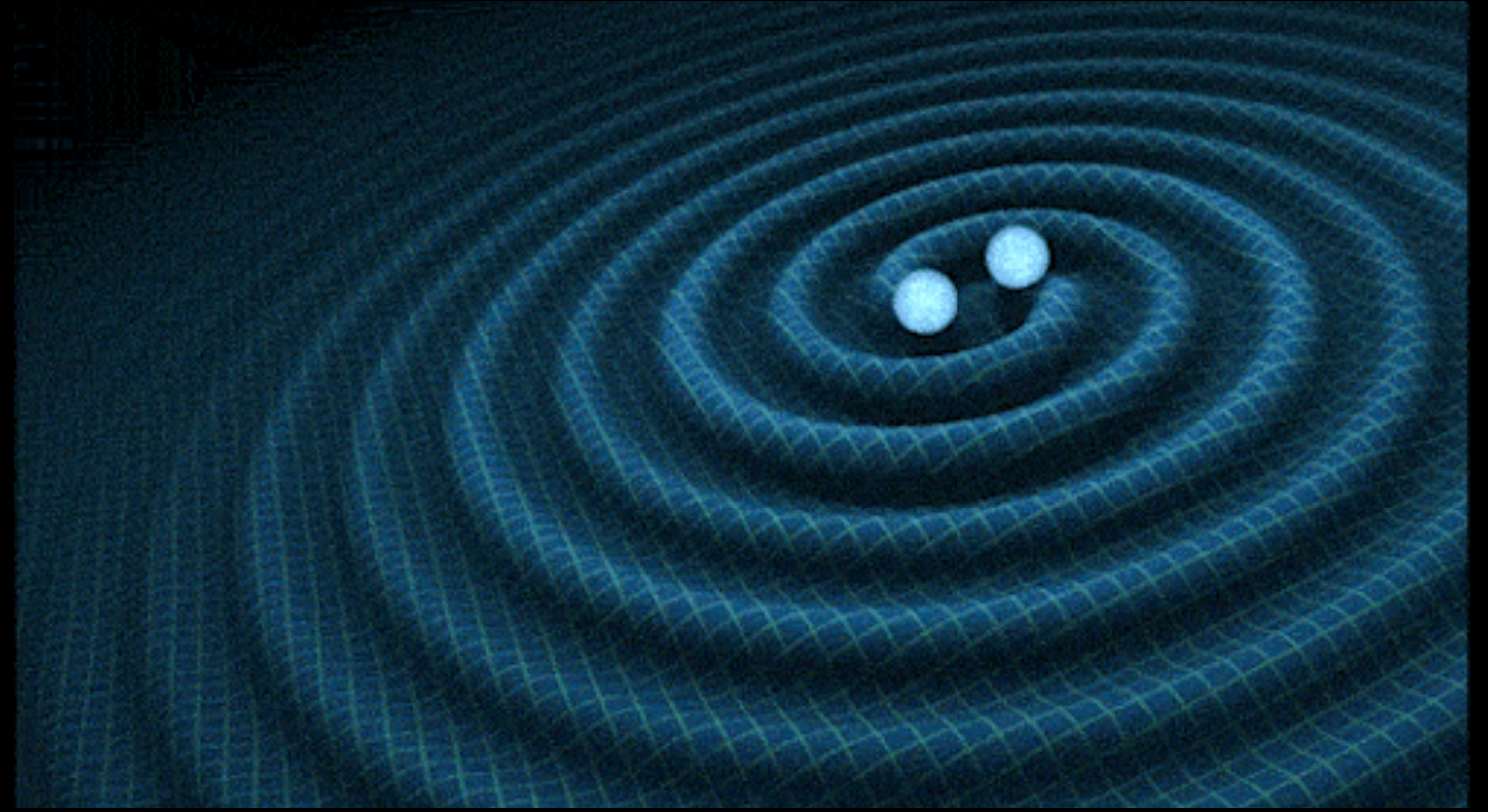
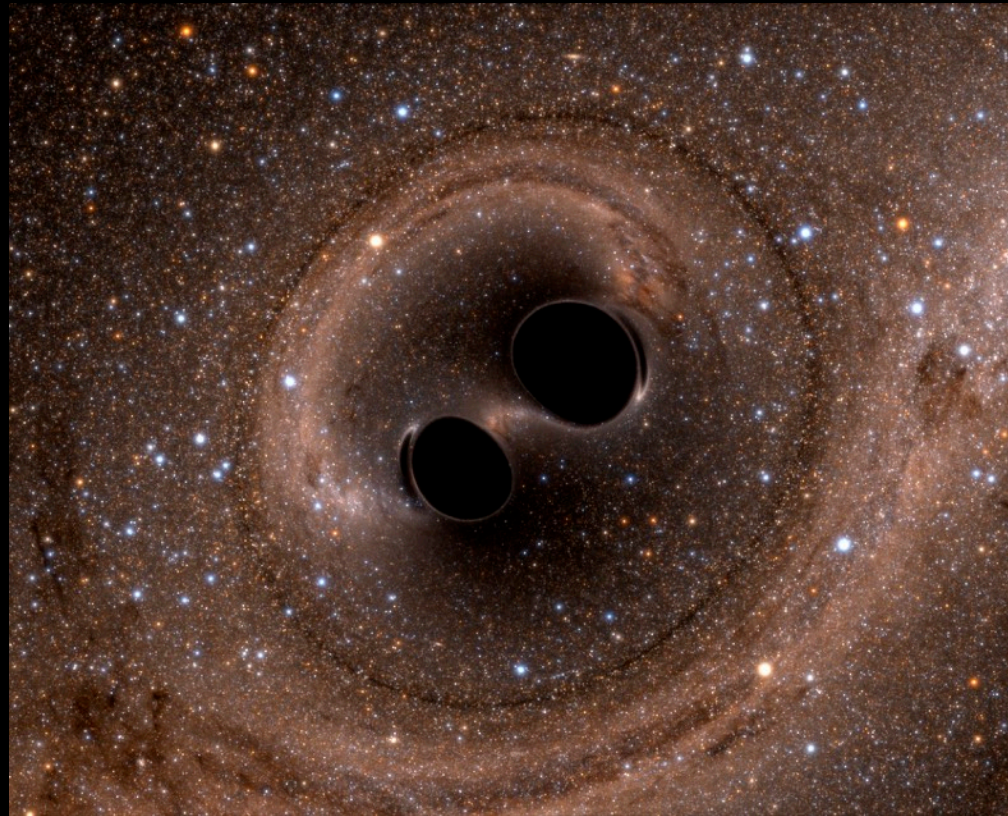


ブラックホールを観る

ブラックホールを聴く



真貝寿明・大阪工業大学
(しんかい ひさあき)

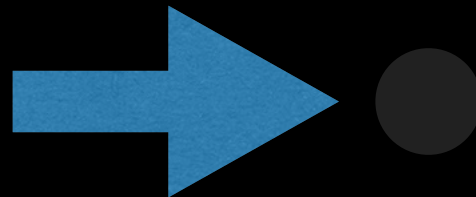
<http://www.oit.ac.jp/is/shinkai/>

サークルすばる 講演会
2020/3/9 大阪産業創造館

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

★何でも吸い込む。光も脱出できない重い星



ここ

2. 見えないはずでは？

⇒ 見えたんです (2019年4月)

3. 音も聞こえないはずでは？

⇒ 重力波で聴こえたんです (2015年9月)

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

★何でも吸い込む。光も脱出できない重い星

★大きな恒星が燃え尽きた最後の姿

★アインシュタインの相対性理論が予言

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

ニュートン



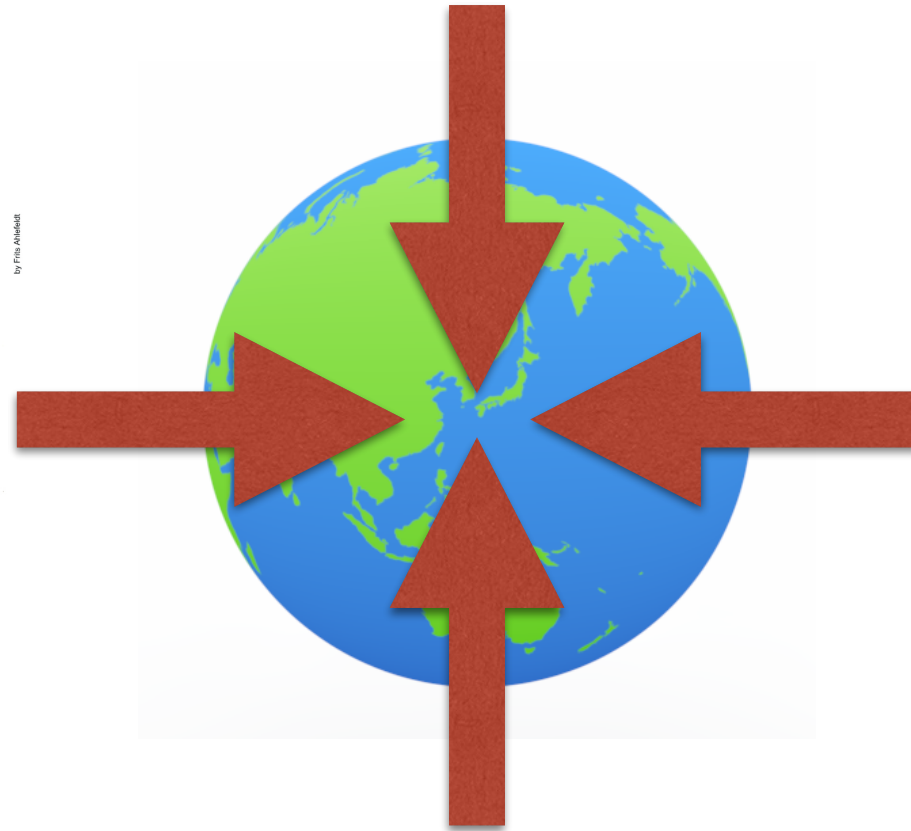
by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



by Frits Ahlefeldt



地球がリンゴを引っ張る
リンゴも地球を引っ張る
⇒すべてが引力をおよぼす
(万有引力)

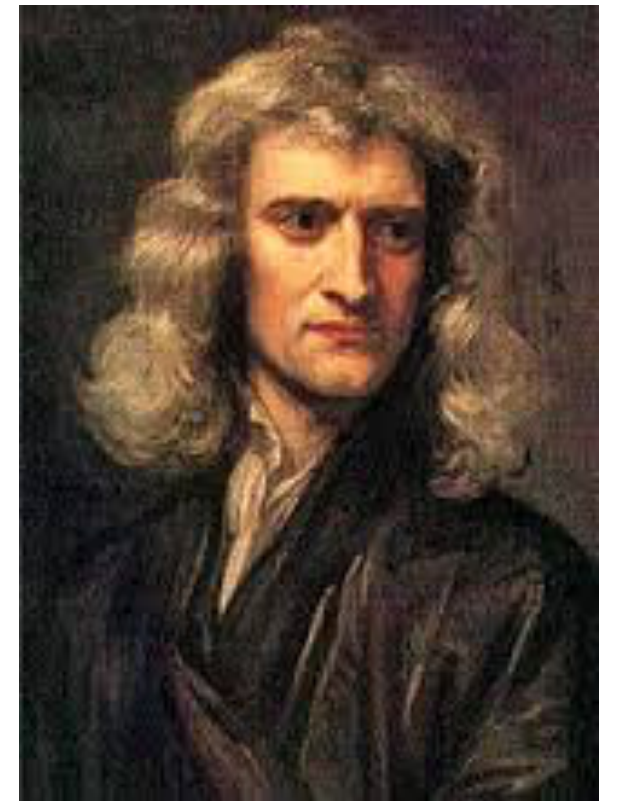
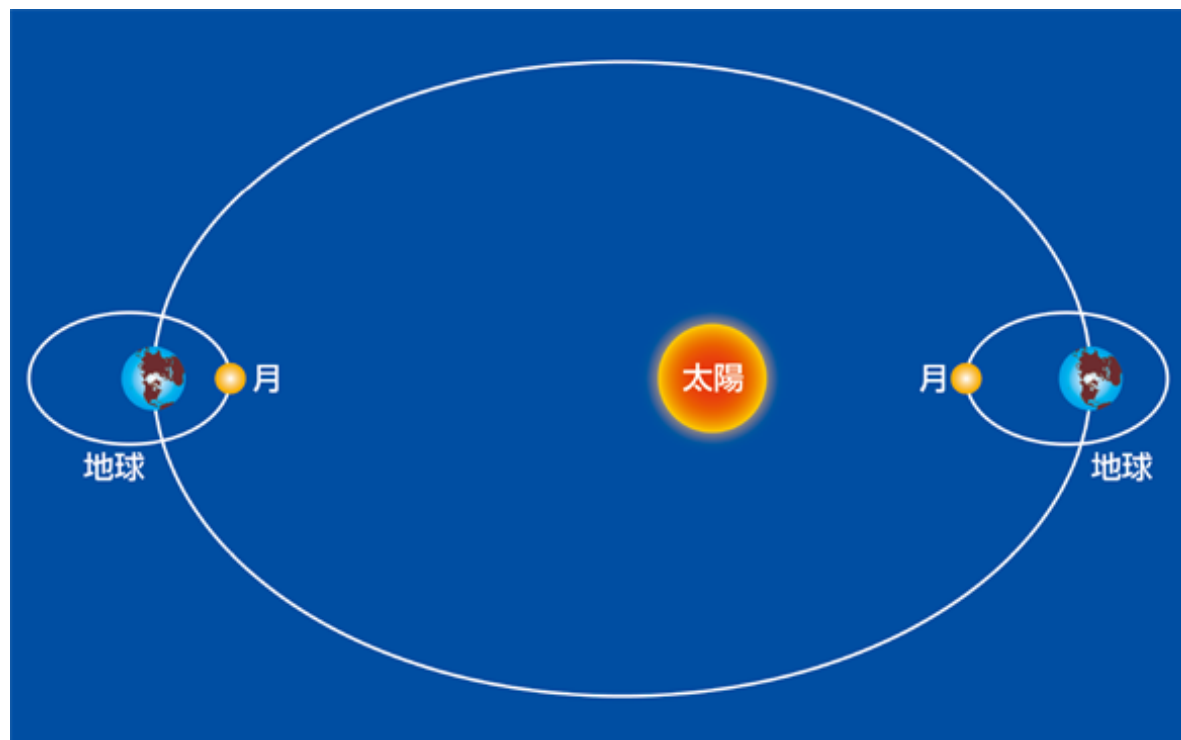


by Frits Ahlefeldt

重力の正体は？

万有引力 $F = G \frac{Mm}{r^2}$

＝すべてのものは引力で引き合う



ニュートン

重力の正体は？



「万有引力があるからだ」 (ニュートン, 1687)

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

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

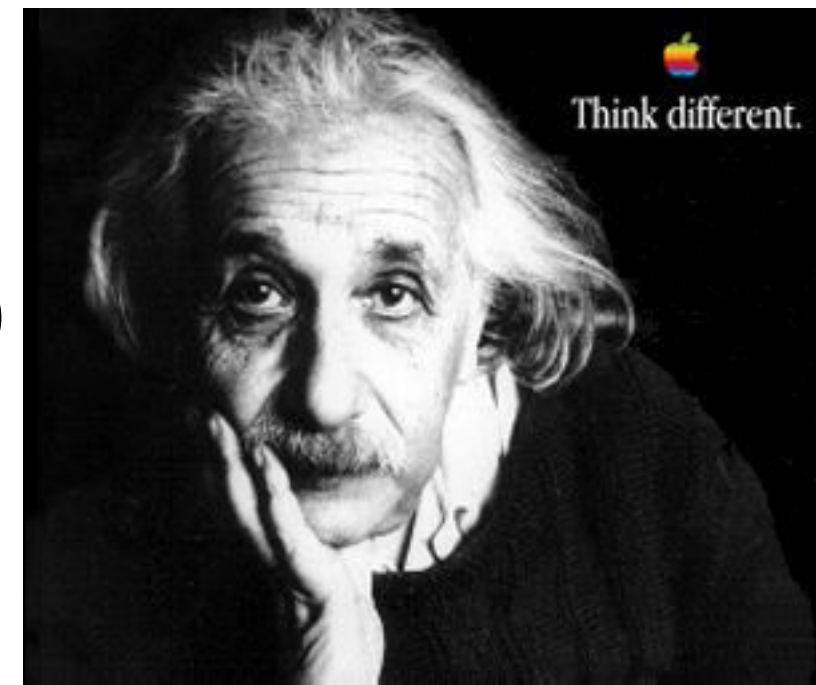
「時空のゆがみだ」

(アインシュタイン, 1915)

一般相対性理論

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

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



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

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

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

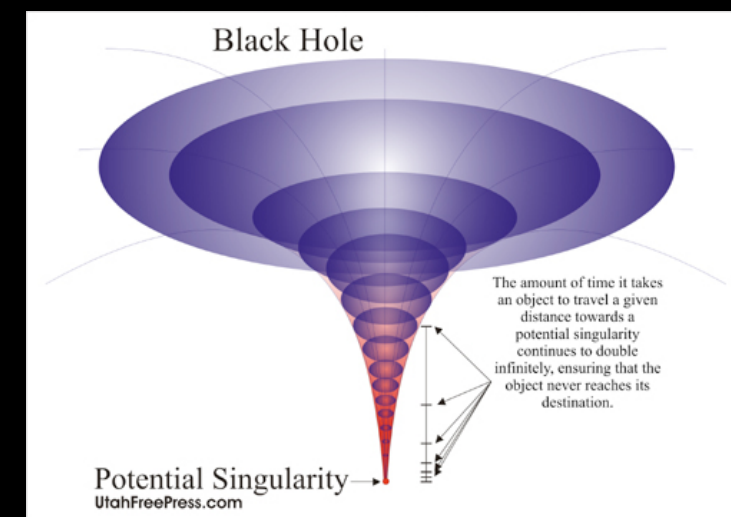
THE MORE MASS, THE MORE
THAT SPACE GETS BENT AND
DISTORTED BY GRAVITY.

JORGE CHAM © 2016

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

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

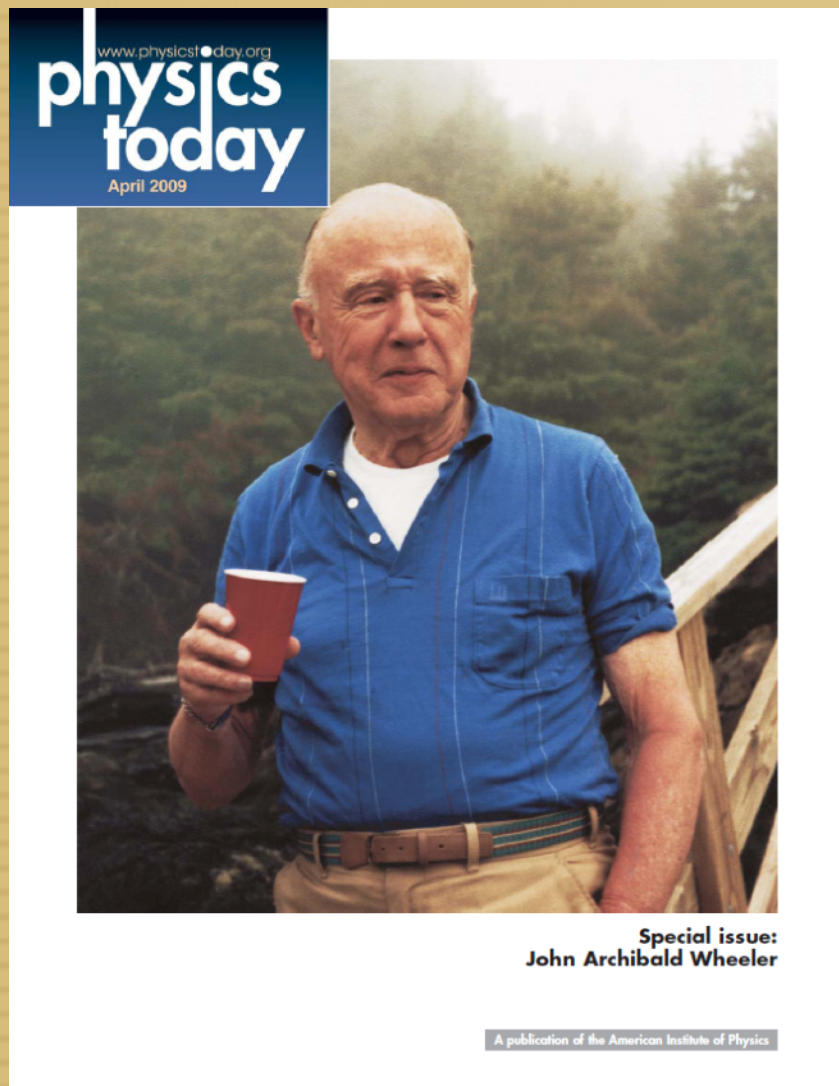
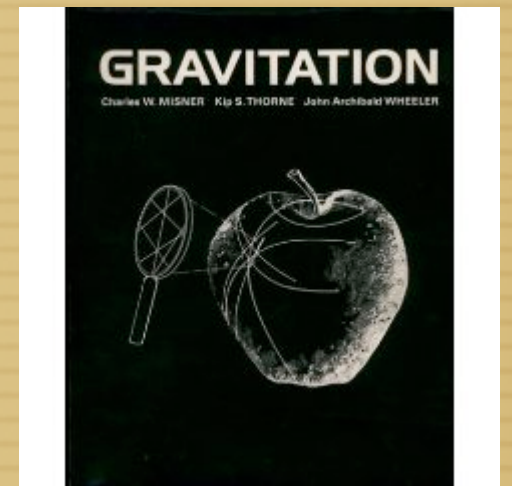
THAT'S HOW ORBITS WORK: THERE'S NO
ACTUAL FORCE PULLING THE PLANETS
AROUND, JUST A BENDING OF THE SPACE.



「ブラックホール」「ワームホール」など多くの言葉の命名者
水素爆弾の父、量子重力の先駆者

John A. Wheeler

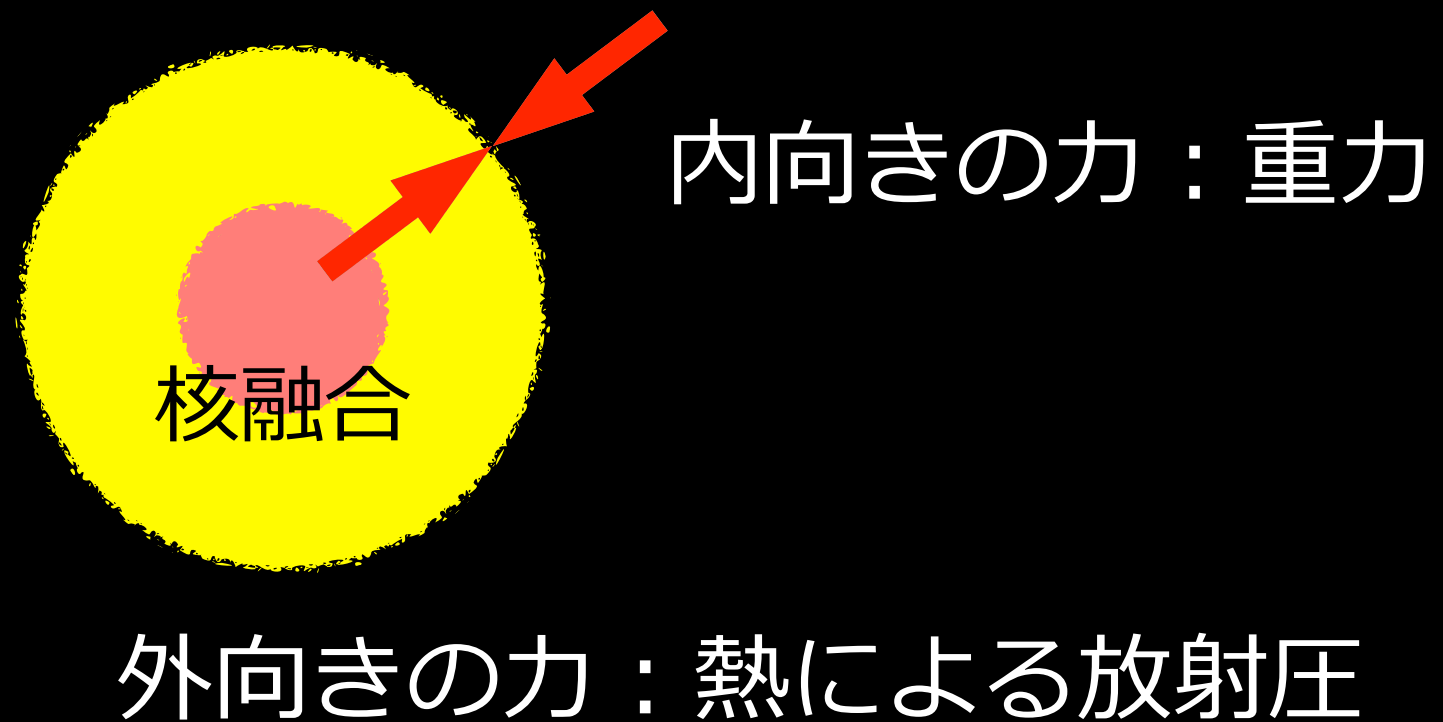
(July 9, 1911 – April 13, 2008)



