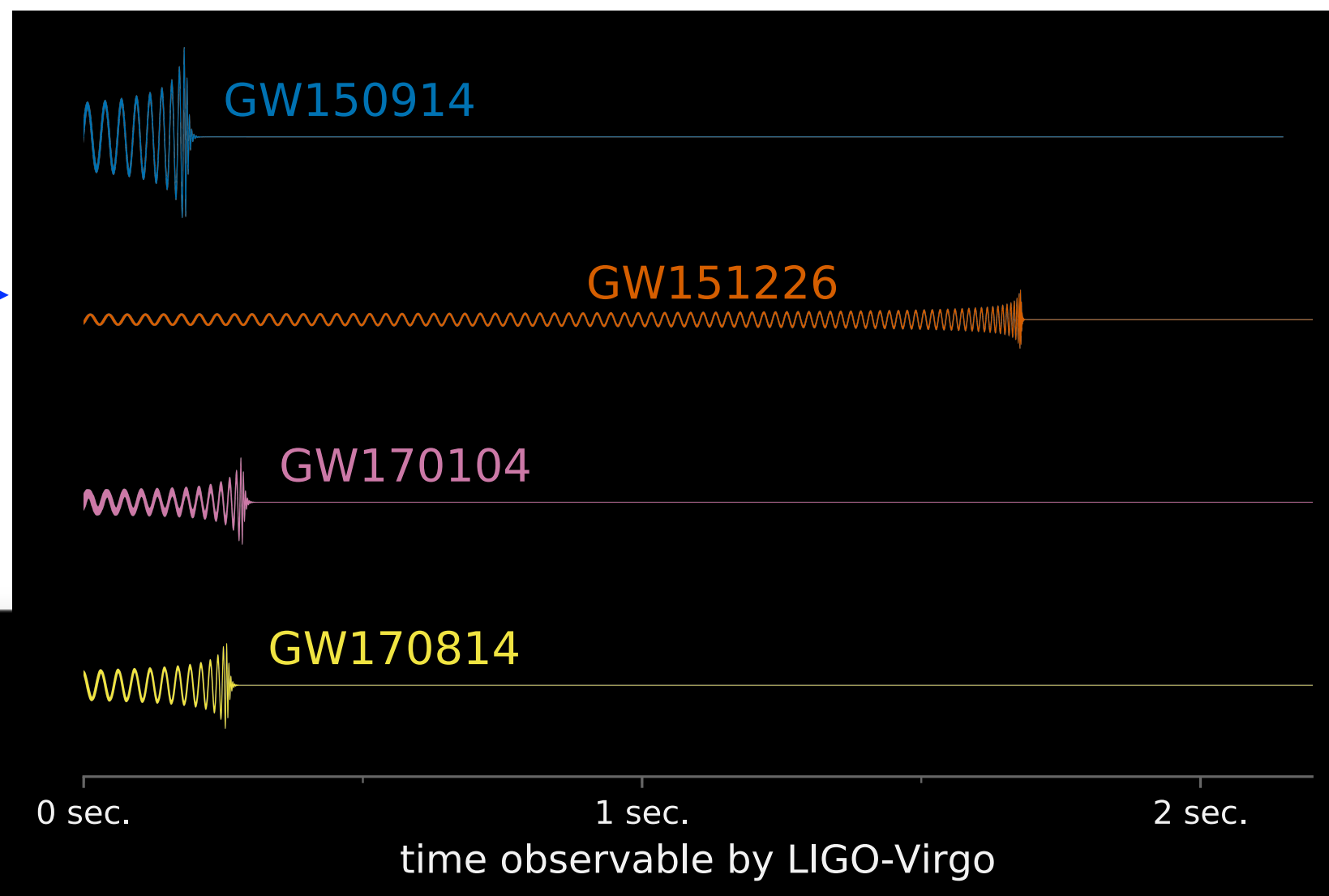


LIGO/VIRGO

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

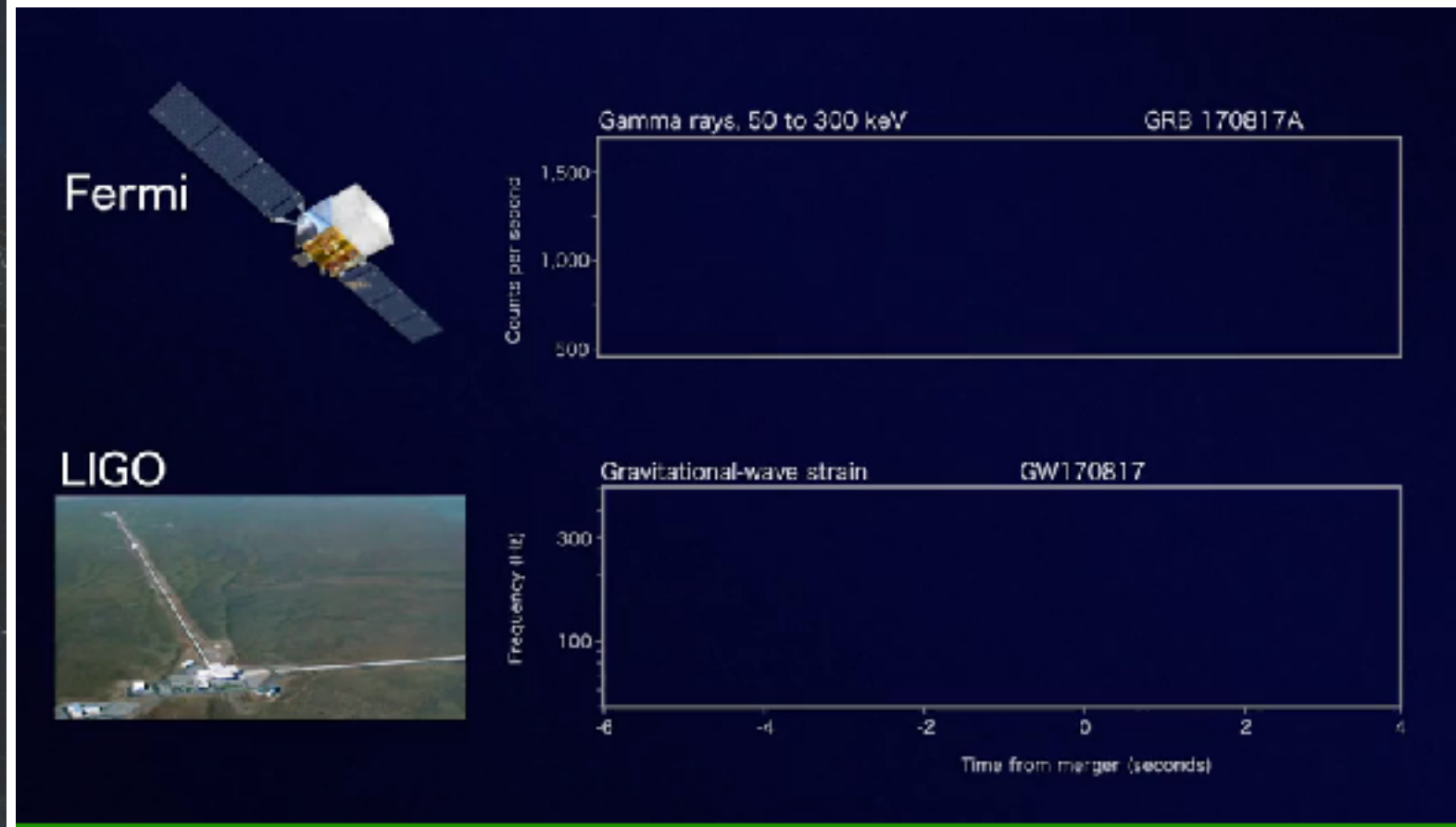
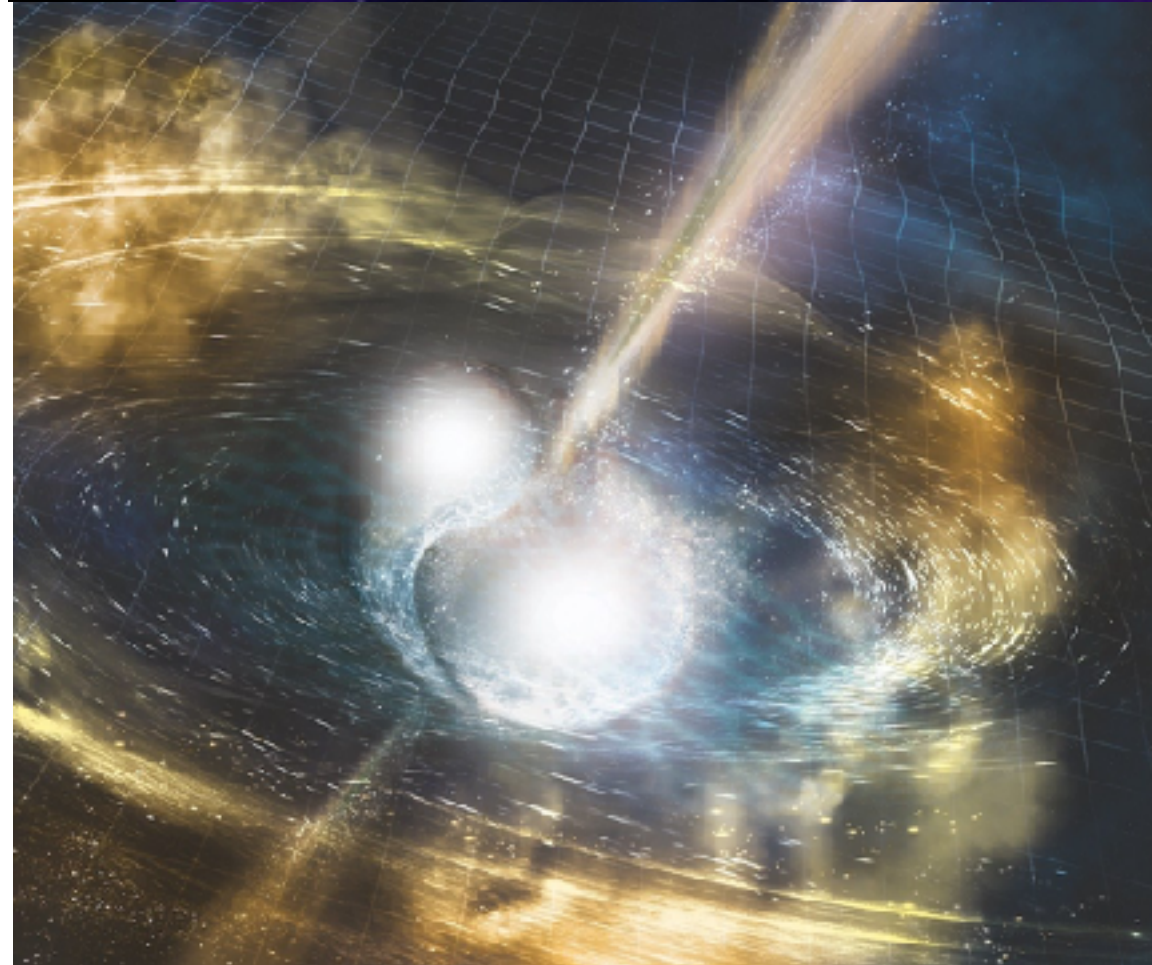
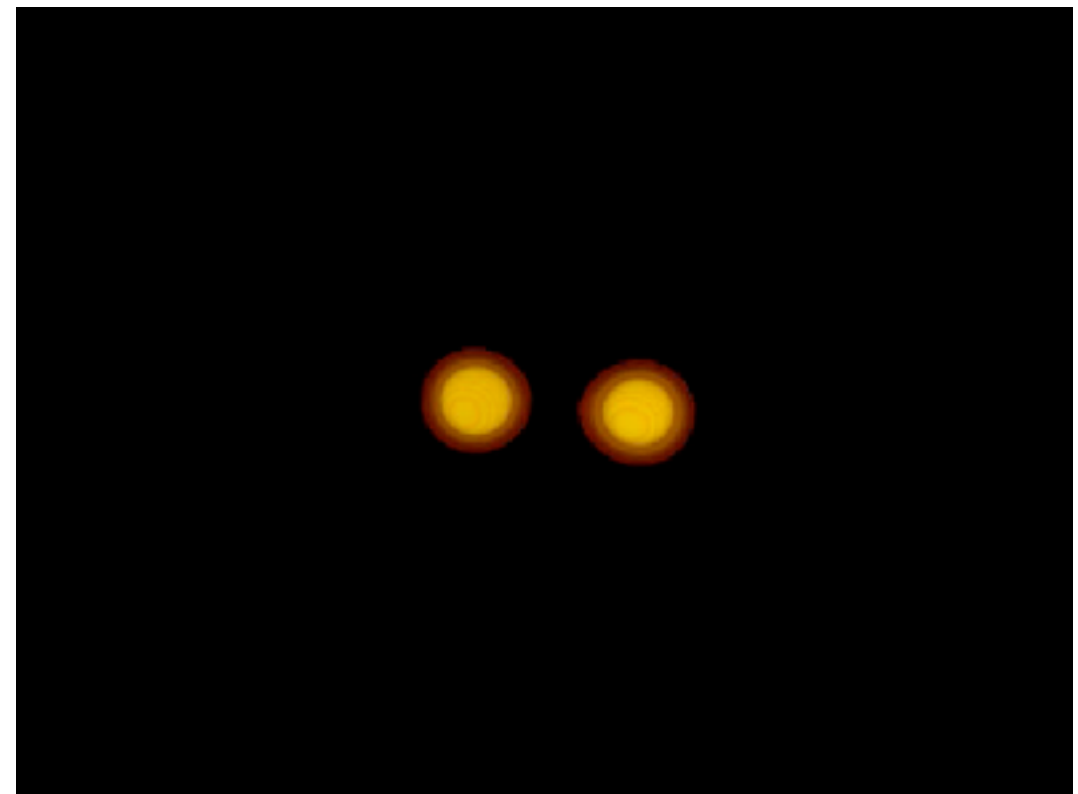
これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

