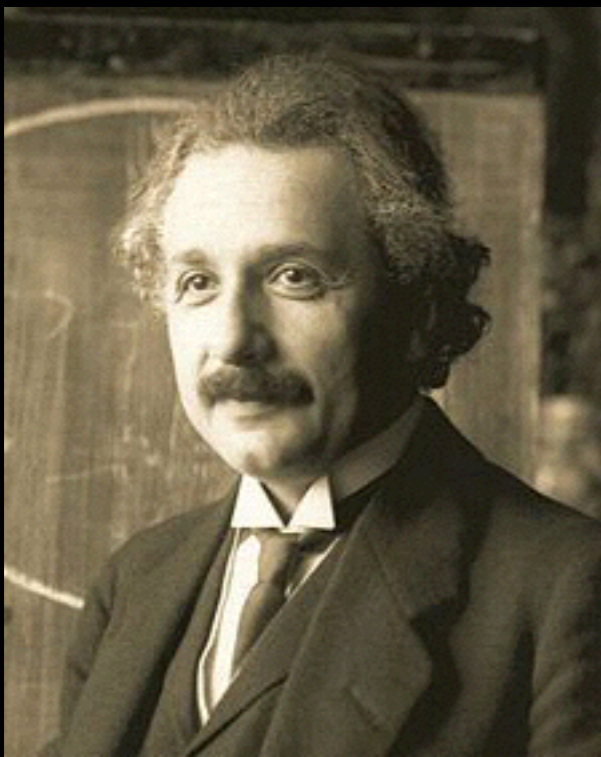


アインシュタインが予言して100年  
ついにとらえた  
重力波とブラックホール



真貝寿明 (大阪工業大学)

しんかい ひさあき



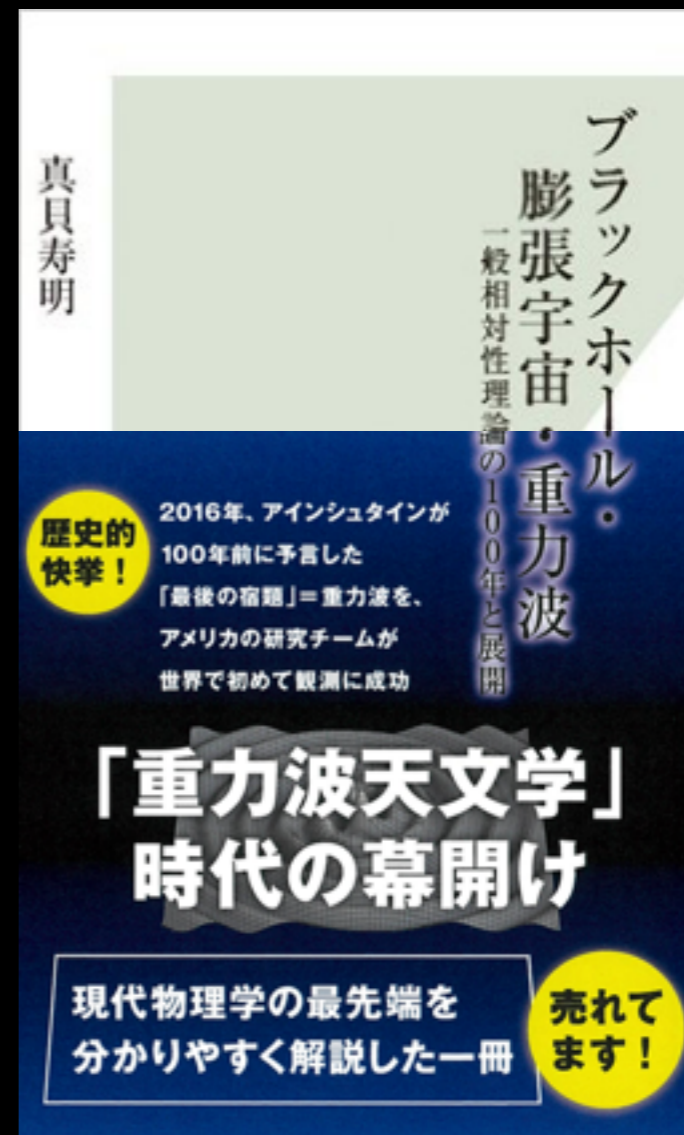
2016/7/10 大阪科学館



2011年2月刊



2015年10月刊



『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』

光文社新書  
2015年9月刊



2016年7月11日発売

アインシュタインが予言して100年

ついにとらえた

# 重力波とブラックホール

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？



by Frits Ahlefeldt

<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

# 重力の正体は？



by Frits Ahlefeldt

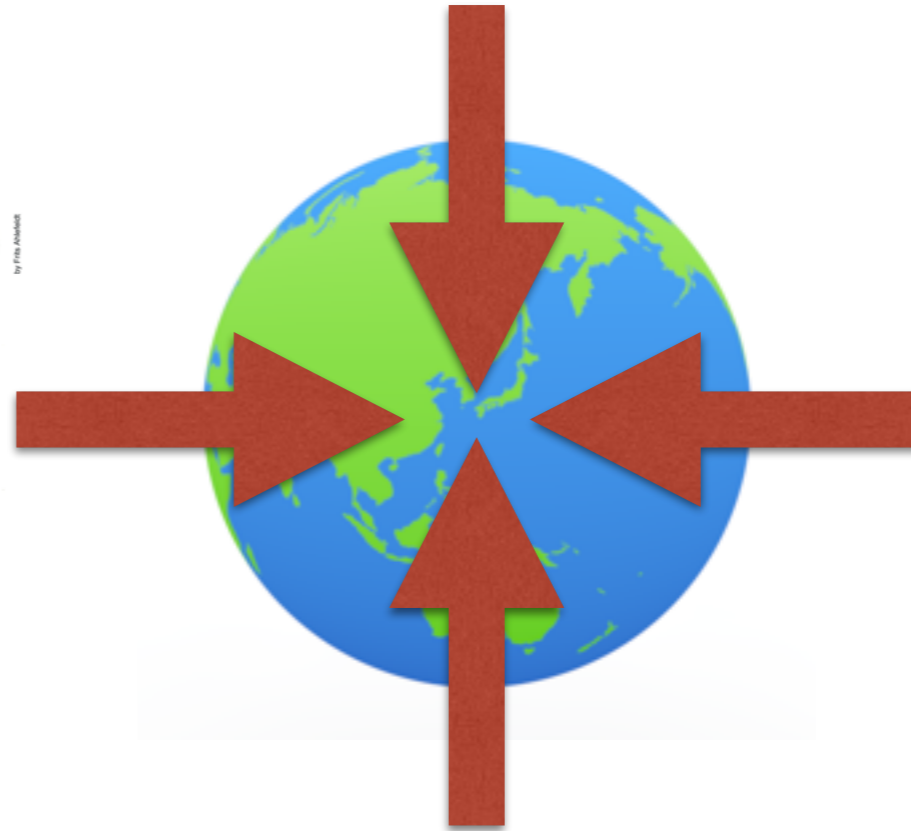
<http://hikingartist.com/>



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

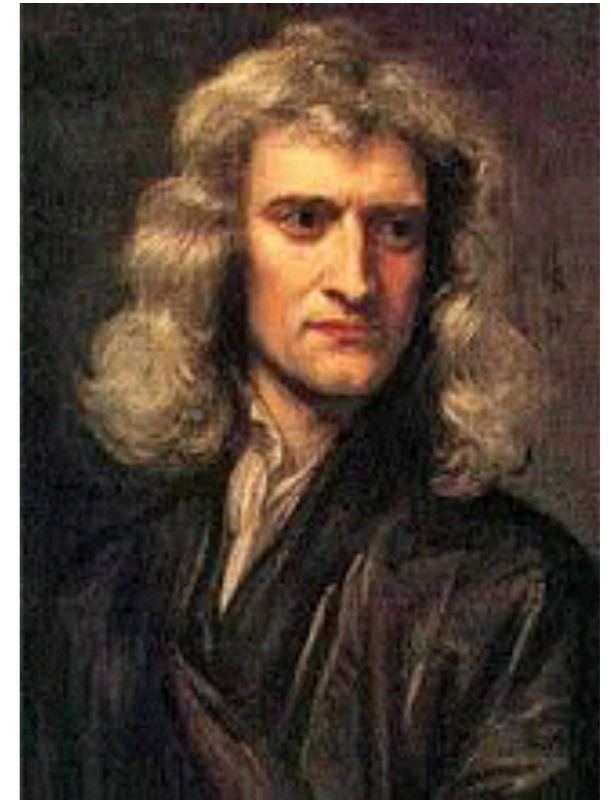
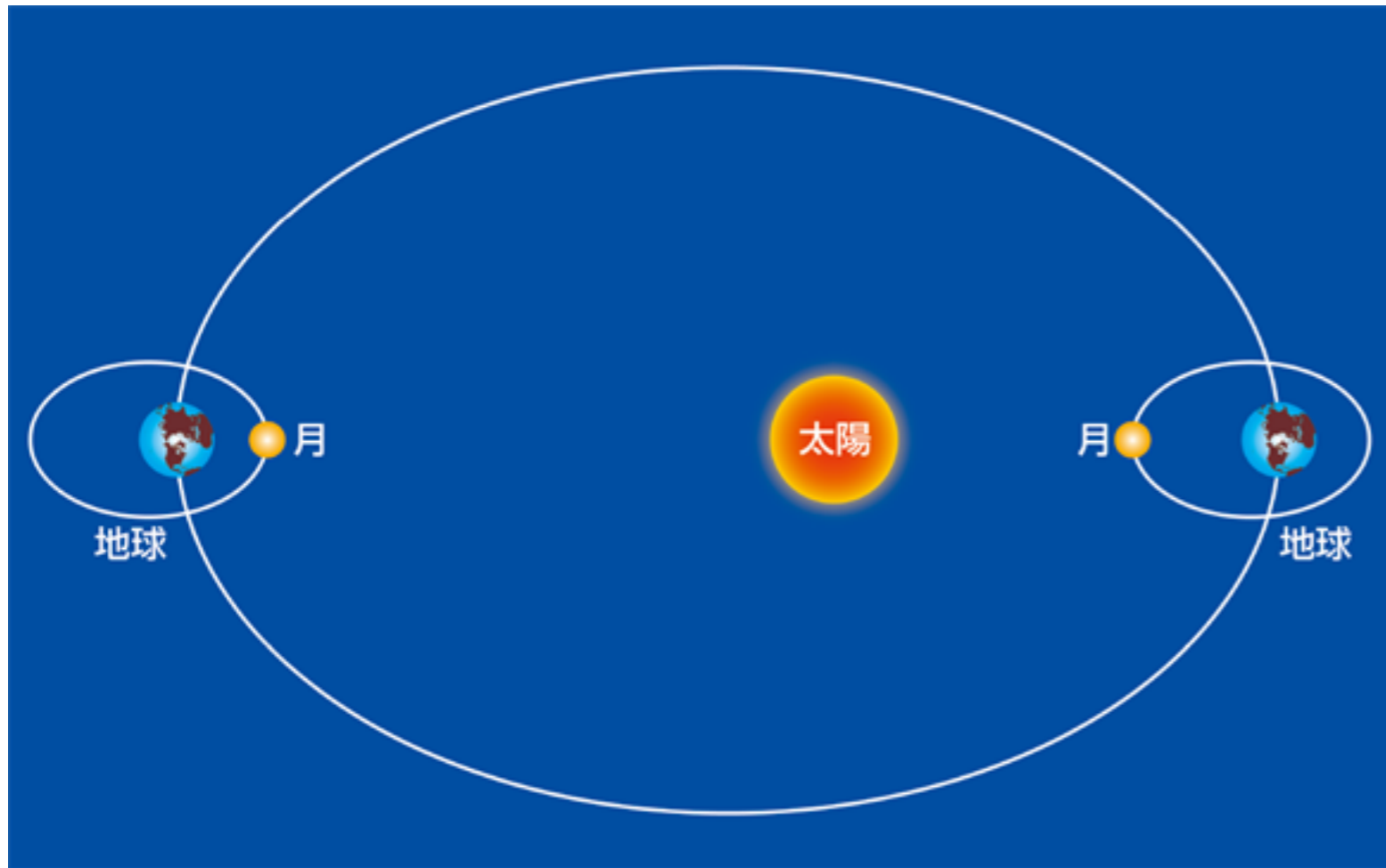


by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt

# 重力の正体は？



ニュートン

**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)

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

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

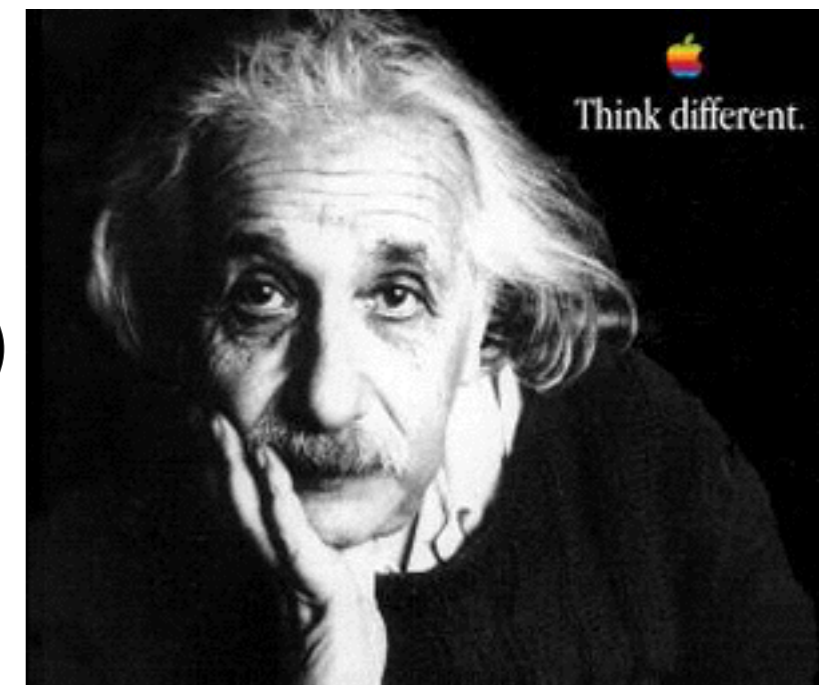
「時空のゆがみだ」

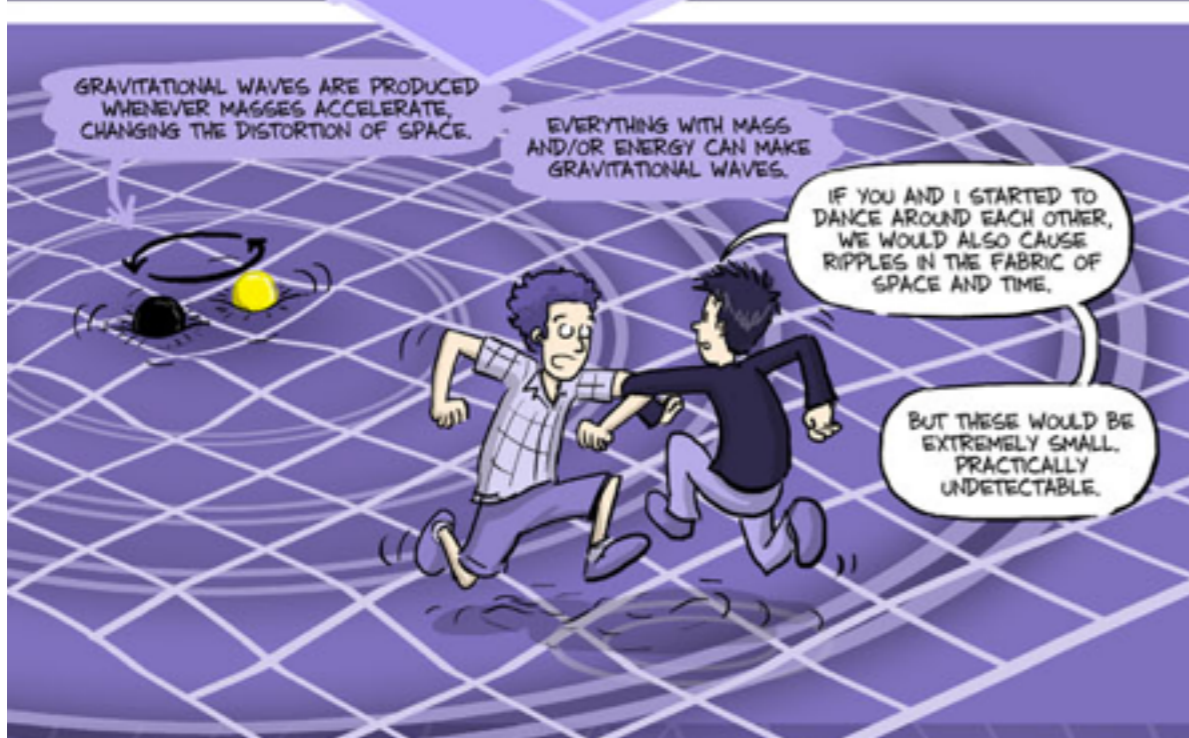
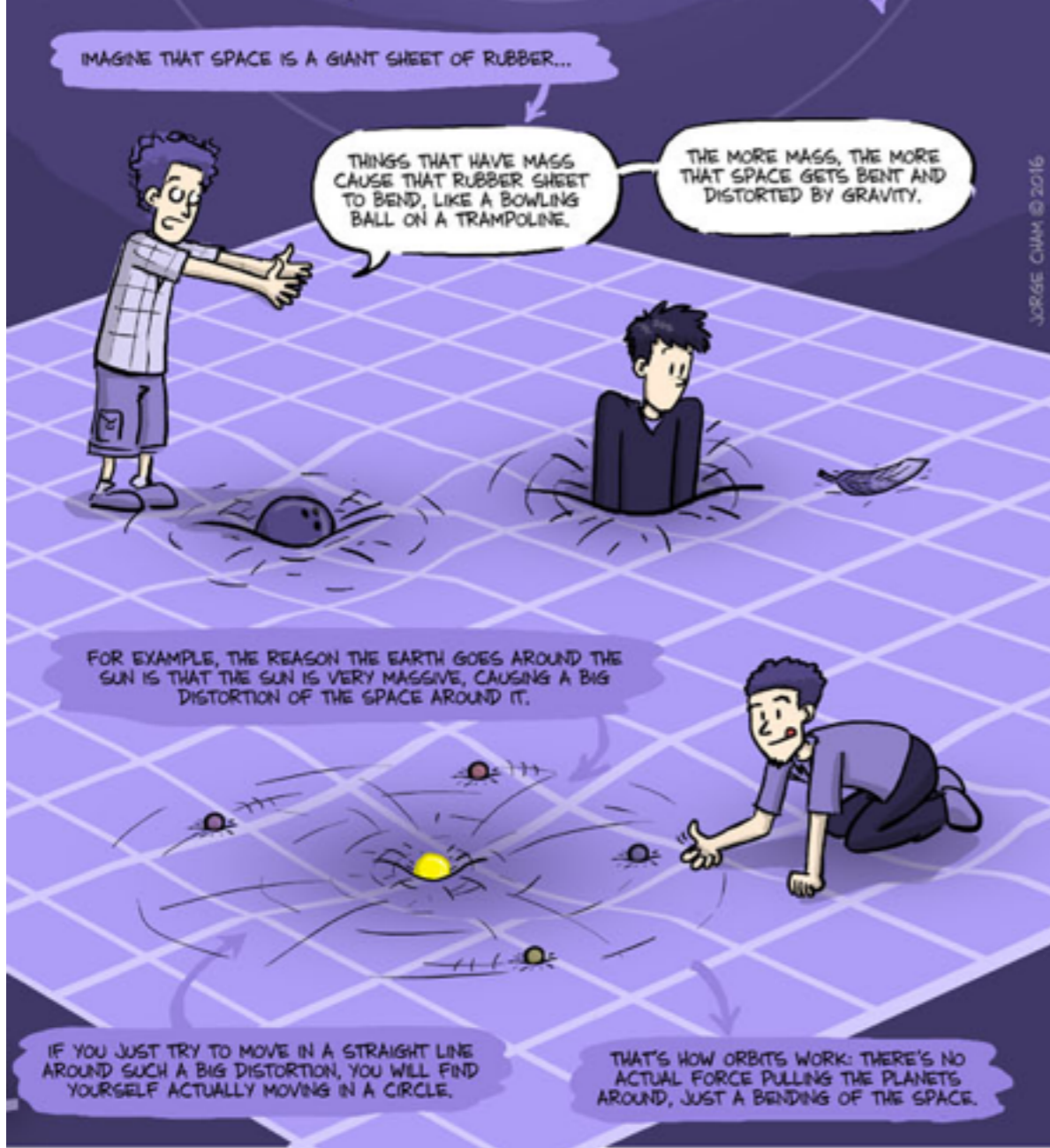
(アインシュタイン, 1915)