Physics Today, 2009-4

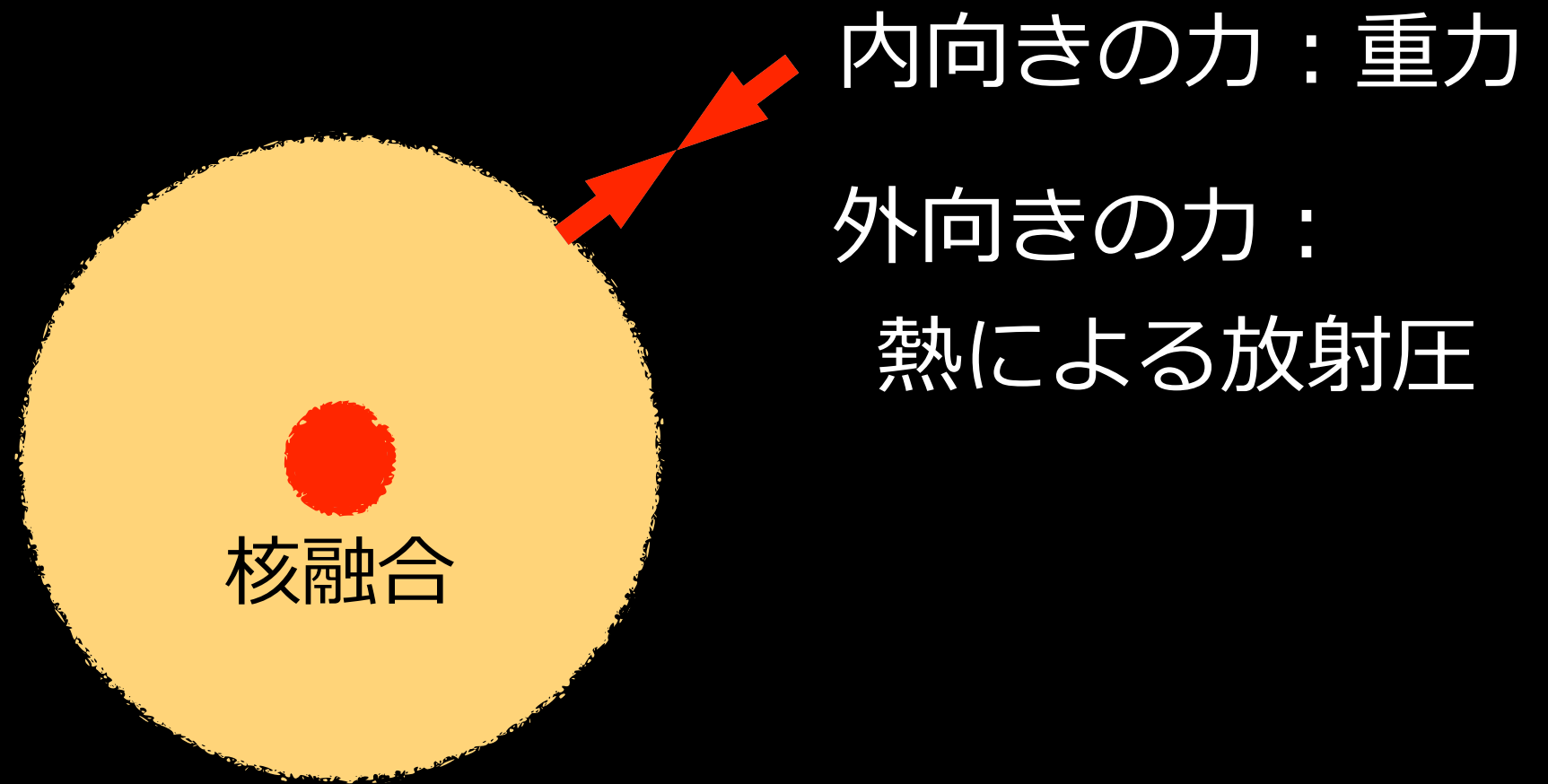


星の一生 (1) 星の燃焼



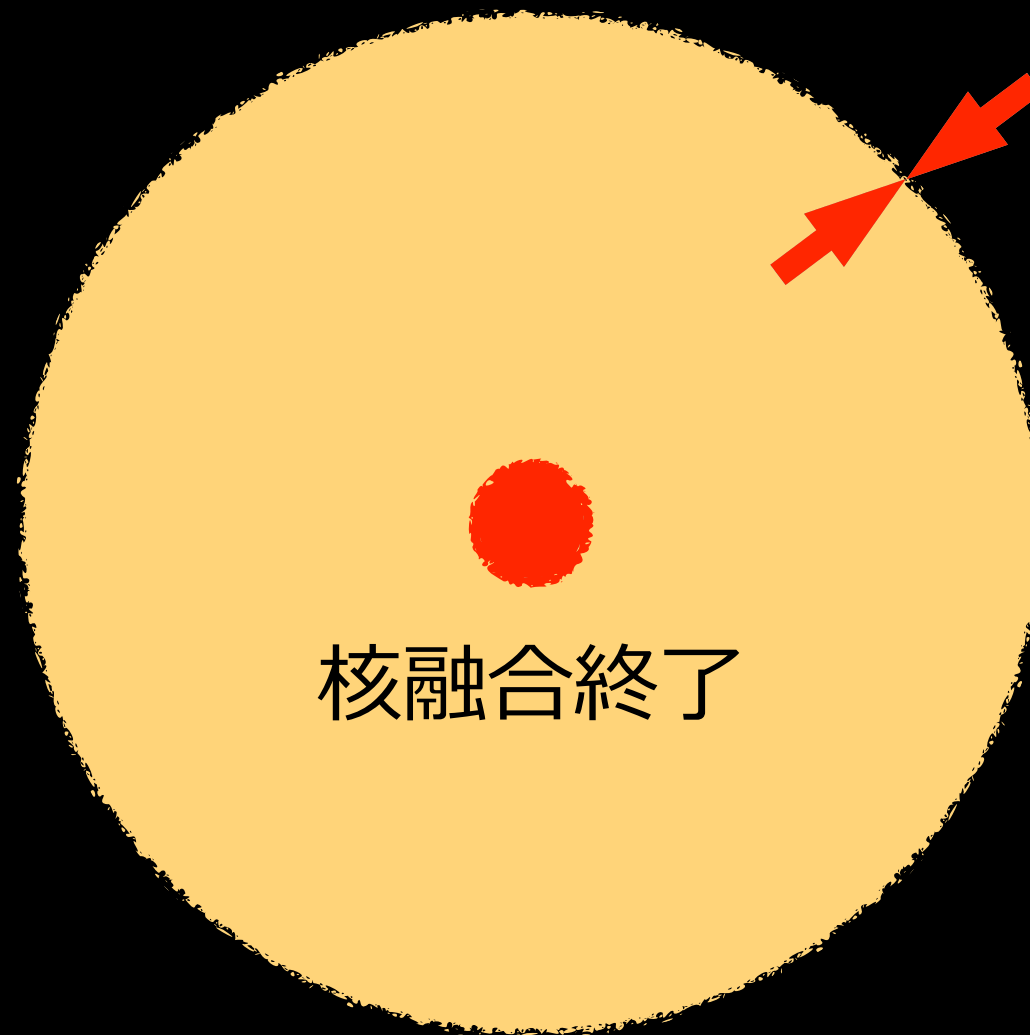
＊現在の太陽：水素がヘリウムに核融合

＊放射圧＝重力 となるところで星の半径が決まる



＊核融合反応で質量をエネルギーに変換し続けると、
軽くなるので重力が弱くなる。

＊放射圧＝重力 となるところで星の半径が決まる



内向きの力：重力

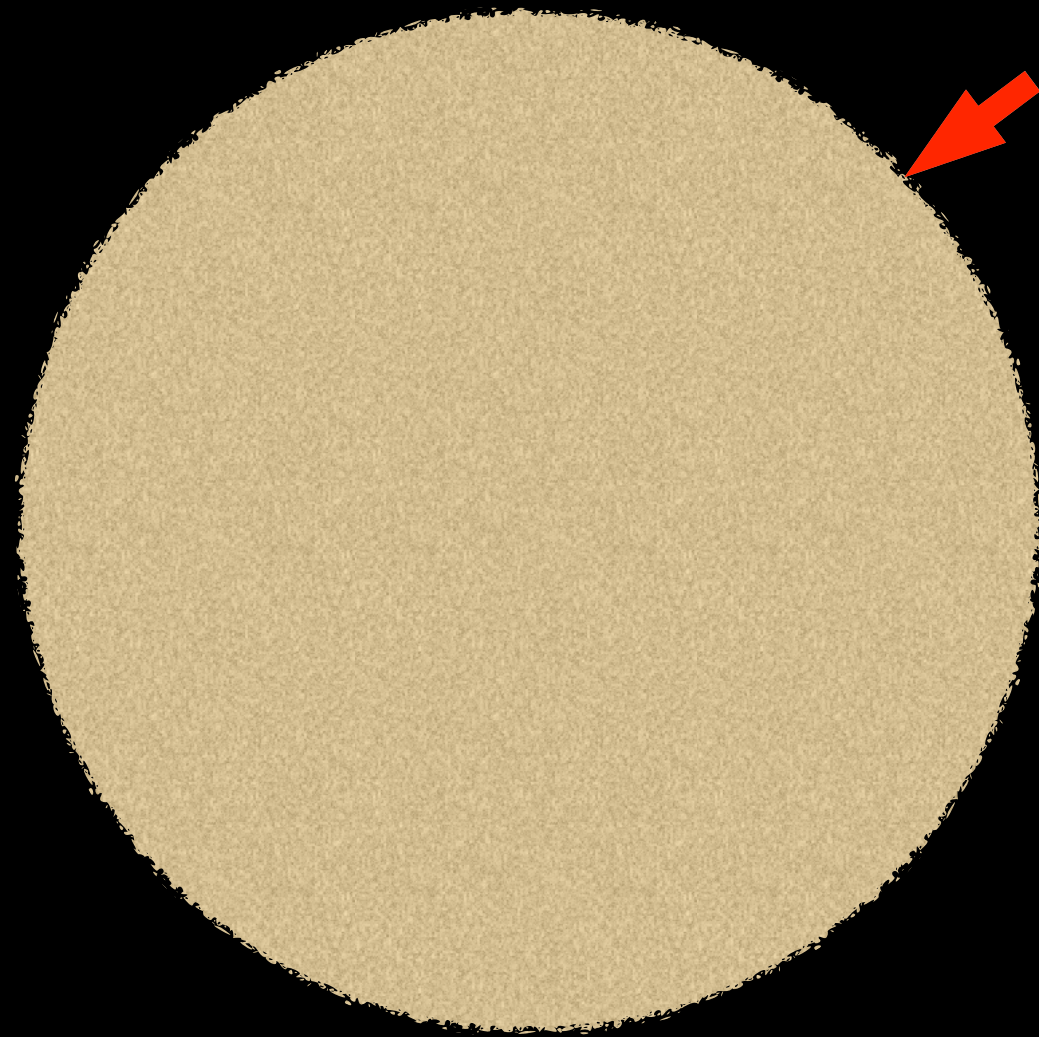
外向きの力：

熱による放射圧

＊核融合反応は鉄まで進むと終了

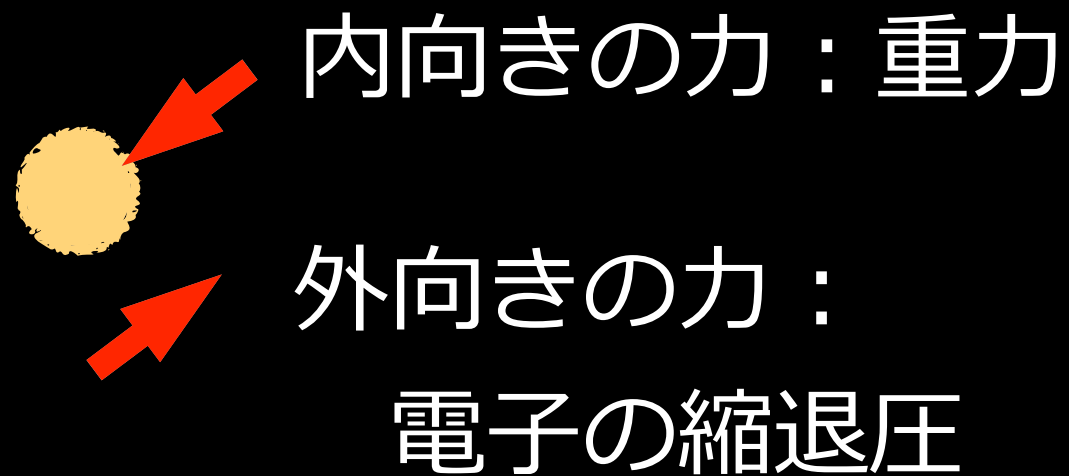
＊放射圧がなくなるので星の収縮が始まる

星の一生 (4) 収縮する



内向きの力：重力

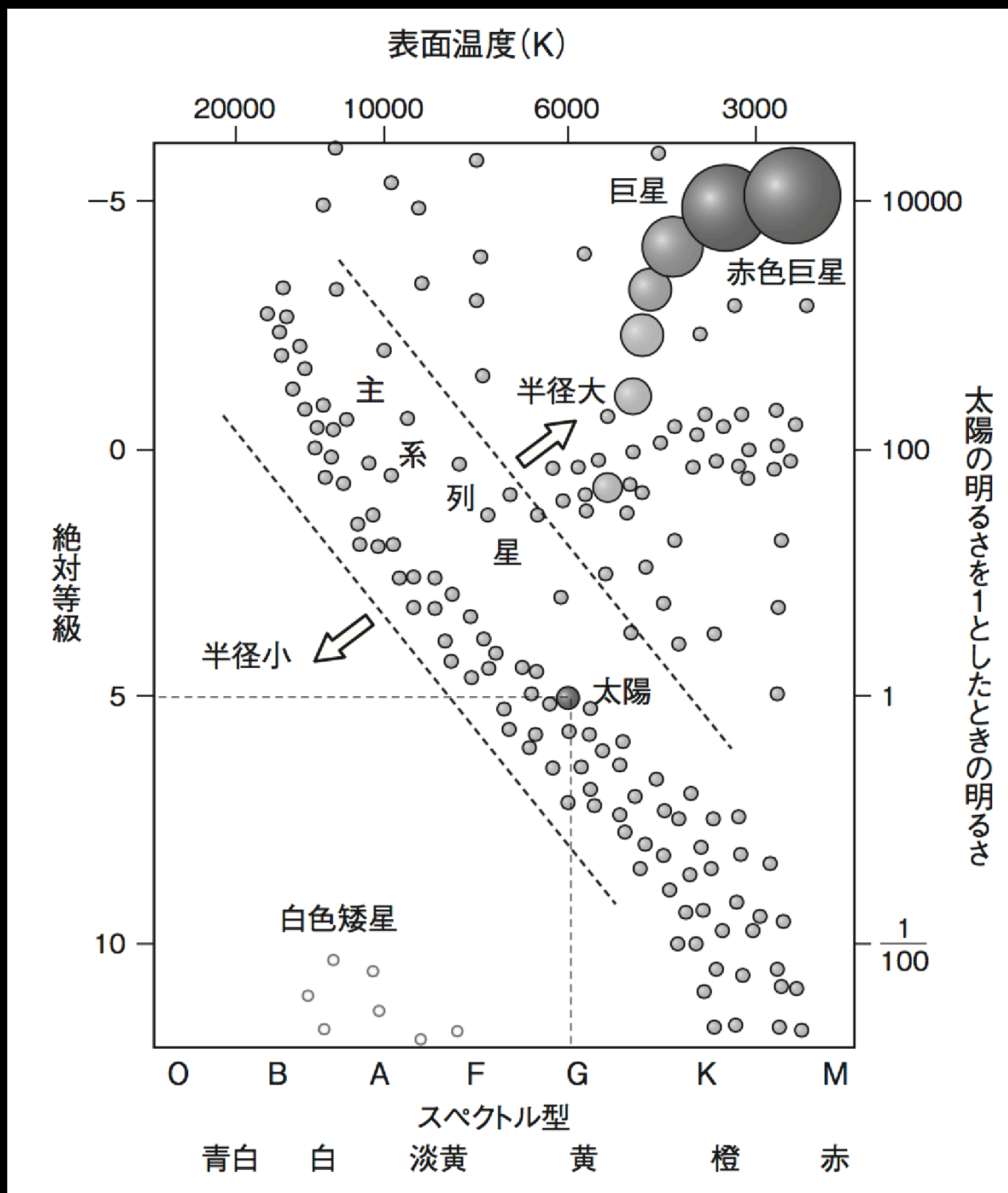
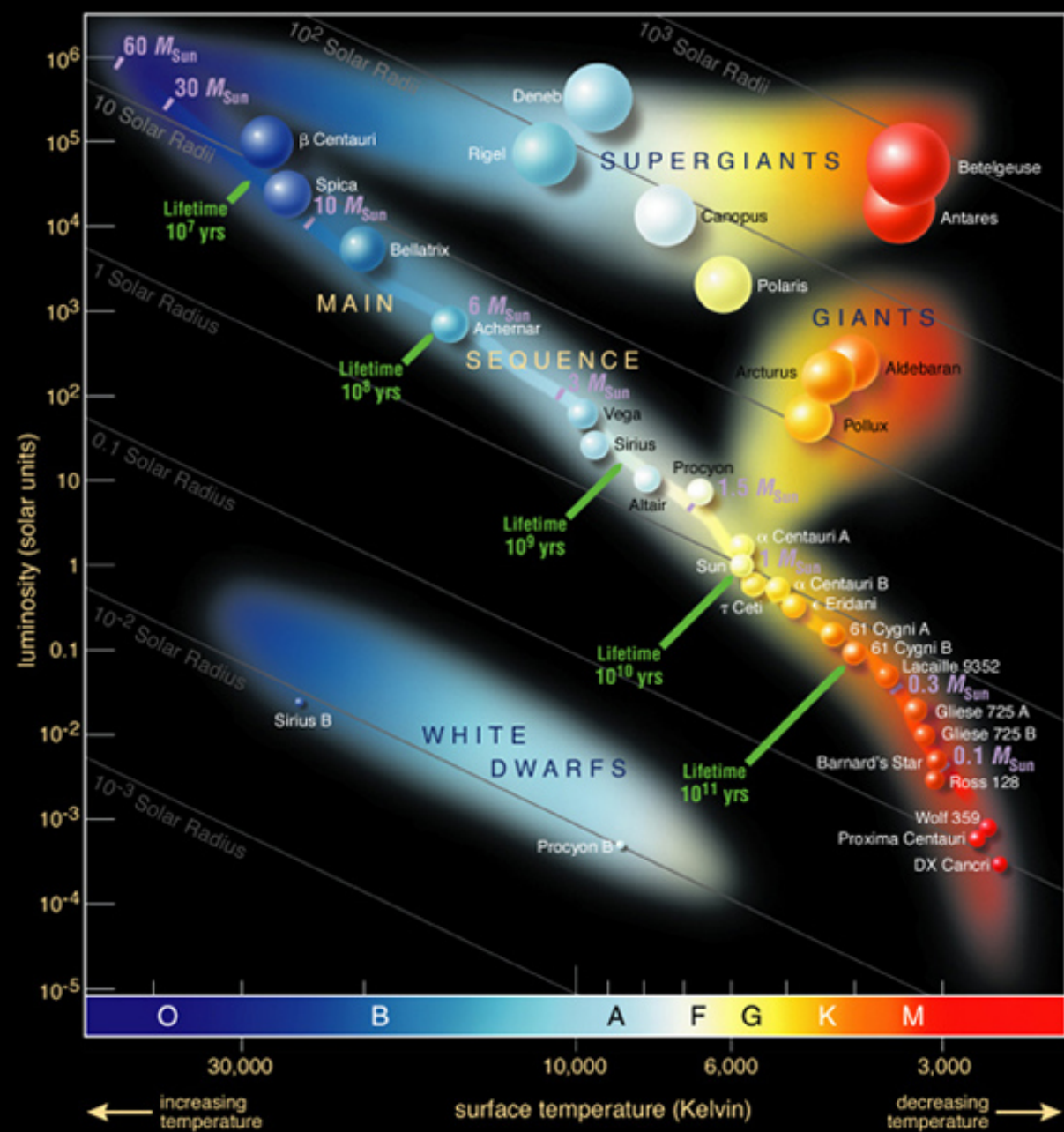
*収縮が始まる



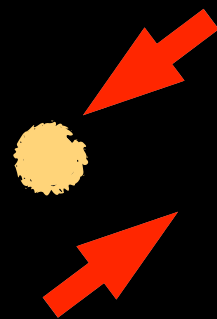
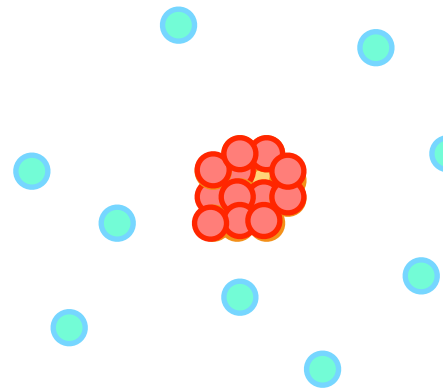
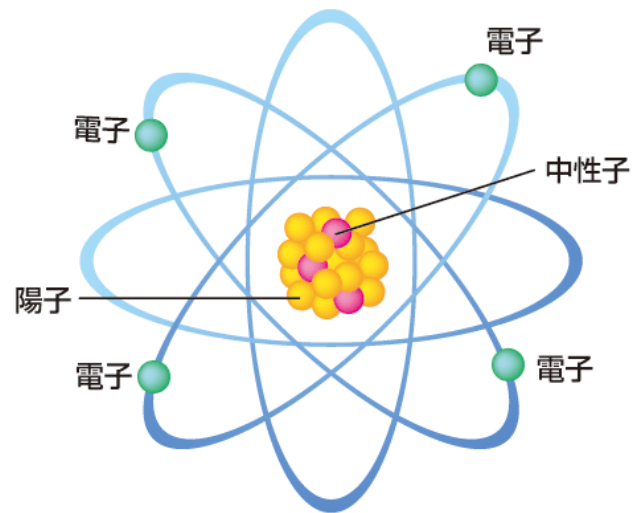
*密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その1】 電子の縮退圧で支える「白色矮星」になる

1933年チャンドラセカールの考え



星の一生 (5) 収縮後の運命2



内向きの力：重力

外向きの力：
中性子の縮退圧

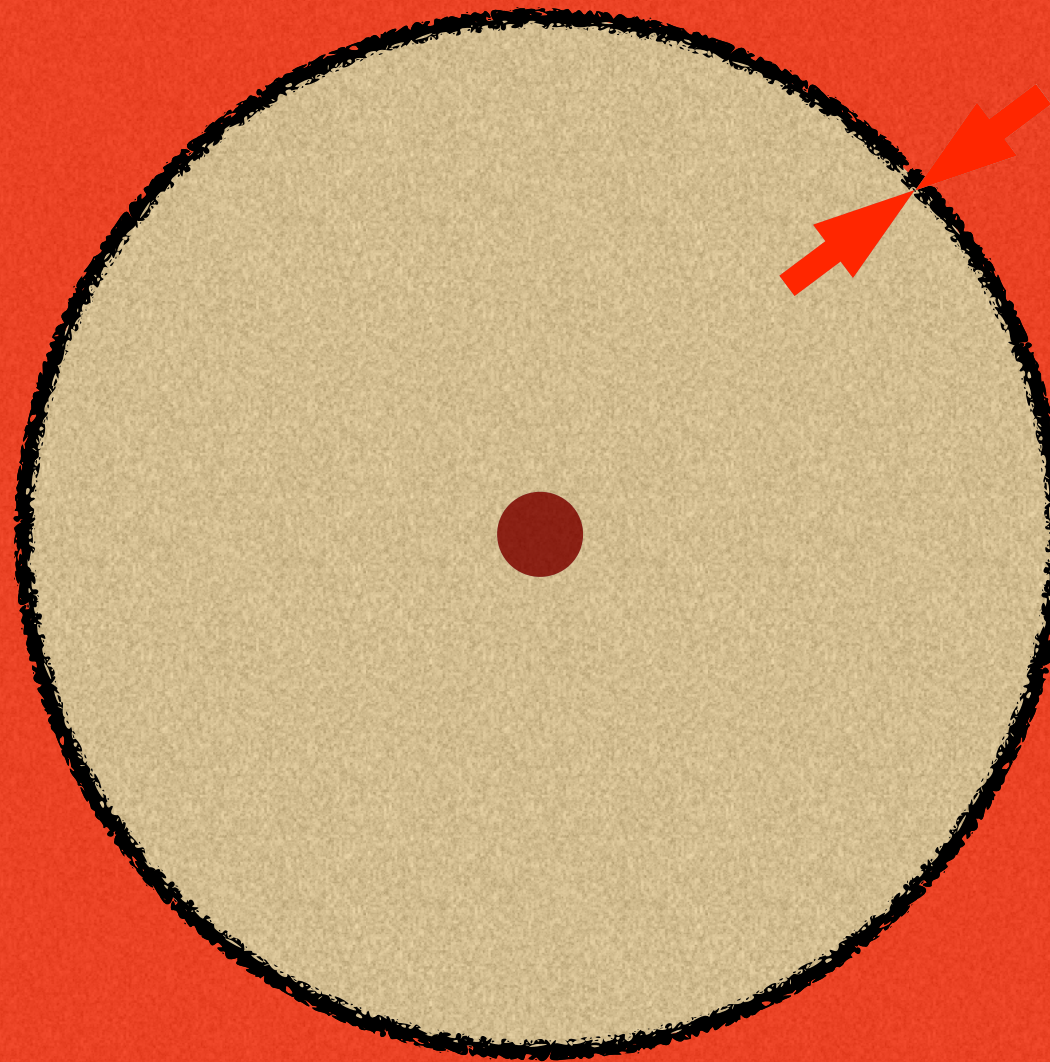


＊密につまった物質が星を支えるようになる

【運命その2】 中性子の縮退圧で支える「中性子星」になる

1938年ツヴィツキーの考え

星の一生 (6) さらに降り積もると... 大爆発



内向きの力：重力

外向きの力：

中性子の縮退圧

硬い殻ができる

＊収縮が始まる

中性子の塊ができる。

さらに外側からガスが落下すると...

重い星が燃え尽きると 中性子星やブラックホールに

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

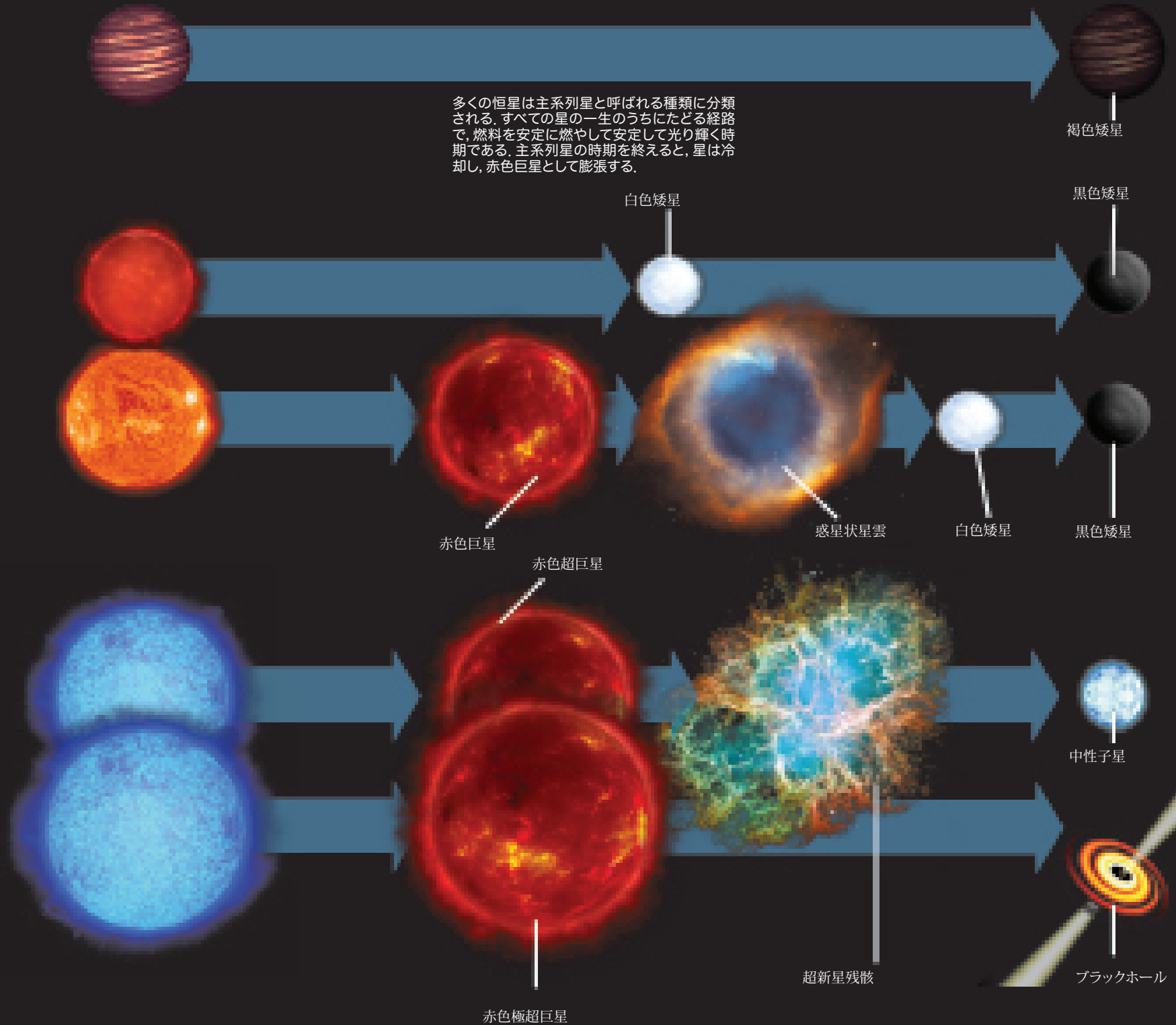
赤色矮星
質量：太陽の0.2倍
表面温度：3000°C
寿命：10兆年

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たどる経路で、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。

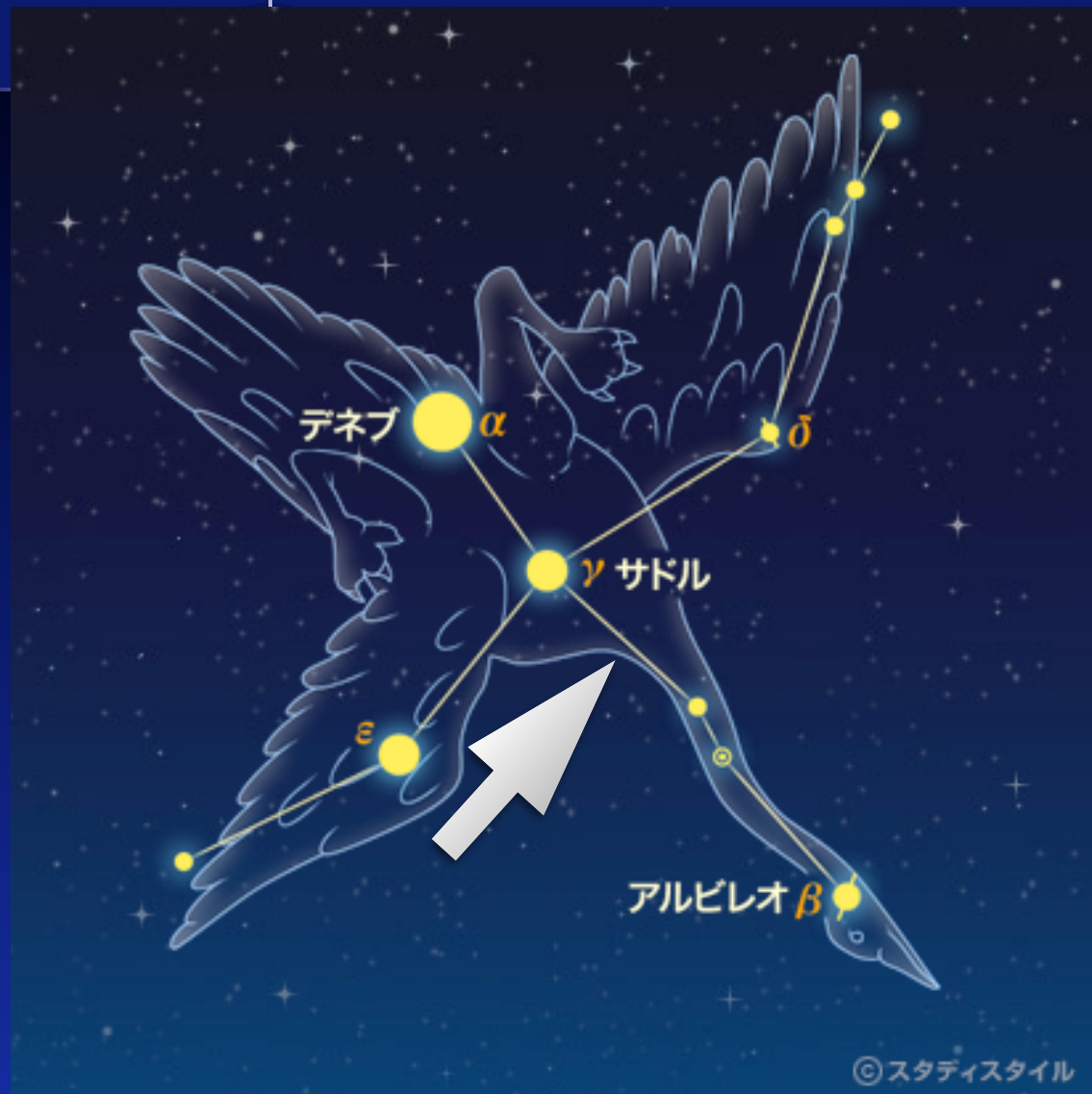


白色矮星
 $\leq 1.4M_{\odot}$

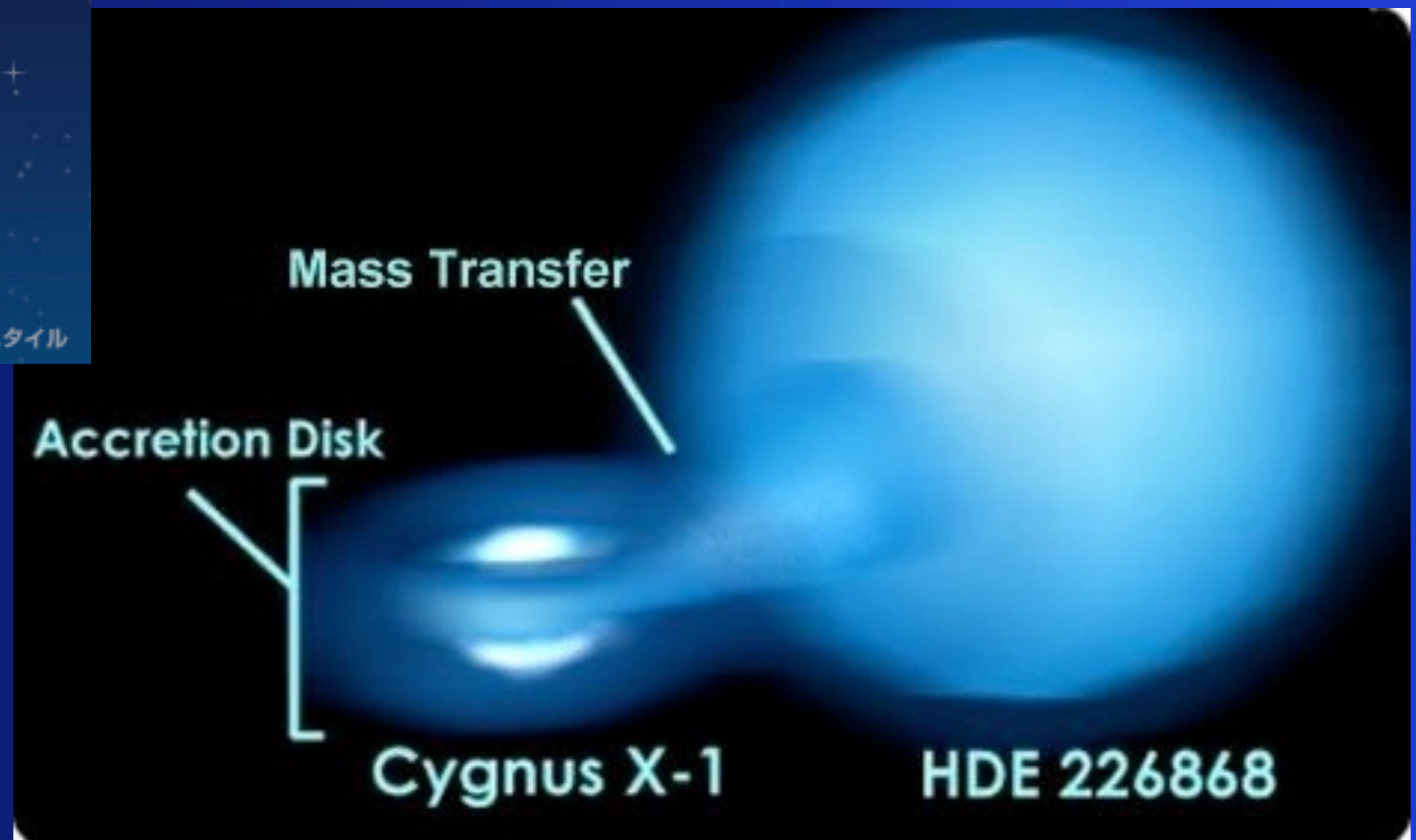
中性子星
 $\leq 2.4M_{\odot}$

ブラックホール

はくちょう座 X-1はブラックホール

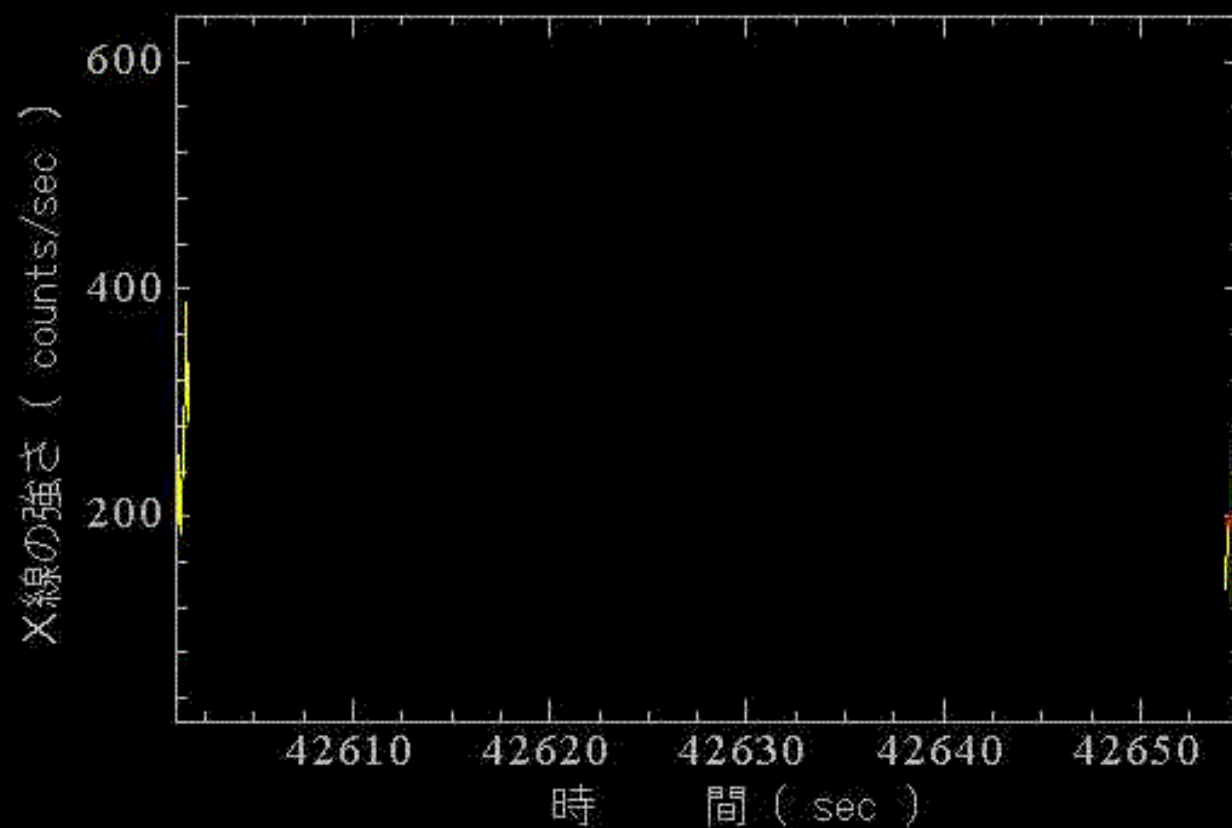


6000光年先

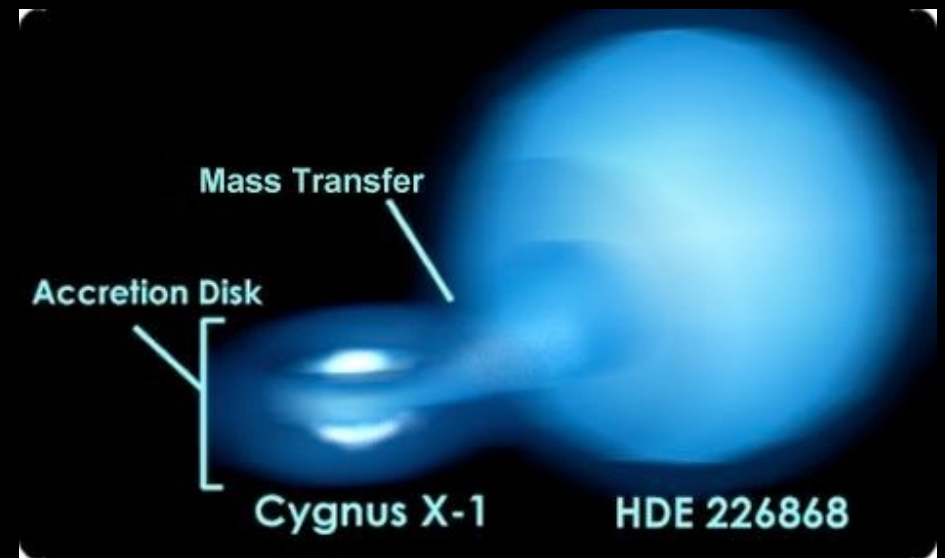


はくちょう座 X-1の光度曲線 (energy band 1-37keV)

Cyg X-1



S.Kitamoto / Osaka Univ.