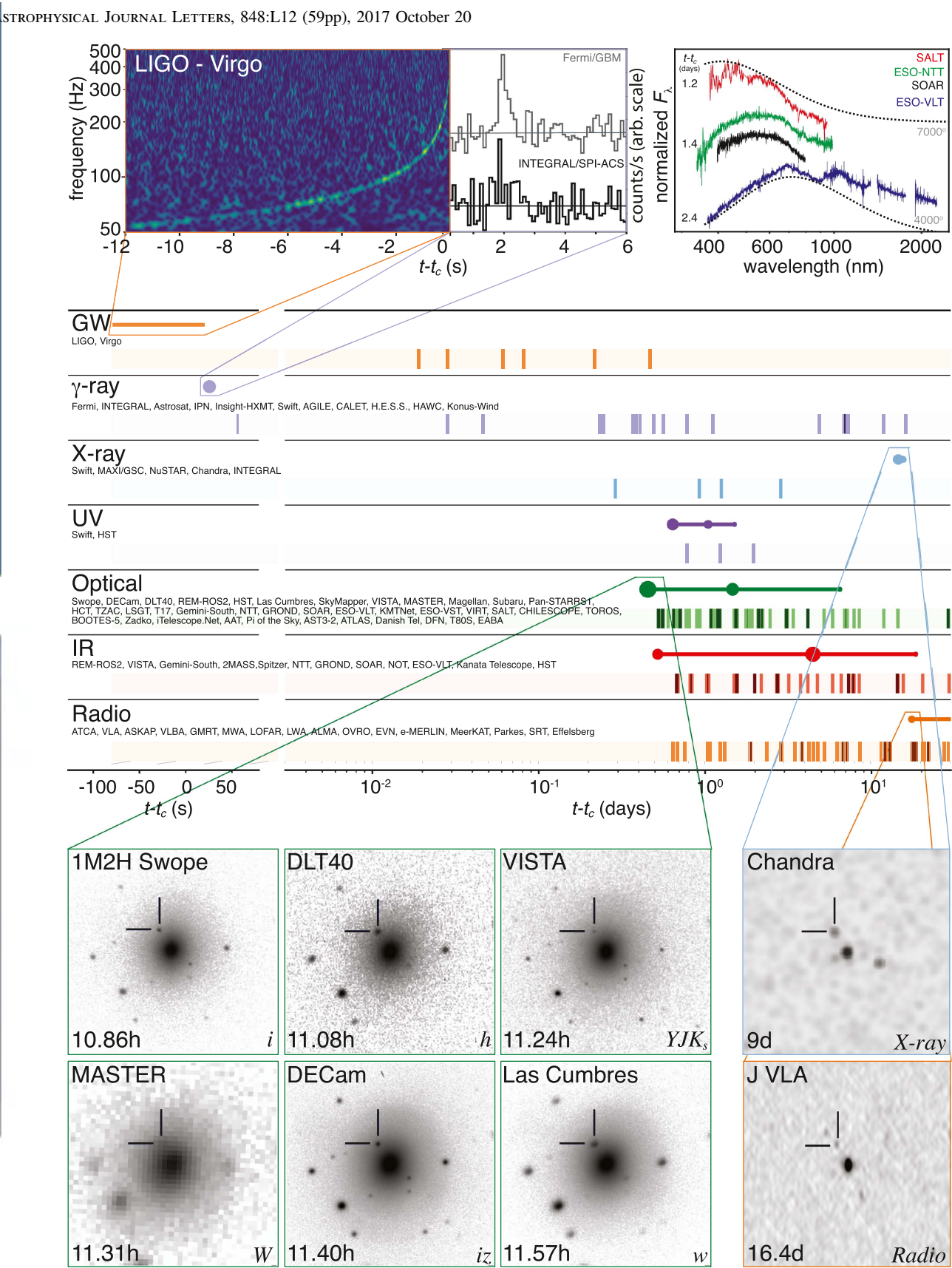
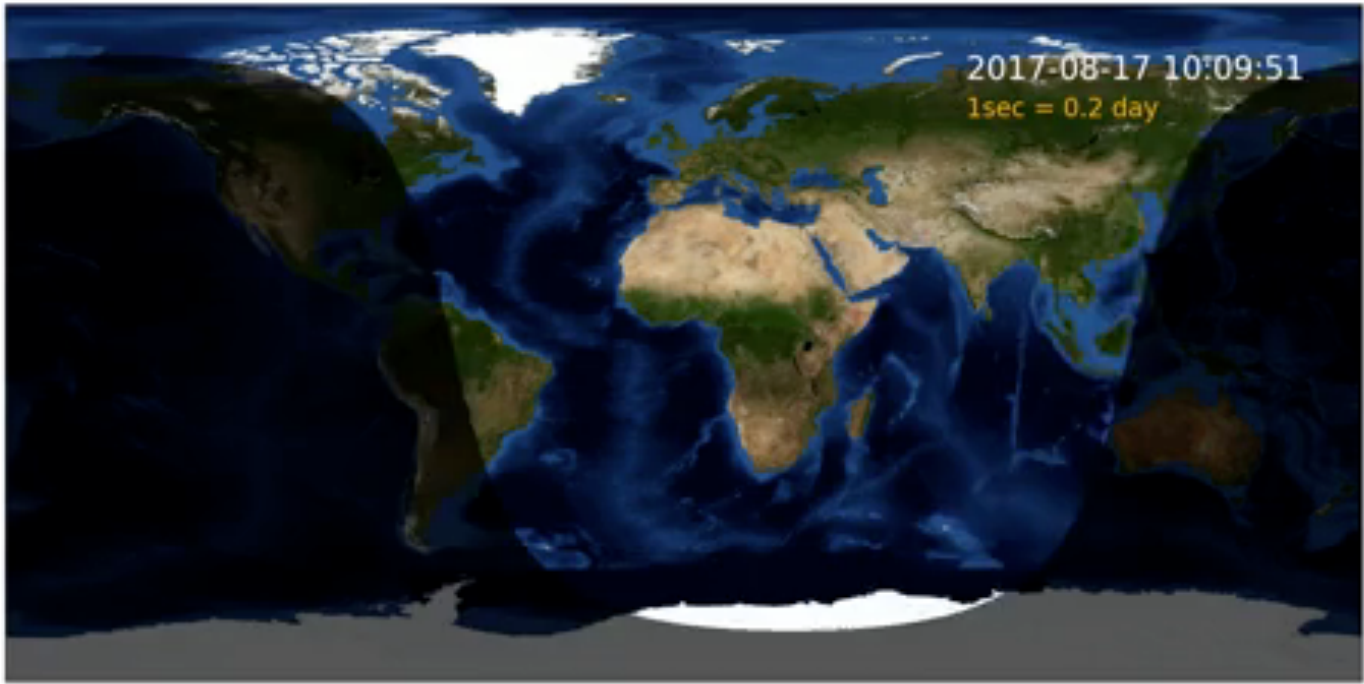
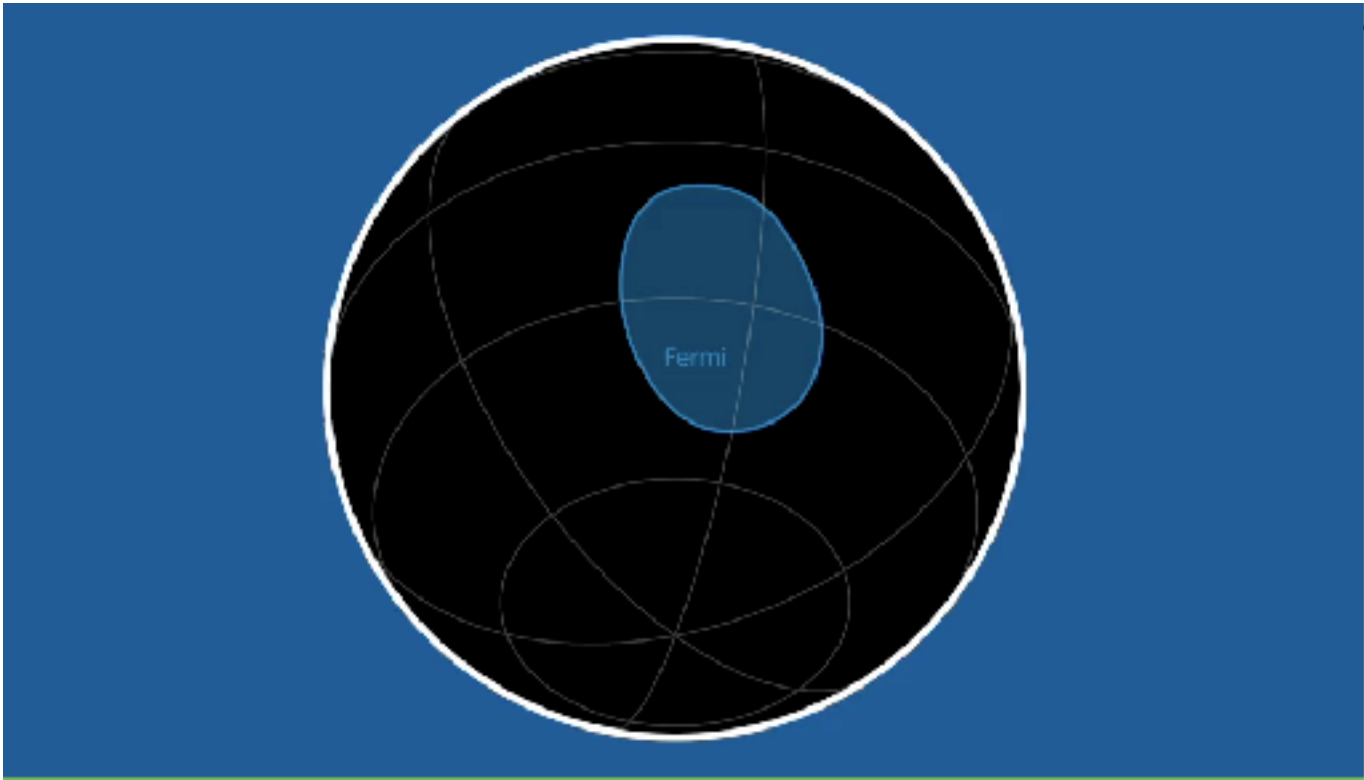