一般相対性理論

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

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

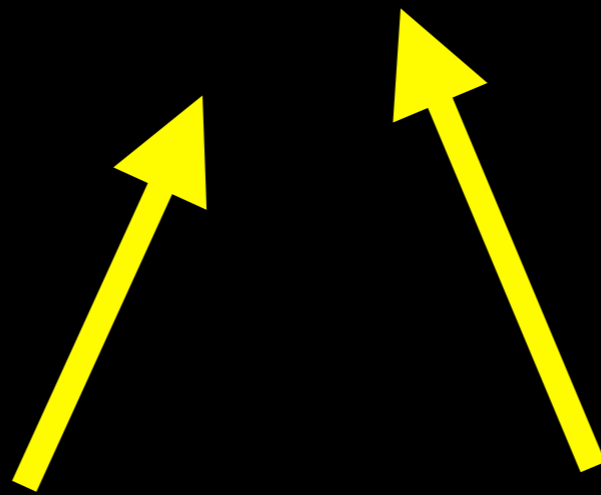






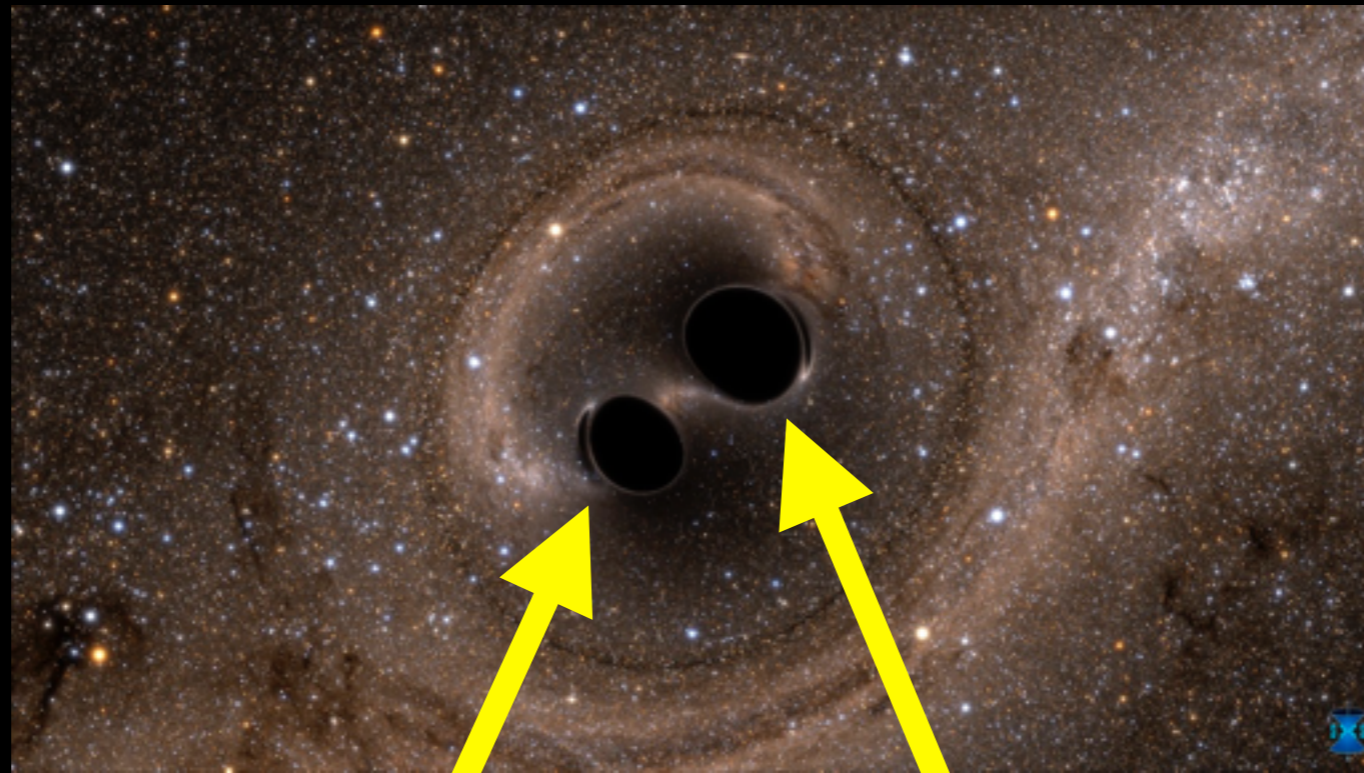
# ブラックホール

= 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



# 夏の星座

はくちょう座



こと座



へびつかい座



さそり座

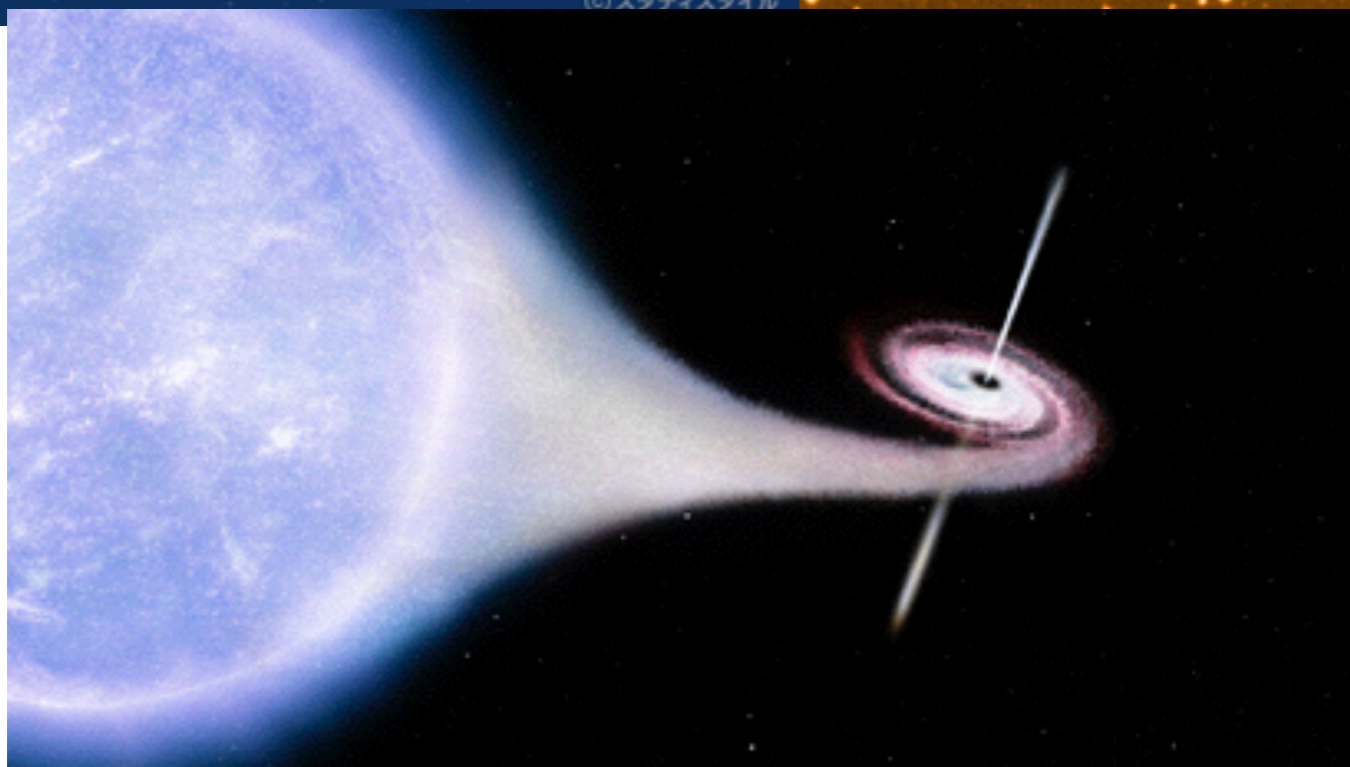
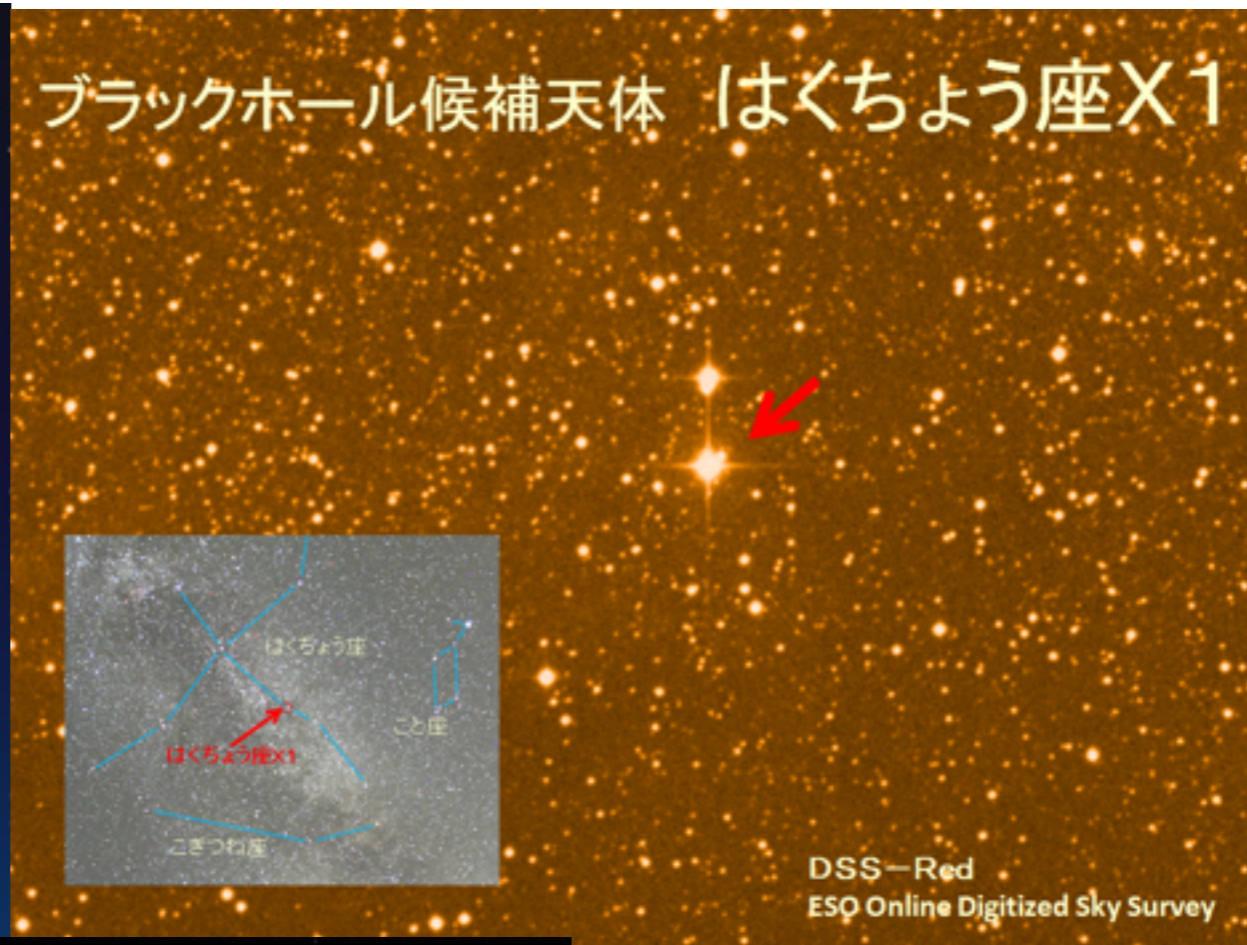
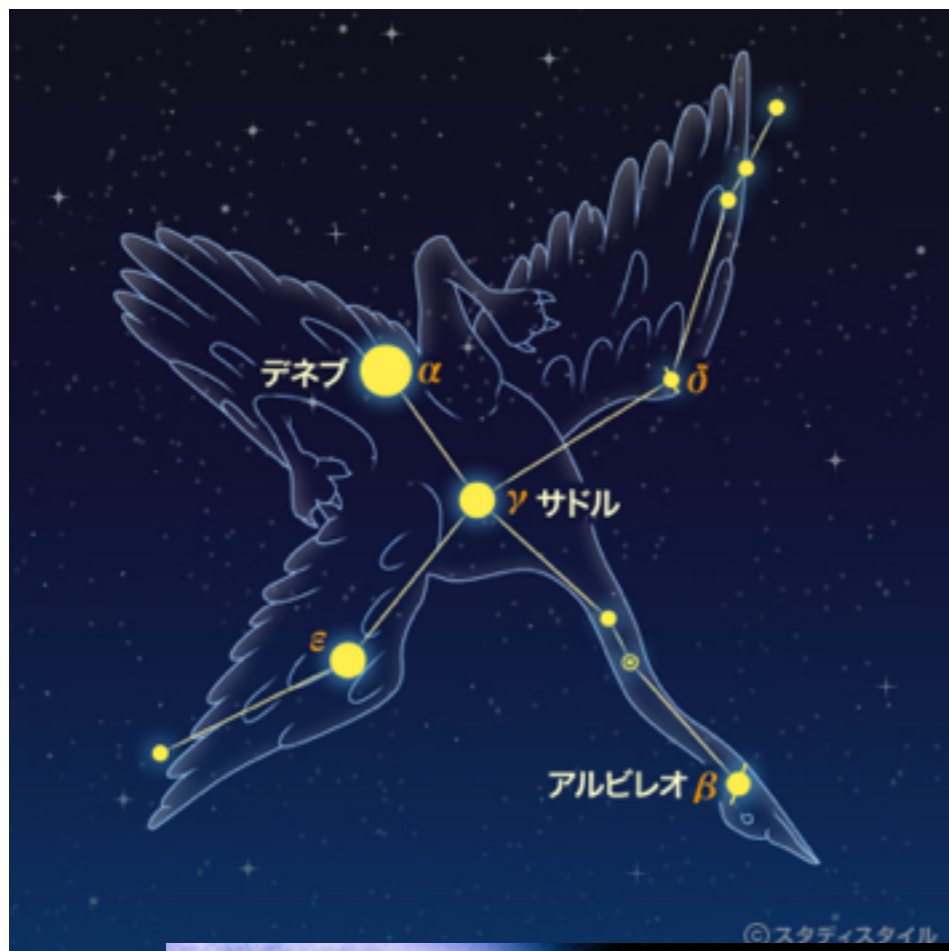


わし座

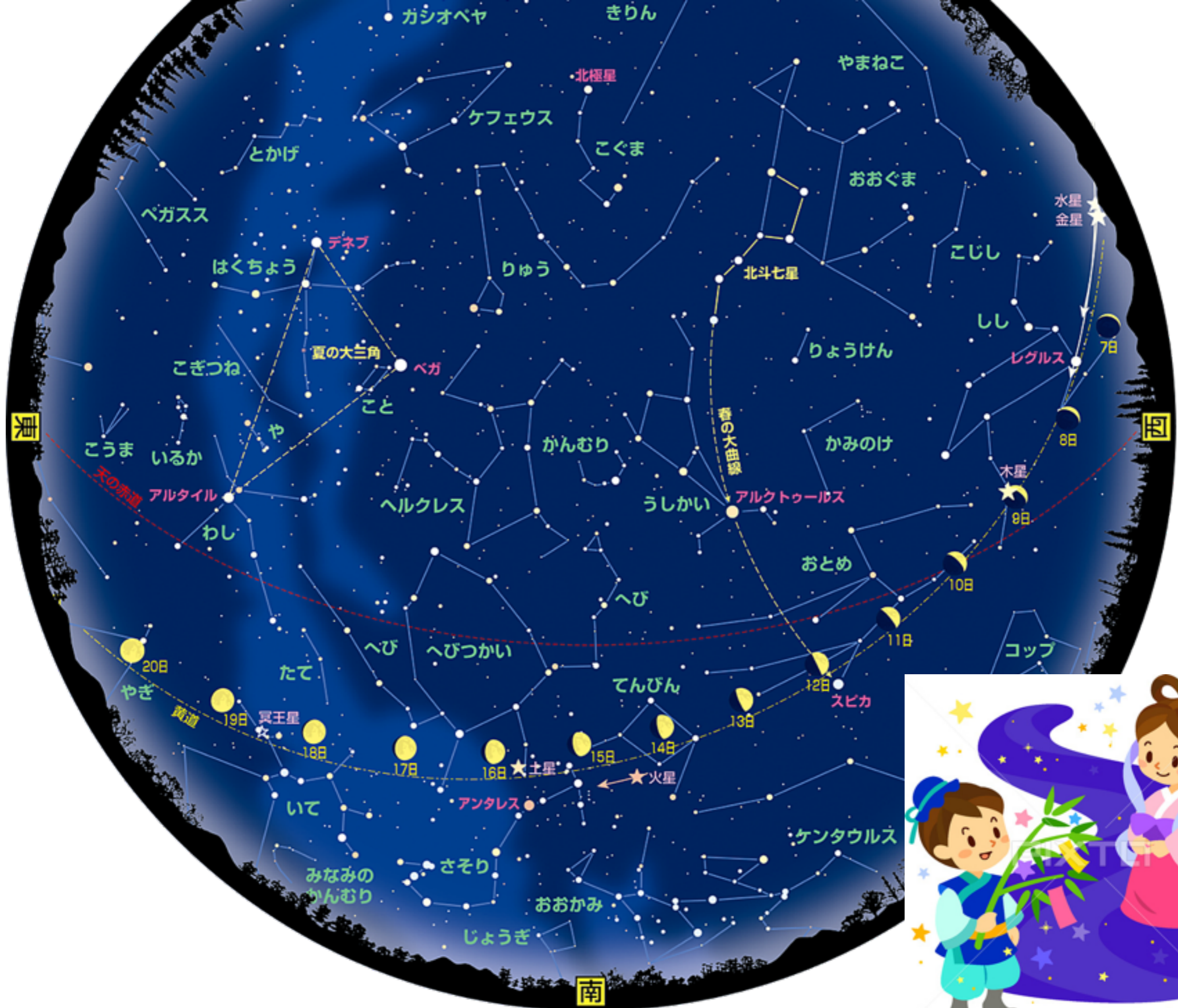
いて座



# はくちょう座 X-1



見えないけれど、  
ブラックホールが  
あるにちがいない！



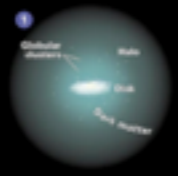
pixta.jp - 1293915

# 天の川銀河 (our Galaxy)

## THE MILKY WAY

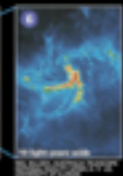
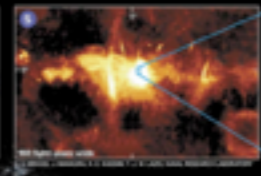
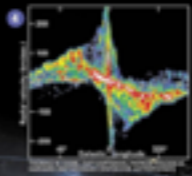
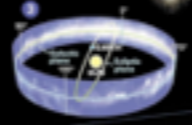


**H**ow far from Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars explode or shed their outer layers as beautiful planetary nebulae, then fade away and die. A thick swarm of orange and red stars marks the galactic bulge, encapsulating the star-packed galactic center. At its core may lie 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.