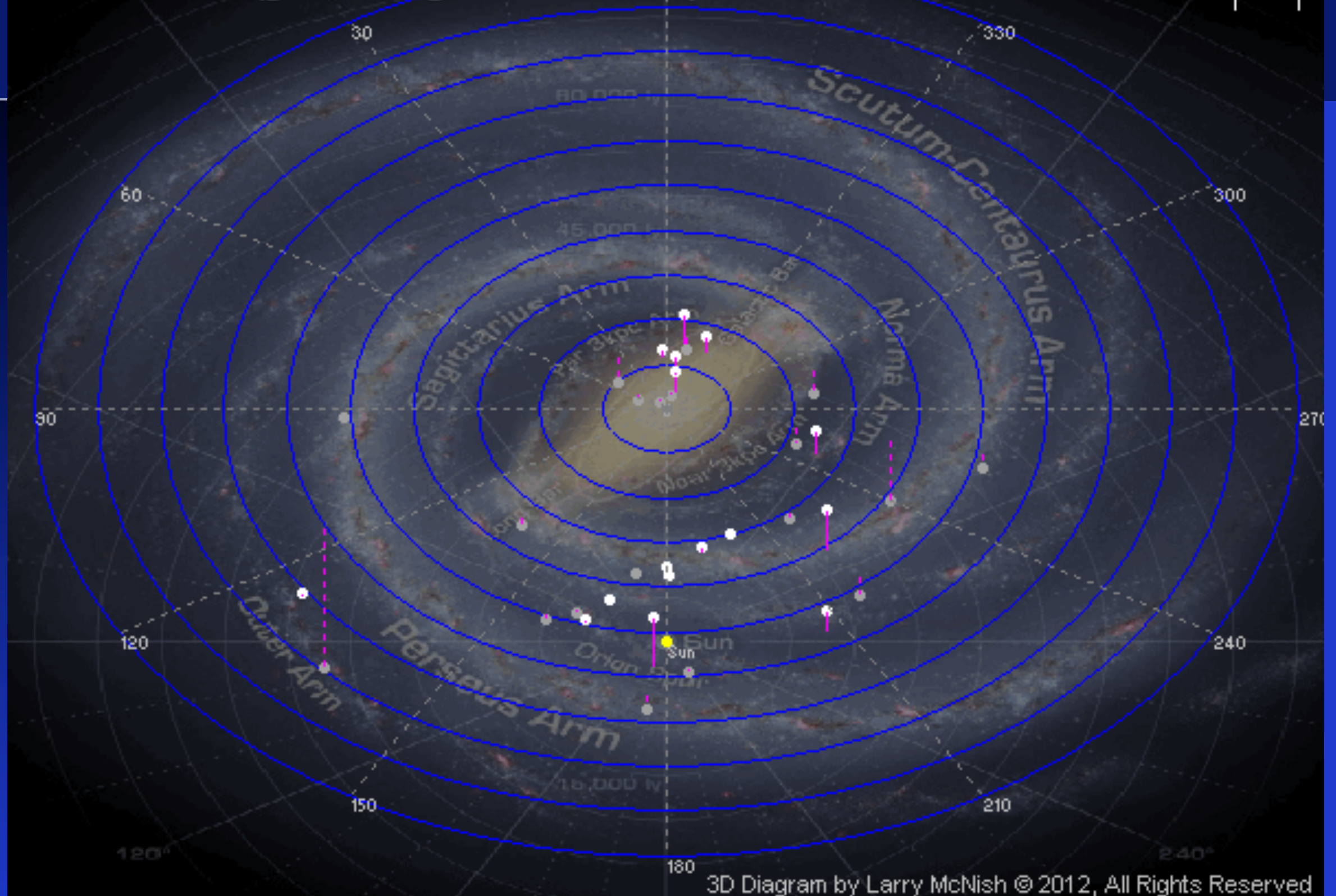
光の速さで1秒以下
(地球7.5周以下)
質量は太陽の10倍以上

重くて小さな天体

The 37 black hole candidates within 50,000 LY of the galactic centre

5,000 LY

Galactic centric (galactic longitude and latitude)



はくちょう座



こと座



へびつかい座



わし座



さそり座



いて座

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



天の河銀河 (Milky Way)



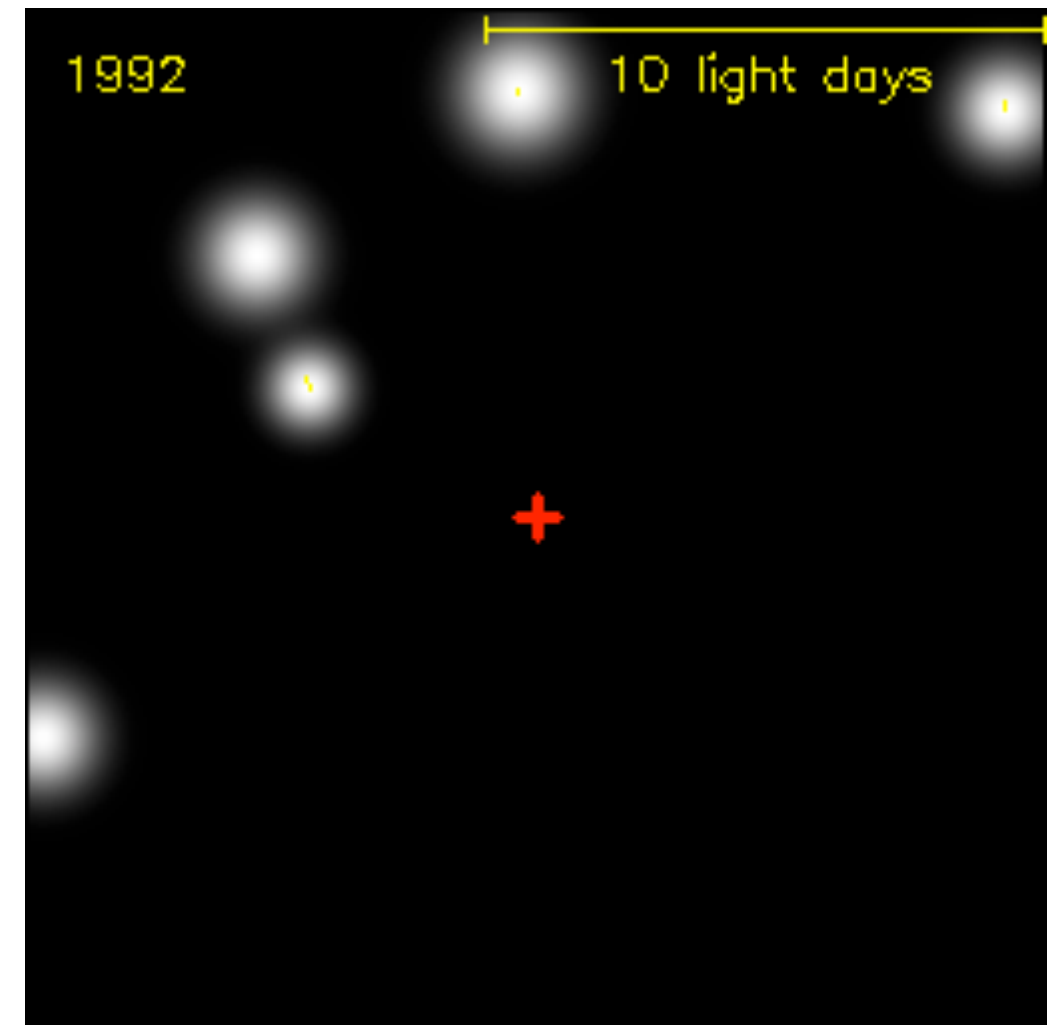
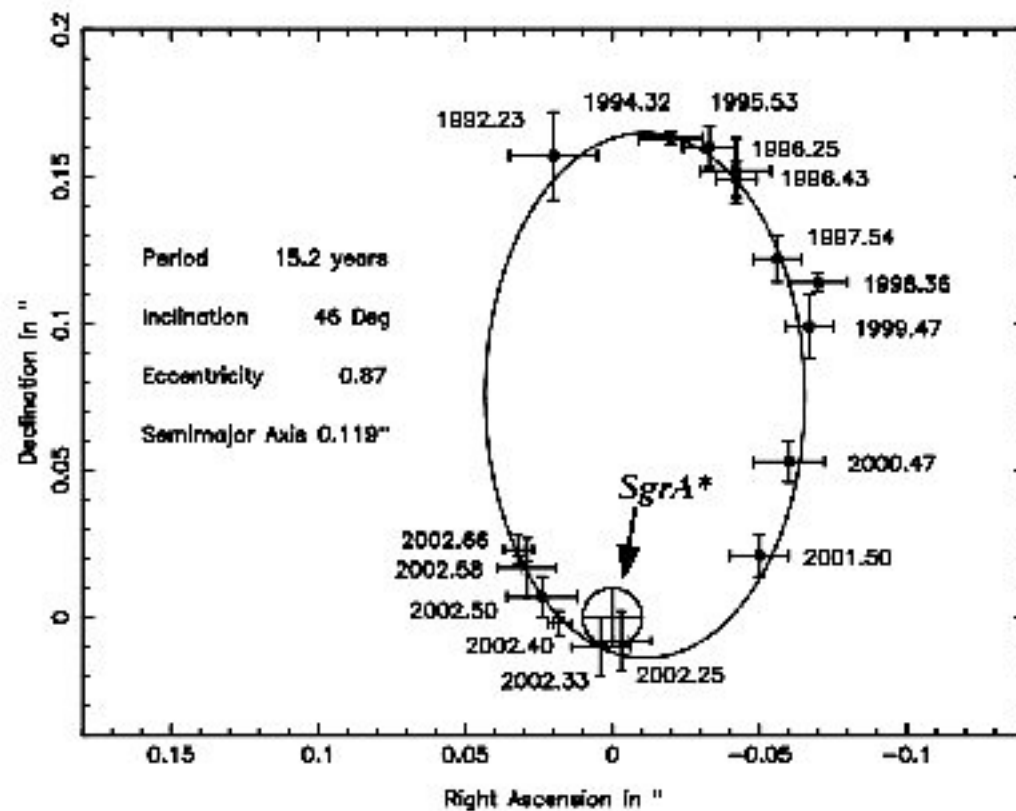
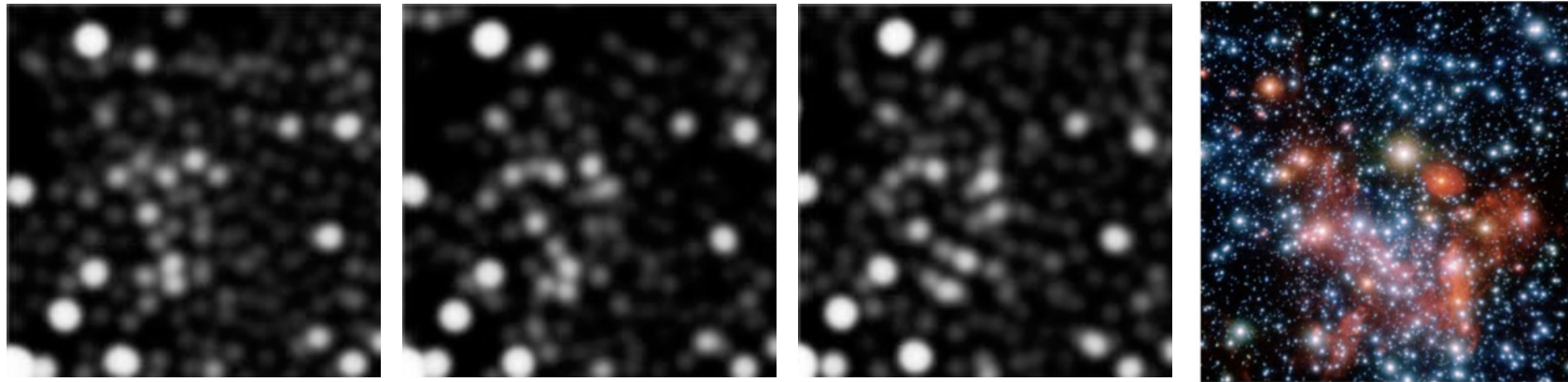
銀河中心へ向かってズームイン



Zooming in on the centre of the Milky Way

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

銀河中心 SgrA* の近くの星 S2 の動き

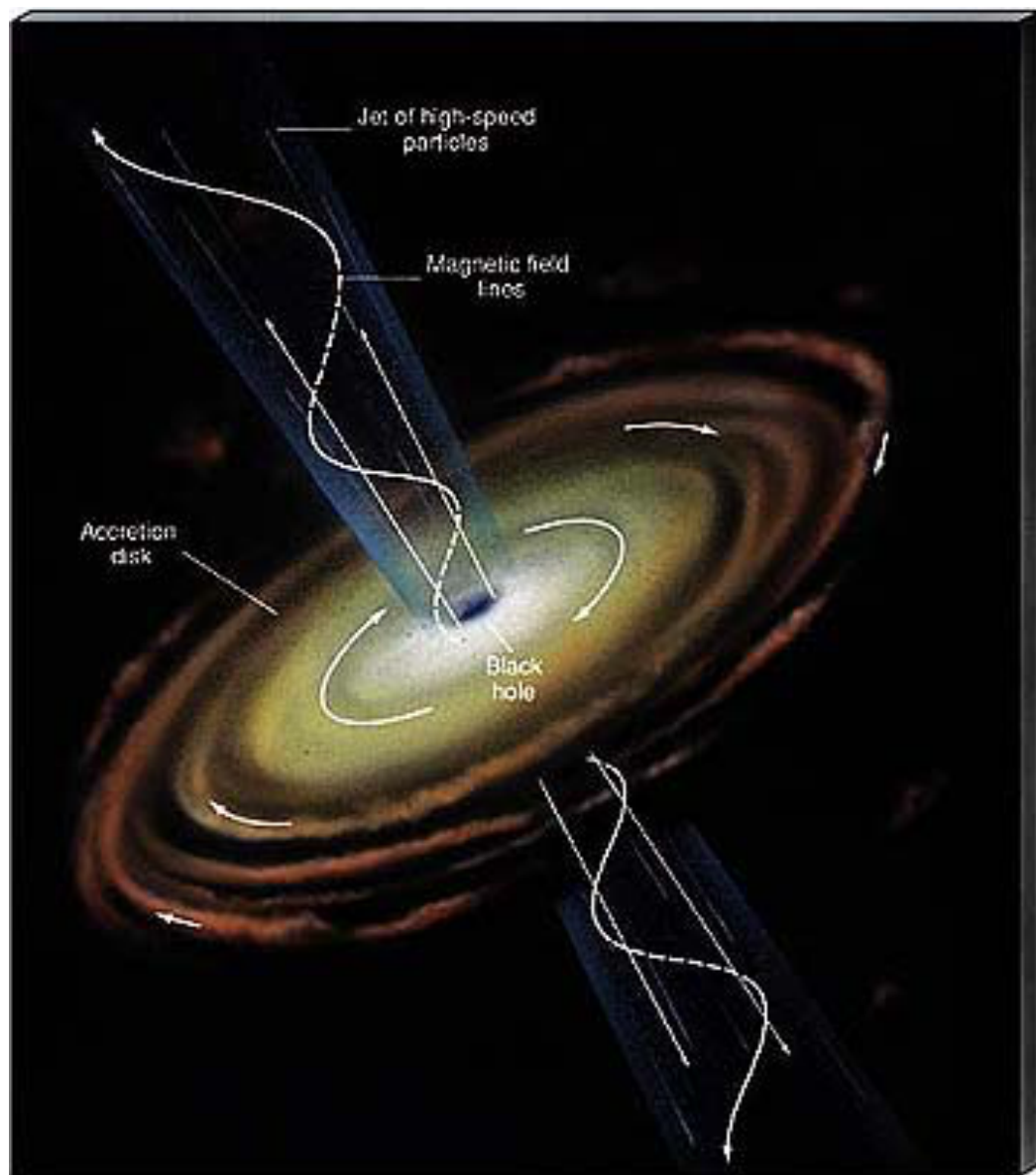


我々の銀河中心には、
太陽の420万倍の質量の
ブラックホール！

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

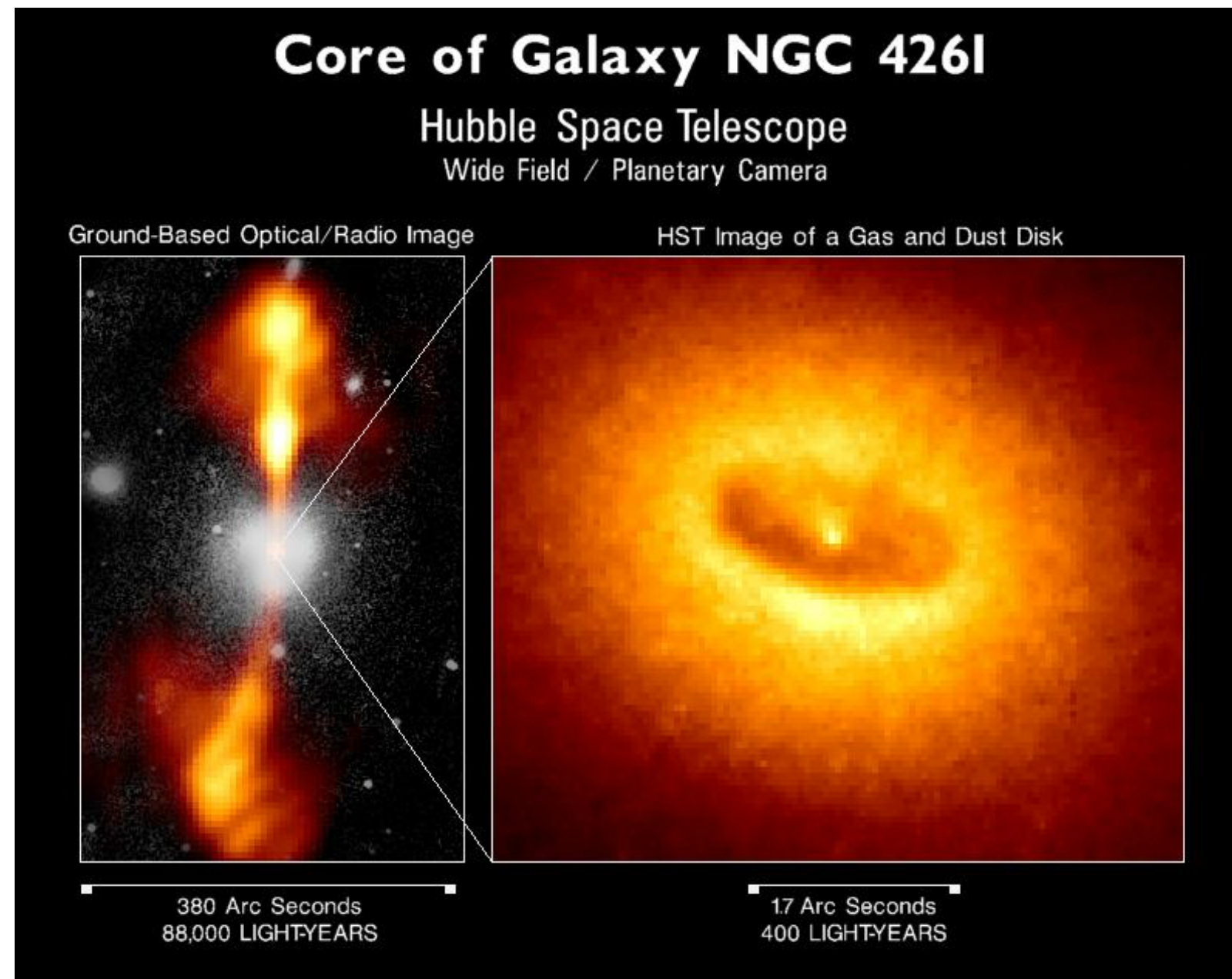
<http://www.brighthub.com/science/space/articles/13435.aspx#>

活動銀河核 (AGN, active galactic nuclei)



<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

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

- ★何でも吸い込む。光も脱出できない重い星
- ★大きな恒星が燃え尽きた最後の姿
- ★アインシュタインの相対性理論が予言
- ★天文学では「明るい天体」 （エネルギー源）

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

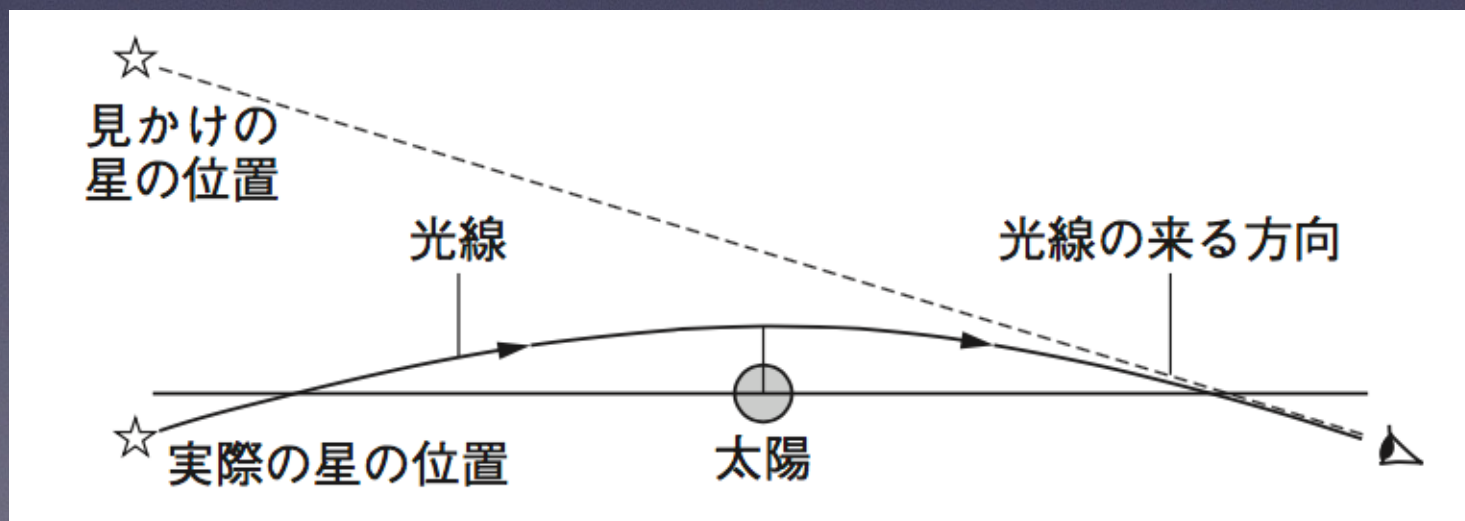
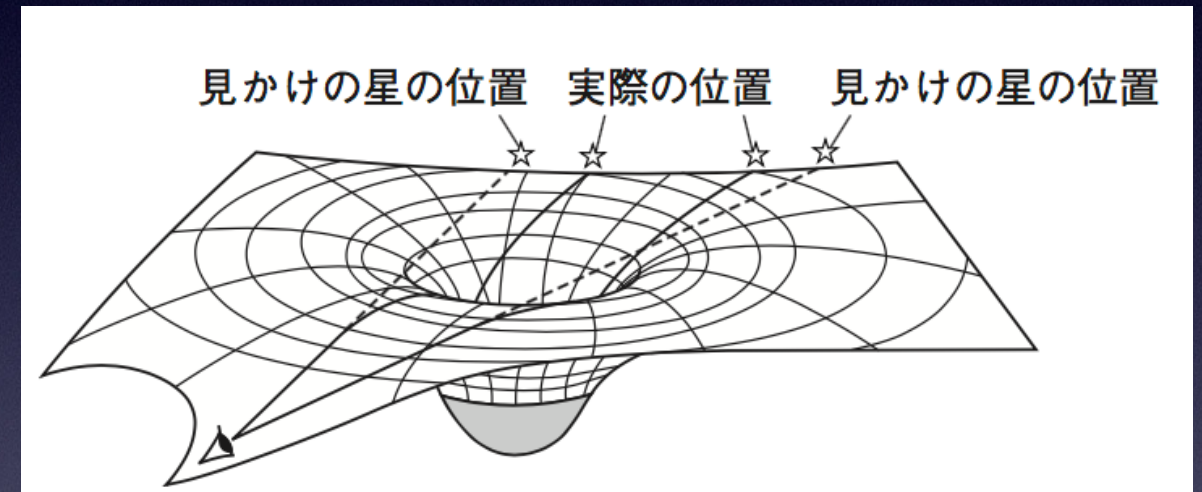
2. 見えないはずでは？

★ まわりのガスや天体の動きから
ブラックホールの存在がわかる！

★ ブラックホールの近くでは光も曲がって進む
(重力レンズ)

一般相対性理論の予言【光の曲がり】

光は時空を直進するが、重い天体の周りでは、時空の歪みにより、曲がって進むことになる。



1919年、エディントンが、皆既日食を利用して、光の曲がりを確認（0.875秒角）

Taken from the 22 November 1919 edition of the Illustrated London News.

Coverage in the (more excitable) New York Times.

LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

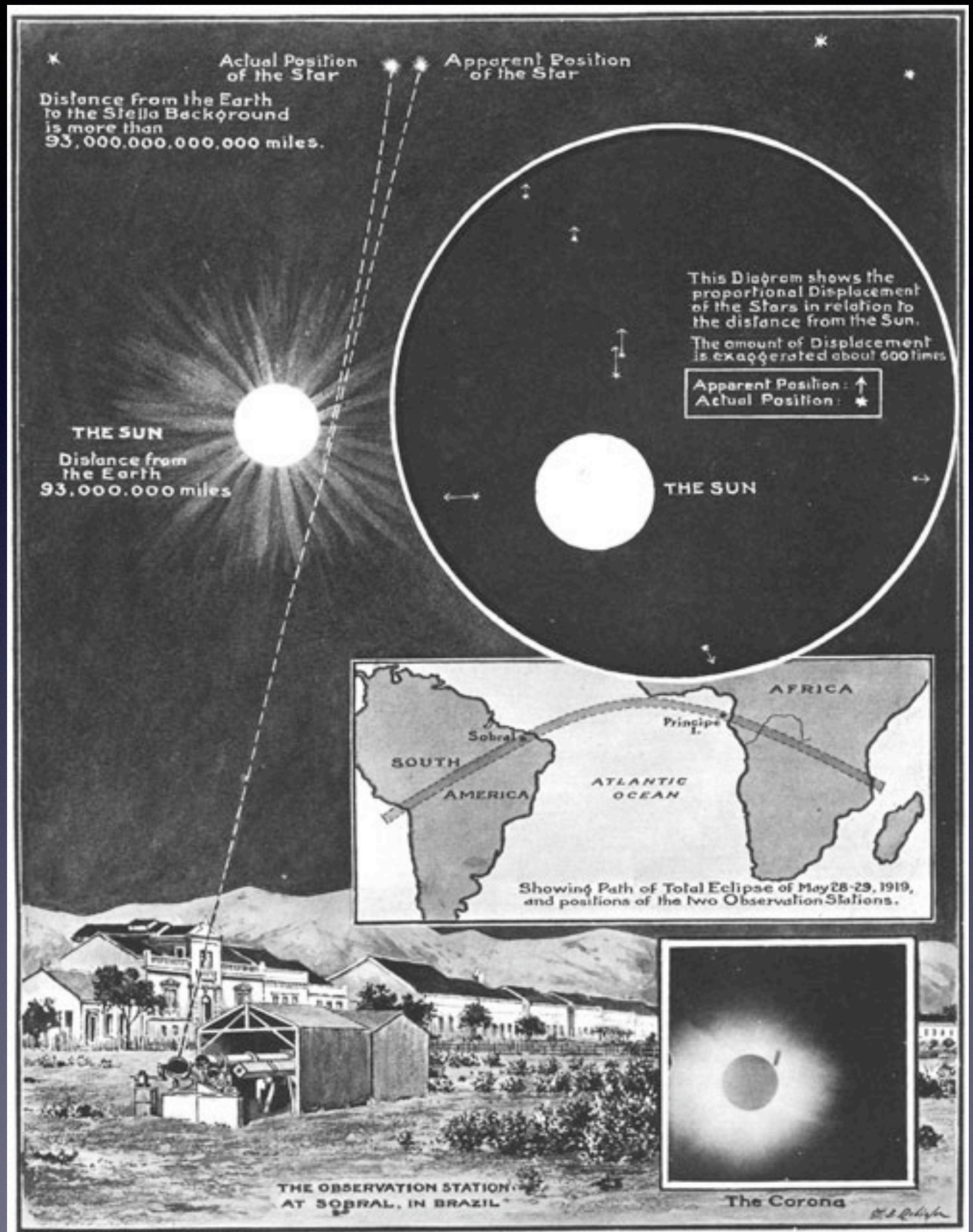
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

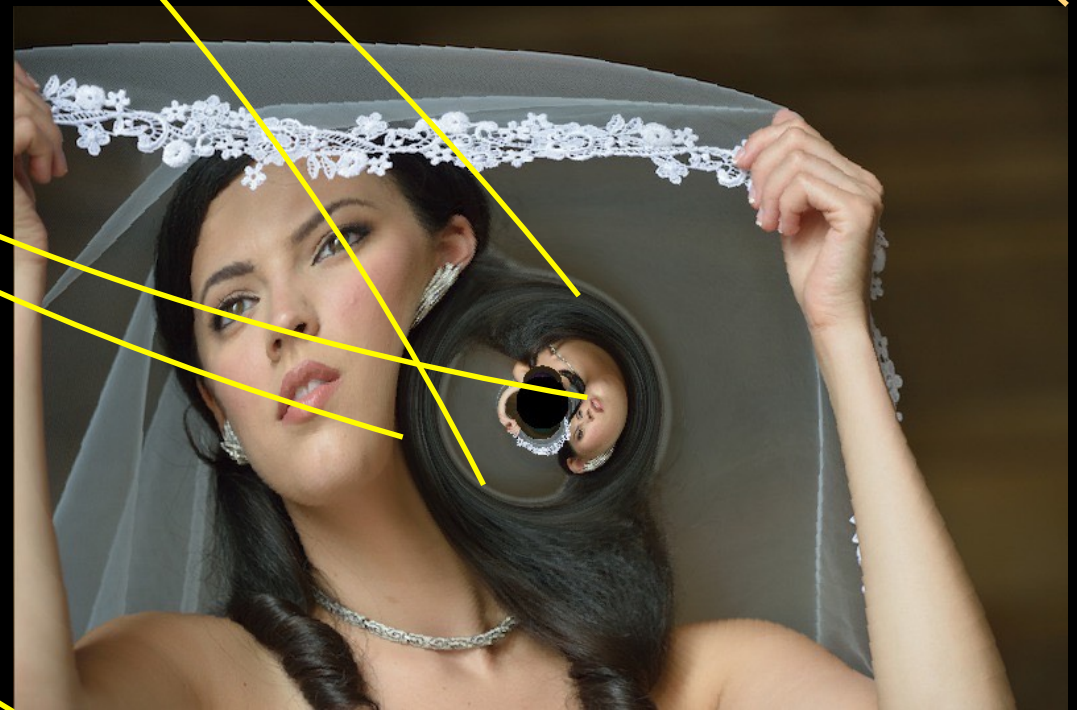
A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