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band/messenger. First, the shaded dashes represent the

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

Collision creates light across the entire electromagnetic spectrum. Joint observations independently confirm Einstein's General Theory of Relativity, help measure the age of the Universe, and provide clues to the origins of heavy elements like gold and platinum

Gravitational wave lasted over 100 seconds

On August 17, 2017, 12:41 UTC, LIGO (US) and Virgo (Europe) detect gravitational waves from the merger of two neutron stars, each around 1.5 times the mass of our Sun. This is the first detection of spacetime ripples from neutron stars.

Within two seconds, NASA's Fermi Gamma-ray Space Telescope detects a short gamma-ray burst from a region of the sky overlapping the LIGO/Virgo position. Optical telescope observations pinpoint the origin of this signal to NGC 4993, a galaxy located 130 million light years distant.

LIGO

Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics



周期表 (periodic table)

Period

1

1 A

1

1 s

1

H

±1

水素

hydrogen

1.008

2

II A

↑ 非金属元素

↓ 金属元素

3

Li

+1

リチウム

lithium

6.941

4

Be

+2

ベリリウム

beryllium

9.012

11

Na

+1

ナトリウム

sodium

22.99

12

Mg

+2

マグネシウム

magnesium

24.31

19

K

+1

カリウム

potassium

39.10

20

Ca

+2

カルシウム

calcium

40.08

37

Rb

+1

ルビジウム

rubidium

85.47

38

Sr

+2

ストロンチウム

strontium

87.62

55

Cs

+1

セシウム

cesium

132.9

56

Ba

+2

バリウム

barium

137.3

87

Fr

+1

フランシウム

francium

223

88

Ra

+2

ラジウム

radium

226

3

III B

4

IV B

5

V B

6

VI B

7

VII B

8

VIII B

9

VIII B

10

VIII B

11

I B

12

II B

21

Sc

+3

スカンジウム

scandium

44.96

22

Ti

+4,3,2

チタン

titanium

47.87

23

V

+5,2,3,4

バナジウム

vanadium

50.94

24

Cr

+3,2,6

クロム

chromium

52.00

25

Mn

+2,3,4,6,7

マンガン

manganese

54.94

26

Fe

+3,2

鉄

iron

55.85

27

Co

+2,3

コバルト

cobalt

58.93

28

Ni

+2,3

ニッケル

nickel

58.69

29

Cu

+2,1

銅

copper

63.55

30

Zn

+2

亜鉛

zinc

65.41

39

Y

+3

イットリウム

yttrium

88.91

40

Zr

+4

ジルコニウム

zirconium

91.22

41

Nb

+5,3

ニオブ

niobium

92.91

42

Mo

+6,3,5

モリブデン

molybdenum

95.94

43

Tc

+7,4,6

テクネチウム

technetium

98

44

Ru

+4,3,6,8

ルテニウム

ruthenium

101.1

45

Rh

+3,4,6

ロジウム

rhodium

102.9

46

Pd

+2,4

パラジウム

palladium

106.4

47

Ag

+1

銀

silver

107.9

48

Cd

+2

カドミウム

cadmium

112.4

57—71

ランタノイド

lanthanides

72

Hf

+4

ハフニウム

hafnium

178.5

73

Ta

+5

タンタル

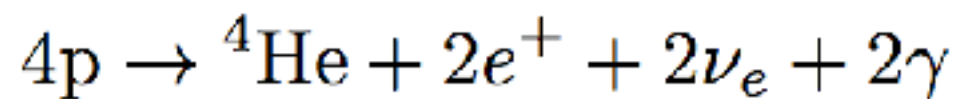
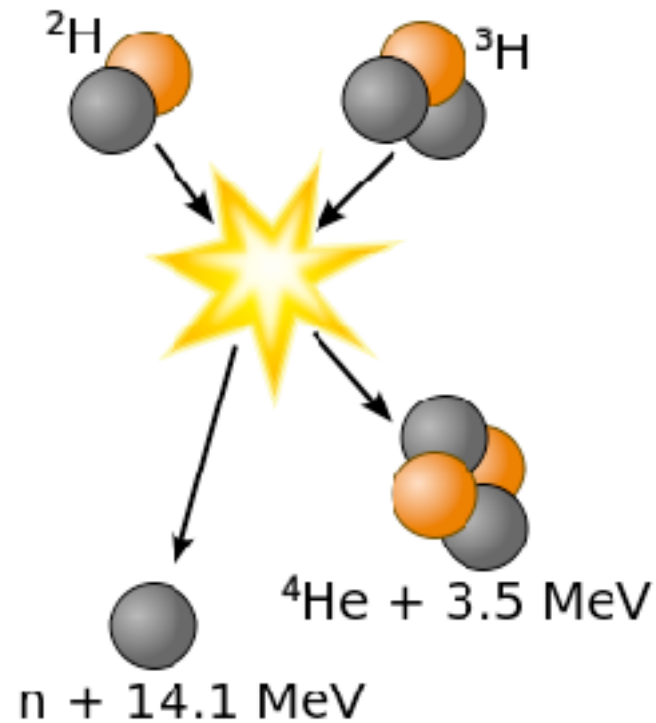
tantalum

