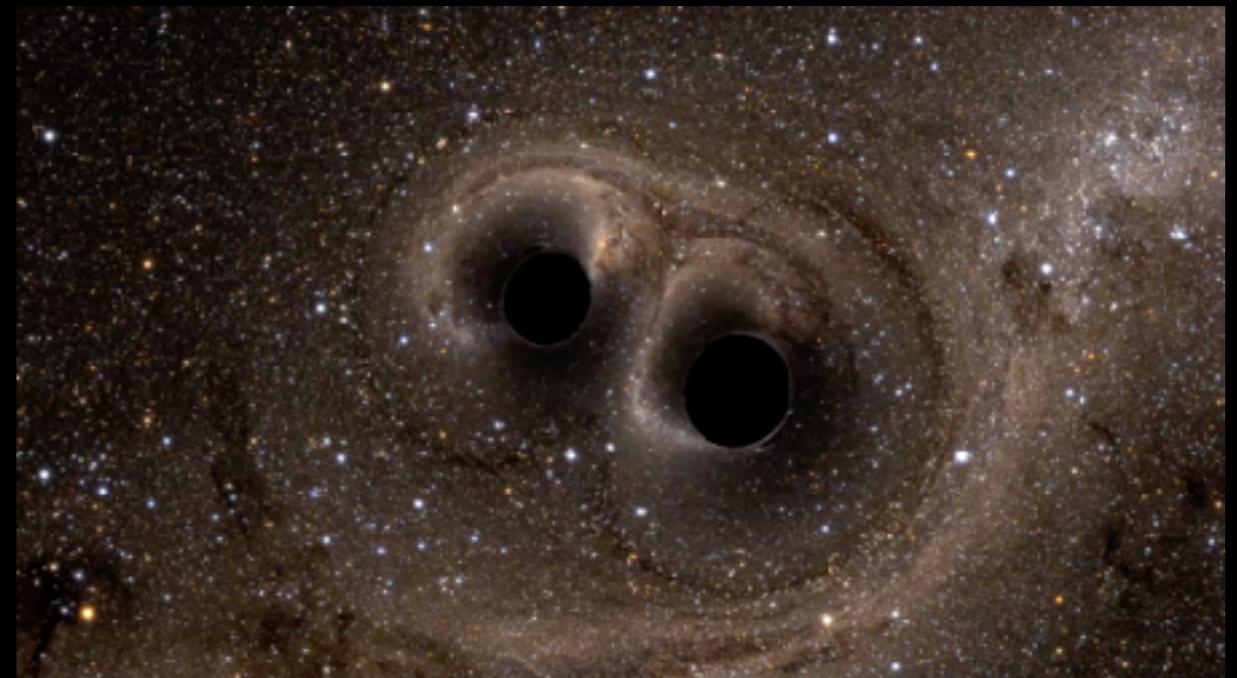
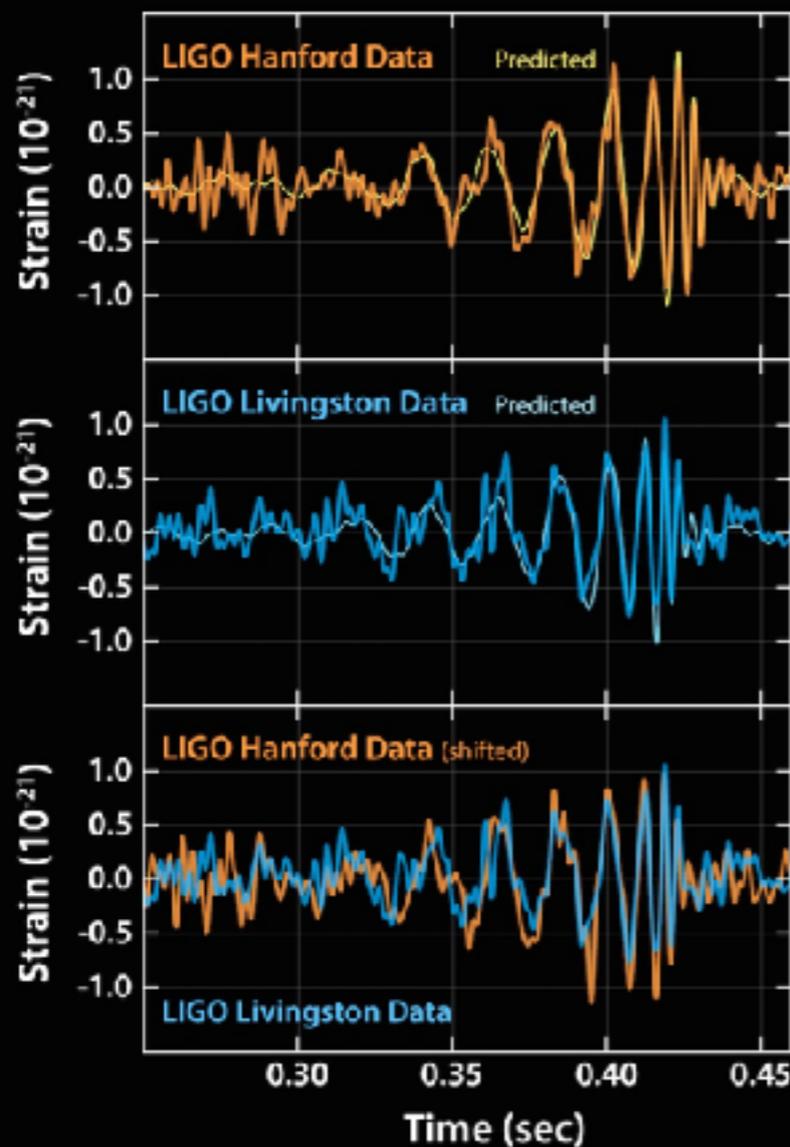


# ブラックホールと重力波



真貝寿明 (大阪工業大)

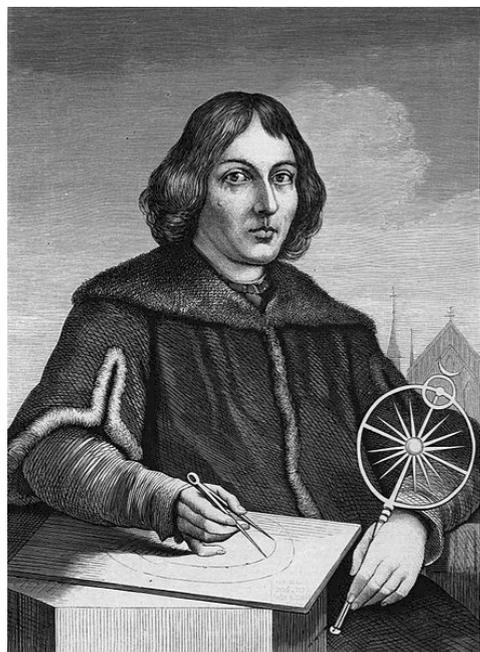
<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>



# 惑星の運動を説明することから物理学は始まった

コペルニクス

Nicolaus Copernicus  
(1473-1543)



地動説

ブラーエ

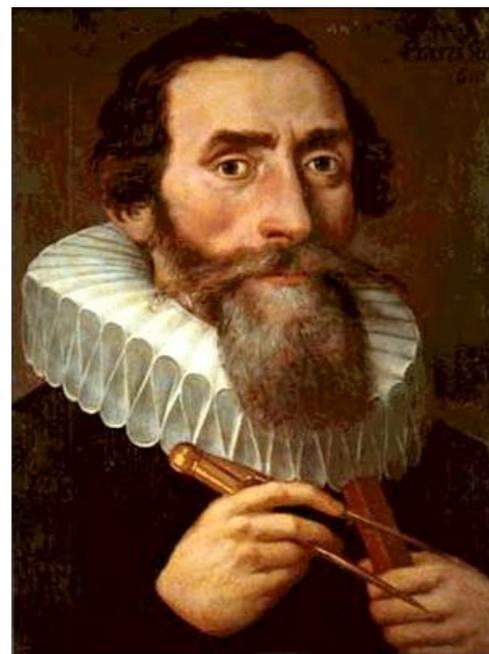
Tycho Brahe  
(1546-1601)



天体観測

ケプラー

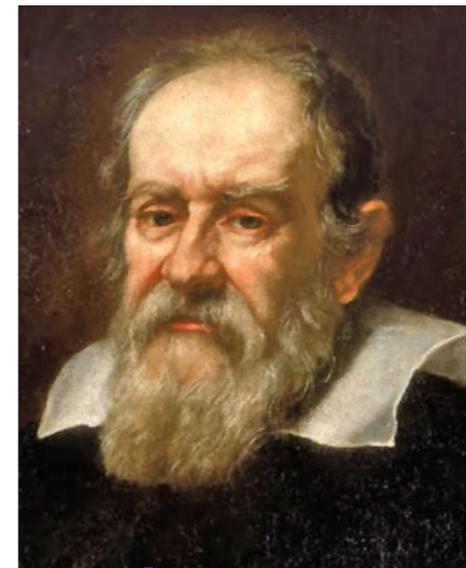
Johannes Kepler  
(1571-1630)



惑星運動の法則

ガリレイ

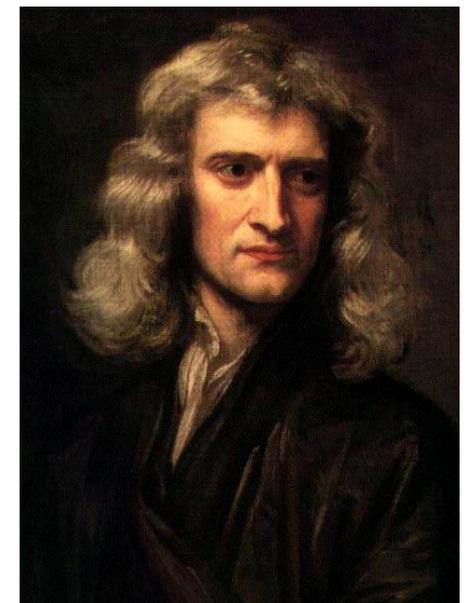
Galileo Galilei  
(1564-1642)



慣性・自由落下運動  
地動説の物理的根拠

ニュートン

Isaac Newton  
(1642-1727)



運動の法則  
万有引力

## ケプラーの惑星の運動についての3法則 (1609,1618)

### 第1法則 楕円軌道の法則

惑星は太陽を1つの焦点とする楕円軌道を描く。

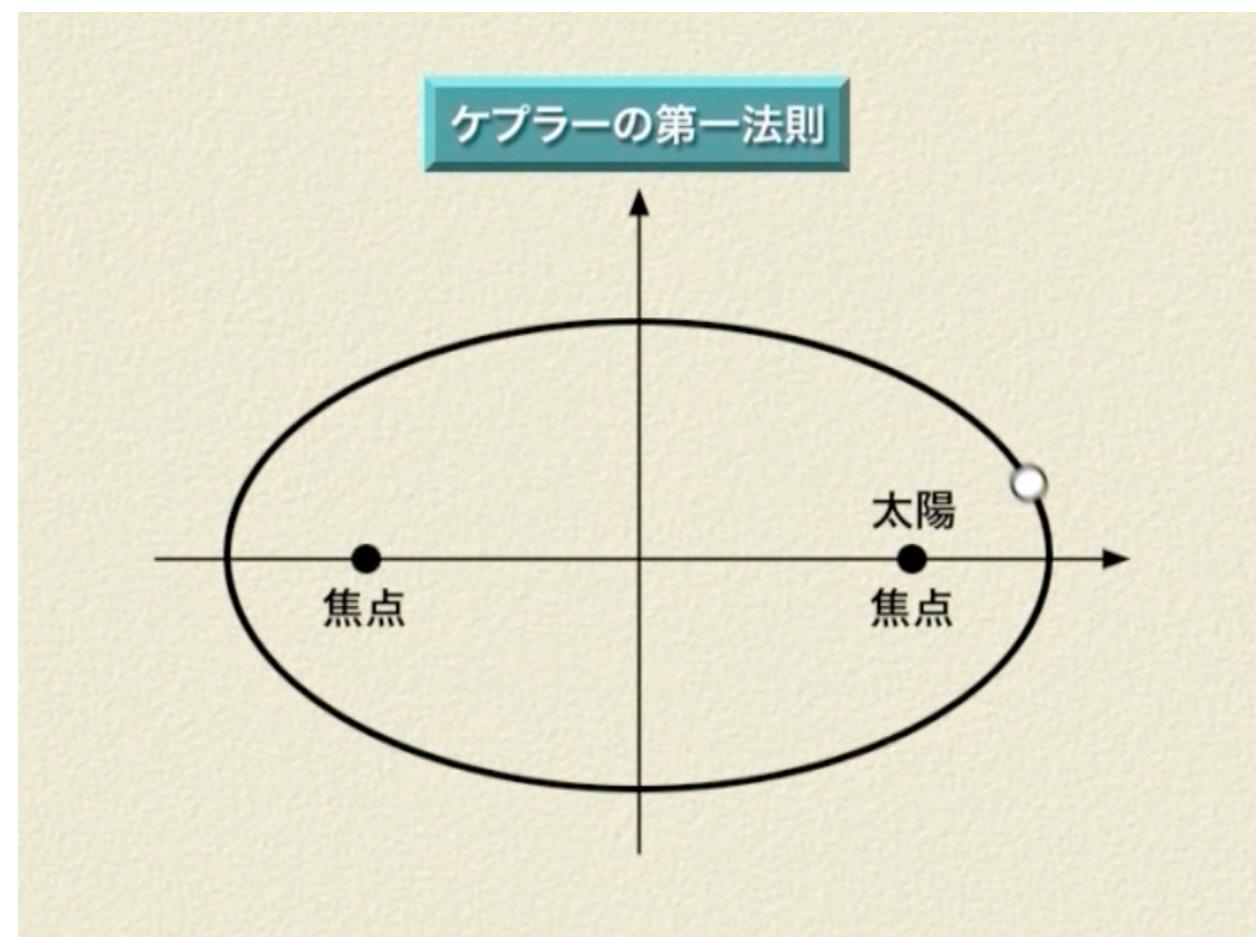
### 第2法則 面積速度一定の法則

太陽と惑星を結ぶ線分が単位時間に描く扇形の面積（面積速度）は、惑星それぞれについて一定である。

### 第3法則 $T^2/R^3$ 一定の法則

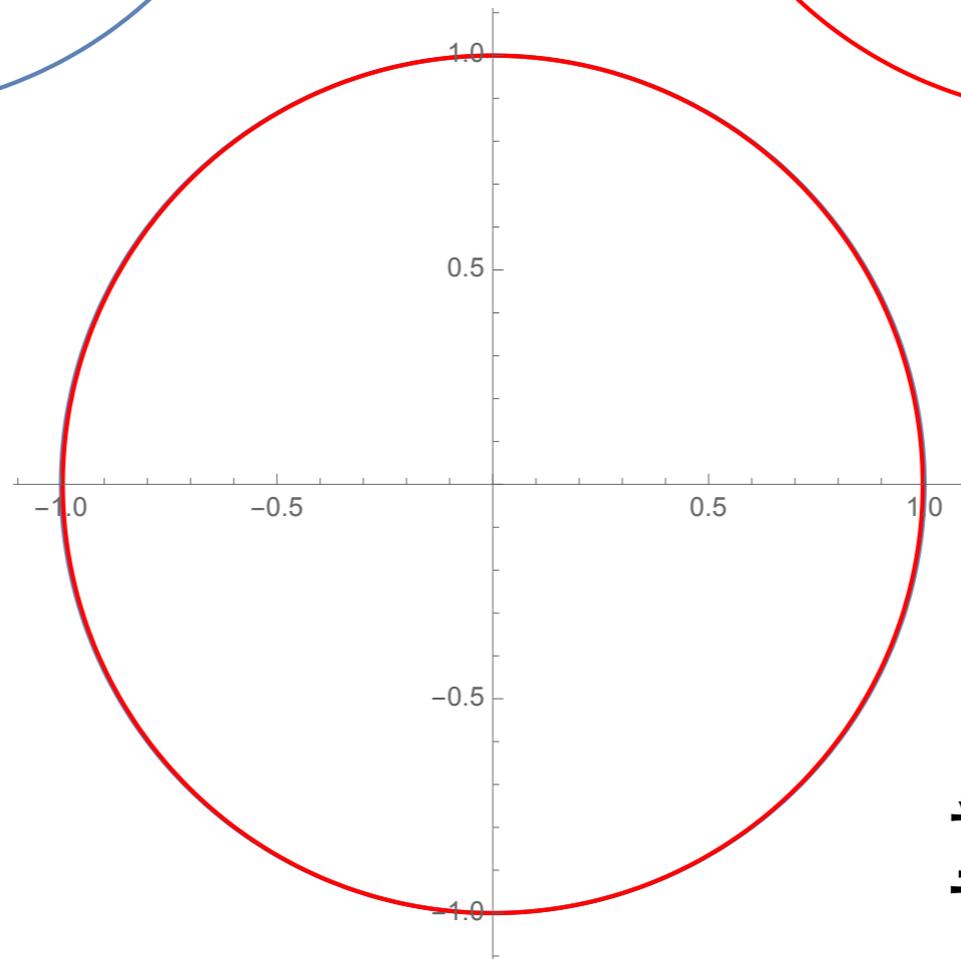
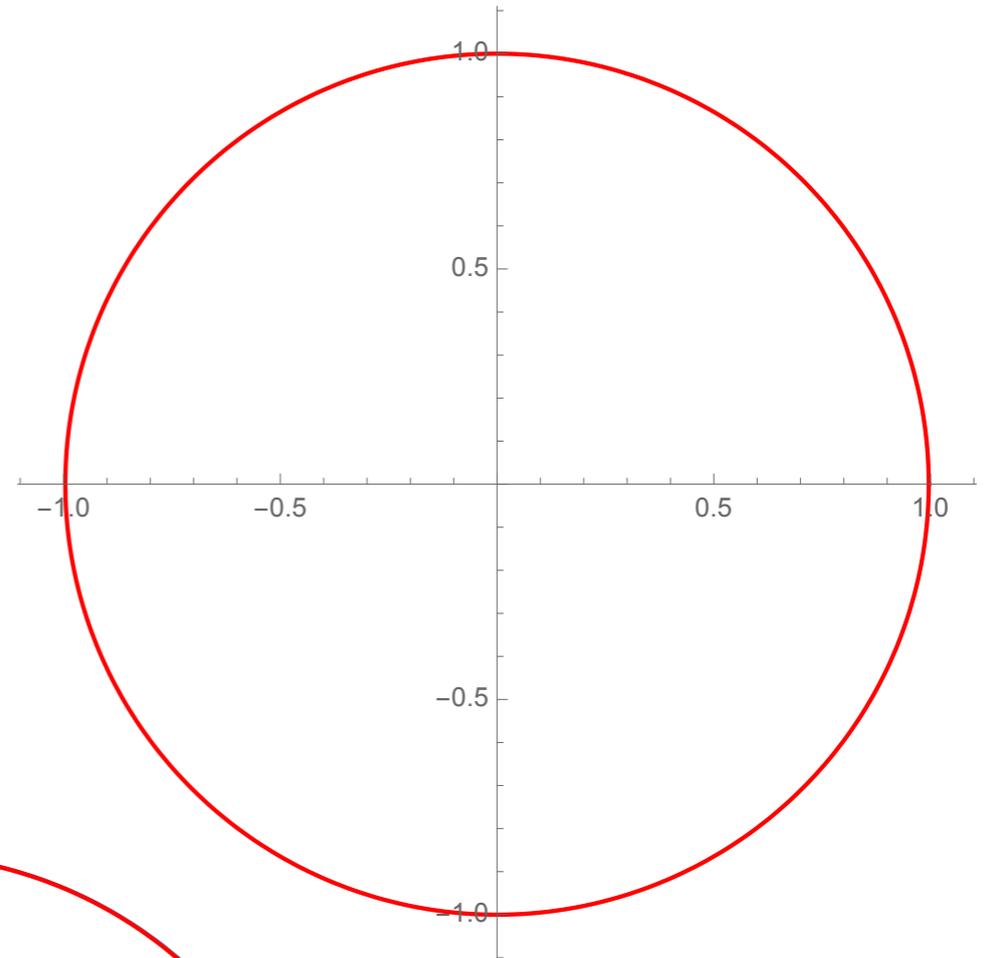
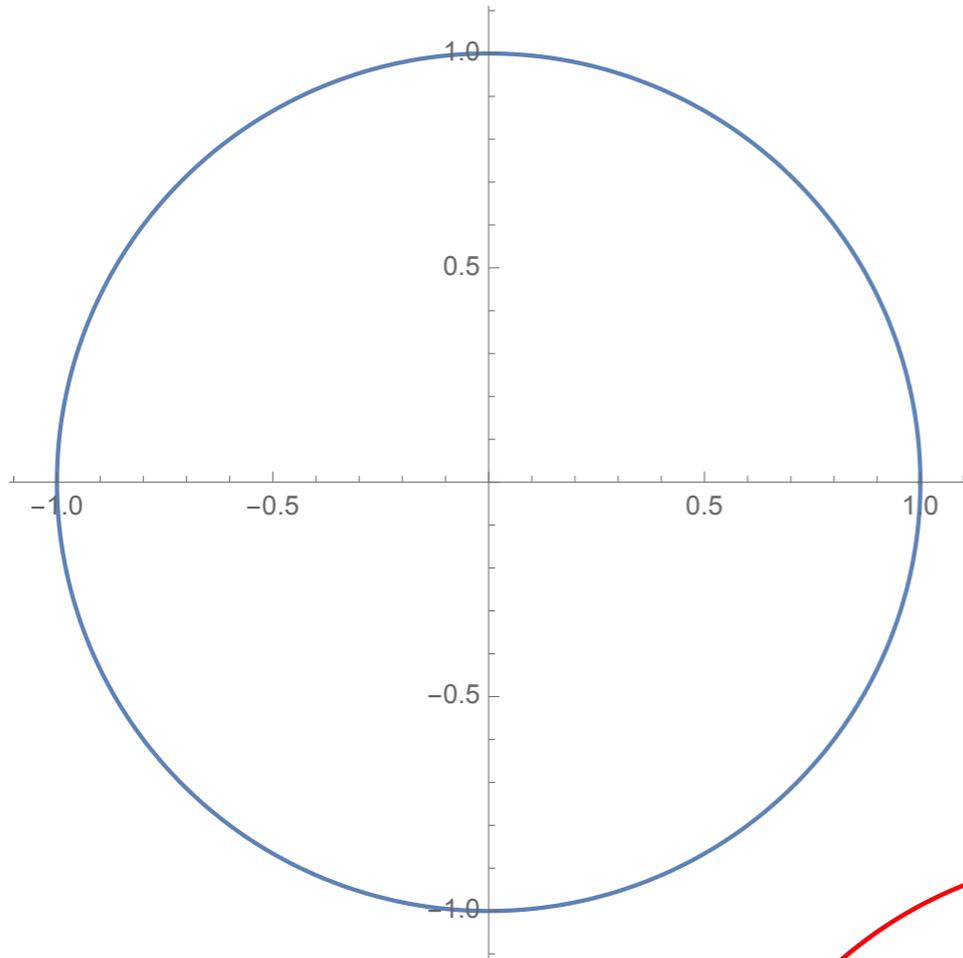
惑星の公転周期  $T$  の2乗と、惑星の描く楕円の長軸半径（長軸の長さの半分）  $R$  の3乗の比  $T^2/R^3$  は、惑星によらず一定である。

Johannes Kepler  
(1571-1630)



円

離心率0.09の円 (火星)



重ね合わせ

はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座



銀河中心



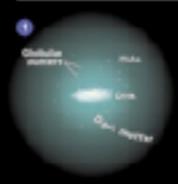
さそり座



# THE MILKY WAY

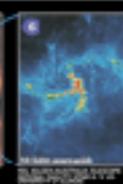
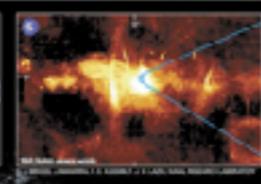
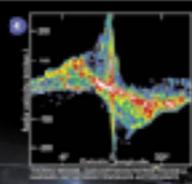
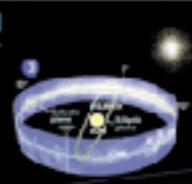


**H**ome galaxy of Earth, the Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars and their associated gas and dust form a beautiful glimmering veil. The Milky Way is a spiral-shaped system of a few hundred billion stars. Bright regions of recently formed stars highlight its arms, while older stars and their associated gas and dust form a beautiful glimmering veil. 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 and their associated gas and dust form a beautiful glimmering veil.



### GUIDE TO THE GALAXY

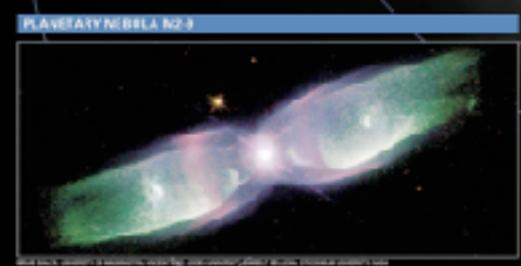
1. The bright, dense galactic core, or bulge, is the central region of the galaxy. It contains a concentration of stars and is the site of intense star formation.
2. The spiral arms are the regions of the galaxy where stars are born. They are composed of gas, dust, and young stars.
3. The galactic disk is the flat, circular region of the galaxy that contains most of the stars and gas.
4. The galactic halo is the region of the galaxy that surrounds the disk and contains older stars and globular clusters.



### ATLANTIC WAVE

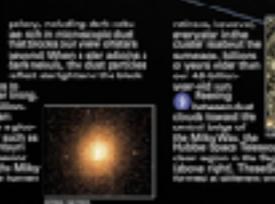
A bright band of stars in the sky is the Milky Way. It is the plane of the galaxy, seen from Earth. The stars are concentrated in a thin layer, and the galaxy is seen as a band of light across the sky. The stars are concentrated in a thin layer, and the galaxy is seen as a band of light across the sky.

This computer-generated image of the Milky Way is based on data from the National Science Foundation's Sloan Digital Sky Survey. It shows the distribution of stars and gas in the galaxy, and is a composite of many different observations.



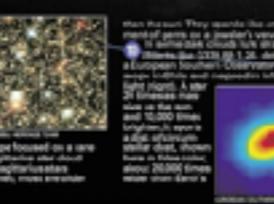
### PLANETARY NEBULA NGC 1

Planetary nebulas are clouds of gas and dust that are ejected from a star in the final stages of its life. They are often shaped like rings or disks, and are illuminated by the central star. NGC 1 is a ring-shaped planetary nebula that is about 1,000 light-years across.

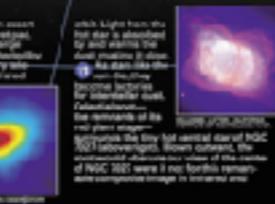


### LAGOON NEBULA

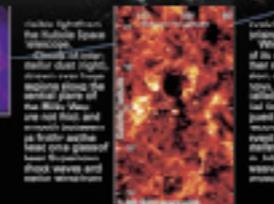
The Lagoon Nebula is a large, colorful nebula that is about 100 light-years across. It is one of the most prominent nebulae in the Milky Way, and is visible to the naked eye. The nebula is composed of gas and dust, and is illuminated by a central star.



Star clusters are groups of stars that are born together and are bound together by gravity. They can contain anywhere from a few dozen to millions of stars. Star clusters are often found in the spiral arms of galaxies, and are an important part of the galaxy's star formation history.



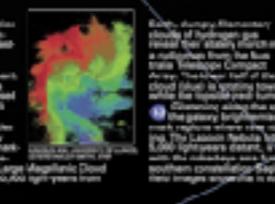
Stars are the main source of energy in the universe. They are composed of hydrogen and helium, and they fuse these elements together to produce energy. Stars come in many different sizes and colors, and they have different lifetimes. The Sun is a yellow dwarf star that is about 4.6 billion years old.



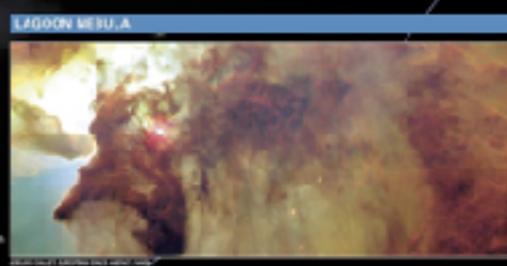
Star clusters are groups of stars that are born together and are bound together by gravity. They can contain anywhere from a few dozen to millions of stars. Star clusters are often found in the spiral arms of galaxies, and are an important part of the galaxy's star formation history.



Star clusters are groups of stars that are born together and are bound together by gravity. They can contain anywhere from a few dozen to millions of stars. Star clusters are often found in the spiral arms of galaxies, and are an important part of the galaxy's star formation history.



Star clusters are groups of stars that are born together and are bound together by gravity. They can contain anywhere from a few dozen to millions of stars. Star clusters are often found in the spiral arms of galaxies, and are an important part of the galaxy's star formation history.



### LAGOON NEBULA

The Lagoon Nebula is a large, colorful nebula that is about 100 light-years across. It is one of the most prominent nebulae in the Milky Way, and is visible to the naked eye. The nebula is composed of gas and dust, and is illuminated by a central star.

With new tools, astronomers are uncovering the hidden secrets of the Milky Way and other galaxies. They are discovering that galaxies are more complex and dynamic than we once thought. They are finding that galaxies are constantly changing and evolving, and that they are part of a larger cosmic web.

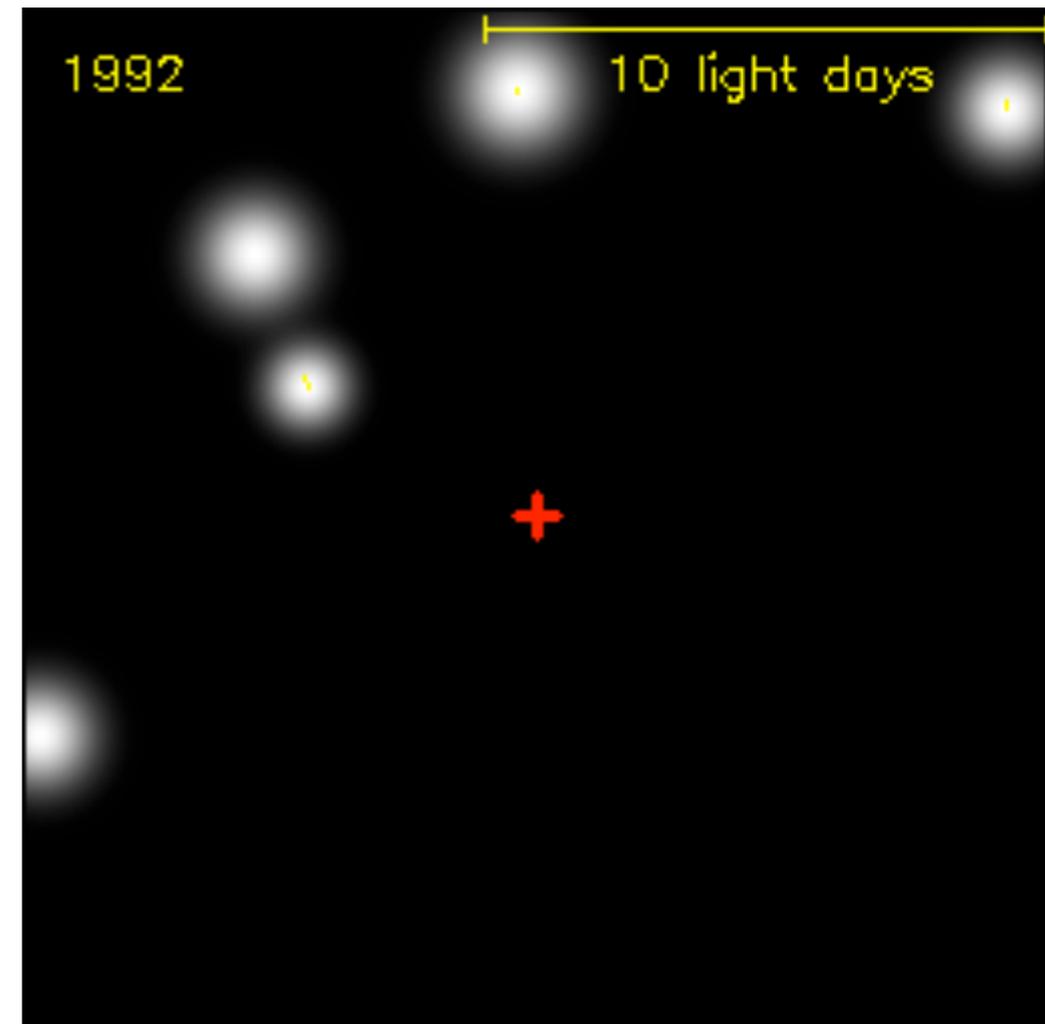
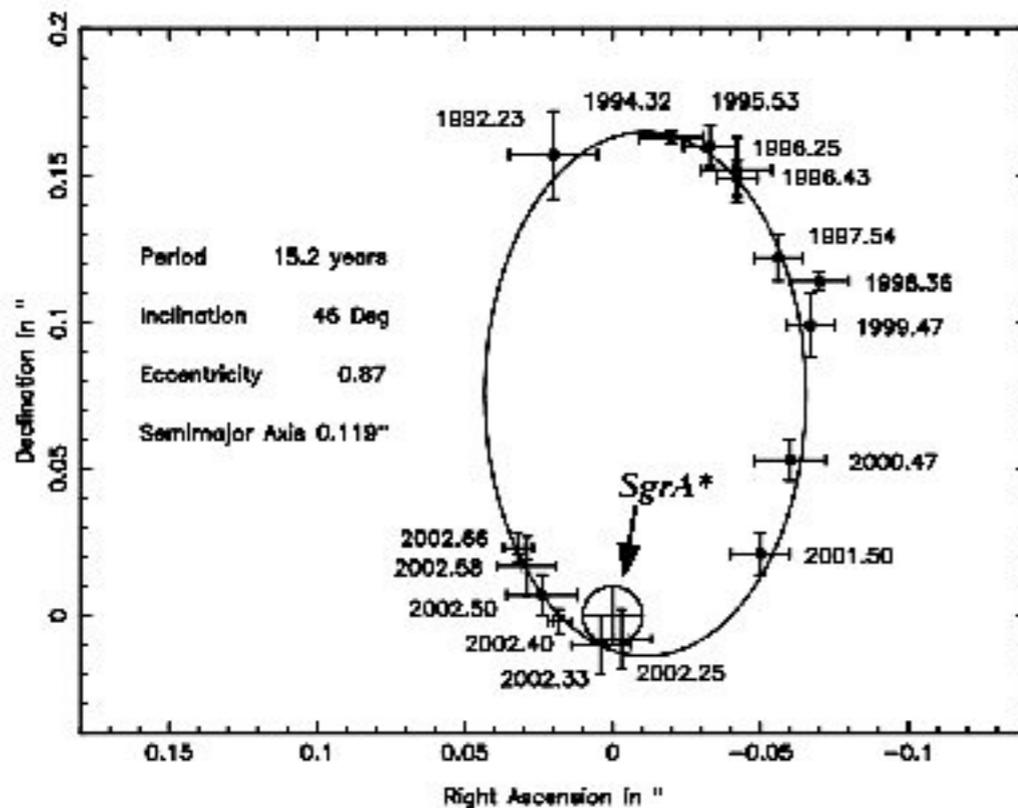
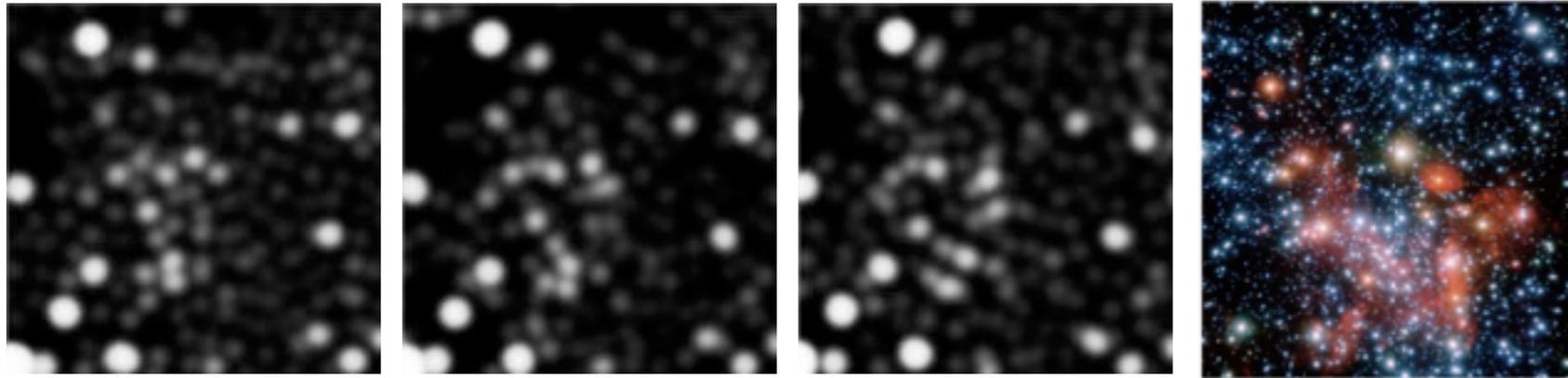
銀河系の中心には巨大ブラックホールがある



Zooming in on the centre of the Milky Way

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

# 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.extinctionshift.com/SignificantFindings08.htm>  
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

Letter

## Millimetre-wave emission from an intermediate-mass black hole candidate in the Milky Way

Tomoharu Oka , Shiho Tsujimoto, Yuhei Iwata, Mariko Nomura & Shunya Takekawa

*Nature Astronomy* (2017)

doi:10.1038/s41550-017-0224-z

[Download Citation](#)

Received: 16 March 2017

Accepted: 14 July 2017

Published online: 04 September 2017

60pc from SgrA\*  
 $10^5$  Msun

## 天の川銀河で中質量ブラックホール候補の実体を初めて確認

2017年9月5日 | [研究成果](#)



中質量ブラックホールによる重力散乱でガス雲が加速される様子の想像図 [オリジナルサイズ \(5.0MB\)](#)

慶應義塾大学理工学部物理学科の岡朋治（おかもとはる）教授らの研究チームは、アルマ望遠鏡を使用して、天の川銀河の中心部分に発見された特異分子雲「CO-0.40-0.22」の詳細な電波観測を行いました。この特異分子雲は、天の川銀河中心核「いて座A（エー・スター）」から約200光年離れた位置にあり、その異常に広い速度幅から内部に太陽の10万倍の質量をもつブラックホールが潜んでいる可能性が指摘されていました。観測の結果、特異分子雲「CO-0.40-0.22」の中心近くに、コンパクトな高密度分子雲と点状電波

# 近代物理学の進展

1600

1700

1800

1900

1905

天文学

ガリレイ  
ケプラー

電磁気学

ファラデー  
マクスウェル

熱学

光学

流体力学

力学

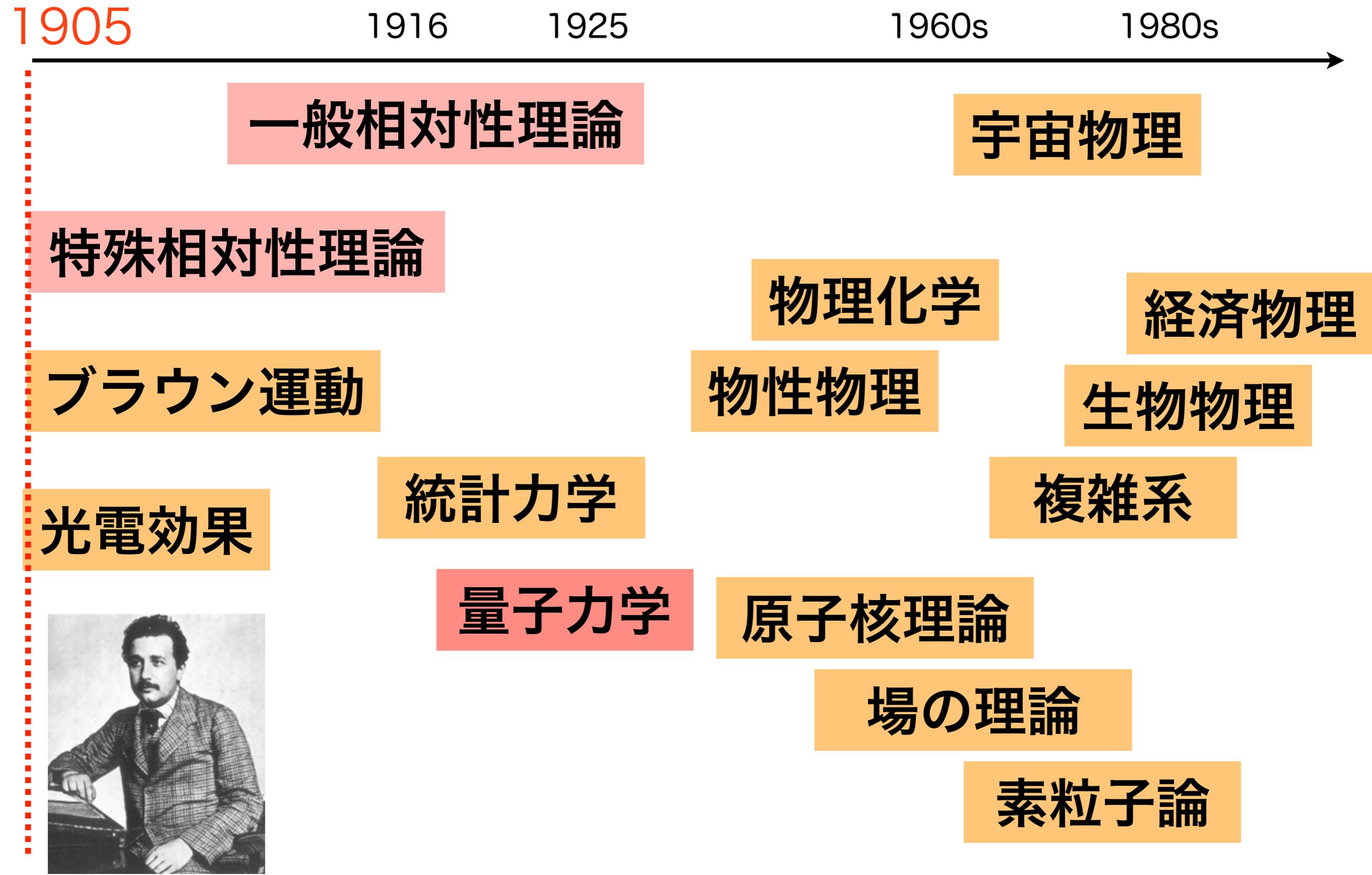
解析力学

ニュートン

ラグランジュ  
ハミルトン

物理学完成!?