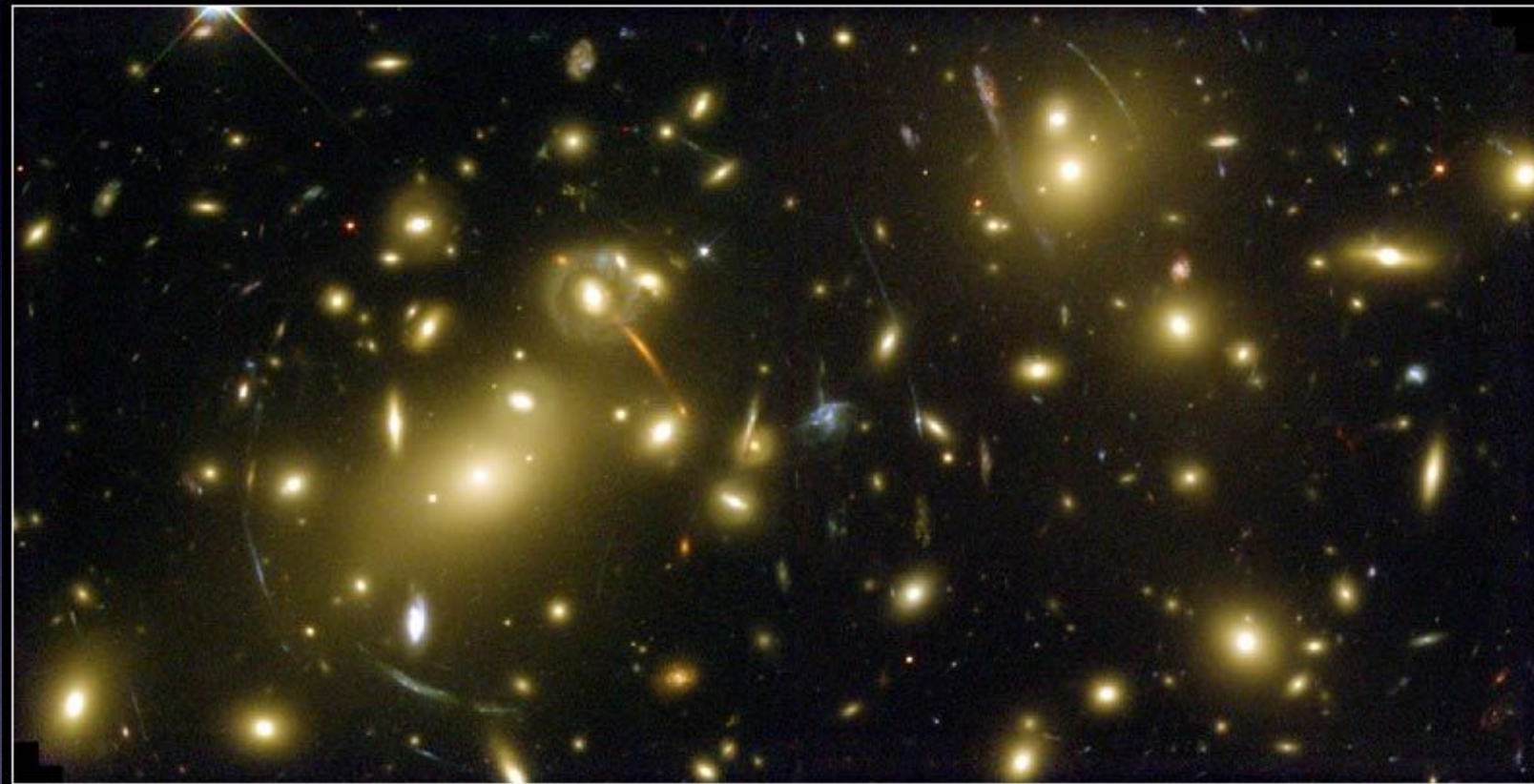


ブラックホールの周りで
光は曲がる



一般相対性理論の予言 【光の曲がり】

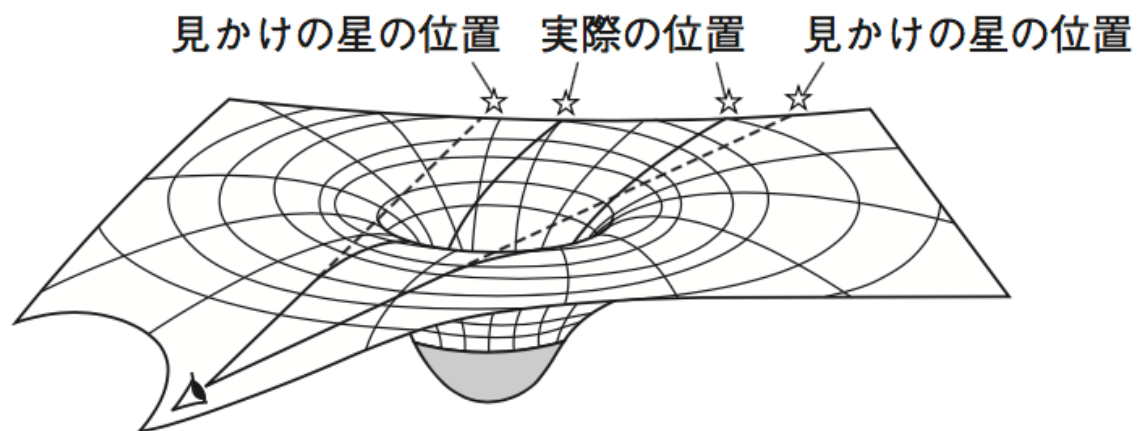
重力レンズ



Galaxy Cluster Abell 2218

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-ECF) • STScI-PRC00-08

HST • WFPC2



映画 インターステラー (2014)



映画 インターステラー (2014)



Interstellar (2014)



Executive Producer: Kip Thorne

<https://www.youtube.com/watch?v=qZZ9jRan9eo>

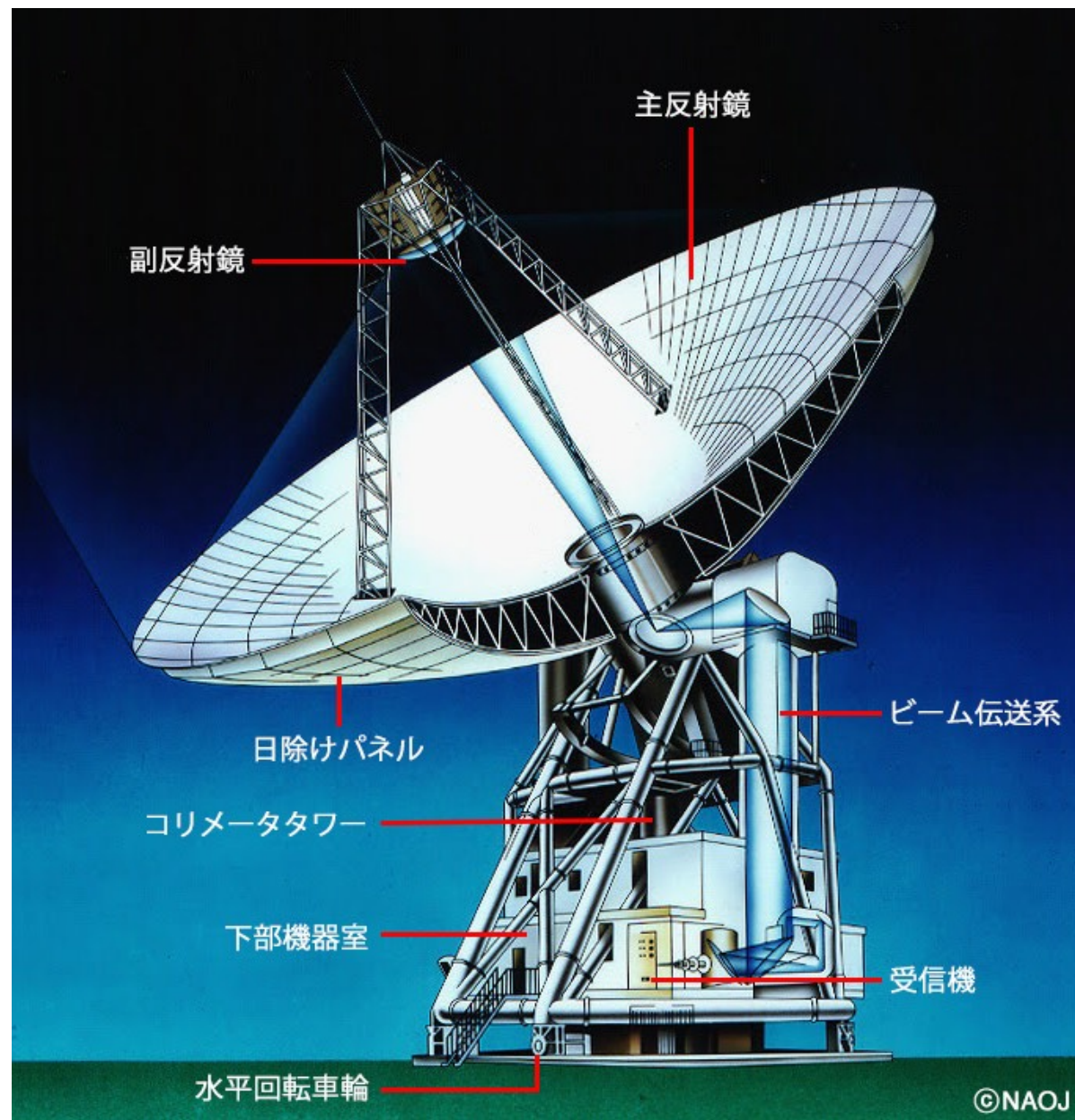
2019年4月10日, 国立天文台グループ「ブラックホールの直接撮像に初めて成功」



地球から5500万光年

<https://alma-telescope.jp/news/press/eht-201904>

電波望遠鏡 口径が大きいほど集光力高い, 分解能高い

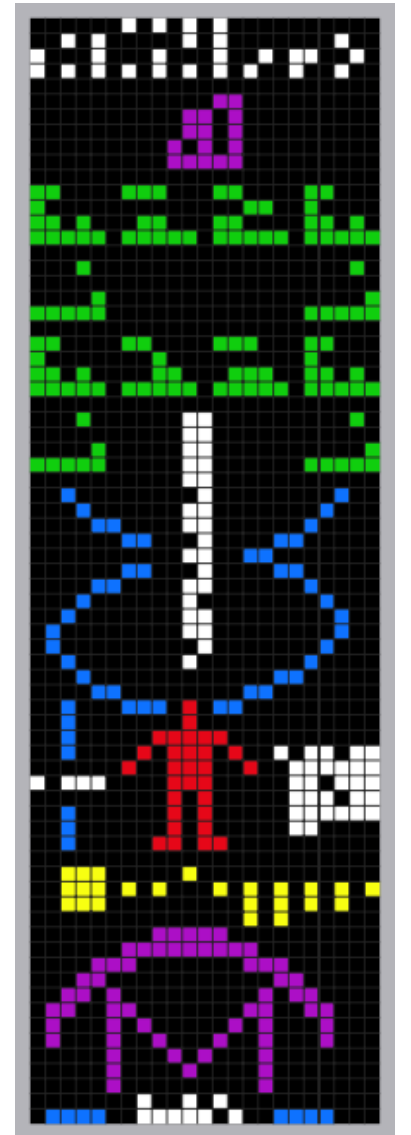


$$\text{分解能} = \text{波長} / \text{口径}$$

野辺山45m望遠鏡

アレシボ電波望遠鏡 305メートル球面電波望遠鏡 (1963ー)

(Arecibo Observatory, プエルトリコ)



- 1964 水星の自転周期55日の発見
- 1968 かにパルサー中心に中性子星発見
- 1974 連星中性子星発見
- 1989 小惑星カスターア直接観測
- 1992 パルサーを公転する太陽系外惑星発見

アレシボ・メッセージ (1974)
SETI (1999ー)

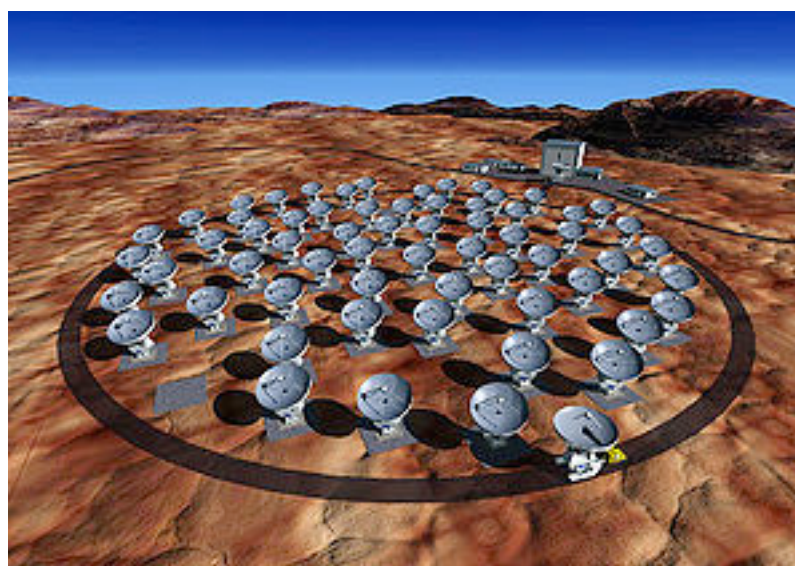
アルマ望遠鏡 Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array

日本が、欧米と共同で、チリのアタカマに建設した電波望遠鏡

全66台のアンテナが設置され、日本は16台を担当。「いざよい」と命名。
標高5000m地点に設置されている。

直径12メートルのアンテナを50台組み合わせるアンテナ群と、直径12メートルのアンテナ4台と直径7メートルアンテナ12台からなる。最大18.5キロメートルまでアンテナ間隔を広げることができ、最大の空間分解能は、0.05 マイクロラジアン。

「大阪にある一円玉を東京から見分けられるほどの高い解像度」



中国「天眼（FAST）」 500メートル球面電波望遠鏡（2016一） (Five-hundred-meter Aperture Spherical radio Telescope: FAST)



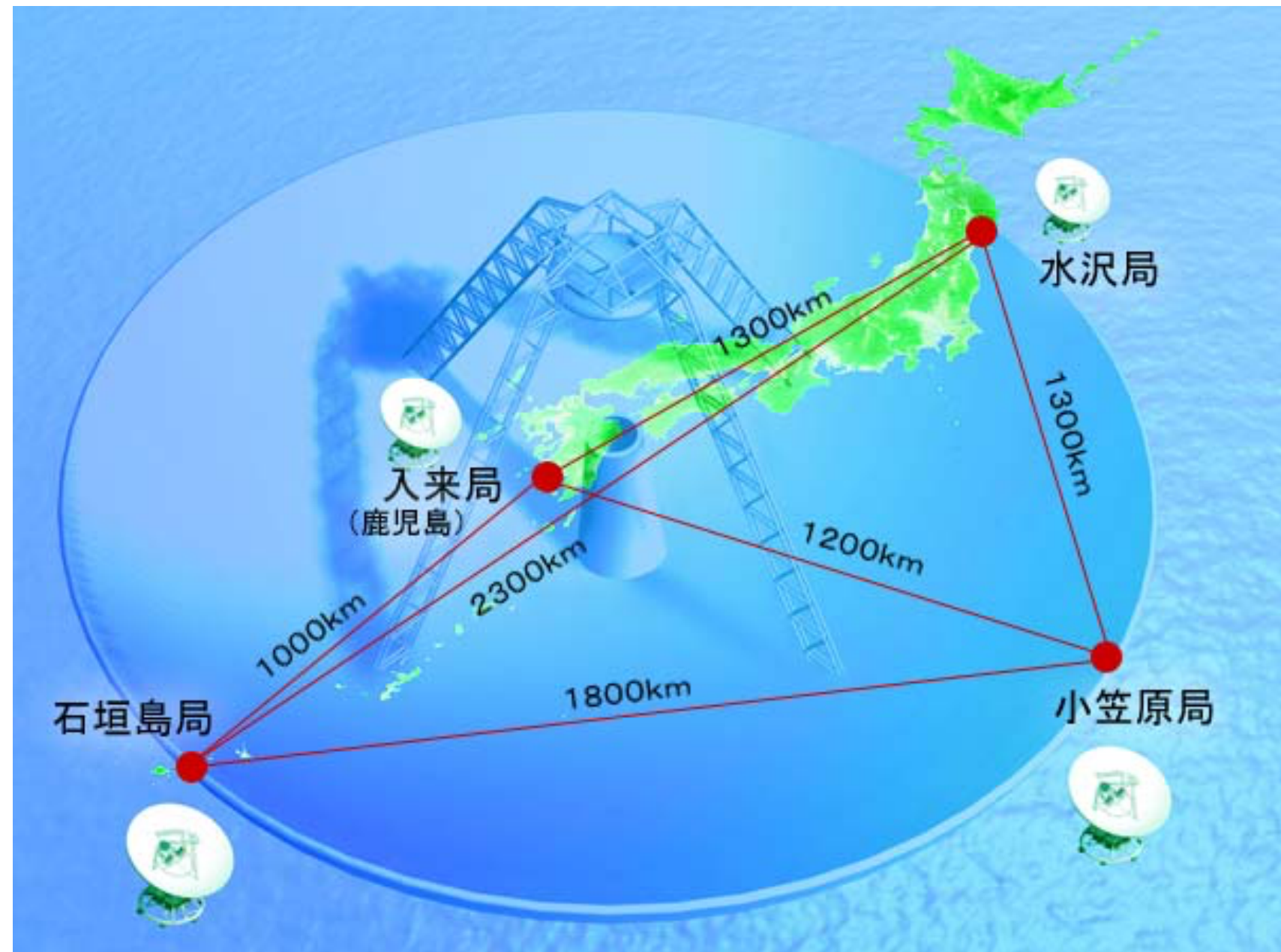
中国南西部の貴州省，185億円，天頂から40度の範囲を観測可能，
1万人強制移住，半径5 km以内携帯電話禁止

http://japanese.china.org.cn/business/txt/2016-07/04/content_38806293.htm

電波干渉計

VLBI = Very Long Baseline Interferometer

VERA = VLBI Exploration of Radio Astrometry



<http://veraserver.mtk.nao.ac.jp/system/index.html>

イベント・ホライズン・テレスコープ (EHT)

— 各地の電波望遠鏡をつなぎ、地球サイズの仮想望遠鏡を構成 —



<https://www.nao.ac.jp/news/science/2019/20190410-eh.html>



First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole

The Event Horizon Telescope Collaboration

(See the end matter for the full list of authors.)

Received 2019 March 1; revised 2019 March 12; accepted 2019 March 12; published 2019 April 10

Abstract

When surrounded by a transparent emission region, black holes are expected to reveal a dark shadow caused by gravitational light bending and photon capture at the event horizon. To image and study this phenomenon, we have assembled the Event Horizon Telescope, a global very long baseline interferometry array observing at a wavelength of 1.3 mm. This allows us to reconstruct event-horizon-scale images of the supermassive black hole candidate in the center of the giant elliptical galaxy M87. We have resolved the central compact radio source as an asymmetric bright emission ring with a diameter of $42 \pm 3 \mu\text{as}$, which is circular and encompasses a central depression in brightness with a flux ratio $\gtrsim 10:1$. The emission ring is recovered using different calibration and imaging schemes, with its diameter and width remaining stable over four different observations carried out in different days. Overall, the observed image is consistent with expectations for the shadow of a Kerr black hole as predicted by general relativity. The asymmetry in brightness in the ring can be explained in terms of relativistic beaming of the emission from a plasma rotating close to the speed of light around a black hole. We compare our images to an extensive library of ray-traced general-relativistic magnetohydrodynamic simulations of black holes and derive a central mass of $M = (6.5 \pm 0.7) \times 10^9 M_\odot$. Our radio-wave observations thus provide powerful evidence for the presence of supermassive black holes in centers of galaxies and as the central engines of active galactic nuclei. They also present a new tool to explore gravity in its most extreme limit and on a mass scale that was so far not accessible.

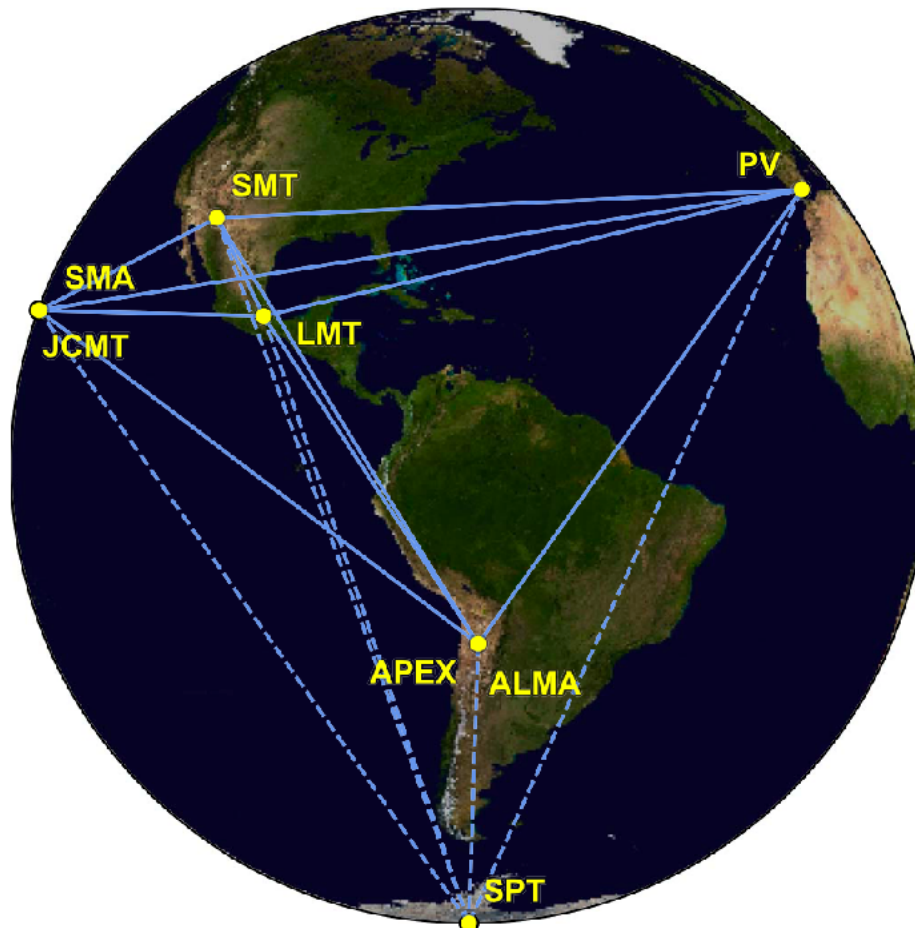


Figure 1. Eight stations of the EHT 2017 campaign over six geographic locations as viewed from the equatorial plane. Solid baselines represent mutual

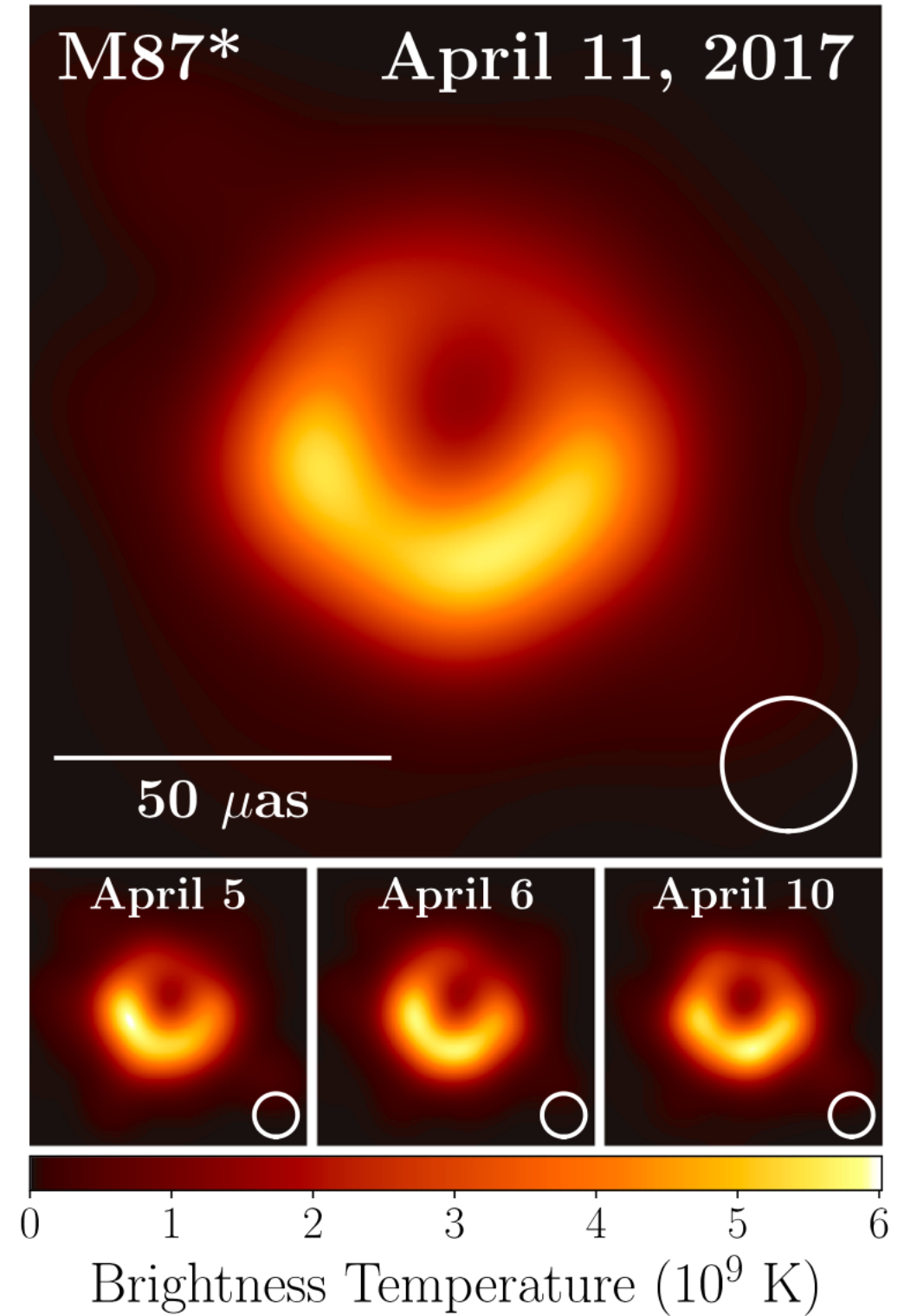


Figure 3. Top: EHT image of M87* from observations on 2017 April 11 as a representative example of the images collected in the 2017 campaign. The image is the average of three different imaging methods after convolving each with a circular Gaussian kernel to give matched resolutions. The largest of the three kernels ($20 \mu\text{as}$ FWHM) is shown in the lower right. The image is shown in units of brightness temperature, $T_b = S\lambda^2/2k_B\Omega$, where S is the flux density, λ is the observing wavelength, k_B is the Boltzmann constant, and Ω is the solid angle of the resolution element. Bottom: similar images taken over different days showing the stability of the basic image structure and the equivalence among different days. North is up and east is to the left.

ブラックホールシャドウのメカニズム解説映像

EHT image

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？

2. 見えないはずでは？

★ まわりのガスや天体の動きから
ブラックホールの存在がわかる！

★ブラックホールの近くでは光も曲がって進む
(重力レンズ)

★ 見えたんです (2019年4月)
まわりの光で黒い部分が見えた!!!

今日の話の内容

1. ブラックホールとは？
2. 見えないはずでは？
3. 音も聞こえないはずでは？

★ 重力波をつかまえた (2015年9月)

重力波

= 時空のゆがみ (トランポリンのゆれ) が
波として伝わる

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

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

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

JORGE CHAM © 2016

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

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

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

GRAVITATIONAL WAVES ARE PRODUCED WHENEVER MASSES ACCELERATE, CHANGING THE DISTORTION OF SPACE.

EVERYTHING WITH MASS AND/OR ENERGY CAN MAKE GRAVITATIONAL WAVES.

IF YOU AND I STARTED TO DANCE AROUND EACH OTHER, WE WOULD ALSO CAUSE RIPPLES IN THE FABRIC OF SPACE AND TIME.

BUT THESE WOULD BE EXTREMELY SMALL, PRACTICALLY UNDETECTABLE.

AND ANYTIME THERE'S A NEW WAY TO INVESTIGATE THE UNIVERSE WE DISCOVER THINGS THAT WE DIDN'T EXPECT.

IT'S REALLY ABOUT LOOKING FOR NEW THINGS THAT WE DIDN'T KNOW EXISTED...

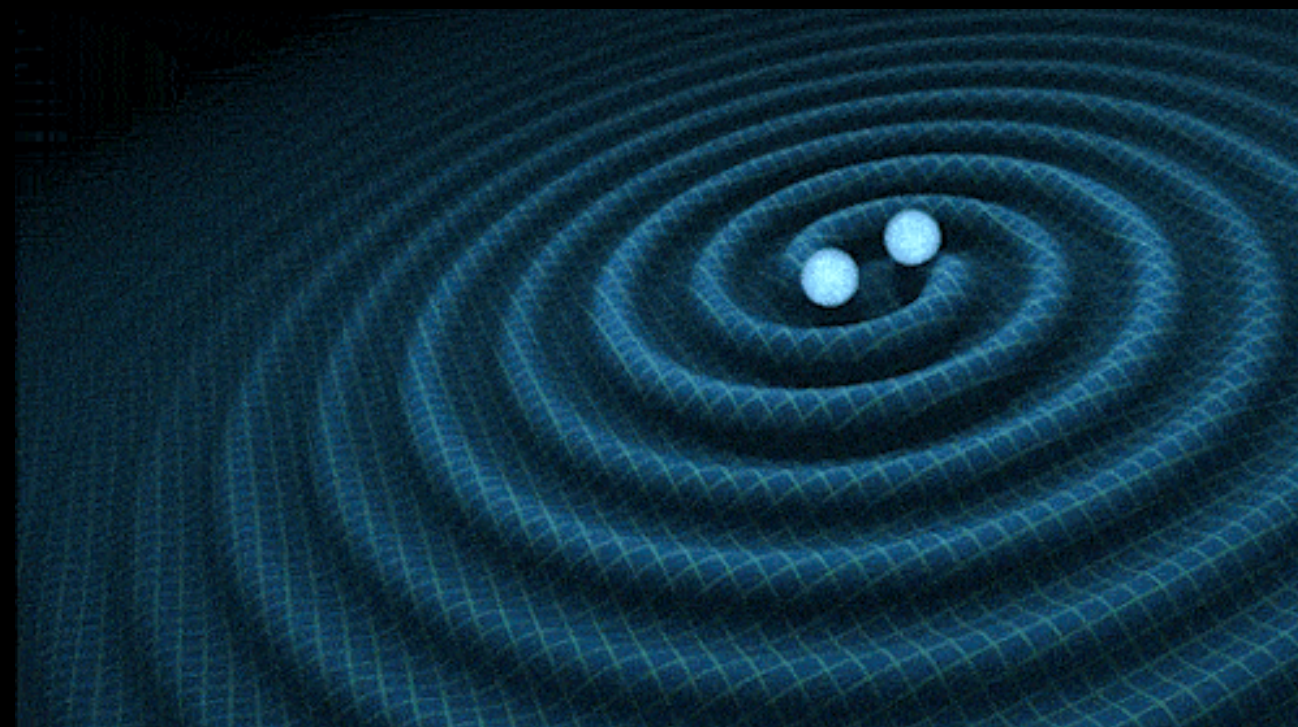
...EXAMINING THE EXTREME EDGES OF OUR KNOWLEDGE OF PHYSICS...