180.9

74

核反応 原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出

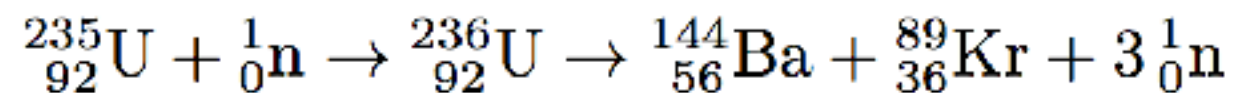
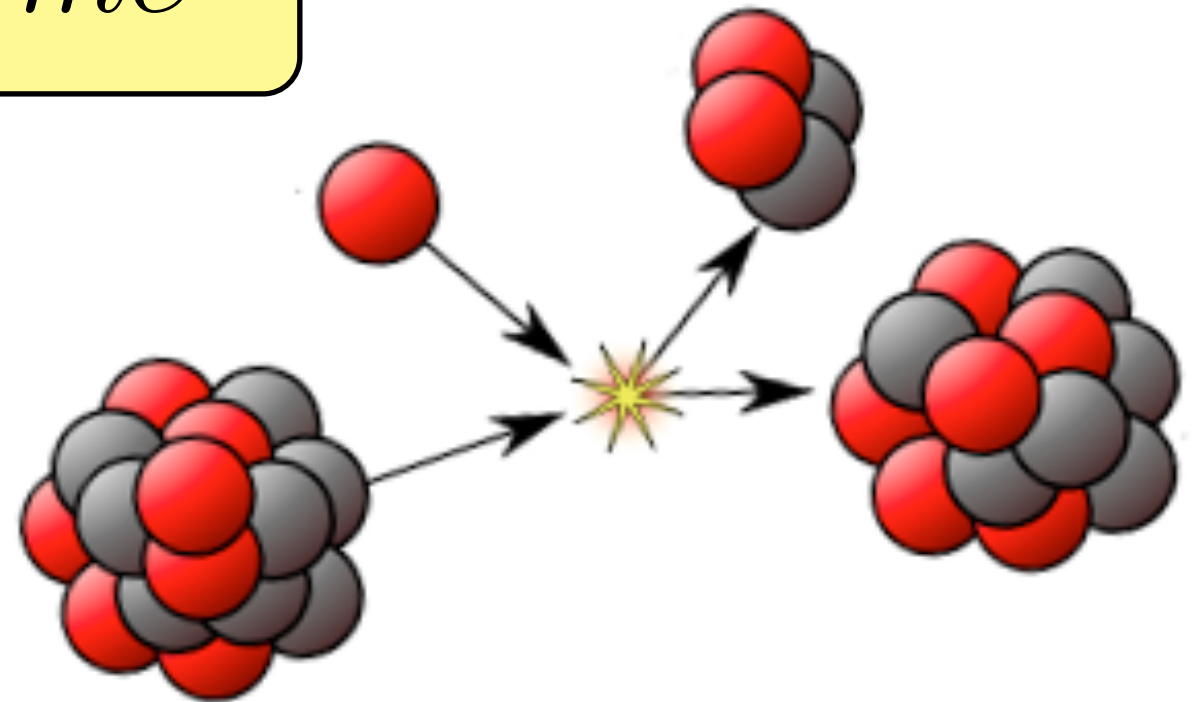
$$E = mc^2$$



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)



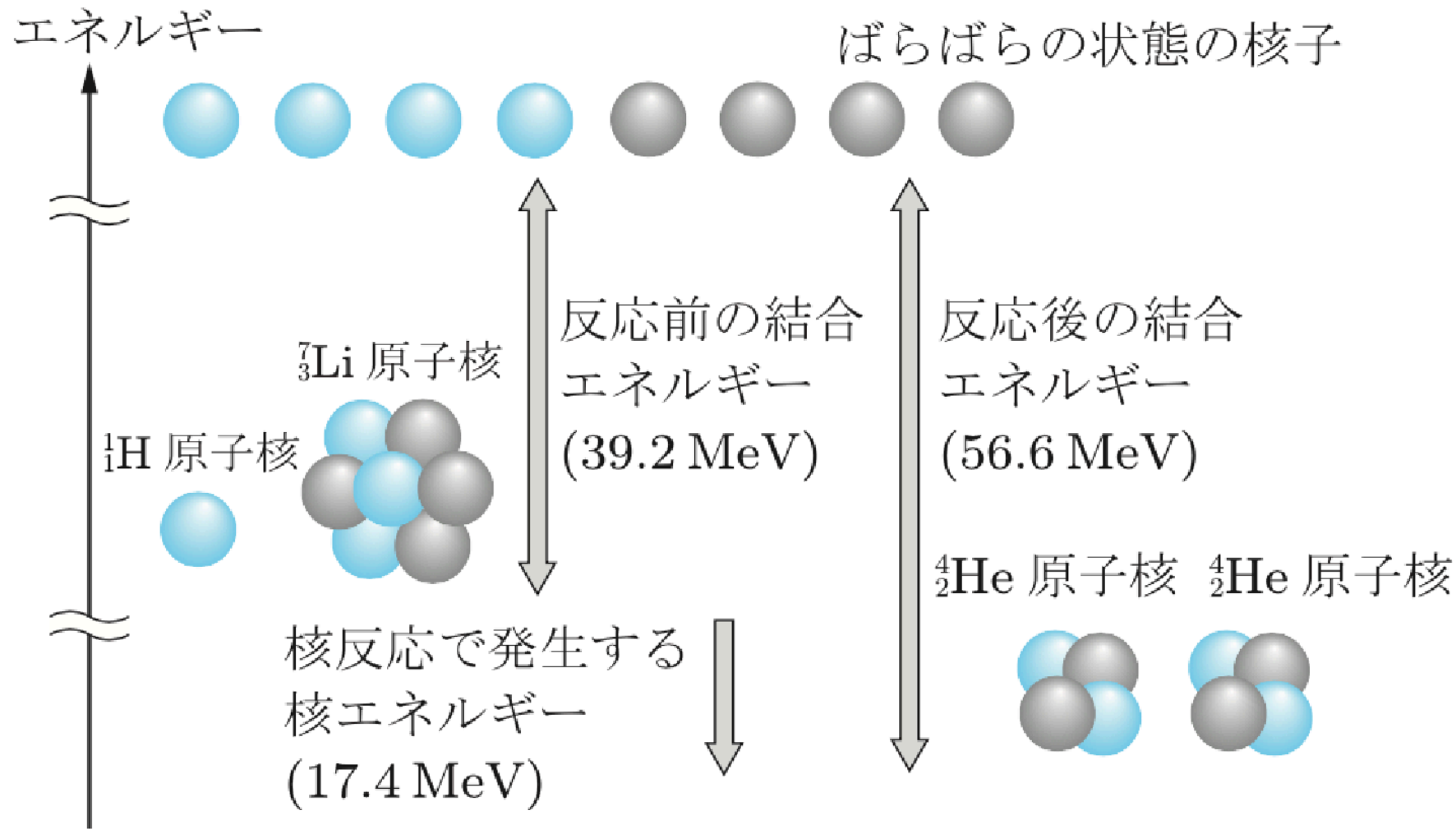
核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