# 現代物理学の発展



2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

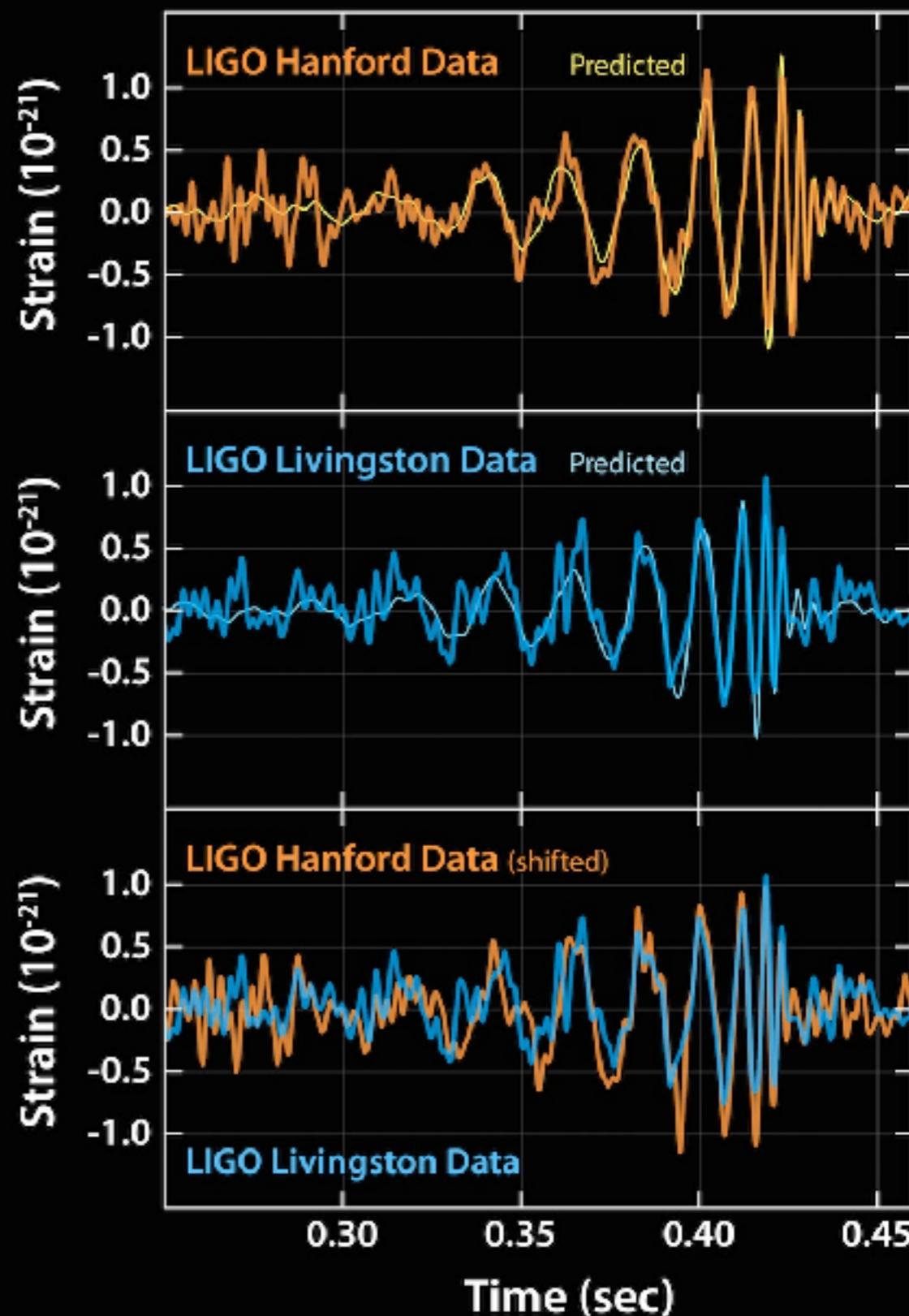


四国新聞だけ  
ちがった... 残念 (笑)



2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2015年9月14日



# contents

## 1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

## 2. 直接観測された重力波

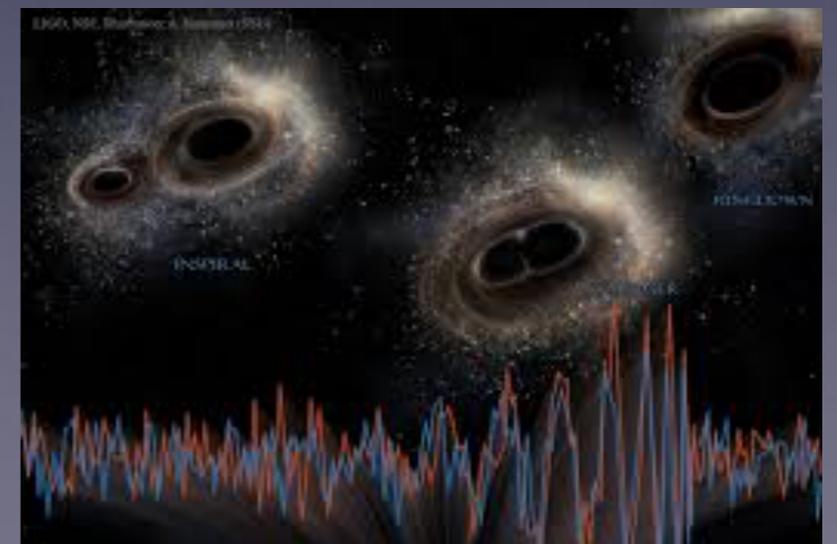
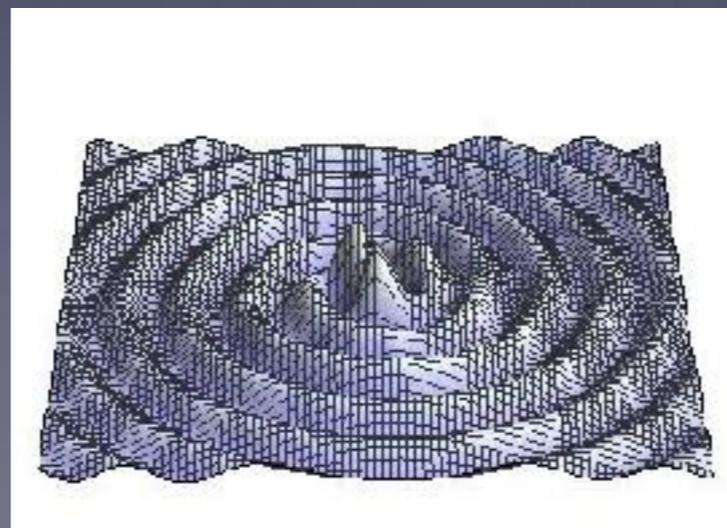
レーザー干渉計のしくみ

LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

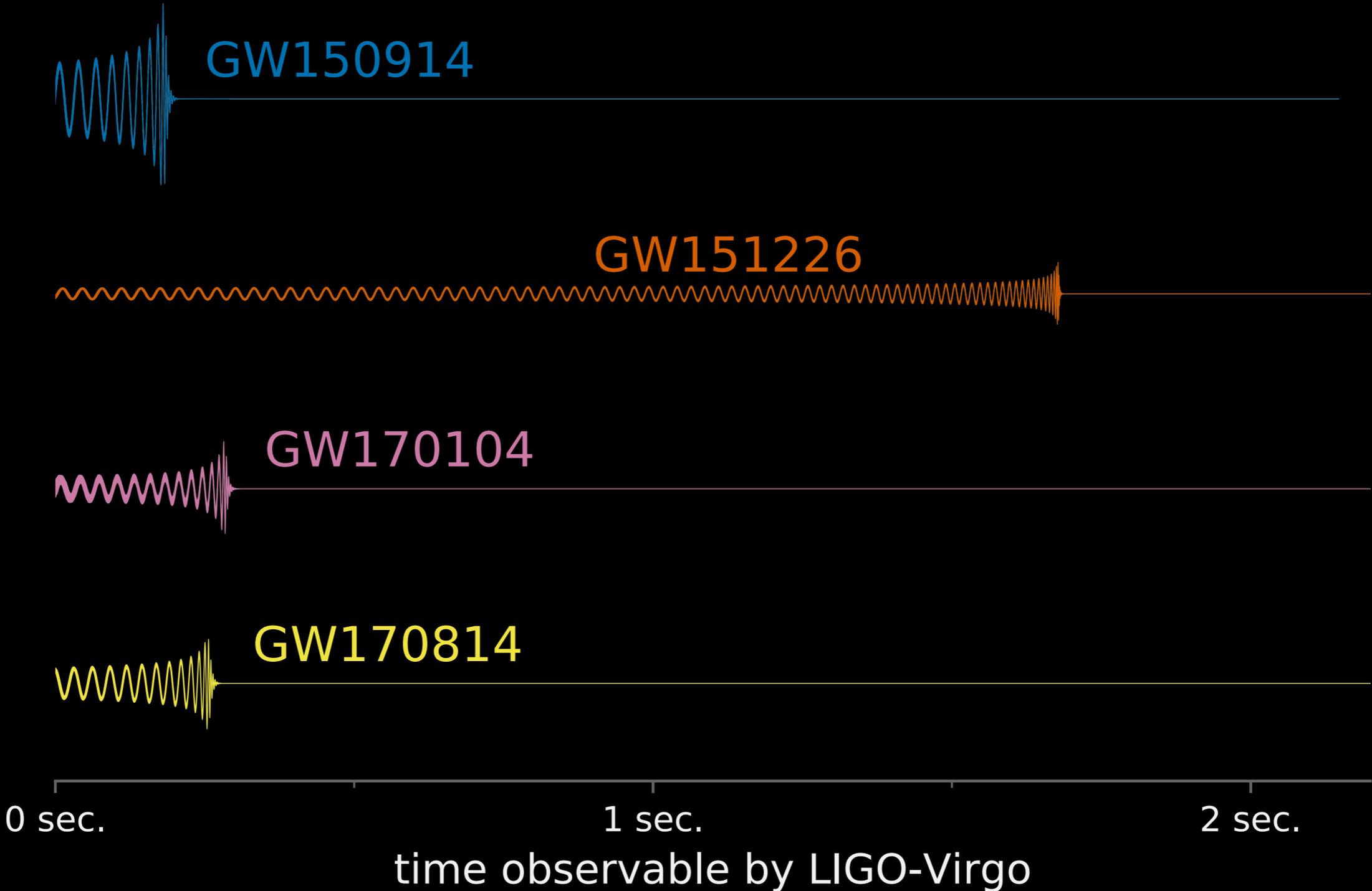
## 3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測

重力波観測から何がわかるか



# 2017年9月28日, LIGO-Virgoが4例目となる重力波を検出した, と発表した



# 重力の正体は？



by Fritz Mähler

<http://hikingartist.com/>



by Fritz Mähler



by Fritz Mähler



by Fritz Mähler



by Fritz Mähler

# 重力の正体は？



by Fritz Ahlefeldt

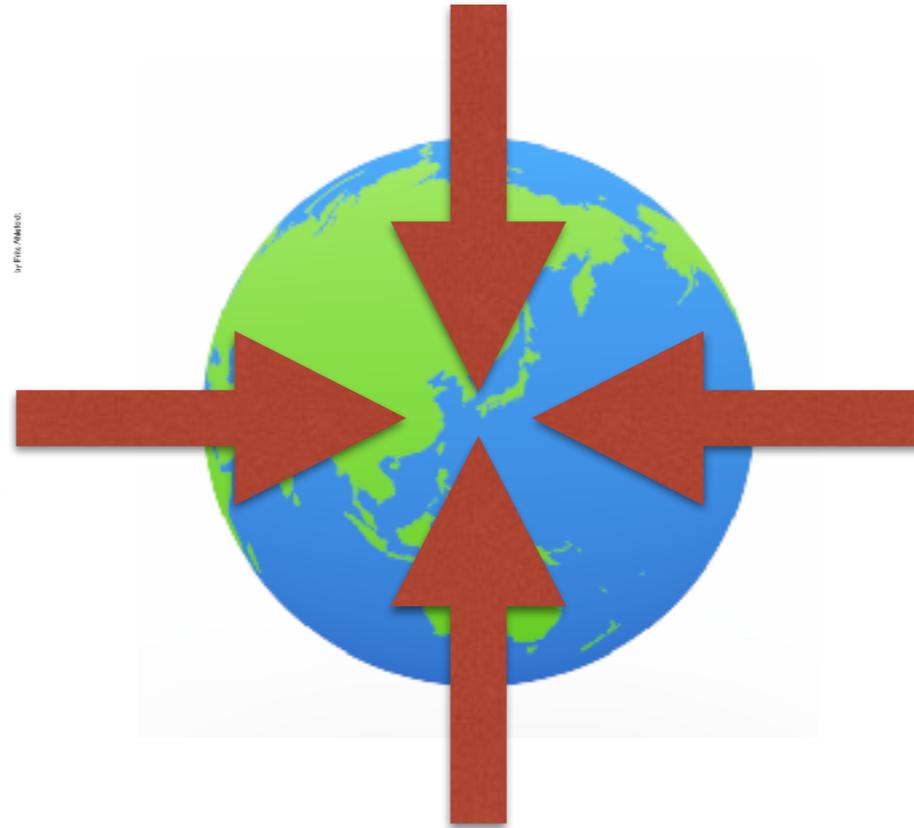
<http://hikingartist.com/>



by Fritz Ahlefeldt



by Fritz Ahlefeldt

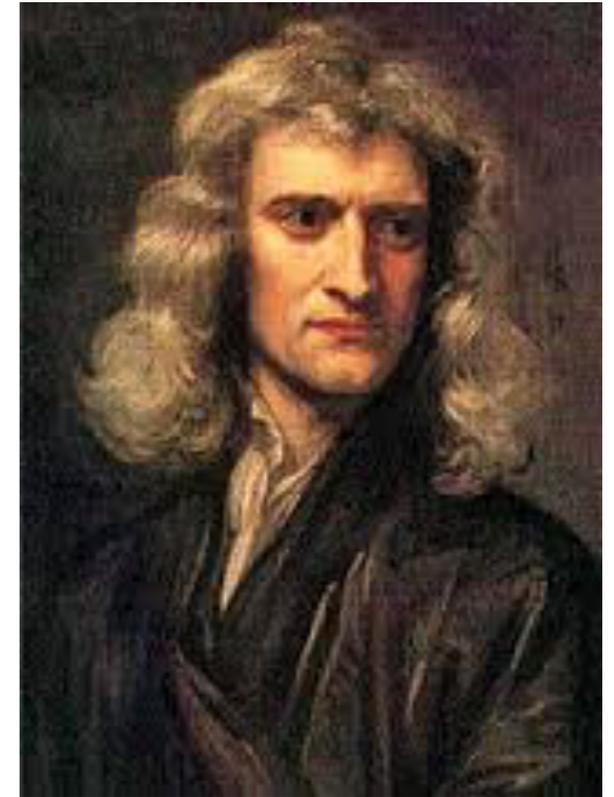
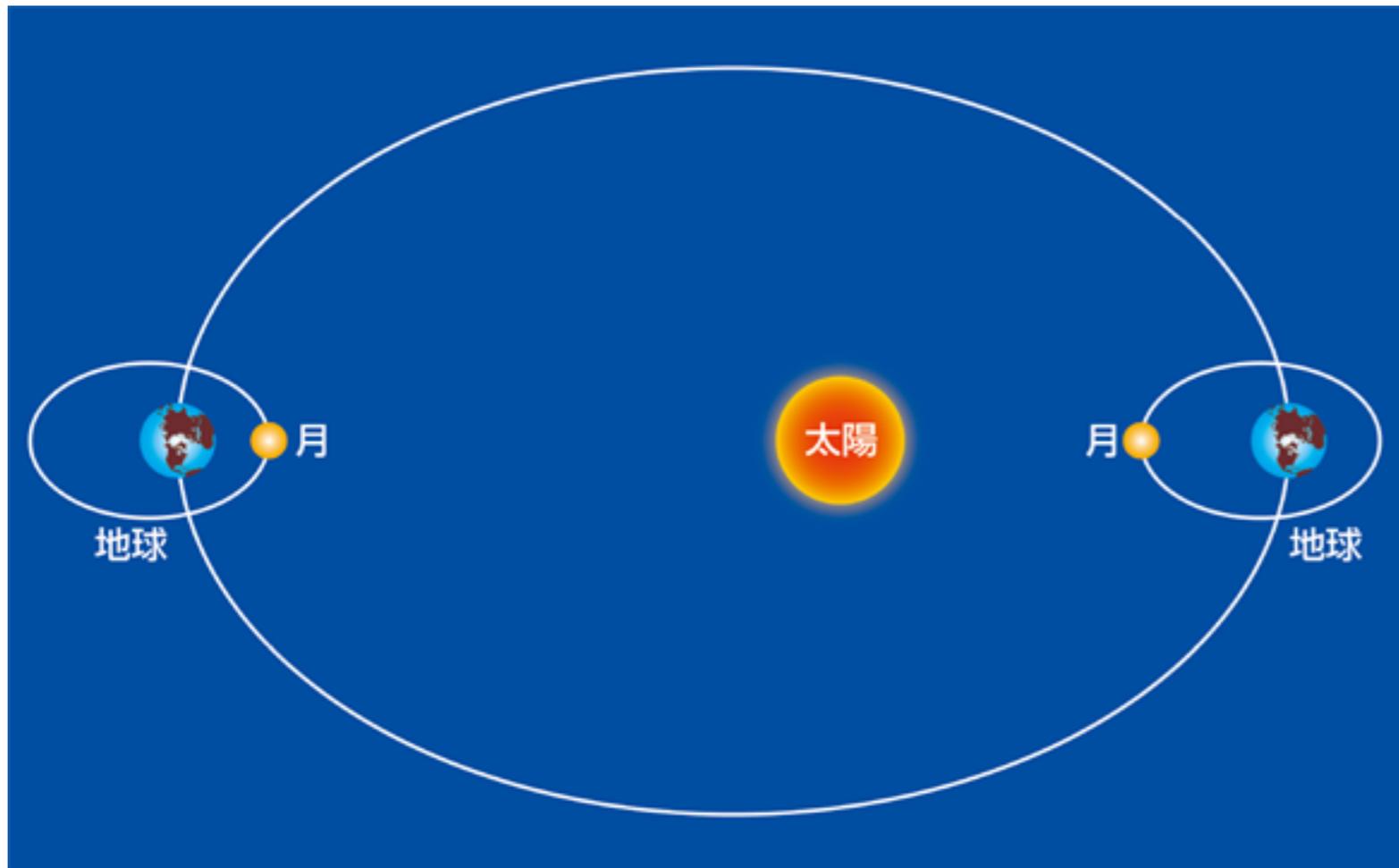


by Fritz Ahlefeldt



by Fritz Ahlefeldt

# 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？



by Fritz Ahlfeldt

<http://hikingartist.com/>

「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

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

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

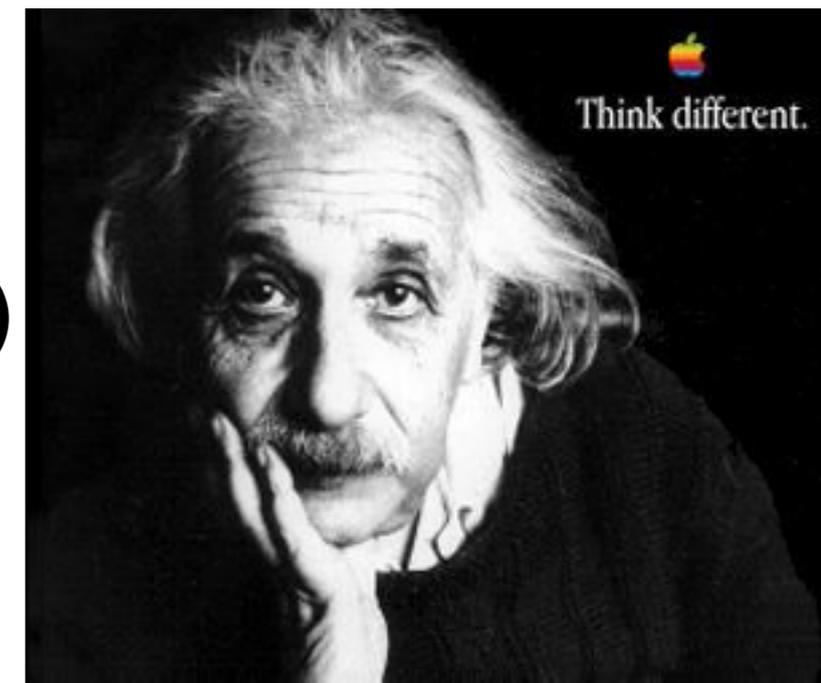
「時空のゆがみだ」

(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.

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.

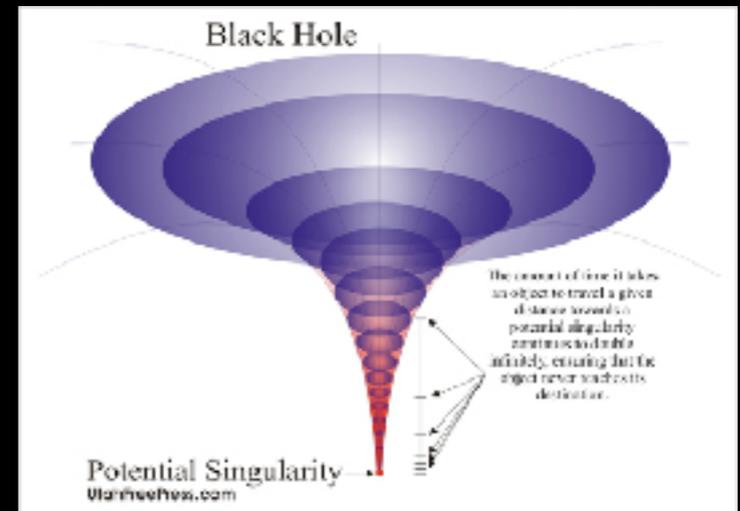
THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS AROUND. JUST A BENDING OF THE SPACE.



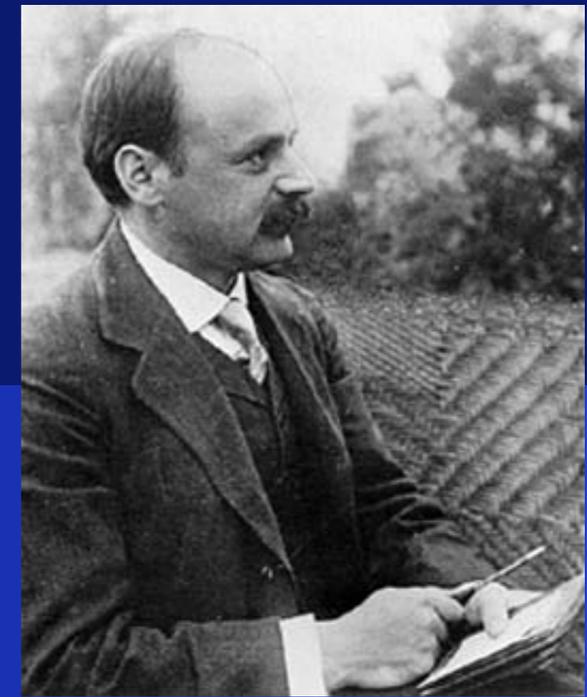
FailsShot



Subscribe UP



# アインシュタイン方程式の解 【シュワルツシルド解】



Schwarzschild (1916)  
球対称, 真空での方程式の厳密解

$$ds^2 = - \left( 1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \frac{dr^2}{1 - \frac{2GM}{c^2 r}} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

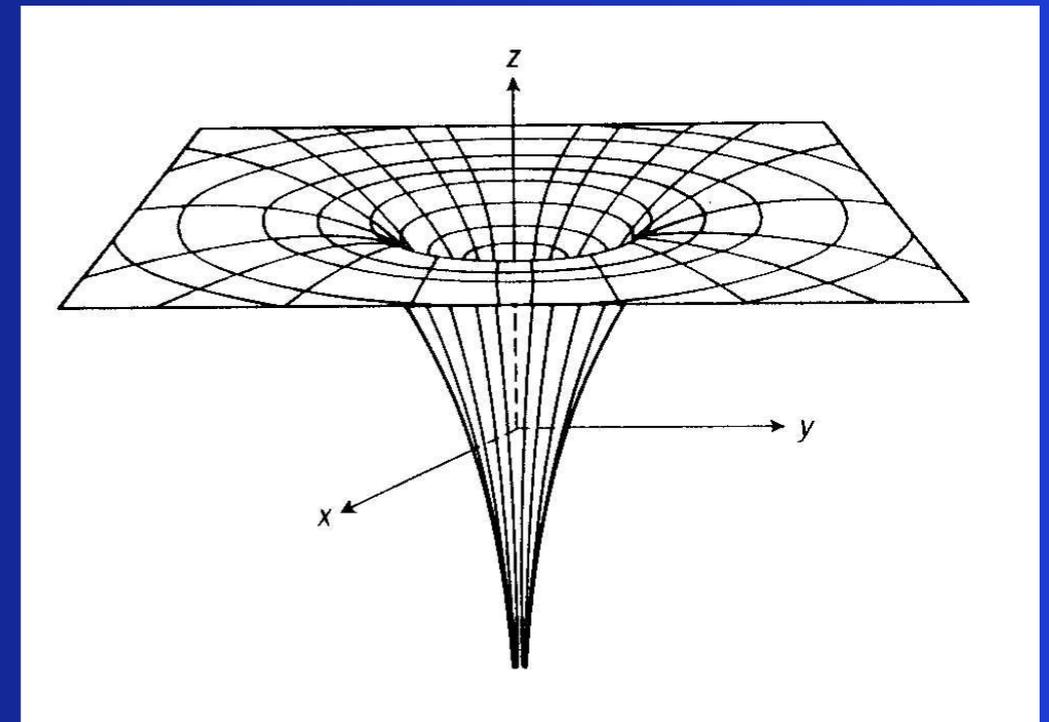
困ったことに, ……

$r=0$  で特異点

⇒ 今でも困ってる

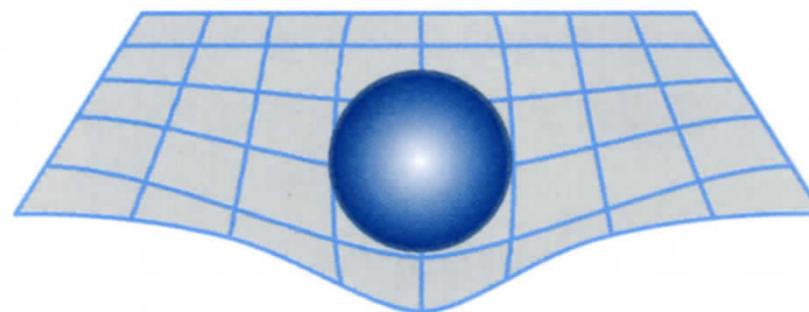
$r=2GM/c^2$  でも特異点

⇒ ブラックホールの境界

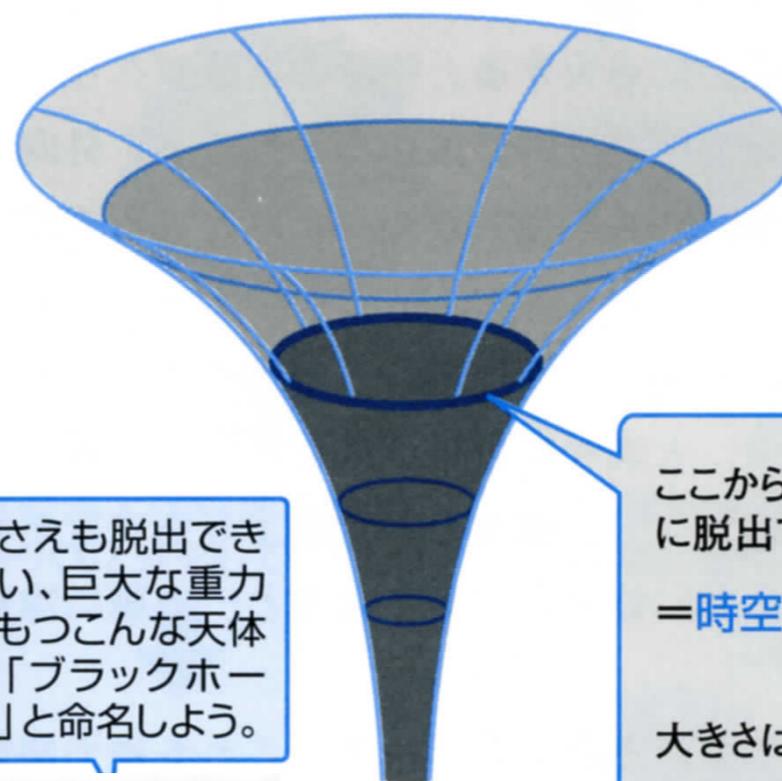


# ブラックホール

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ブラックホールに

## 星の輪廻

星(恒星)の一生を決めるのは、どれだけの質量があるか、そしてどのように燃えていくかの2つの要素だ。巨大な星は、核燃料の消費もはやく、数万年くらいの寿命しかないが、小さな星は現在の宇宙年齢の数倍も燃焼し続ける可能性がある。

褐色矮星\*はよく「星のなりそこない」と呼ばれる。水素の核融合反応に点火するほどの質量を持たなかった星の残骸だからだ。これらの星は、まわりの空間に熱を放出して、ゆっくりと死んでゆき、やがて消えてゆく。巨大なガス惑星と同じなので、「できすぎた惑星」と考えてもよいかもしれない。[\*訳注：矮星(dwarf)は、小さな星という意味。]

赤色矮星は小さいけれども水素の核融合を起こすことのできる星だ。低い温度で燃えるために、宇宙が今の何倍の年齢になったとしても薄暗く輝き続けることができる。宇宙にある多くの星は -- 全体のおよそ75パーセントの星は -- 赤色矮星である。

太陽型恒星(あるいは黄色矮星)は、水素とヘリウムの両方の核融合反応に点火できる十分な質量を持つ星だ。これらの星がヘリウムを失ったあとは赤色巨星になり、周囲のガス層を照らして惑星ガス雲とし、そしてやがて白色矮星となる。100億年以上の時間をかけて(もし宇宙がそれだけ長く続けば、だが)、これらの星はゆっくりと冷却して、褐色矮星になってゆく。

超巨星や極超巨星は、星の仲間たちからみても病的に肥満している星である。太陽の10倍から数百倍の大きさの質量のものは、燃料の消費も大きく、数十万年程度の寿命である。

宇宙におけるすべての重元素の合成主の星たちは、その星のコアでひとたび鉄が合成されると、超新星として爆発する。

痩せている星は中性子星やパルサーとなって生き延びるが、肥満している星は、自分の巨大な体重で押しつぶされてブラックホールに変貌する。

図にした星の大きさは正しいものではない。例えば、太陽の20倍の質量をもつ超巨星は、太陽の75倍の大きさになる。

褐色矮星  
質量：太陽の0.08倍  
表面温度：1000°C  
寿命(主系列)：不明

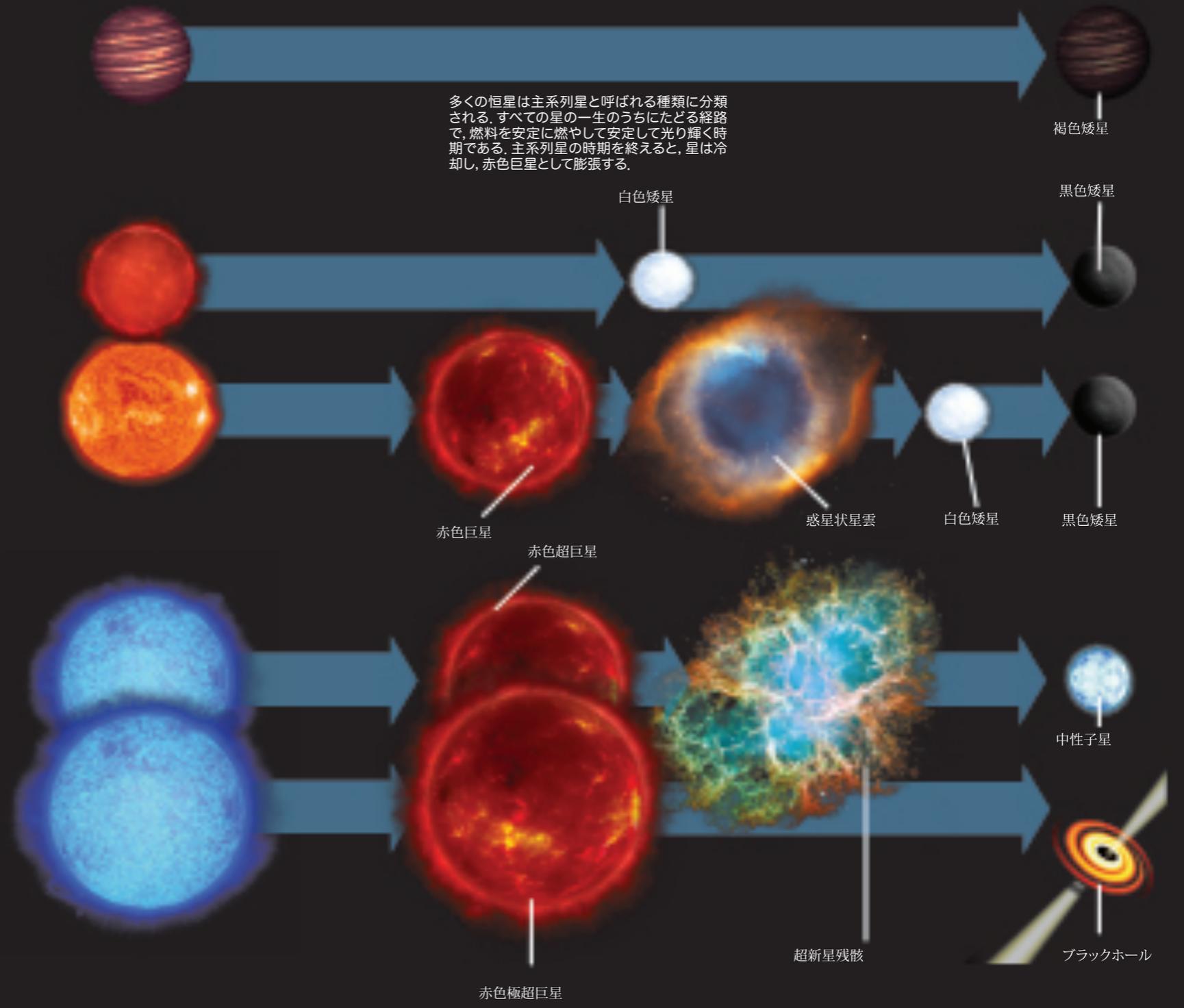
赤色矮星  
質量：太陽の0.2倍  
表面温度：3000°C  
寿命：10兆年

太陽型恒星  
質量：太陽の1倍  
表面温度：5000°C  
寿命：100億年

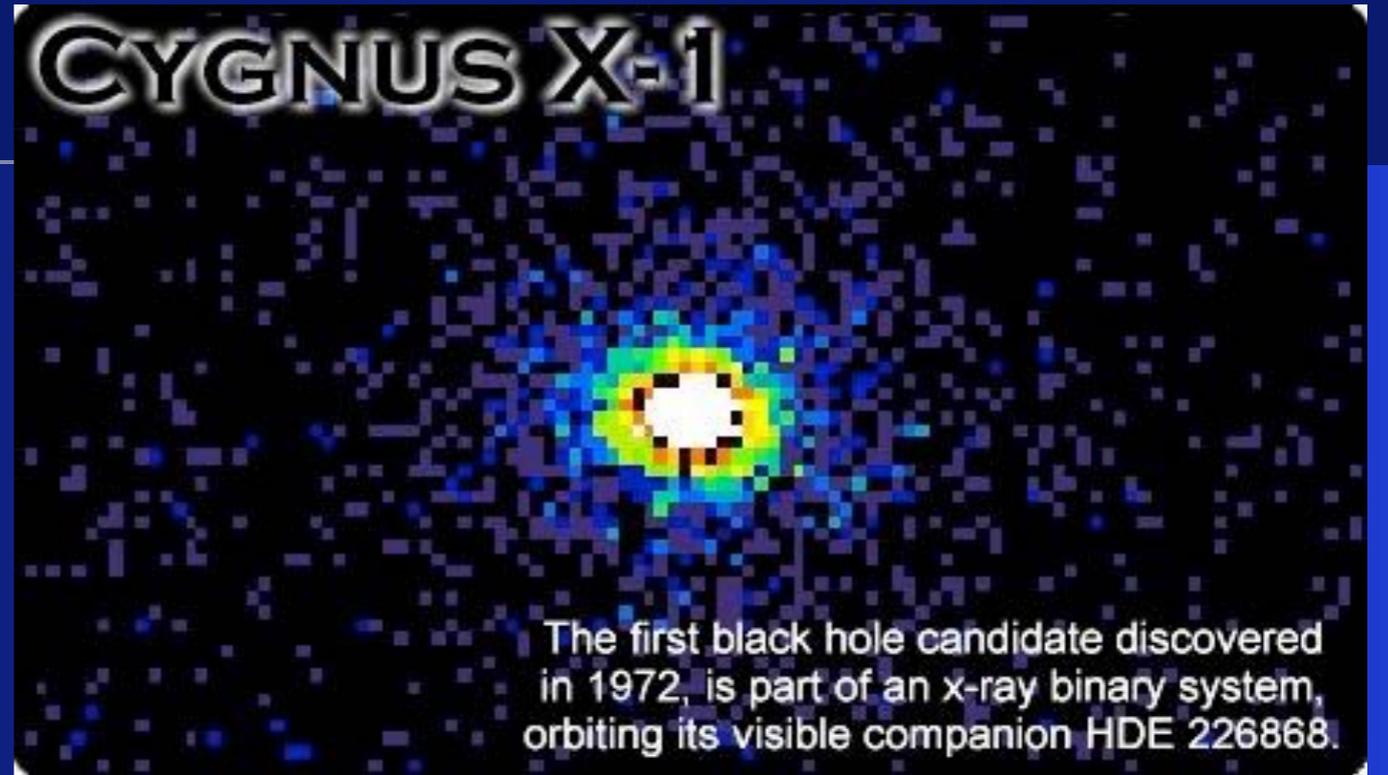
超巨星  
質量：太陽の20倍  
表面温度：12000°C  
寿命：500万年

極超巨星  
質量：太陽の100倍  
表面温度：40000°C  
寿命：100万年

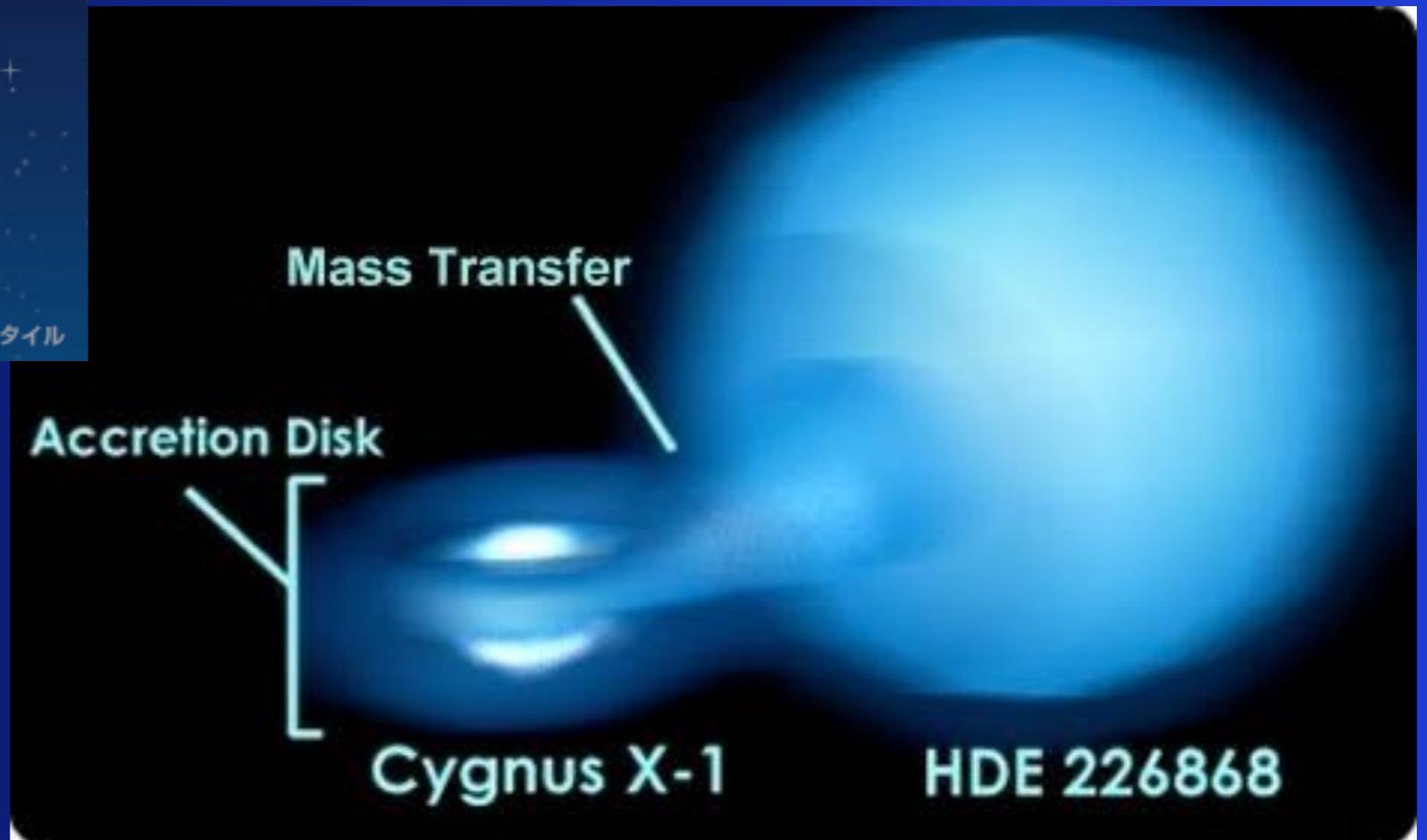
多くの恒星は主系列星と呼ばれる種類に分類される。すべての星の一生のうちにとどる経路で、燃料を安定に燃やして安定して光り輝く時期である。主系列星の時期を終えると、星は冷却し、赤色巨星として膨張する。



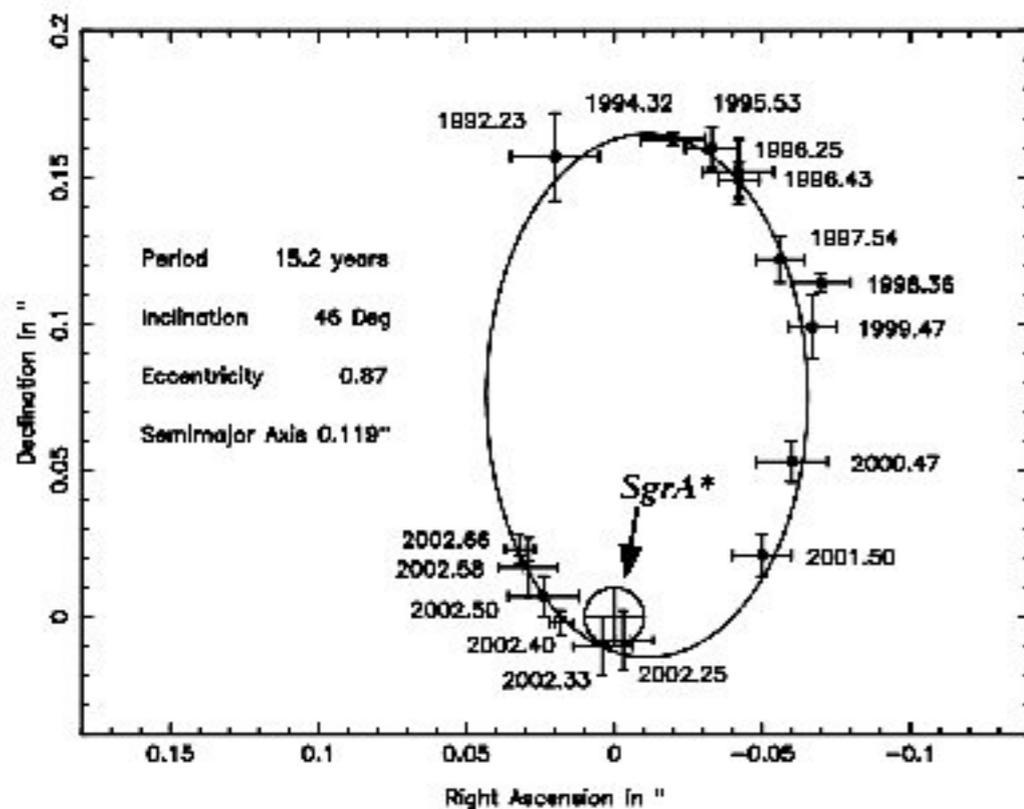
# はくちょう座 X-1はブラックホール



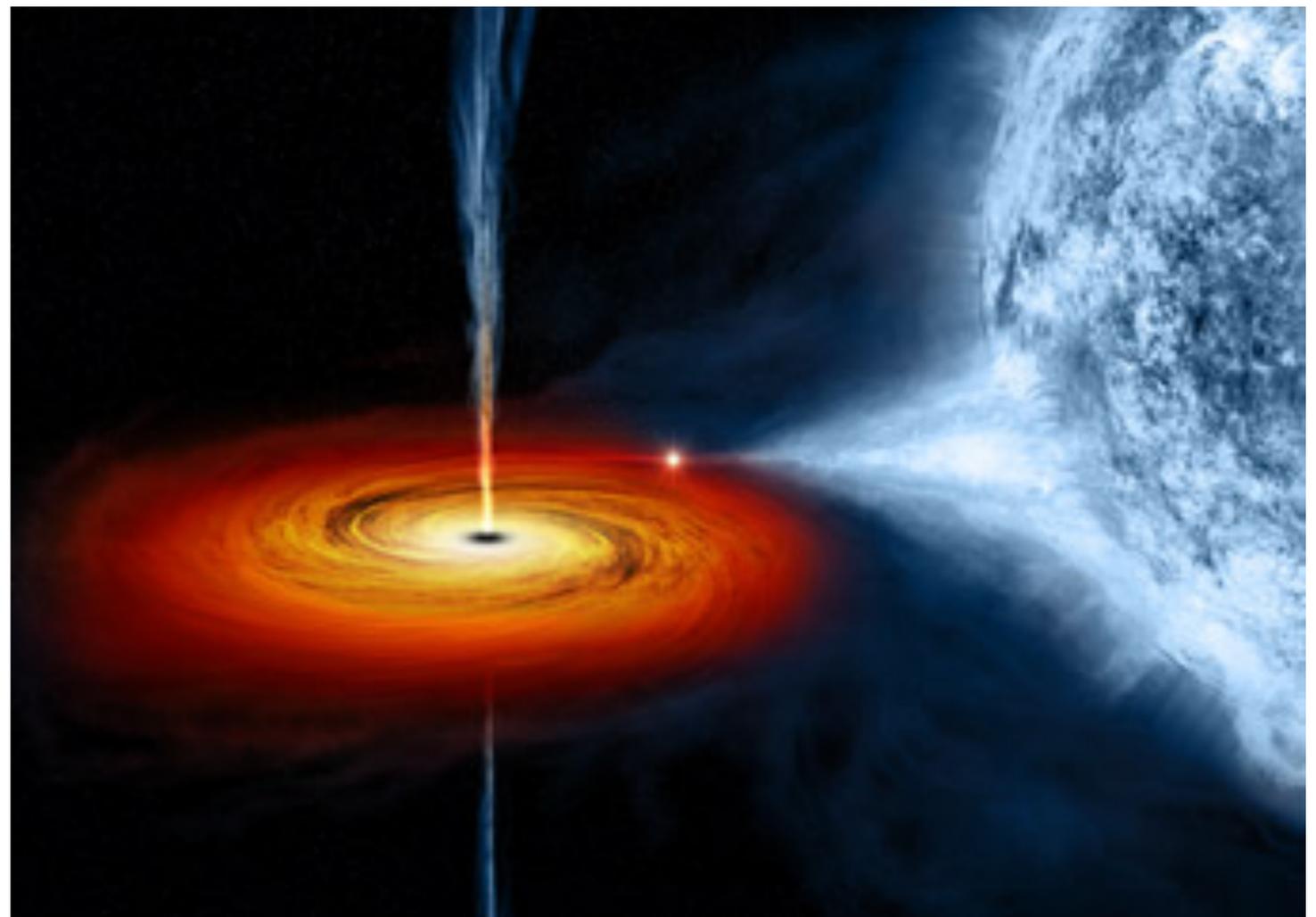
6000光年先



# ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？



周りの星の激しい運動から  
強い重力源であることがわかる

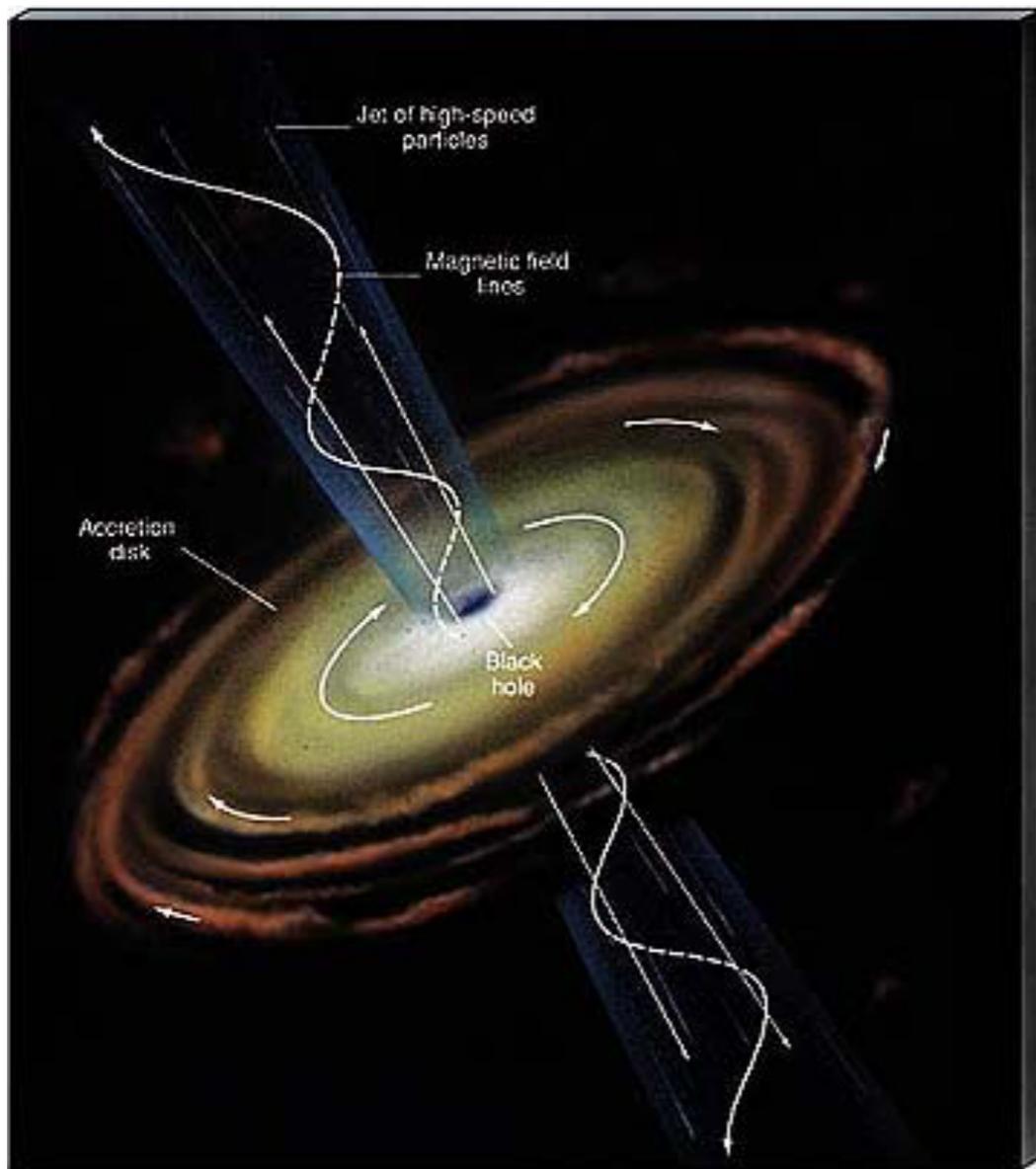


落下していくガスが  
高い温度で輝く

(降着円盤 accretion disk)