**GUIDE TO THE GALAXY**

- For beyond the galactic disk, yet drawn by its gravity, some stars and planetary nebulae roam the galaxy halo. Regions of dark matter—regions that fall through by gravitational effects—stretch beyond that.
- Millions of interstellar dust clouds drift through the galaxy.
- Our view of the Milky Way, which from our position in the flat galactic disk, resembles a flat, glowing ring, is a 3D view of the galaxy. To see the galaxy from the outside, we can see through the dust to reveal the spiral arms.
- Earth's orbit around the sun lies at a severe angle to the galactic plane.



**A TURBULENT HEART**

A graph based on a radio survey reveals the intergalactic structure of interstellar dust in the inner part of our galaxy. The dust is most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant. The dust is most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

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 nebulae.

- Stellar star cluster
- Interstellar gas and dust
- Nebulae
- Star-forming region
- Stellar bulge
- Stellar bulge in center
- Galactic core



**PLANETARY NEBULA NG 5**

Earth's habitability depends on the Milky Way's stellar population and star clusters are found throughout Earth's galaxy. Stars of the red dwarf star are particularly common in the galaxy's spiral arms.

galaxy, including dark matter, is rich in interstellar dust that swirls in the spiral arms. The dust is most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

Light from the star is absorbed by the dust, which is most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.



**LAGOON NEBULA**

stars, however, are star in the galaxy. The stars are most abundant in the inner part of the galaxy, where it is most abundant.

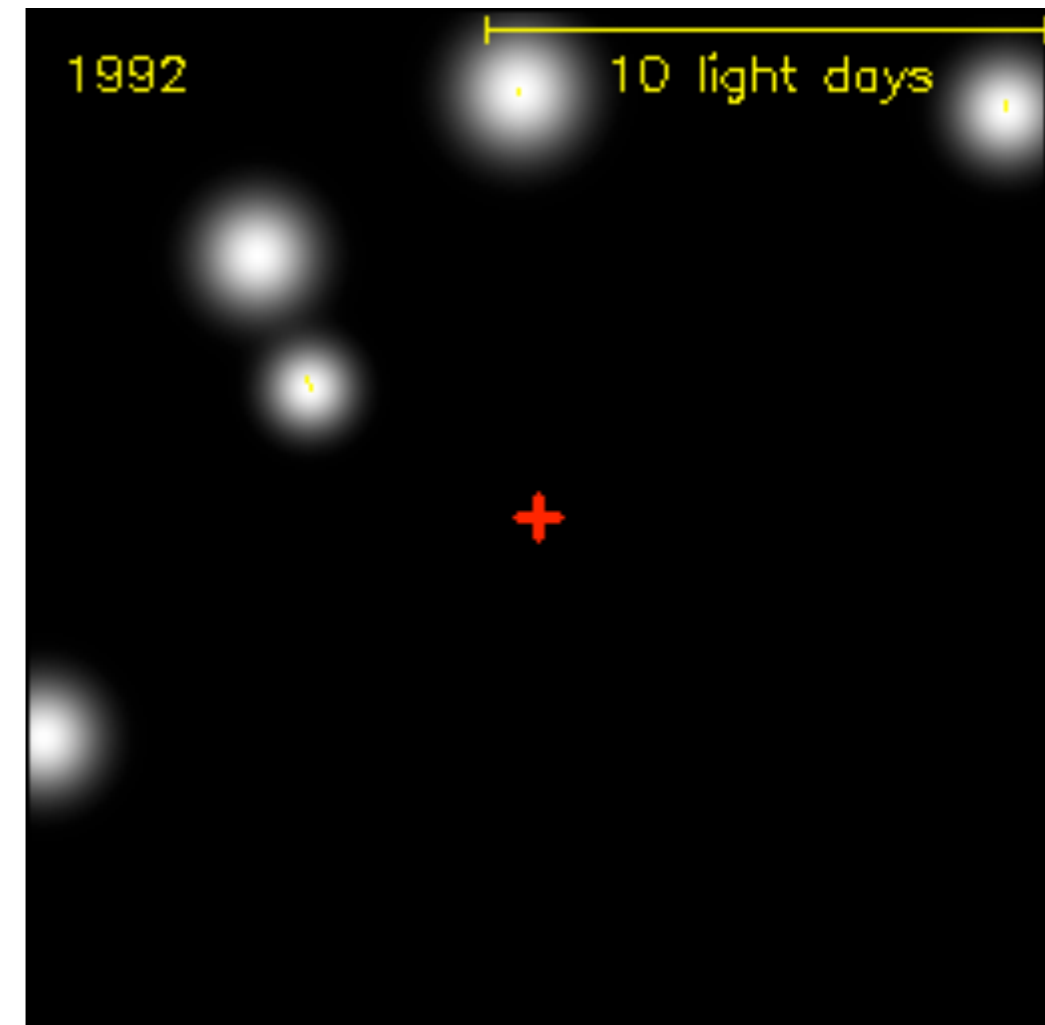
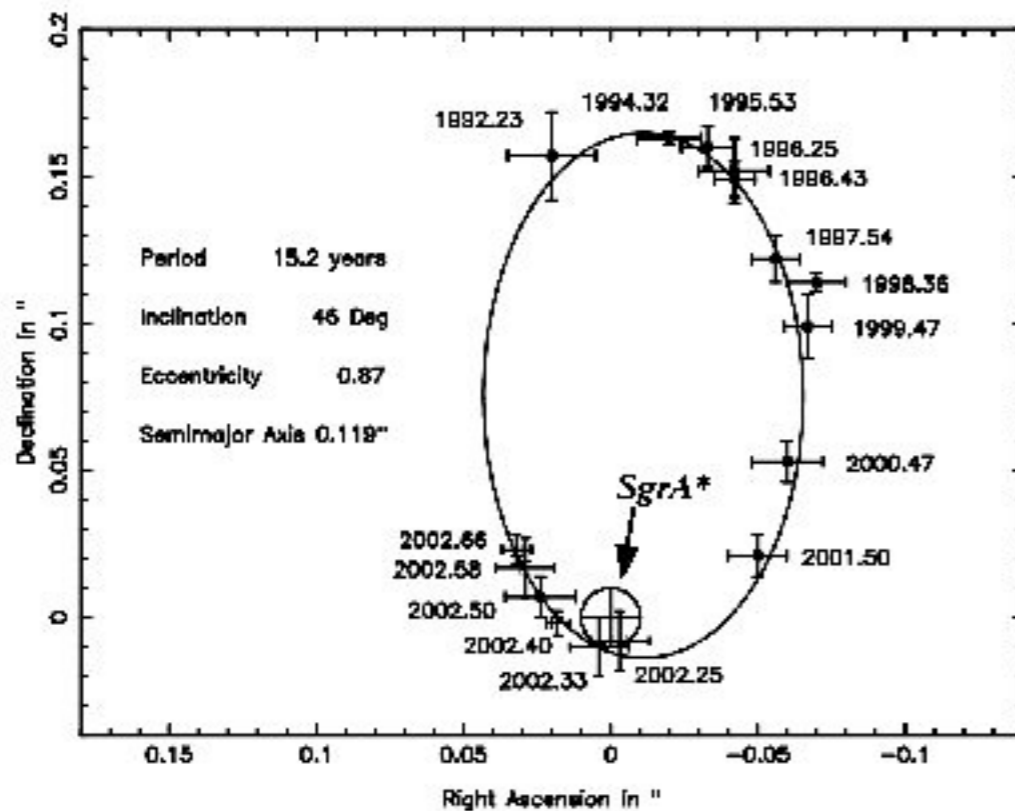
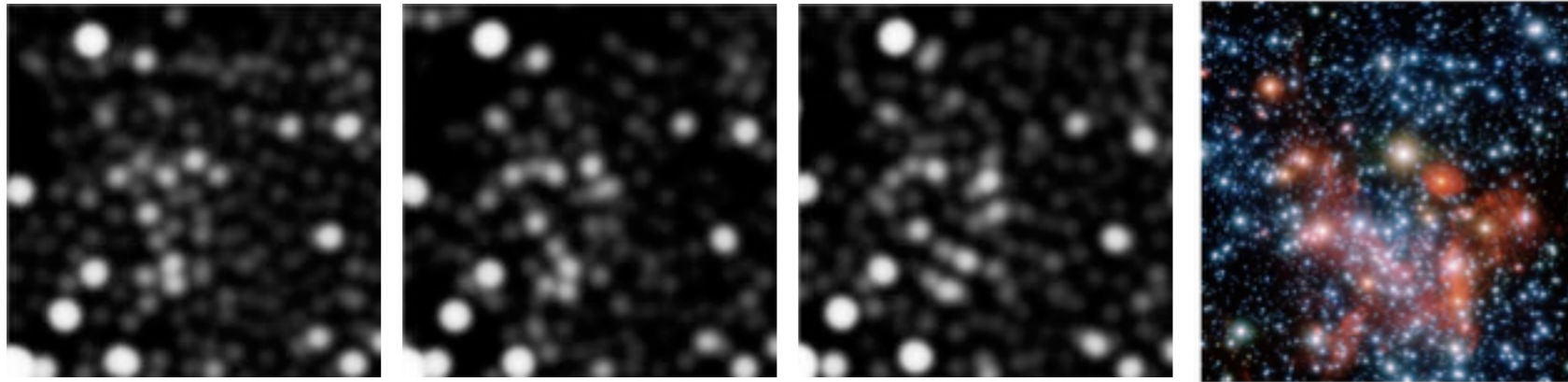
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



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



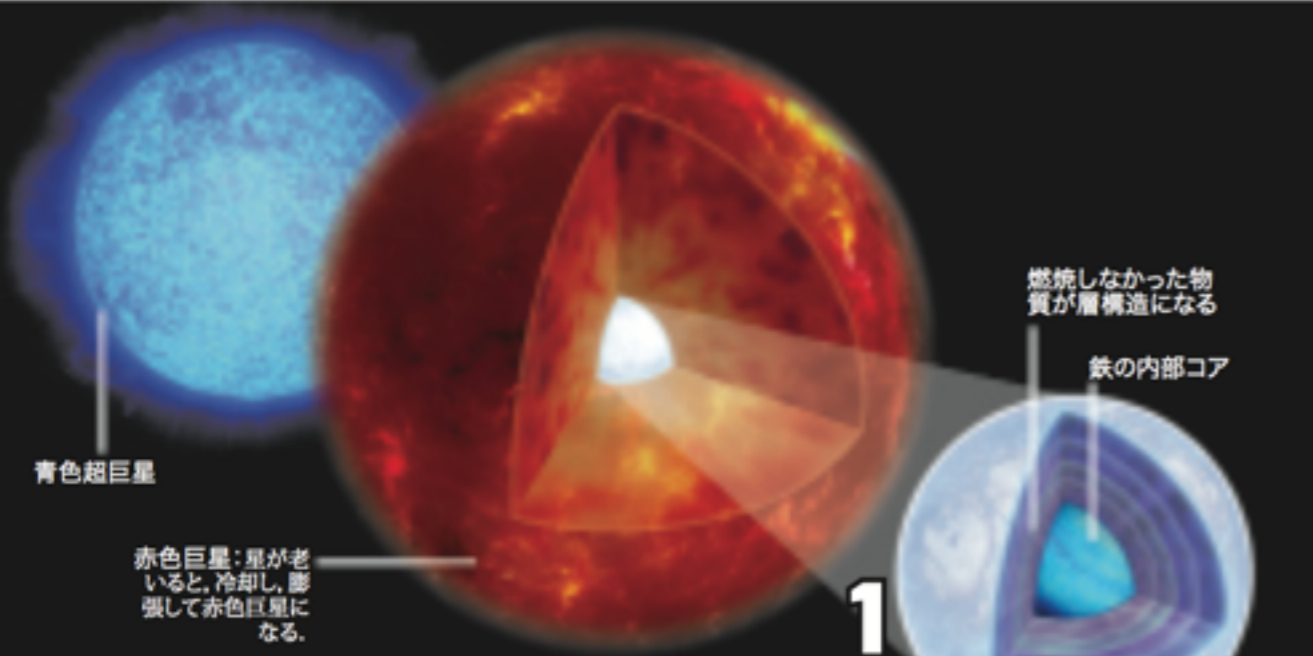
<http://www.extinctionsift.com/SignificantFindings08.htm>

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



# ダイハード：重元素を合成するまでは死ねない

鉄の核融合を発生させるには、エネルギーを解放するよりも多くのエネルギーを必要とする。ひとたび星のコアに鉄ができれば、それは死を意味する。核融合反応は終了し、星は重力の報酬を受けることになる。重元素が合成されるのは、この星の断末魔の時期である。

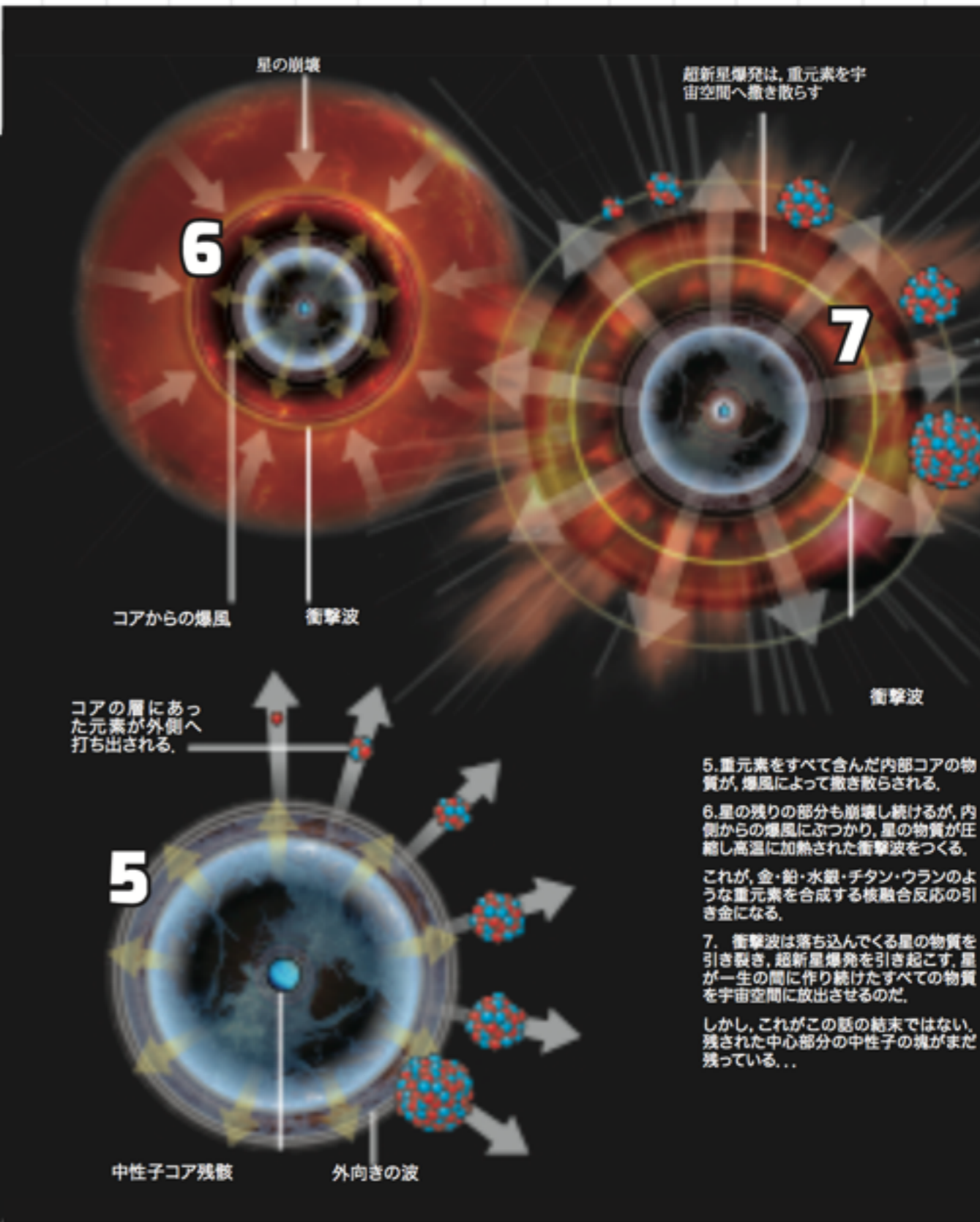
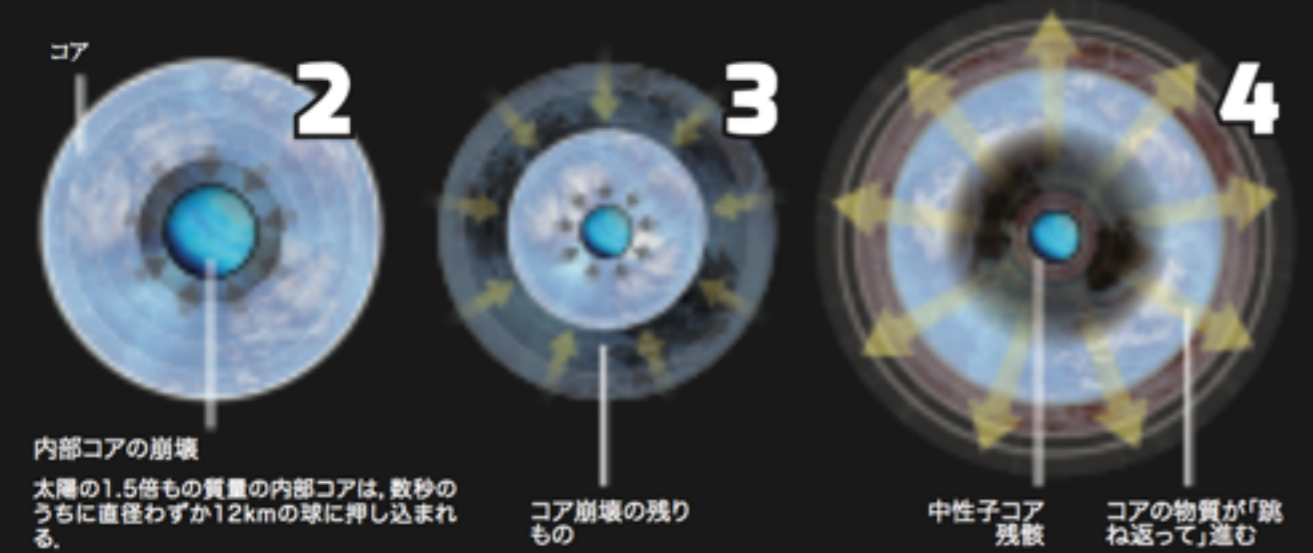