結合エネルギー

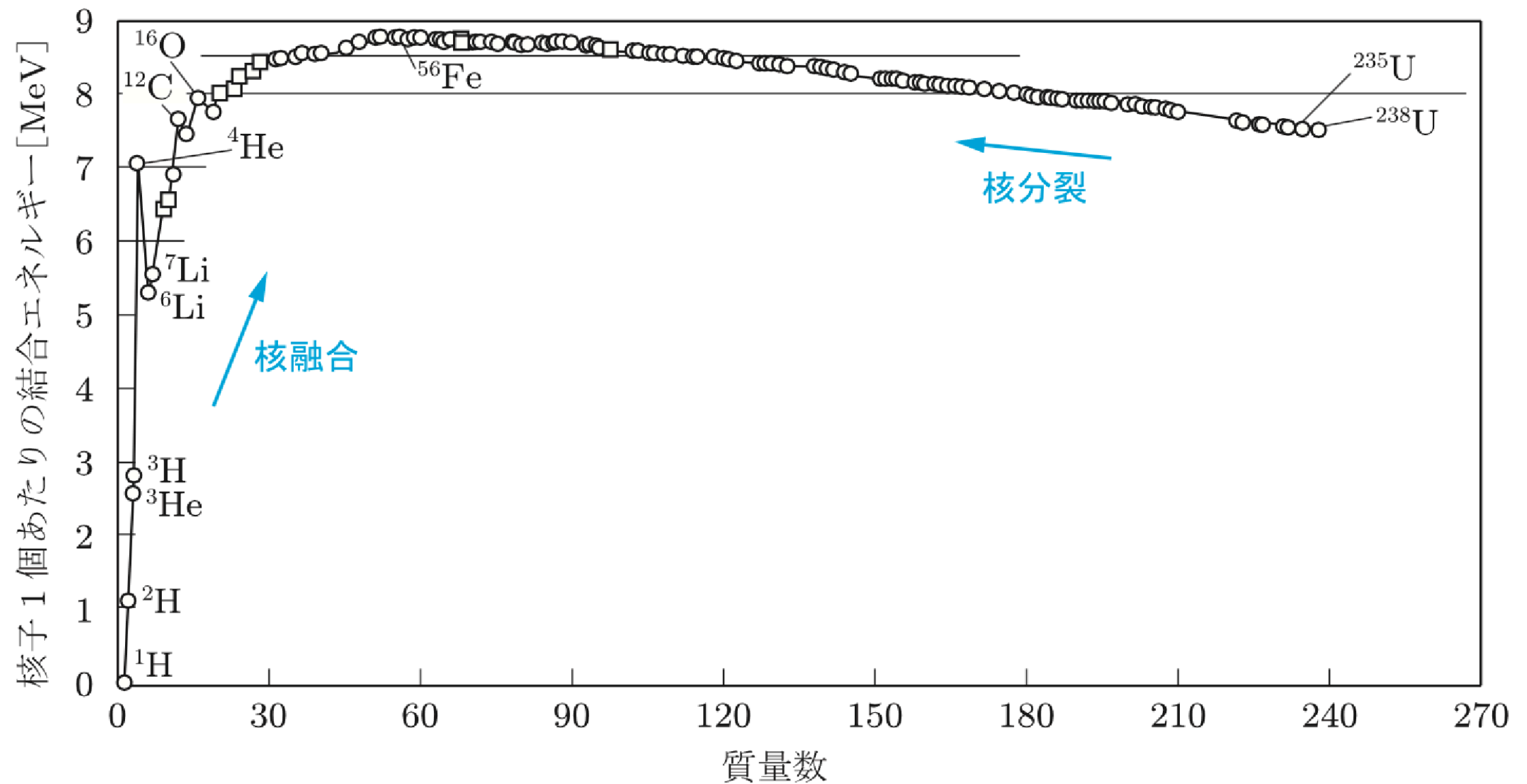
$$E = mc^2$$



ばらばらでいるより，結合している方が，エネルギーが低くて安定

結合エネルギー

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



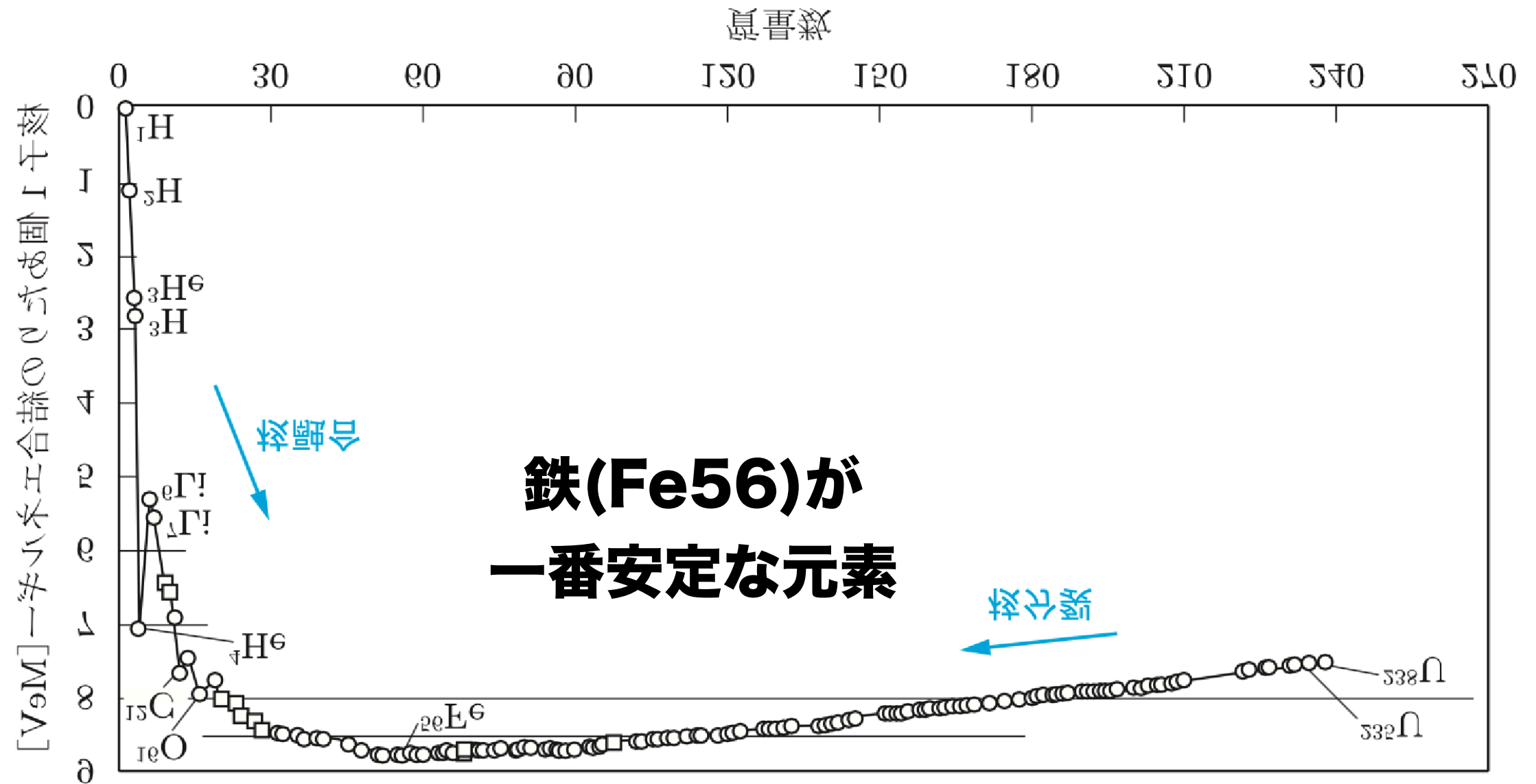
↑
↑
結合エネルギー (大)

→ → 質量数 (大)

結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

結合エネルギー (大)



The Convection Zone

Energy continues to move toward the surface through convection currents of heated and cooled gas in the convection zone.

The Corona

The ionized elements within the corona glow in the x-ray and extreme ultraviolet wavelengths. NASA instruments can image the Sun's corona at these higher energies since the photosphere is quite dim in these wavelengths.

The Radiative Zone

Energy moves slowly outward—taking more than 170,000 years to radiate through the layer of the Sun known as the radiative zone.

Sun's Core

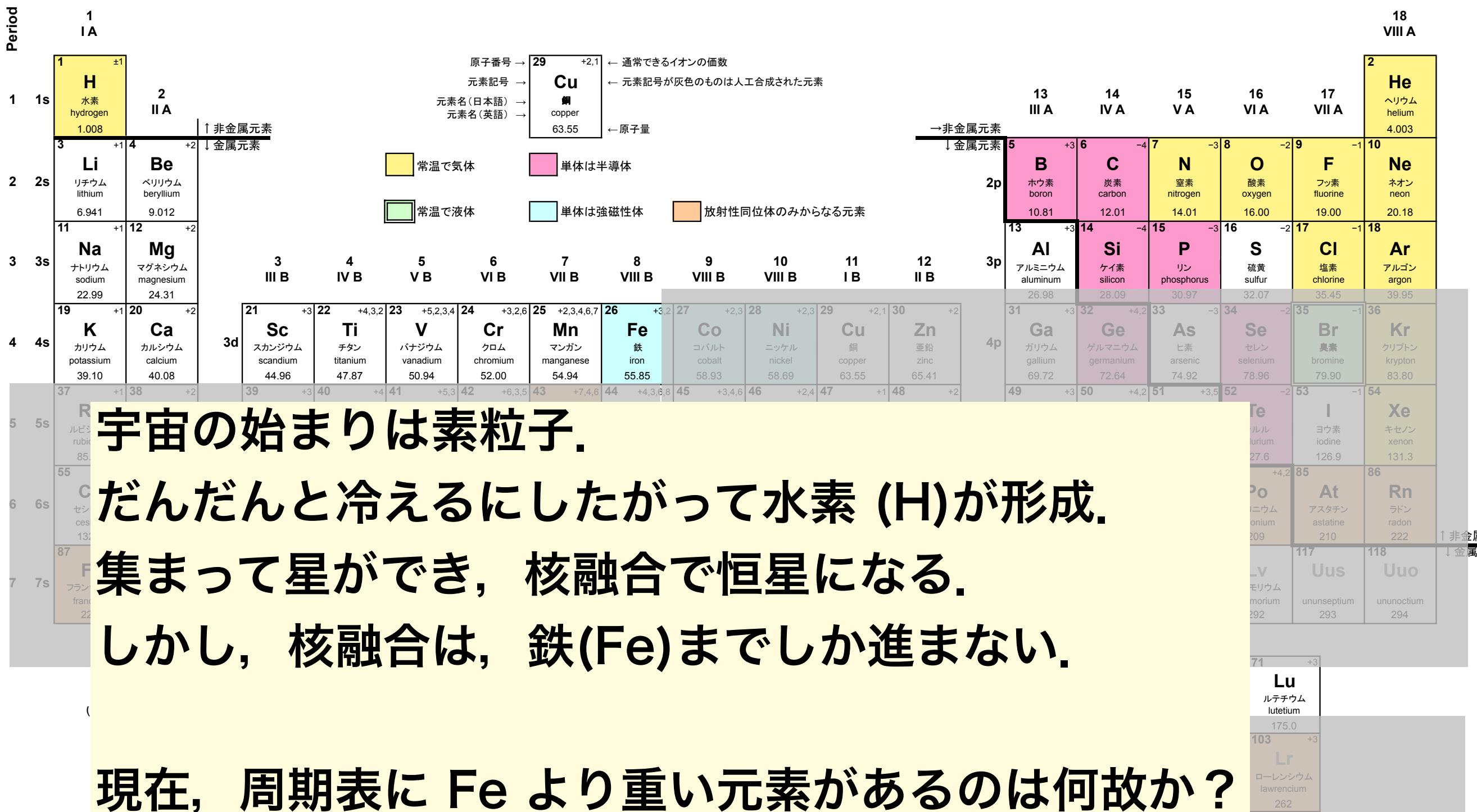
Energy is generated by thermonuclear reactions creating extreme temperatures deep within the Sun's core.

Coronal Streamers

The outward-flowing plasma of the corona is shaped by magnetic field lines into tapered forms called coronal streamers, which extend millions of miles into space.

The Chromosphere

The relatively thin layer of the Sun called the chromosphere is sculpted by magnetic field lines that restrain the electrically charged solar plasma. Occasionally larger plasma features—called prominences—form and extend far into the very tenuous and hot corona, sometimes ejecting material away from the Sun.



超新星爆発で作られた！

中性子星連星合体で作られた！

本日の内容

1. 重力波とは

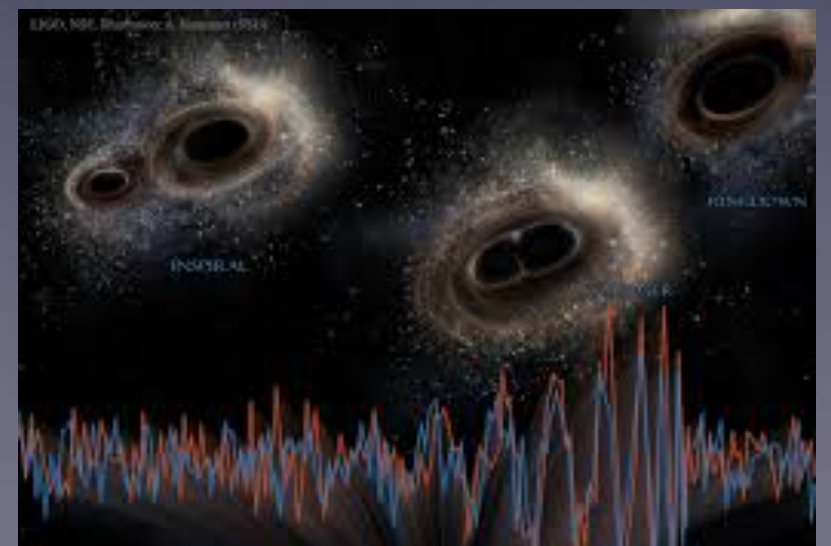
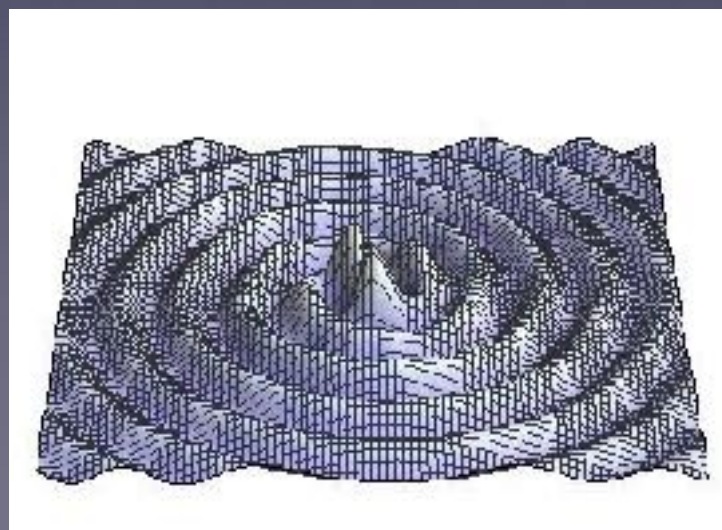
Einsteinが残した100年越しの宿題
重力波の発見まで