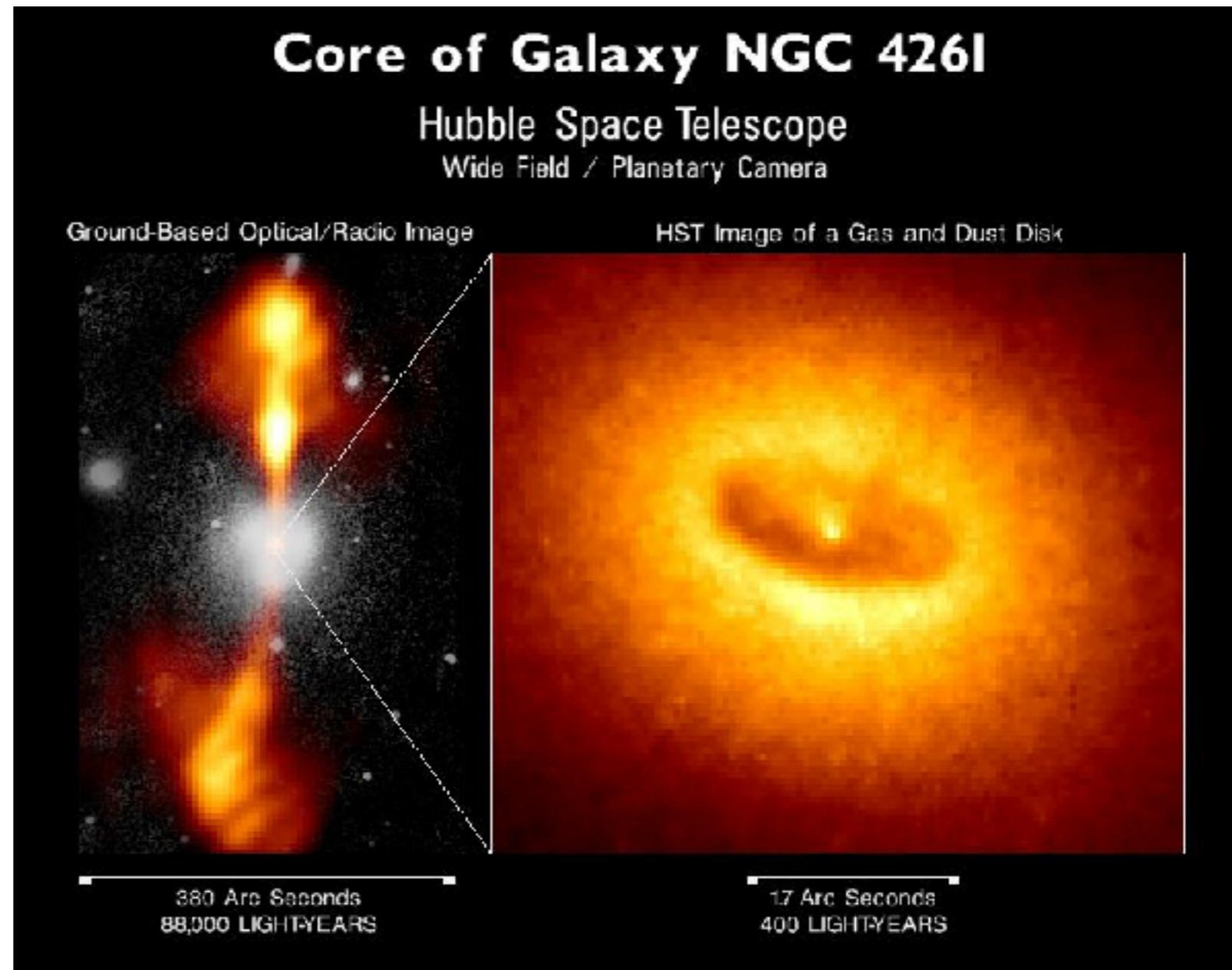
想像図

# ブラックホールの存在はどのようにしてわかるのか？

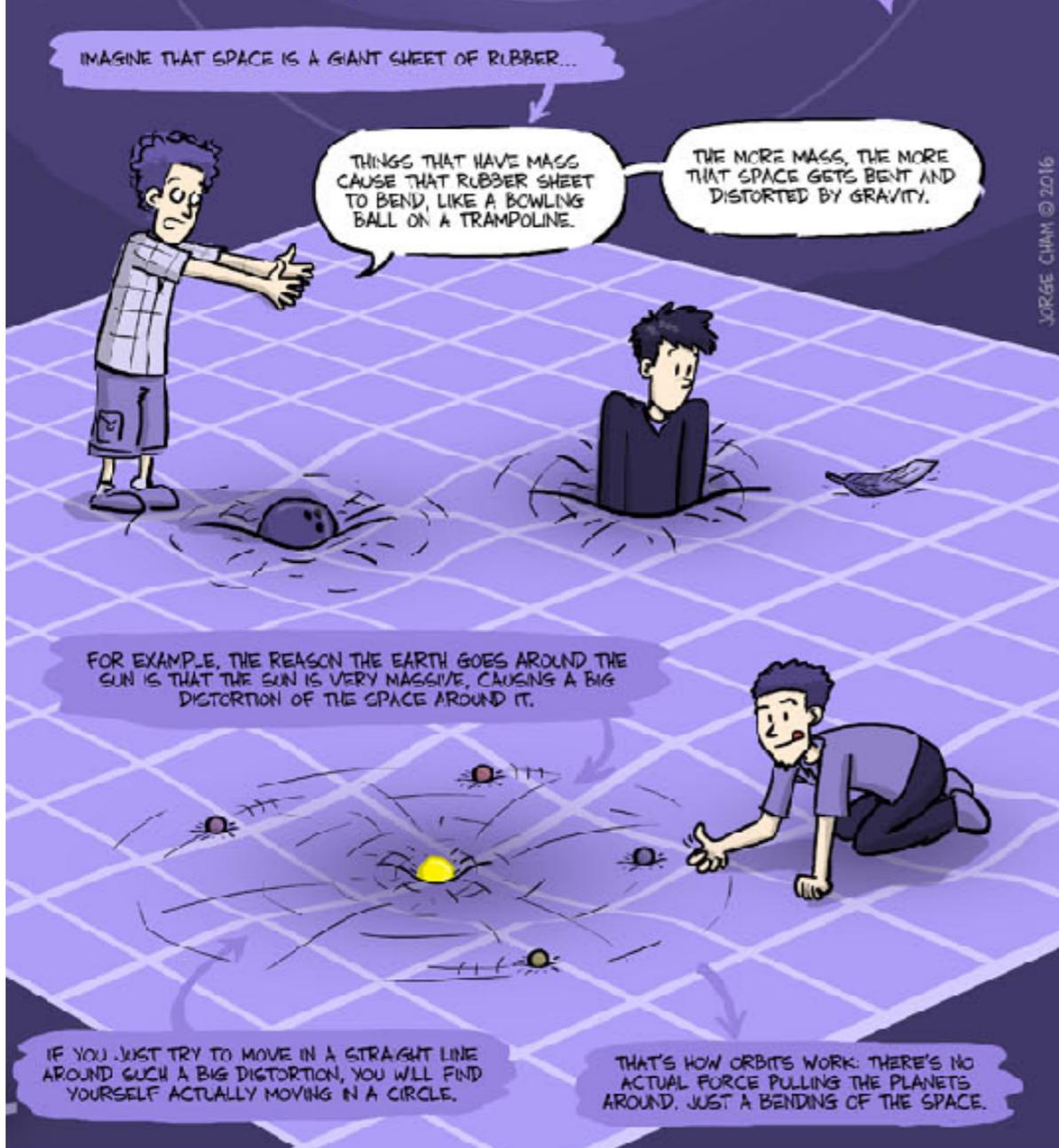


<http://www2.astro.psu.edu/users/rbc/a1/lec26n.html>

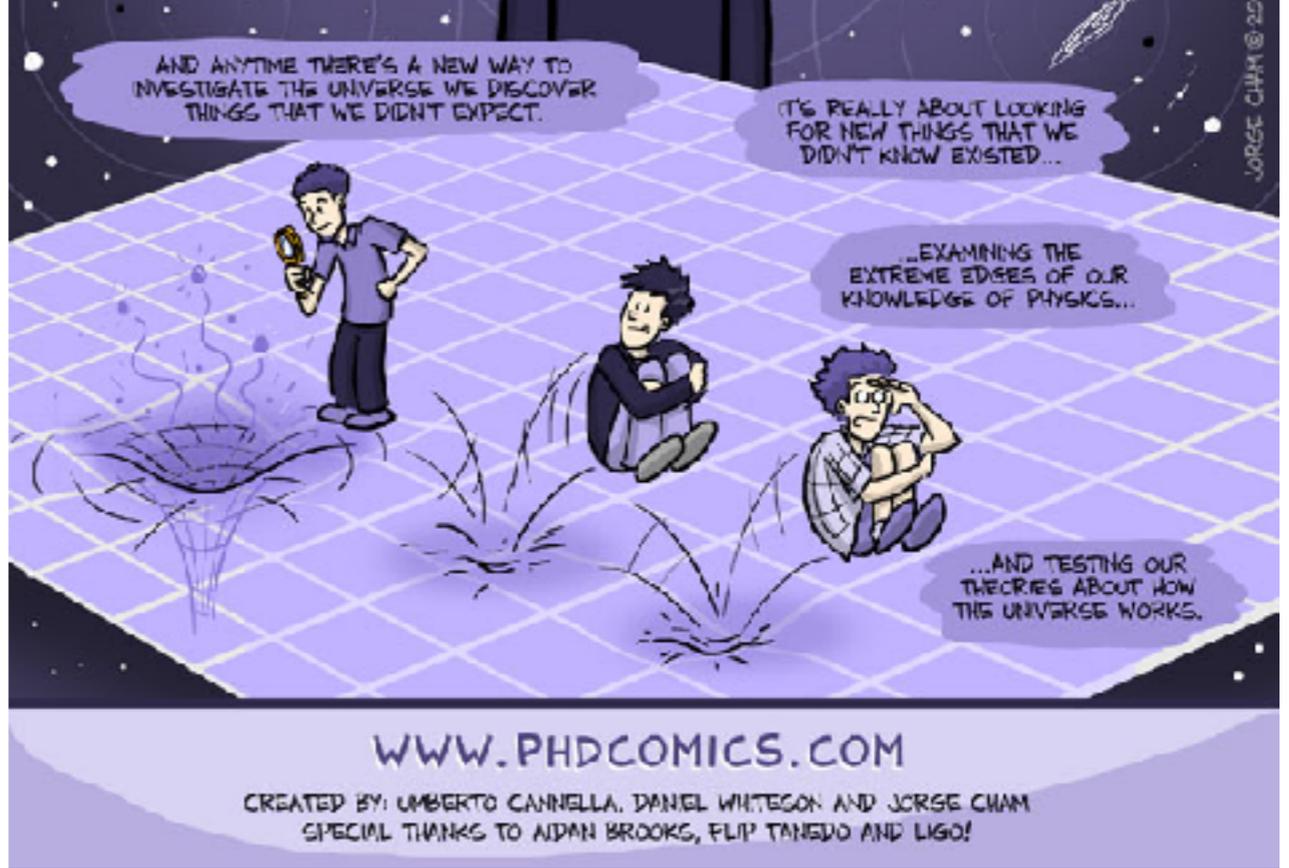
想像図



銀河中心からジェットが吹き出す  
(活動銀河核 active galactic nuclei)



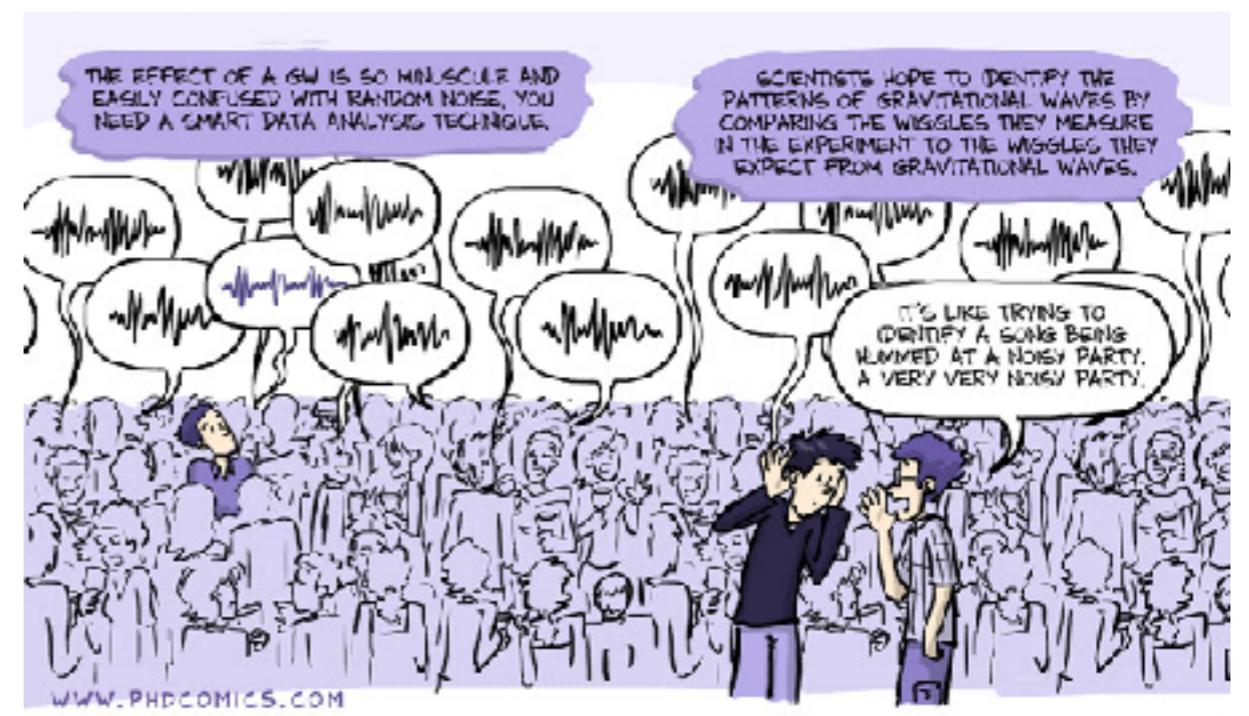
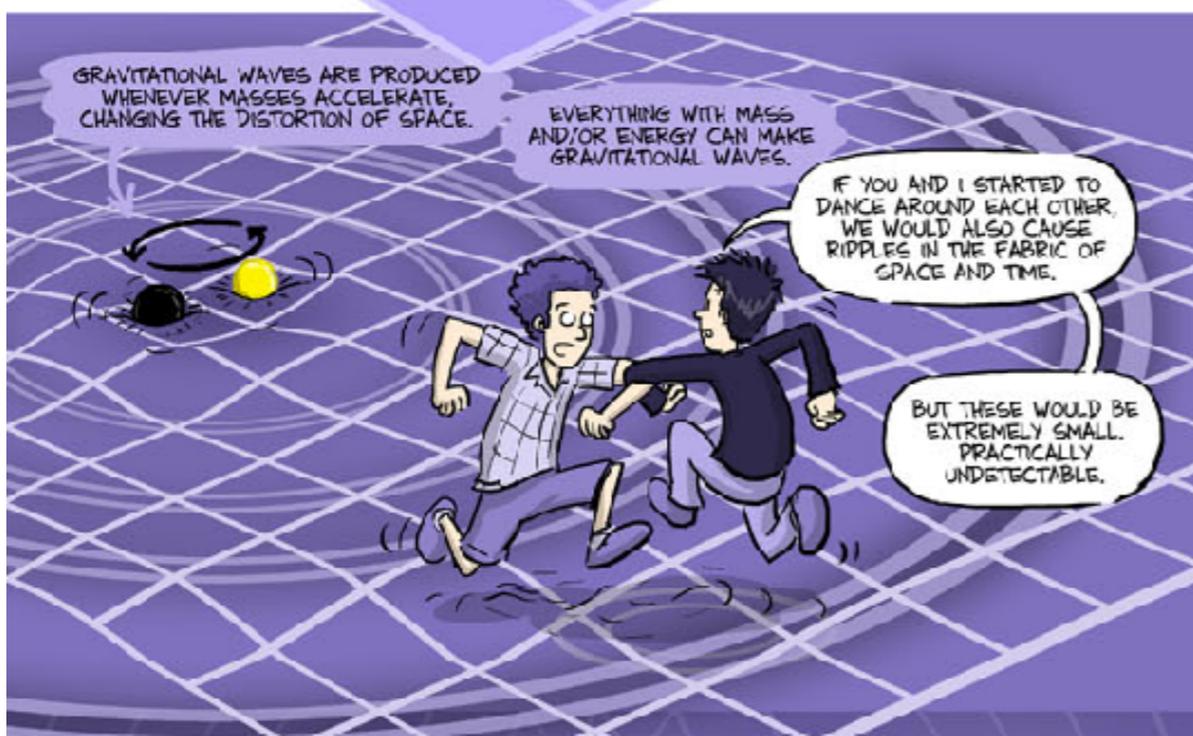
JORGE CHAM © 2016



JORGE CHAM © 2016

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

“gravitational waves explained”

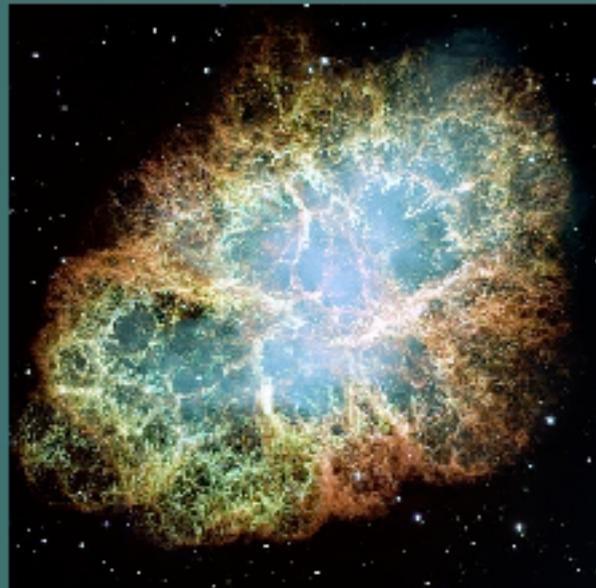


# 重力波の波源

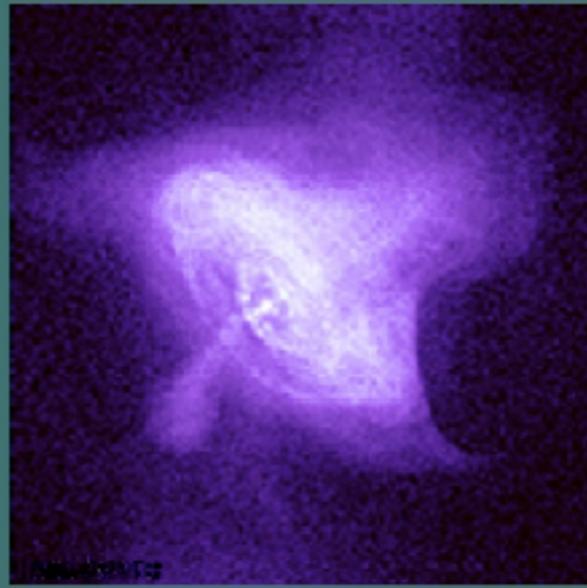
sources of gravitational wave

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

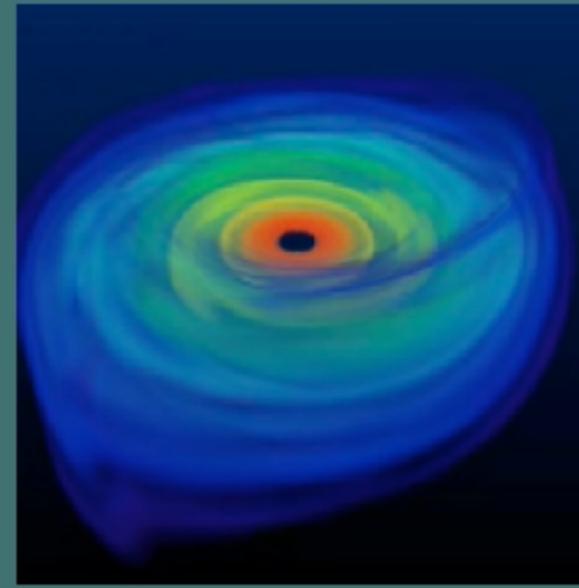
超新星爆発 (写真出典: NASA)



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

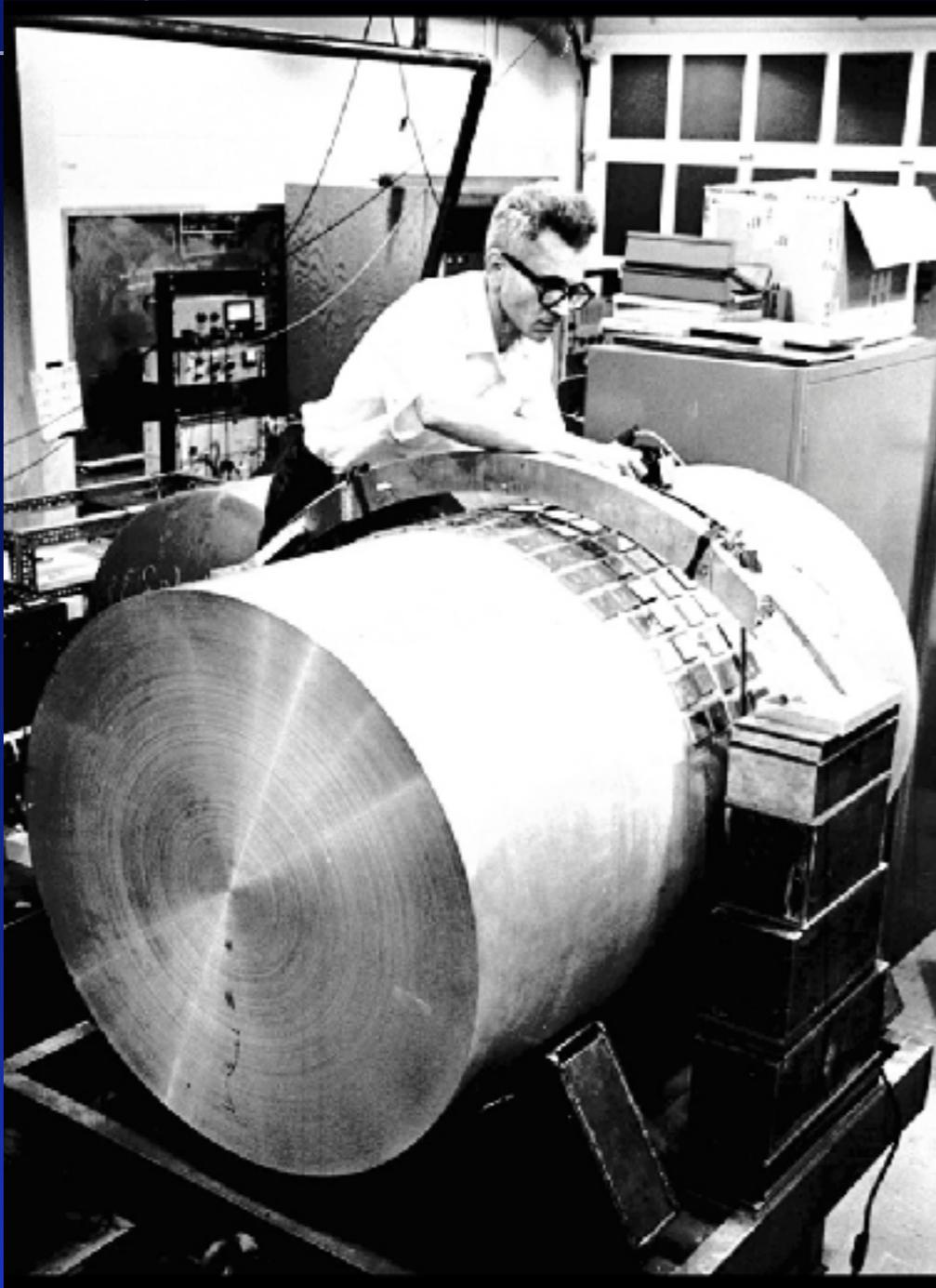
振幅が小さい

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 wave<sup>2</sup>. 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.

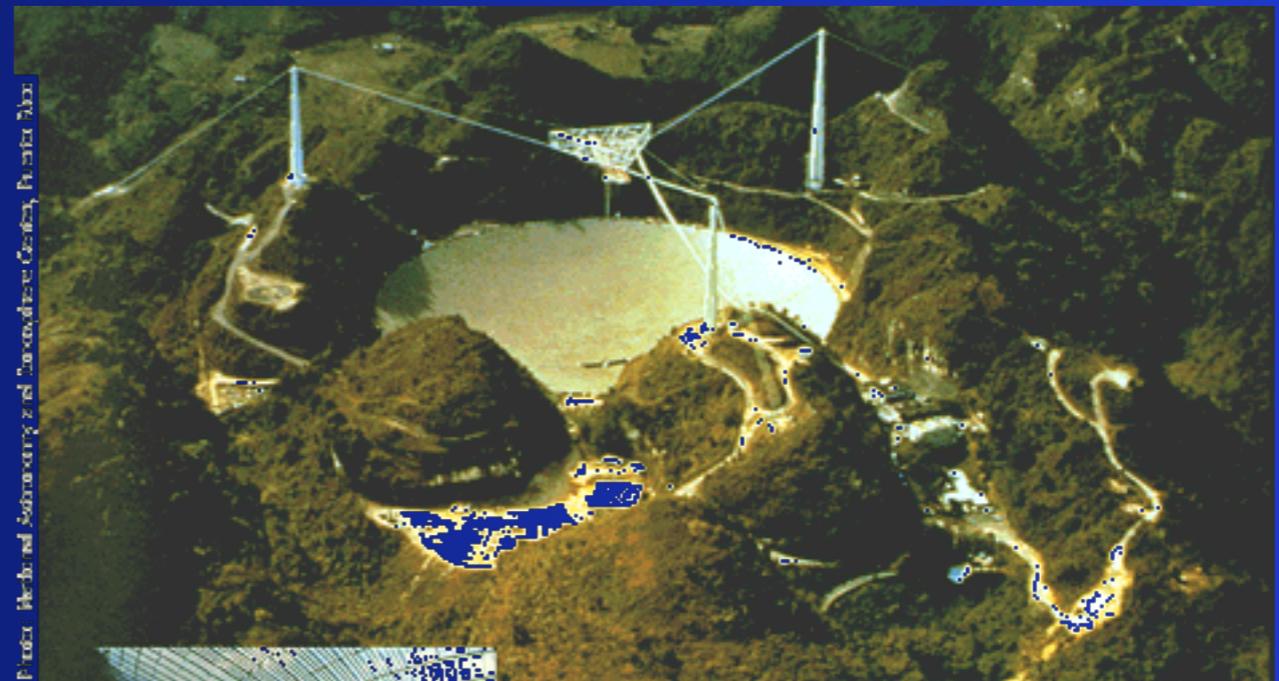
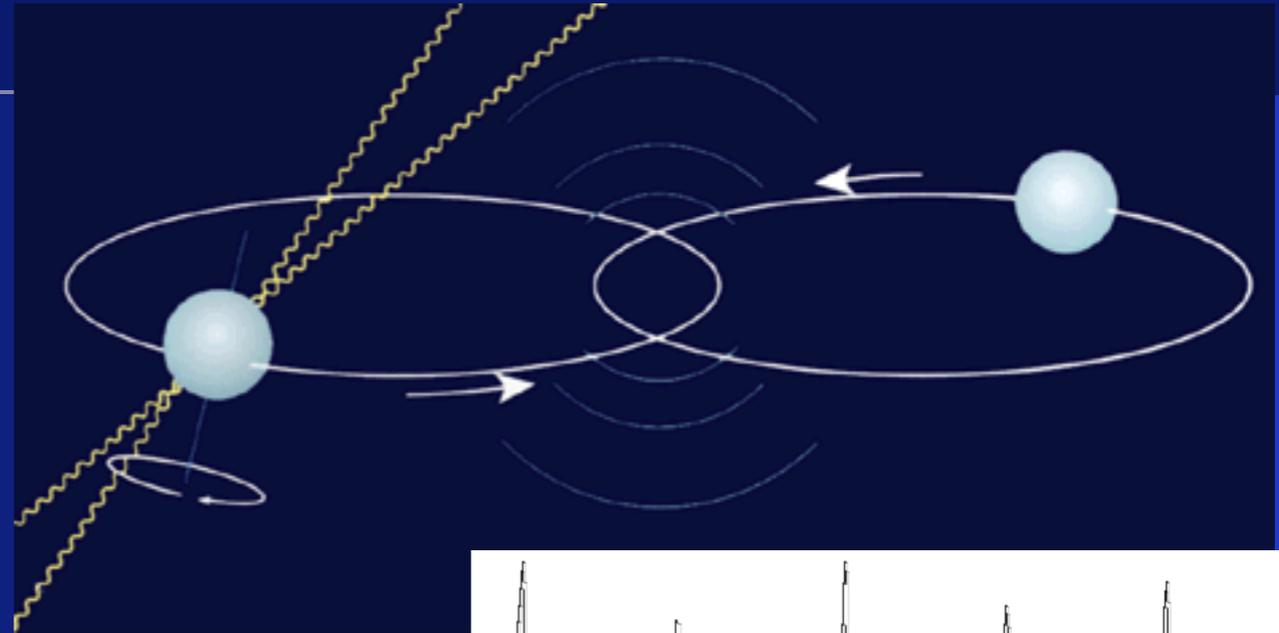
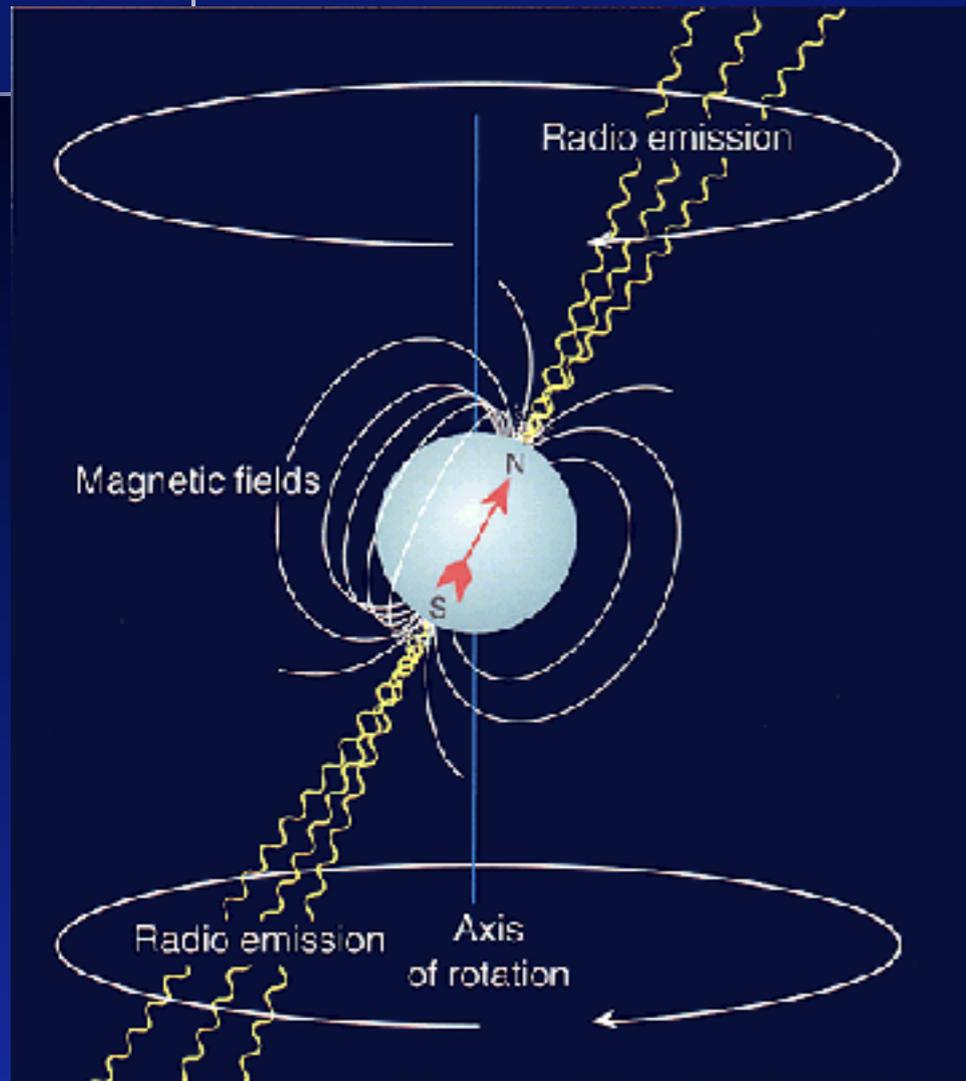
68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

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)

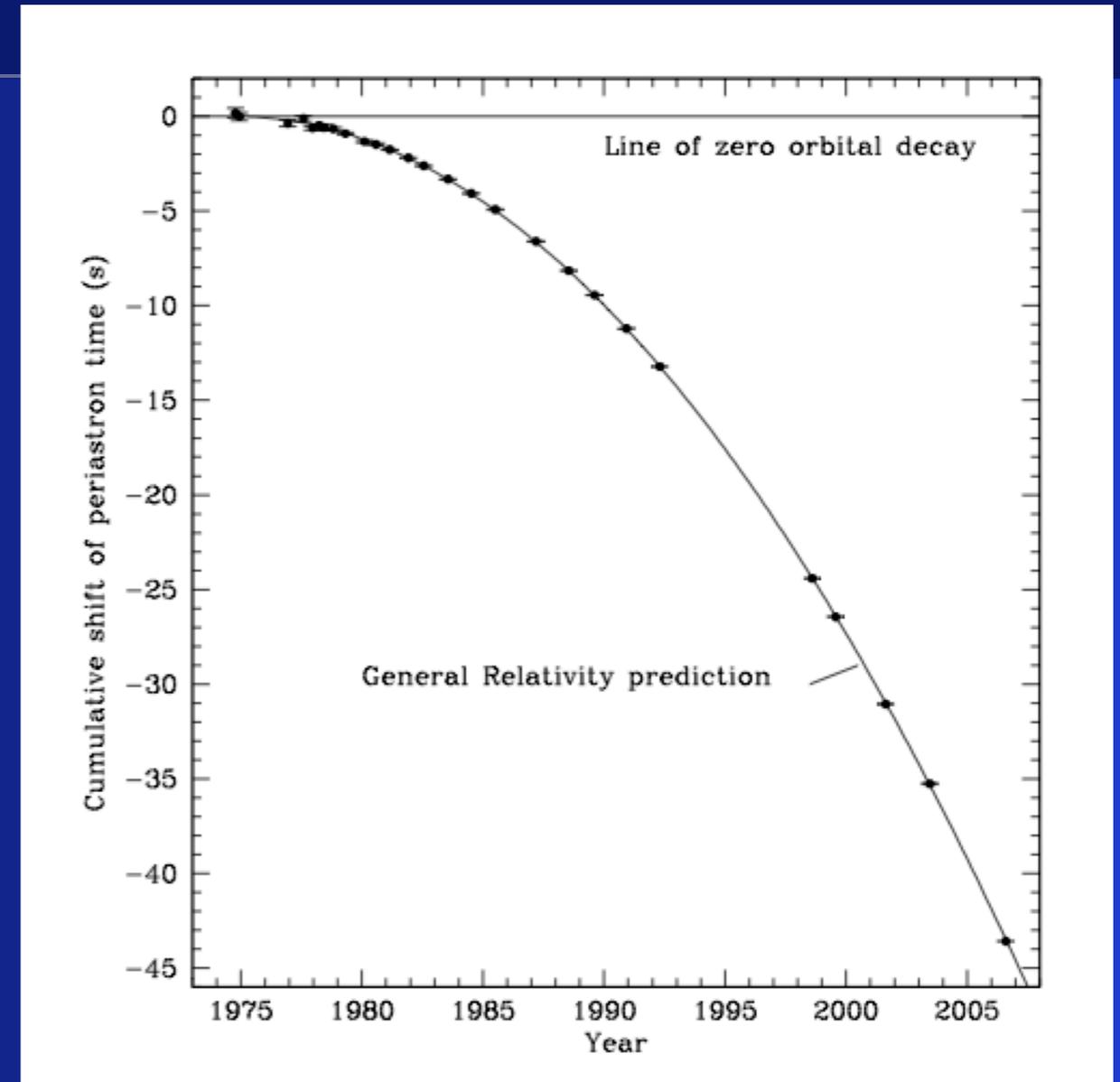
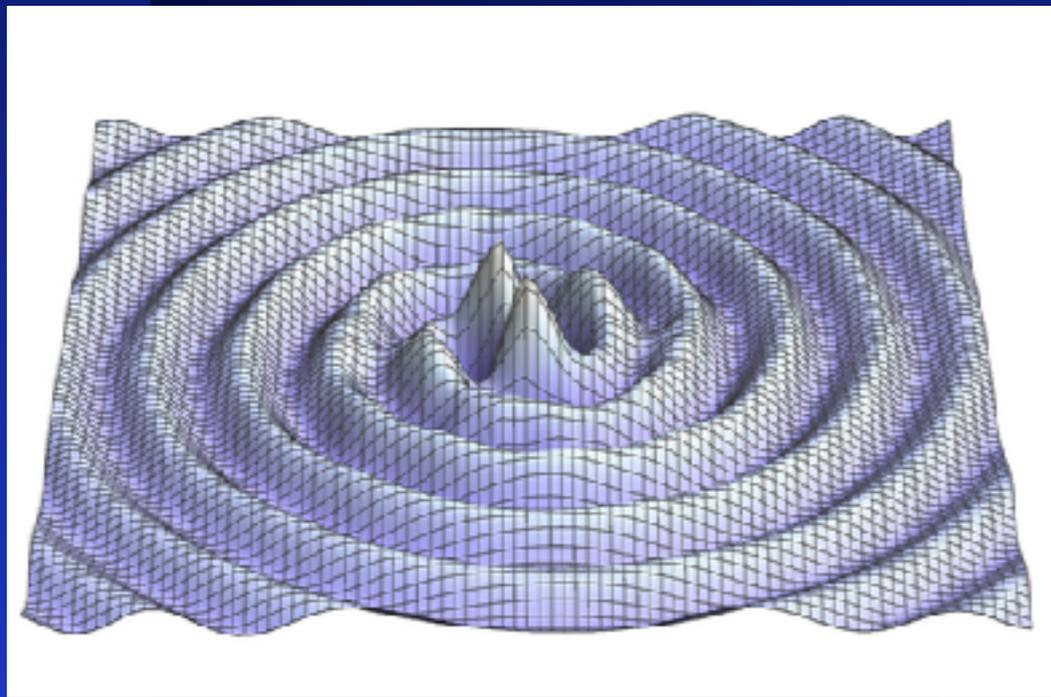
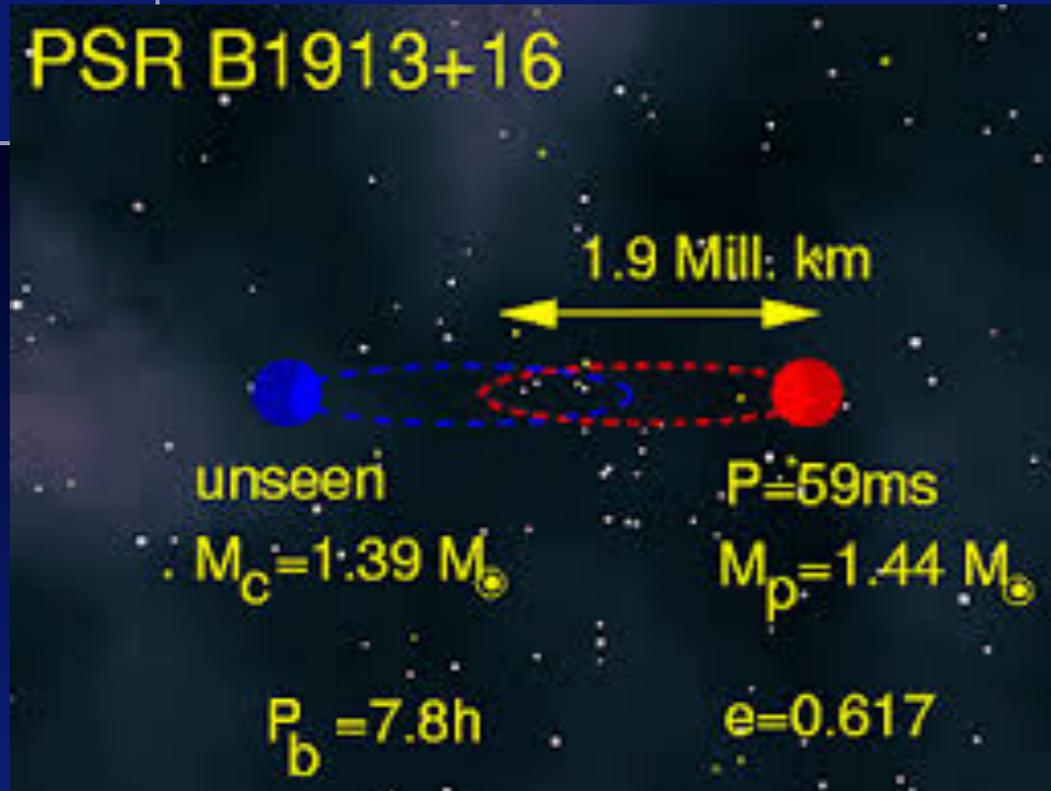


Arecibo, Puerto Rico

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](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

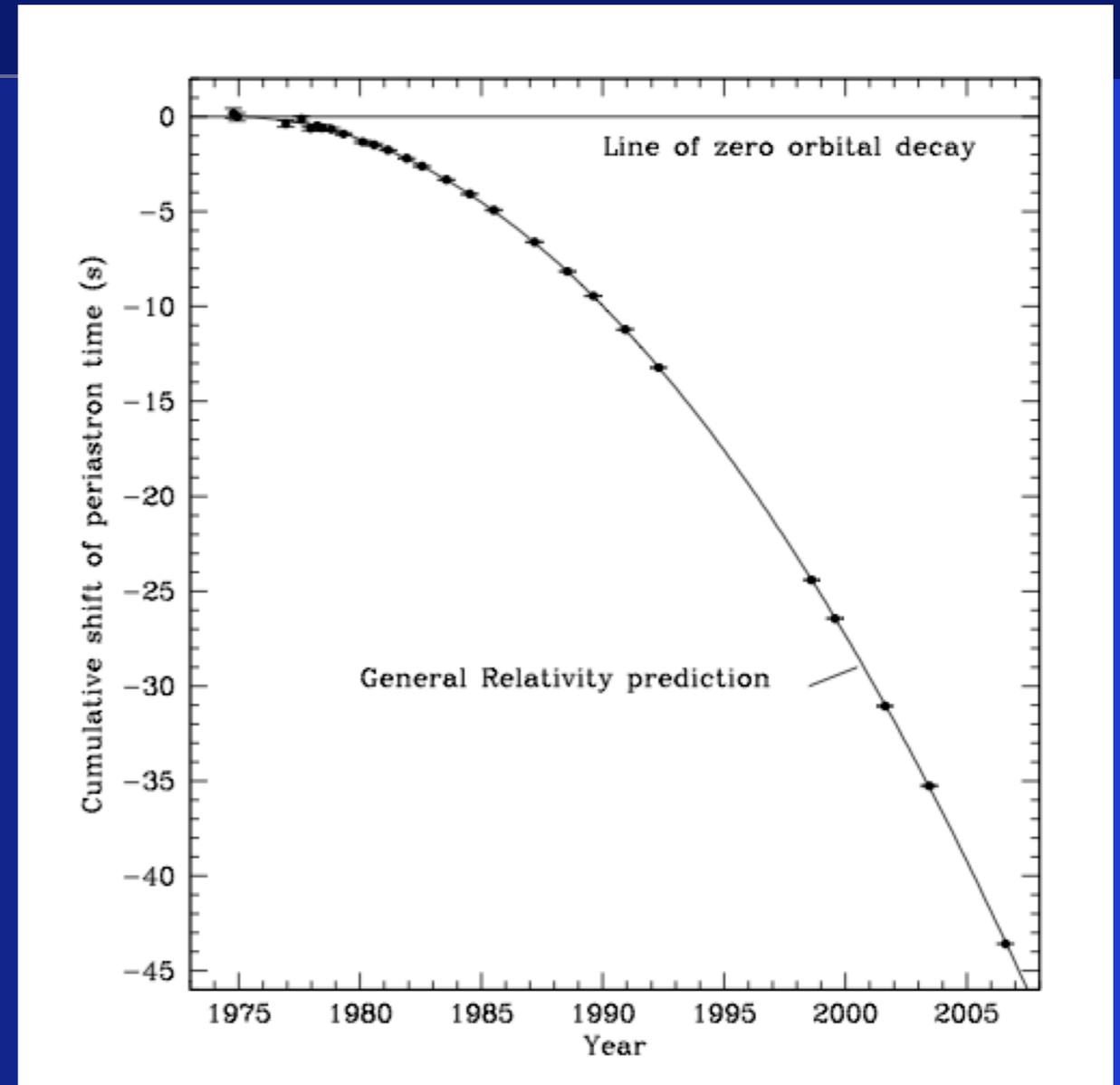
## The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse  
Prize share: 1/2