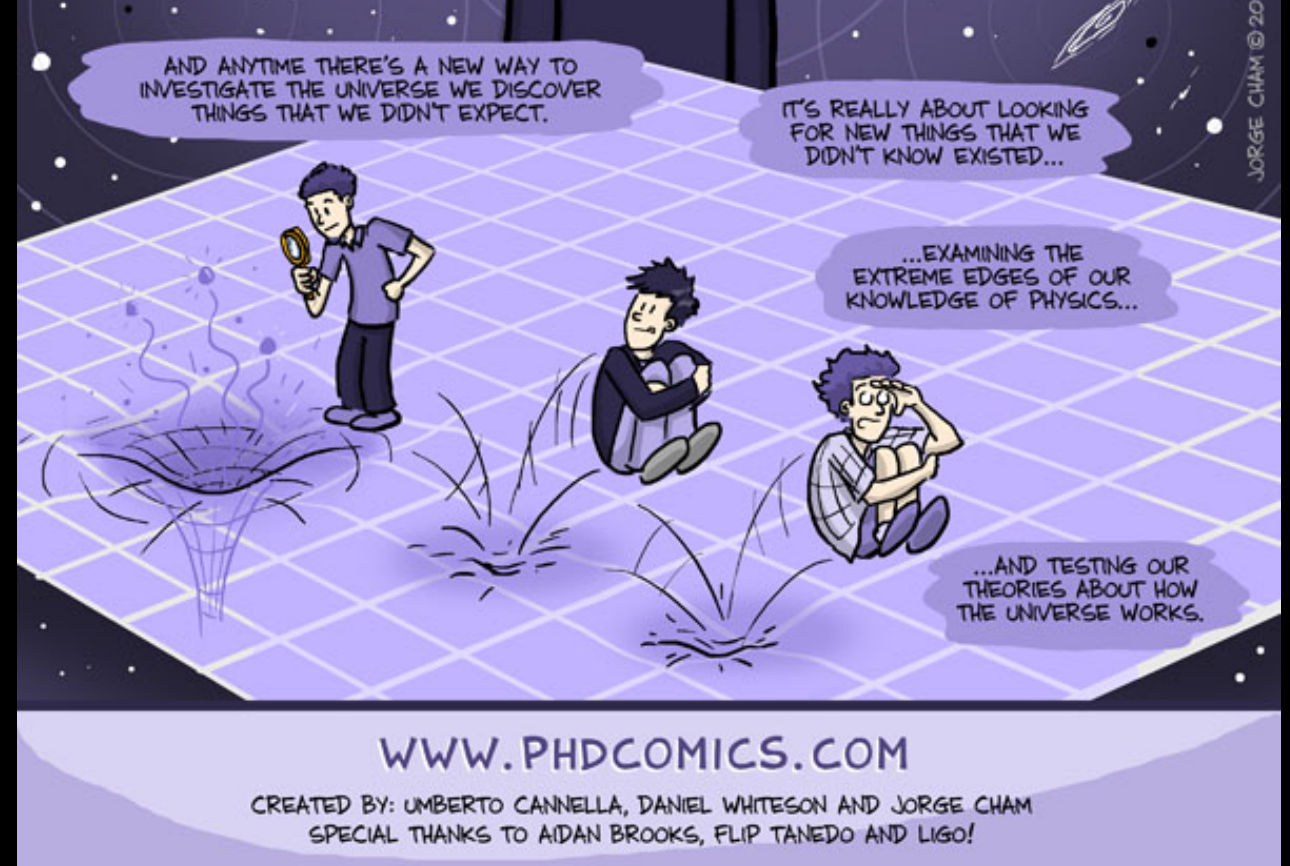
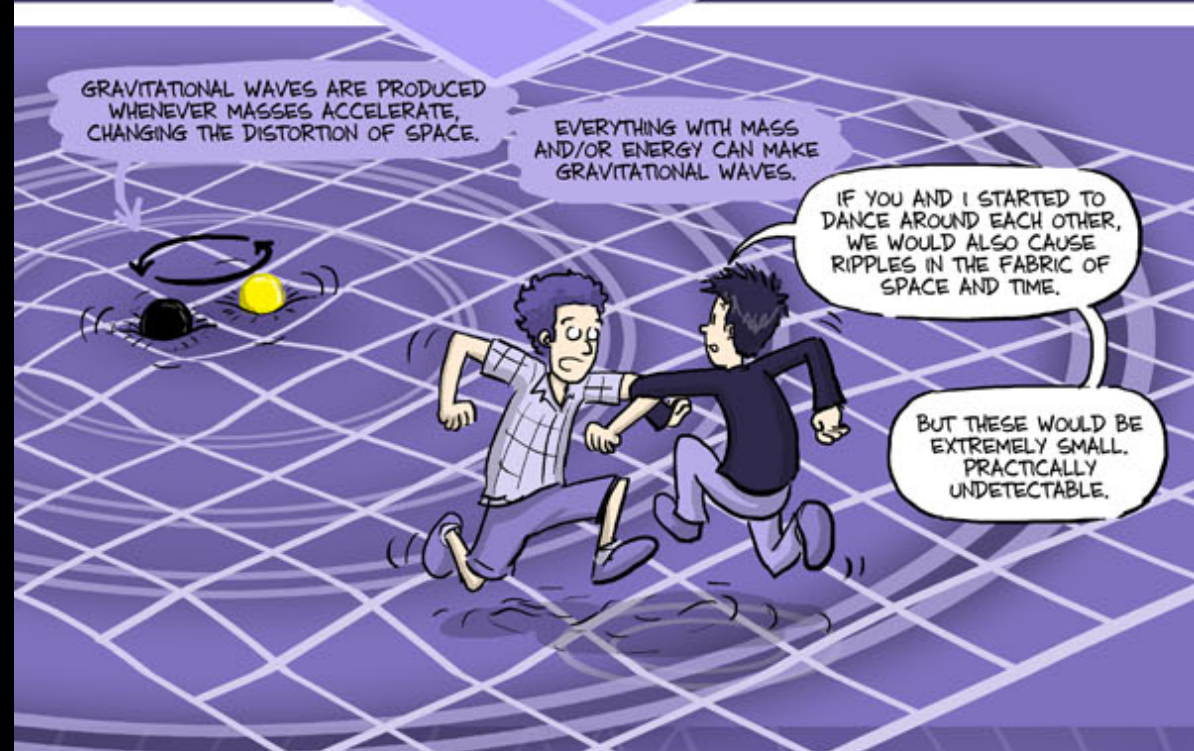
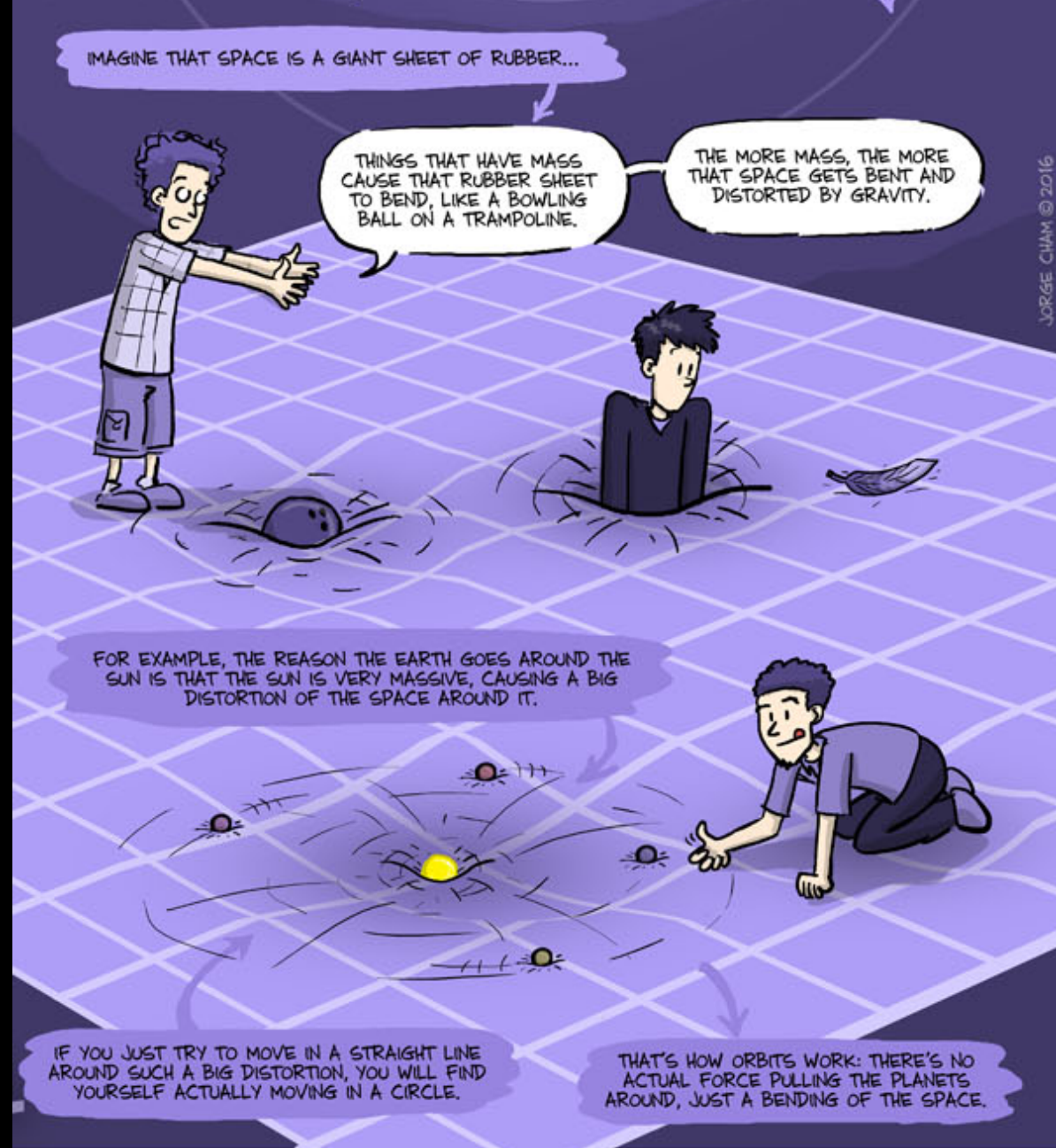
...AND TESTING OUR THEORIES ABOUT HOW THE UNIVERSE WORKS.

JORGE CHAM © 2016

WWW.PHDCOMICS.COM

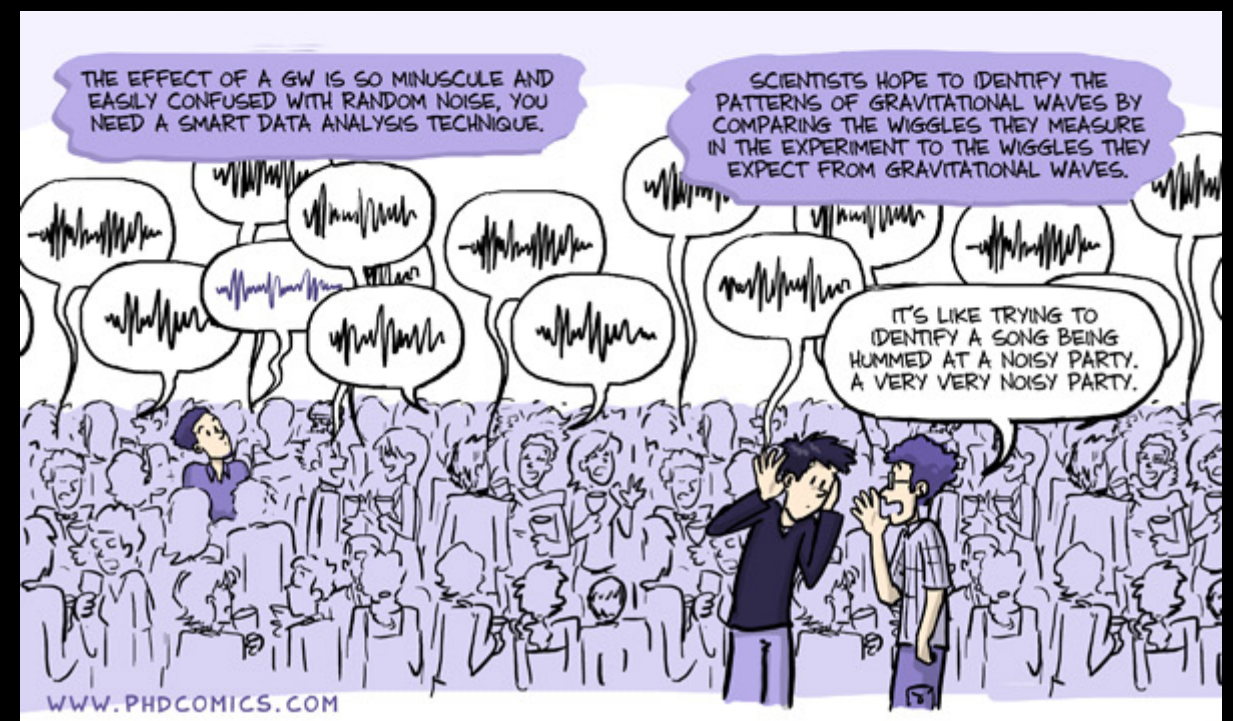
CREATED BY: UMBERTO CANNELLA, DANIEL WHITESON AND JORGE CHAM
SPECIAL THANKS TO AIDAN BROOKS, FLIP TANEDO AND LIGO!

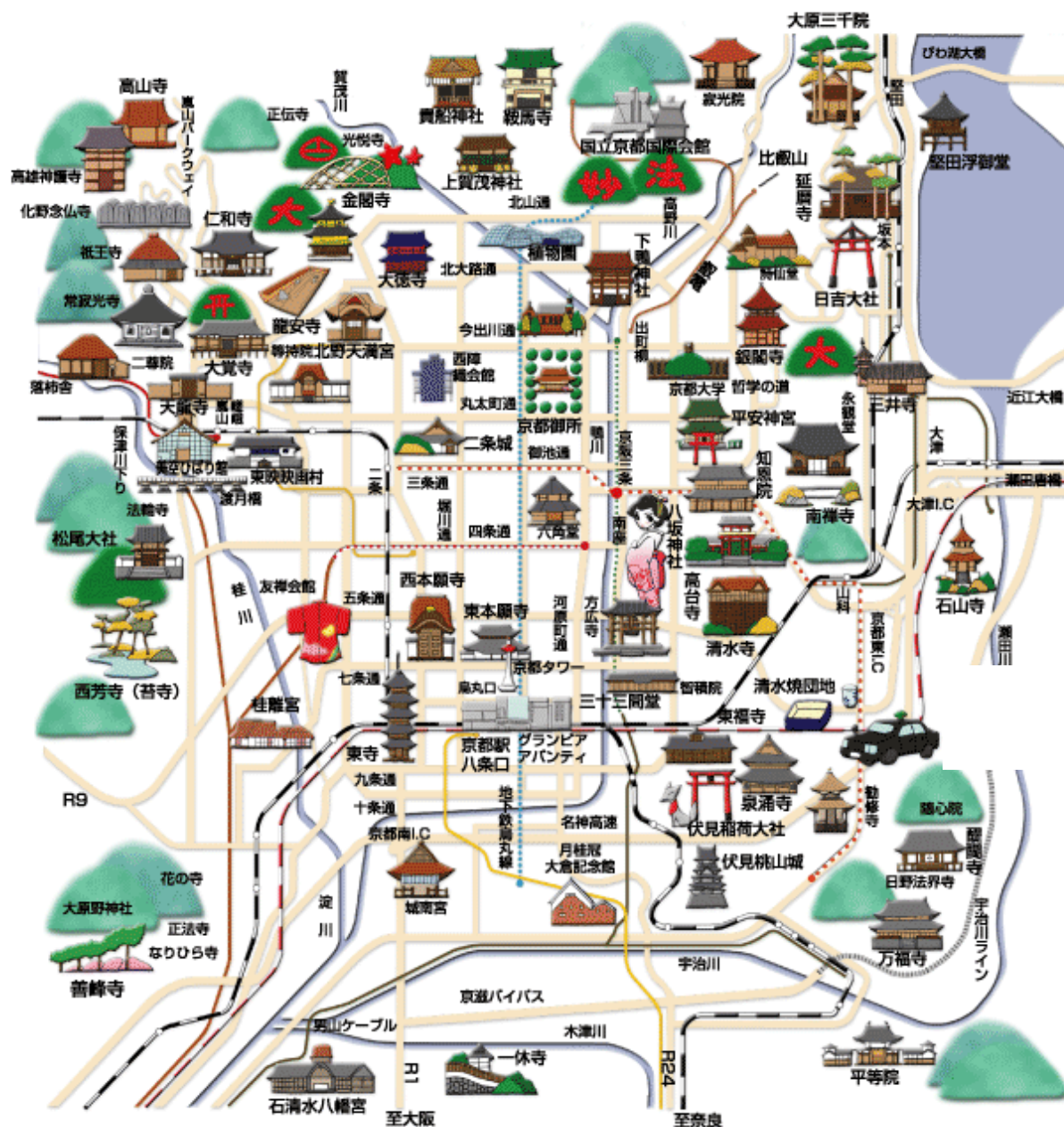




www.phdcomics.com

“gravitational waves explained”





重力波の波源

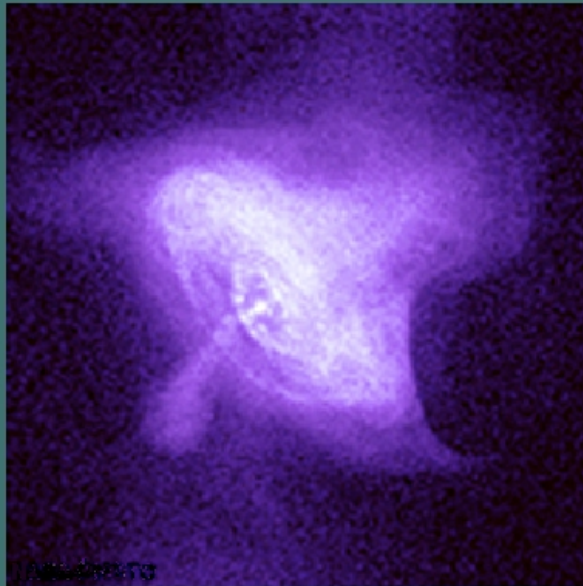
sources of gravitational wave

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

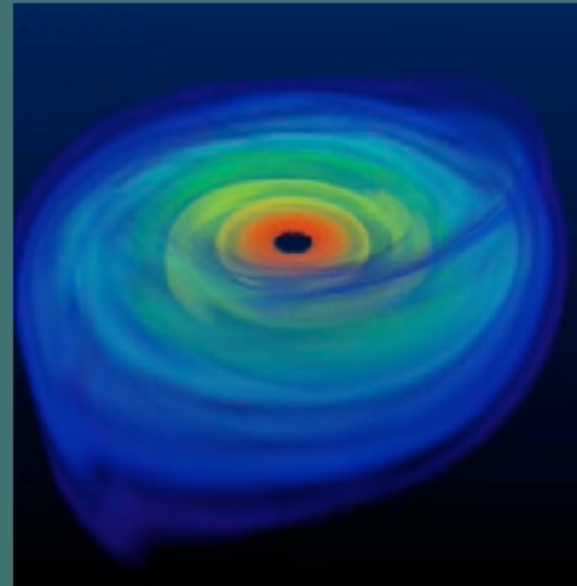
超新星爆発 (写真出典: NASA)



パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



予測が難しい

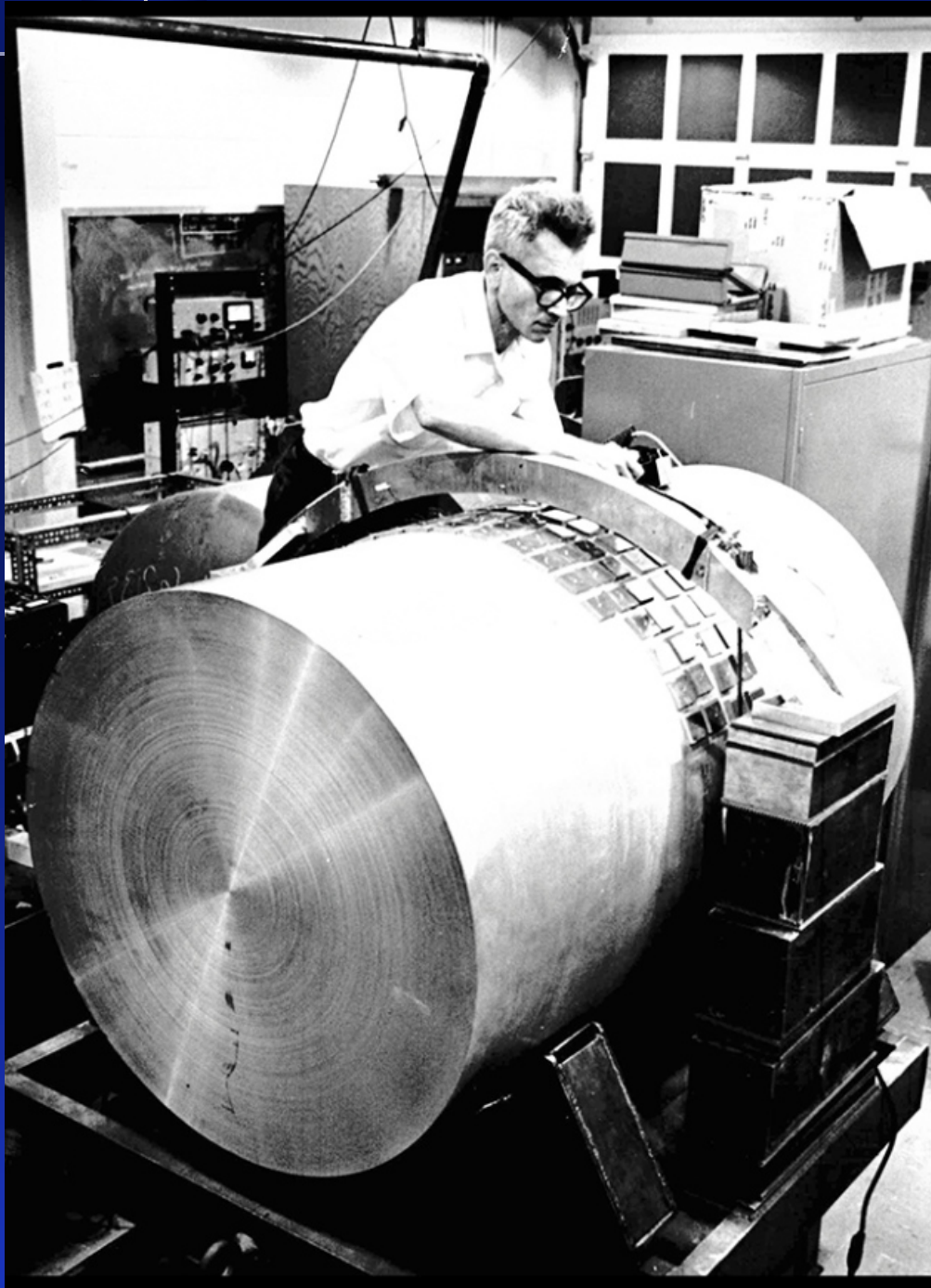
振幅が小さい

振幅が小さい

連星合体を
ターゲットに

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

重力波 幻の発見 (1968/70)



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

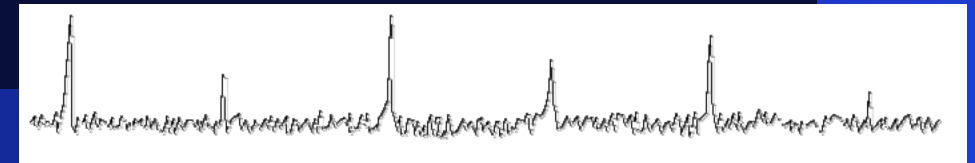
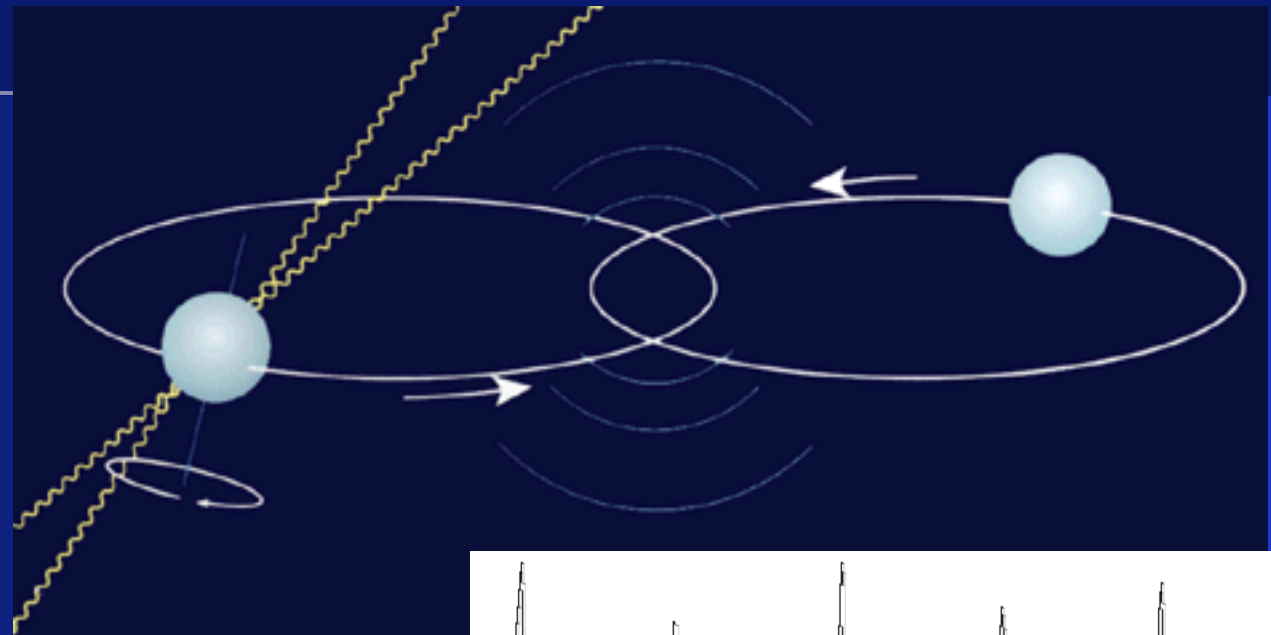
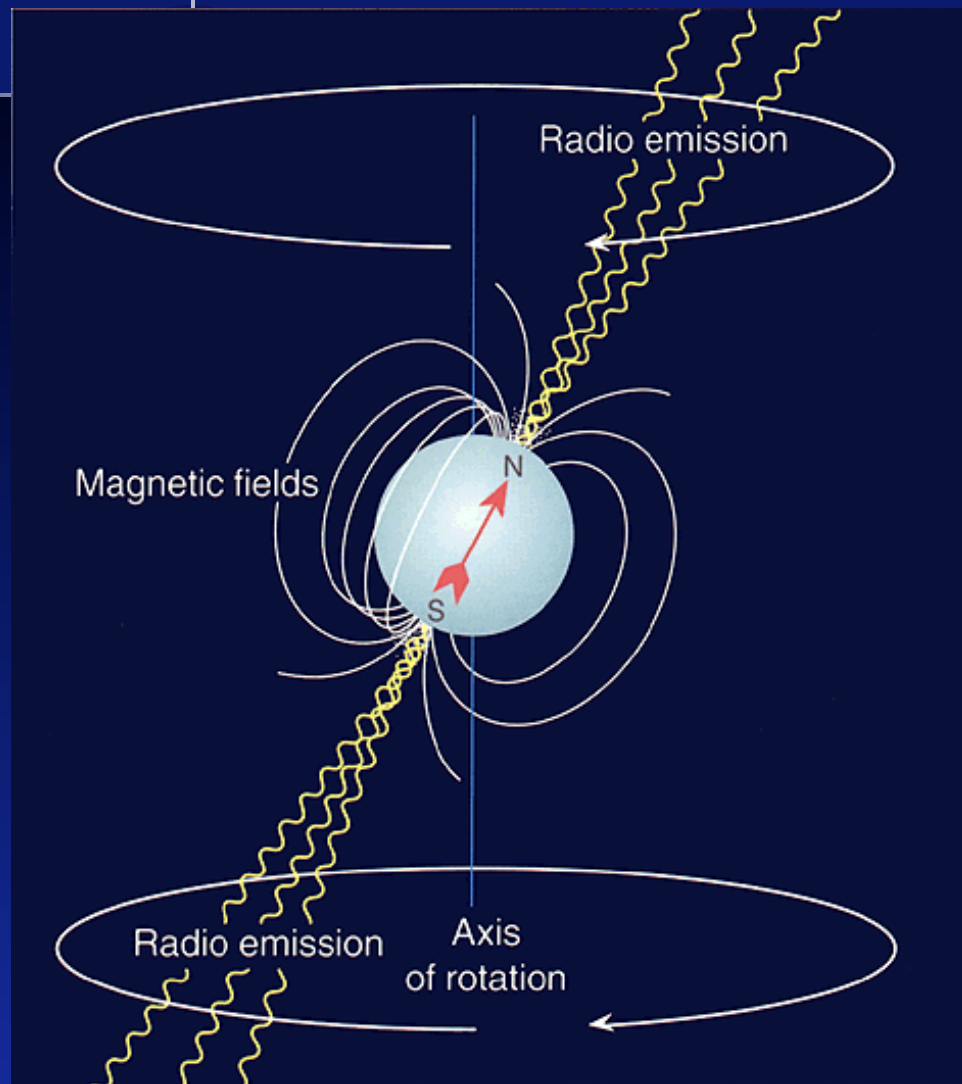
68年に「2台の装置で同時に重力波信号を検出」

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

と発表したが、他のグループで追試されず、

ウェーバー
Joseph Weber

連星中性子星の発見 (1974)

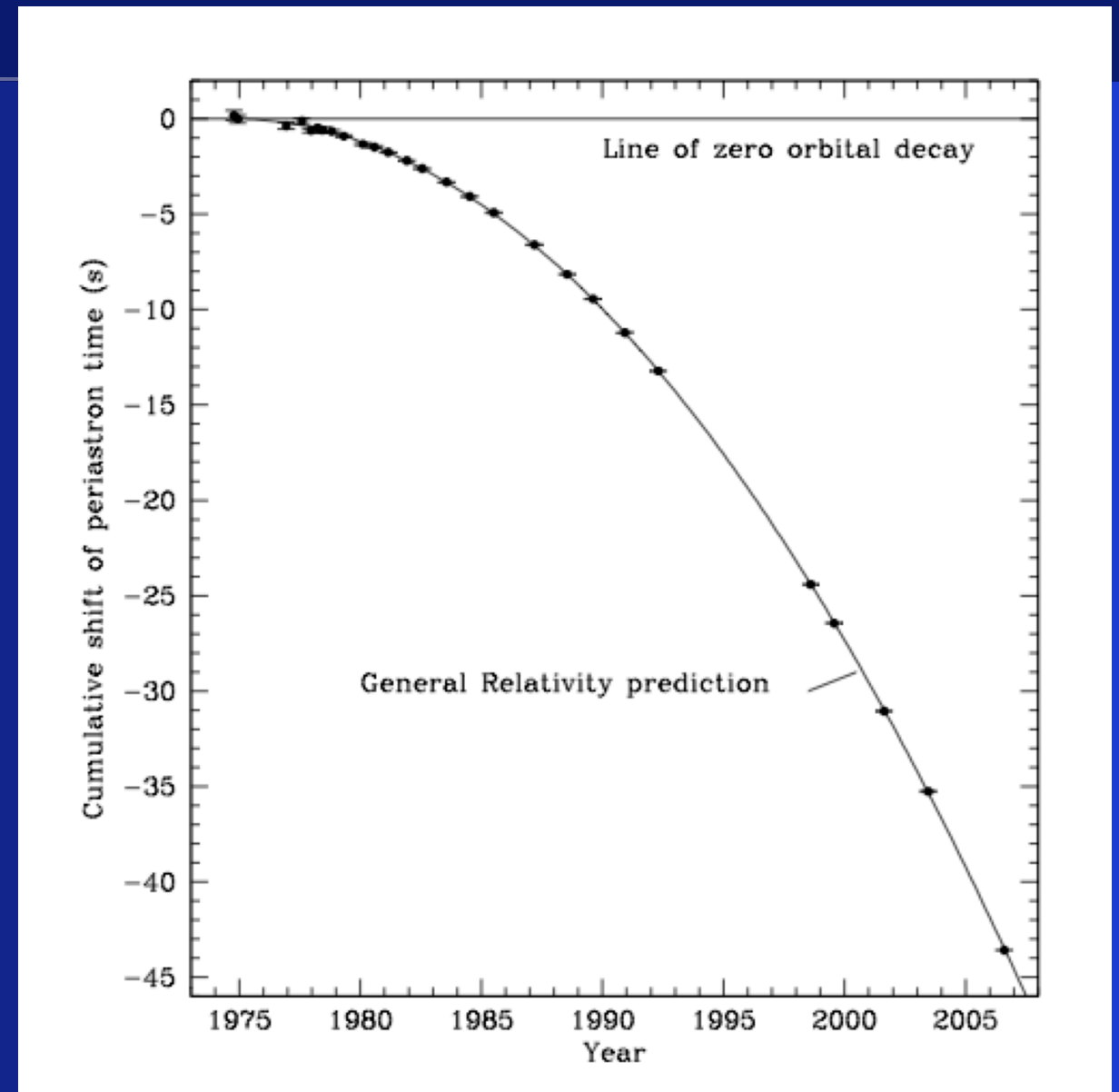
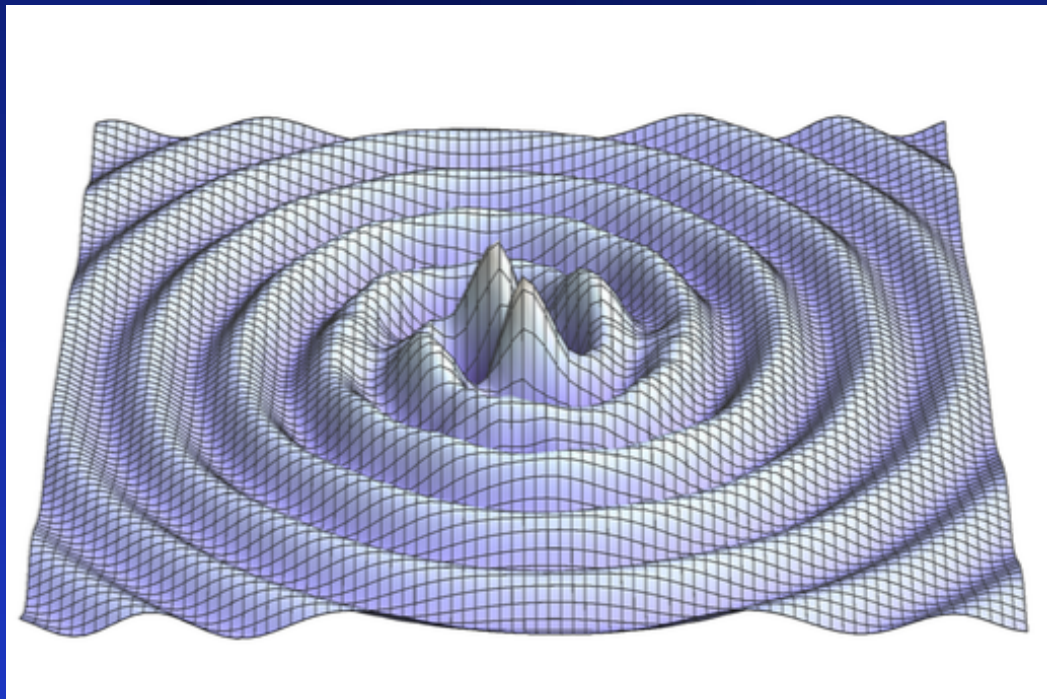
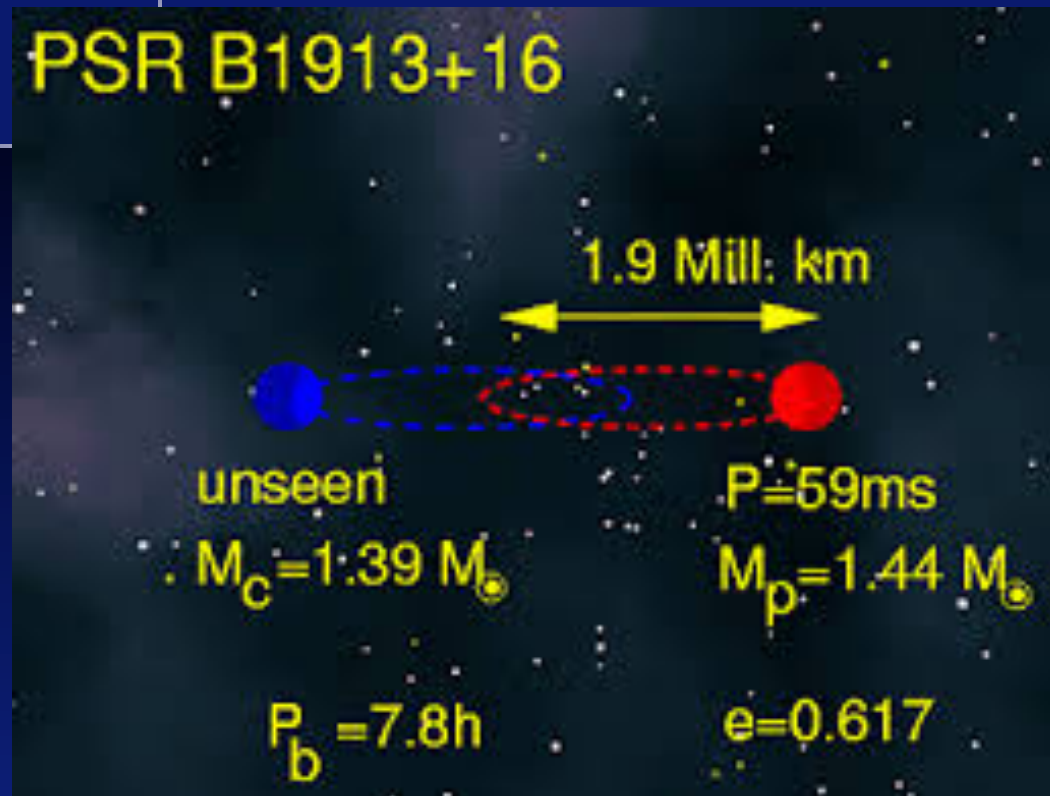