2. 直接観測された重力波

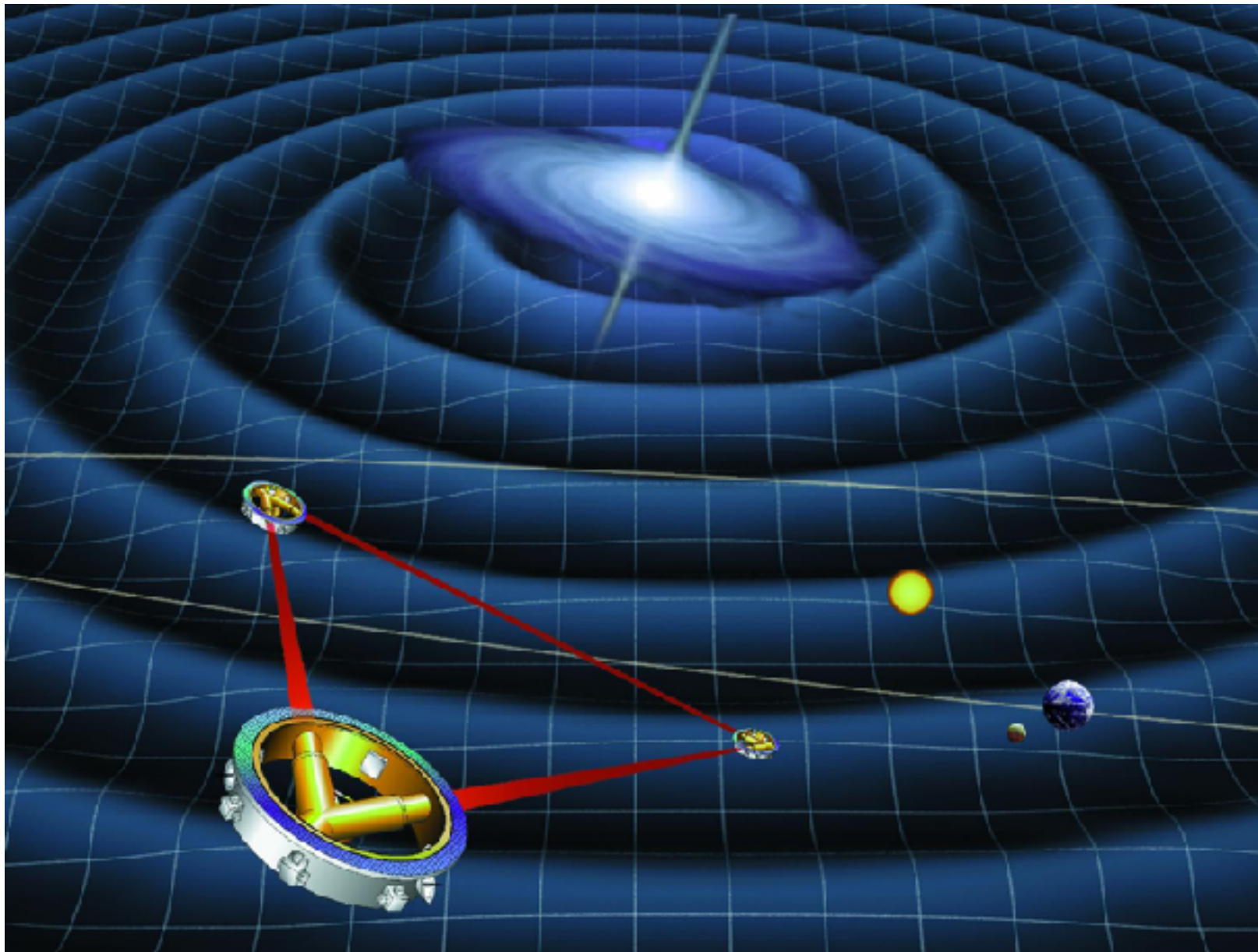
レーザー干渉計のしくみ
LIGOグループが発見した5つの重力波イベント

3. 重力波観測の将来

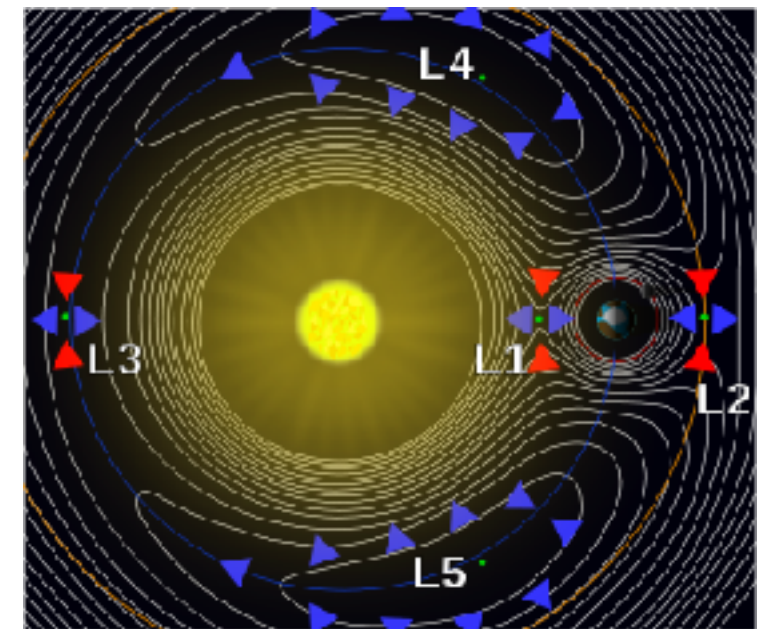
宇宙空間での重力波観測
重力波観測から何がわかるか



Laser Interferometer Space Antenna

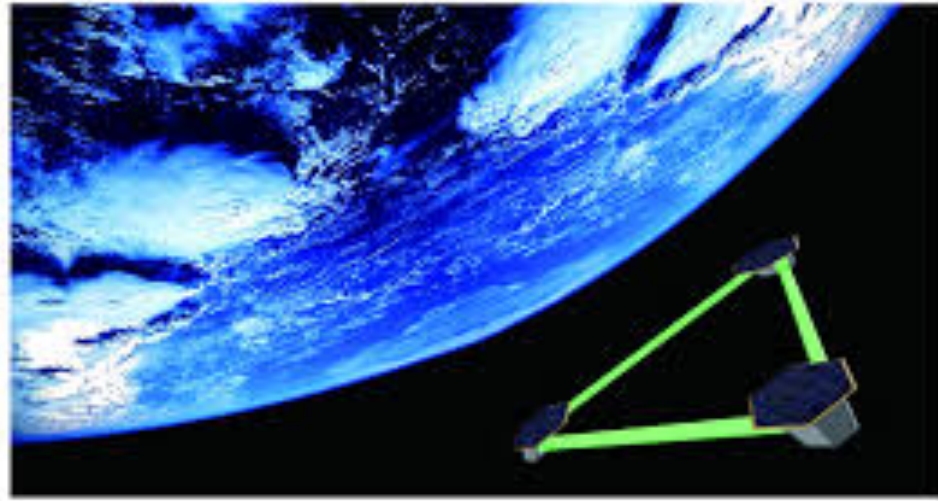


2034年に打ち上げ予定
250万kmの腕の長さ
地球の公転軌道のL4
低周波数帯（mHzからHz帯）



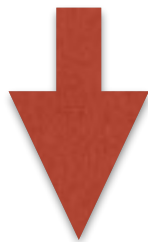
重力波宇宙干渉計DECIGO（ディサイゴ）

Deci-hertz Interferometer Gravitational wave Observatory



1000kmの腕の長さ
低周波数帯（decihzからHz帯）

宇宙全体スケールで
巨大ブラックホール連星合体の