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



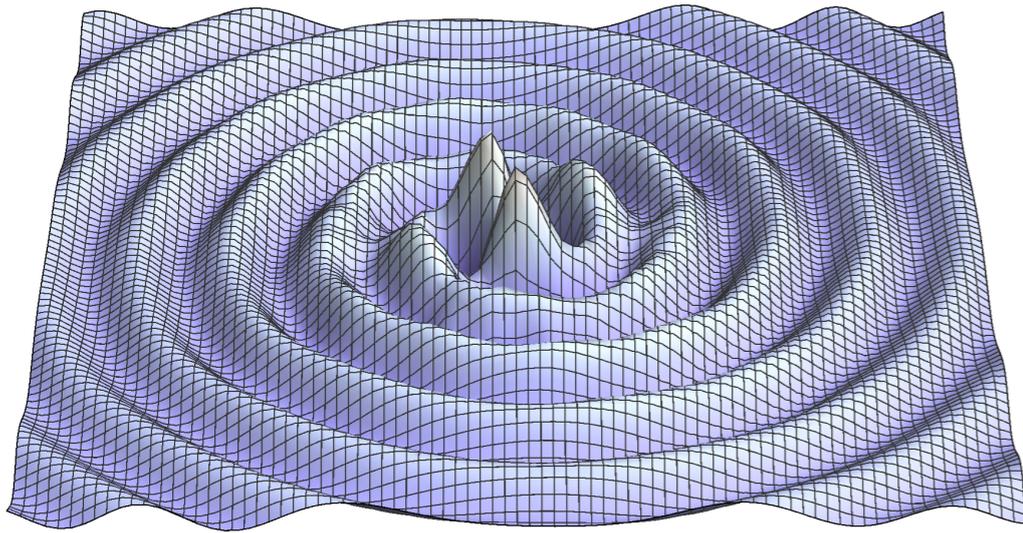
"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"

"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！

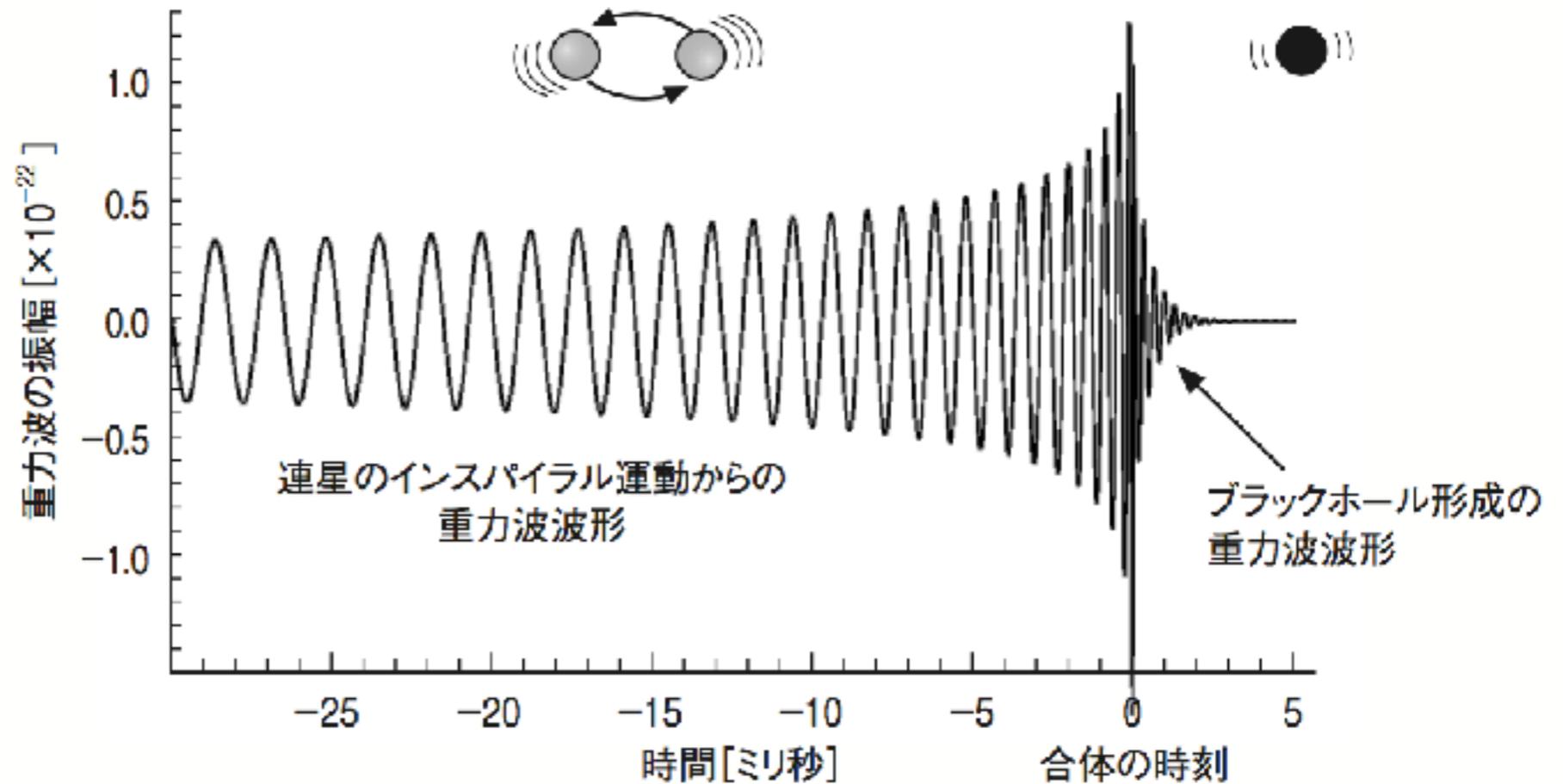


連星中性子星

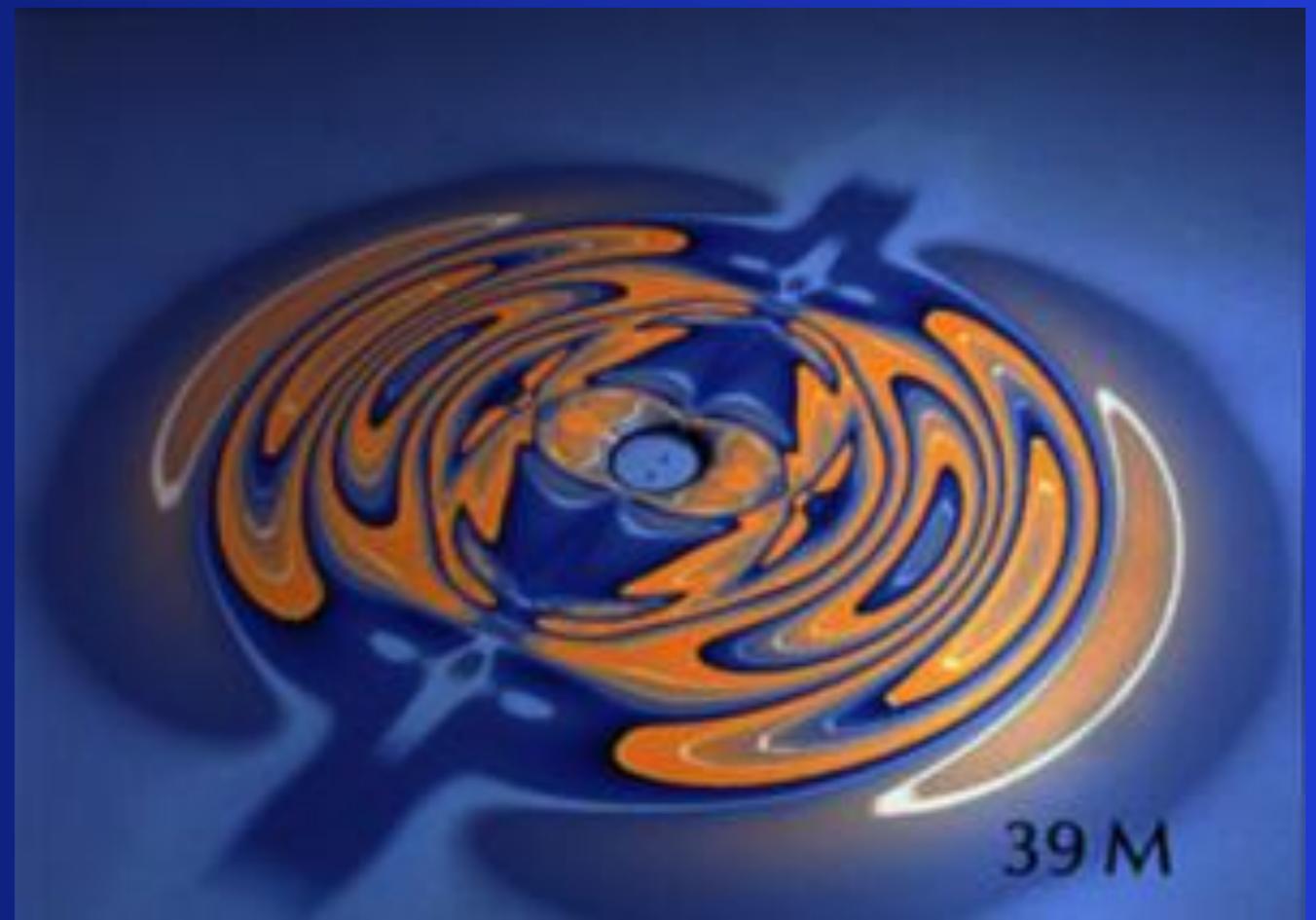
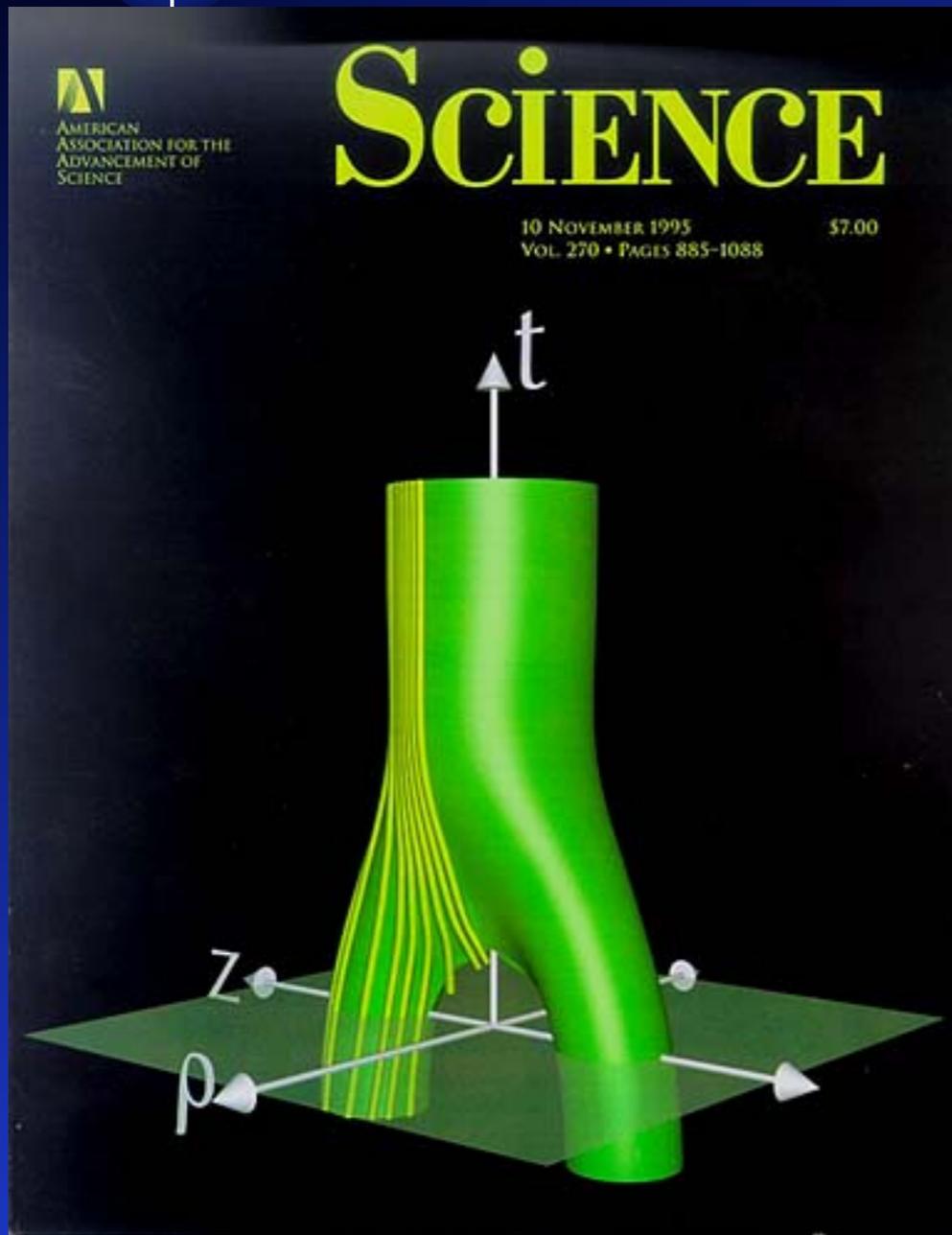
連星ブラックホール

Inspiral

Merger Ringdown

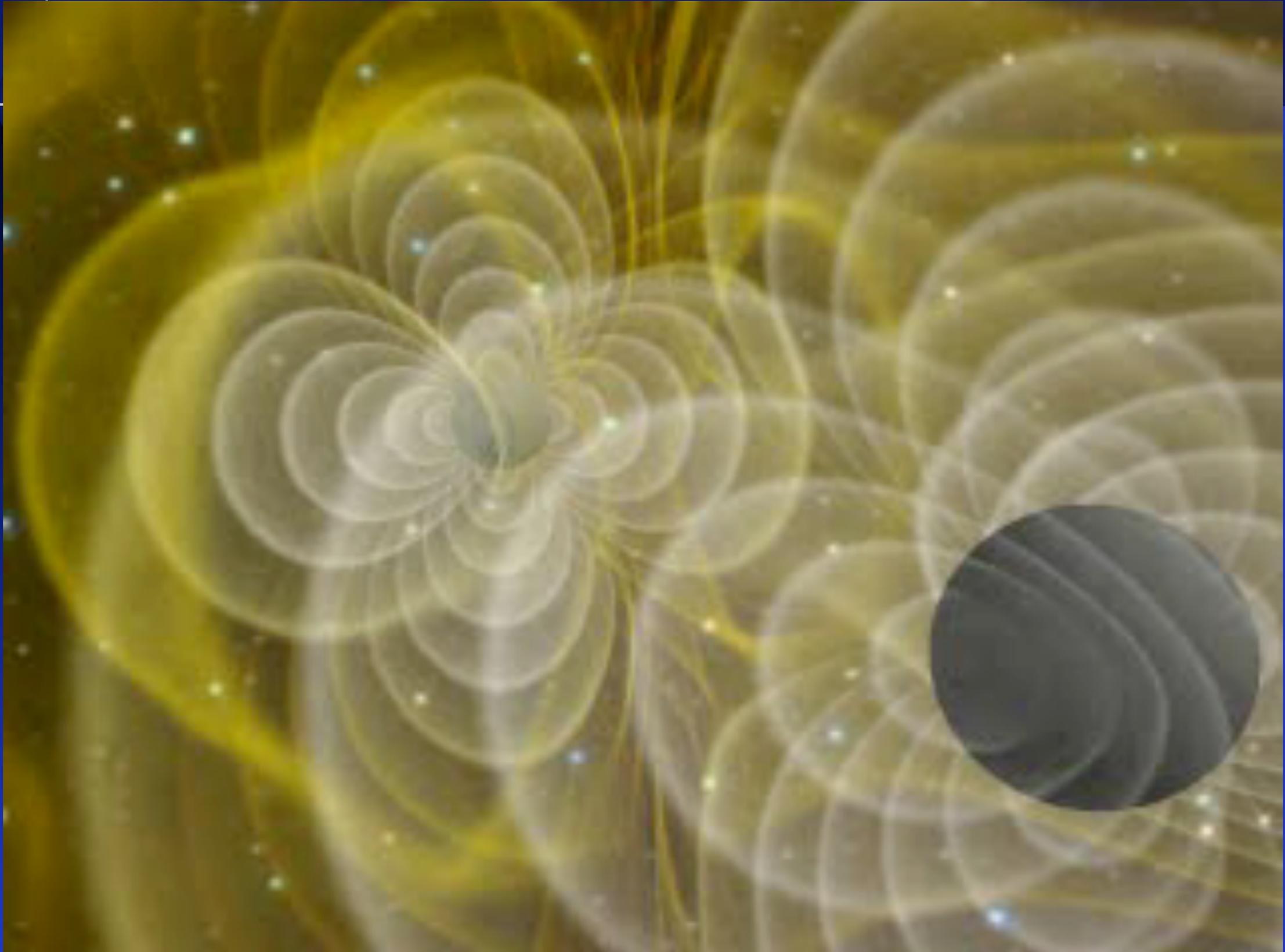


# ブラックホールの合体シミュレーション



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)

# contents

## 1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

## 2. 直接観測された重力波

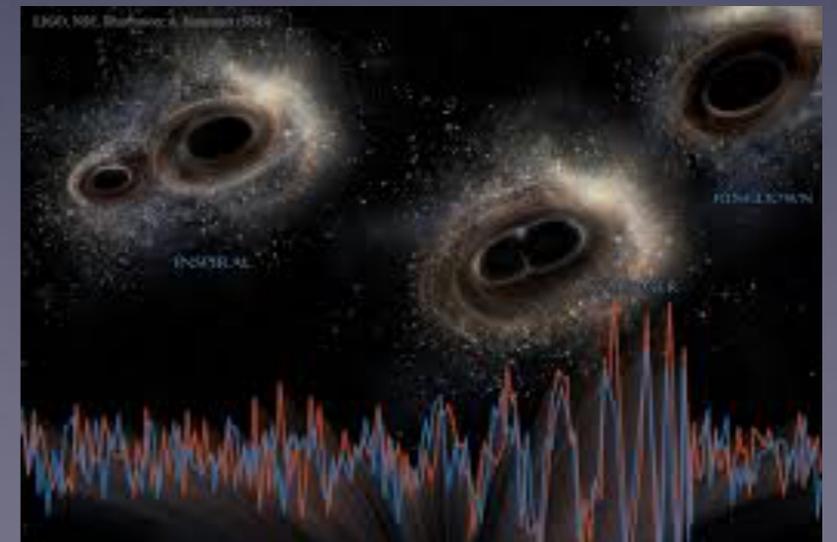
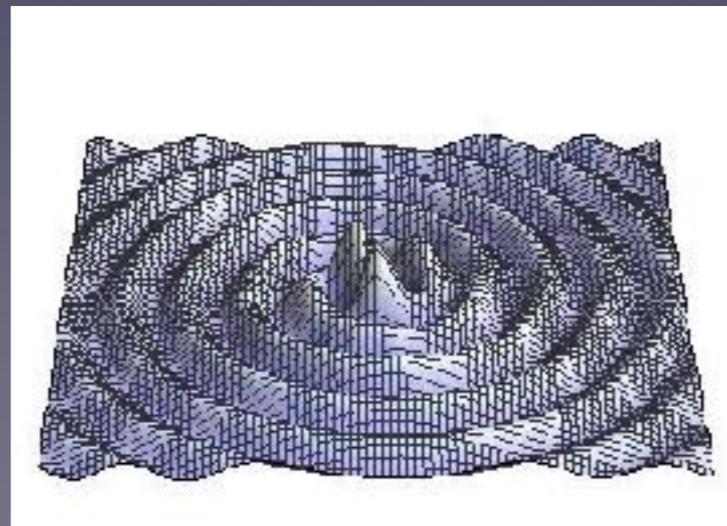
レーザー干渉計のしくみ

LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

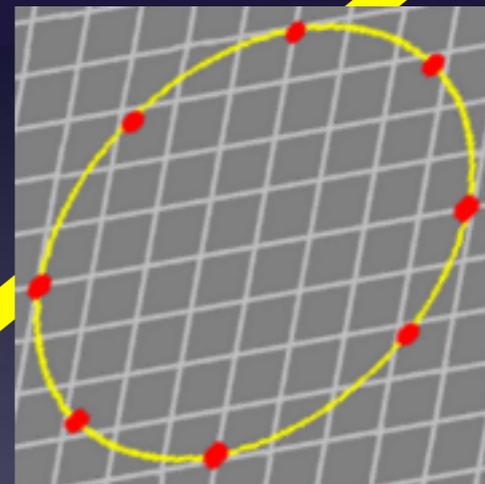
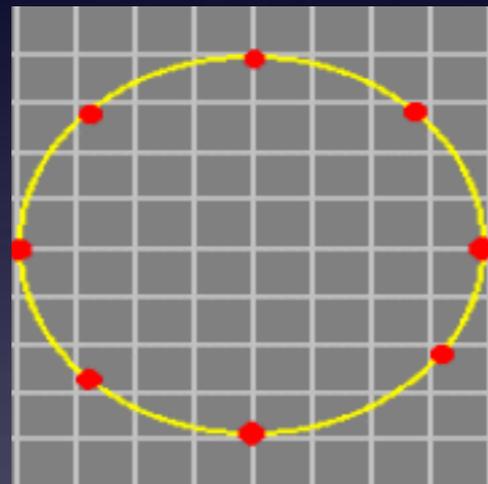
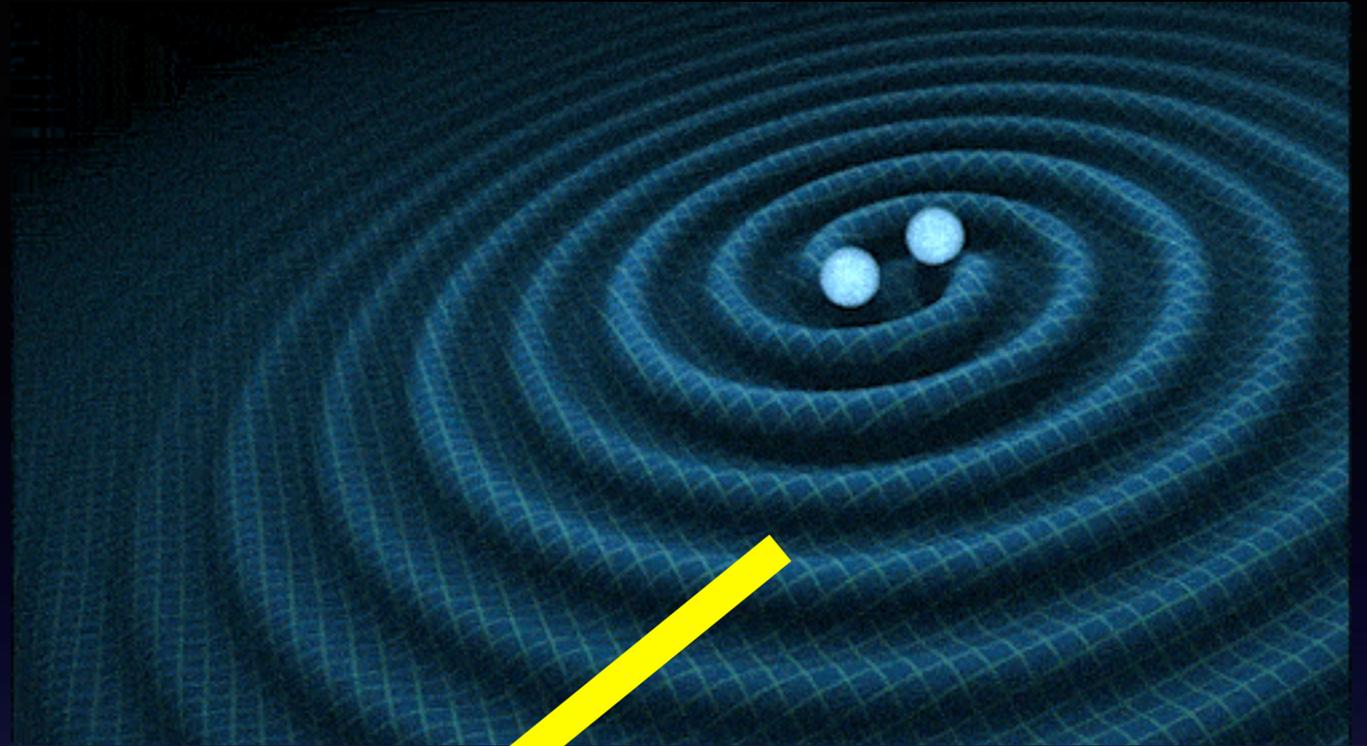
## 3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測

重力波観測から何がわかるか



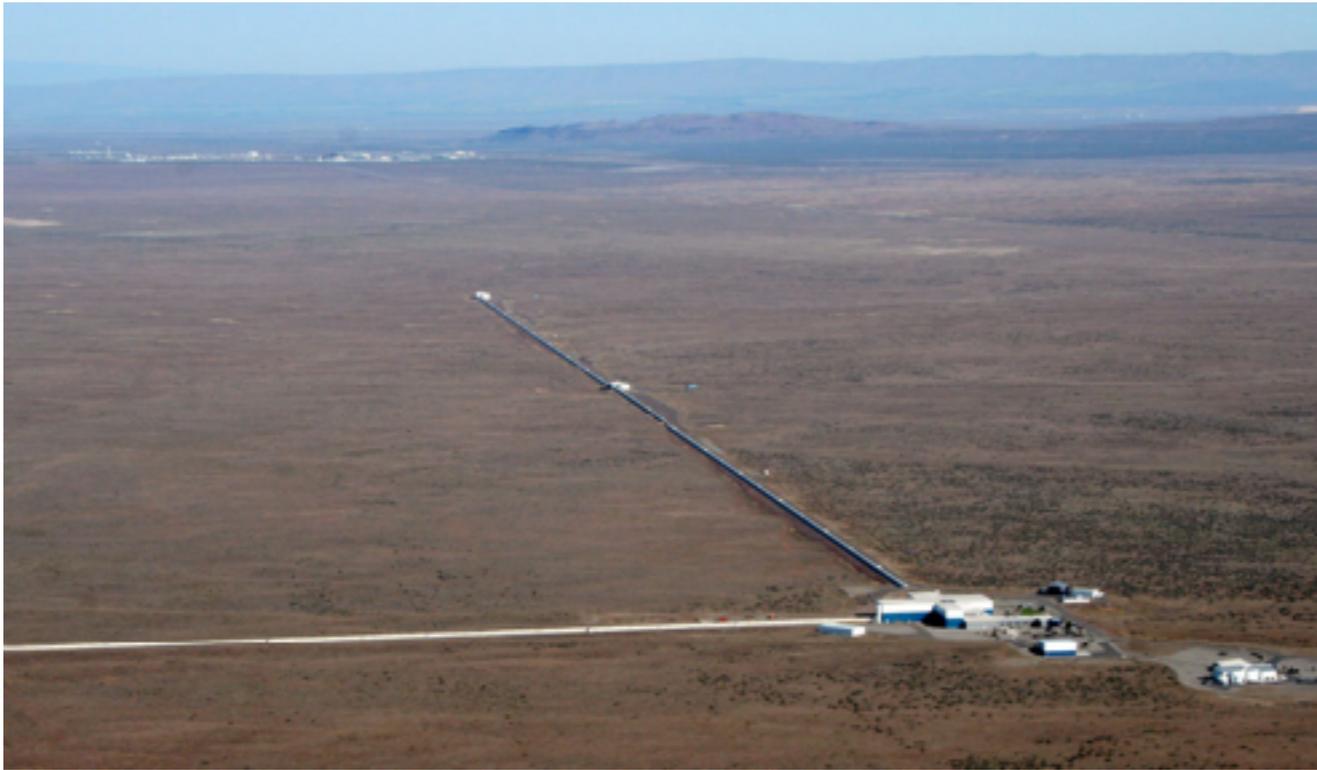
# 重力波の発生と伝播



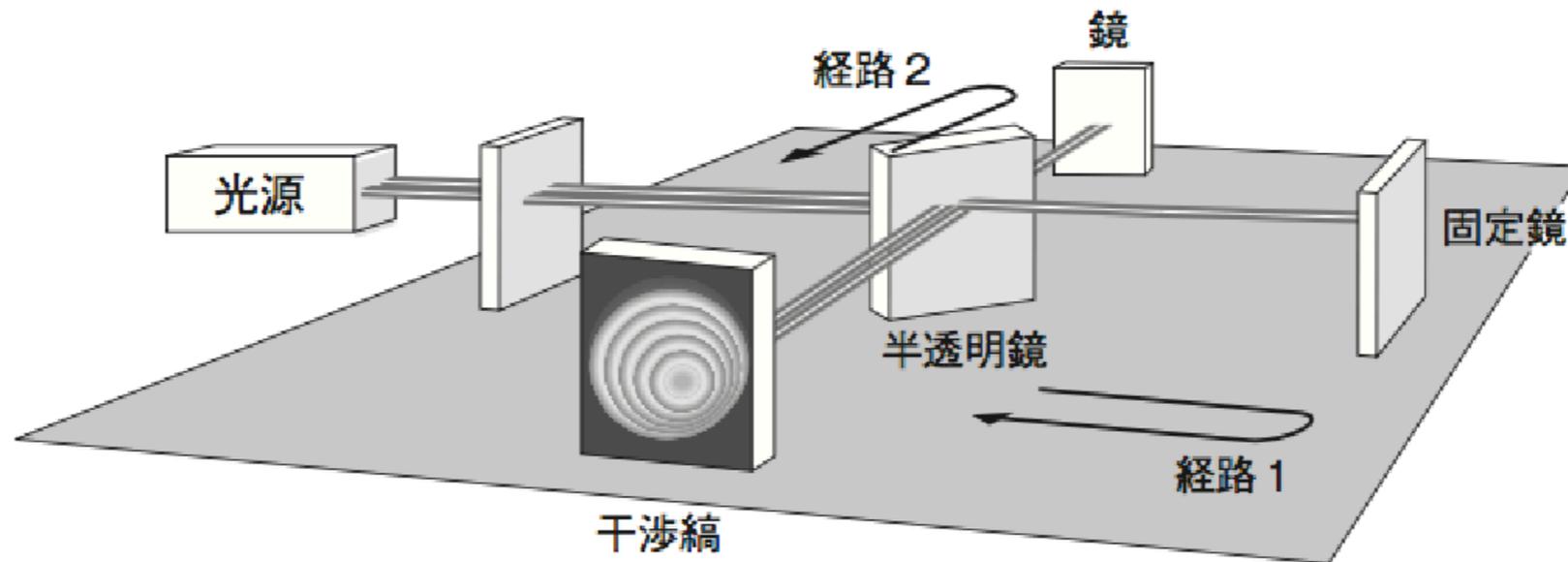
レーザー干渉計

# LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

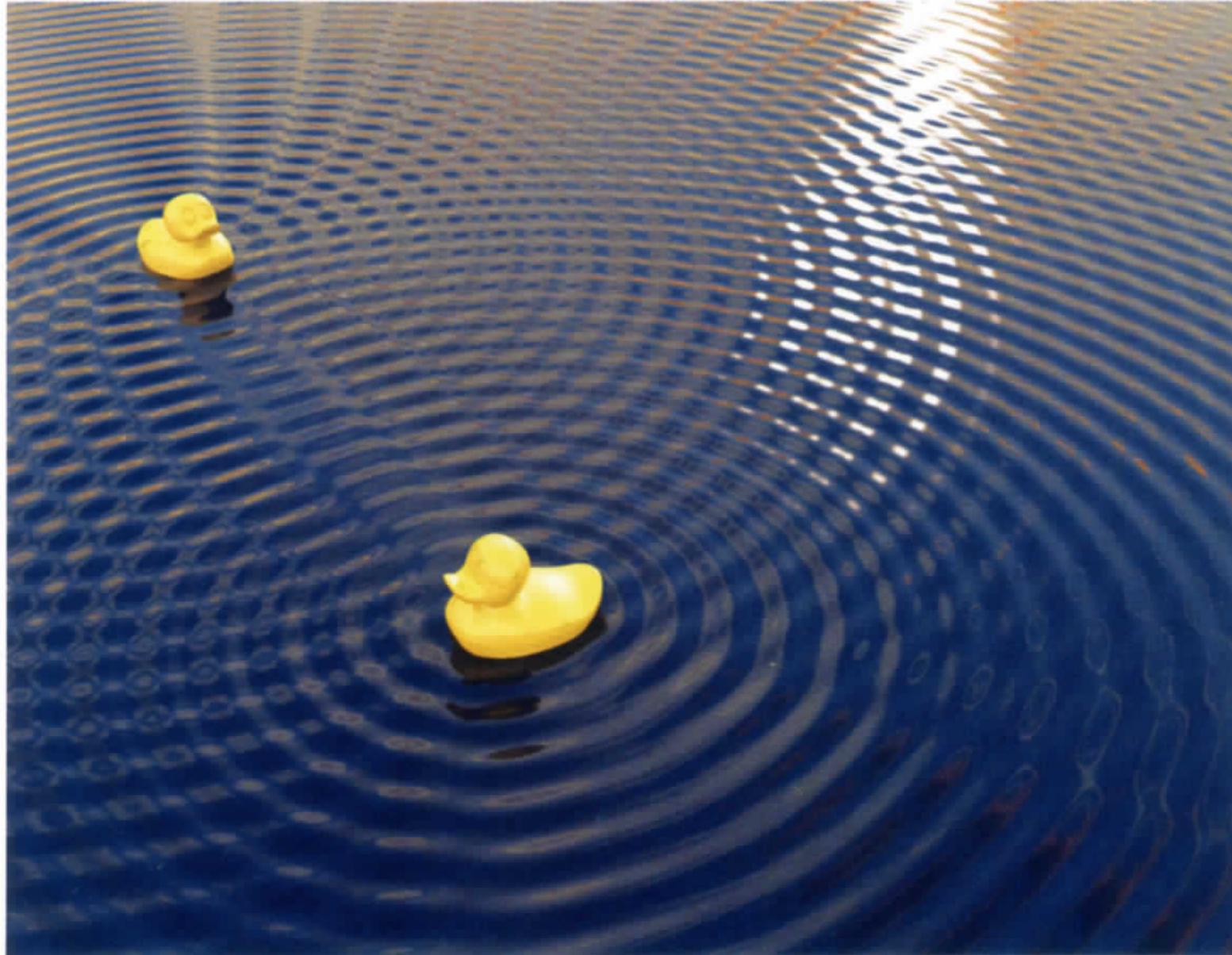
Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (1992年予算承認)



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



## 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

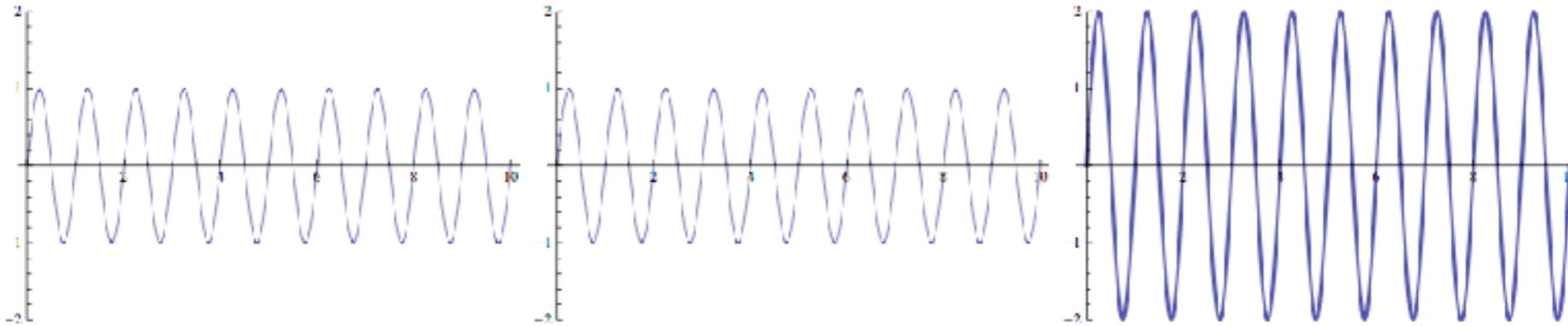


図 31: 左 2 つの波を足すと右の波になる.  $y_1(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $y_2(t) = y_1(t)$  としたときの,  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$  の図.

- 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

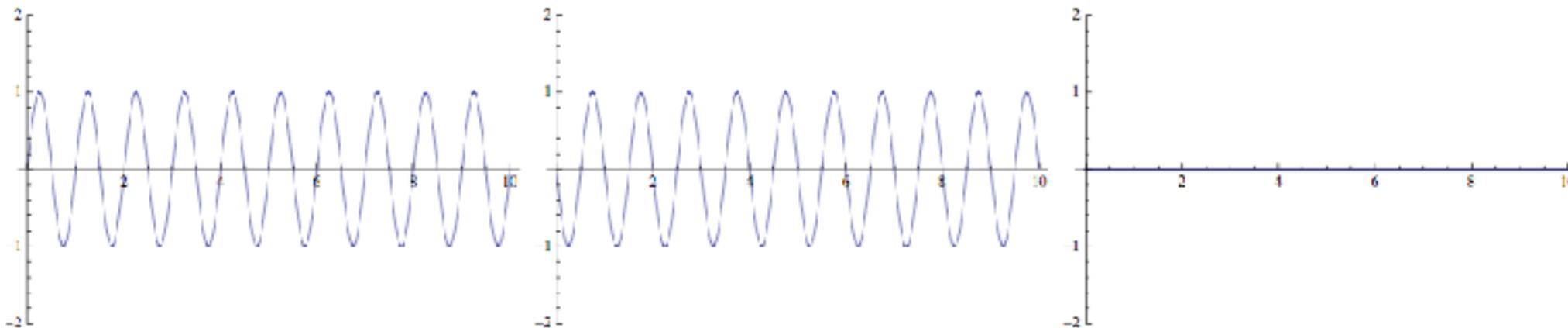
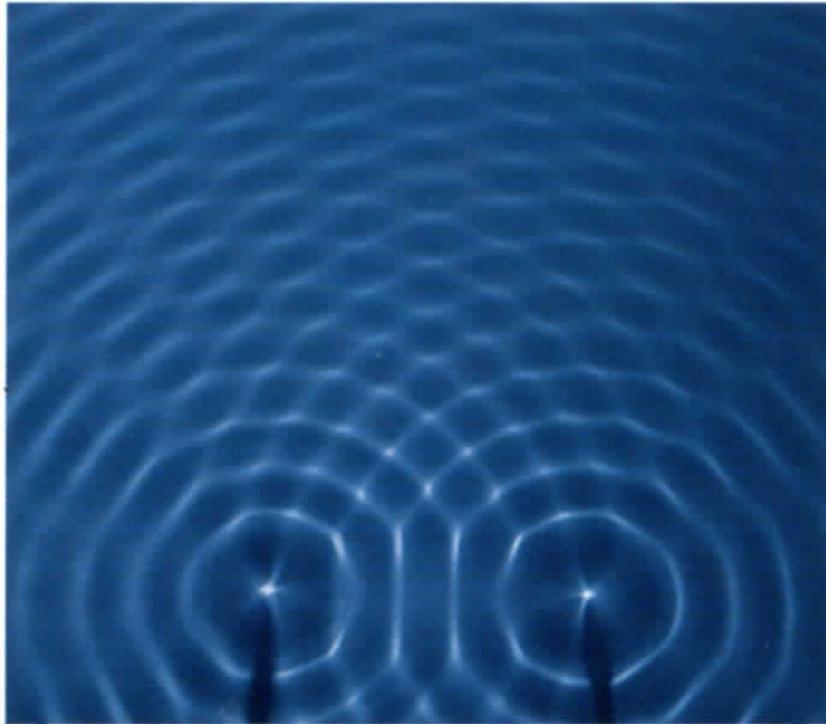


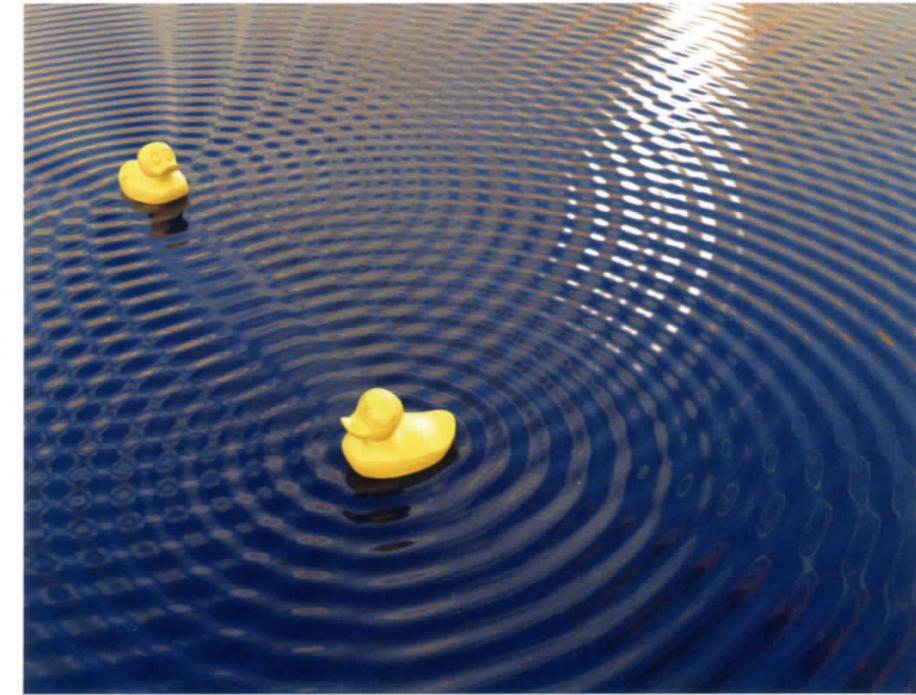
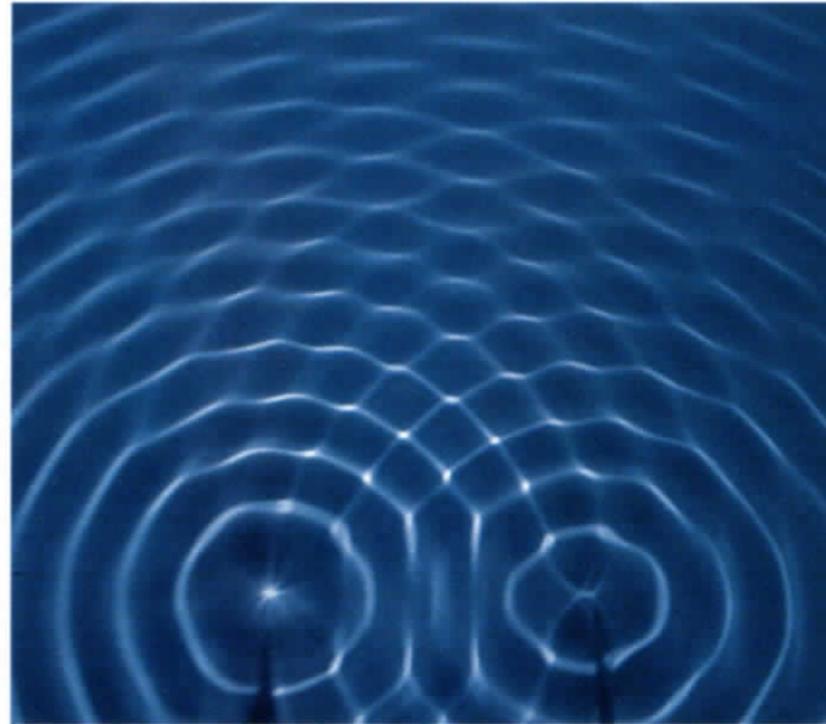
図 32: 左 2 つの波を足すと右の波になる.  $y_1(t) = \sin(2\pi t)$ ,  $y_2(t) = -\sin(2\pi t)$  としたときの,  $y(t) = y_1(t) + y_2(t)$  の図.