Arecibo, Puerto Rico

パルサー＝中性子星
半径 10km位
質量 1.4x太陽

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

連星中性子星の発見 (1974)



重力波を放出してエネルギーを失うので、星が近づいてゆく。

重力波の存在が間接的に確かめられた。

連星中性子星の発見 (1974)

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

Share this:     25

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2

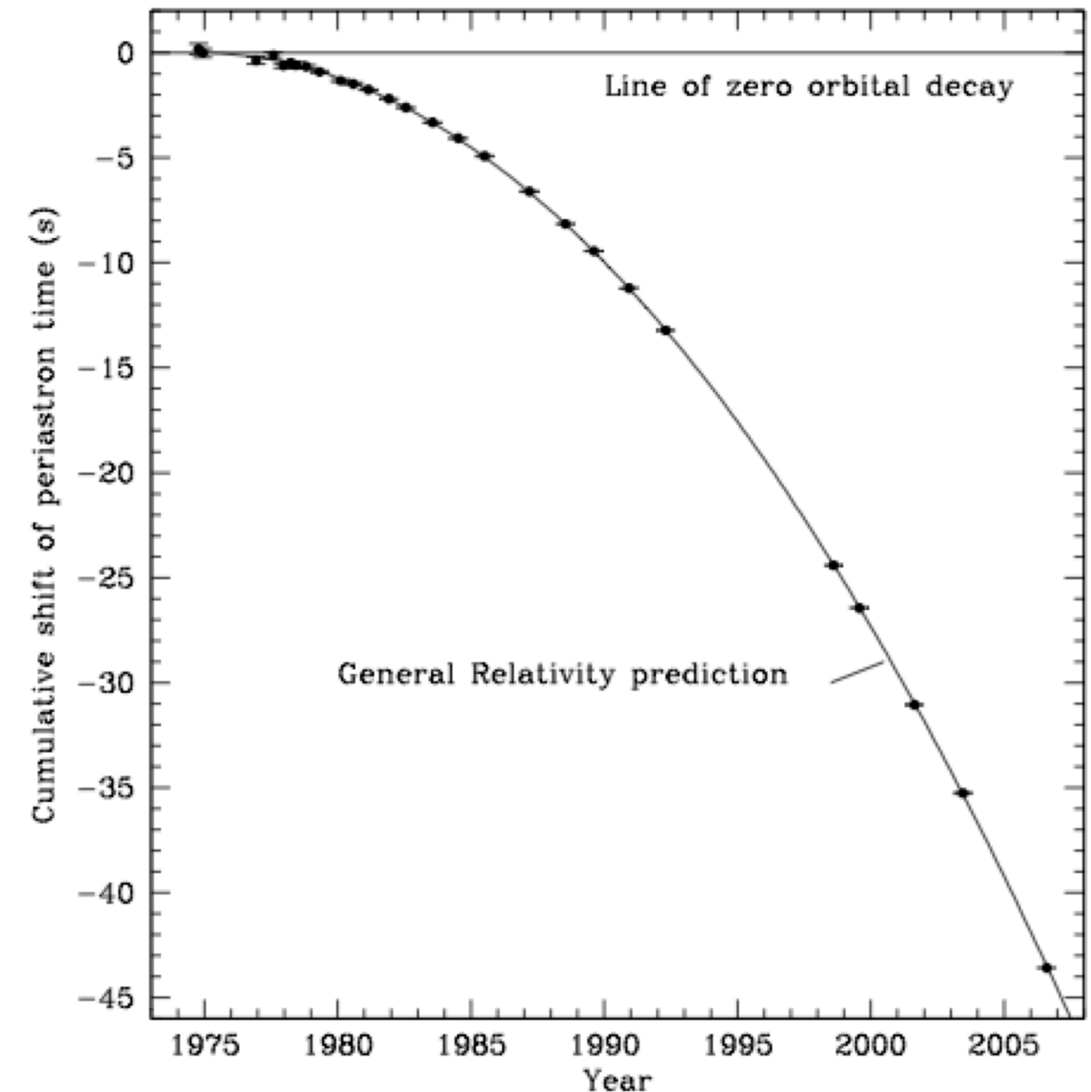


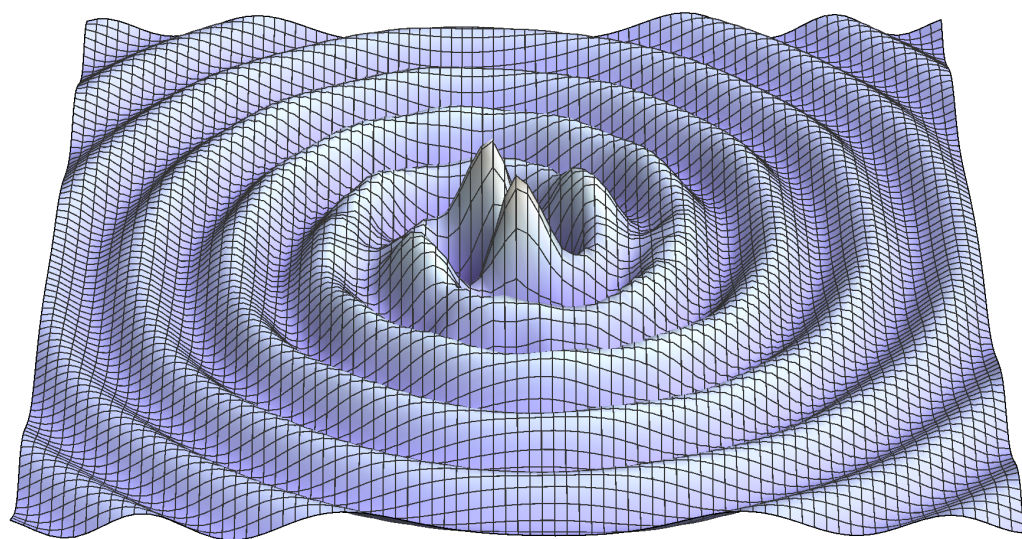
Joseph H. Taylor Jr.
Prize share: 1/2

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

"重力についての新しい研究を開いた、新種のパルサーの発見に対して"

重力波の存在が間接的に確かめられた。





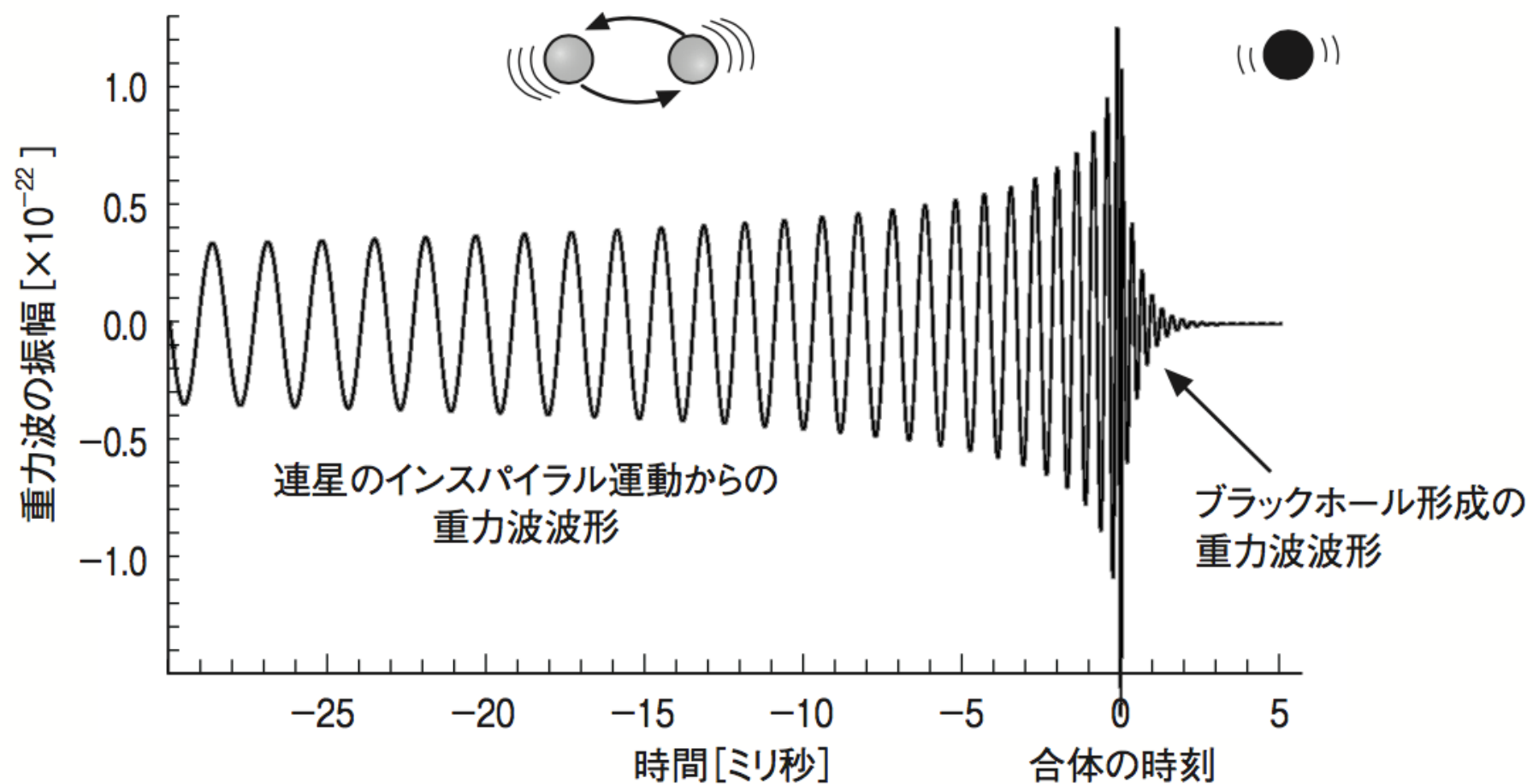
重力波の直接観測をしたい！

連星中性子星
連星ブラックホール

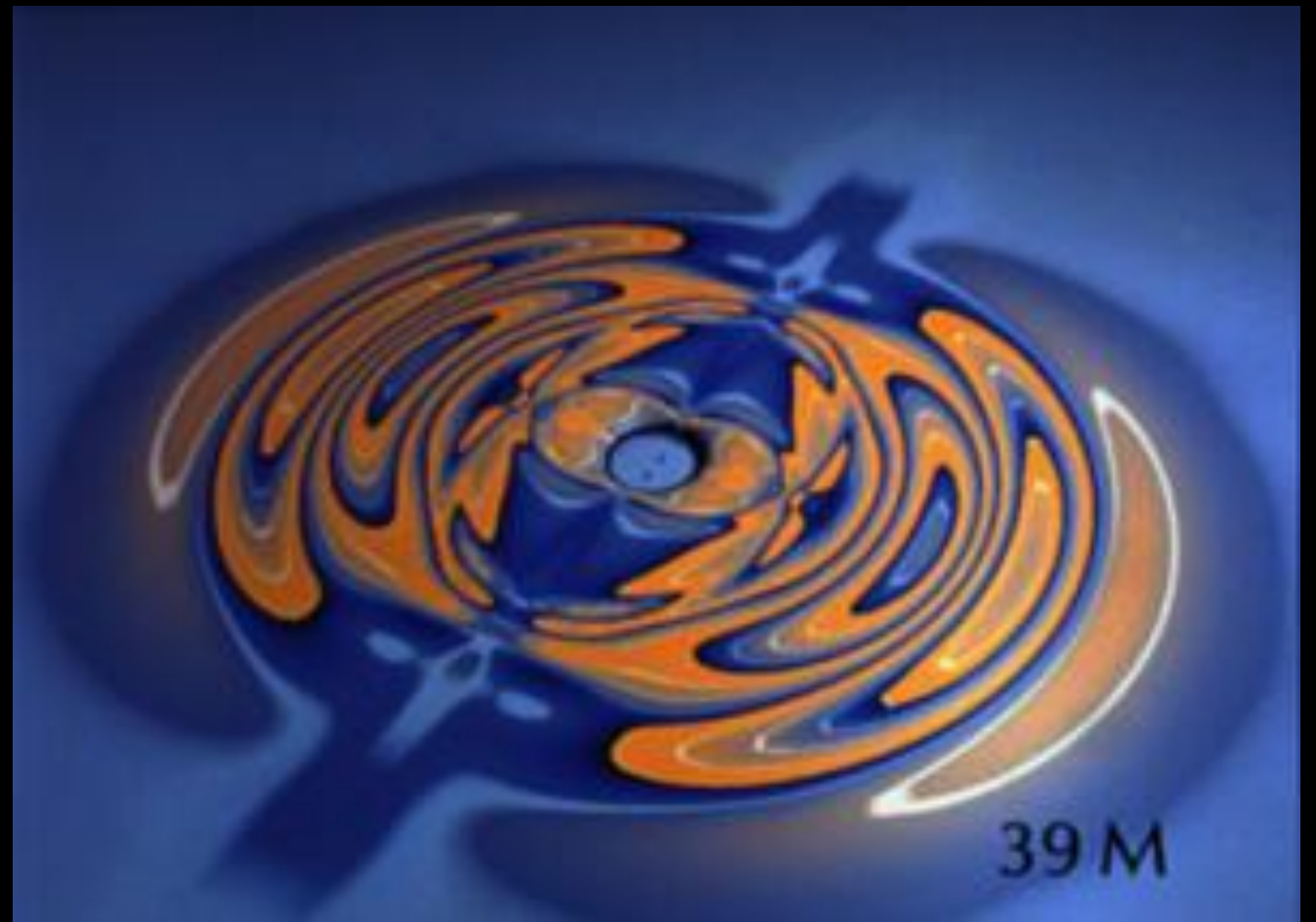
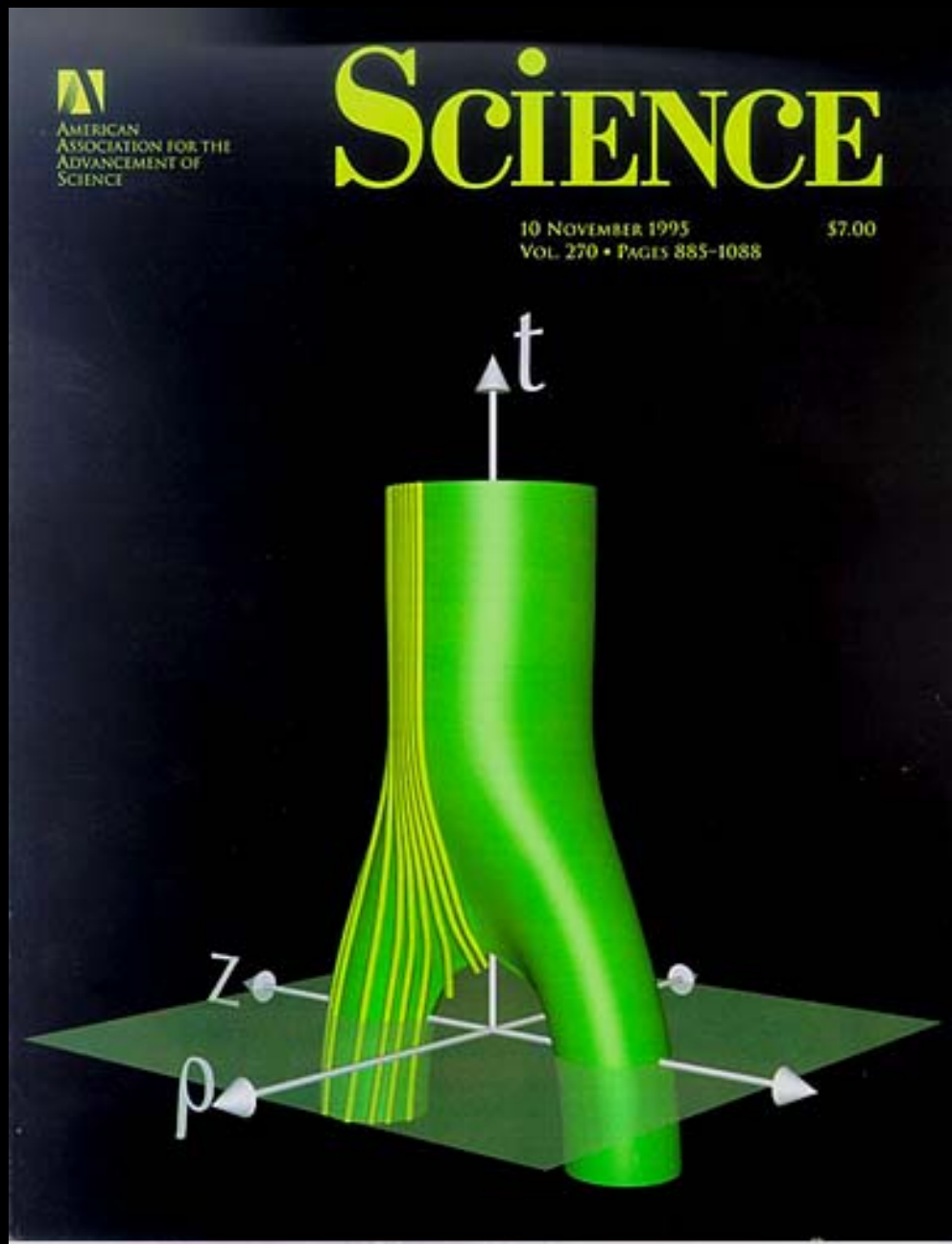
インスパイラル

合体

リングダウン

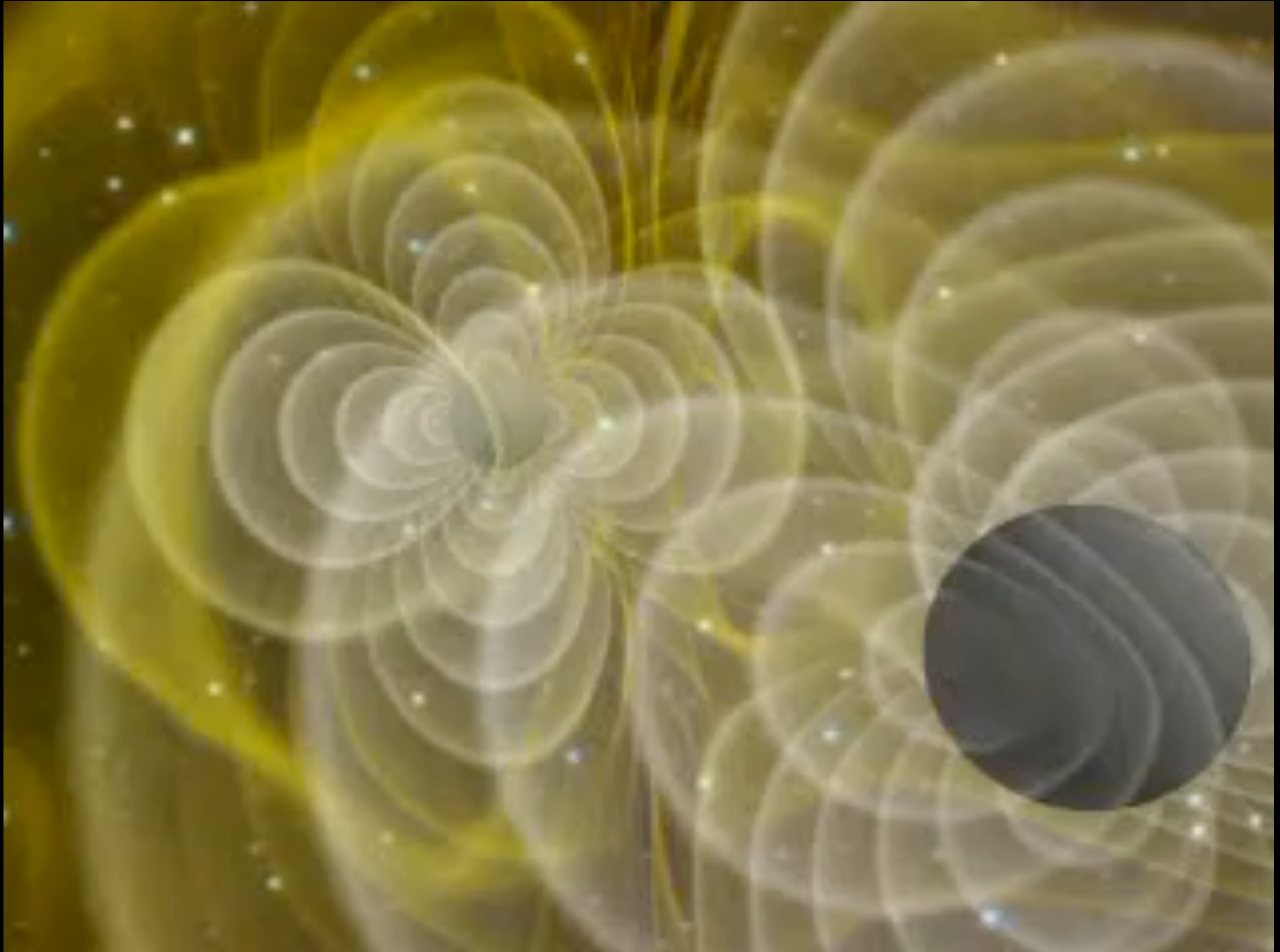


ブラックホールの合体シミュレーション



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)

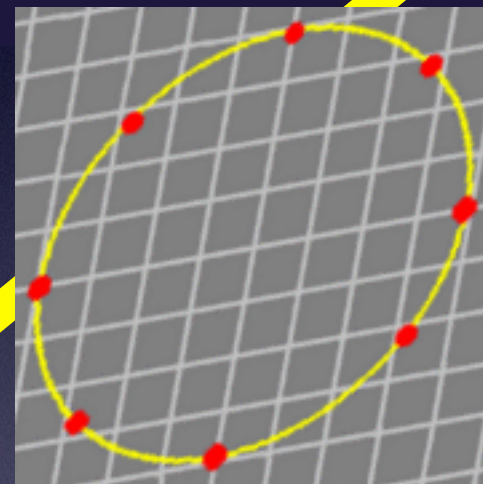
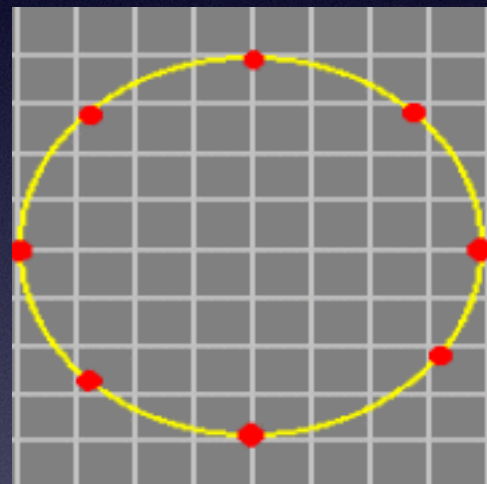
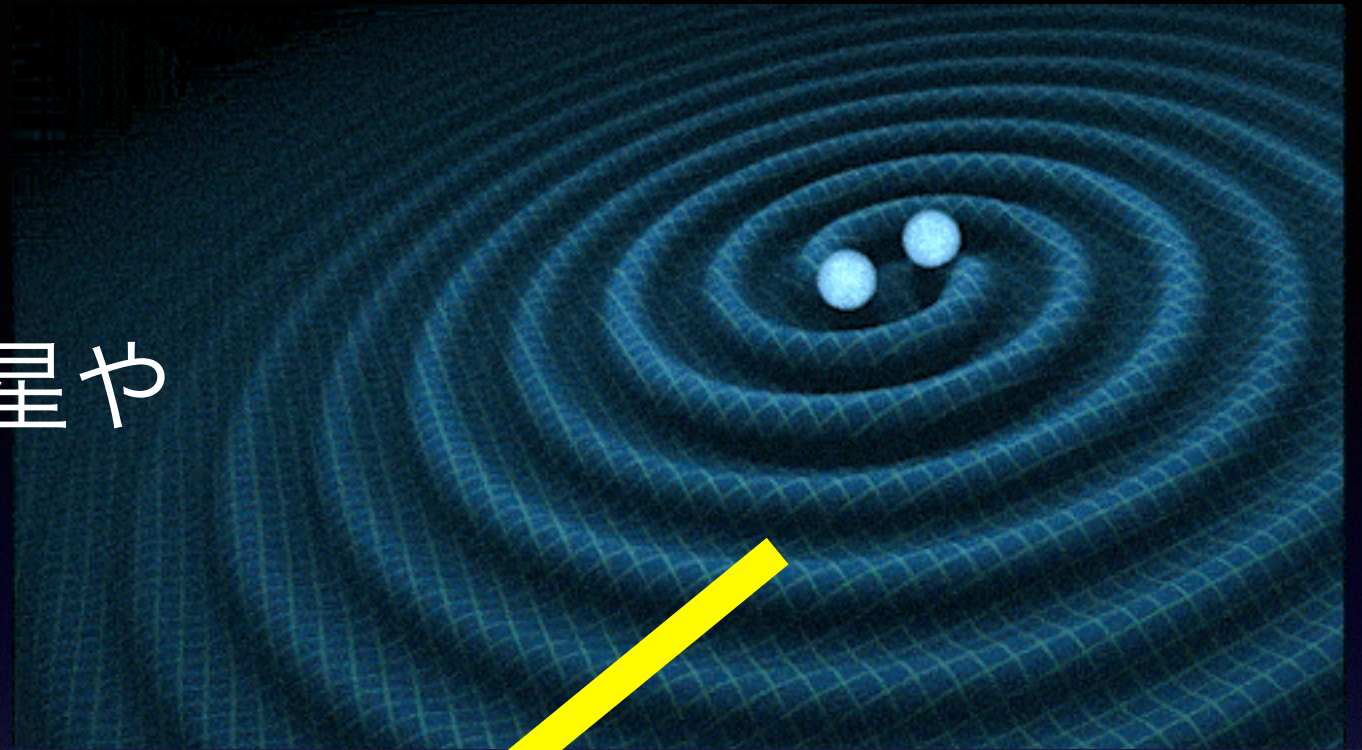
ブラックホールの合体シミュレーション



NCSA-AEI group (1998)

重力波の発生と伝播

ブラックホール連星や
中性子星連星



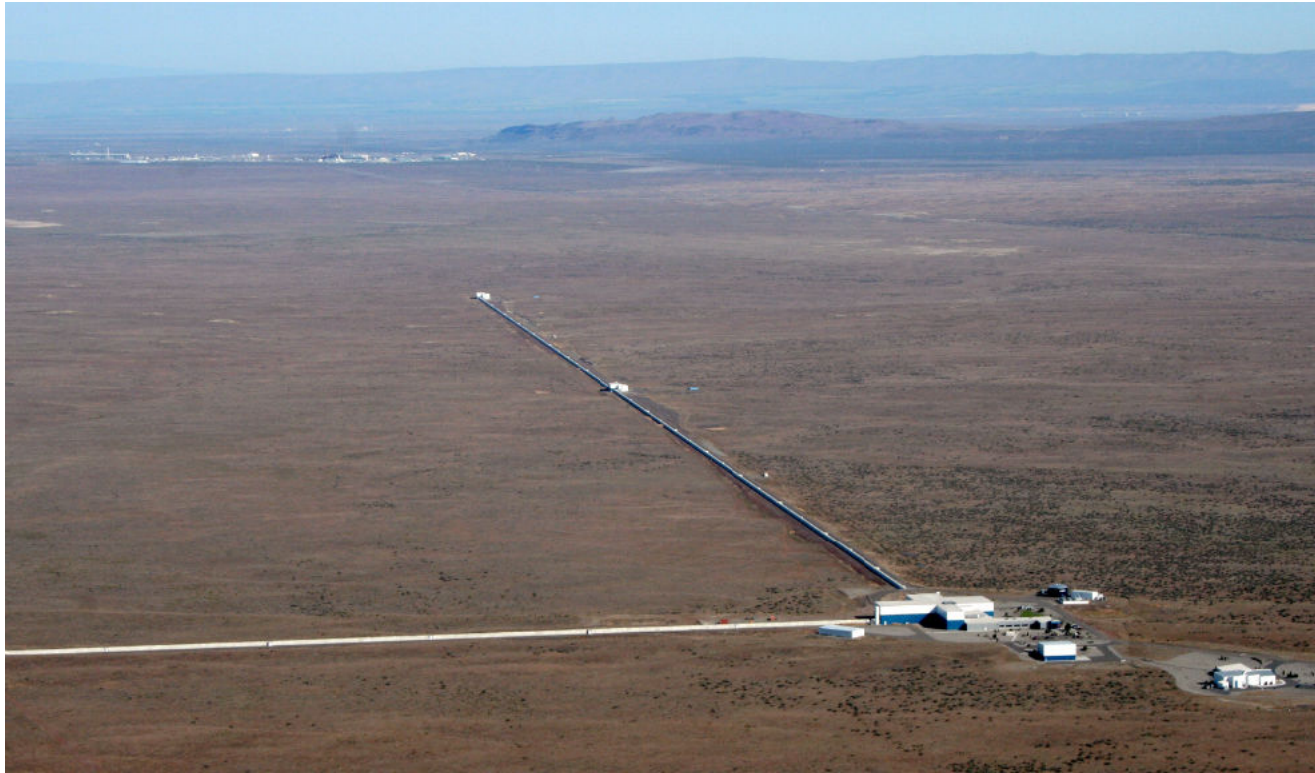
レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

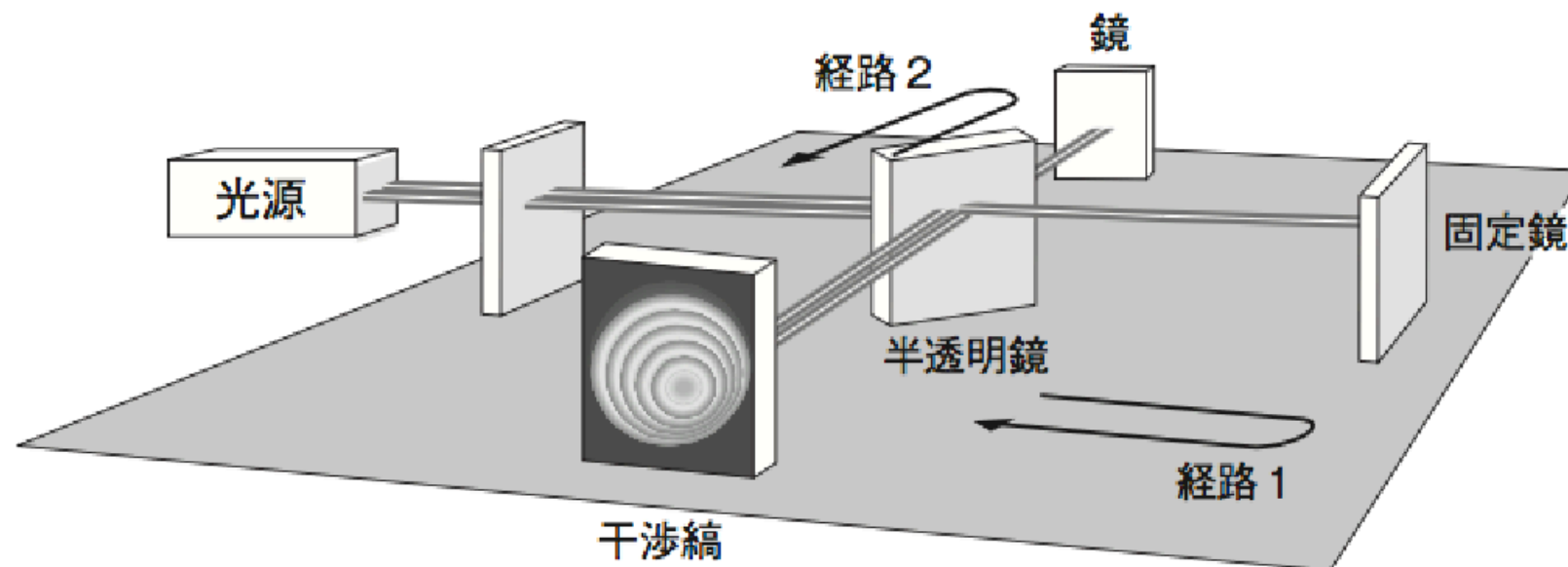
Gravitational-Wave Observatory

LIGO (ライゴ: レーザー干渉計重力波天文台)