重力波が検出できる

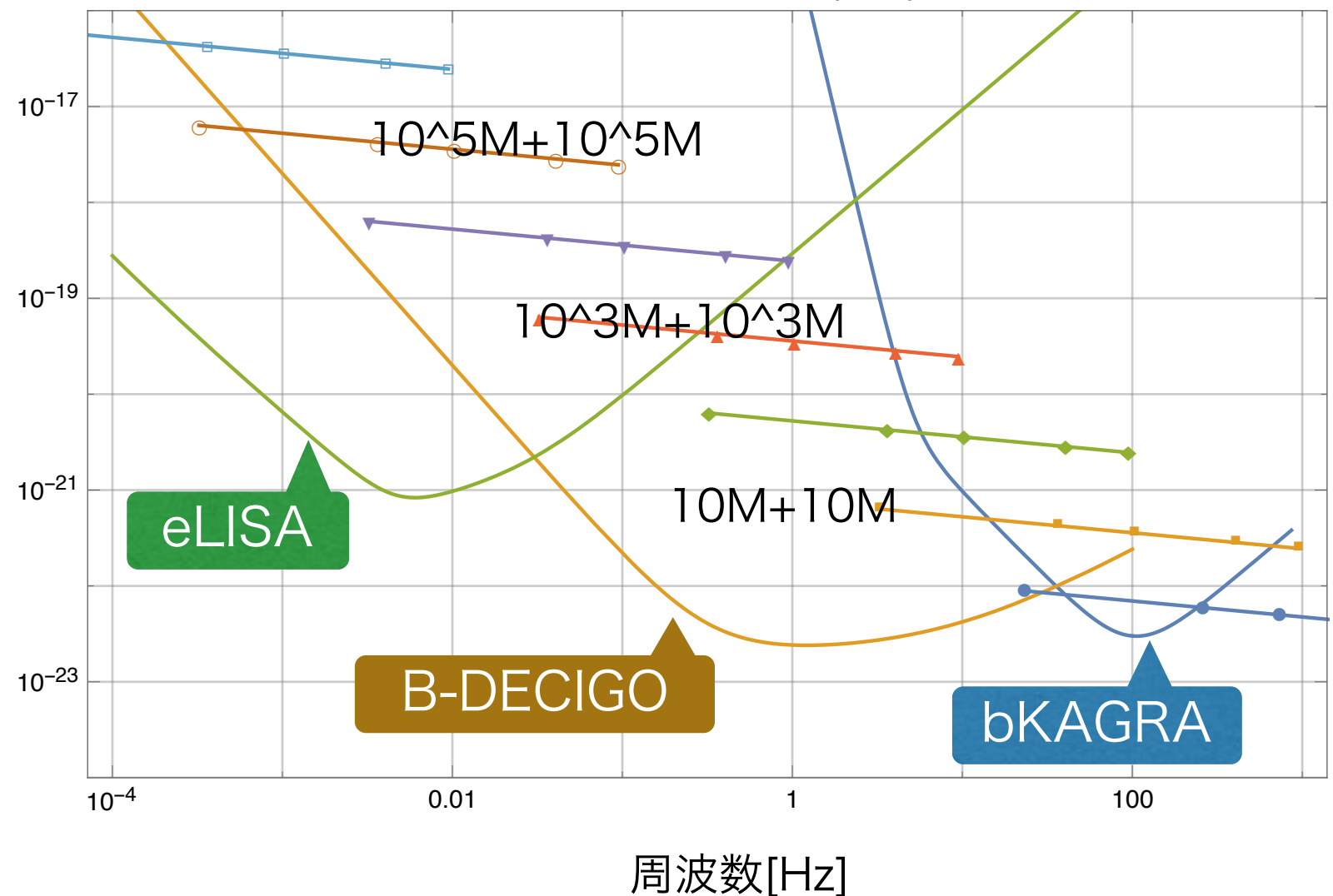


銀河中心の超巨大ブラックホール
形成過程がわかる

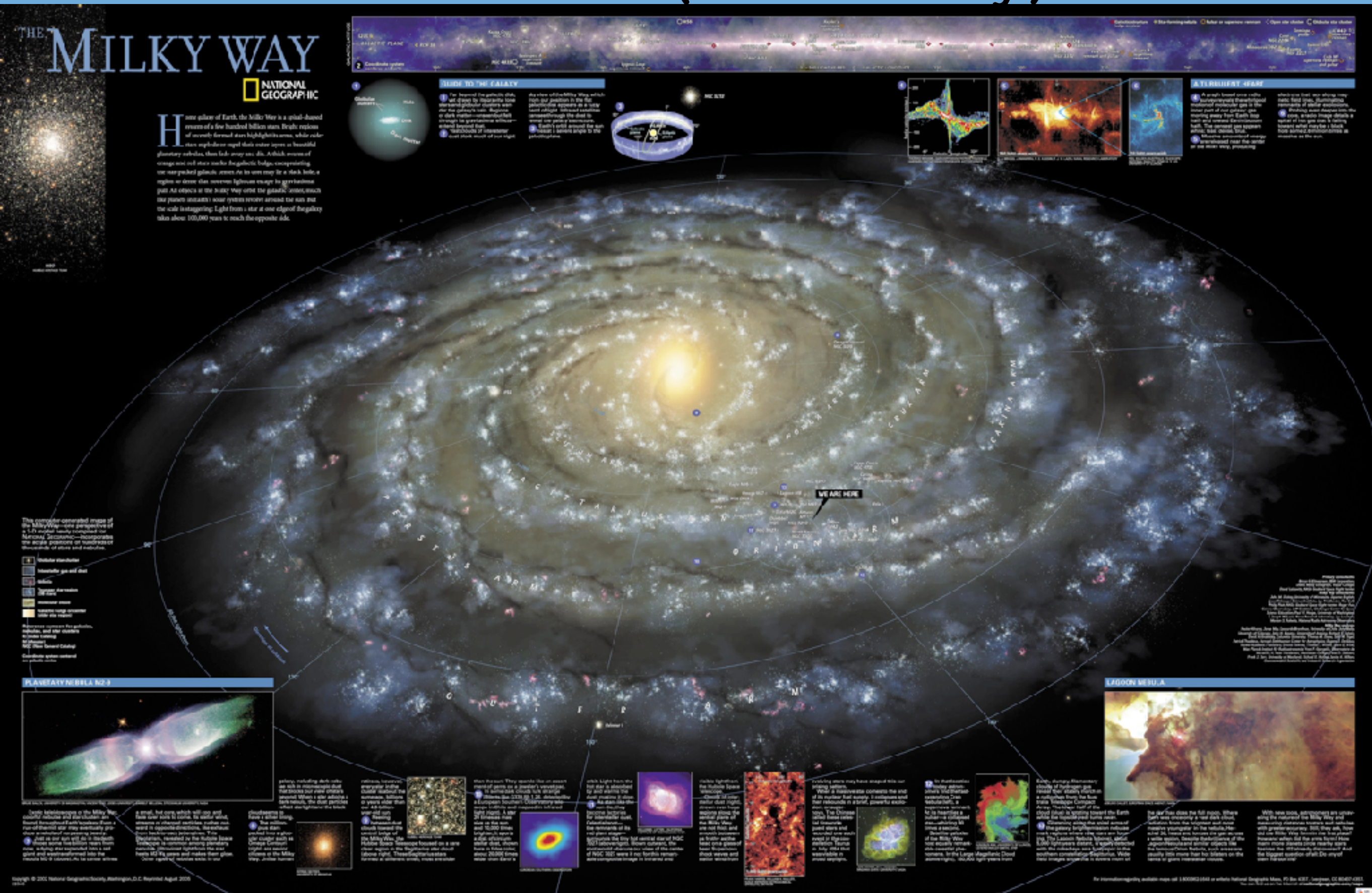
宇宙の膨張速度がわかる

重力波の検出感度

Characteristic Strain – frequency



天の川銀河 (our Galaxy)



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

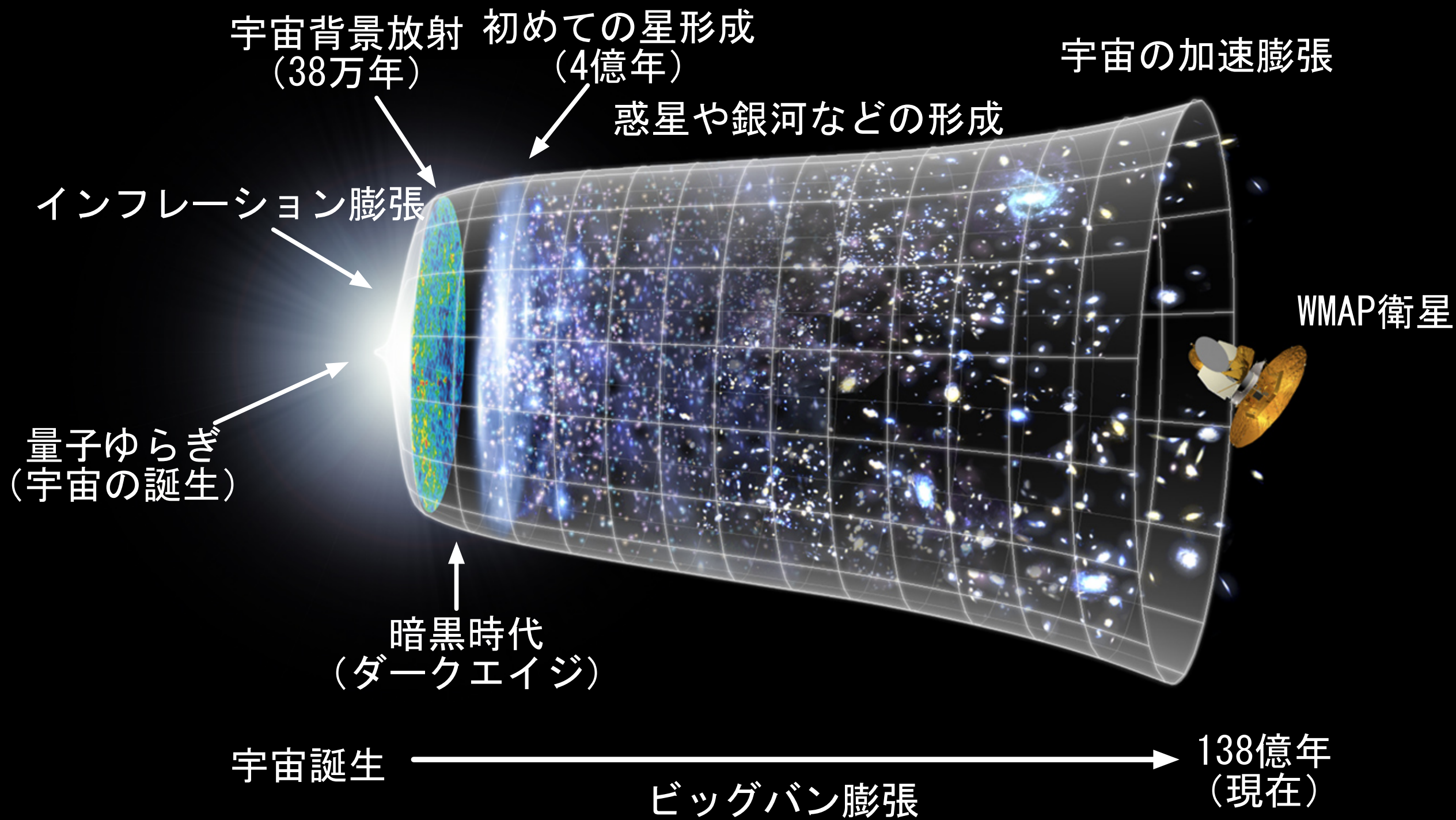
→ 原子核の状態方程式

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

ブレーンワールド型 タイムマシン1

～膜宇宙に生じる近道～

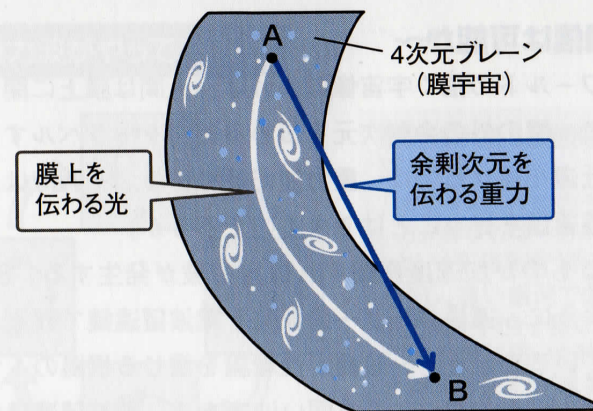
ブレーンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