# 波の干渉 = 強めあったり弱めあったりする現象

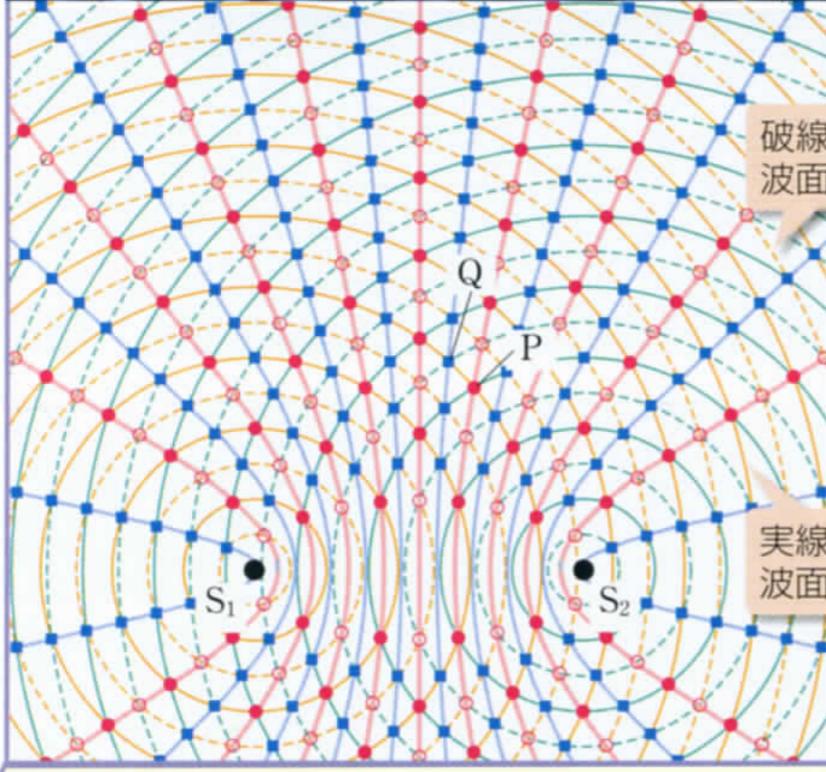
● 同位相で振動する 2 つの波源の場合



● 逆位相で振動する 2 つの波源の場合

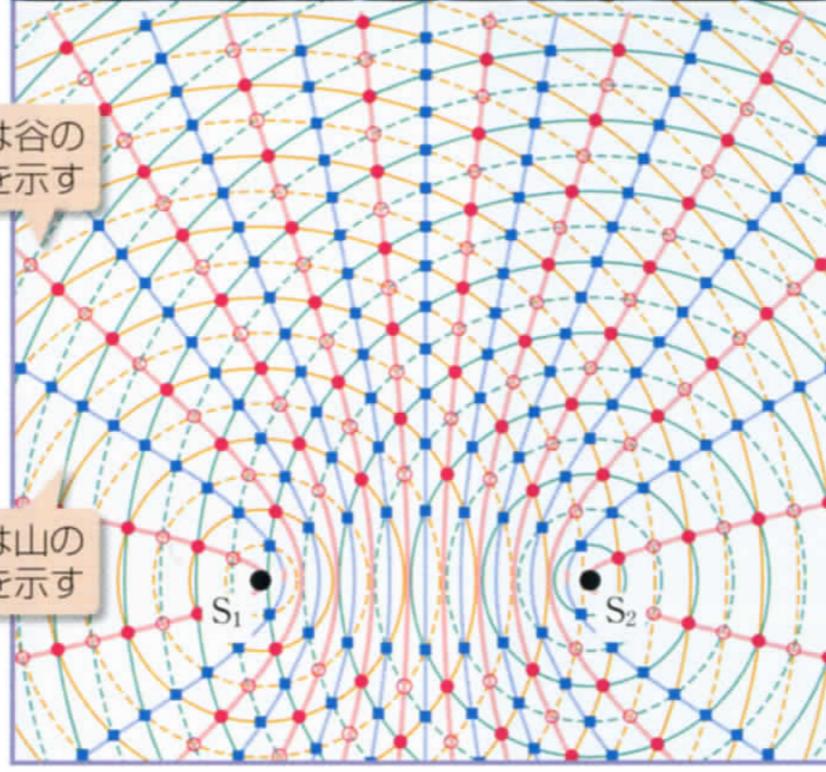


**Puddle Interference** The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.



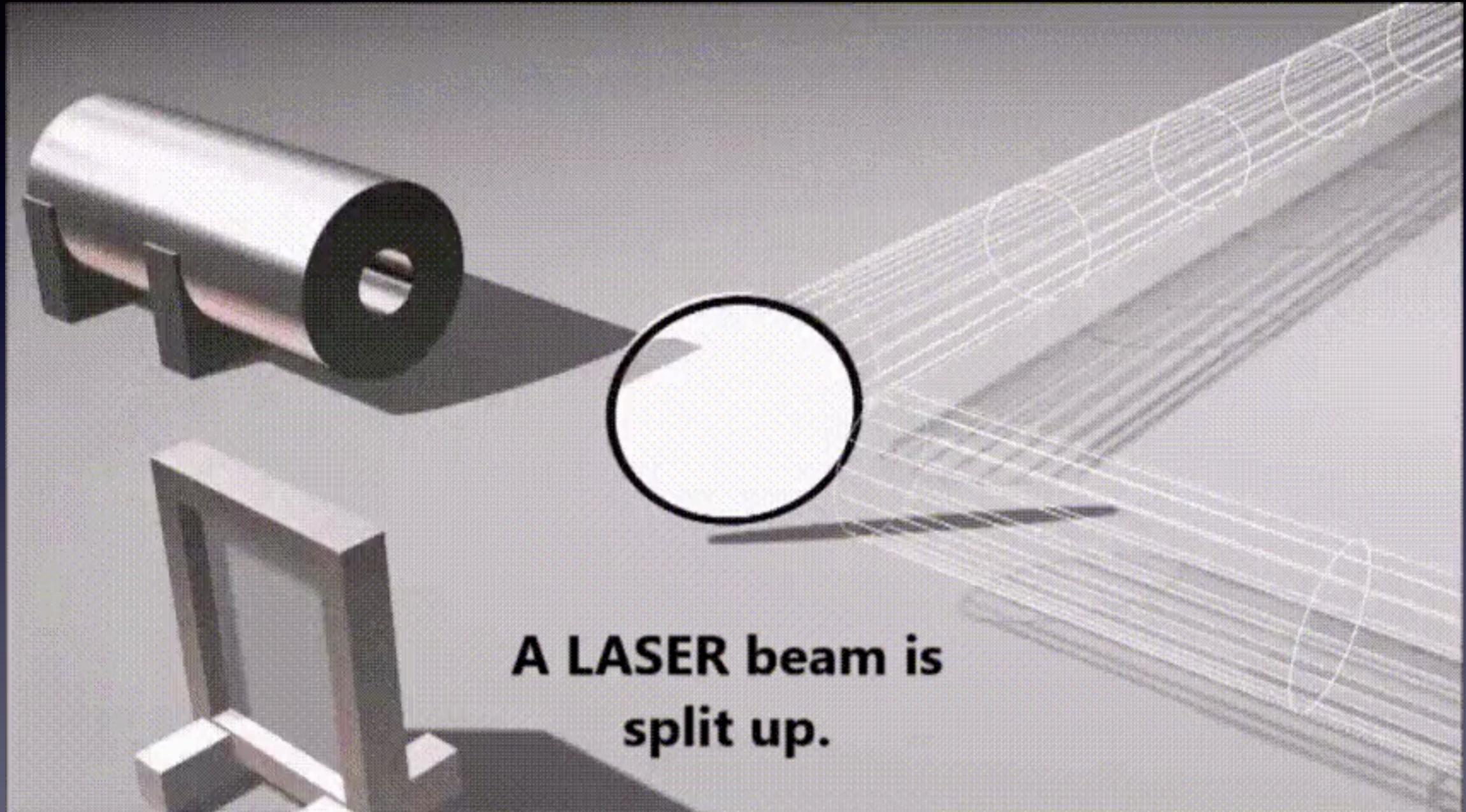
破線は谷の波面を示す

実線は山の波面を示す

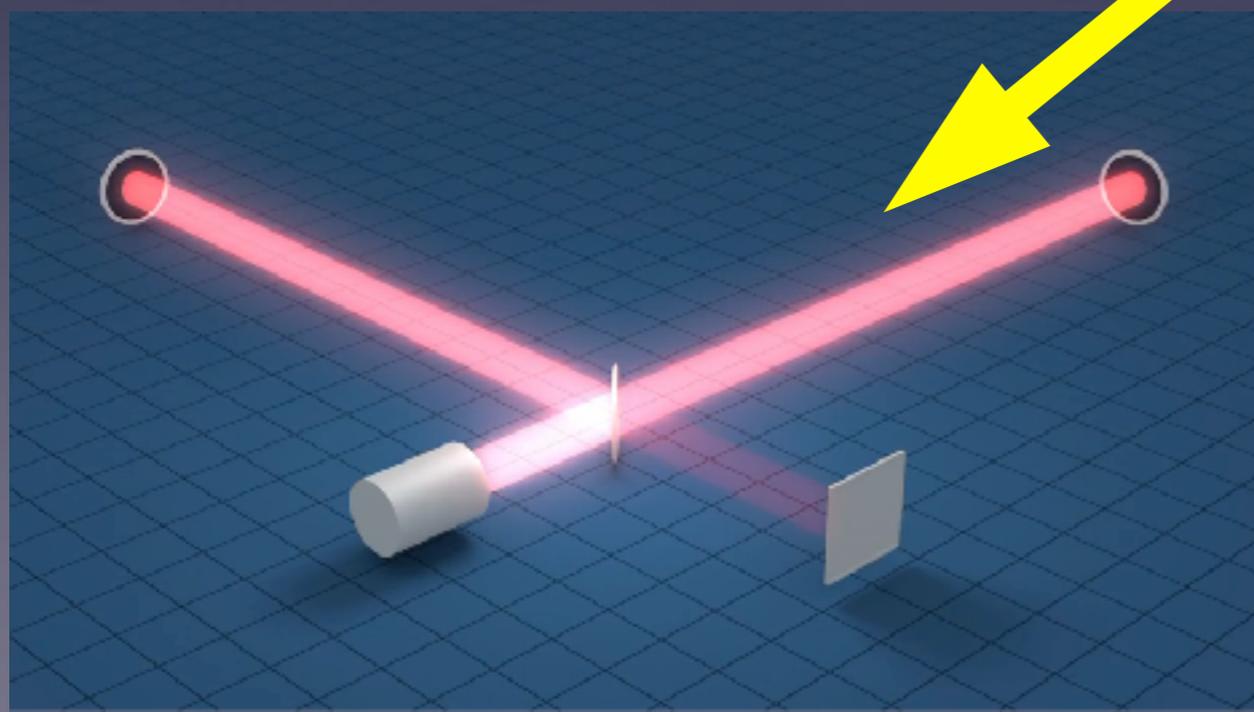
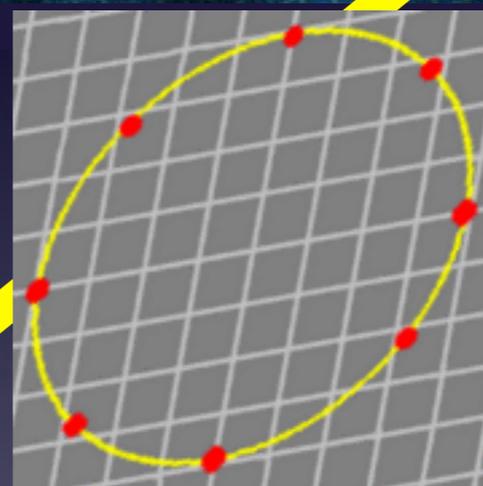
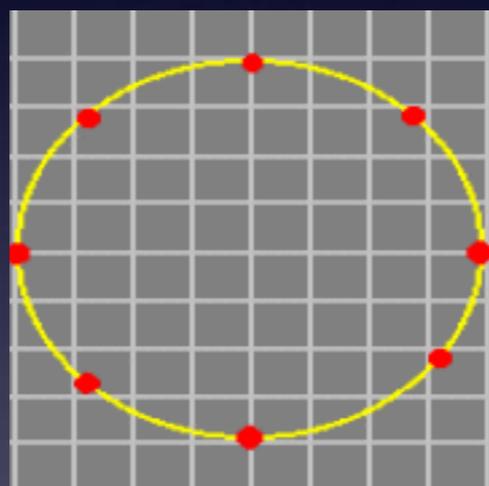
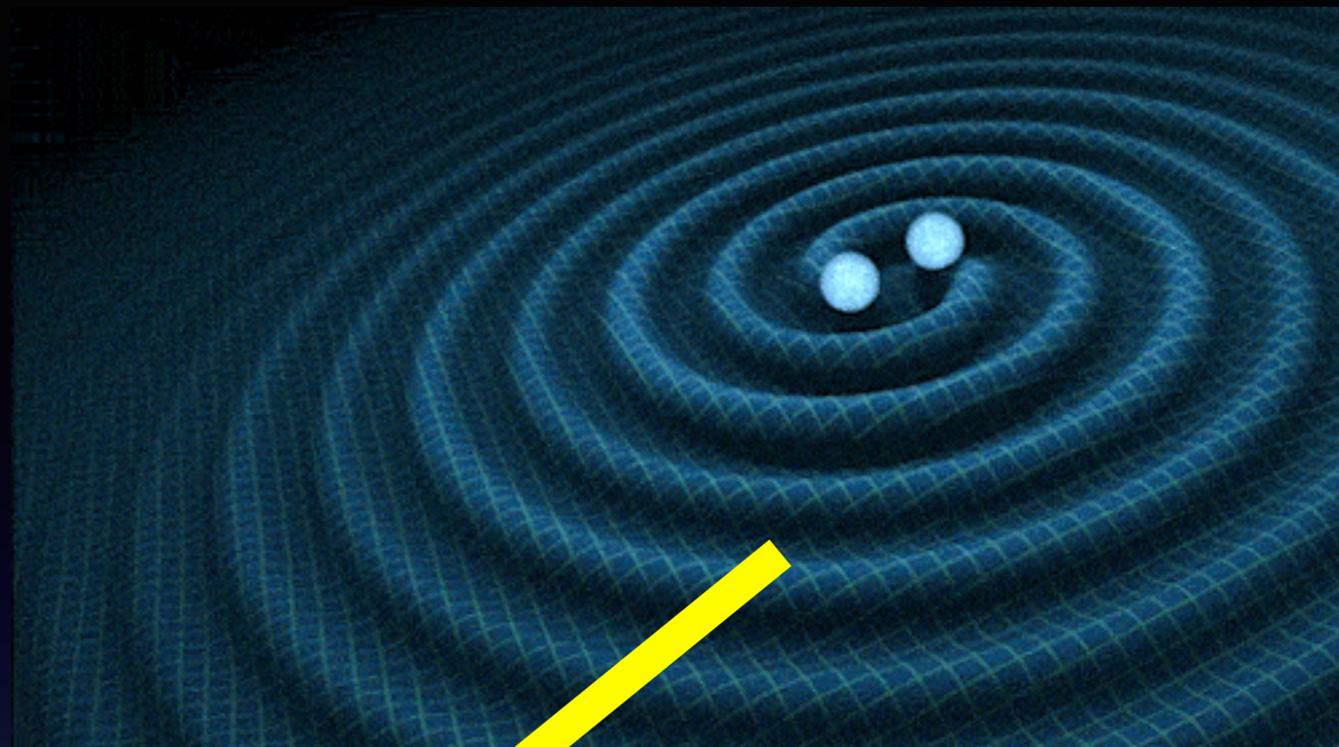


赤色で示した曲線(双曲線) ——— は強めあう点を連ねて得られる曲線で、●(山と山)や○(谷と谷)の状態が移動していく経路を表している。  
青色で示した曲線(双曲線) ——— は、打ち消しあう点(■(山と谷))を連ねて得られる曲線であり、節線という。

# レーザー干渉計による重力波検出のしくみ

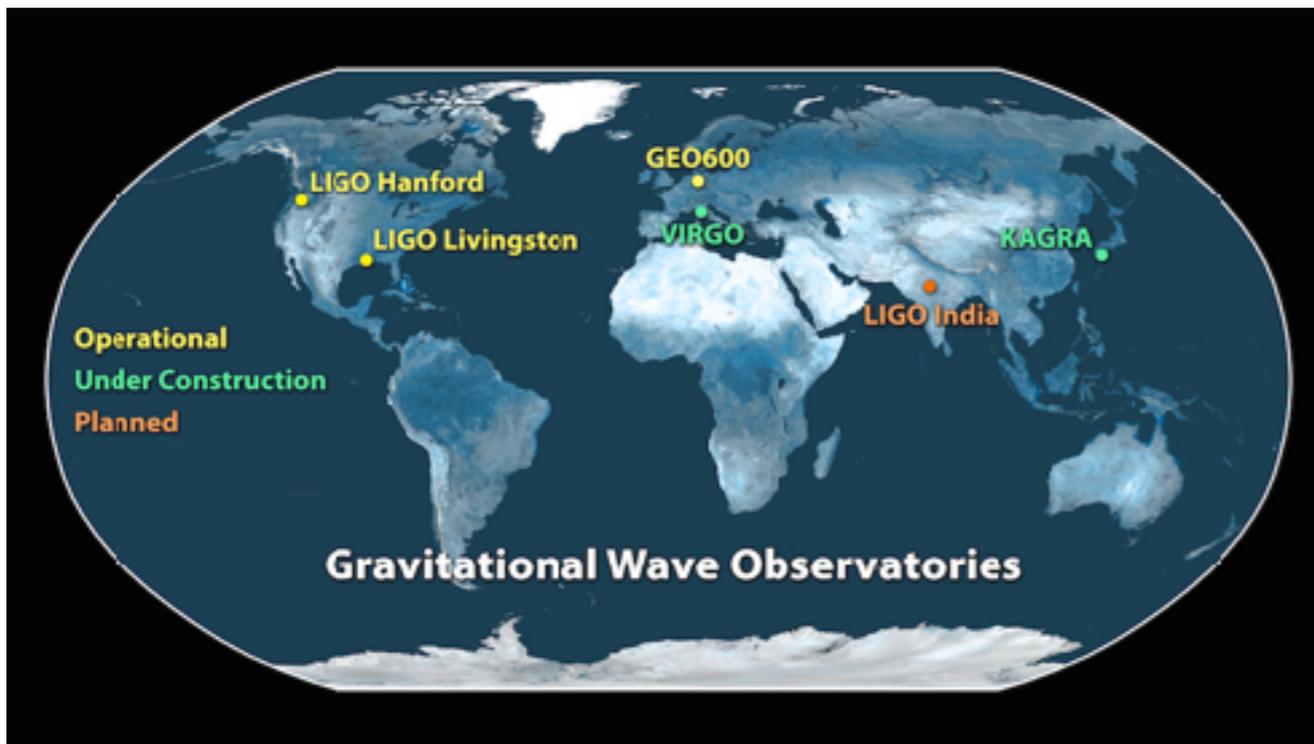


# 重力波の発生と伝播

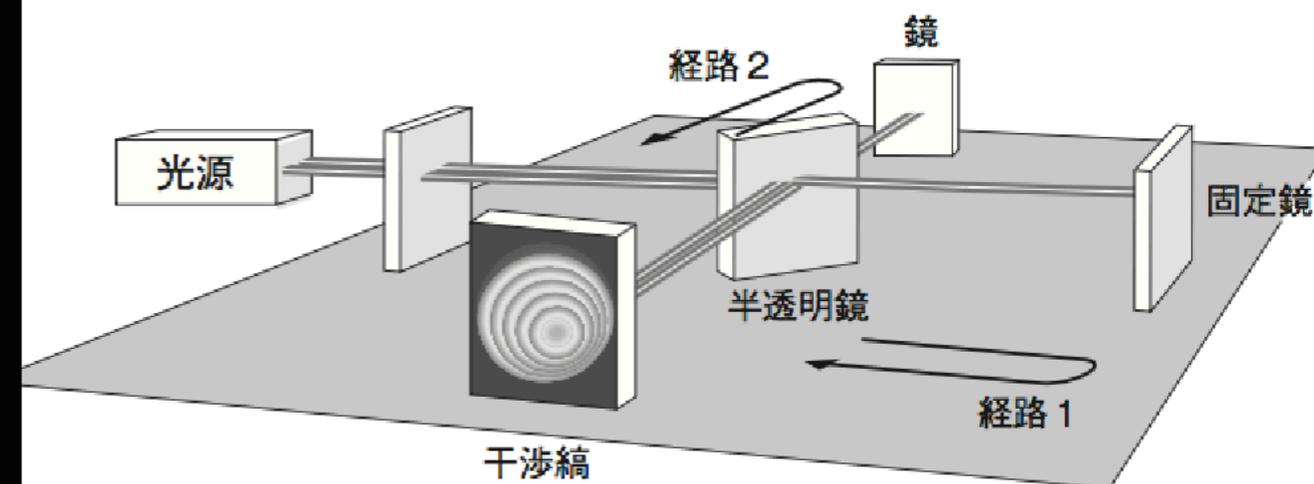


# LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

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

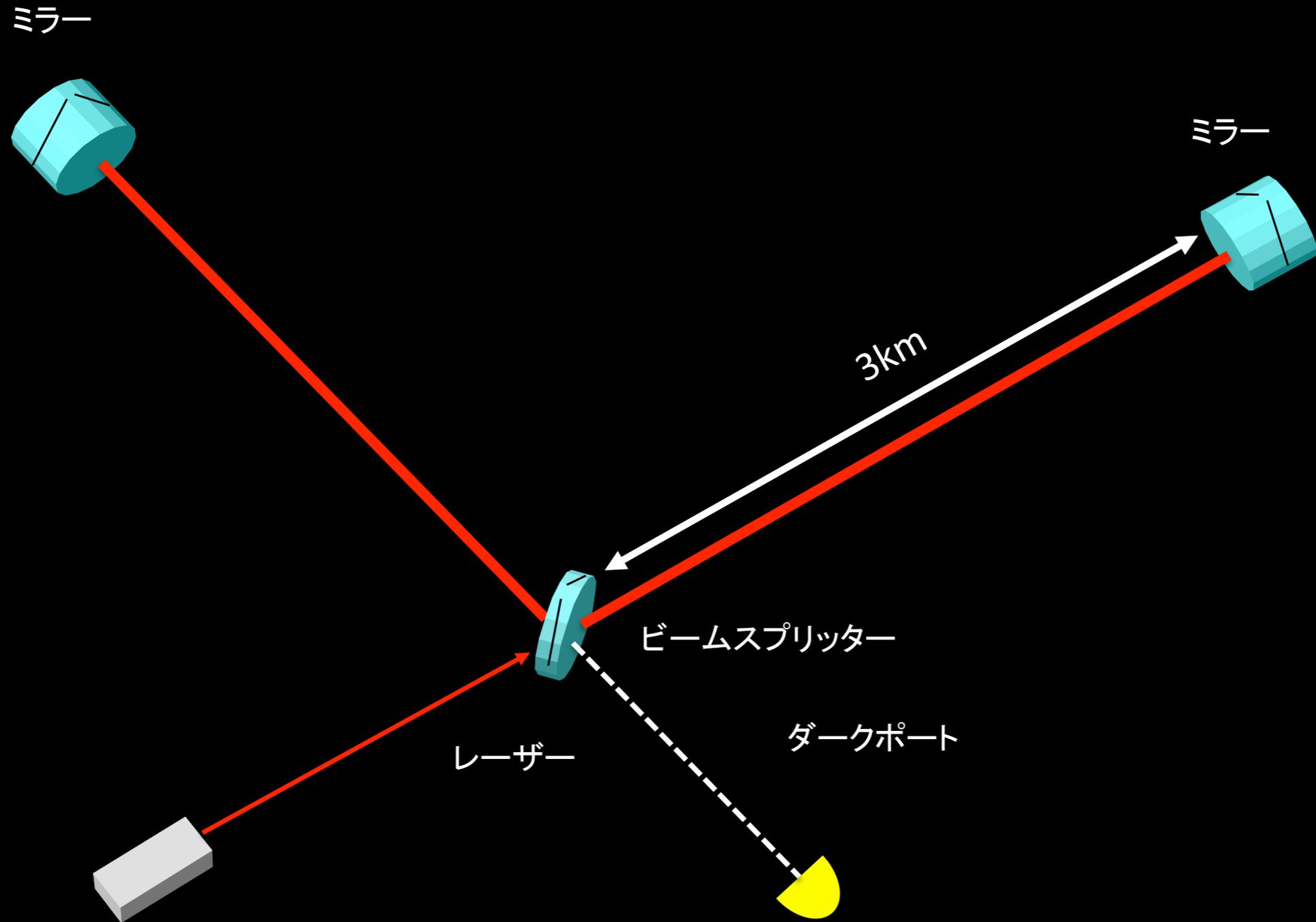
鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

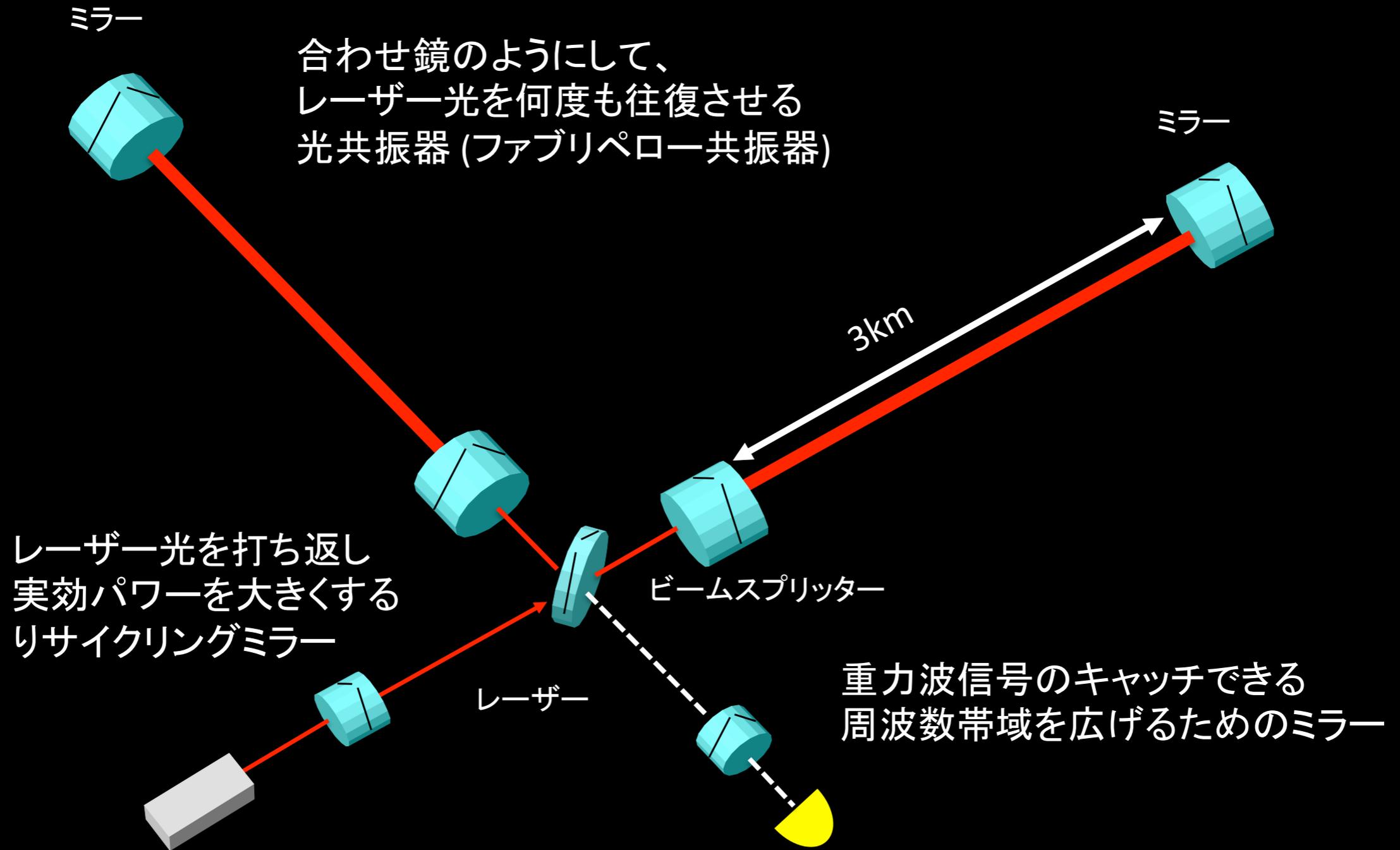
鏡の材質としてサファイア

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

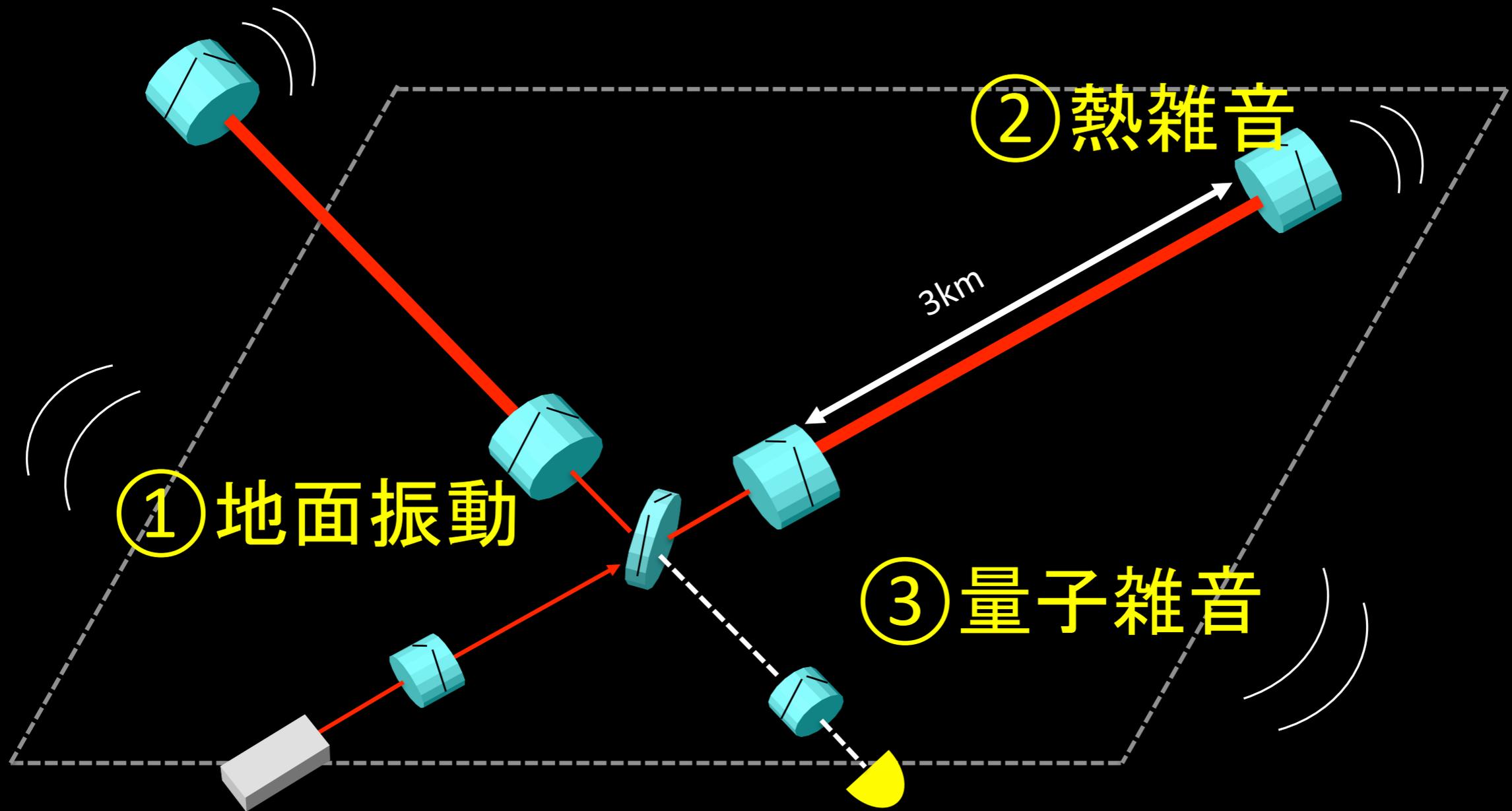
# 検出機は大きければ大きいほどいい！



# さらに信号を増幅する工夫



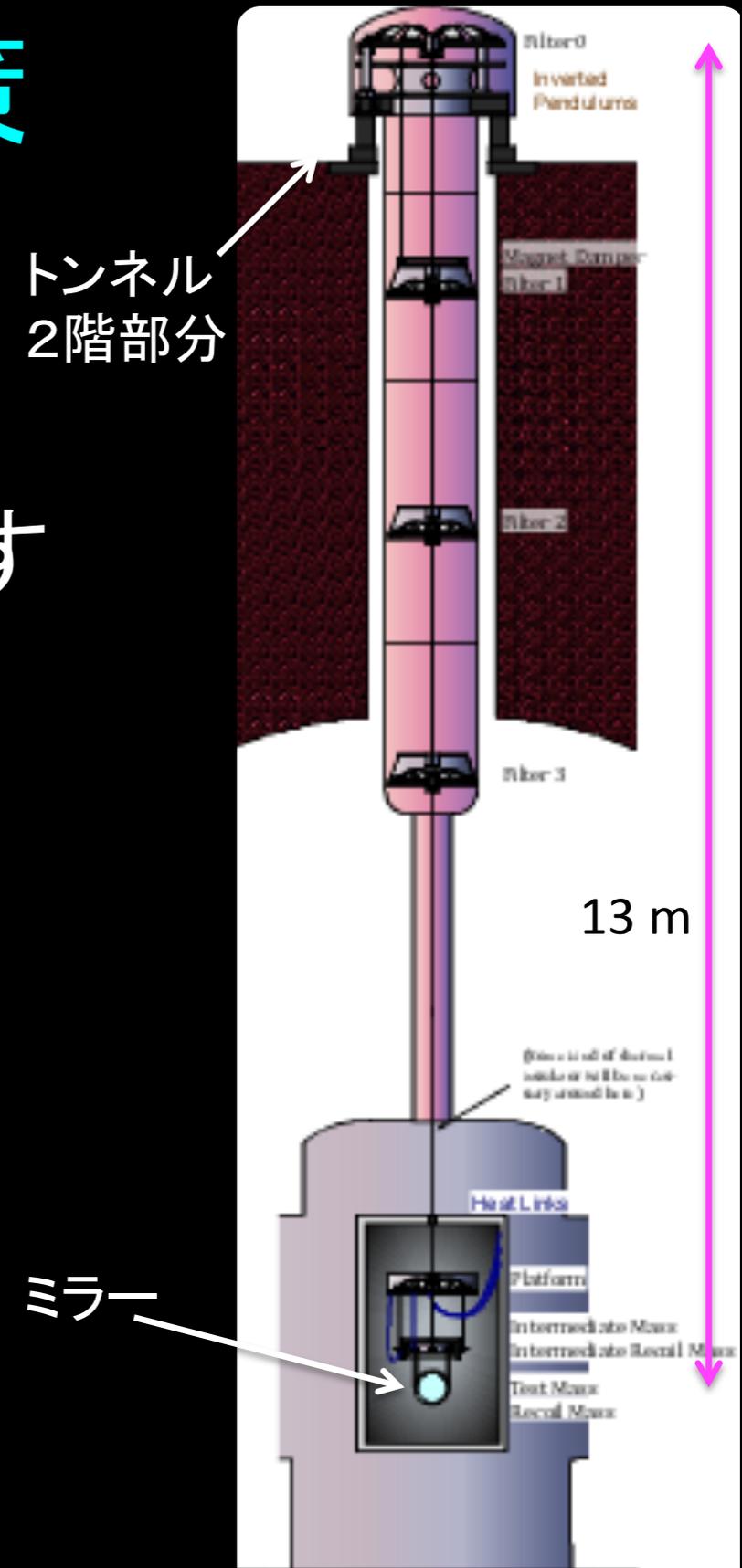
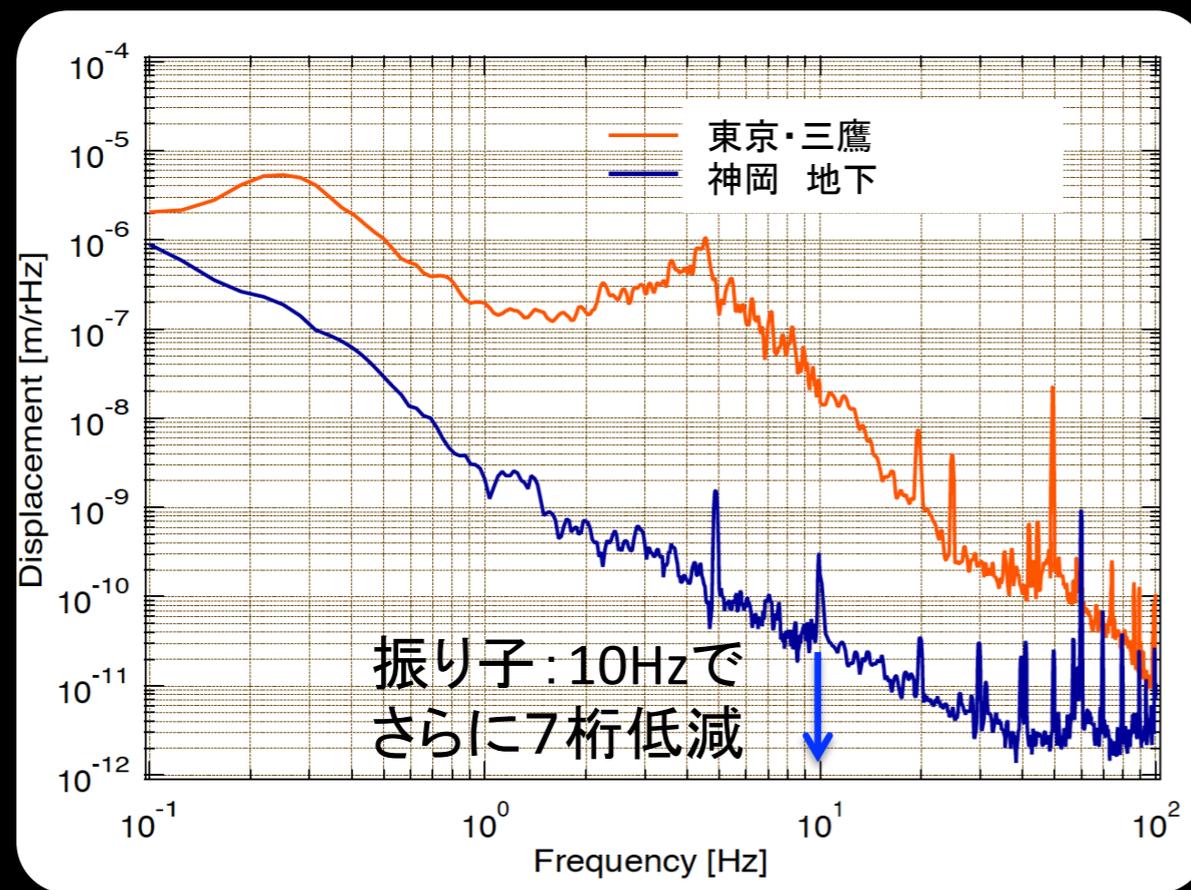
# さらにさらに、雑音をやっつける



# KAGRAでの雑音対策

## ① 地面振動

- 地下に検出器を設置する
- ミラーを大きな振り子に吊るす



# KAGRAでの雑音対策

## ② 熱雑音

鏡の表面の分子や振り子が熱運動して揺れ、空間の揺らぎと区別がつかずに雑音となる

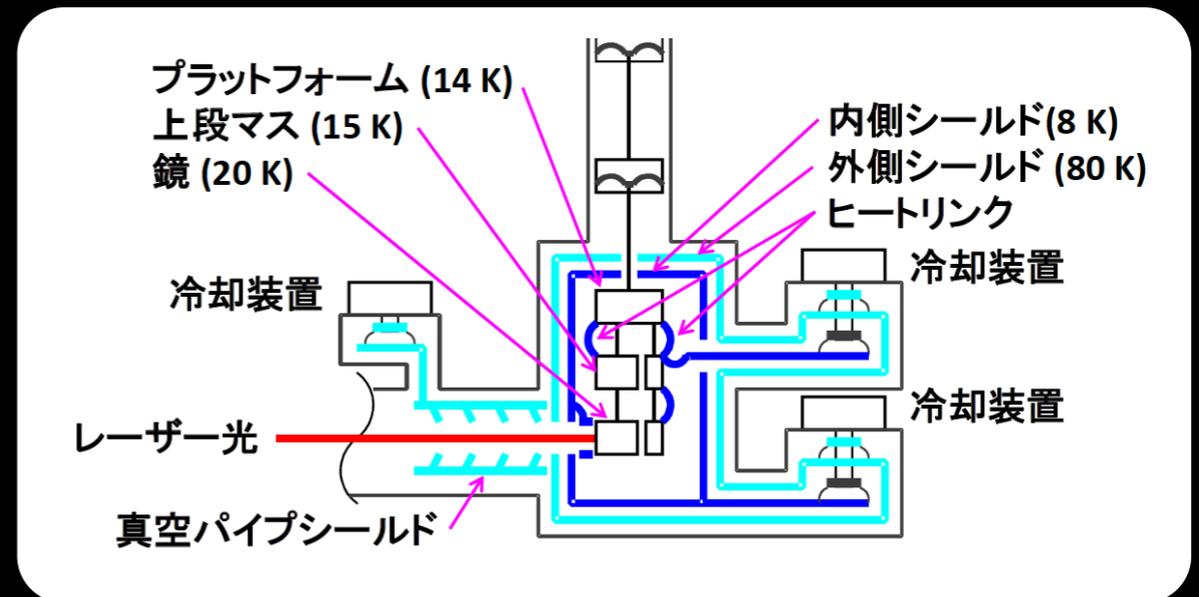
$$\text{熱雑音} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

- ミラーをマイナス253°Cに冷やす
- サファイアミラーを使う

サファイアミラー



冷却システム

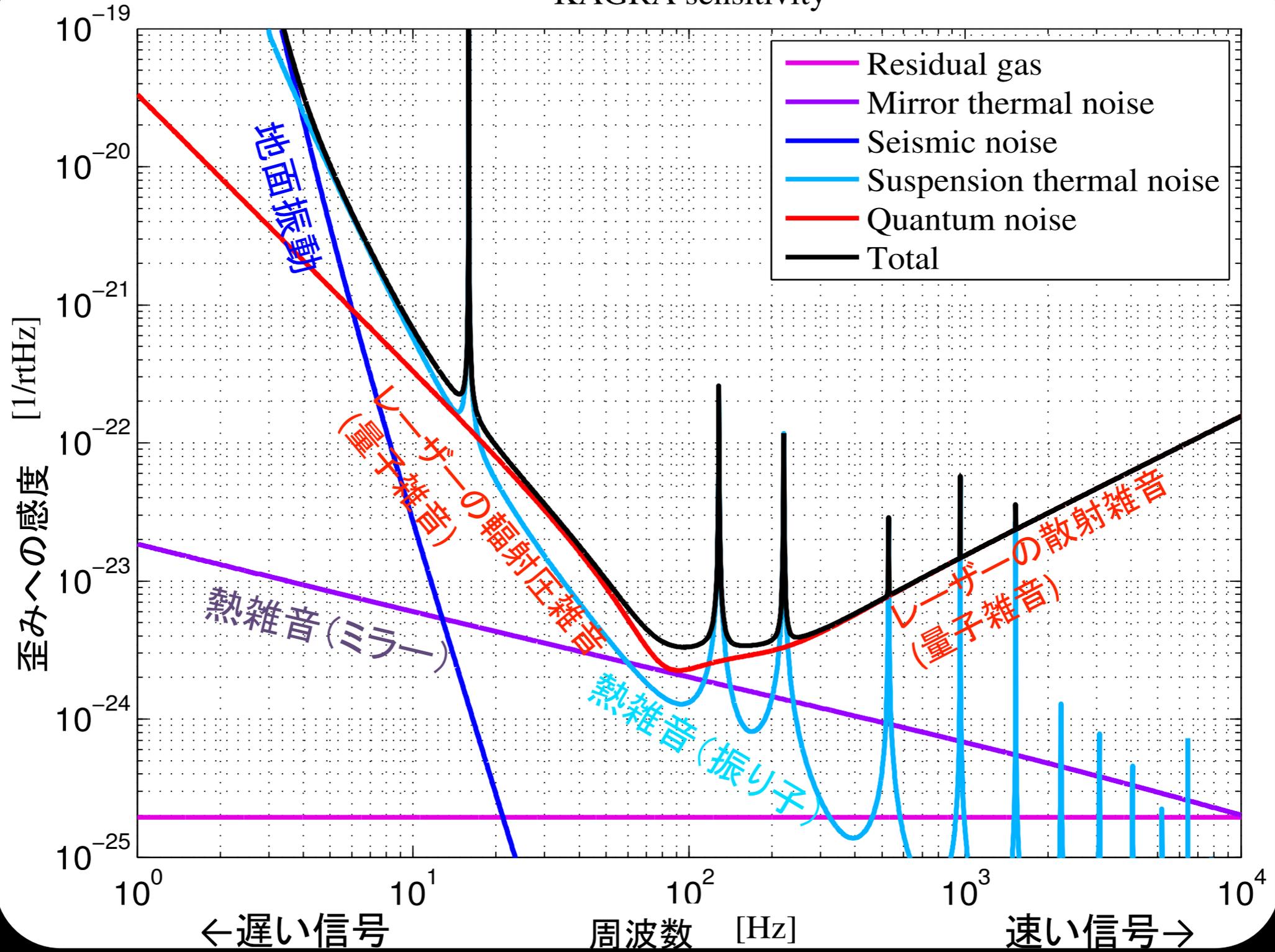


## ③ 量子雑音

光子が量子的なふるまいをするせいで起きる雑音

- 180Wのハイパワーレーザーを使う

# KAGRA sensitivity





# 天文学検定

 受験のご案内

 公式テキスト

 天文学クイズ

[ホーム](#) > 2014年度 第4回天文学検定 解答速報

## 解答速報

 2014年度 第4回天文学検定 解答速報

1級

[問題と解答](#)

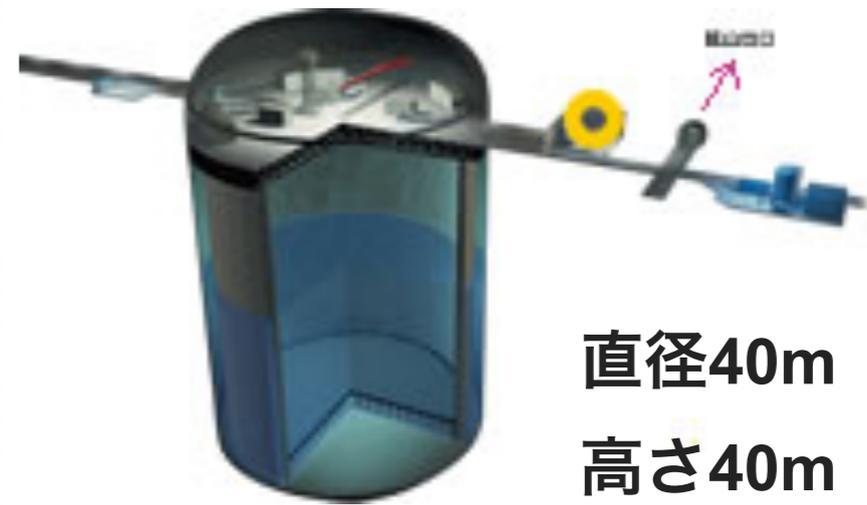
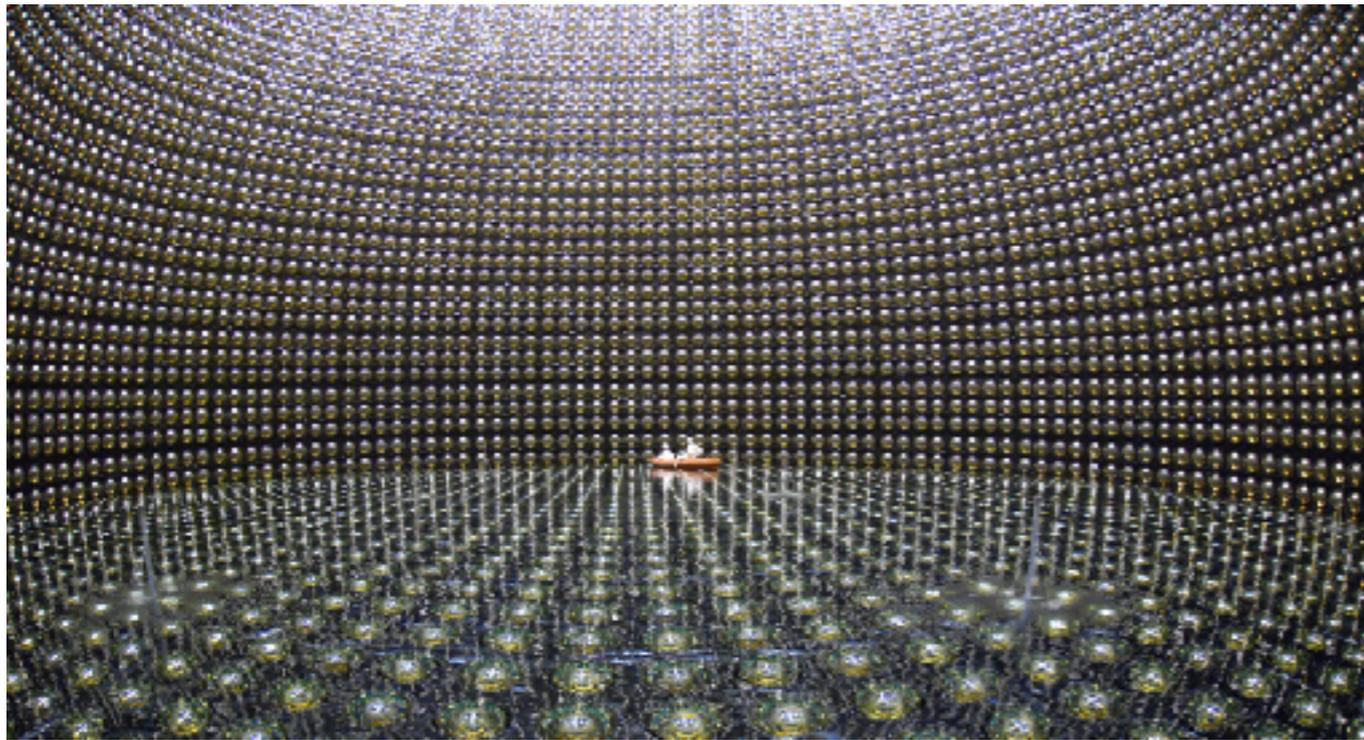
2014年6月、日本が岐阜県に建設している重力波干渉計KAGRA（かぐら）のトンネルが貫通し、マスコミに公開された。KAGRAは、一辺が3kmもあるレーザー干渉計だが、岐阜県神岡鉱山跡の山中にわざわざ建設した理由は何か。