1. 鉄が合成される時点までは、星のコアは巨大なタマネギ状である。燃焼していないすべての元素が層になっている。

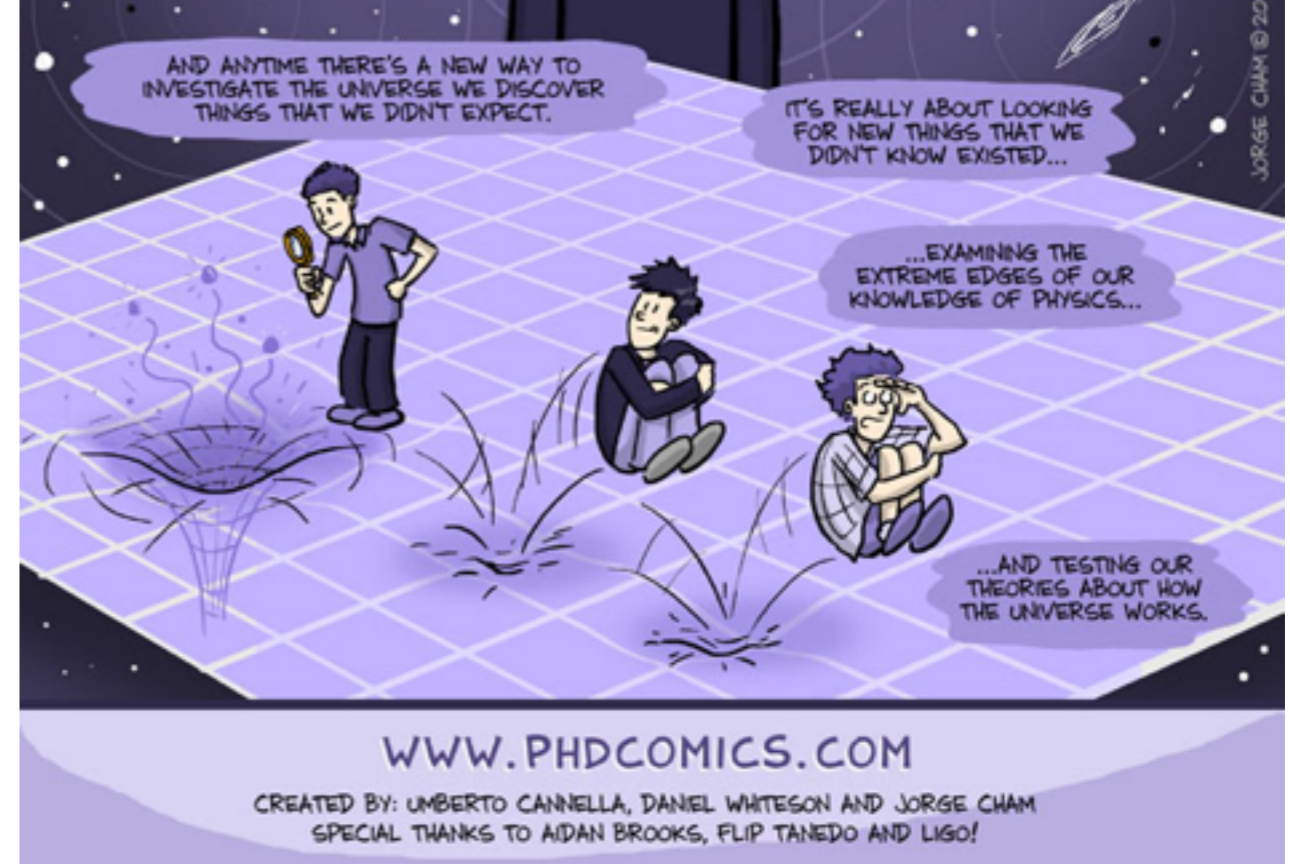
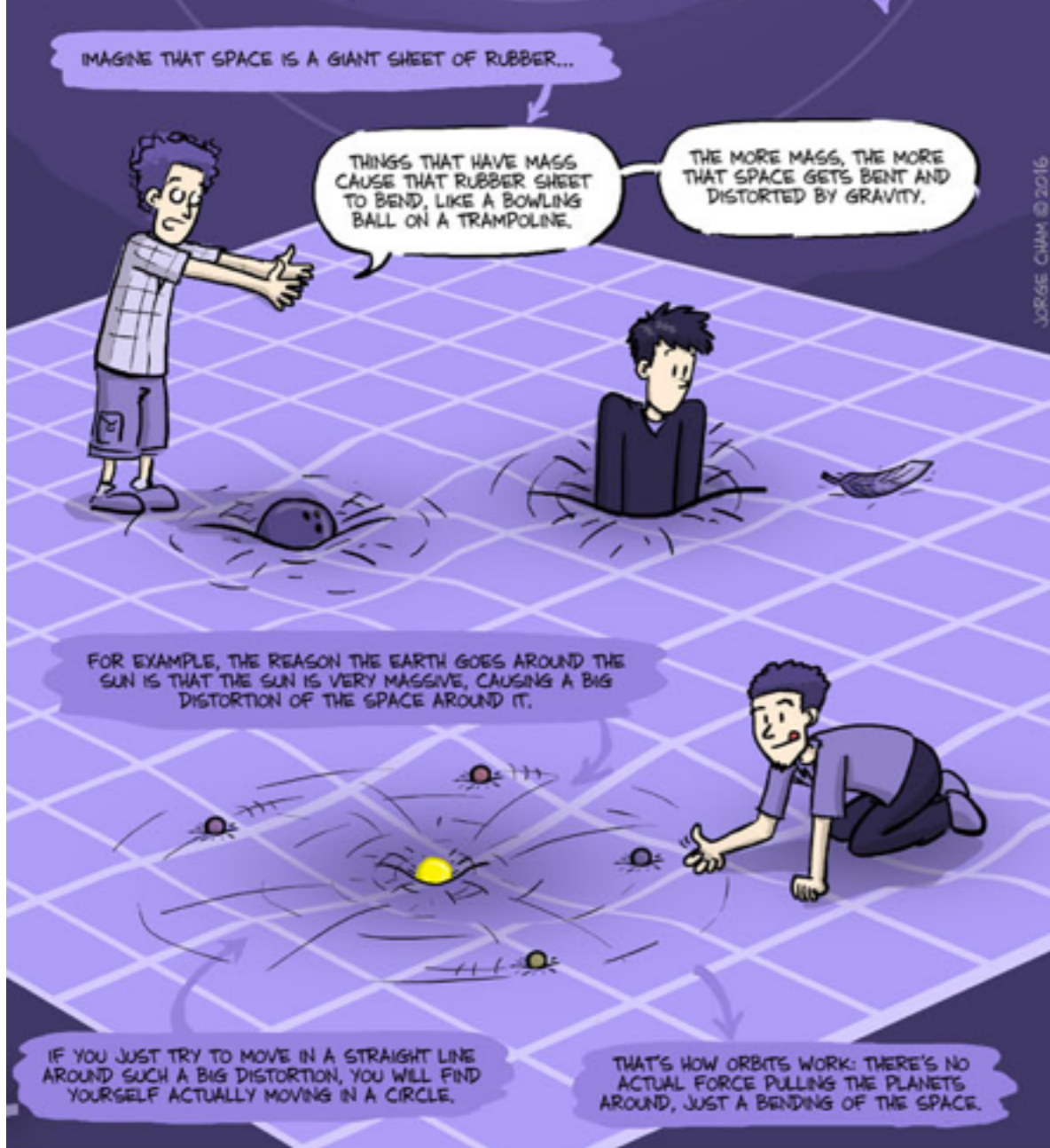
2. 鉄をさらに融合できず、核融合は終了し、鉄の内部コアは自身の重力によって激しく重力崩壊する。

3. 少し後に、コアの残りの部分も先例にならって内側へ向かって収縮をはじめ、鉄のコアはそれ以上潰れることができず、中性子の塊に変形して崩壊が一時くいとめられる。

4. 上から降り積もる物質は中性子のボールにぶつかって跳ね返る。これが、重力のエネルギーを解放する爆風となる。

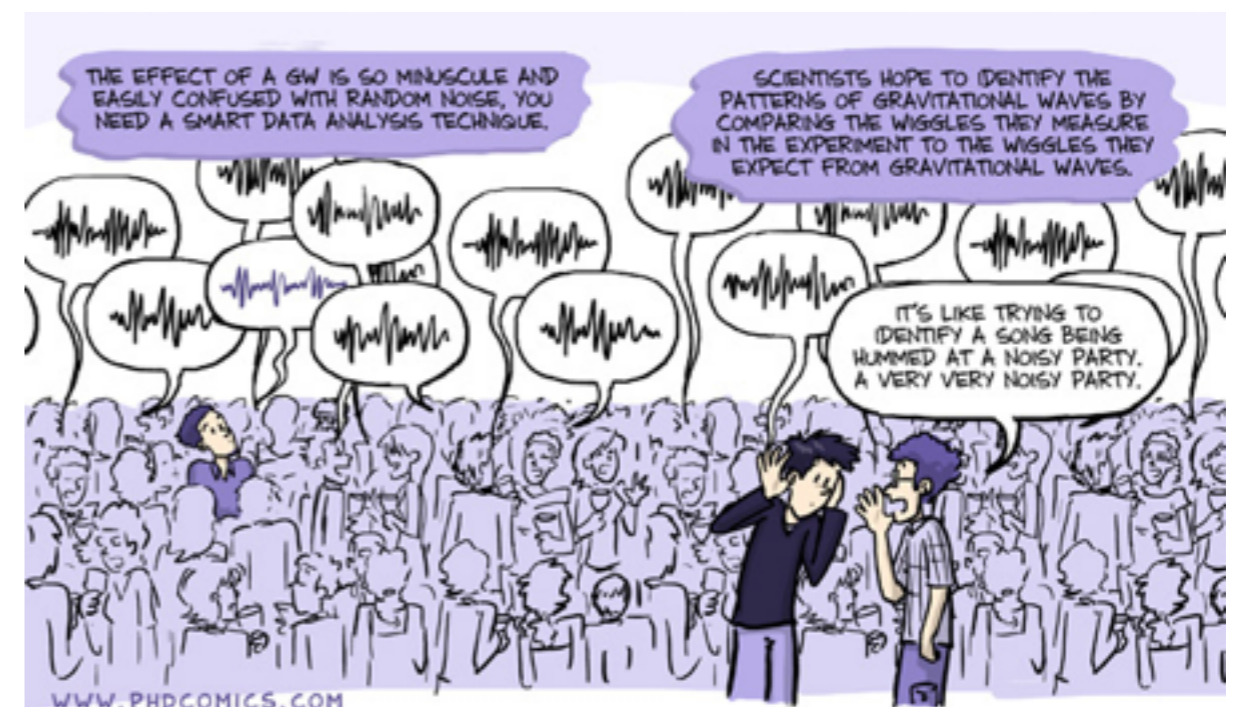
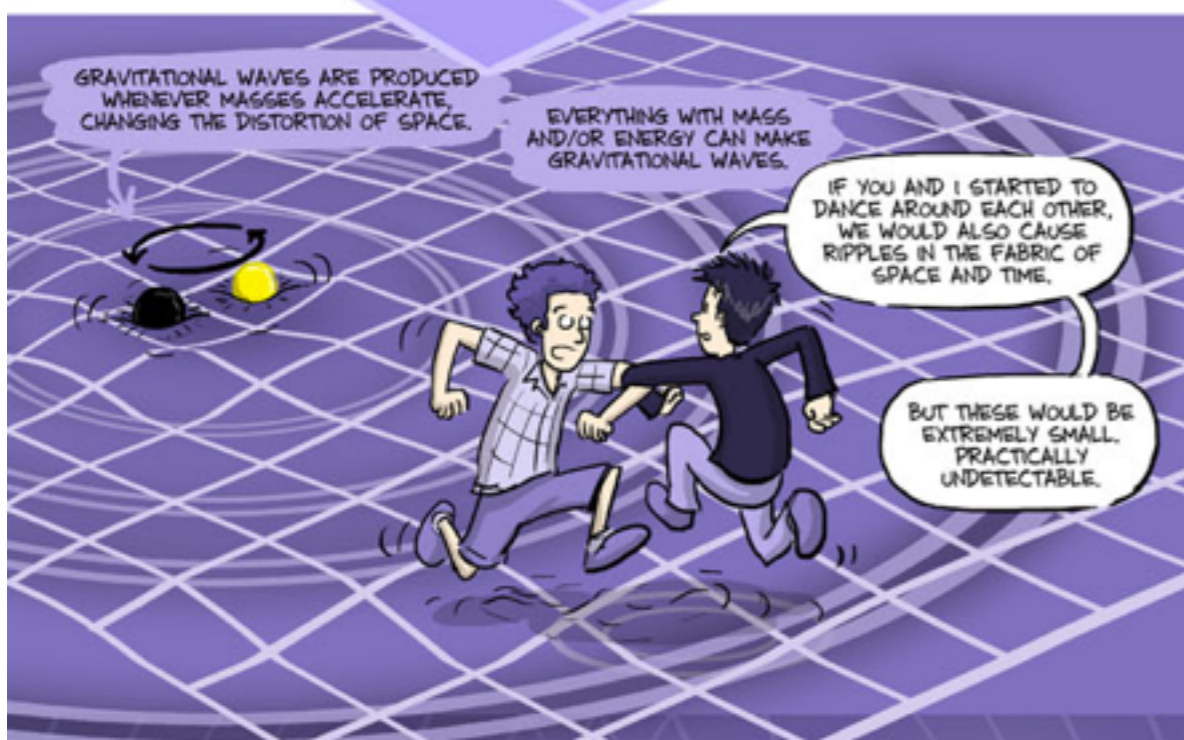


「宇宙のつくり方」ギリランド著 真貝・鳥居訳  
(丸善, 2016年12月発売)



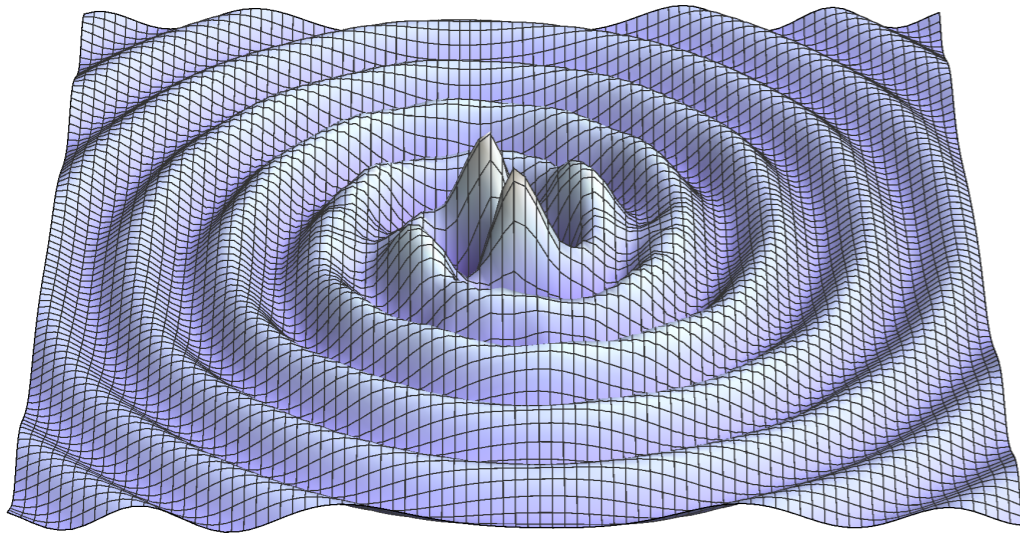
[www.phdcomics.com](http://www.phdcomics.com)

“gravitational waves explained”