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、重力波が伝わることも可能だ。

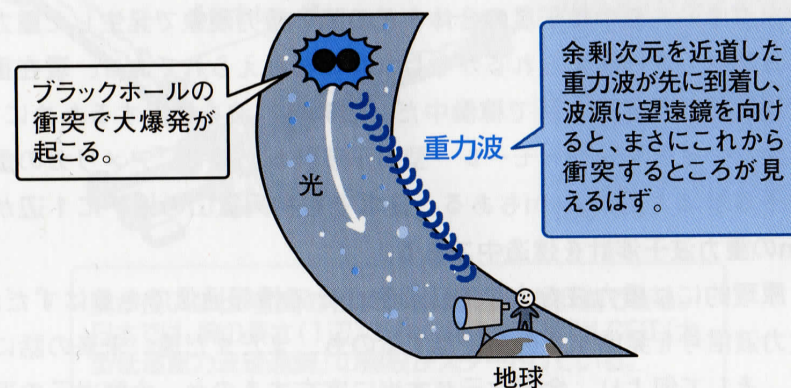
バン宇宙モデルの問題点の1つが解決できる可能性が指摘された。重力波信号によって、情報が伝えられるかもしれない。

余剰次元を通して近道をする



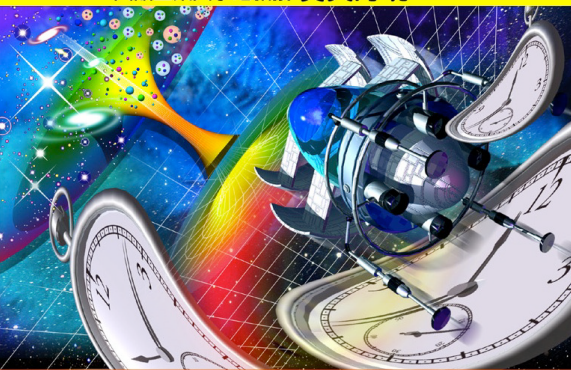
重力は余剰次元をすることで、膜上を通る光よりも速く伝わることができる。

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 真見寿明 = 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!

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

														
	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波							
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波		
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4			
波長[nm]				380	770									
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4		
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話 電子レンジ	テレビ FMラジオ	短波ラジオ	AMラジオ	電波時計 飛行機の通信			

ガンマ線

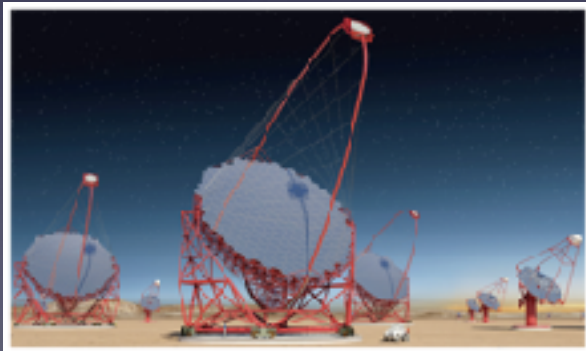
X線

可視光

赤外

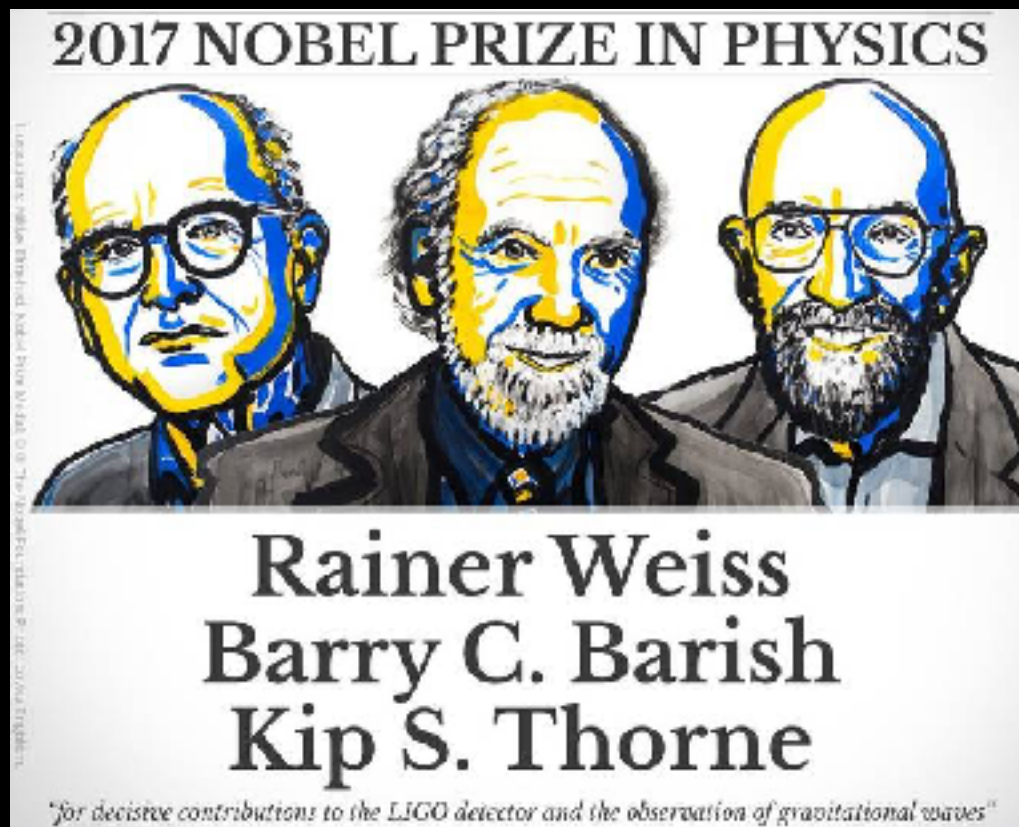
電波

重力波



重力波天文学
はじめました。



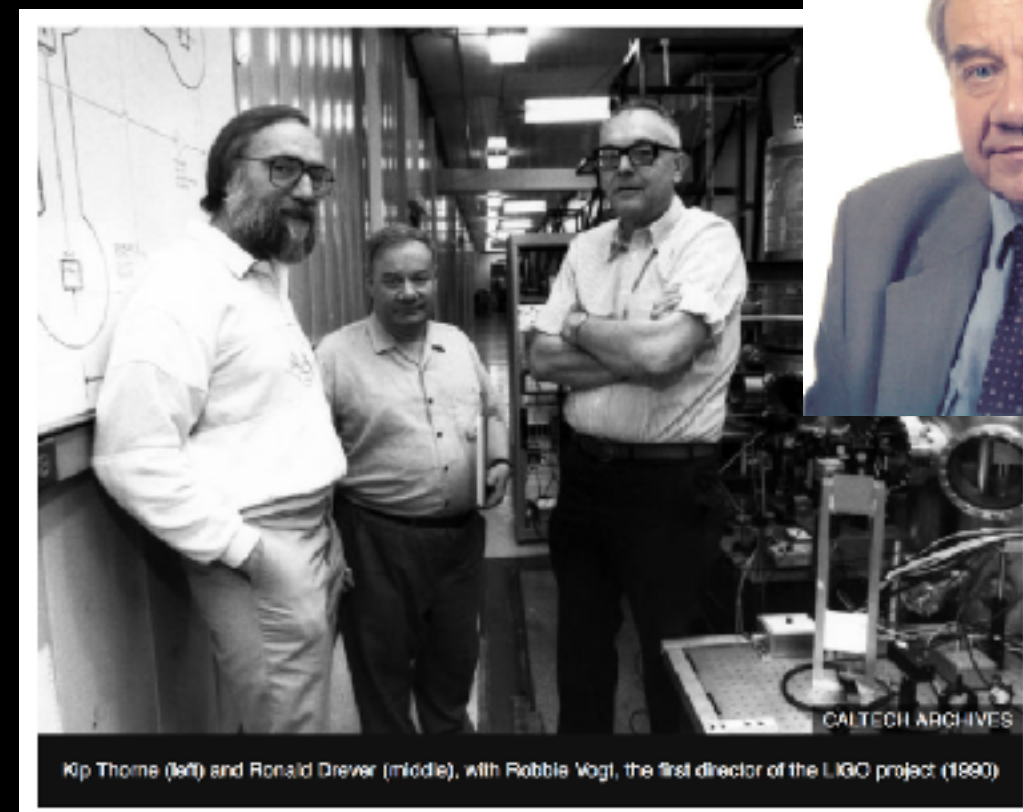


ライナー・ワイス(85)

バリー・バリッシュ(77)

キップ・ソーン(77)

干渉計設計
グループ組織
理論



Ronald Drever (1932–2017)

ロナルド・ドレーバー

プロトタイプ実験

Drever, Weiss, Thorne の3名は, 以下のものを同時授賞されている

Special Breakthrough Prize in Fundamental Physics (2016)

Gruber Prize in Cosmology (2016)

Shaw Prize (2016)

Kavli Prize (2016)