- ①近くにはスーパーカミオカンデというニュートリノ観測装置があり、実験装置の調整にニュートリノを使うから
- ②山の中だと地面の振動が少なく、干渉計装置のゆれを押さえることができるから
- ③山の中だと温度調整が少なくて済むので、レーザー光源のメンテナンスに都合がよいから
- ④強力なレーザー光の発生や、真空ポンプの稼働で、騒音が激しいから

# 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



# 重力波初検出を発表するライツィLIGO所長

2016年2月11日

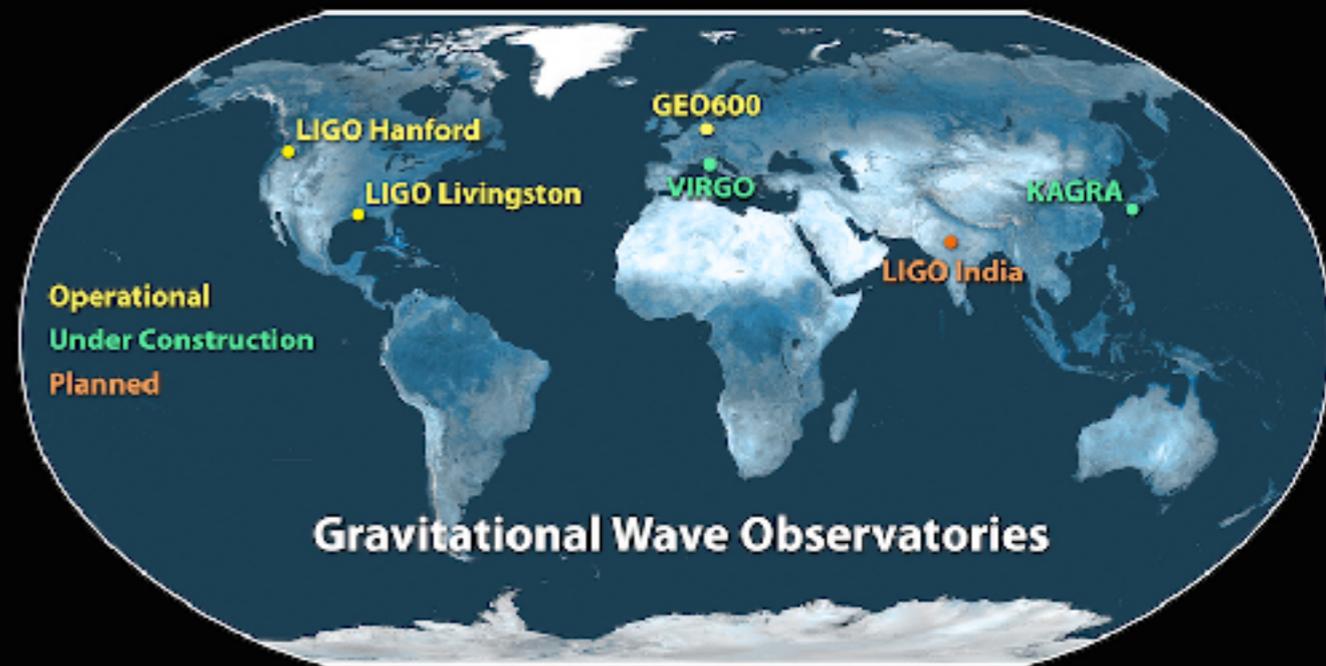
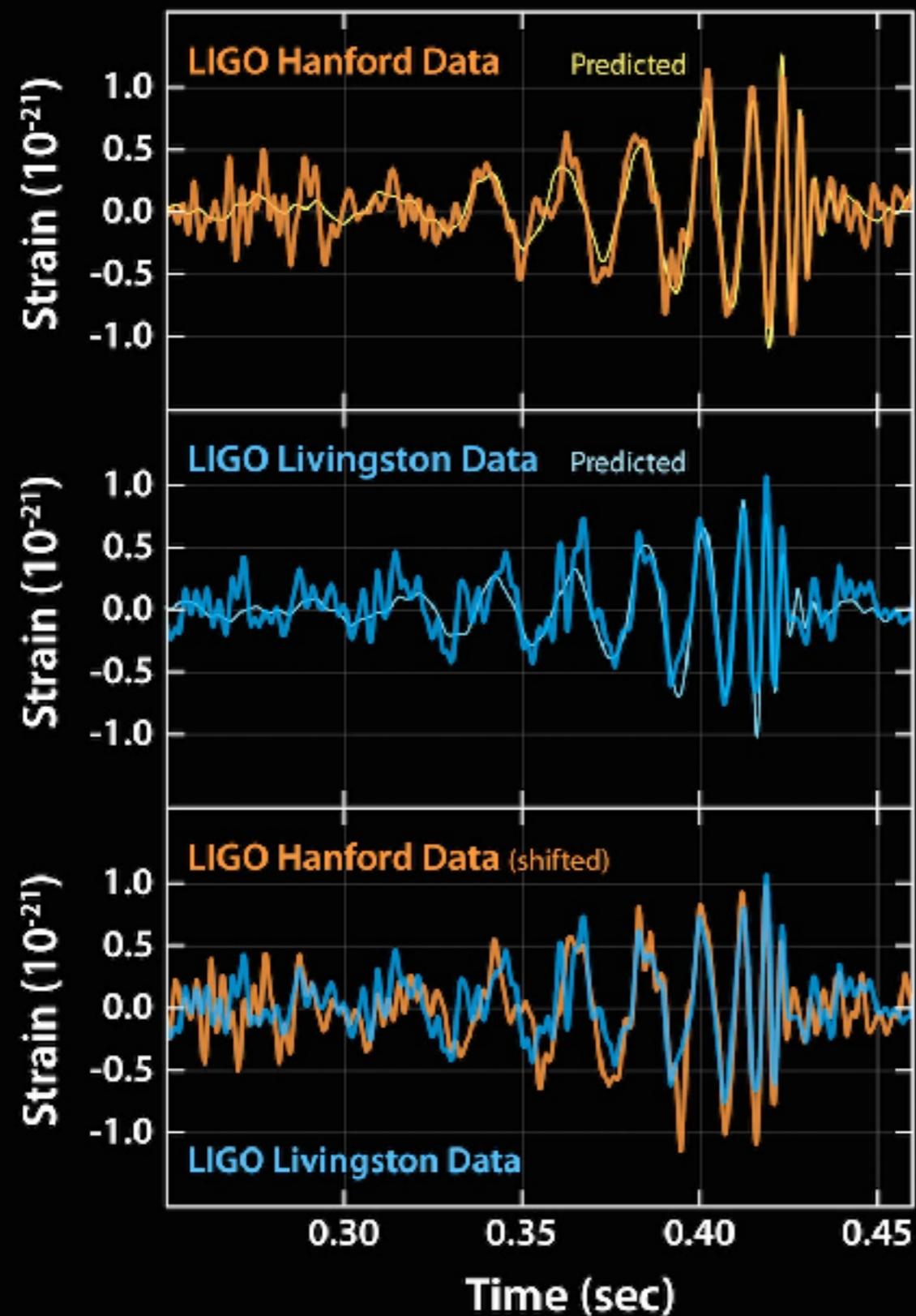


**“We had detected gravitational waves. We did it.”**

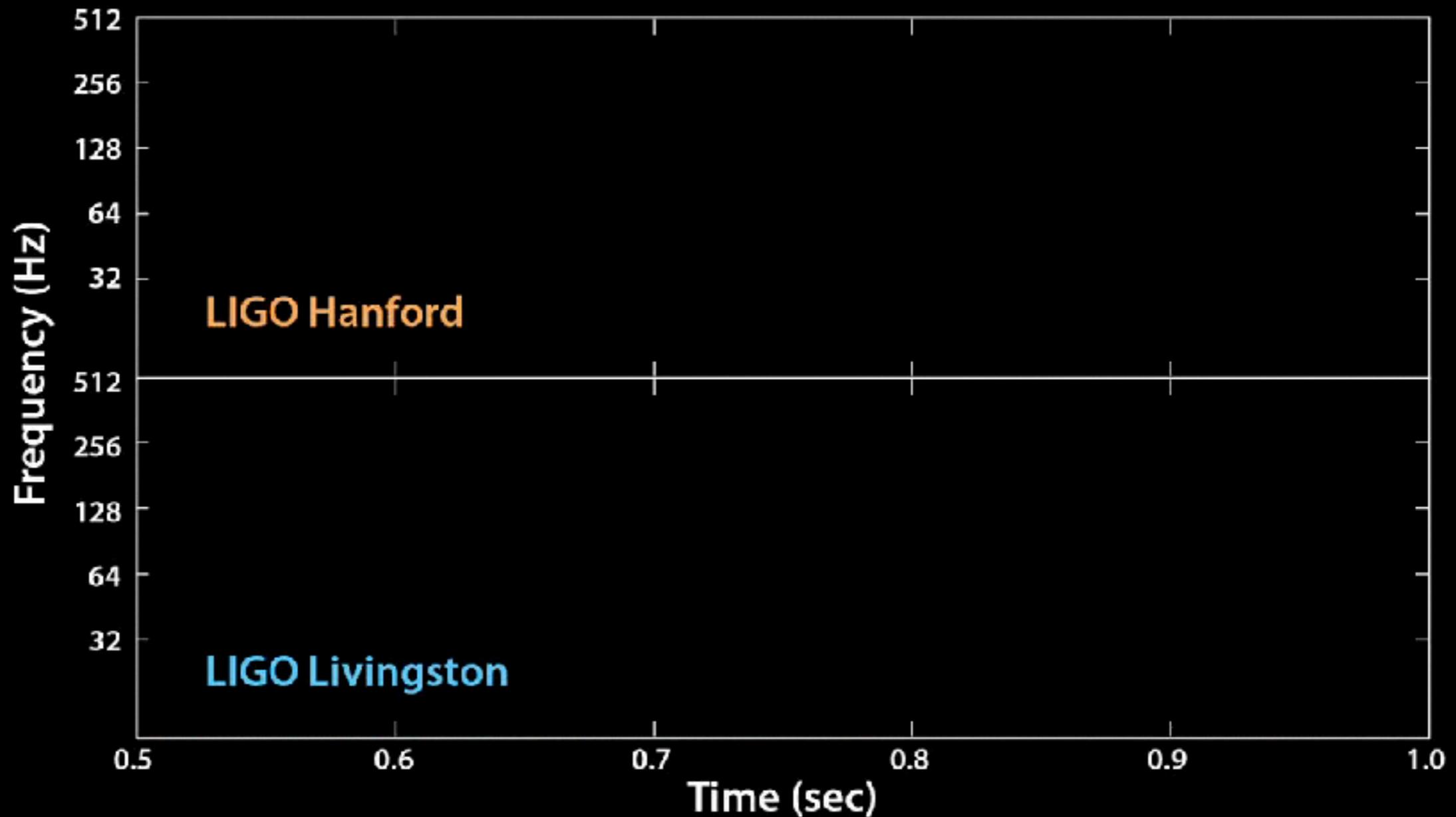
**“我々は、重力波を検出した。やり遂げたのだ。”**

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

# 2015年9月14日



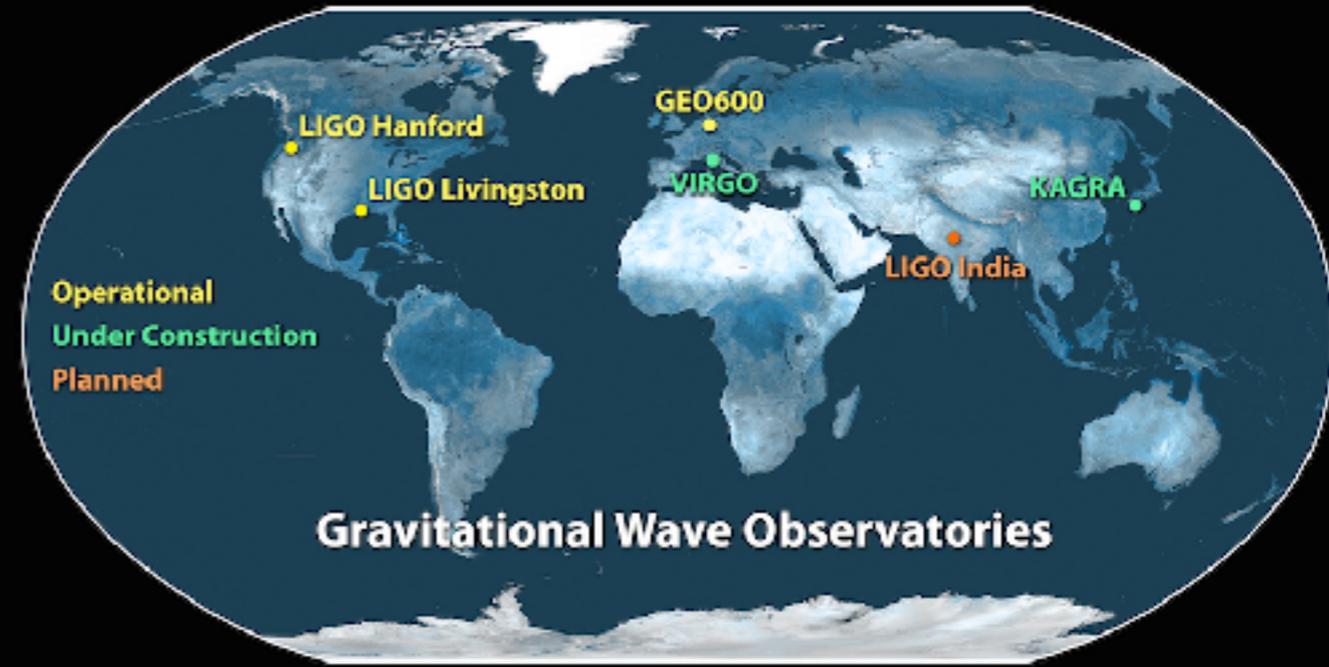
# 重力波波形を音にすると. . .



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>

2015年9月14日

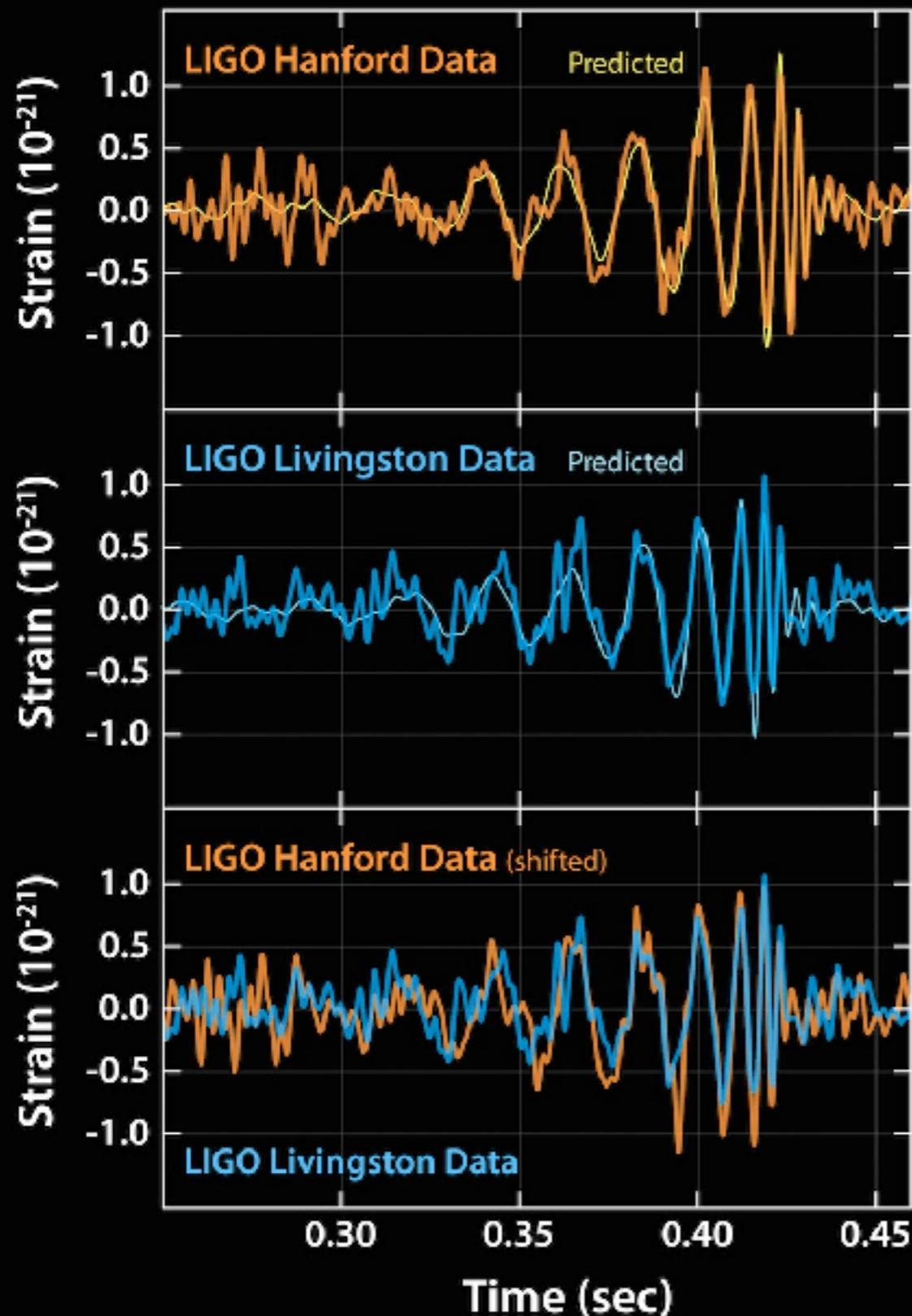


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、  
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

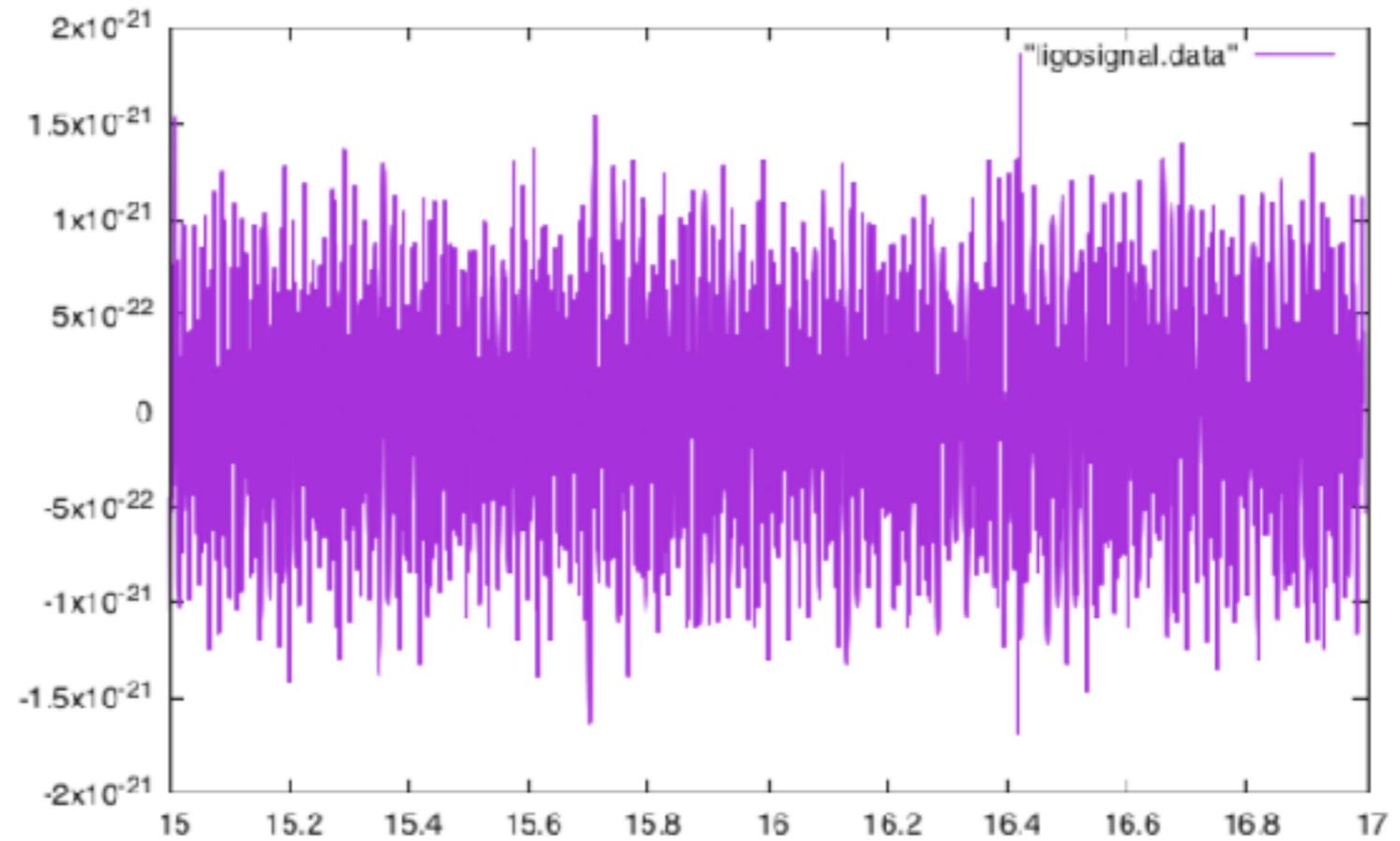
$$E = mc^2$$

13億光年先

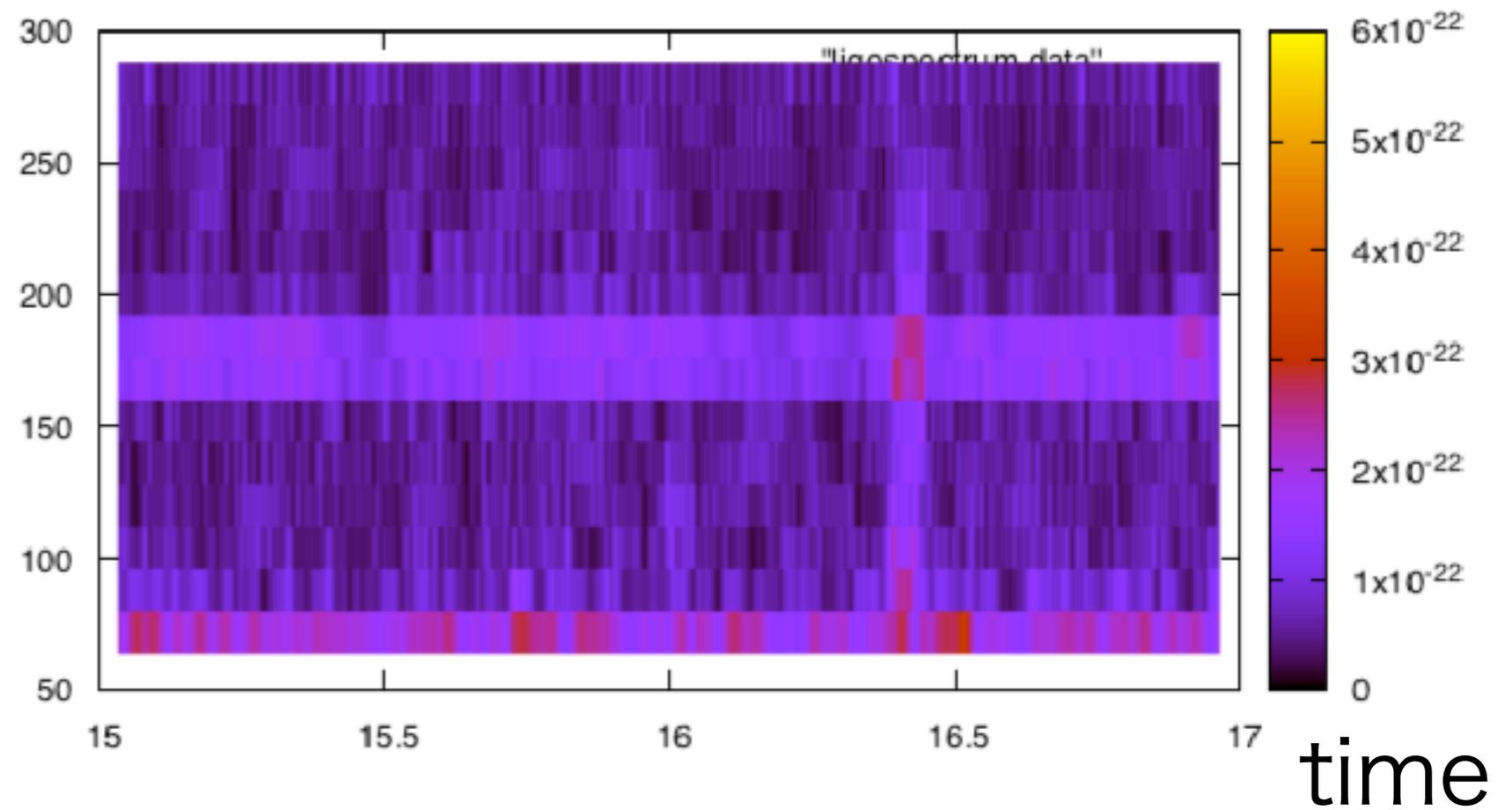


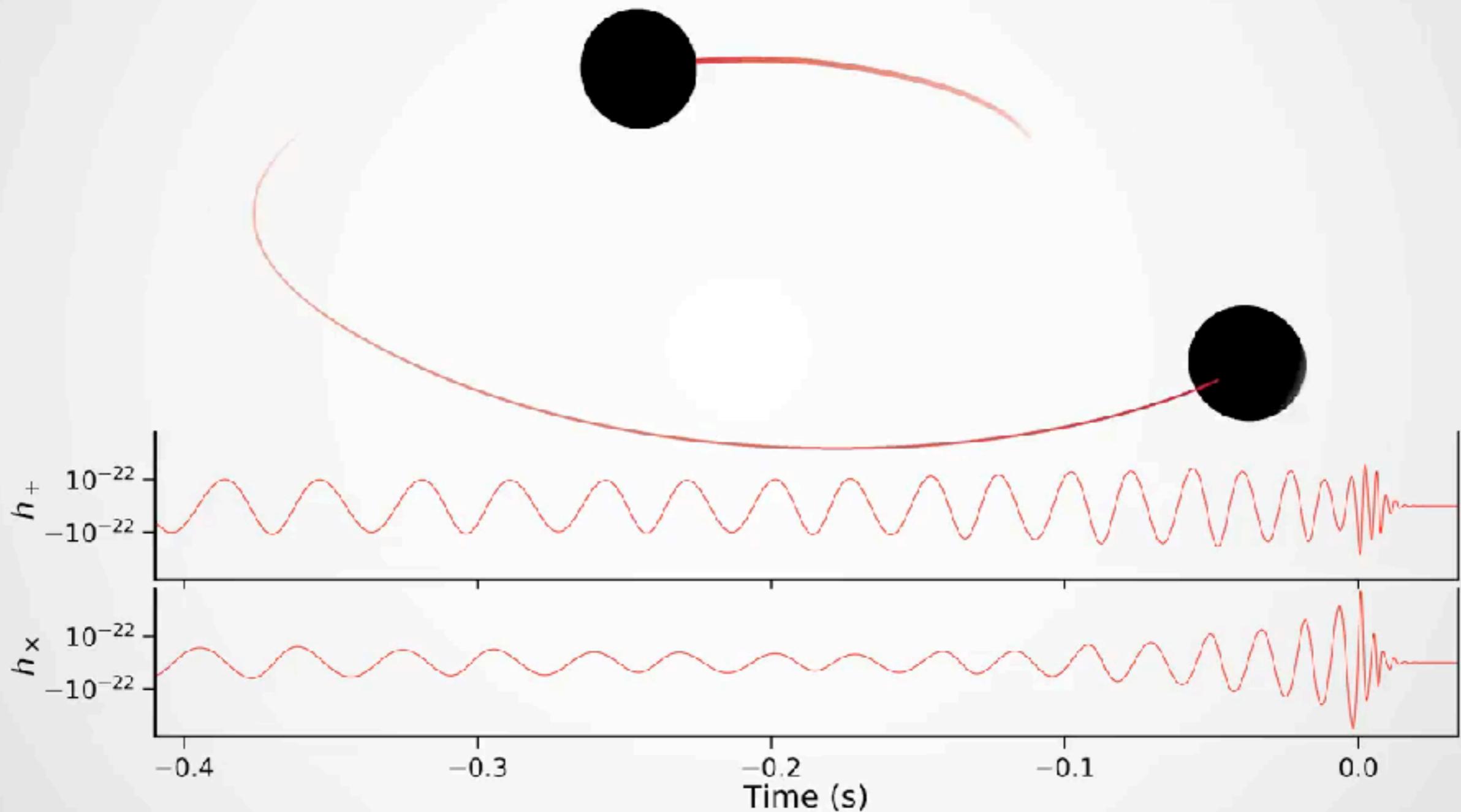
# GW150914

$h(t)$



freq





**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>

## APPENDIX B: SIMULATION RANKINGS

In this appendix, we enumerate the simulations used in this work, ordered by one measure of their similarity with the data ( $\ln L$ , in Table III). For nonprecessing binaries, Fig. 6 provides a visual illustration of some trends in  $\ln L$  versus mass ratio and the two component spins.

TABLE III. *Peak Marginalized  $\ln L$  I: Consistency between simulations:* Peak value of the marginalized log likelihood  $\ln L$  [Eq. (7)] evaluated using a lower frequency  $f_{\text{low}} = 30$  Hz and all modes with  $l \leq 2$ ; the simulation key, described in Table II [an asterisk (\*) denotes a new simulation motivated by GW150914, and a (+) denotes one of the simulations reported in LVC-detect [1]]; the *initial* spins of the simulation (using  $-$  to denote zero, to enhance readability); the initial  $\chi_{\text{eff}}$ ; the total (redshifted) mass of the best fit; and the starting frequency (in Hz) of the best fit. Though omitting information accessible to the longest simulations, this choice of low-frequency cutoff eliminates systematic biases associated with simulation duration, which differs across our archive, as seen by the last column.

$\ln L$	Key	$q$	$\chi_{1,x}$	$\chi_{1,y}$	$\chi_{1,z}$	$\chi_{2,x}$	$\chi_{2,y}$	$\chi_{2,z}$	$\chi_{\text{eff}}$	$M_z/M_\odot$	$f_{\text{start}}$ (Hz)
272.2	SXS:BBH:0310(*)	1.221	...	...	...	...	...	...	0.00	73.0	15.1
272.1	D12_q1.00_a-0.25_0.25_n100(*)	1.0	...	...	0.250	...	...	-0.250	-0.00	73.2	20.5
272.1	SXS:BBH:0002[S]	1.0	...	...	...	...	...	...	0.00	73.2	10.0
271.8	D11_q0.75_a0.0_0.0_n100(*)	1.333	...	...	...	...	...	...	-0.00	72.1	23.1
271.8	SXS:BBH:0305(*+)	1.221	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	74.2	14.8
271.6	SXS:BBH:0218	1.0	...	...	-0.500	...	...	0.500	0.00	73.3	10.6
271.6	SXS:BBH:0198	1.202	...	...	...	...	...	...	0.00	73.4	12.7
271.6	SXS:BBH:0307(*)	1.228	...	...	0.320	...	...	-0.580	-0.08	70.0	17.0
271.6	GT:BBH:476	1.0	...	...	-0.200	...	...	-0.200	-0.20	67.9	24.3
271.6	S0_D10.04_q1.3333_a0.45_-0.80_n100	1.334	...	...	0.450	...	...	-0.801	-0.09	71.9	27.9
271.5	D12_q1.00_a0.85_a0.0_0.0_n100(*)	1.176	...	...	...	...	...	...	-0.00	73.0	20.6
271.5	D12.25_q0.82_a-0.44_0.33_n100(*+)	1.22	...	...	0.330	...	...	-0.440	-0.02	72.9	20.2
271.5	SXS:BBH:0312(*)	1.203	...	...	0.390	...	...	-0.480	-0.00	73.9	14.8
271.4	SXS:BBH:0127	1.34	0.010	-0.077	-0.017	-0.061	-0.065	-0.179	-0.09	71.5	14.3
271.4	SXS:BBH:0115	1.07	0.019	0.013	-0.204	0.243	-0.067	0.291	0.04	74.1	13.8
271.3	SXS:BBH:0213	1.0	...	...	-0.800	...	...	0.800	0.00	73.2	11.7
271.3	UD_D10.01_q1.00_a0.4_n100	1.0	...	...	0.400	...	...	-0.400	-0.00	73.4	26.7
271.2	D12_q1.00_a-0.25_0.00_n100(*)	1.0	...	...	...	...	...	-0.250	-0.12	69.4	21.8
271.2	SXS:BBH:0222	1.0	...	...	-0.300	...	...	...	-0.15	69.1	12.3
271.2	SXS:BBH:0217	1.0	...	...	-0.600	...	...	0.600	0.00	73.2	11.9



# 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  $z = 0.09_{-0.02}^{+0.03}$ . 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

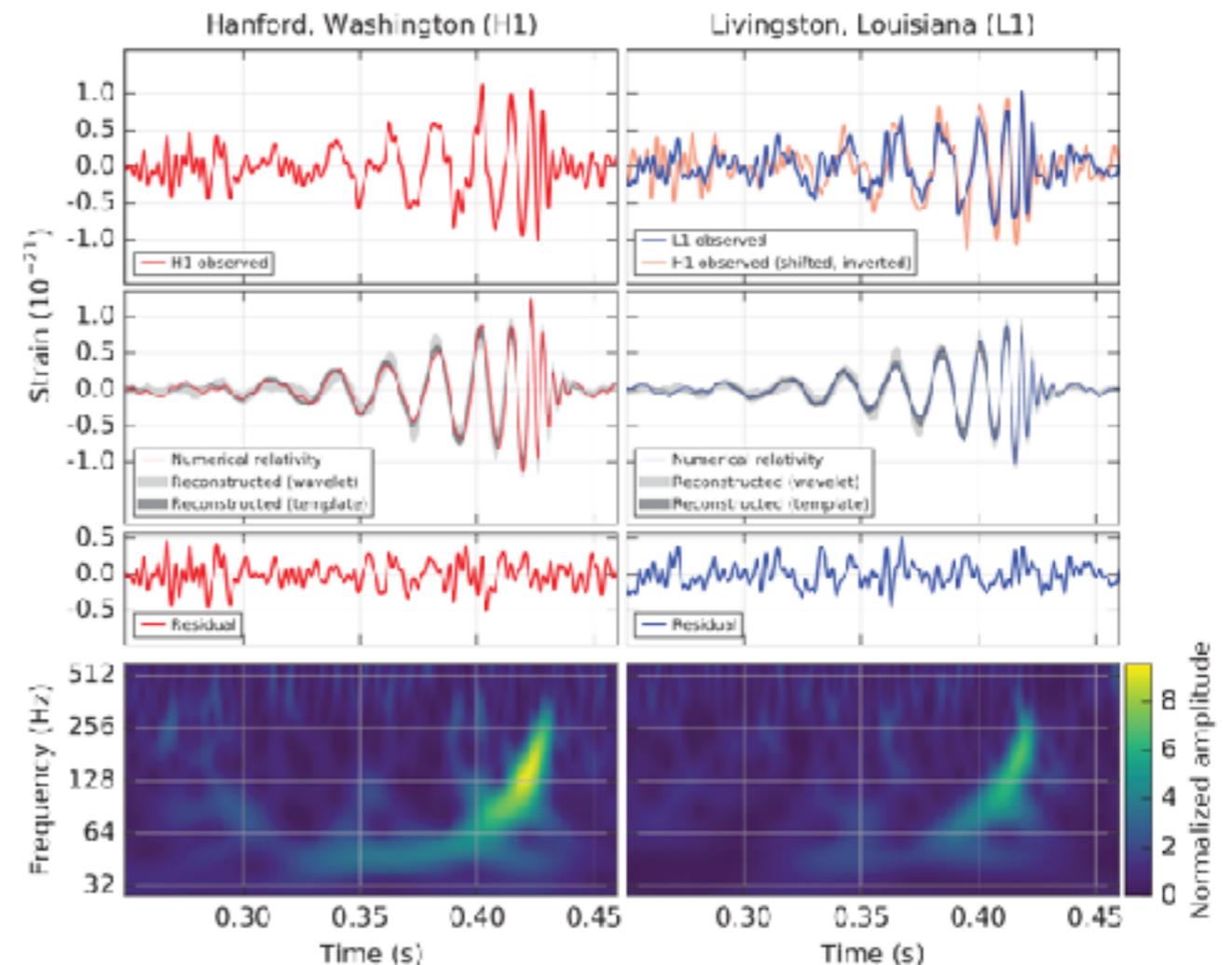
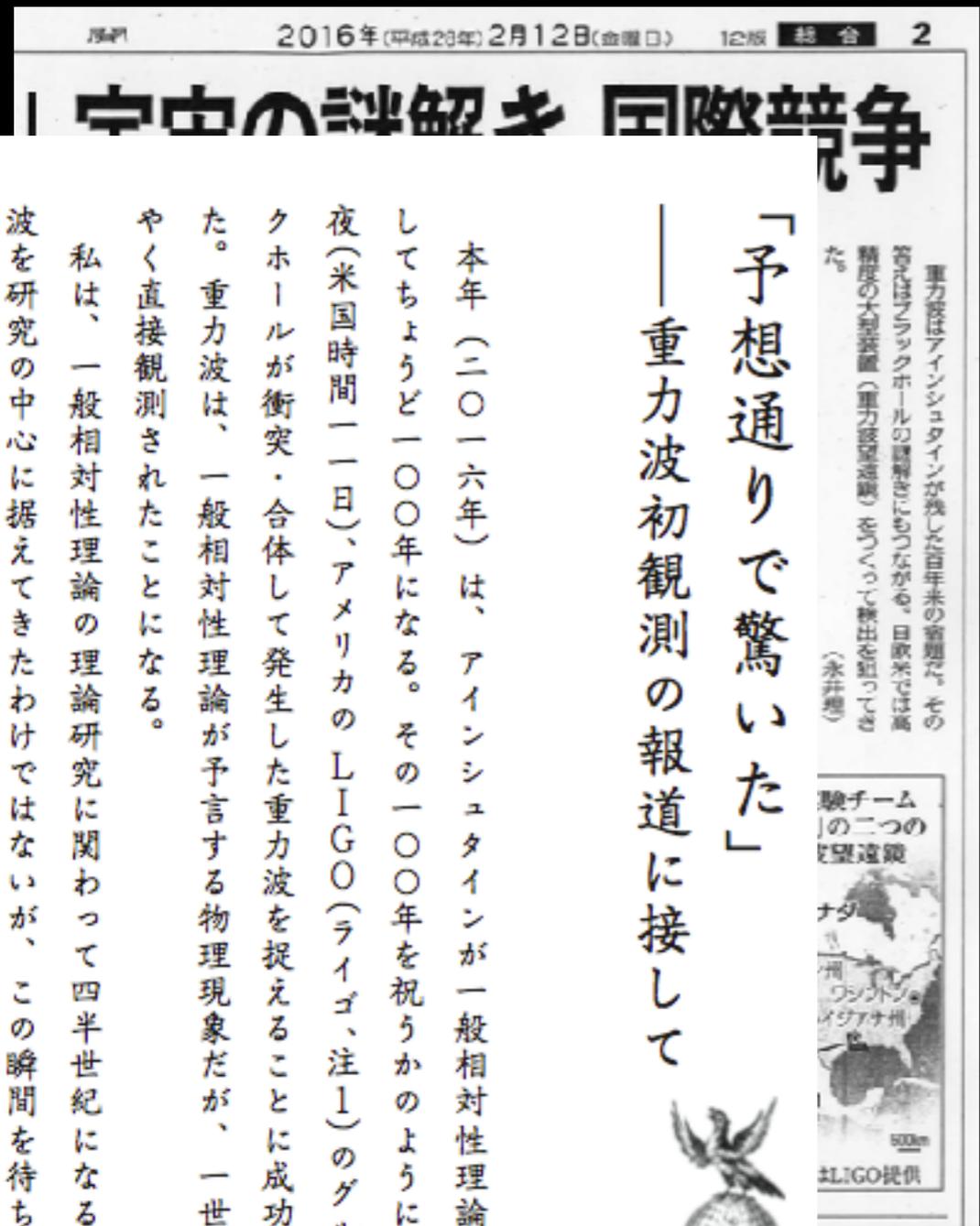


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered



# 2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した



「予想通りで驚いた」  
 重力波初観測の報道に接して

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。

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

真貝 寿明



## 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辰行・大阪市立大学大学院教授(司)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100人が参加し、興味な表情で聴き入った。

【嵐山哲郎】

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辰行教授—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时空にゆがみが生じ、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。

### 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余り余りの側面が強かった。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ったのである。

[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つていた。「もっと科学を」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

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「もっと科学を」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「もっと科学を」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」ゴレンである。ゴレン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、科学が自らを実態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、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 ゴレン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5)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6)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

「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。一九六九年にウエーバーが、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、ウエーバーの結晶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、ウエ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、本当はウエ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)コクされる。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、「もっと科学を」路線を批判するのである。民主主義国家の一

- (ウ) ヤツカイ
- 3
- ① ゴリヤクがある
  - ② ツウヤクの資格を取得する
  - ③ ヤクドシを乗り切る
  - ④ ヤツキになって反対する
  - ⑤ ヤツコウがある野草を探す

- (エ) センコク
- 4
- ① 上級裁判所へのジョウコク
  - ② コクメイな描写
  - ③ コクビヤクのつけにくい議論
  - ④ コクソウ地帯
  - ⑤ 筆跡がコクジした署名

# 2017年1月大阪工業大学 物理

## 物 理

I 空所を埋め、問いに答えよ。(配点 60)

2015年9月14日、重力波が観測された。この重力波は、13億光年のかたで2つのブラックホールが互いの周りを回転しながら衝突・合体したときに、放出されたものだという。以下では2つのブラックホールを、質量  $m_1, m_2$  [kg] の2つの質点(以下、星1, 星2と呼ぶ)とみなし、万有引力の下でどのような運動をするかを力学的観点から調べてみよう。

(1) 星1, 星2の位置ベクトルを  $\vec{r}_1, \vec{r}_2$  [m], 速度を  $\vec{v}_1, \vec{v}_2$  [m/s] とする。以下で、物理量  $X$  の微小な時間  $\Delta t$  [s] の間の変化を  $\Delta X$  と書き表すことにする。この書き方では、位置ベクトル  $\vec{r}_1$  の変化は、速度ベクトル  $\vec{v}_1$  を用いて、 $\Delta \vec{r}_1 = \vec{v}_1 \Delta t$  となる。この式は、以下のように書いてもよい。

$$\vec{v}_1 = \frac{\Delta \vec{r}_1}{\Delta t}$$

星1の速度の変化  $\Delta \vec{v}_1$  [m/s] と、星2から星1にはたらく万有引力  $\vec{F}$  [N] の間には、

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = \vec{F} \Delta t \quad \text{①}$$

という関係がある。式①は  ア  の変化が  イ  に等しいことを表している。一方、星1から星2にはたらく力は、 ウ  の法則により  $-\vec{F}$  となるので、次の関係式が成り立つ。

$$m_2 \Delta \vec{v}_2 = -\vec{F} \Delta t \quad \text{②}$$

式①, ②より、

$$m_1 \Delta \vec{v}_1 + m_2 \Delta \vec{v}_2 = \Delta(m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2) = 0 \quad \text{③}$$

1) 式③の表す物理的内容を簡潔に述べよ。

星1, 星2の重心の位置ベクトル  $\vec{R}$  [m], 速度  $\vec{V}$  [m/s], 加速度  $\vec{A}$  [m/s<sup>2</sup>] は、次のように表される。

$$\vec{R} = \frac{m_1 \vec{r}_1 + m_2 \vec{r}_2}{m_1 + m_2}, \quad \vec{V} = \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta t} = \frac{m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2}{m_1 + m_2}, \quad \vec{A} = \frac{\Delta \vec{V}}{\Delta t}$$

2) 問1)の結果を踏まえ、重心がどのような運動をするか簡潔に述べよ。

(2) 星1から見た星2の相対位置を表すベクトルを  $\vec{r}$  [m], 相対速度を  $\vec{v}$  [m/s] とすると、

$$\vec{r} = \vec{r}_2 - \vec{r}_1, \quad \vec{v} = \frac{\Delta \vec{r}}{\Delta t} = \vec{v}_2 - \vec{v}_1$$

となる。この式より

$$\Delta \vec{v} = - \left( \text{エ} \right) \times \vec{F} \Delta t \quad \text{④}$$

が得られる。式④は、

$$\mu \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = -\vec{F}, \quad \text{ただし } \mu = \frac{1}{\text{エ}} \quad \text{⑤}$$