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

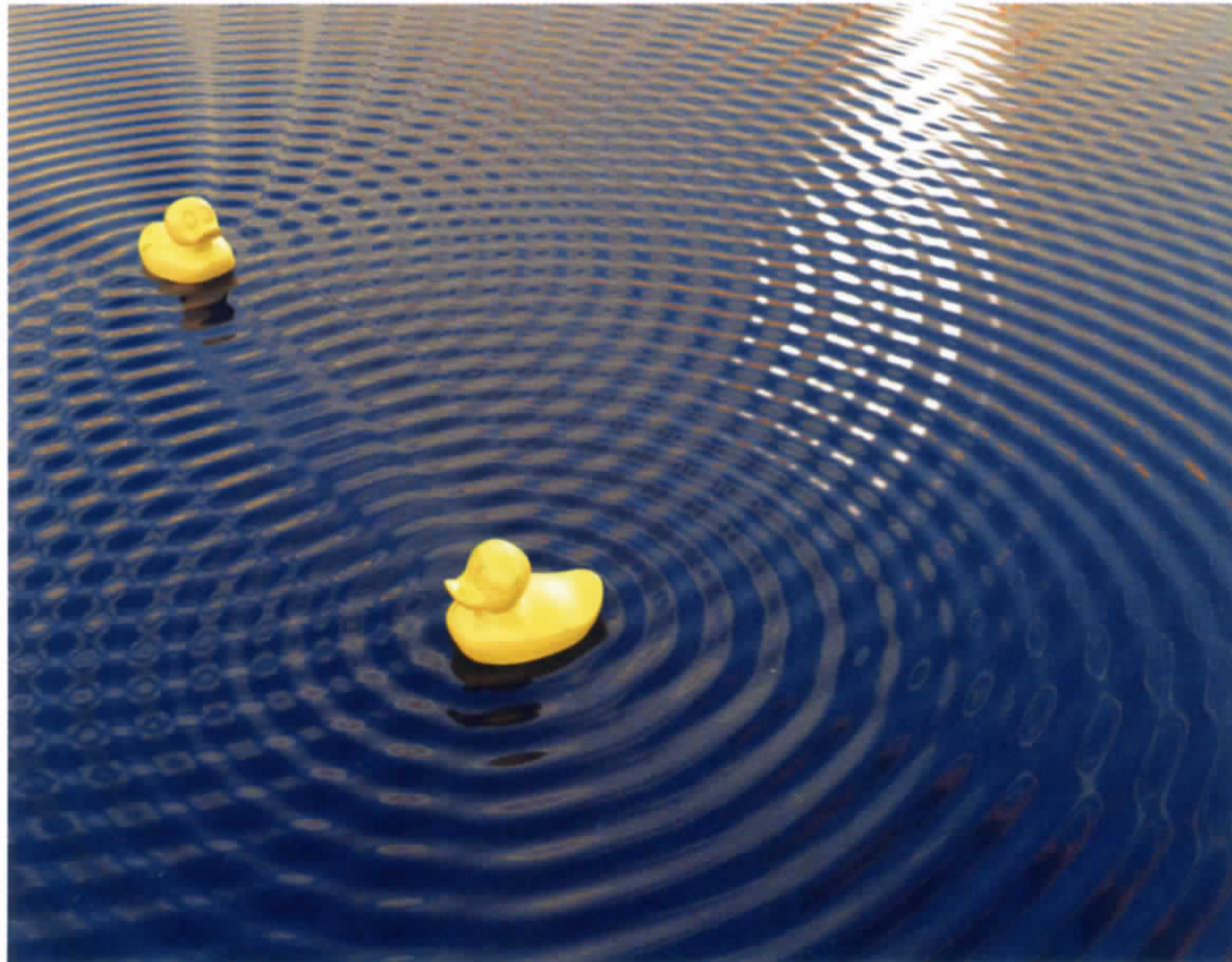


<https://mediaassets.caltech.edu/gwave>



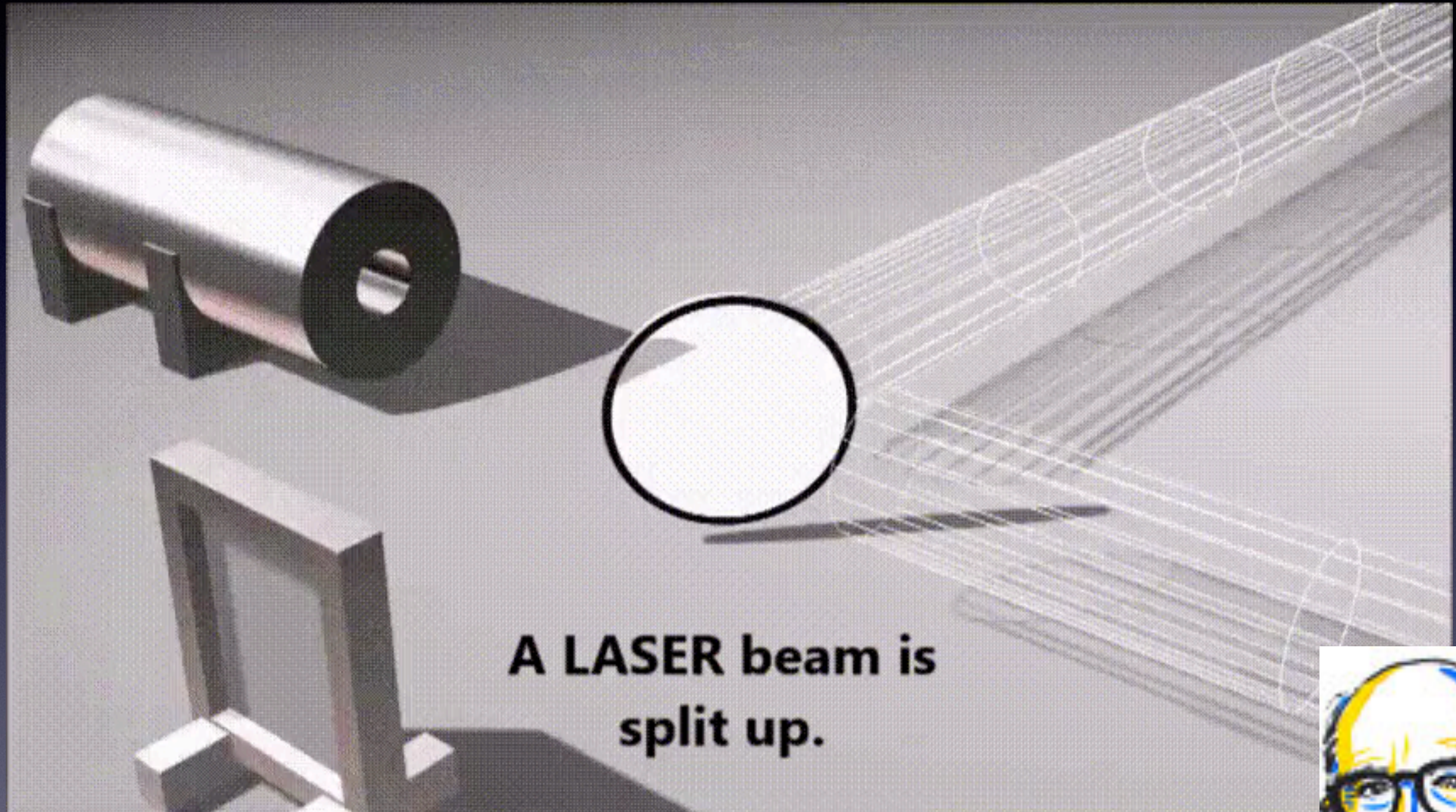
干渉計のしくみを理解しよう

波の干渉（かんしょう）



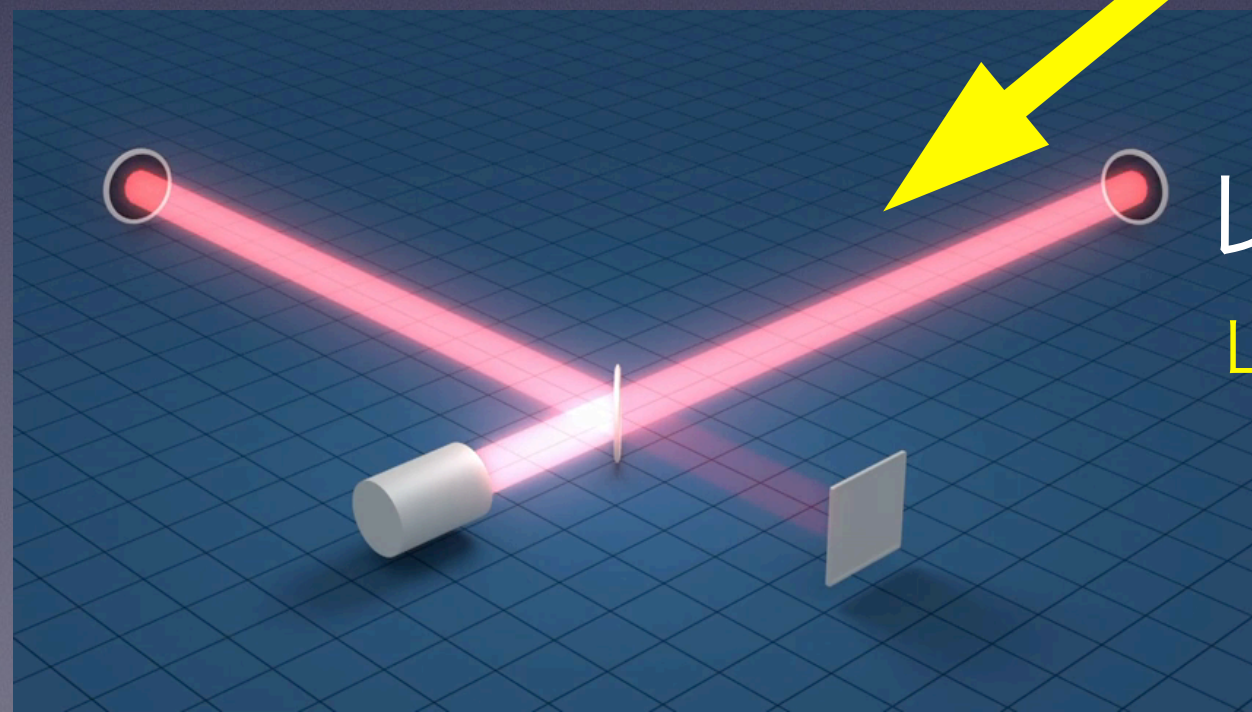
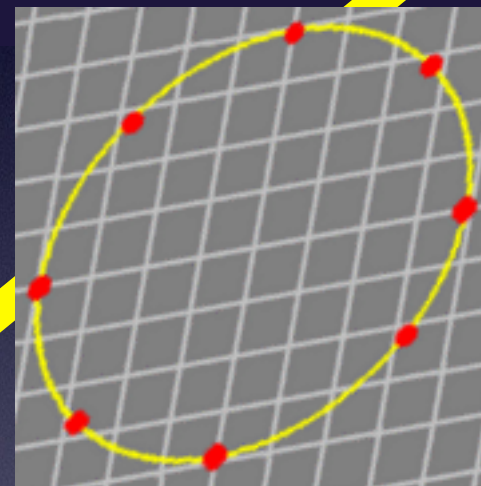
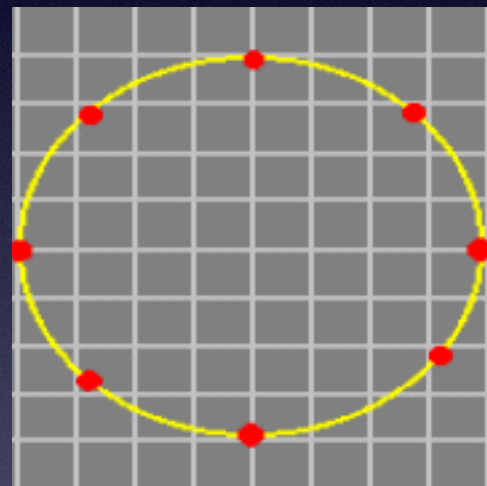
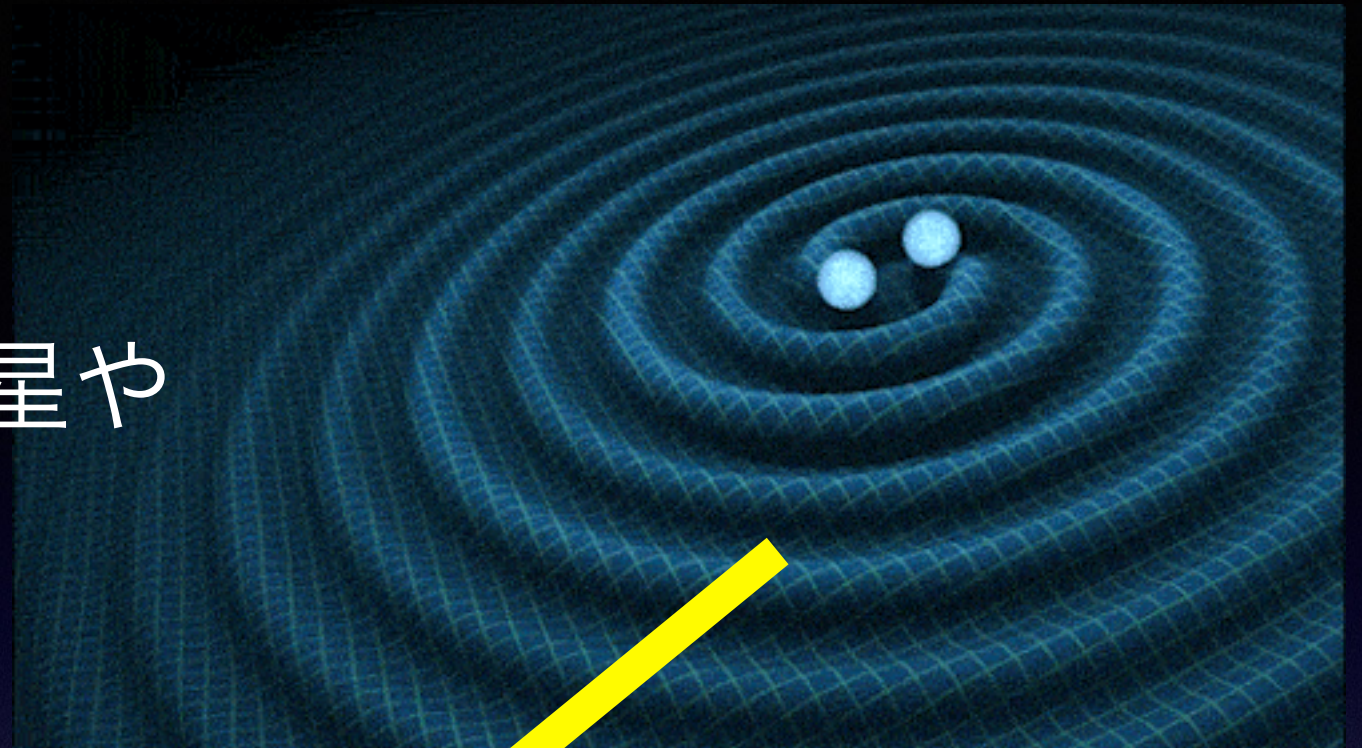
Puddle Interference The concept of interference shows up in everyday life in bodies of water, from puddles to oceans.

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

ブラックホール連星や
中性子星連星



レーザー干渉計

LIGO=Laser Interferometer

Gravitational-Wave Observatory

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>

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

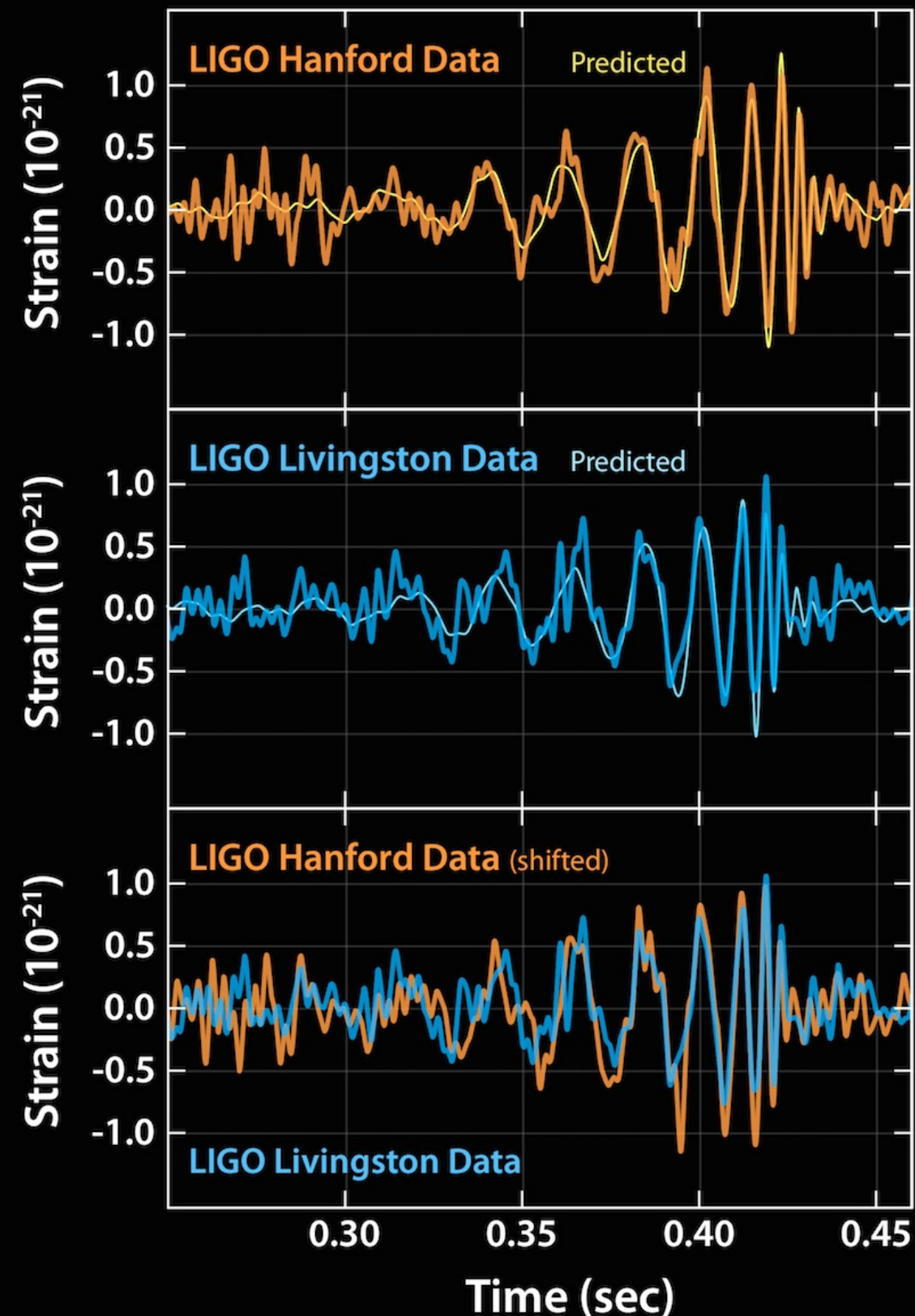


2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

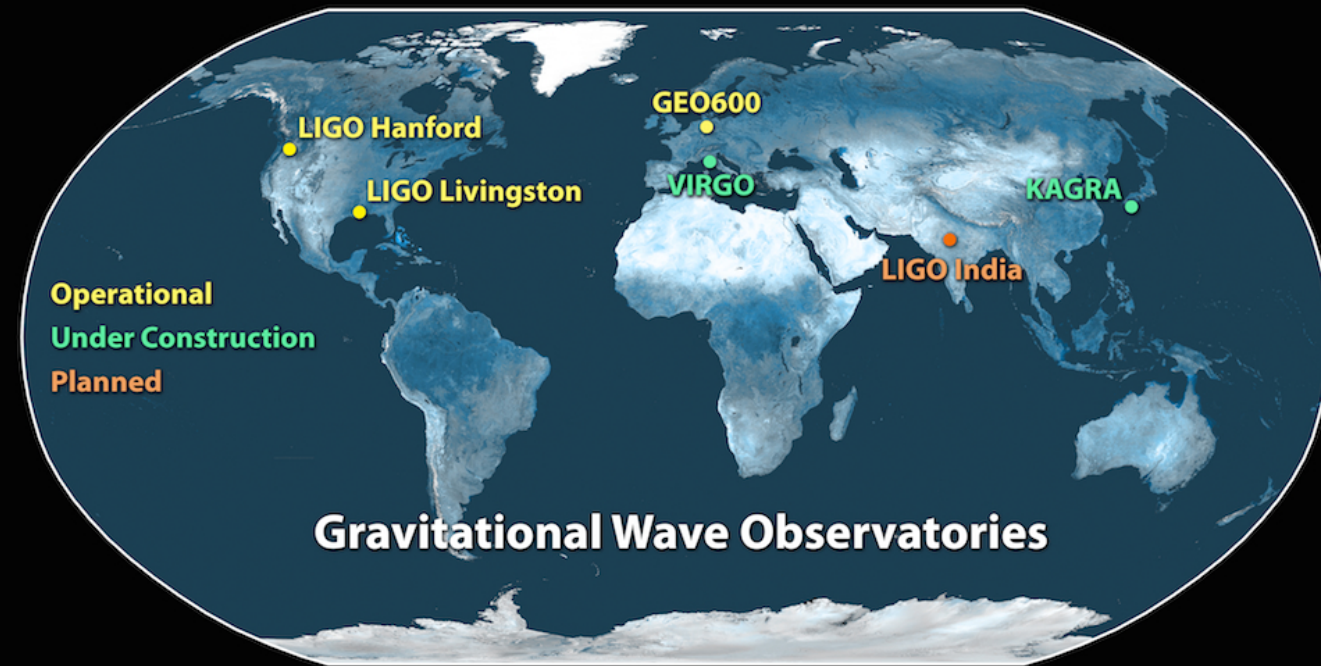
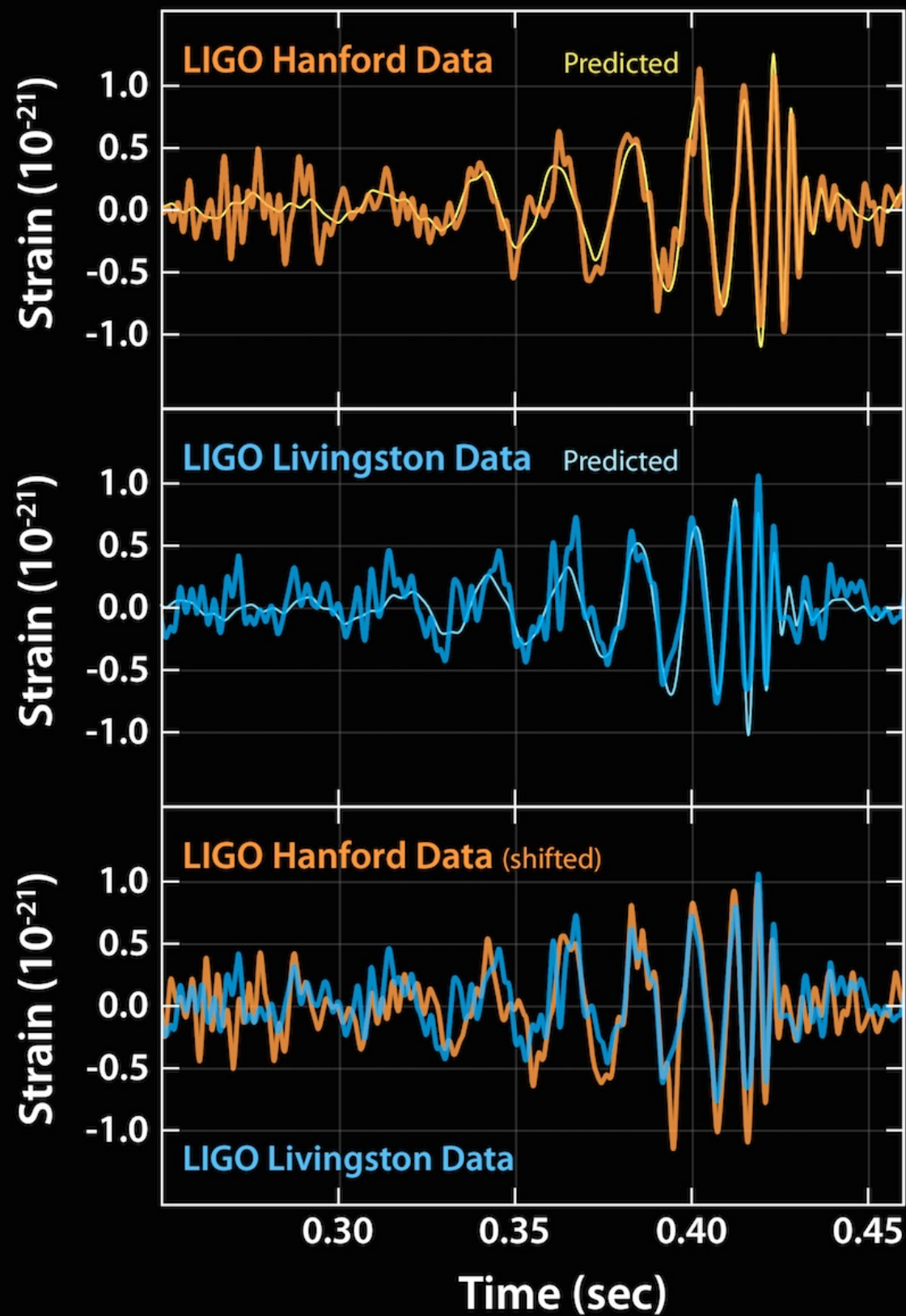
2015年9月14日



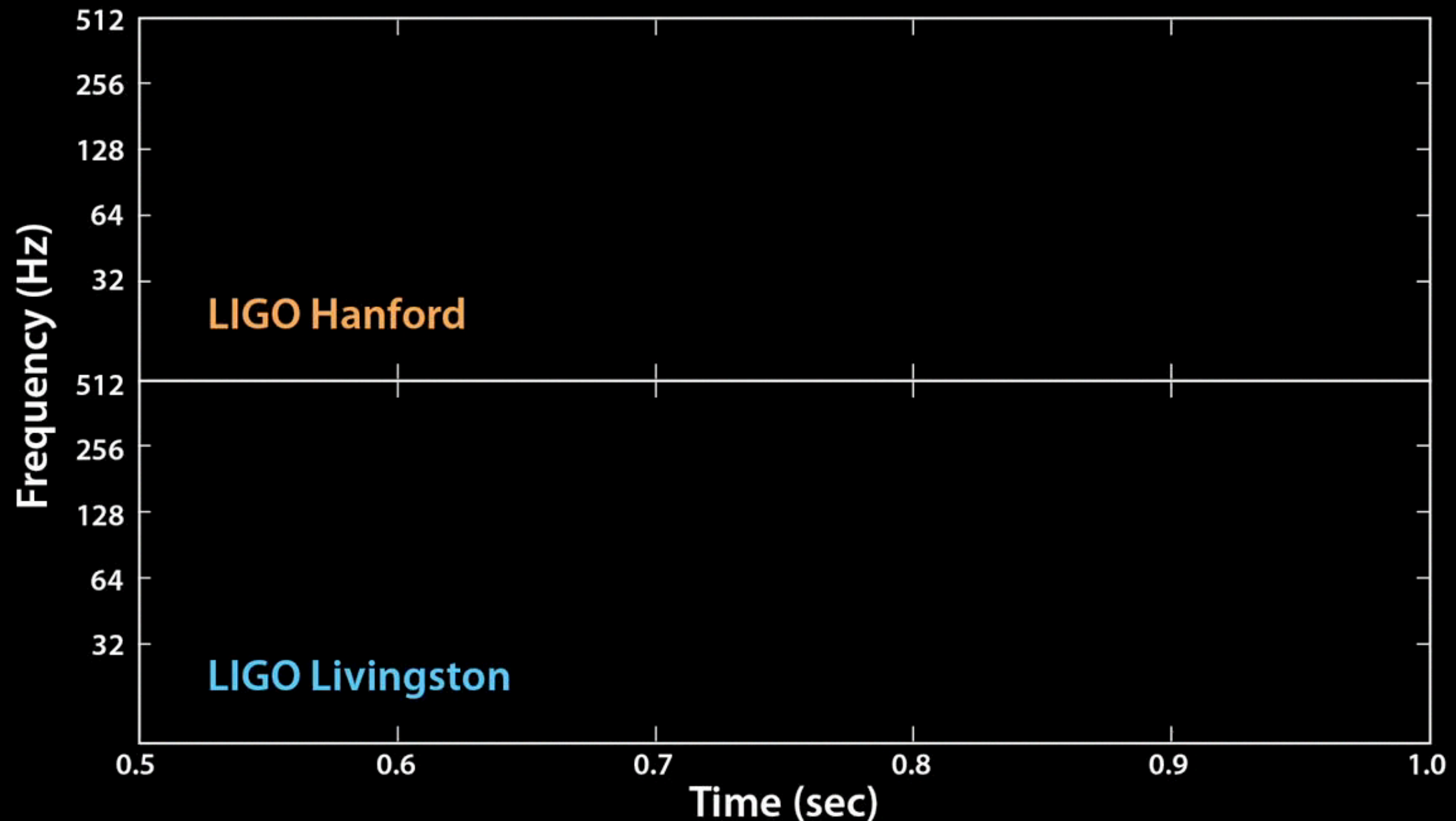
ブラックホール連星の合体
によって生じた重力波だった



2015年9月14日



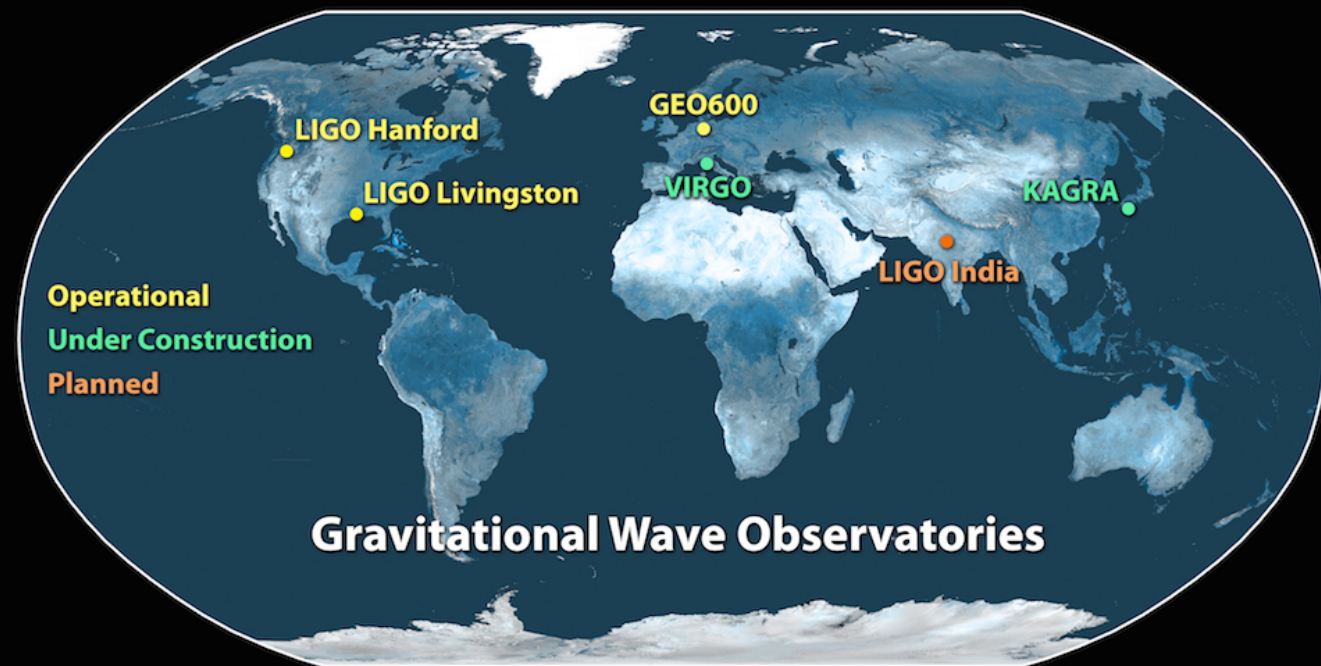
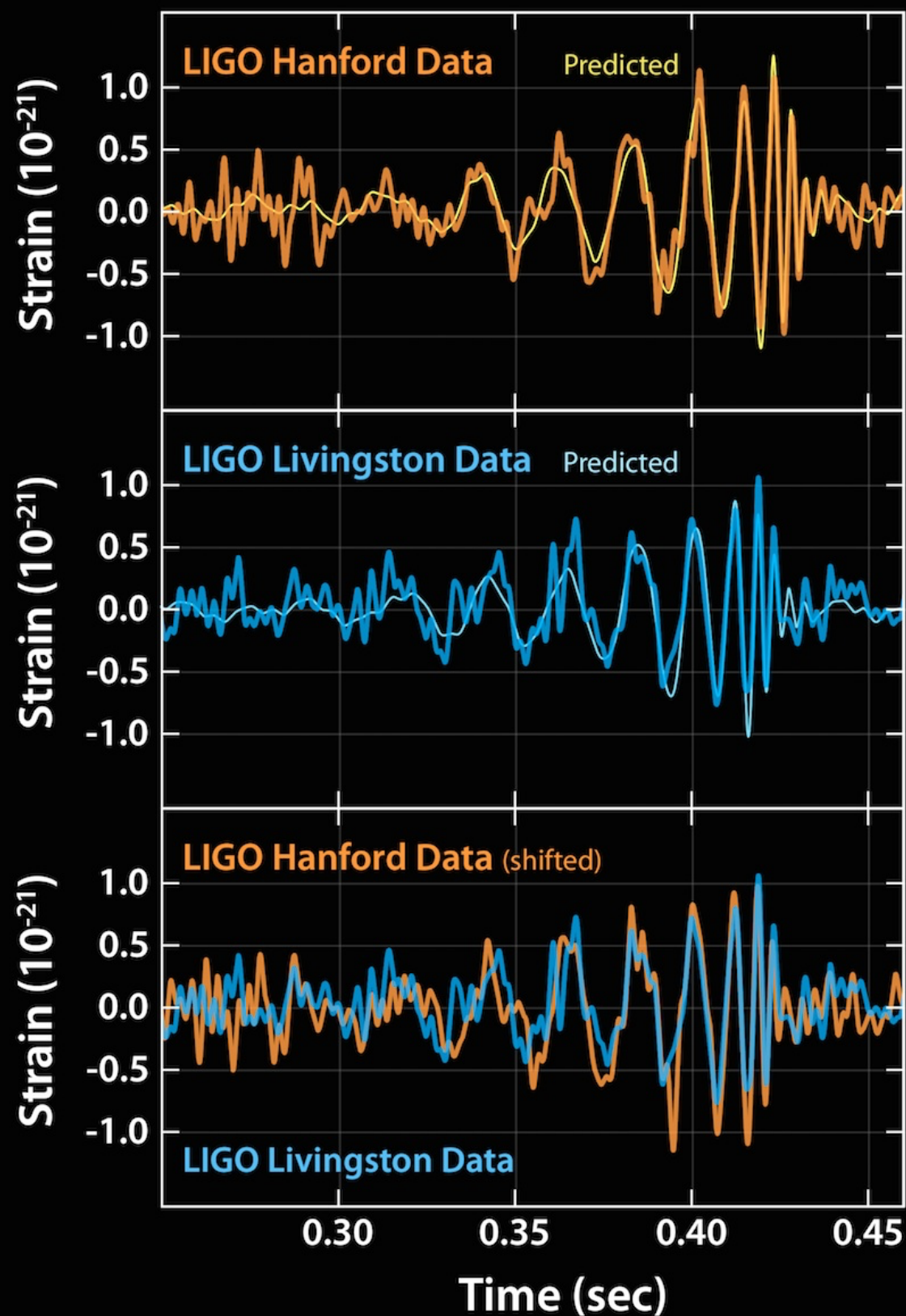
重力波波形を音にすると. . .