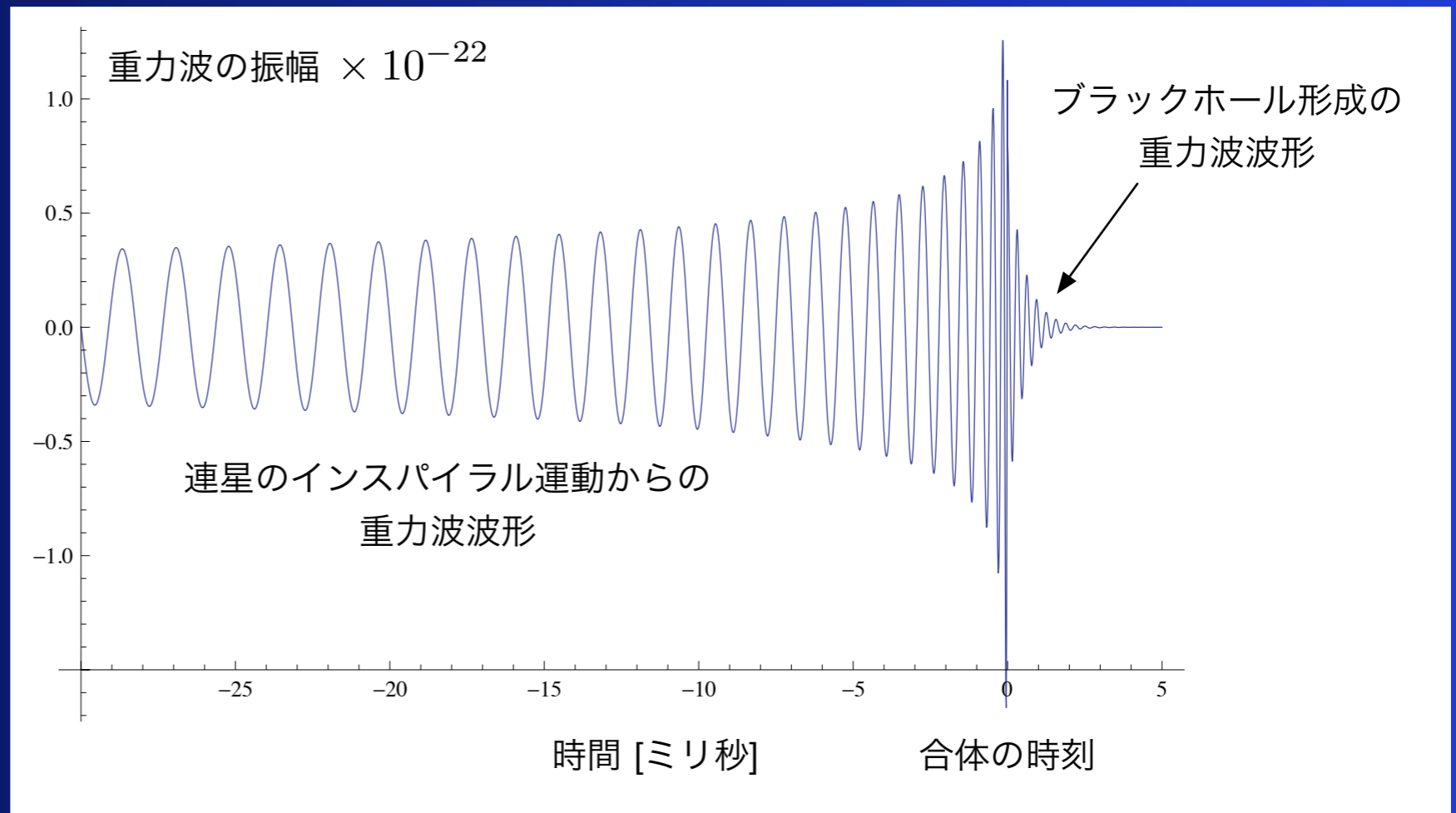
重力波の存在が間接的に確かめられた。

重力波の直接観測をしたい！



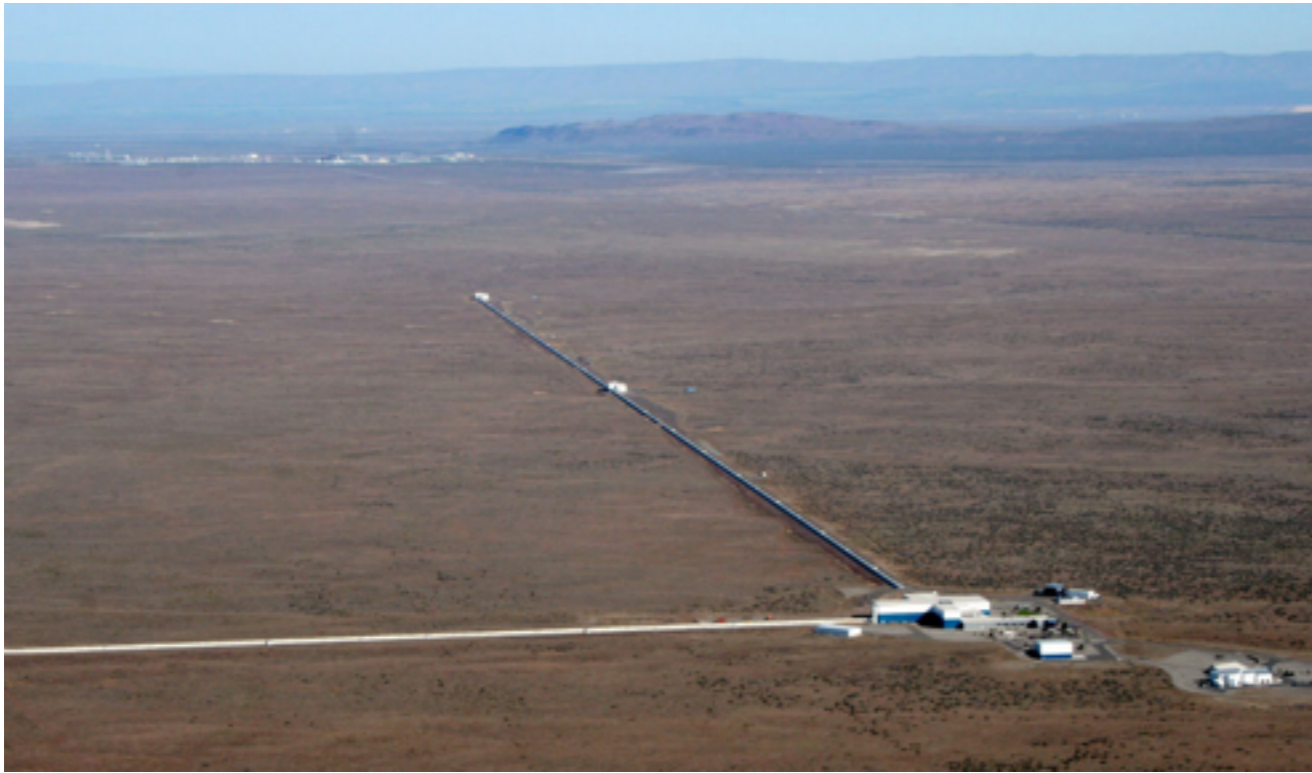
連星中性子星

連星ブラックホール

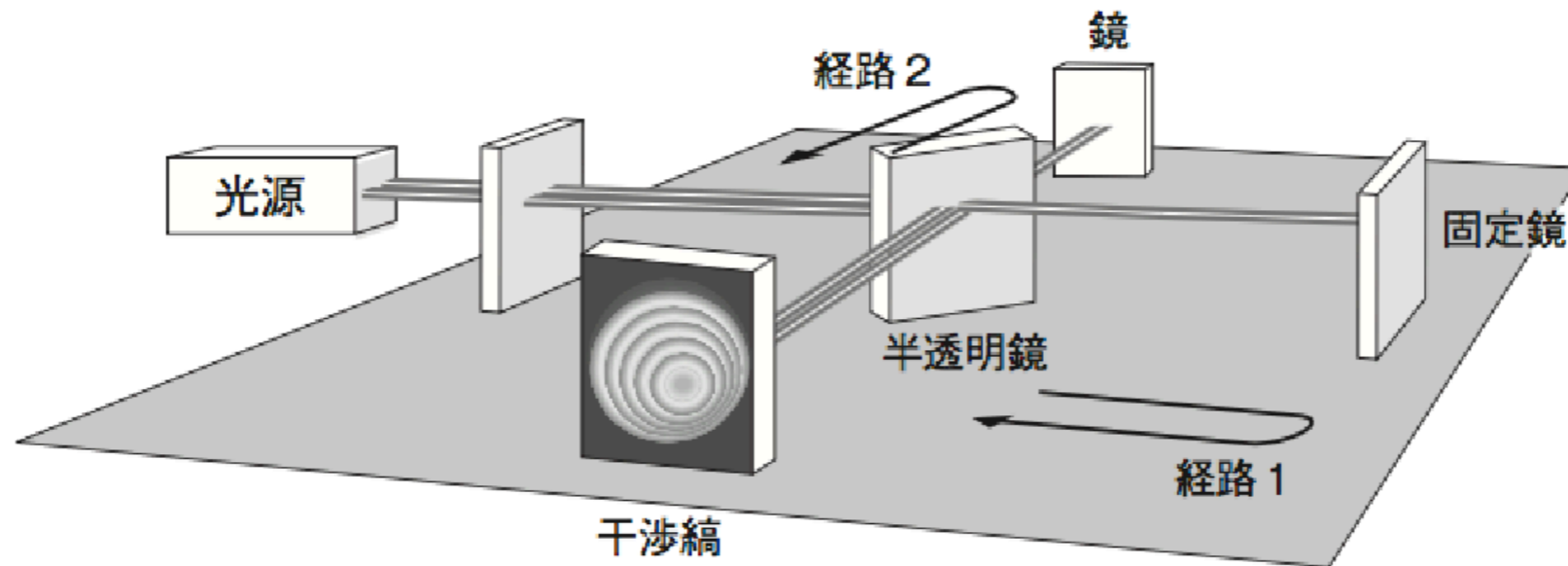


# LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

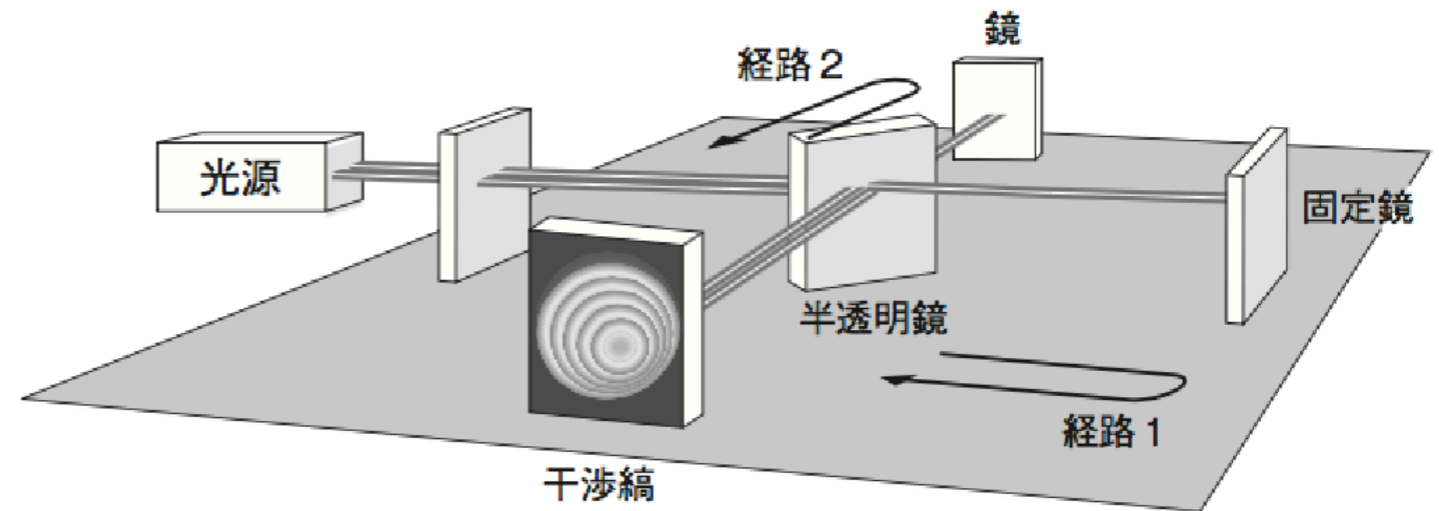
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



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

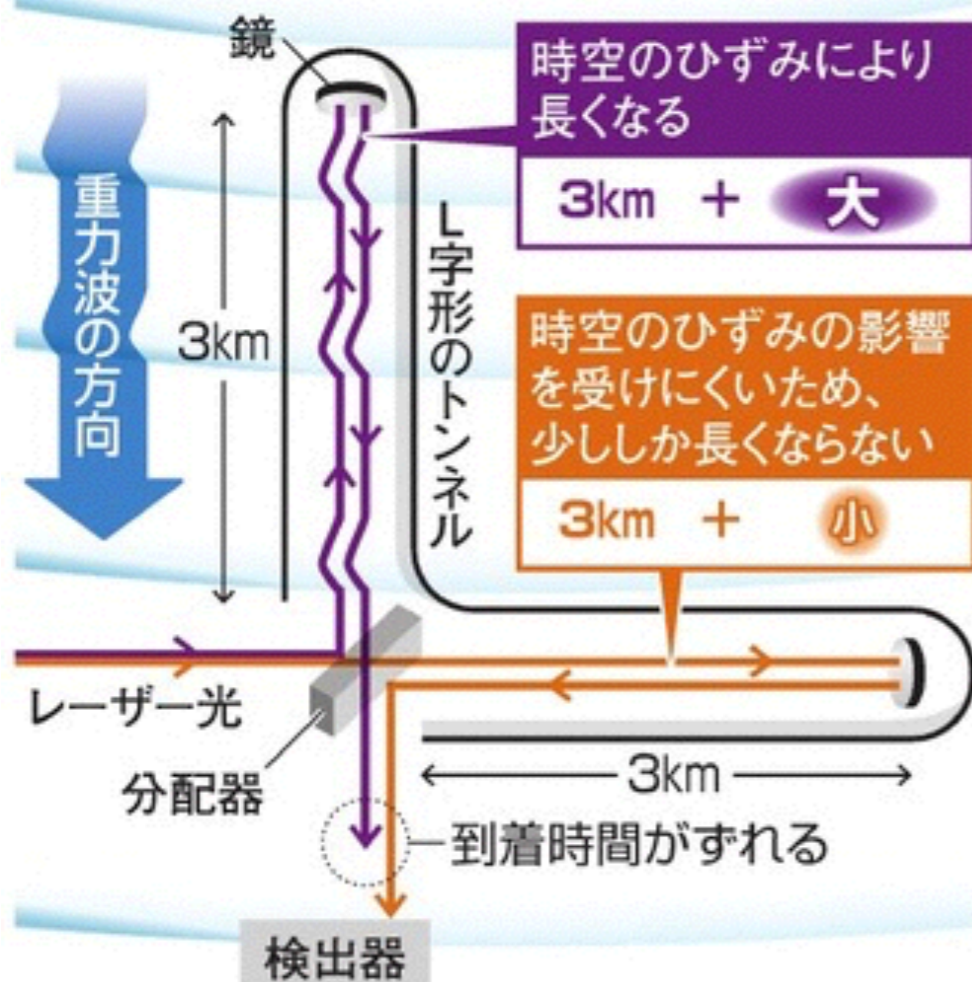


# 干渉計のしくみ



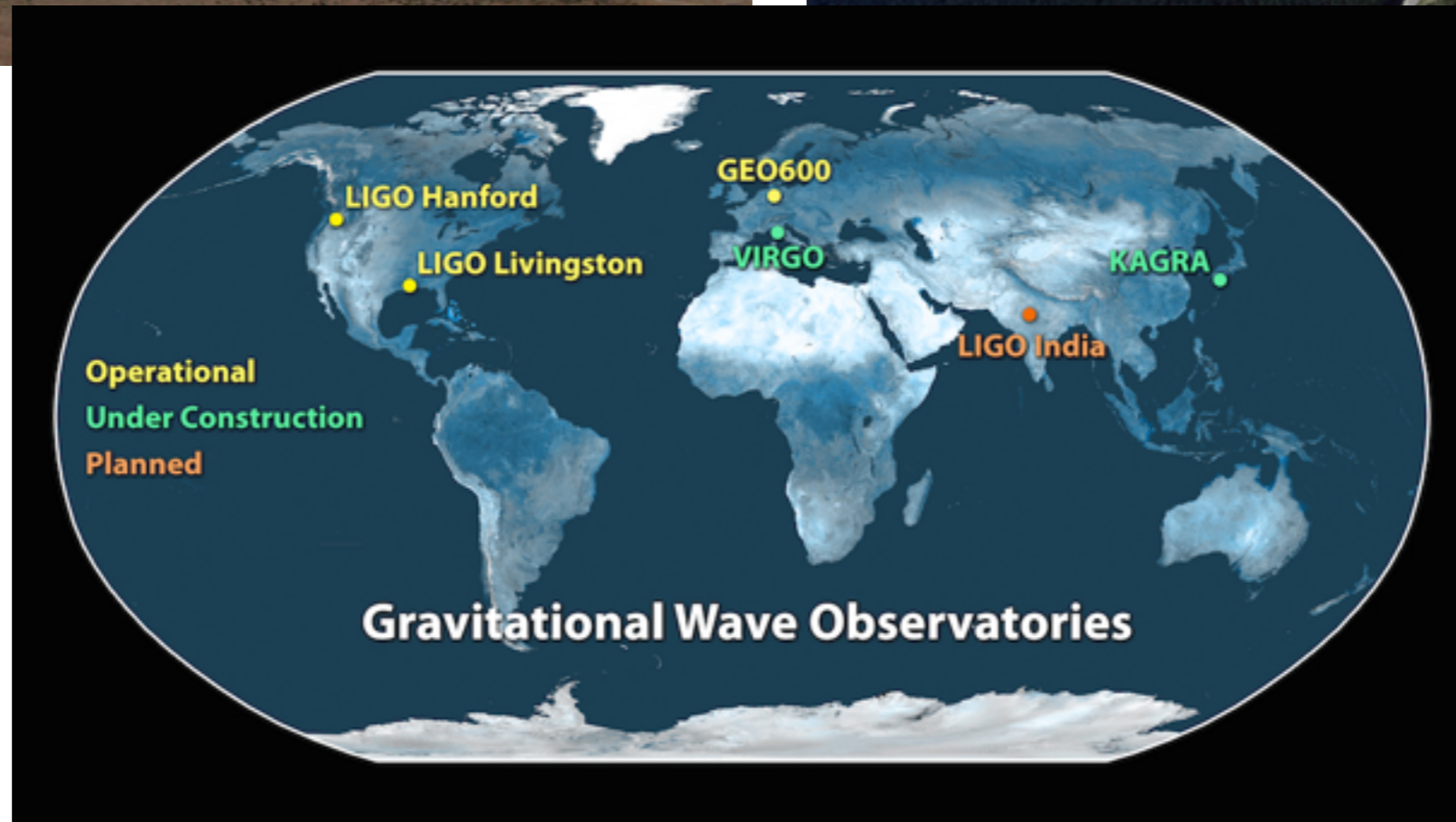
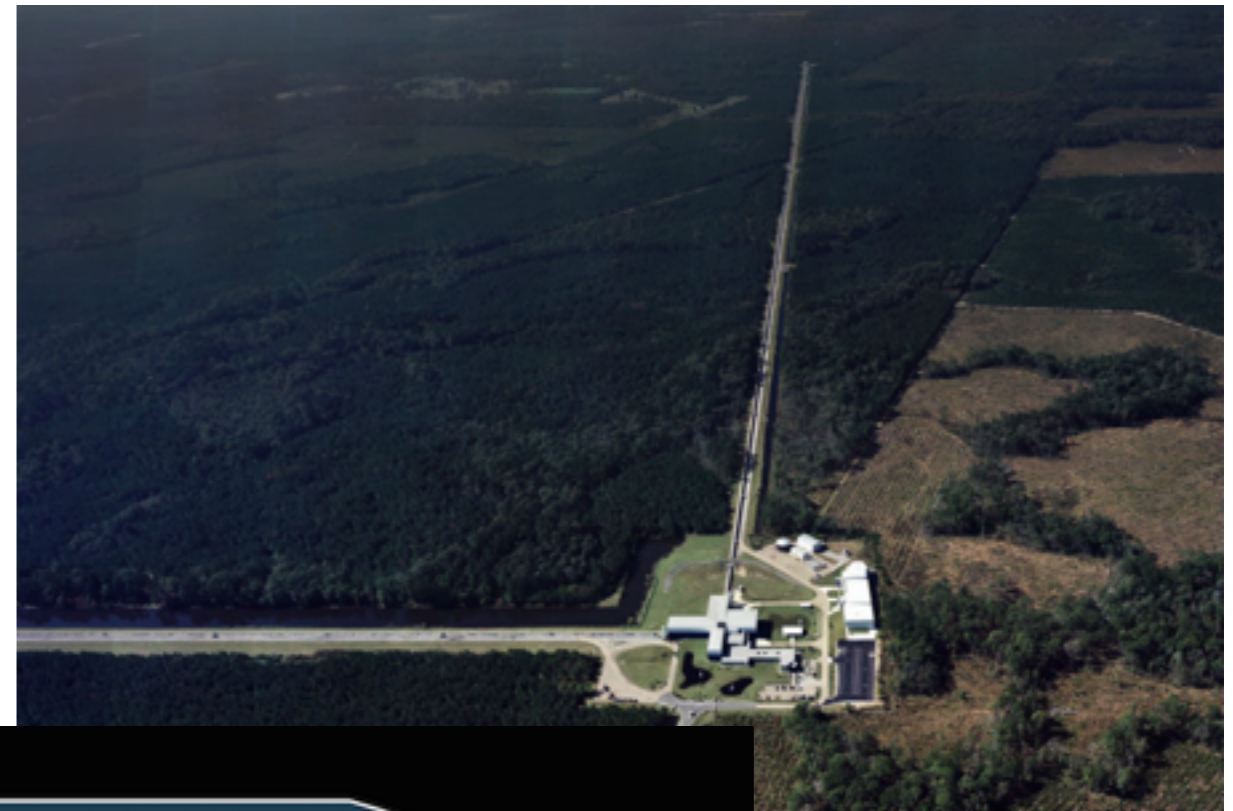
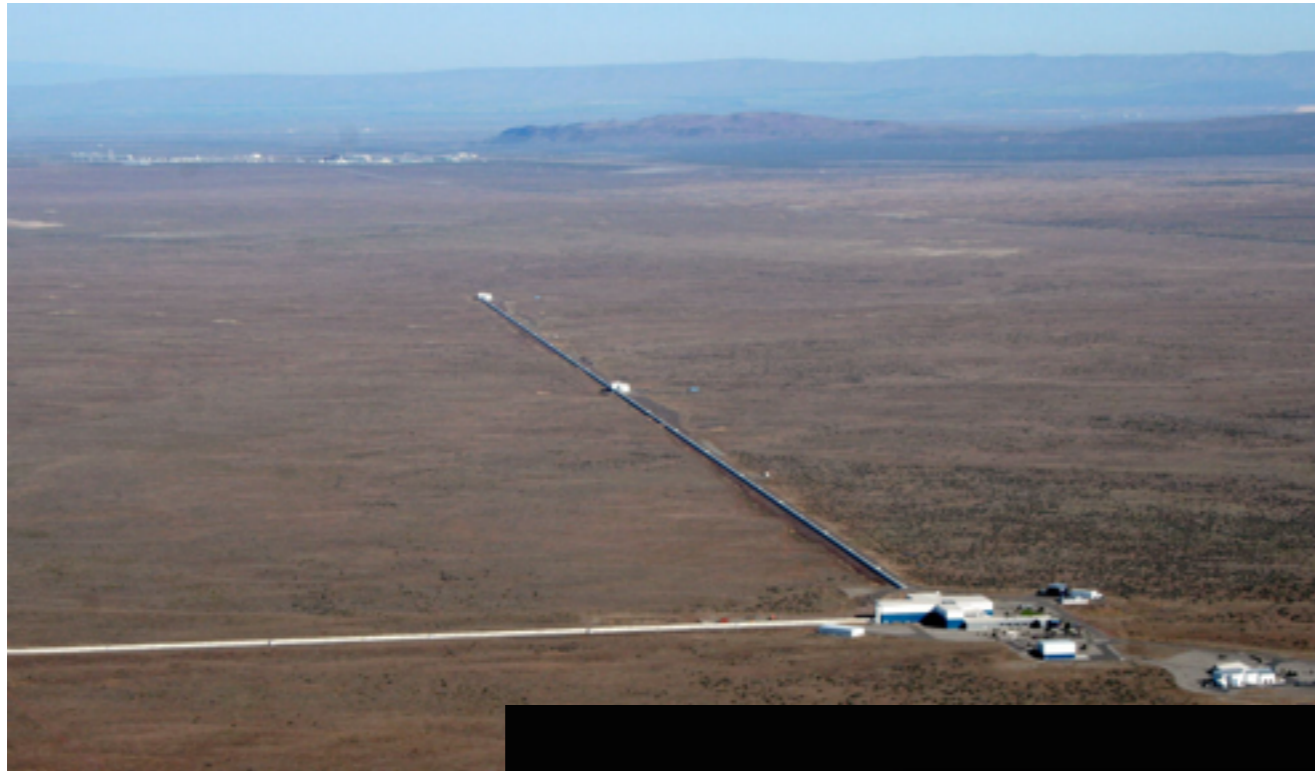
光の重ね合わせで強めあったり弱めあったりする現象（干渉）を利用して、微小な長さを測る