と書き直すことができる。

式⑤は、星1を原点とする座標系で、質量  $\mu$  [kg] の質点(以下、質点  $\mu$  と呼ぶ)が、常に原点に向かう力  $-\vec{F}$  (万有引力)を受けて運動しているときの運動方程式と見なすことができる。以下では、質点  $\mu$  が星1を中心とする半径  $\ell$  [m] の円周上を、角速度  $\omega$  で等速円運動する場合を考えよう。2つの質点の間にはたらく万有引力は、お互いの位置関係のみによって決まり、質点の速度には無関係である。したがって、どのような座標系から見ても、その大きさは万有引力定数を  $G$  [N·m<sup>2</sup>/kg<sup>2</sup>] として  $G \frac{m_1 m_2}{\ell^2}$  である。また、無限の遠方を基準とした万有引力による位置エネルギーは  $-G \frac{m_1 m_2}{\ell}$  である。

3) 質点  $\mu$  の円運動について、中心方向の運動方程式を書き、角速度  $\omega$  [rad/s] を求めよ。ただし、 $\mu$  はそのまま用い、 エ  の値を代入する必要はない。

問3)の結果は、円運動の周期の2乗が半径  $\ell$  の  オ  乗に比例することを示している。これは、 カ  法則に相当する。

4) 質点  $\mu$  の力学的エネルギー  $E$  [J] を求め、 $\ell$  との関係を解答欄のグラフに描け。

5) 重力波の放出により力学的エネルギーが失われると、半径  $\ell$ , 角速度  $\omega$  および質点  $\mu$  の速さはどのように変化するか、解答欄からそれぞれ正しいものを選び丸で囲め。

(3) (2)では相対運動に着目し、静止した星1の周りを星2が円運動すると見る立場で考察した。現実には星1, 星2は互いの周りを回って加速度運動しているので、このような見方は許されないはずだが、星2の質量を  $\mu$  に置きかえることで、矛盾が解消されている。

この運動を元の座標系から見るときは、星1, 星2が、共通の角振動数  $\omega$  [rad/s] で、それぞれ半径  $\ell_1, \ell_2$  [m] の等速円運動をしていると考える(図1参照)。大きさ  $G \frac{m_1 m_2}{\ell^2}$  の万有引力を向心力として円運動するから、円運動の中心は、星1, 星2を結ぶ線分上にある。更に、星1, 星2の運動方程式を用いて計算すると、 $\ell_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \ell$ ,  $\ell_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \ell$  となり、全体の力学的エネルギーが、先に求めた  $E$  と一致することが確認できる。これによって、相対運動に着目した考え方が正当化されることがわかる。

6) 図2に、力学的エネルギーが保存するときの星1, 星2の円軌道の一部を実線で描いた。重力波を放出して力学的エネルギーが失われていくとき、軌道がどのように変わるかを示す概略図を解答欄に描き込め。

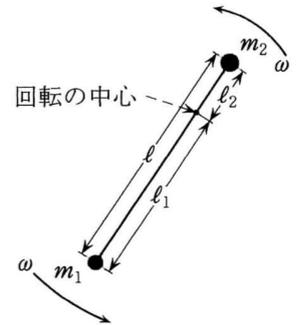


図1 互いの周りを回転する星1と星2

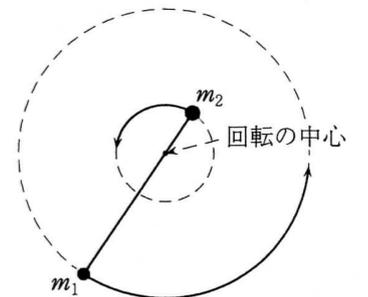


図2 力学的エネルギーが保存するときの軌道

2016.2.29配信

ツイート

## 絶対に役立つ中学受験専門プロ家庭教師からの必勝アドバイス！ 入試で狙われそうな今月の理科トピックス

今月は、記事の数が多かった宇宙のお話の特集です。  
“アインシュタインの最後の宿題”と“H2Aロケット30号機で6世代目のX線天文衛星「ひとみ」を打ち上げ”それに“太陽系第9番目の惑星発見か？”について取り上げます。

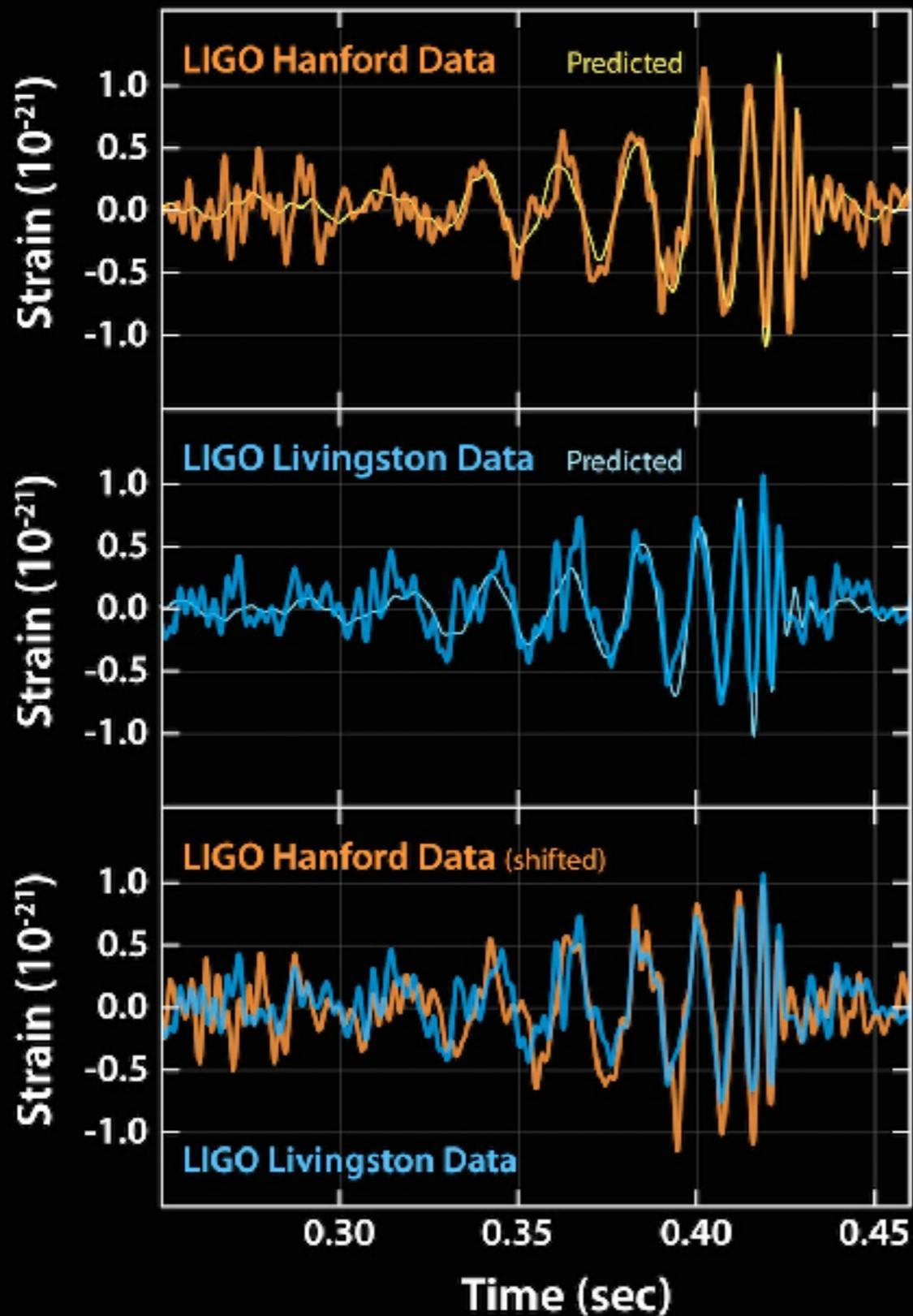
### < アインシュタインの最後の宿題 >

今月11日、米国重力波観測所LIGOのリーダーであるデビッド・ライツ氏は、重力波の観測に成功したと発表しました。この発見は100年にアインシュタインによって存在が予言されていた重力波が確認されたものです。これはノーベル賞級の快挙です。

### 『重力波ってなに？』

皆さんはセルロイドの下敷きを髪の毛でこすると髪の毛や軽い紙やほこりが下敷きに引き寄せられてくっつく遊びをしたことありますよね。これは電気（静電気）の力ですが、砂場で遊んだ磁石が砂鉄や他の磁石とくっつくのは磁気（磁力）です。他に物体が引き寄せあう力には重力があります。リンゴが地面に落ちるのを見てアイザック・ニュートンが発見したと言われる万有引力の法則がありますが、これは物体同士の引き合う力

# 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	$1 \times 10^{-21}$
time	09:50:45 UTC	peak displacement of interferometers arms	$\pm 0.002$ 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	$3.6 \times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
false alarm prob.	< 1 in 5 million	radiated GW energy	2.5-3.5 M <sub>⊙</sub>
false alarm rate	< 1 in 200,000 yr	remnant ringdown freq.	~ 250 Hz
<b>Source Masses</b> M <sub>⊙</sub>		remnant damping time	~ 4 ms
total mass	60 to 70	remnant size, area	180 km, $3.5 \times 10^5$ km <sup>2</sup>
primary BH	32 to 41	consistent with general relativity?	passes all tests performed
secondary BH	25 to 33	graviton mass bound	< $1.2 \times 10^{-22}$ eV
remnant BH	58 to 67	coalescence rate of binary black holes	2 to 400 Gpc <sup>-3</sup> yr <sup>-1</sup>
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= $9.46 \times 10^{12}$  km; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, Gpc= $10^3$  Mpc, fm=femtometer= $10^{-15}$  m, M<sub>⊙</sub>=1 solar mass= $2 \times 10^{30}$  kg

# GW151226

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

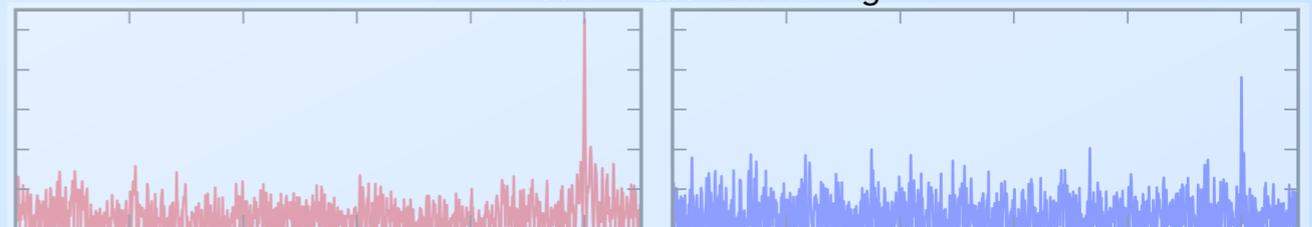
15億光年先  
 (440±190 Mpc)  
 (z=0.05—0.13)

# 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	
distance	250 to 620 Mpc	peak GW strain	~ 3.4 x 10 <sup>-22</sup>
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
<b>Source Masses</b> M <sub>⊙</sub>		peak GW luminosity	2 to 4 x 10 <sup>56</sup> erg s <sup>-1</sup>
total mass	20 to 28	radiated GW energy	0.8-1.1 M <sub>⊙</sub>
primary BH	11 to 23	remnant ringdown freq.	~ 750 Hz
secondary BH	5 to 10	remnant damping time	~ 1.3 ms
remnant BH	19 to 27	remnant size, area	60 km, 3.5 x 10 <sup>4</sup> km <sup>2</sup>
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.		

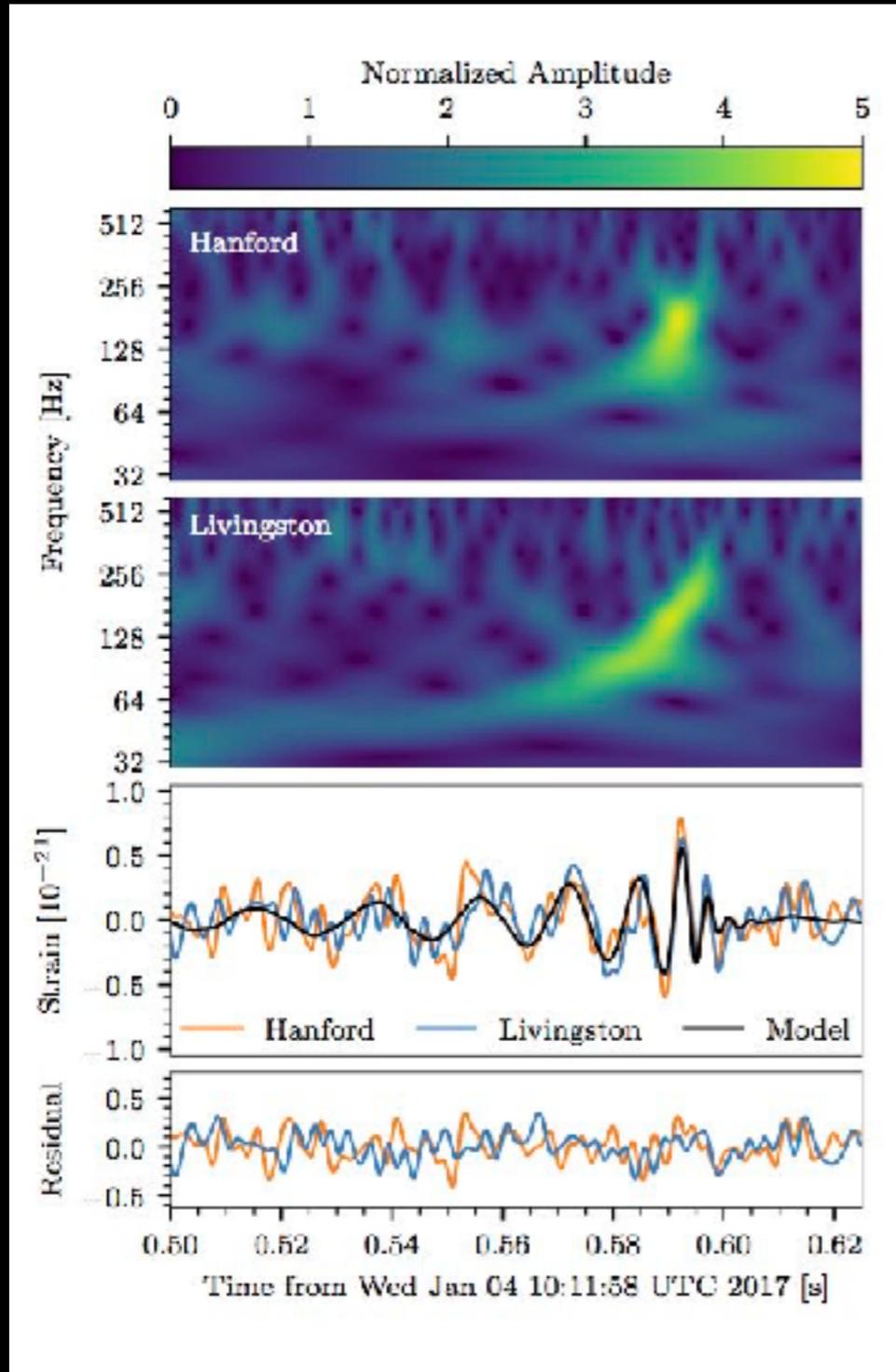
Parameter ranges correspond to 90% credible bounds. Acronyms: L1/H1=LIGO Livingston/Hanford; Mpc=mega parsec=3.2 million lightyear, am=attometer=10<sup>-18</sup> m, M<sub>⊙</sub>=1 solar mass=2 x 10<sup>30</sup> kg



# 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	~ $5 \times 10^{-22}$
false alarm rate	< 1 in 70,000 years	peak displacement of interferometer arm	~ $\pm 1$ 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 $3.8 \times 10^{56}$ erg s <sup>-1</sup>
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 <sup>2</sup>
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 $2.8 \times 10^5$ km <sup>2</sup>		
effective spin parameter	-0.42 to 0.09		
effective precession spin parameter	unconstrained		

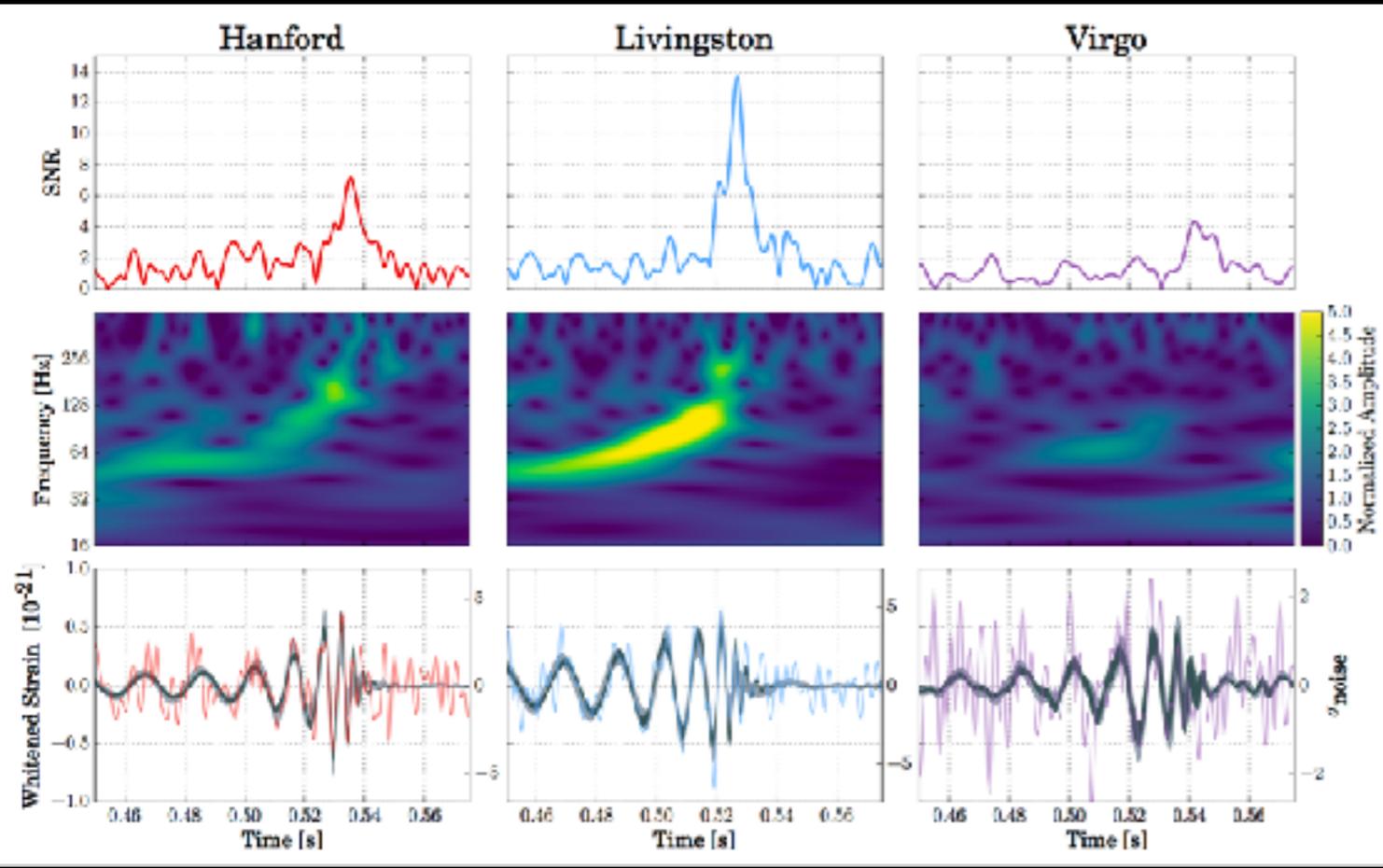
Parameter ranges correspond to 90% credible intervals.

Acronyms:

L1/H1=LIGO Livingston/Hanford, am=attometer= $10^{-18}$  m,  $M_{\odot}$ =1 solar mass= $2 \times 10^{30}$  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 <sup>2</sup>
time	10:30:43 UTC	credible region sky area (without V1)	1160 deg <sup>2</sup>
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 <sup>h</sup> 11 <sup>m</sup> , -44°57 <sup>m</sup>
false alarm rate	≤ 1 in 27 000 years	Peak GW strain (10 <sup>-22</sup> ) (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 <sub>⊙</sub>	peak GW luminosity	3.2 to 4.2 × 10 <sup>56</sup> erg s <sup>-1</sup>
primary BH mass	28 to 36 M <sub>⊙</sub>	radiated GW energy	2.4 to 3.1 M <sub>⊙</sub> c <sup>2</sup>
secondary BH mass	21 to 28 M <sub>⊙</sub>	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 <sub>⊙</sub>	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 <sup>5</sup> km <sup>2</sup>		
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<sup>-18</sup> m, M<sub>⊙</sub>=1 solar mass=2 × 10<sup>30</sup> 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

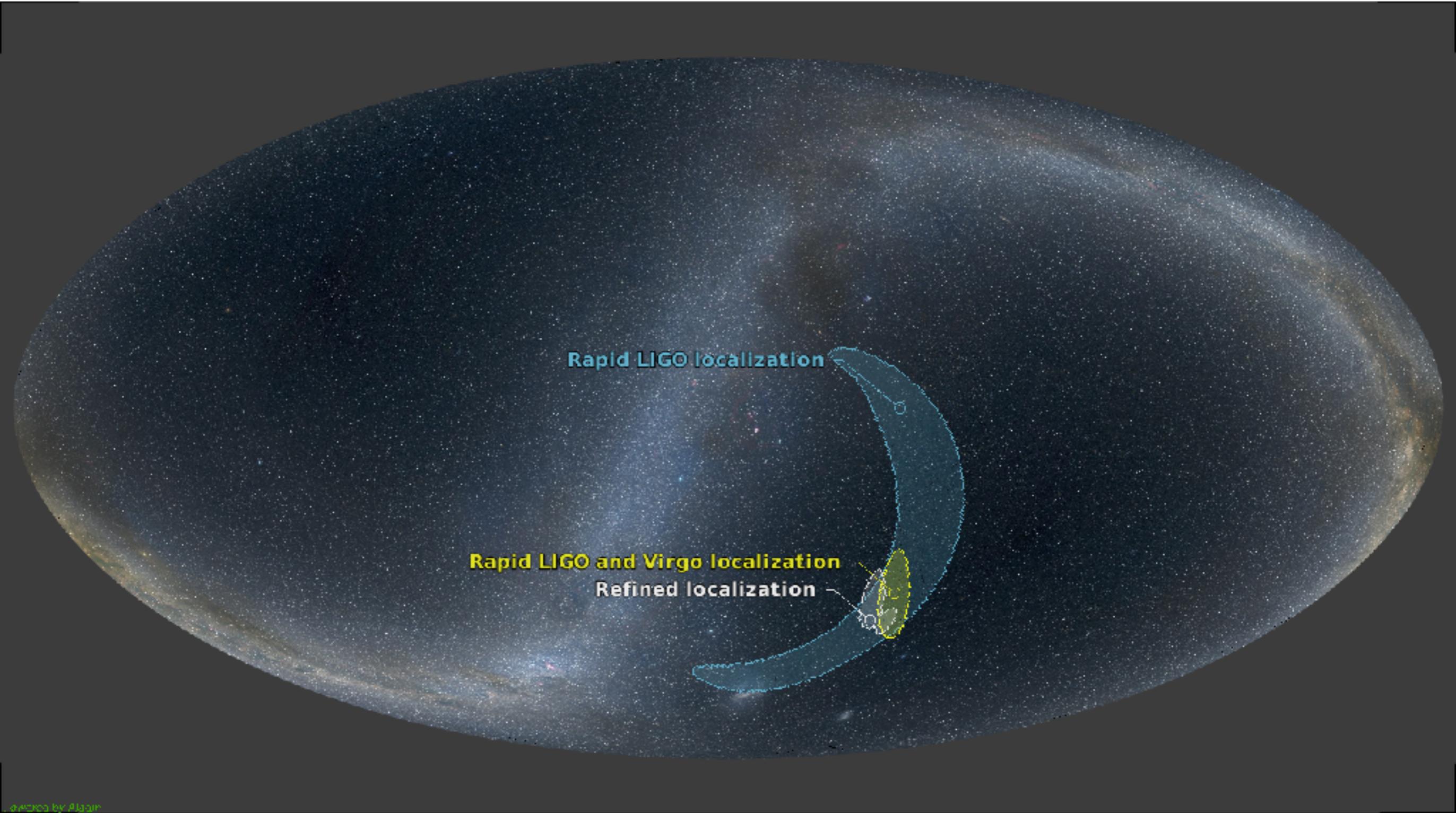


Image by Algan

# List of Detected GW events

		$M1+M2=M_f$ , $M_{diff}/M_{total}$	spin $a_{final}$	Mpc $z$	SNR	deg <sup>2</sup>
<b>GW150914</b>	PRL116, 061102 (2016/2/11)	$36.2+29.1=62.3+3.0$ <b>4.59%</b>	0.68	410Mpc 0.09	23.7	600
<b>LVT151012</b>	(2016/2/11)	$23+13=35+1.5$ <b>2.78%</b>	0.66	1000Mpc 0.20	9.7	
<b>GW151226</b>	PRL116, 241103 (2016/6/15)	$14.2+7.5=20.8+0.9$ <b>4.15%</b>	0.74	440Mpc 0.09	13.0	850
<b>GW170104</b>	PRL118, 221101 (2017/6/1)	$31.2+19.4=48.7+1.9$ <b>3.75%</b>	0.64	880Mpc 0.18	13.0	1300
<b>GW170814</b>	(2017/9/28)	$30.5+25.3=53.2+2.6$ <b>4.66%</b>	0.70	540Mpc 0.11	18	60

<https://losc.ligo.org/events/GW150914/>

<https://losc.ligo.org/events/LVT151012/>

<https://losc.ligo.org/events/GW151226/>

<https://losc.ligo.org/events/GW170104/>

# [ LIGO'S GRAVITATIONAL-WAVE DETECTIONS ]

**[GW150914]**  
DISCOVERED:  
**14.09.2015**  
**1.3** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**62** SOLAR  
MASSES  
**360** KILOMETRES IN  
DIAMETER

**[GW151226]**  
DISCOVERED:  
**26.12.2015**  
**1.4** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**21** SOLAR  
MASSES  
**120** KILOMETRES IN  
DIAMETER

**[GW170104]**  
DISCOVERED:  
**04.01.2017**  
**3** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**49** SOLAR  
MASSES  
**270** KILOMETRES IN  
DIAMETER

**1** BILLION  
LIGHT YEARS

**2** BILLION  
LIGHT YEARS

**3** BILLION  
LIGHT YEARS

**4** BILLION  
LIGHT YEARS

YOU ARE  
**HERE**



## DID YOU KNOW ?

THE SOLAR MASS IS  
A STANDARD UNIT OF MASS  
IN ASTRONOMY  
IT IS EQUAL TO  
THE MASS OF THE SUN  
EQUAL TO APPROXIMATELY  
 **$1.99 \times 10^{30}$  KG**

# contents

## 1. 重力波とは

Einsteinが残した100年越しの宿題

## 2. 直接観測された重力波

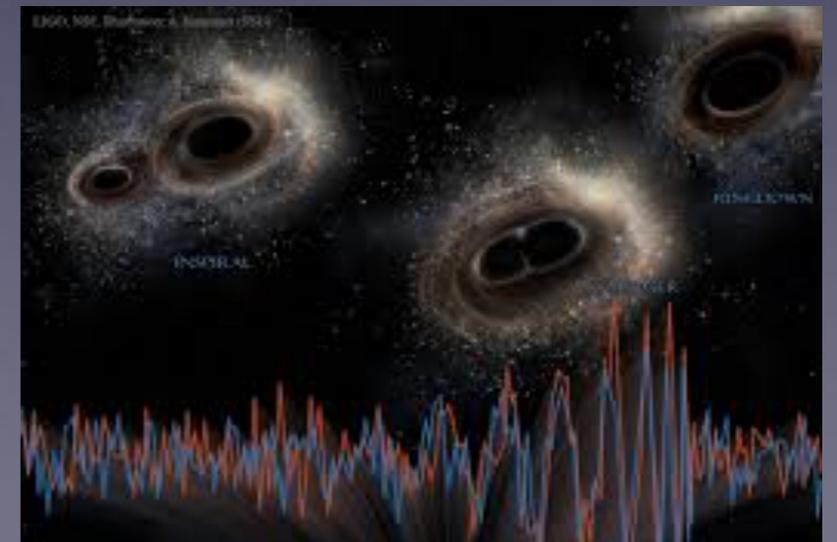
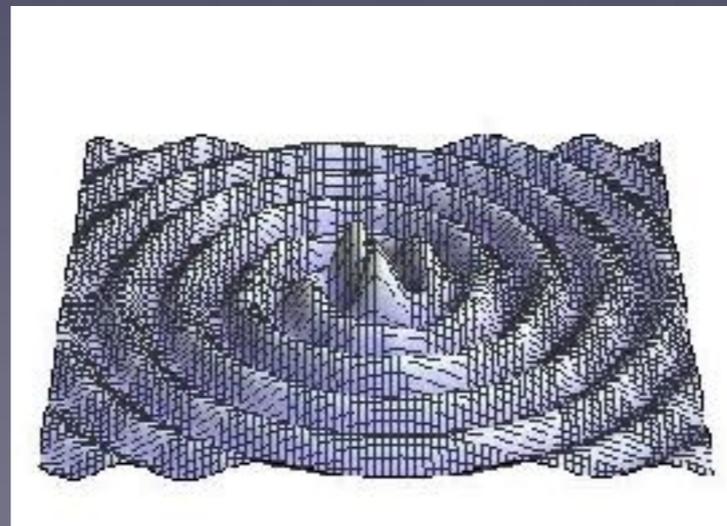
レーザー干渉計のしくみ

LIGOグループが発見した4つの重力波イベント

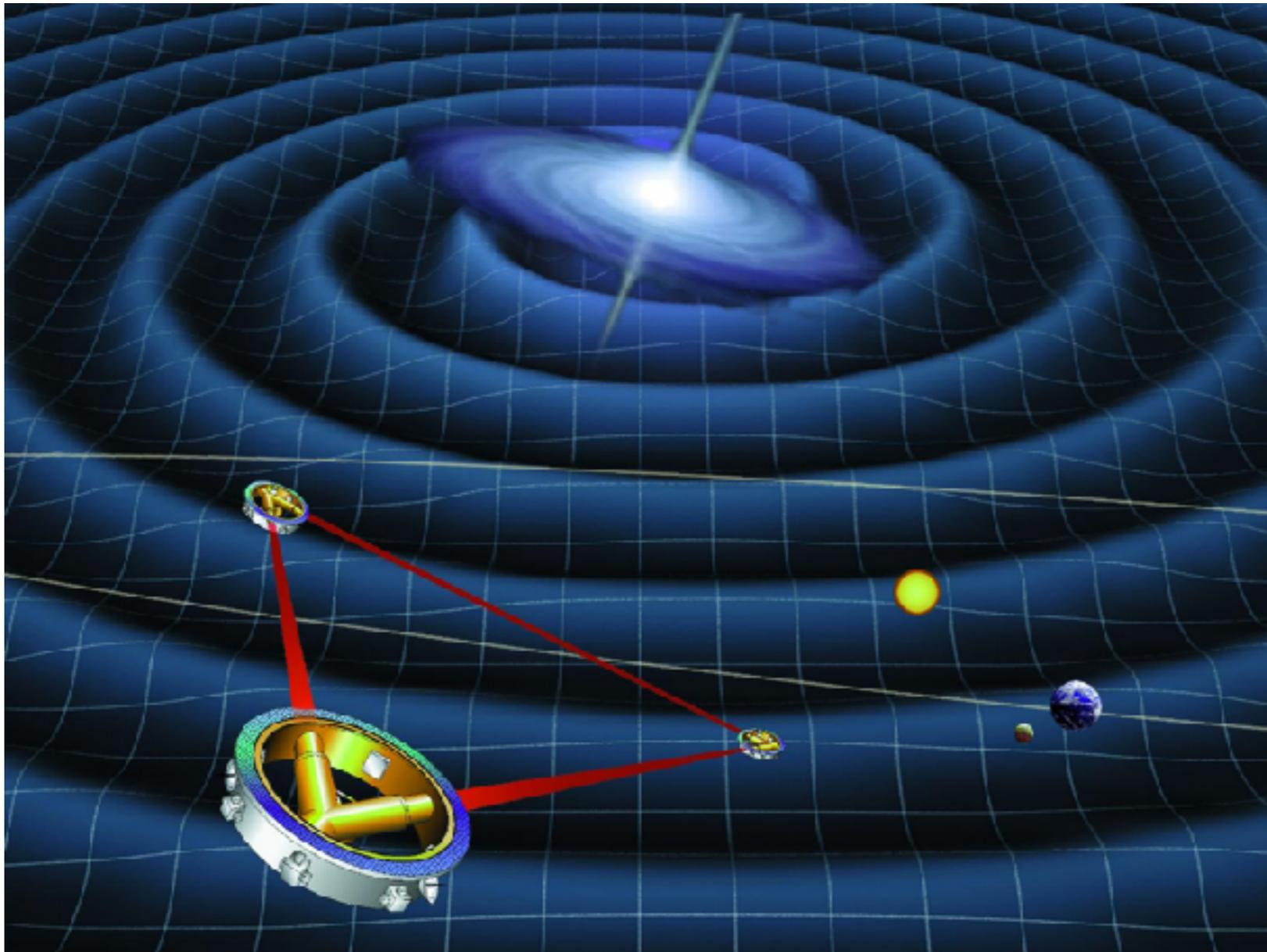
## 3. 重力波観測の将来

宇宙空間での重力波観測

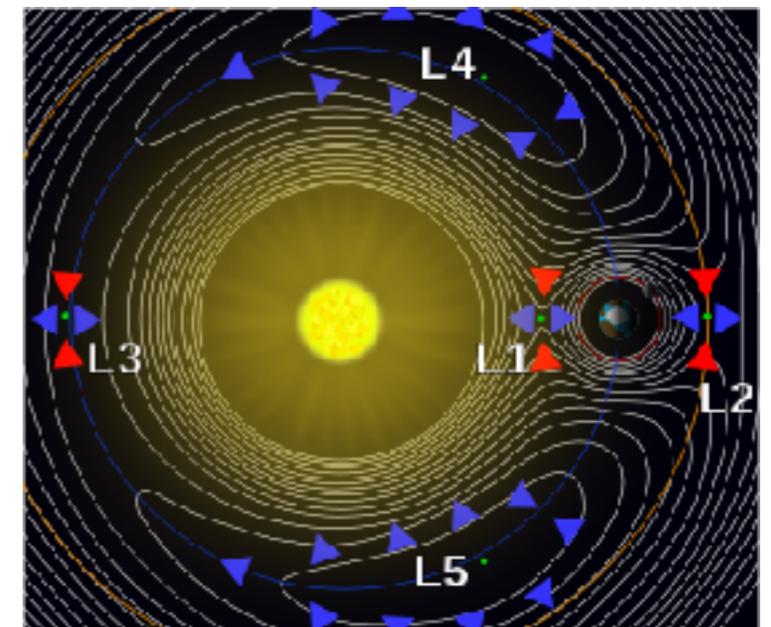
重力波観測から何がわかるか



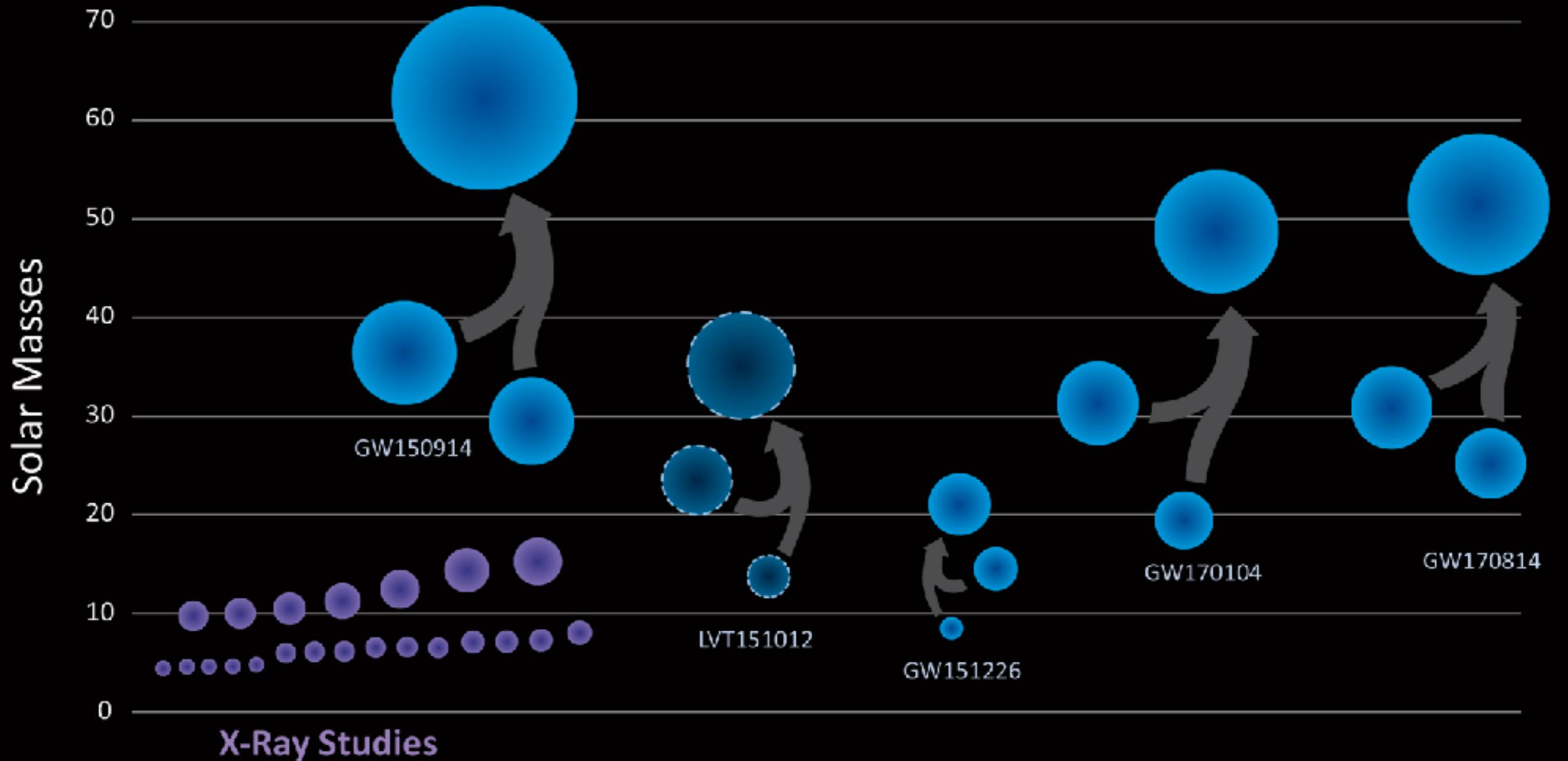
## Laser Interferometer Space Antenna



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)



# Black Holes of Known Mass



LIGO/VIRGO

# 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～

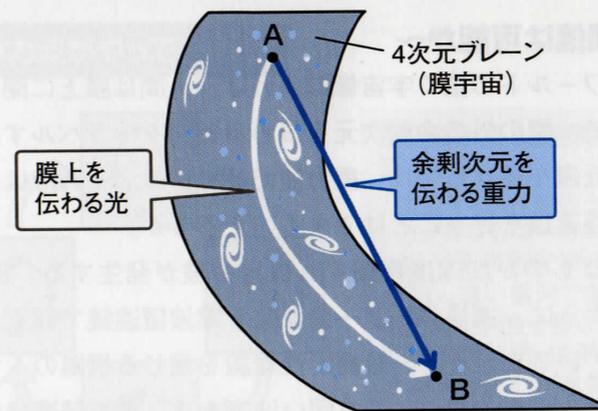
ブレンワールド（膜宇宙）モデルによれば、我々の住む4次元空間は高次元の中を漂う膜のようなものである。重力だけが高次元の中を伝わり、他の力や物質は膜に閉じ込められている。膜の上にいるものは、膜以外の世界を知る由もない。地球の表面に住むだけでは地球の丸みを感じることができないように、我々も4次元空間に閉じ込められているのである。

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、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

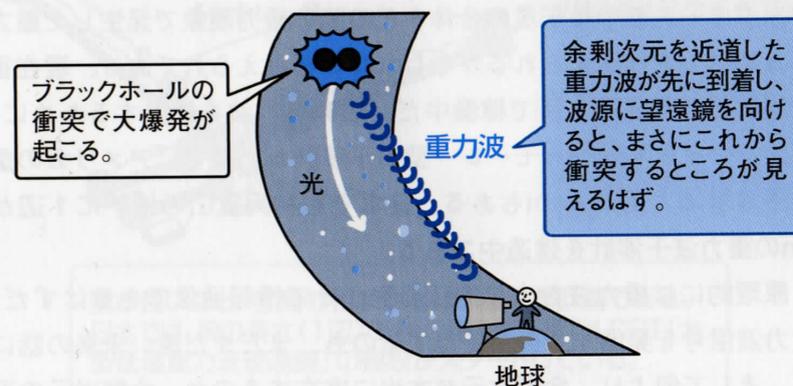
バン宇宙モデルの問題点の1つが解決できる可能性が指摘されている。重力波信号によって、情報が伝えられるかもしれない

### 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可能性がある。

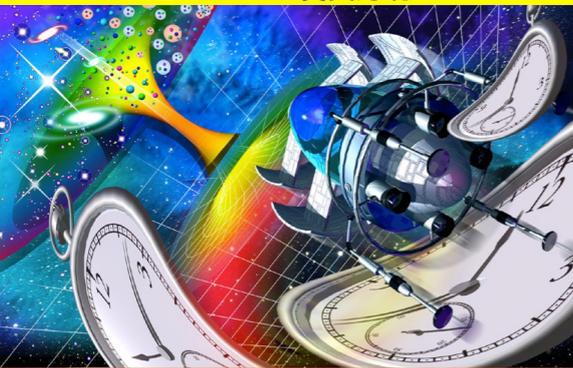
重力波信号を使えば、光速を超えた速度での情報伝達が可能になり、因果律を破って未来からの情報が伝えられる??



余剰次元を近道した重力波が先に到着し、波源に望遠鏡を向けると、まさにこれから衝突するところが見えるはず。

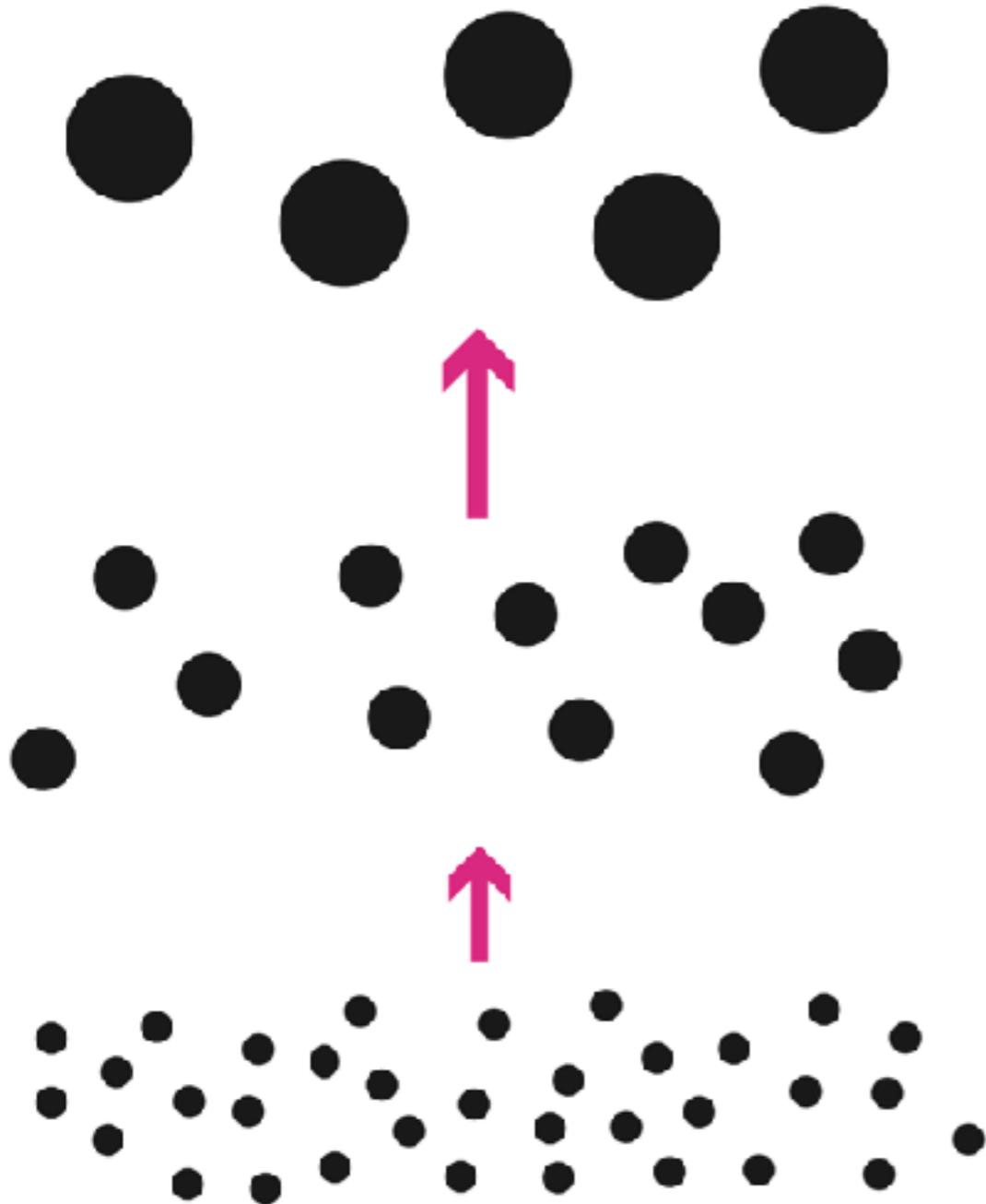
## 図解雑学 タイムマシンと 時空の科学

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!

Hierarchical growth model



銀河にはいくつBHがあるのか?  
宇宙にはいくつ銀河があるのか?

宇宙にBH合体はいくつ  
生じるか

我々は1年間にいくつ観測  
できるか

重力波で観測可能な距離?  
ground-base / space

宇宙モデル?  
BH spin? Signal-to-Noise?

- ★ BH連星合体が繰り返されて、SMBHが形成されると考える
- ★ 1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
- ★ 宇宙にいくつ銀河があるかを数える
- ★ LIGOやKAGRAの検出器感度で、1年にいくつ観測できるのか予想する

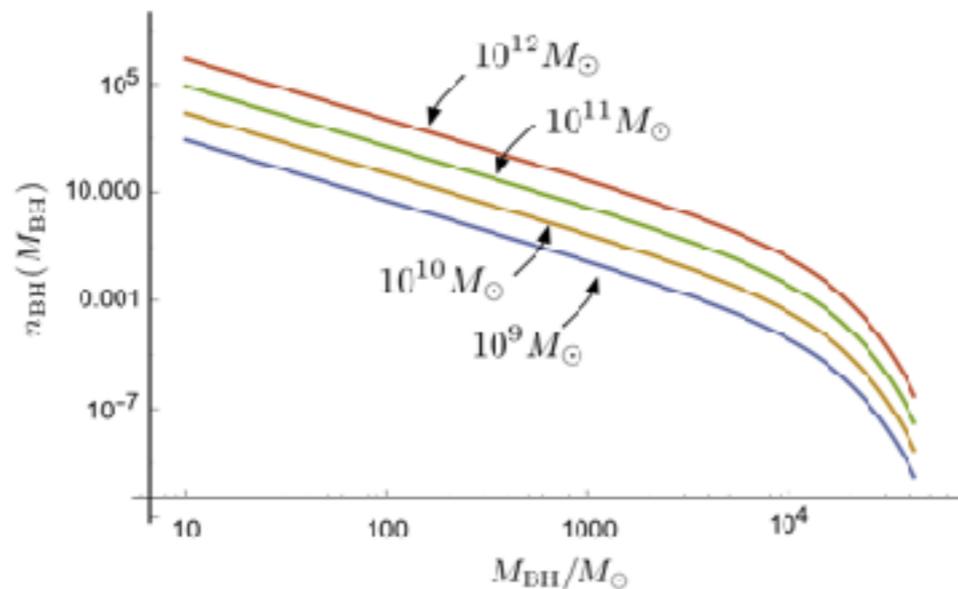


Figure 5. Number density of BHs per galaxy as a function of BH mass for different total mass of galaxies  $M_{\text{galaxy}} = 10^9 M_{\odot}, \dots, 10^{12} M_{\odot}$ .

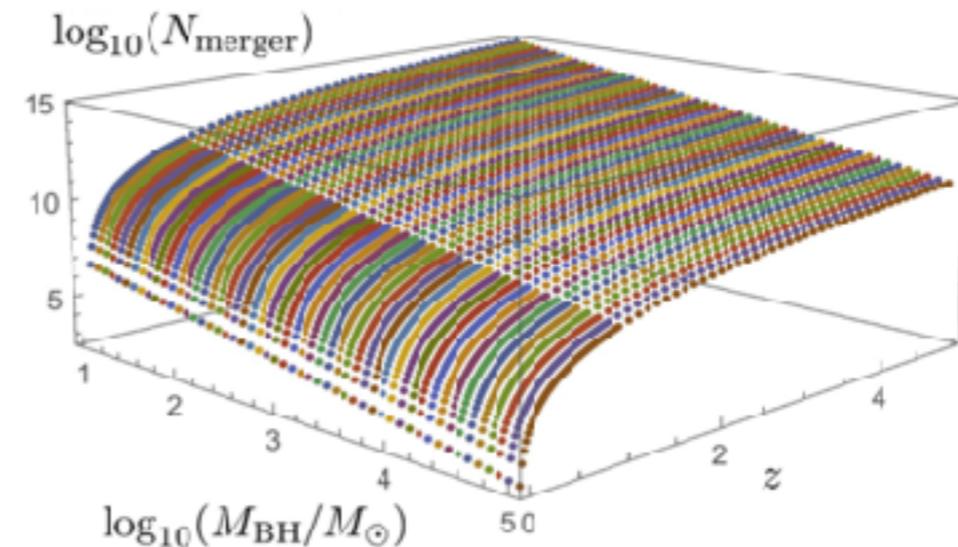


Figure 6. Cumulative distribution function of the number of BH mergers  $N_{\text{merger}}(M_{\text{BH}})$  as a function of the redshift  $z$ .  $N_{\text{merger}}$  is expressed with binned one, of which we binned 20 for one order in  $M_{\text{BH}}$ .



## Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

# Signal-to-Noise Ratio (SNR)

Let the true signal  $h(t)$ , the function of time, is detected as a signal,  $s(t)$ , which also includes the unknown noise,  $n(t)$ :

$$s(t) = h(t) + n(t). \quad (17)$$

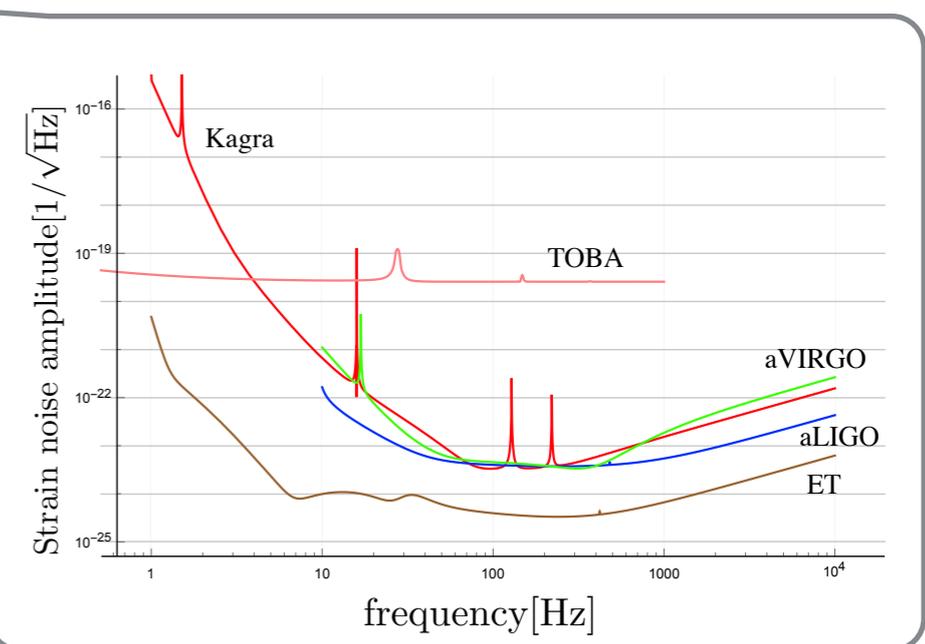
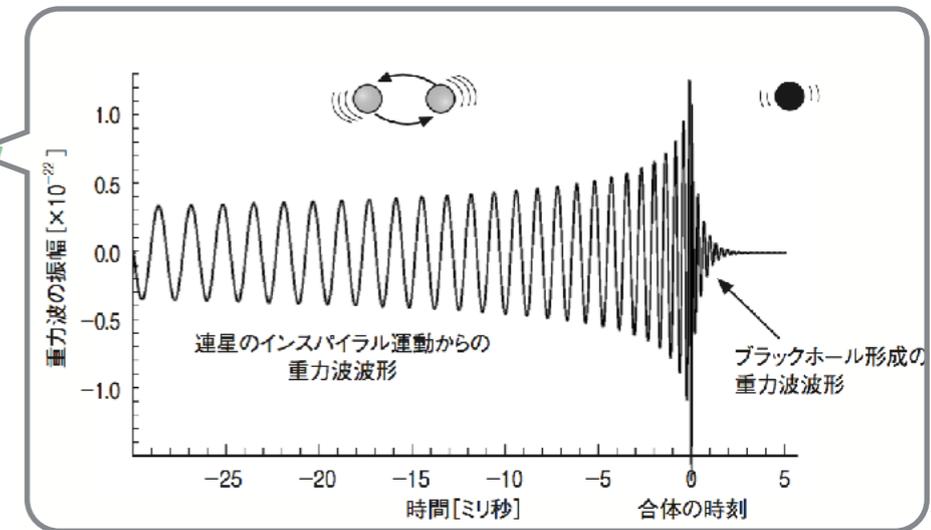
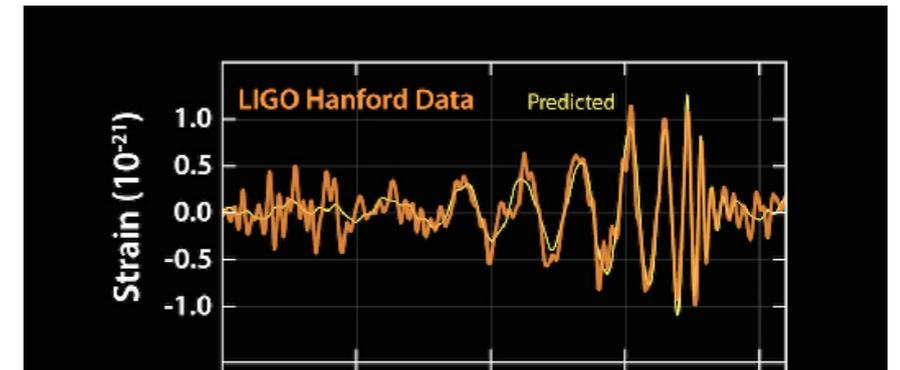
The standard procedure for the detection is judged by the optimal signal-to-noise ratio (SNR),  $\rho$ , which is given by

$$\rho = 2 \left[ \int_0^\infty \frac{\tilde{h}(f) \tilde{h}^*(f)}{S_n(f)} df \right]^{1/2}, \quad (18)$$

where  $\tilde{h}(f)$  is the Fourier-transformed quantity of the wave,

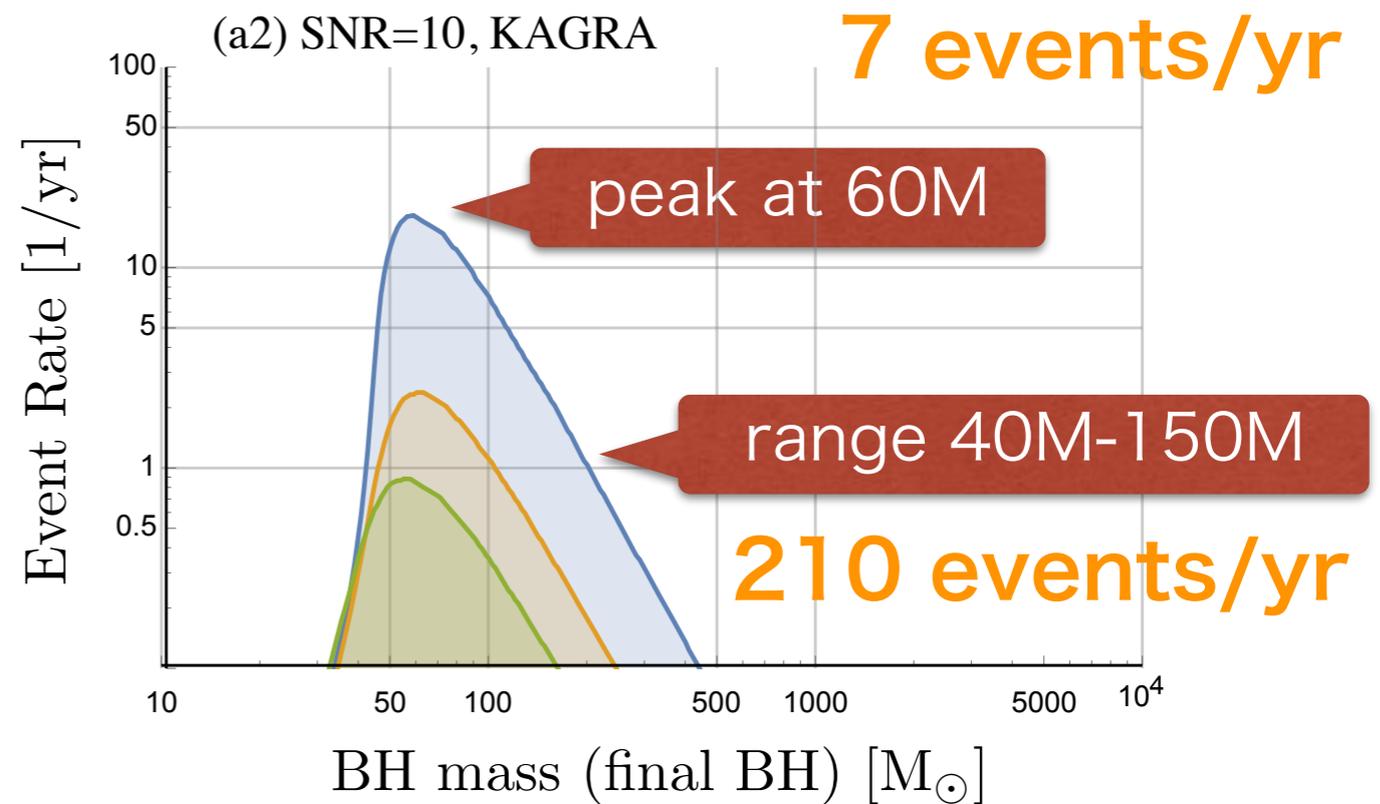
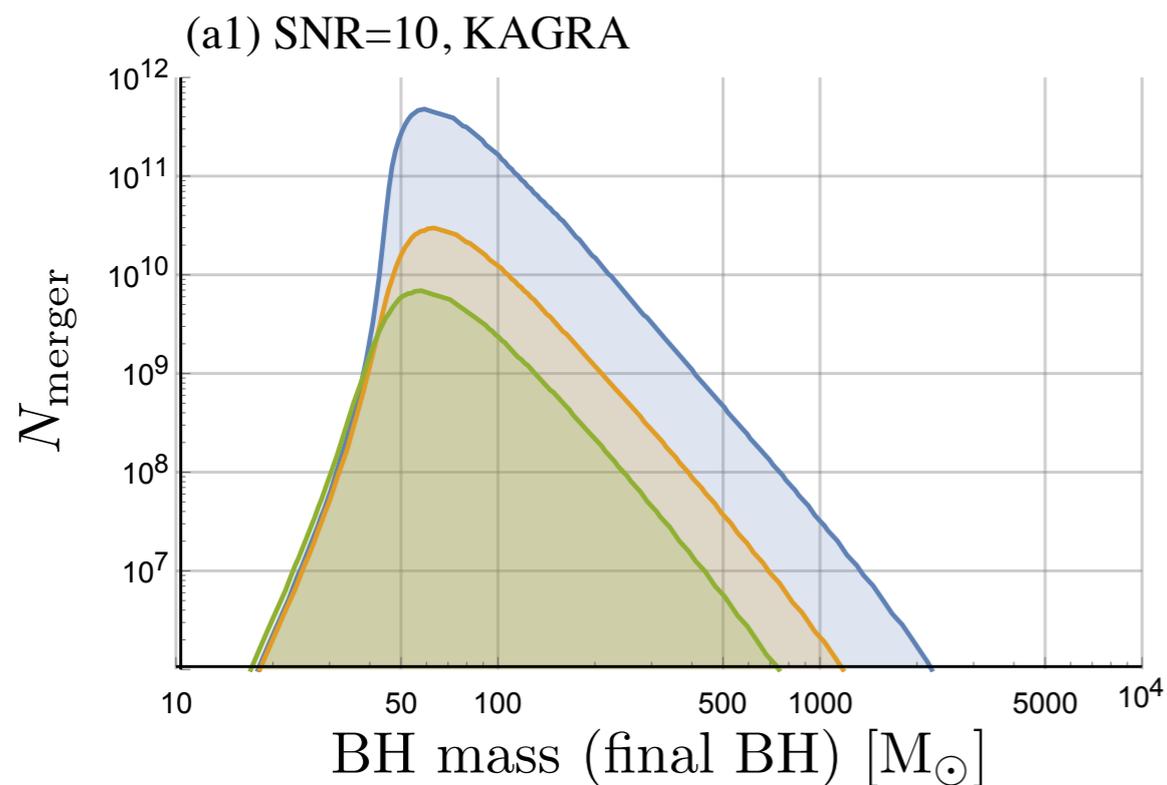
$$\tilde{h}(f) = \int_{-\infty}^\infty e^{2\pi i f t} h(t) dt, \quad (19)$$

and  $S_n(f)$  the (one-sided) power spectral density of strain noise of the detector, as we showed in Fig. 1.



# 現在進行中の研究 (1) BH連星合体から銀河中心SMBHの形成シナリオを決める

- ★ BH連星合体が繰り返されて、SMBHが形成されると考える
- ★ 1つの銀河にいくつBH連星合体があるかを数える
- ★ 宇宙にいくつ銀河があるかを数える
- ★ LIGOやKAGRAの検出器感度で、1年にいくつ観測できるのか予想する



THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 835:276 (8pp), 2017 February 1  
© 2017. The American Astronomical Society. All rights reserved.

[doi:10.3847/1538-4357/835/2/276](https://doi.org/10.3847/1538-4357/835/2/276)

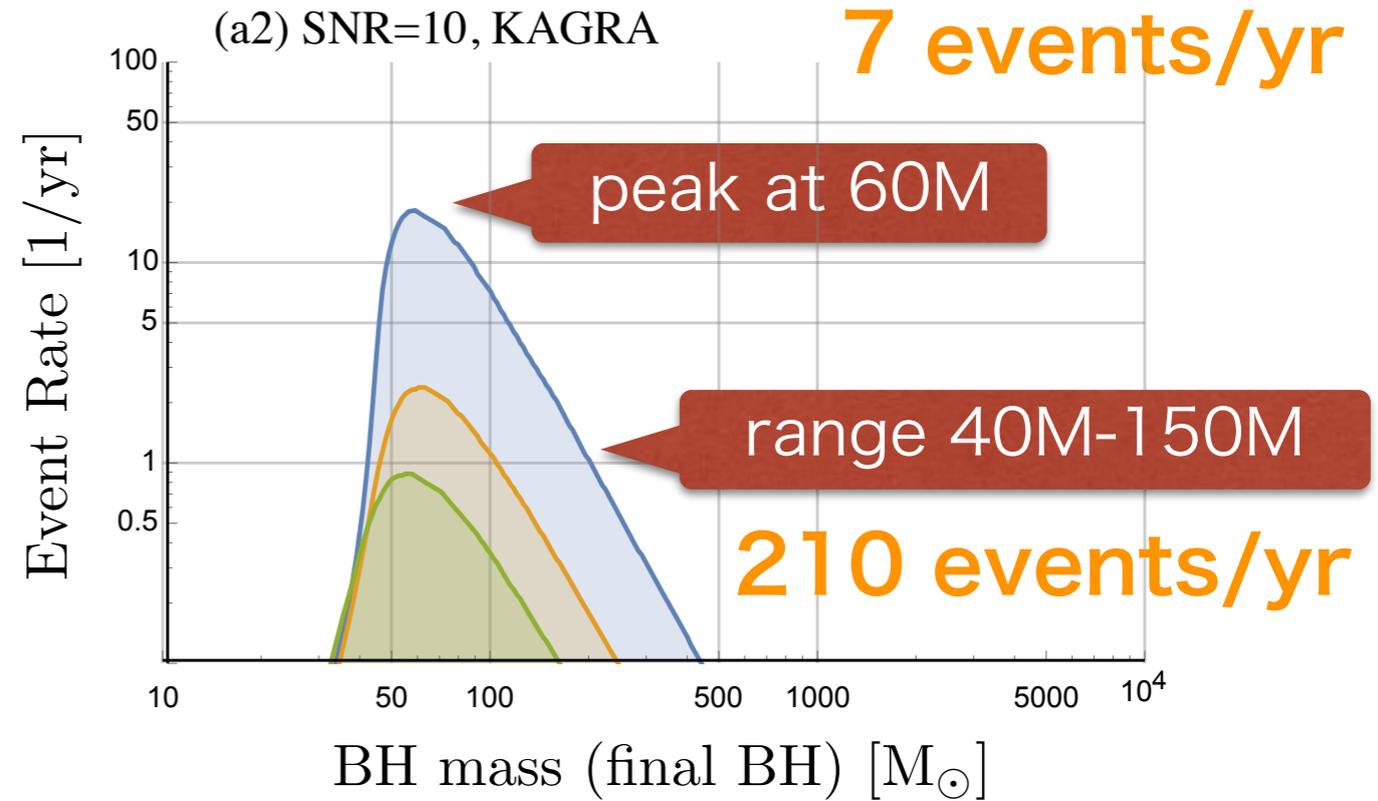


## Gravitational Waves from Merging Intermediate-mass Black Holes. II. Event Rates at Ground-based Detectors

Hisa-aki Shinkai<sup>1</sup>, Nobuyuki Kanda<sup>2</sup>, and Toshikazu Ebisuzaki<sup>3</sup>

# Event Rates at bKAGRA/aLIGO

Mass distribution	$R / (\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	Combined
Event based			
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.8}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.1^{+31.0}_{-8.5}$
GW151226	$35^{+92}_{-29}$	$37^{+94}_{-31}$	$36^{+95}_{-30}$
All	$53^{+100}_{-40}$	$56^{+105}_{-42}$	$55^{+103}_{-41}$
Astrophysical			
Flat in log mass	$31^{+43}_{-21}$	$29^{+43}_{-21}$	$31^{+42}_{-21}$
Power law (-2.35)	$100^{+136}_{-69}$	$94^{+137}_{-66}$	$97^{+135}_{-67}$

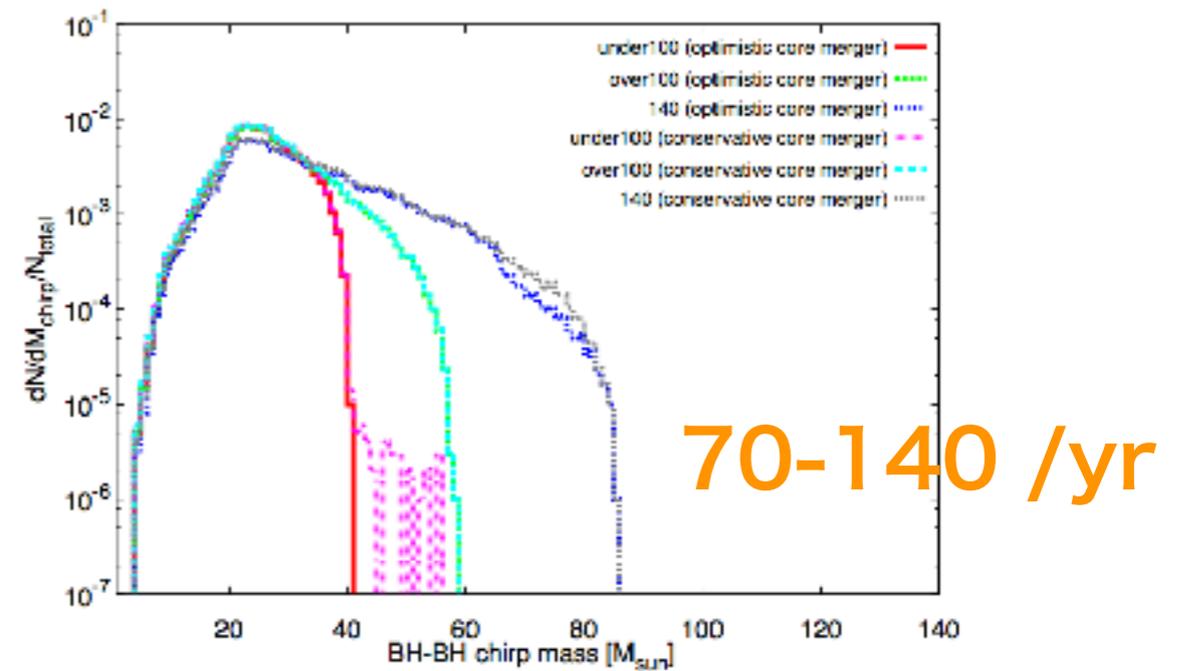
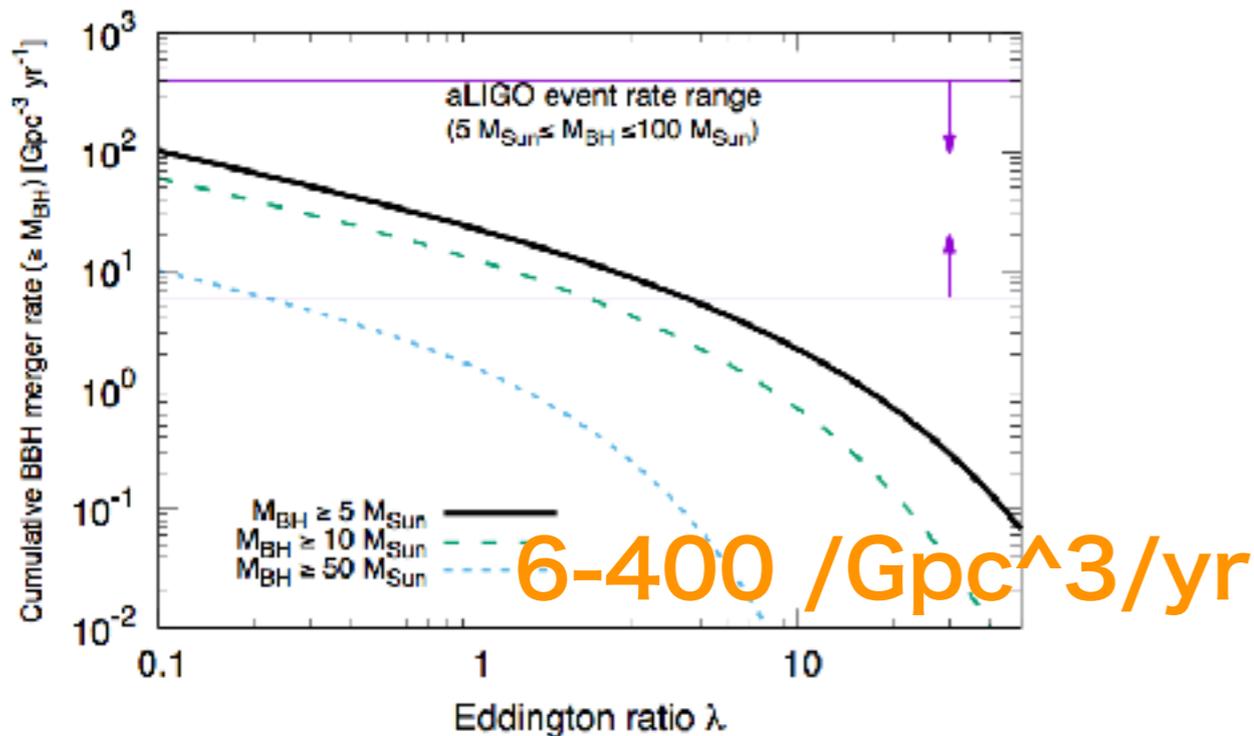


LIGO group PRX6(2016)041015

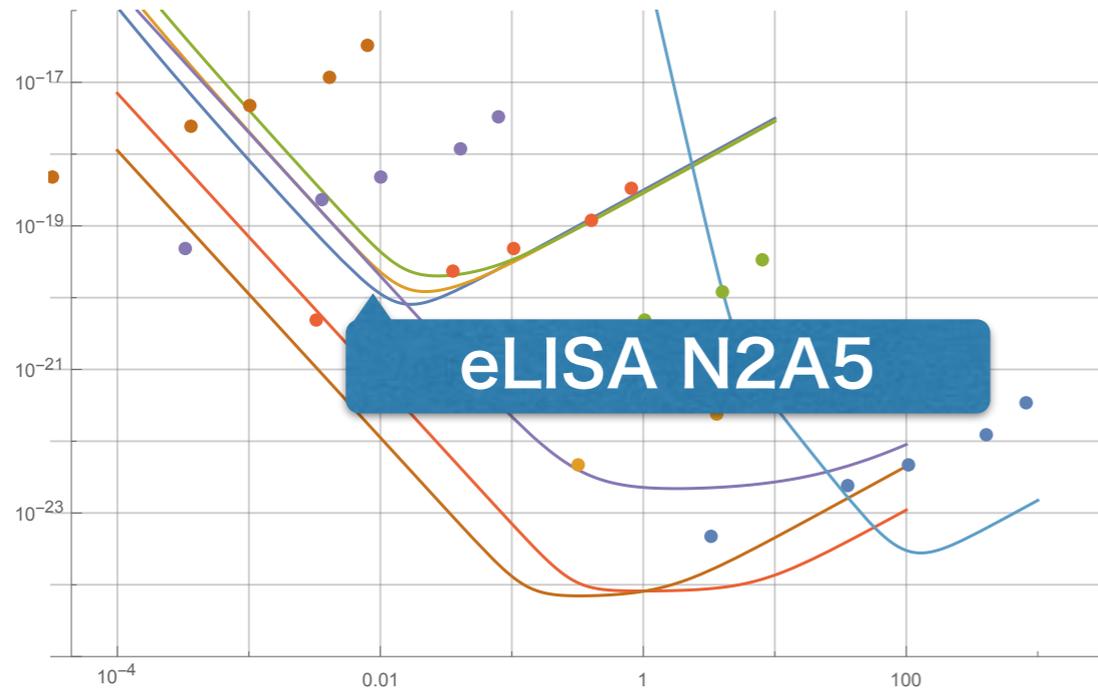
Shinkai+ ApJ 835(2017)276

Inoue+ MNRAS461(2016)4329

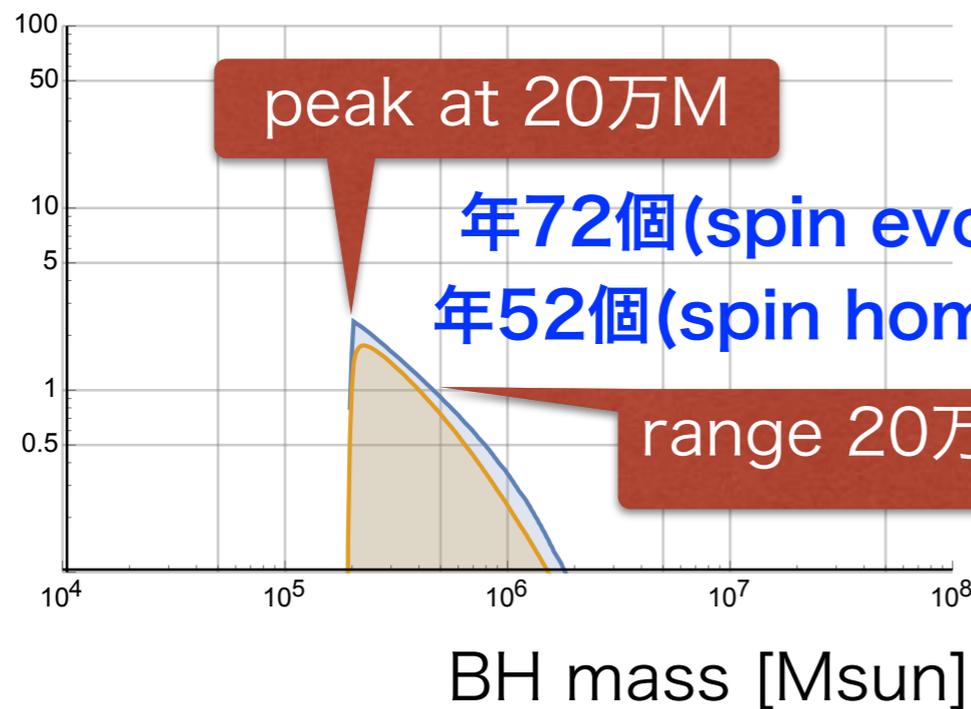
Kinugawa+ MNRAS456(2015)1093



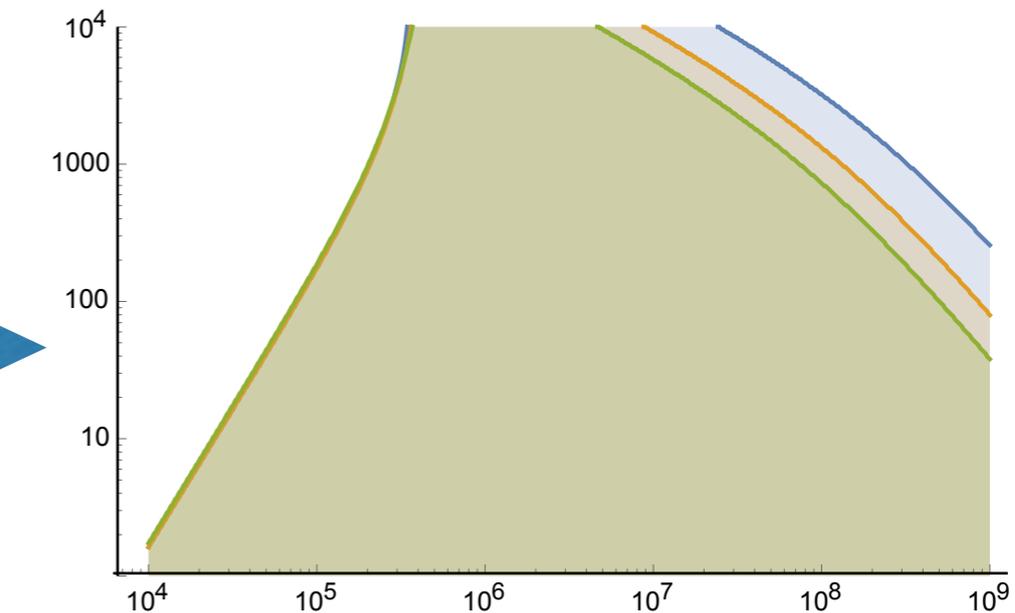
# Event Rates at eLISA



Event Rate  
(S/N=10)

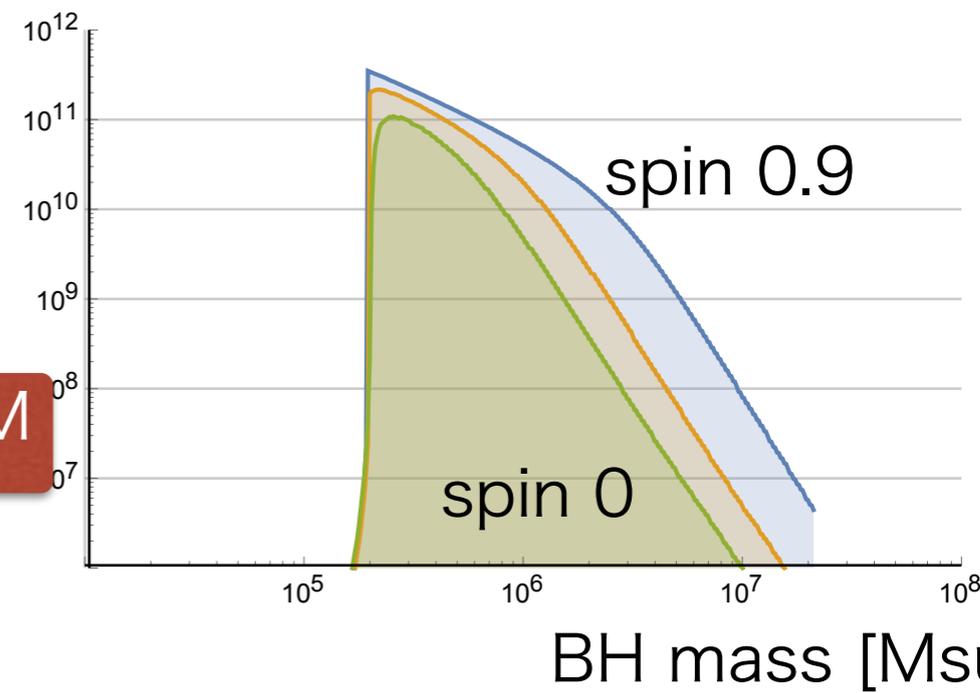


Horizon Distance  
(S/N=10)



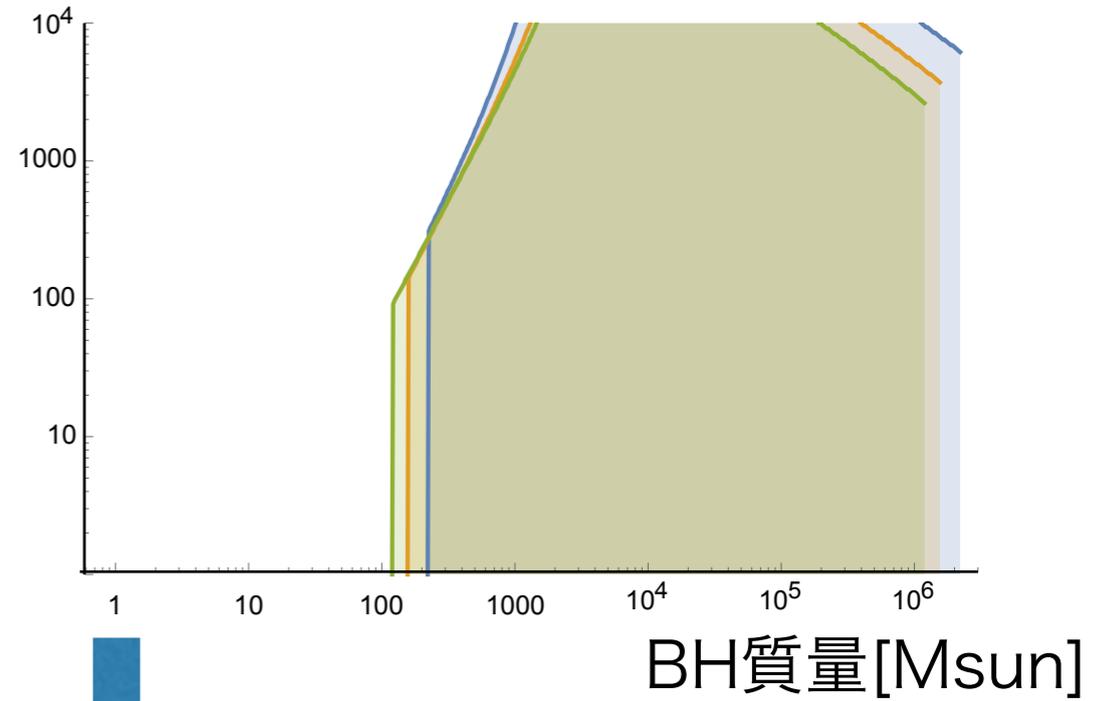
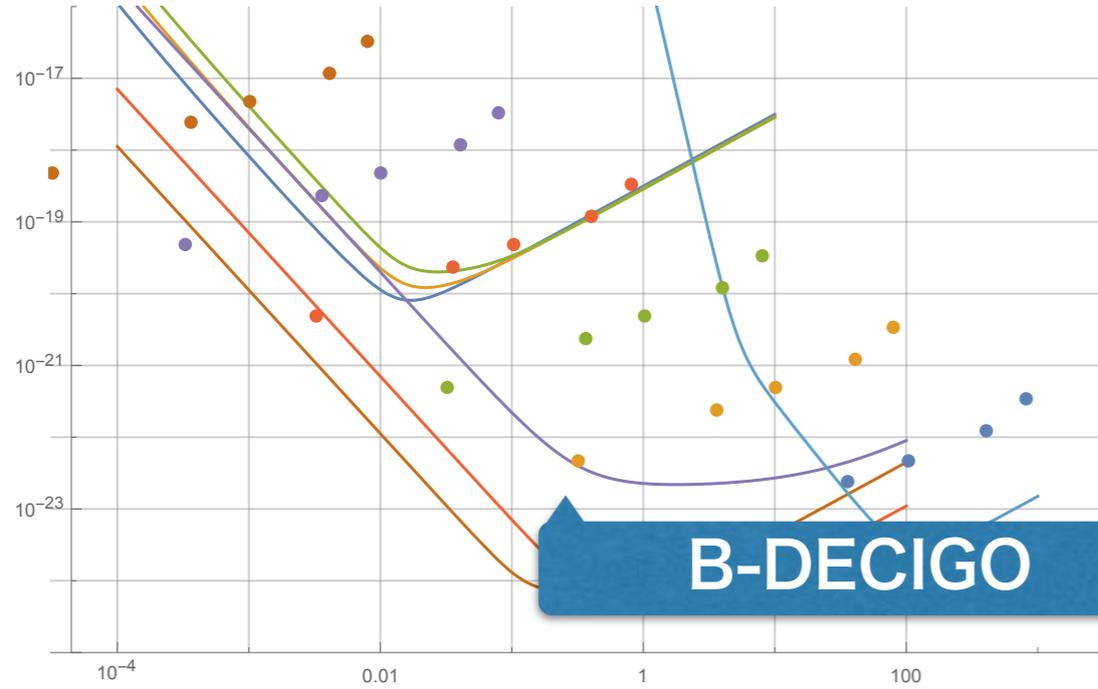
BH mass [Msun]

Observable BH mergers



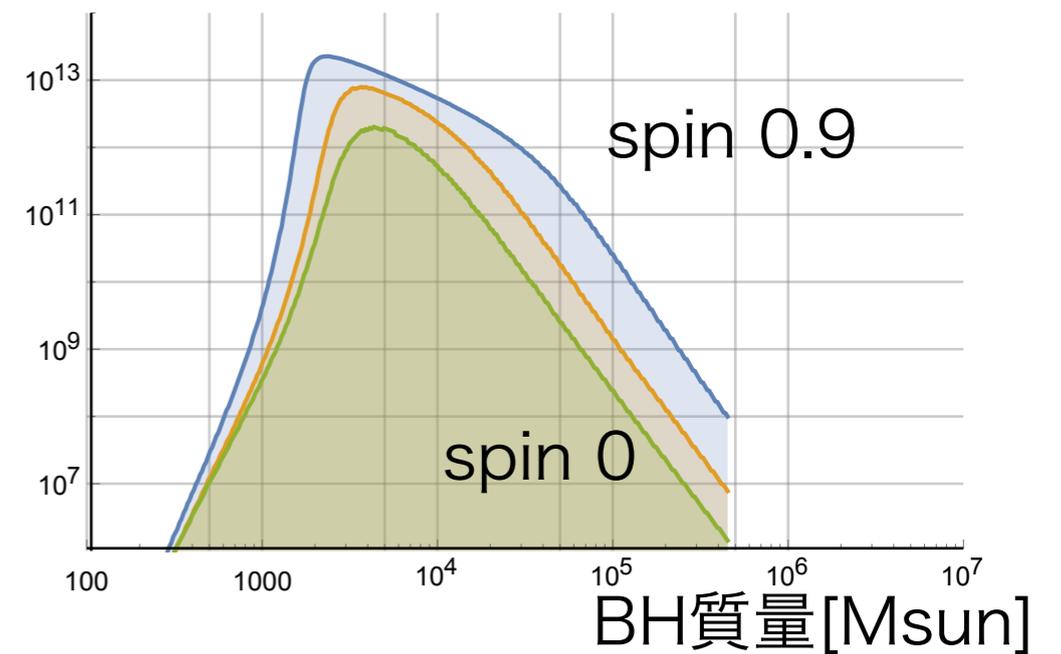
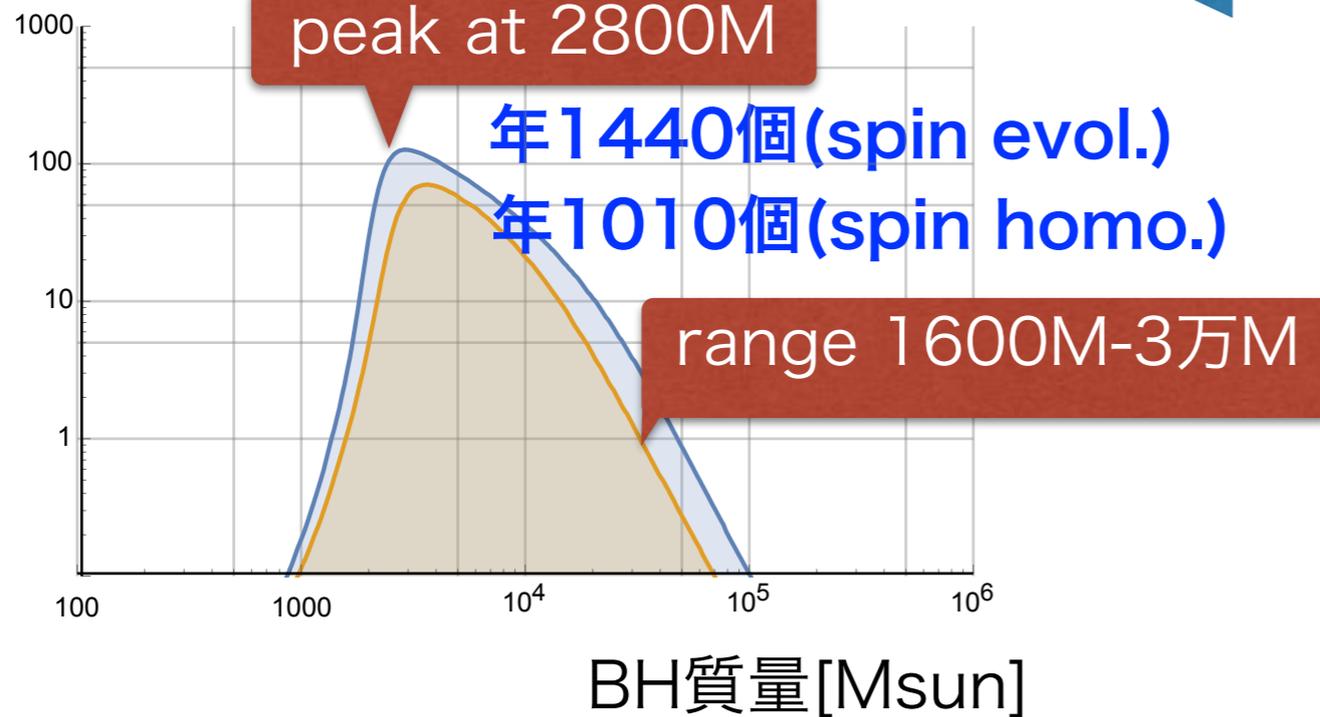
# Event Rates at B-DECIGO

観測できるBH合体距離  
[Mpc]  
(S/N=30)



1年間で観測できるBH数分布  
(S/N=30)

観測できるBH数分布





	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]	$10^{-13}$	$10^{-10}$	$10^{-9}$	$3.8 \times 10^{-7}$	$7.7 \times 10^{-7}$	$10^{-4}$	1	10	$10^2$	$10^3$	$10^4$			
波長[nm]				380	770									
振動数[Hz]	$3 \times 10^{18}$	$3 \times 10^{17}$					$3 \times 10^{12}$	$3 \times 10^8$	$3 \times 10^7$	$3 \times 10^6$	$3 \times 10^5$	$3 \times 10^4$		
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	F M ラジオ	短波ラジオ	A M ラジオ	電波時計	飛行機の通信

ガンマ線

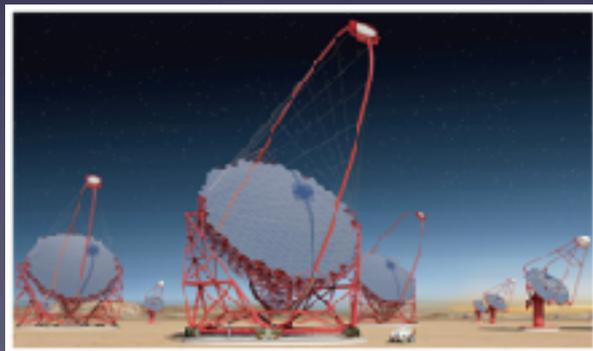
X線

可視光

赤外

電波

重力波



重力波天文学  
はじめました。