## KAGRAのしくみ



# 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

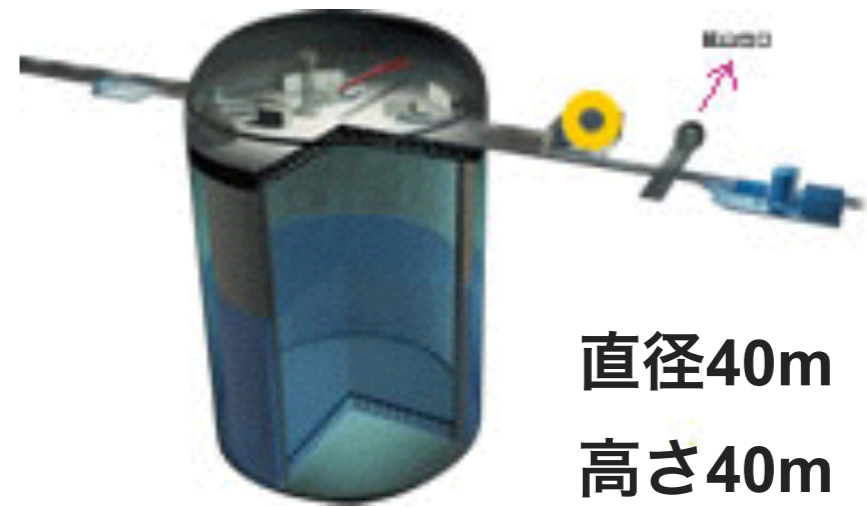
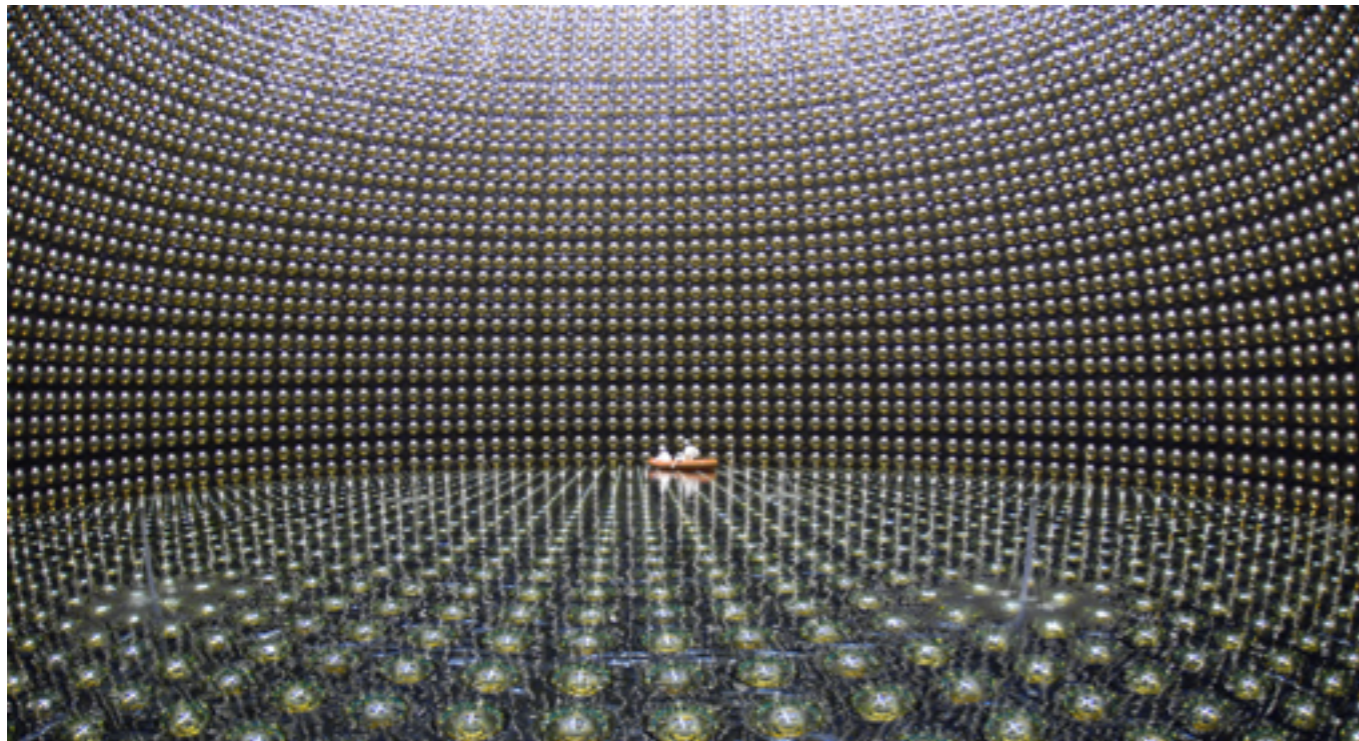
鏡の材質としてサファイア

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

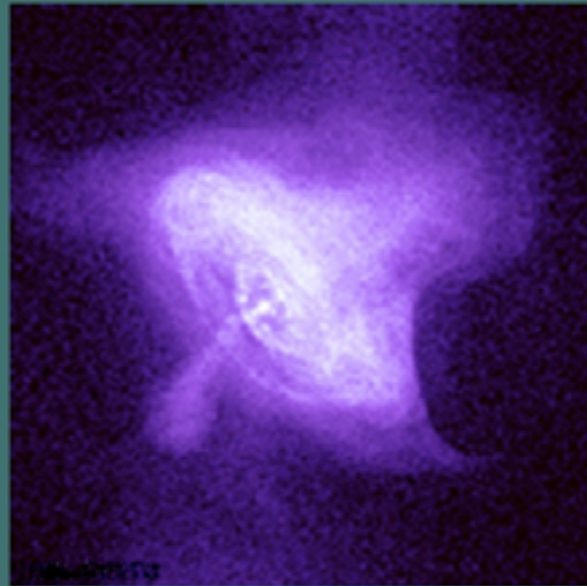
sources of gravitational wave

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

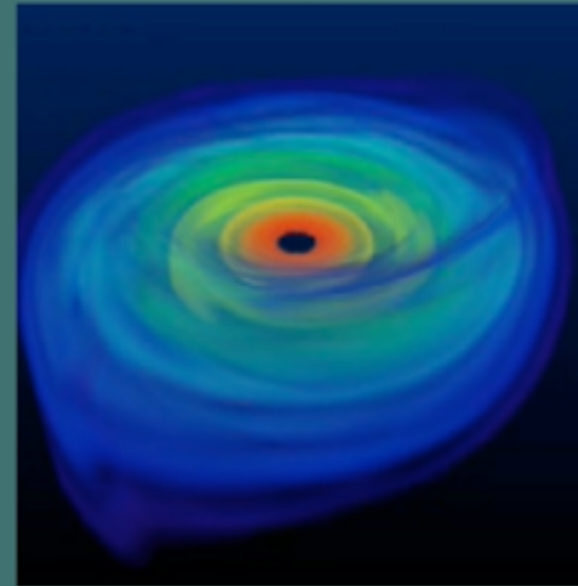
超新星爆発 (写真出典: NASA)



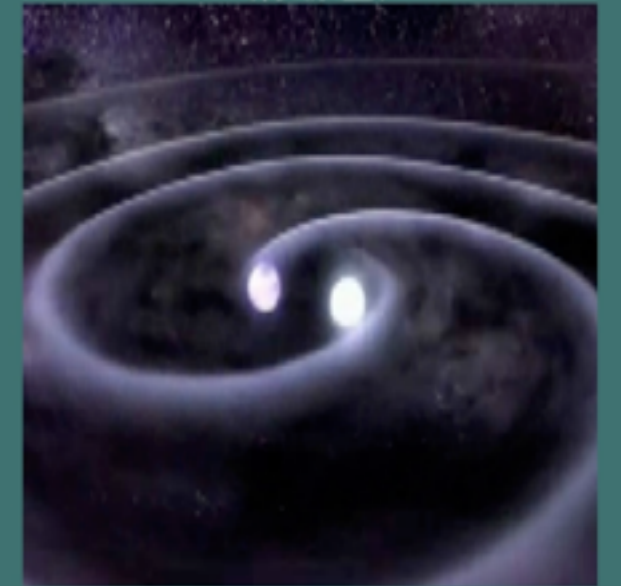
パルサー (写真出典: NASA)



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

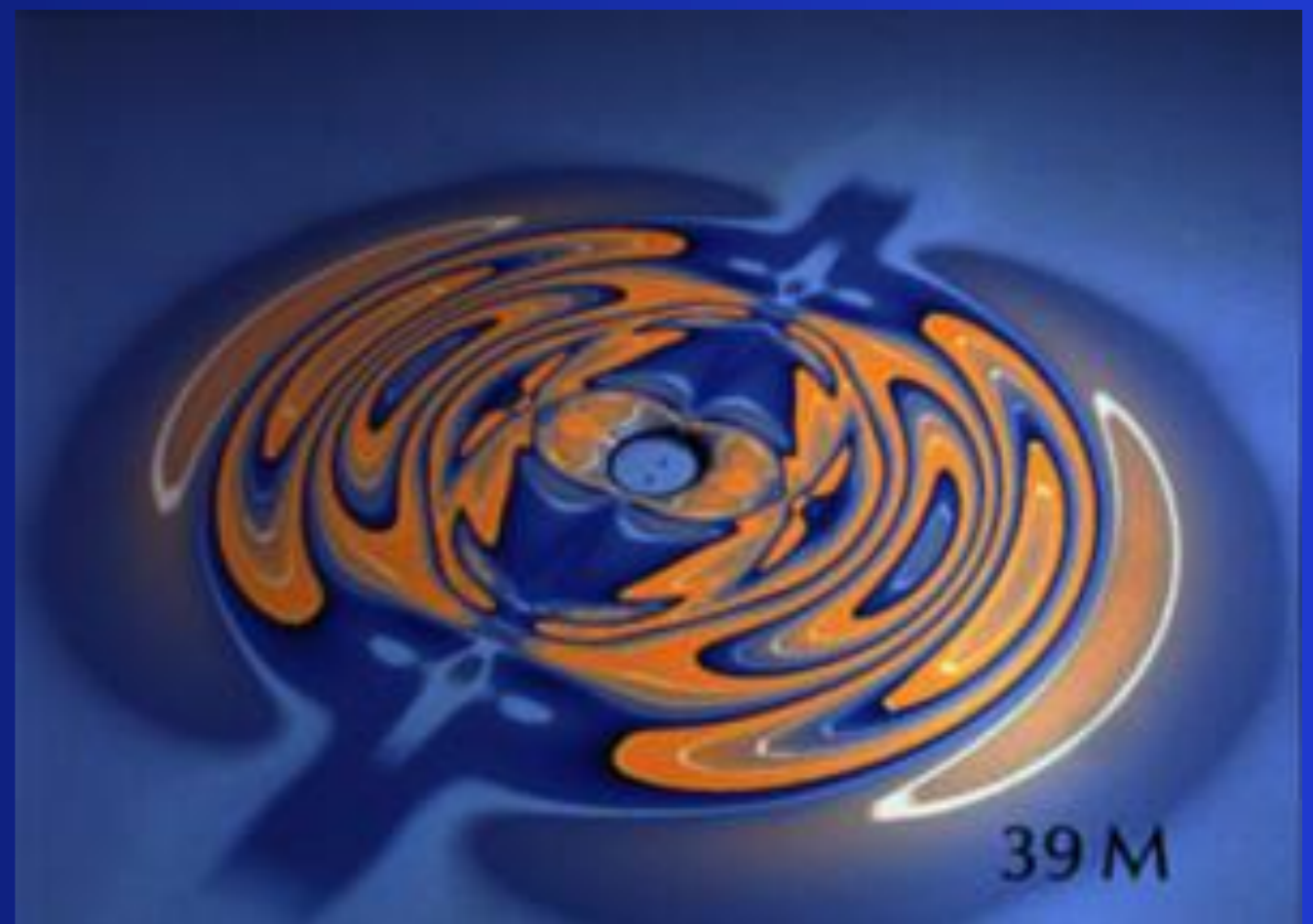
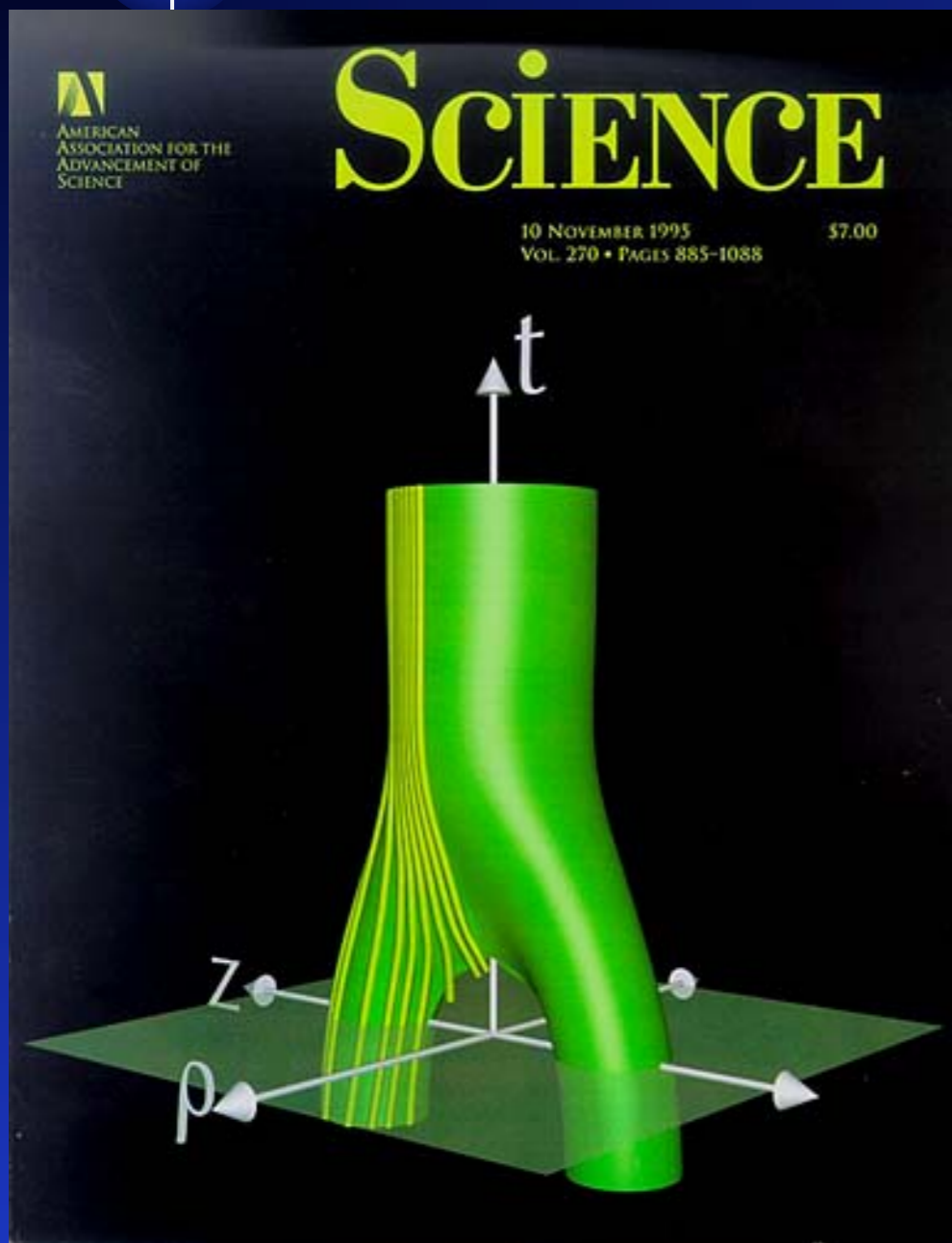
振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を  
ターゲットに

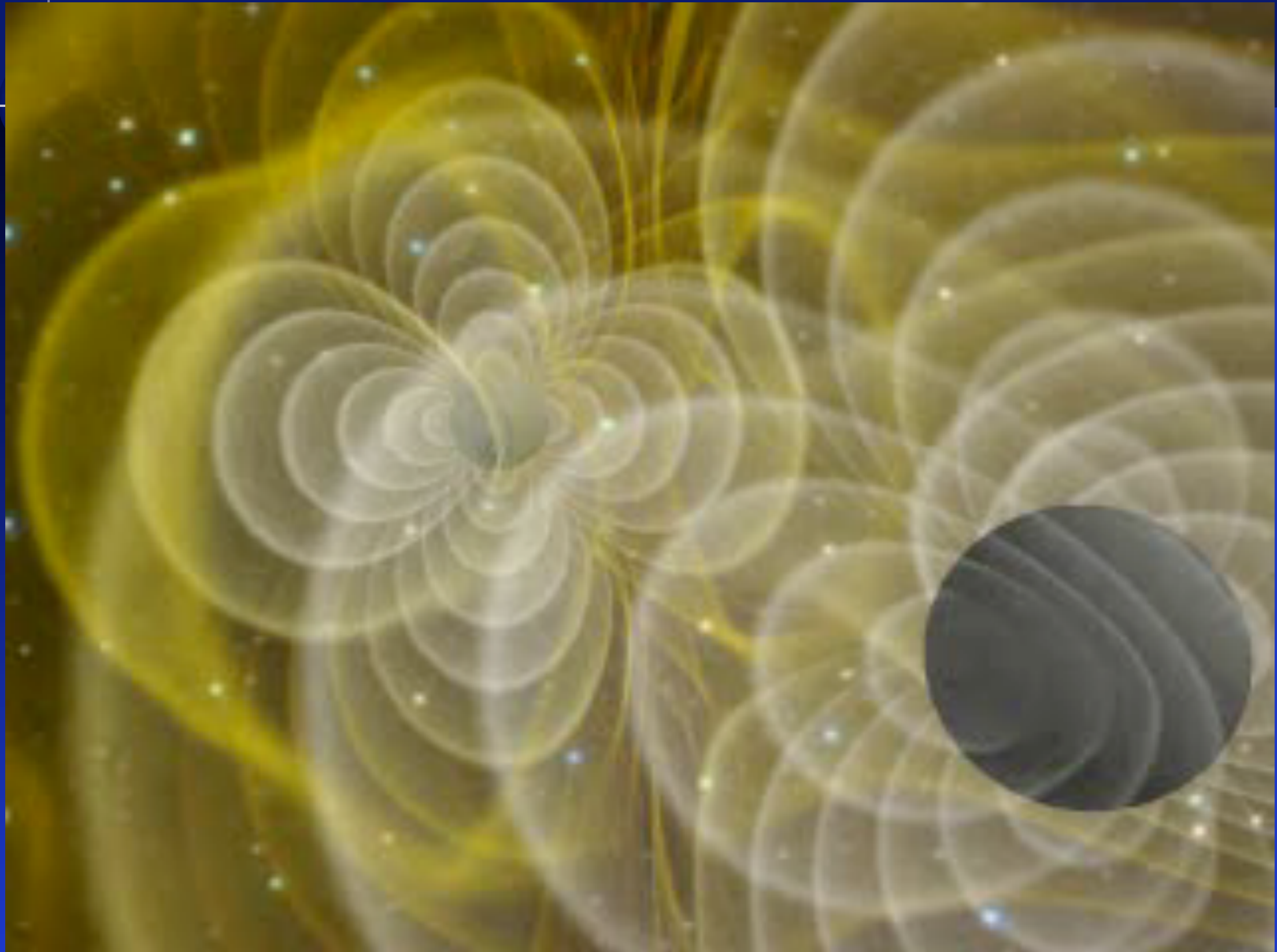
重力波は弱いのであらかじめ、波形の予測が必要  
ノイズにまみれたデータに、予測した波形があるか探す

# 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)

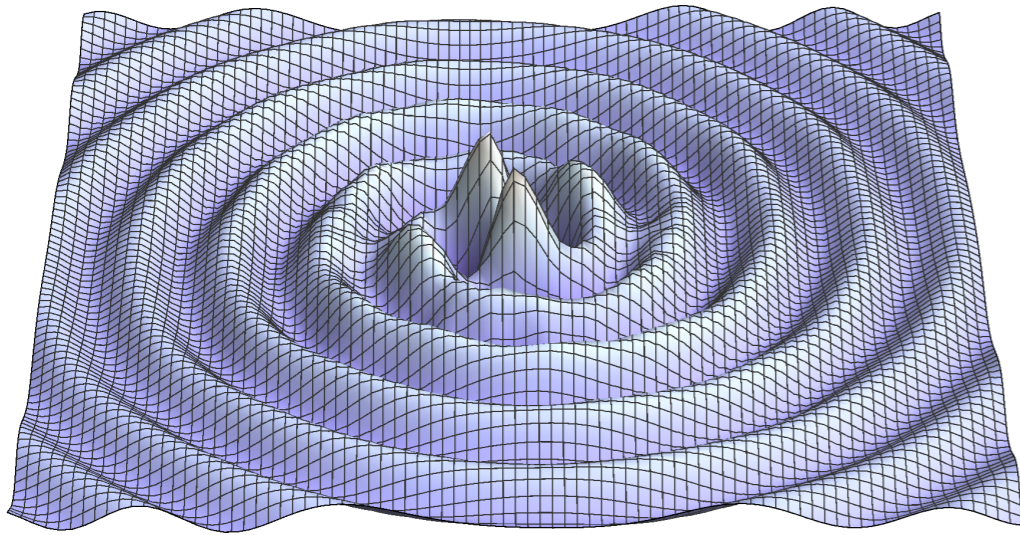
# ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

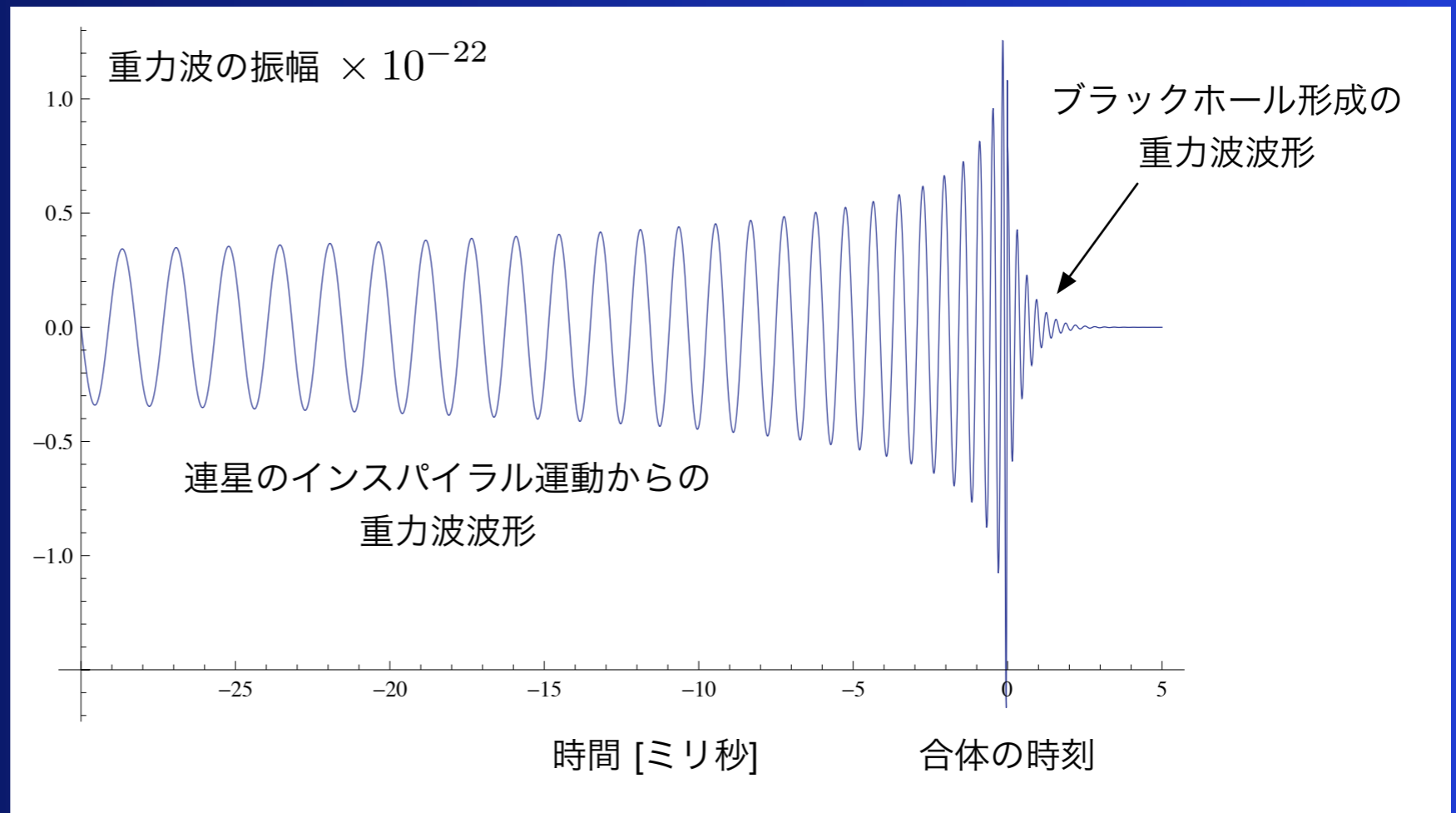
重力波の存在が間接的に確かめられた。

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



# 重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

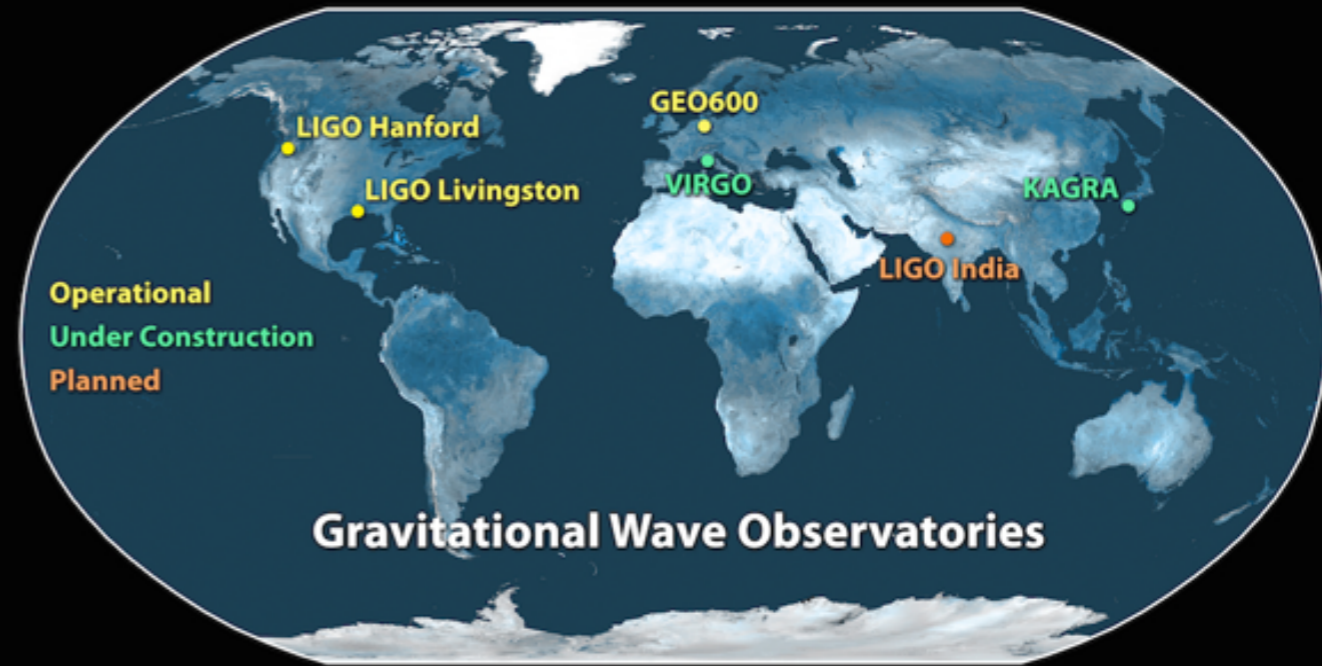
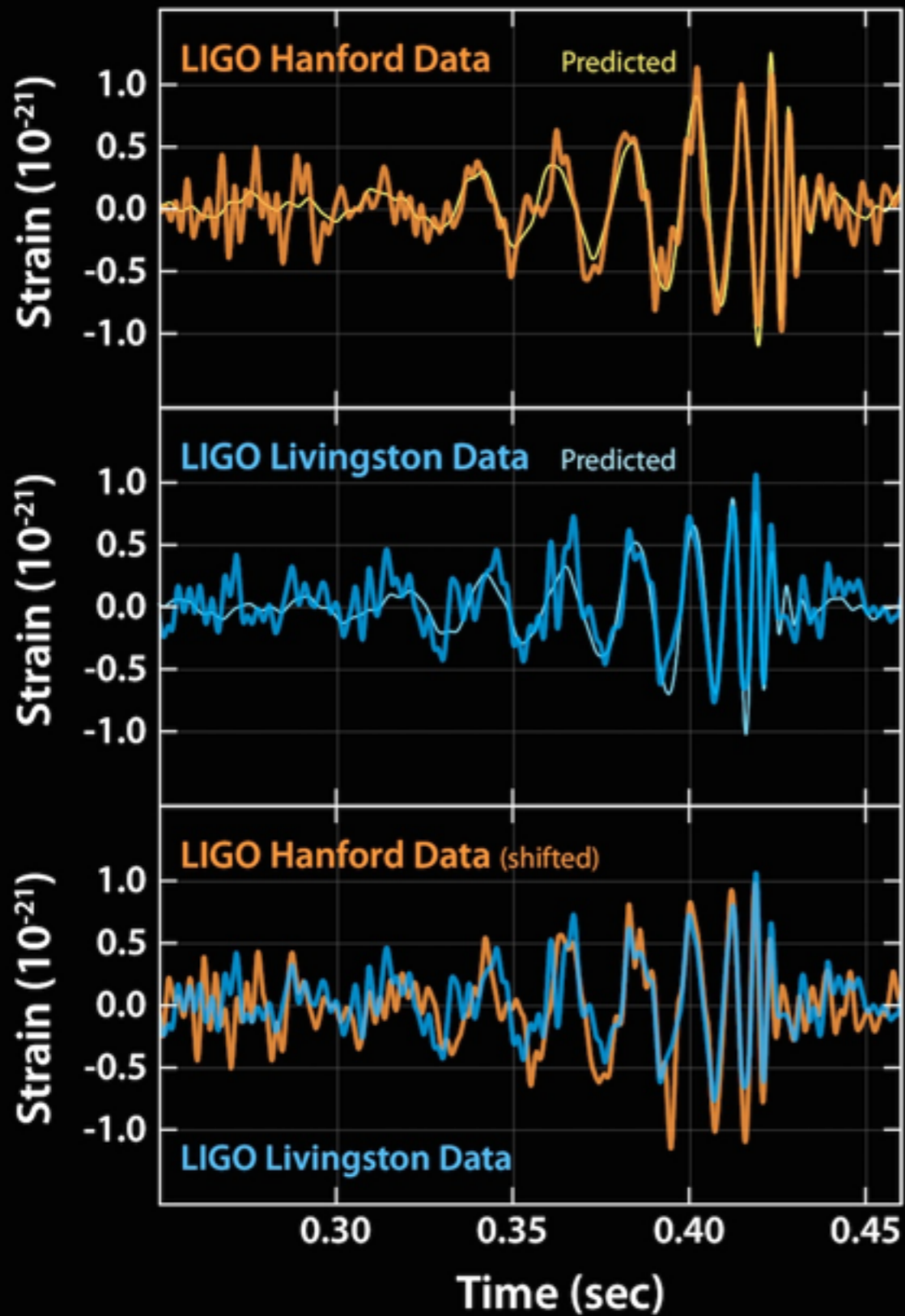


**“We had detected gravitational waves. We did it.”**

**“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”**

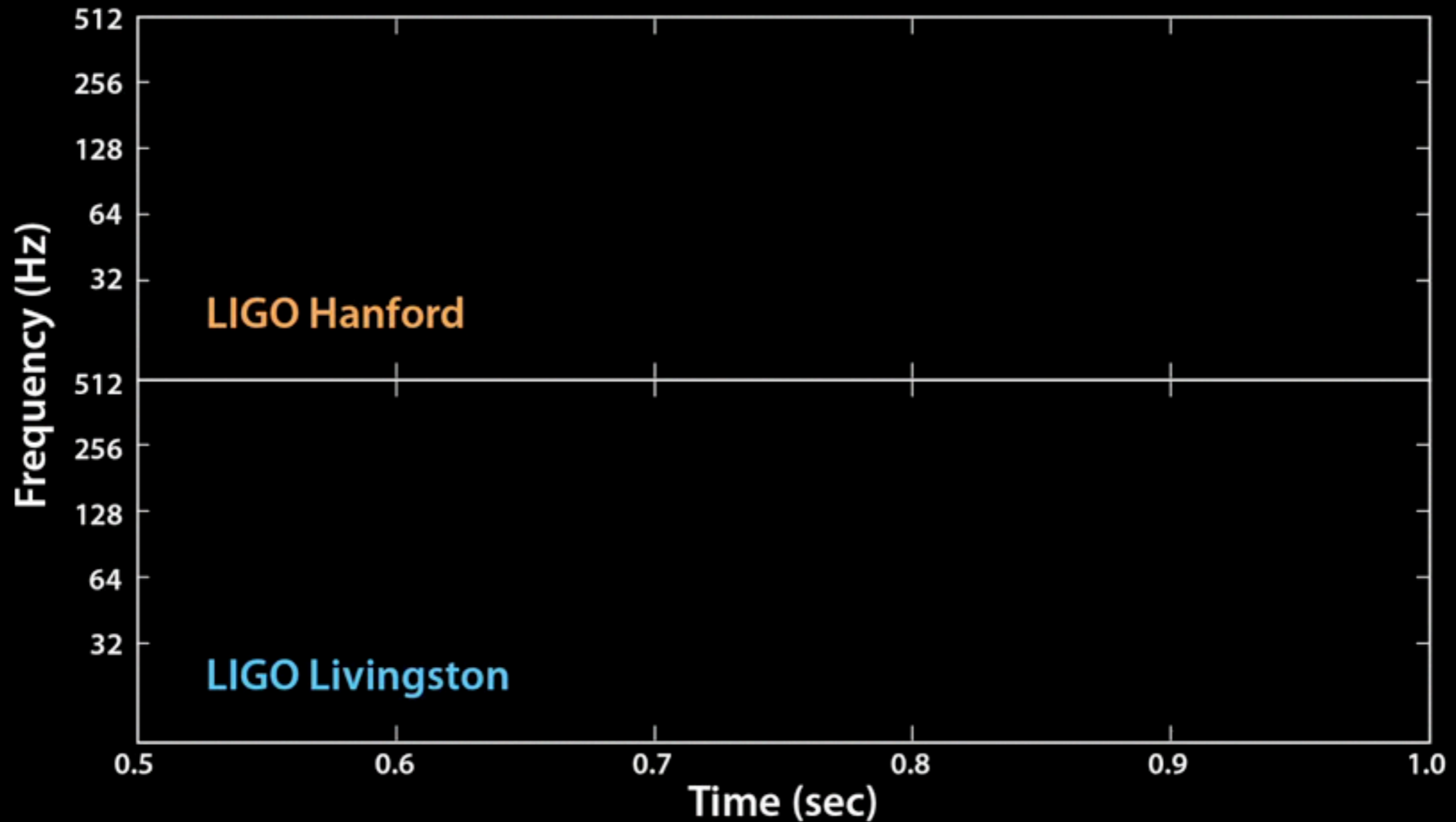
<https://www.youtube.com/watch?v=aEPlwEJmZyE>

# 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>



# 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  $1.0 \times 10^{-21}$ . 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  $5.1\sigma$ . 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

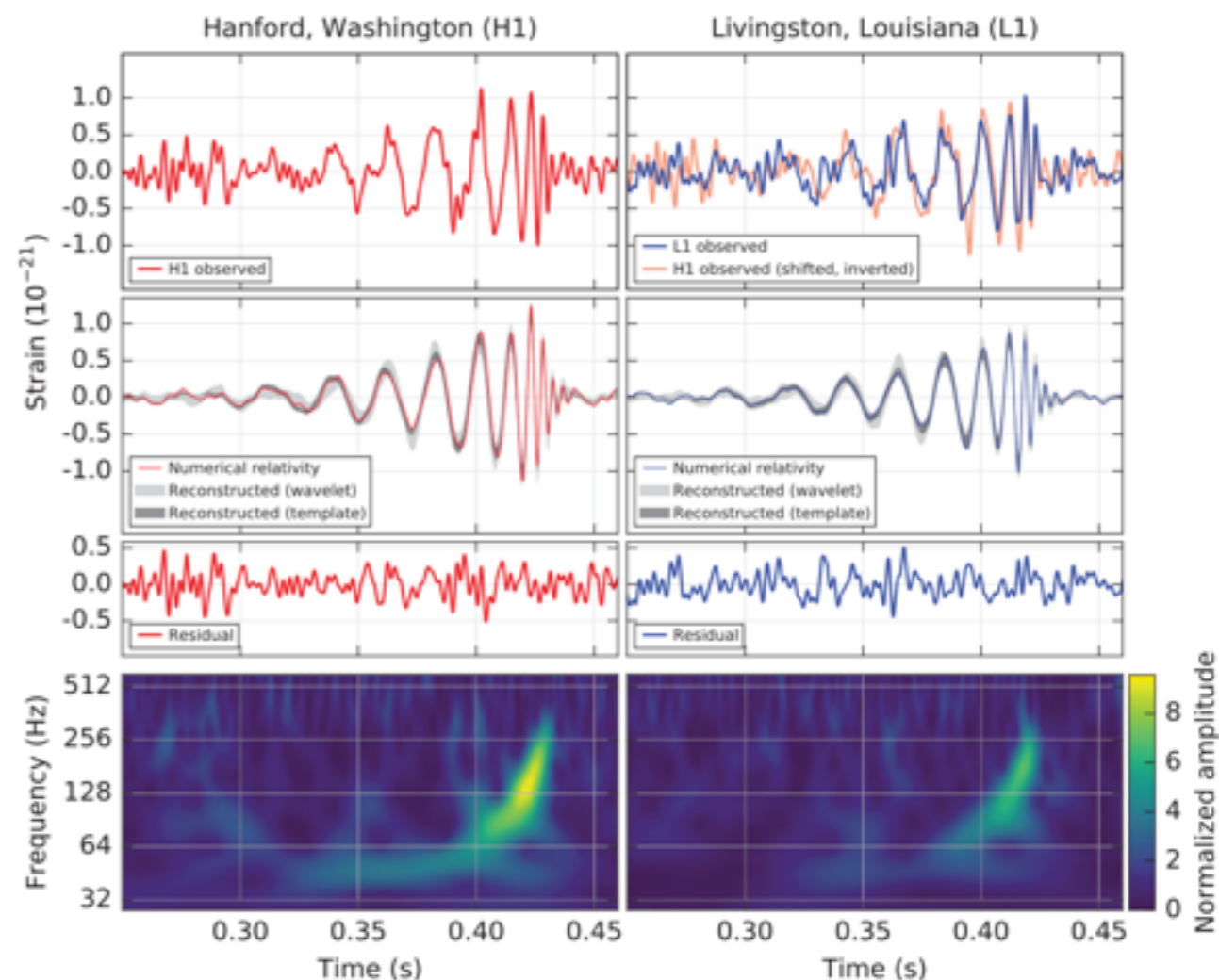
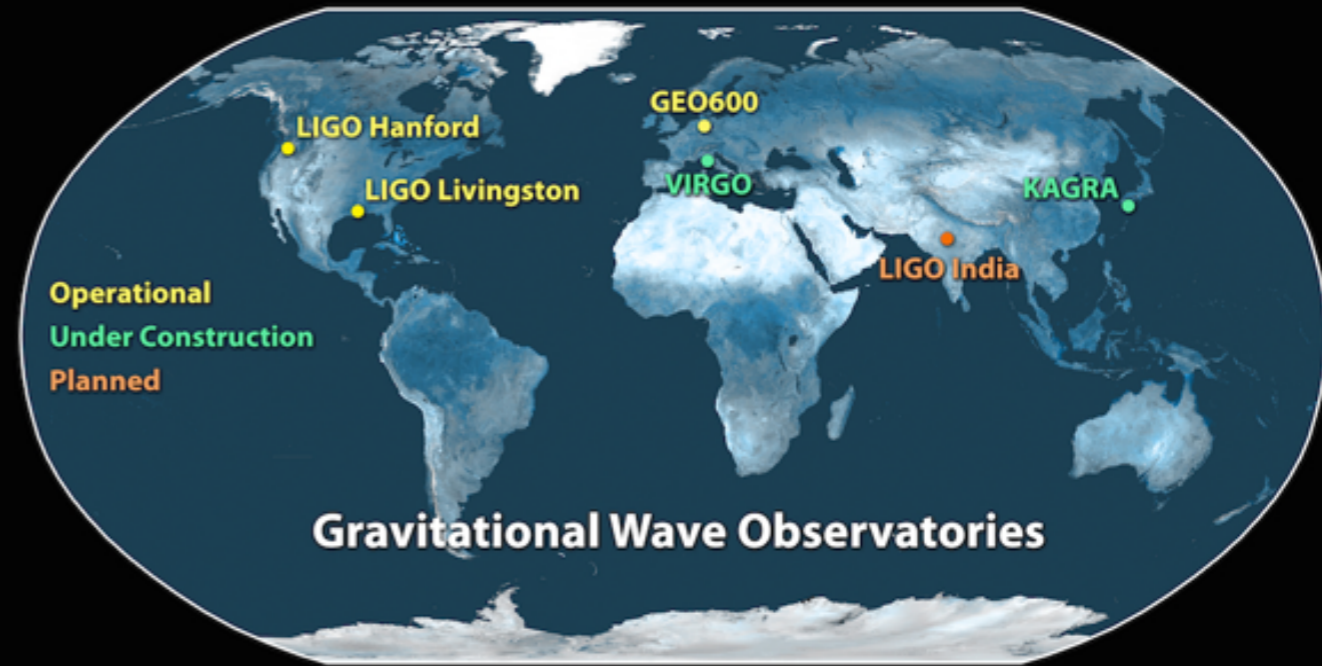


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered



2015年9月14日

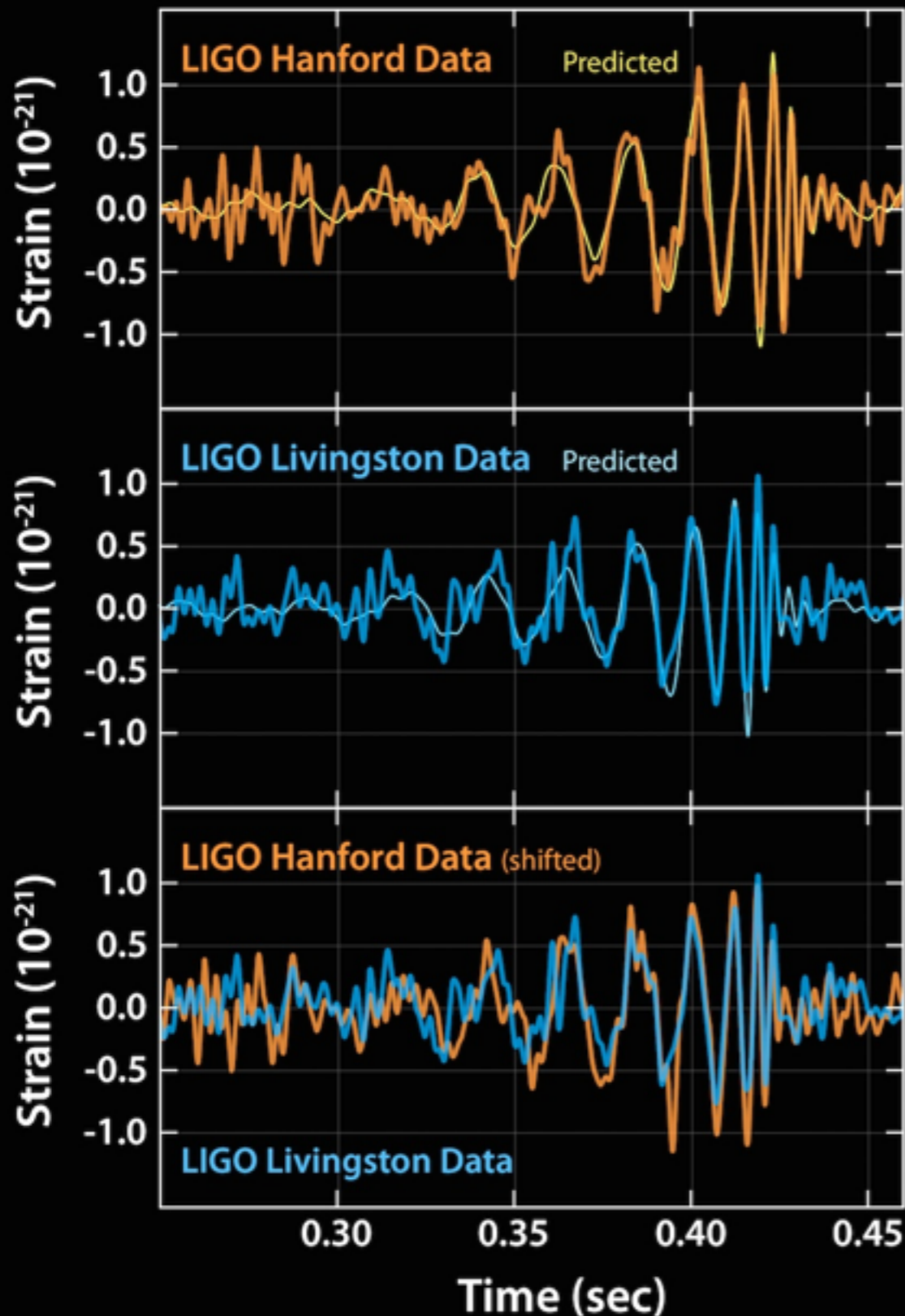


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、  
太陽の62倍のブラックホールになった。

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

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

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、「期待が膨らんだ」と話している。

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



できなかった。その謎に迫る強力な手段になる。また、弱まらずに遠くまで届くので、遠い星の観測や誕生直後の宇宙の姿を知るのにも役立つと期待されている。

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

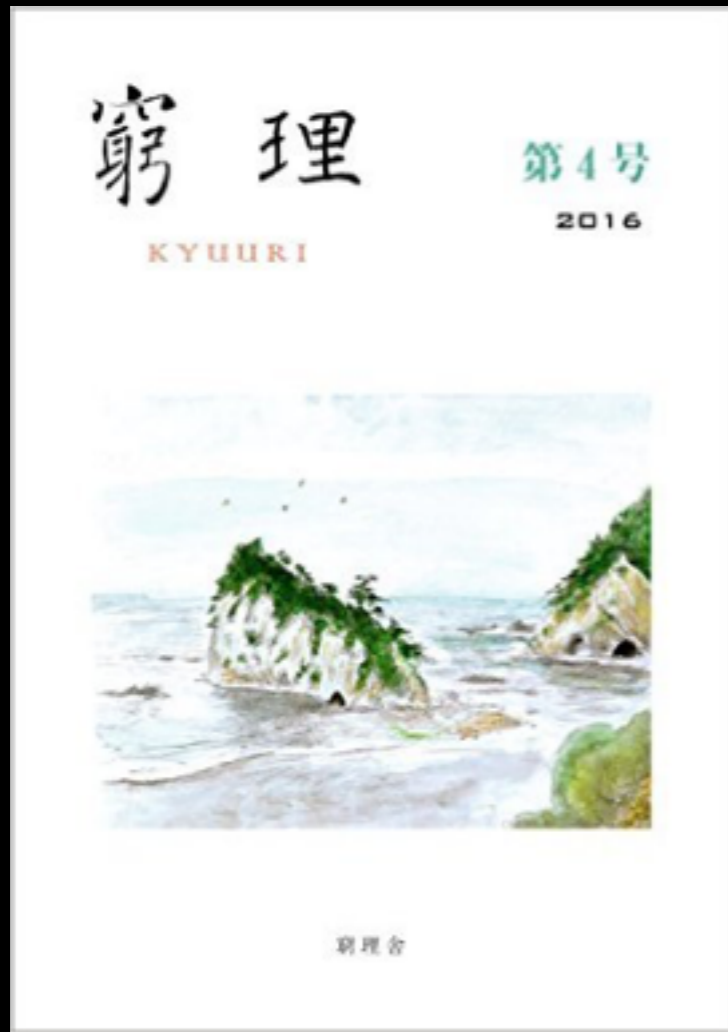
**重力波が検出された！**  
**重力波が検出できた！**  
**ブラックホールが存在した！**  
**ブラックホール連星が存在した！**  
**相対性理論, 正しかった！**

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



2016年7月20日発売

## 内容紹介

物理系の科学者が中心の随筆雑誌。

「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

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、ブラックスホールが衝突・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。

私は、一般相対性理論の理論研究に関わって四半世紀になる。これまで重力波を研究の中心に据えてきたわけではないが、この瞬間を待ち望んでいた一人だ。記者発表の中継は、インターネットで研究者仲間とチャットしながら自宅で見守っていた。発表の第一声は、LIGO所長のデビット・ライツイによる「我々は重力波を検出した。やり遂げたのだ(We did it)」だった。彼のガッツポーズが、我々の喜びを倍増させた。

重力波については広く報道されたので、ここでは詳細を避けるが、少しだけ

# 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～

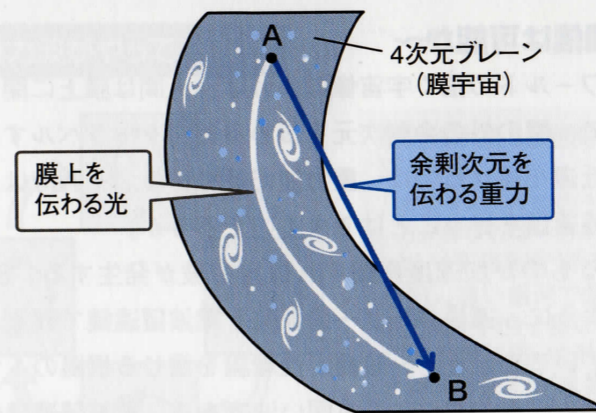
ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

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る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

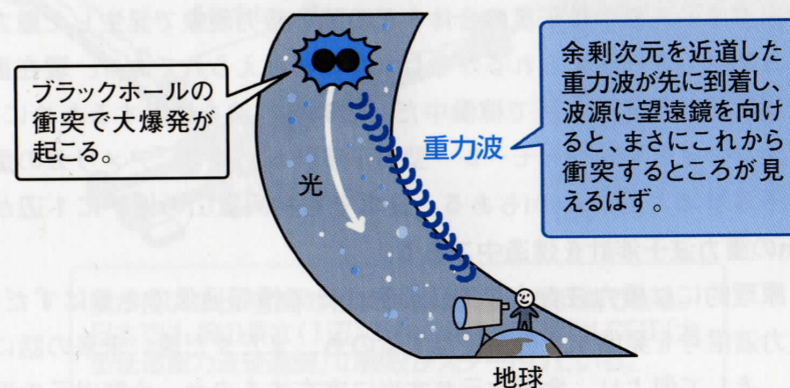
は余剰次元を通過することで、膜上を通る光よりも速く伝わる。重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??

### 余剰次元を通過して近道をする



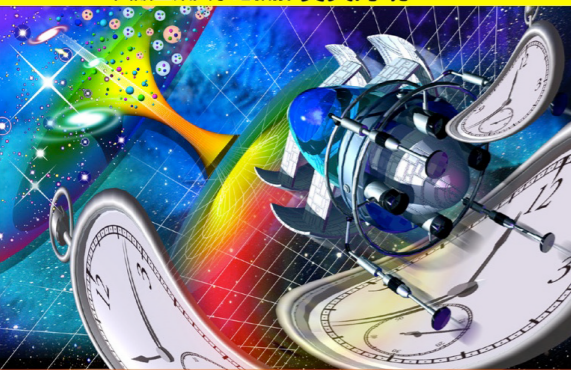
重力は余剰次元を通過することで、膜上を通る光よりも速く伝わる

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 1609年

100年もかかったのか。