はじめ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

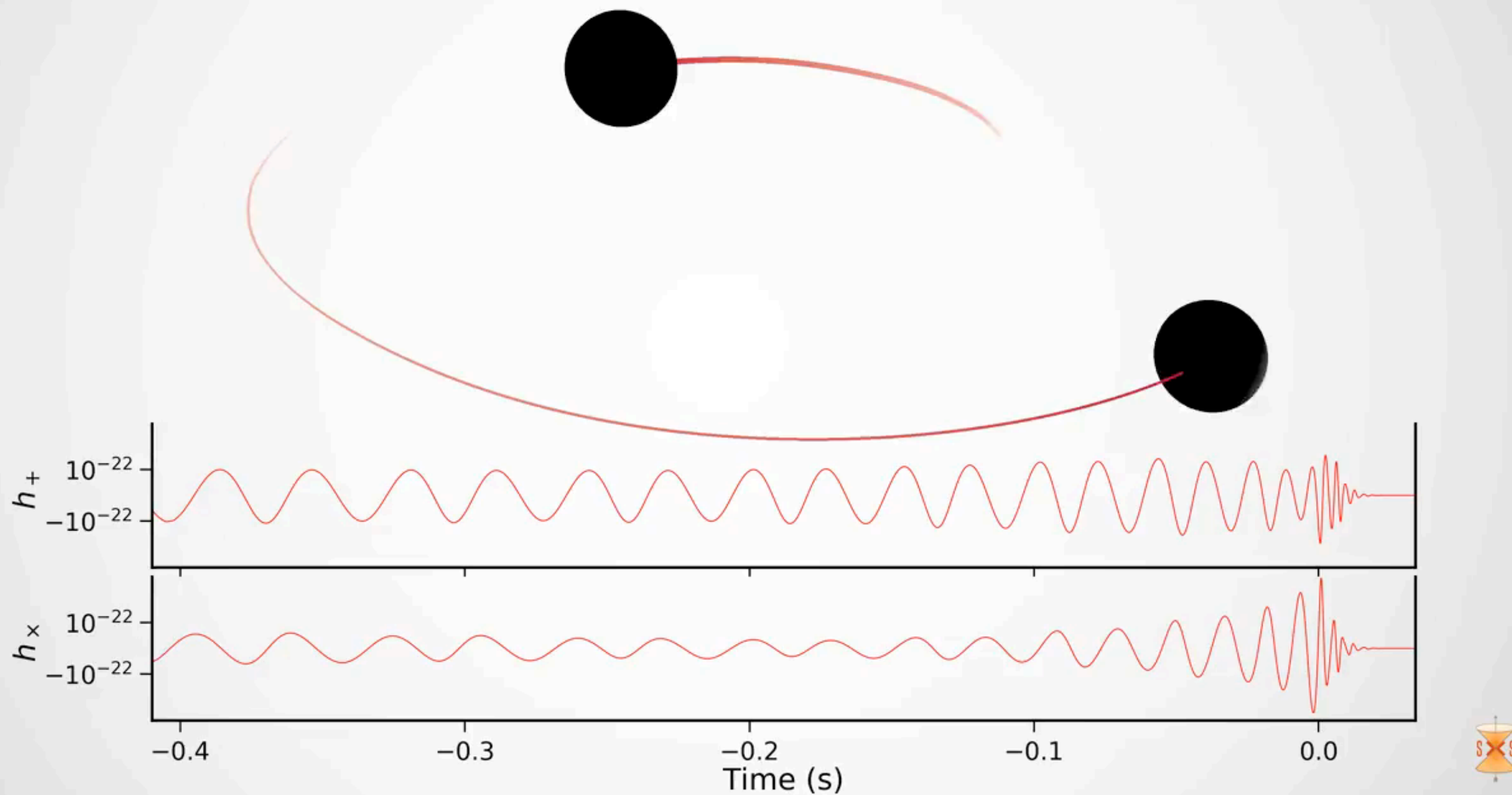


太陽の36倍と29倍のブラックホールが合体して、
太陽の62倍のブラックホールになった。

3倍の質量が消失

$$E = mc^2$$

13億光年先



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>

2016年2月, LIGOが重力波を初めて検出した, と発表した

2016年(平成28年)2月12日(金曜日) 12版 総合 2

宇宙の謎解き 国際競争

「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、二月一二日深夜(米国時間一日)、アメリカのLIGO(ライゴ、注1)のグループは、ブラックホールが衝突・合体して発生した重力波を捉えることに成功した、と発表した。重力波は、一般相対性理論が予言する物理現象だが、一世紀を経て、ようやく直接観測されたことになる。

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

重力波はアインシュタインが残した百年来の宿題だ。その答えはブラックホールの謎解きにもつながる。日欧米では高精度の大型装置(重力波望遠鏡)をつくらせて検出を狙ってきた。(永井理)

実験チームの二つの望遠鏡

ナダ

州

ワシントン

イリノイ州

500m

LIGO提供

「研究者勇気づけた」 大阪市大院・神田教授 学生らに解説

重力波 初の直接観測

米国を中心とした国際研究チームが「重力波」を初めて直接観測したとの発表を受け、重力波の研究が専門の神田展行・大阪市立大学大学院教授(51)は12日、発表内容についての説明会を大阪市住吉区の同大杉本キャンパスで開いた。成果を詳しく理解してもらう狙い。学生ら約100人が参加し、真剣な表情で聴き入った。

【畠山哲郎】

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

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

同大大学院理学研究科2年の和知慎吾さん(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、嬉しかった」と話していた。

重力波は、質量を持った物体が動いた時に周囲の時空にゆがみが生じ、そのゆがみが光速でさ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。

三行で！

1. 一般相対性理論が予言する重力波
2. ブラックホールが合体した瞬間
3. 重力波の検出

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

大阪工大「予想通りで驚いた」
真貝教授

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。

【畠山哲郎】

毎日新聞 2016/2/13

「窮理」 2016/8

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

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

② 第二次世界大戦以後、科学技術という営みの存在は膨張を続ける。ブライスによれば、科学技術という営みは十七世紀以来、十五年で^(ア)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ってきた。

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

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

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

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

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

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

ウ(イ)ンが絡んで生じていることを明らかにしたのである。

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

7 ウェーバー——ジョセフ・ウェーバー(一九一九～二〇〇〇)。物理学者。

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

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

(ウ)

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

(エ)

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

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、13億光年のかなたで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 Δt [s] の間の変化を ΔX 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

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

に書いてもよい。
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、
$$m_1 \Delta \vec{v}_1 = \vec{F} \Delta t \tag{1}$$

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。

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

式①、②より、
$$m_1 \Delta \vec{v}_1 + m_2 \Delta \vec{v}_2 = \Delta(m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2) = 0 \tag{3}$$

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/s²] 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

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

が得られる。式④は、

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

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 μ [kg] の質点（以下、質点 μ 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 μ が星1を中心とする半径 ℓ [m] の円周上を、角速度 ω 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・m²/kg²] 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 μ の円運動について、中心方向の運動方程式を書き、角速度 ω [rad/s] を求めよ。ただし、 μ 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 ℓ 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 μ の力学的エネルギー E [J] を求め、 ℓ 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 ℓ 、角速度 ω および質点 μ 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 μ 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 ω [rad/s] で、それぞれ半径 ℓ_1, ℓ_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、
$$\ell_1 = \frac{m_2}{m_1 + m_2} \ell, \quad \ell_2 = \frac{m_1}{m_1 + m_2} \ell$$
 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。

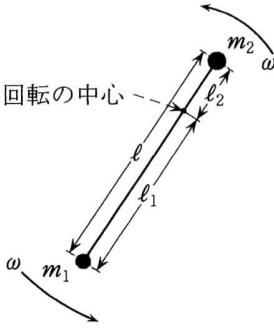


図1 互いの周りを回転する星1と星2

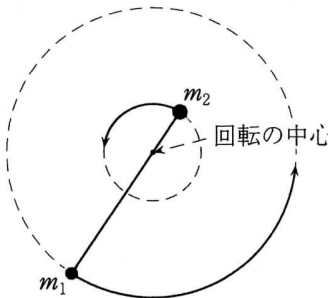


図2 力学的エネルギーが保存するときの軌道

sport

2016/4/21

Cameron McEvoy wears his passion on his swimming cap

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



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

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

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



2017/10





GRAVITATIONAL WAVES DRESS

★★★★★ 6 reviews

\$179.00

SIZE

- X-SMALL

SMALL

MEDIUM

LARGE
- XX-LARGE

X-SMALL WITH 15" SLEEVES
- SMALL WITH 15" SLEEVES

MEDIUM WITH 15" SLEEVES
- LARGE WITH 15" SLEEVES

X-LARGE WITH 15" SLEEVES
- XX-LARGE WITH 15" SLEEVES

ADD TO CART

Want to wear the fabric of space time?

Celebrate the **discovery of gravitational waves**. At first glance, you see plaid. Look a bit further and you see data from the **LIGO** detectors. It's a classic educational twist.

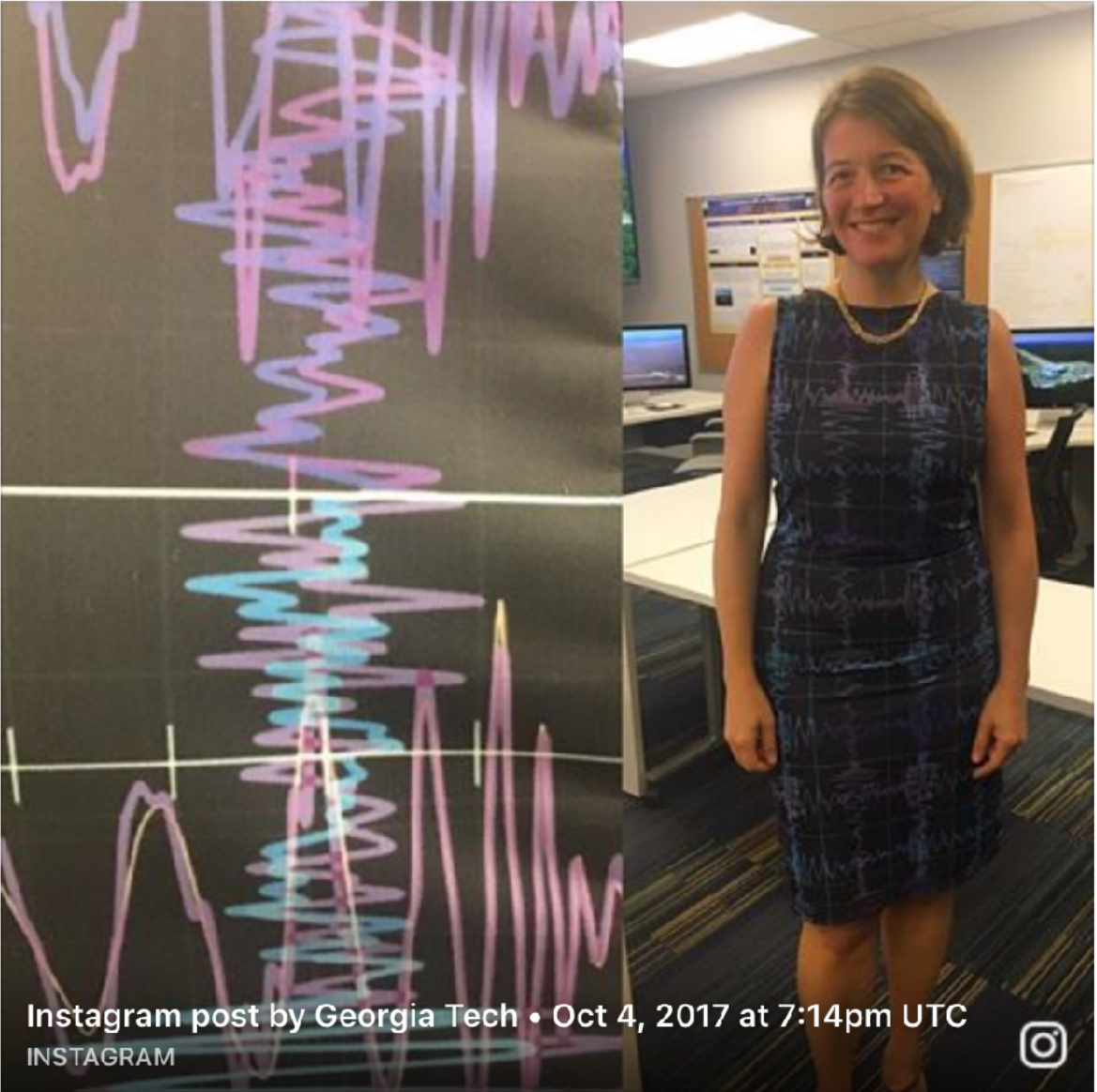
MATCHING PLAID TIE AND ACCESSORIES AVAILABLE



Laura Cadonati

10月11日 1:22 · 2人

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



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

いいね! コメントする シェアする

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

Accessories > Ties

Gravitational Waves Tie

★★★★☆ 4,4 (1254)



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

\$44.30
per tie

Qty: 1

Add to Cart

15% Off with code CREATIVEDEAL



Designed for you
by Shenova by Zazzle

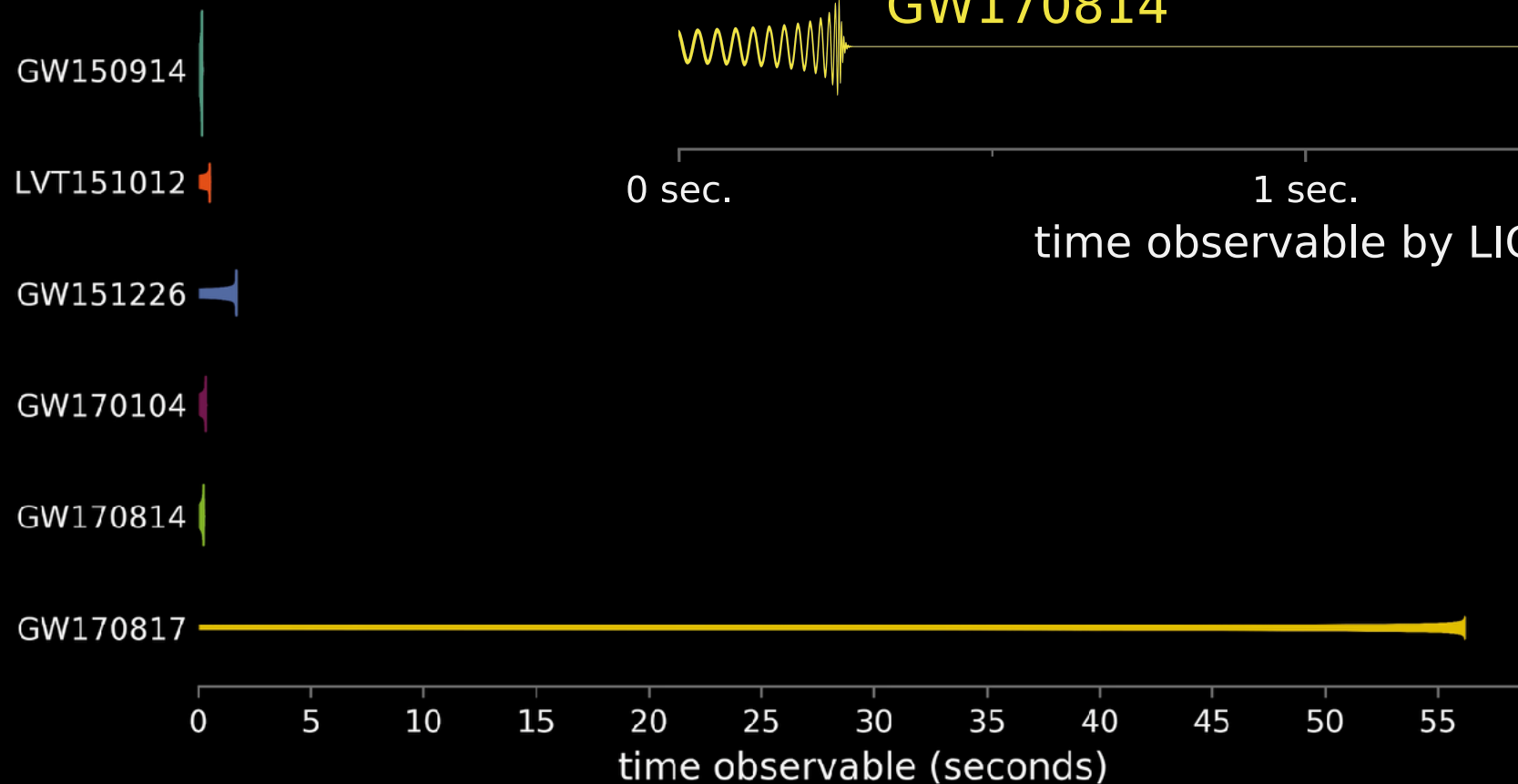
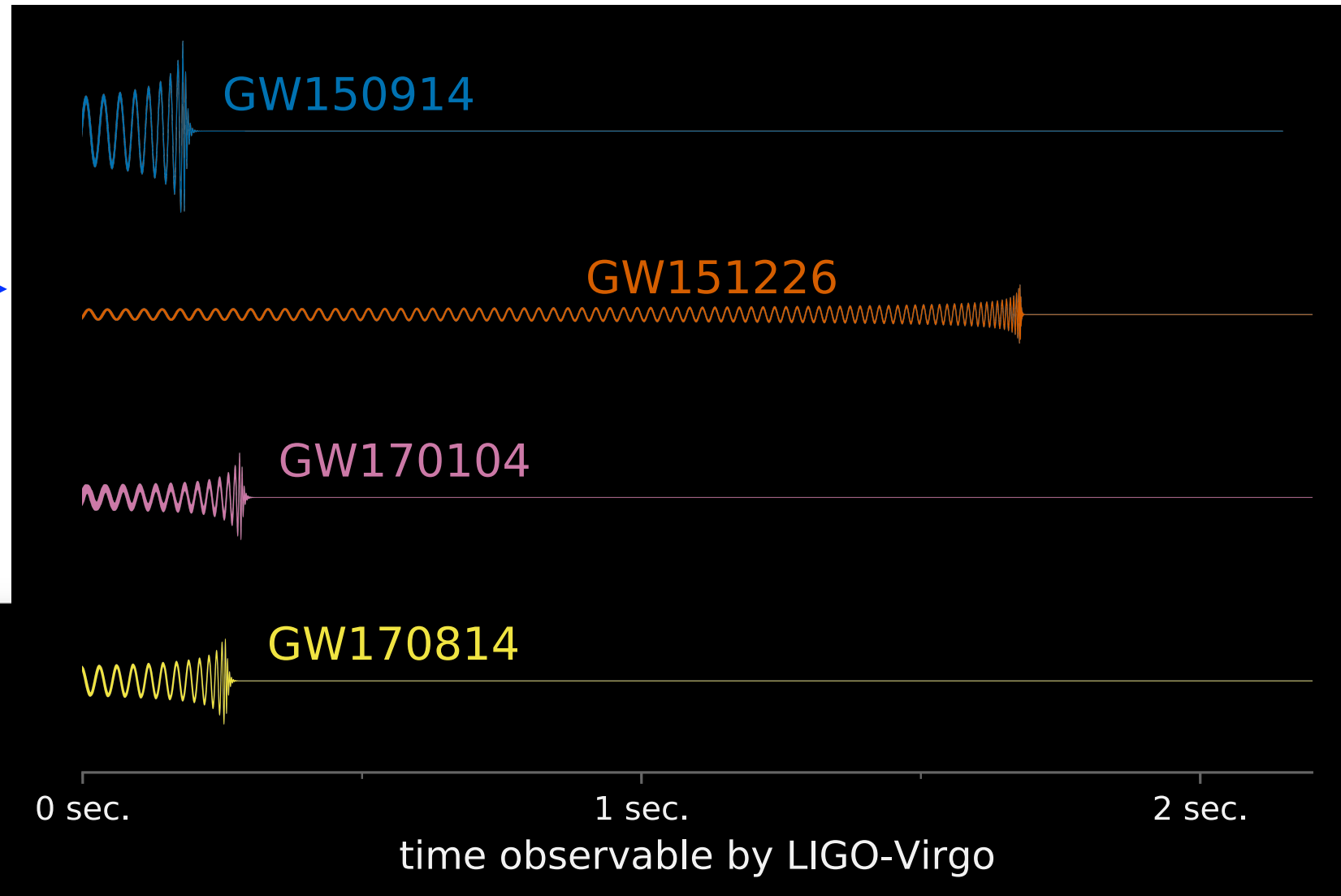
Customize



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

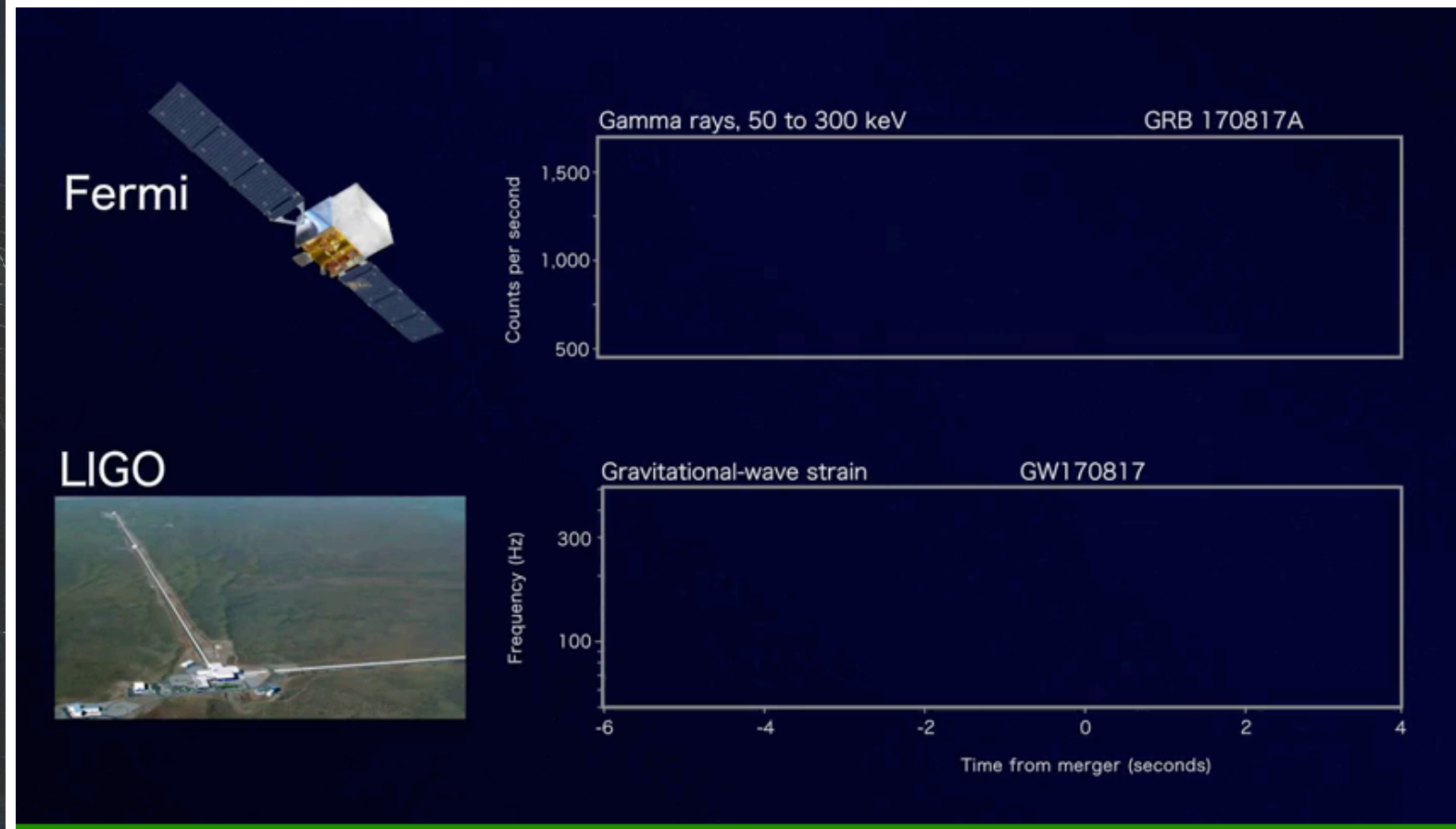
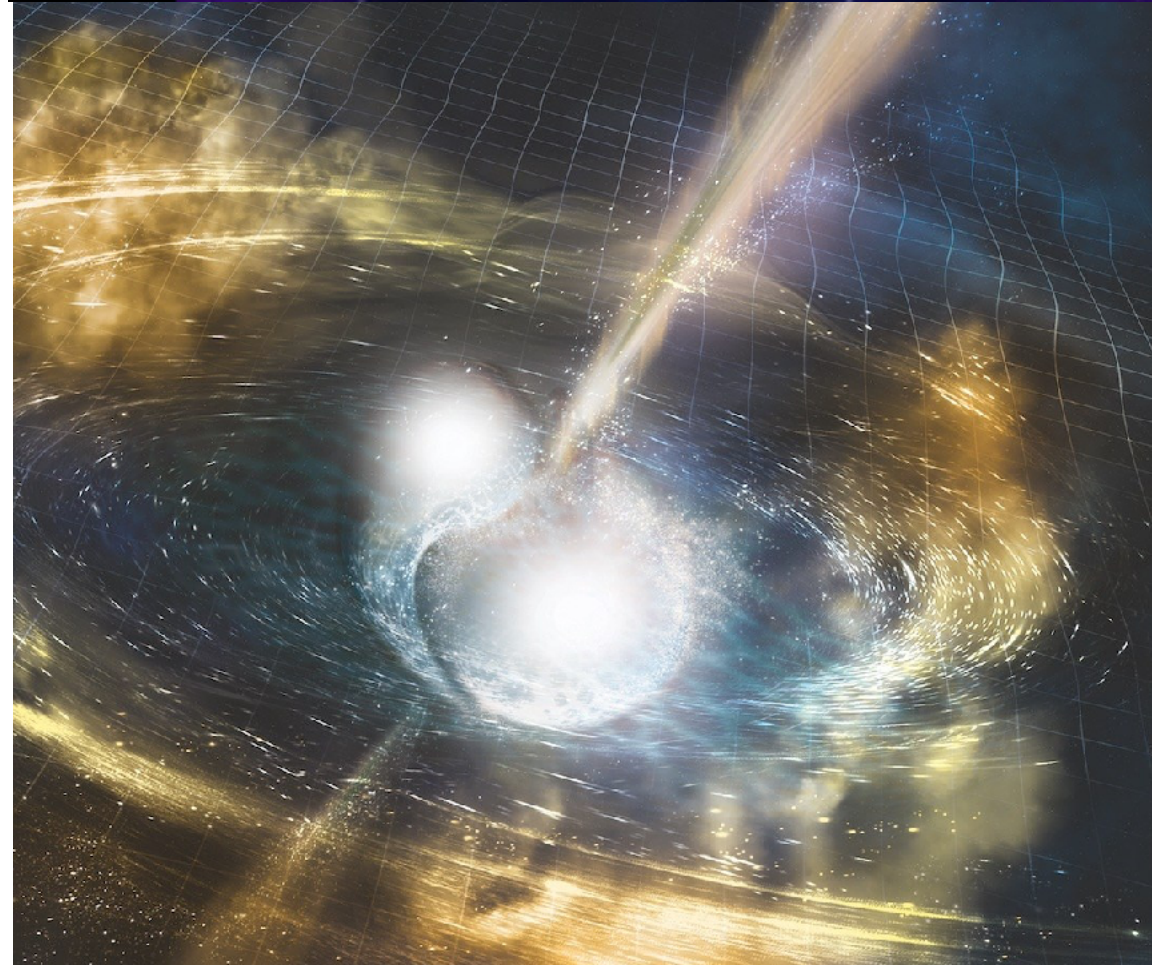
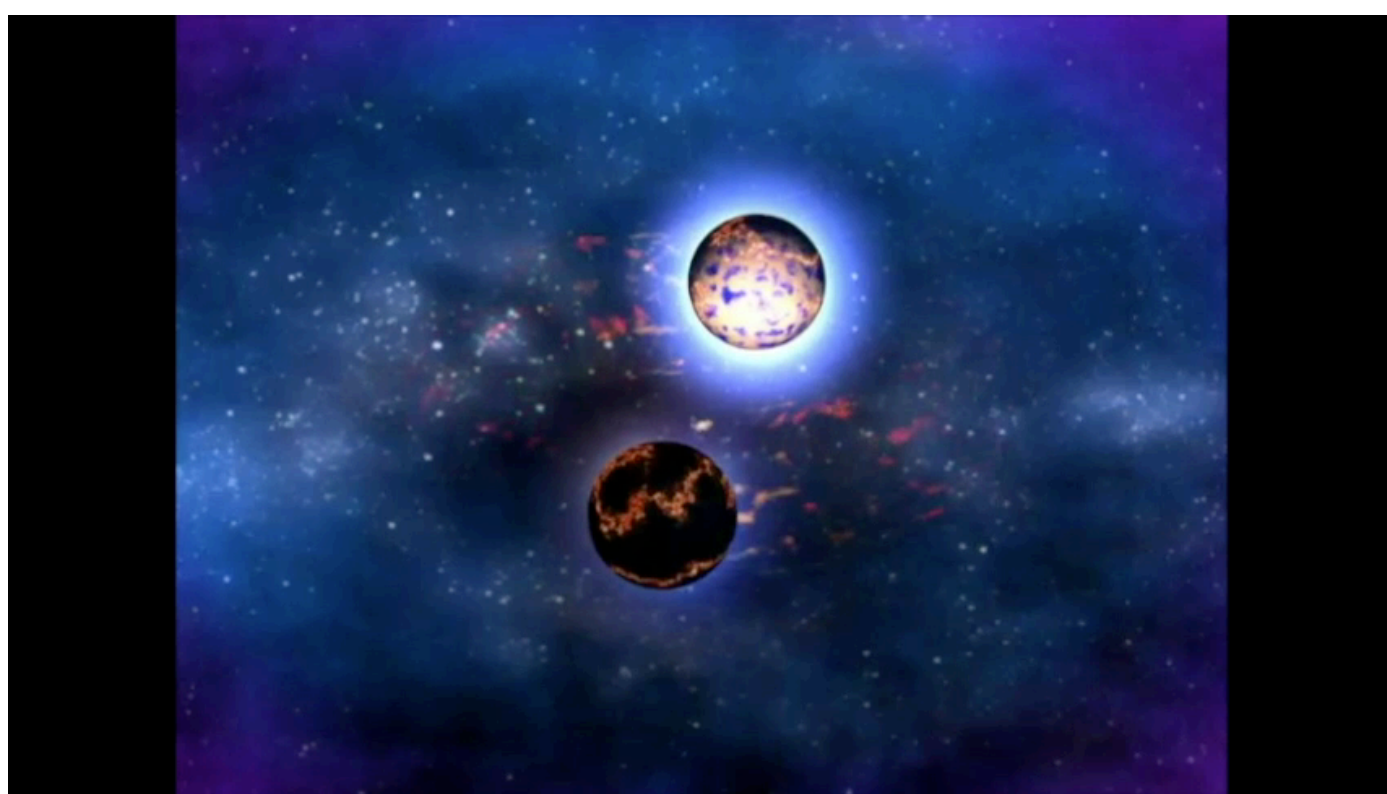
これまでの
BHBH合体
による重力波



今回のNSNS
合体による重力波

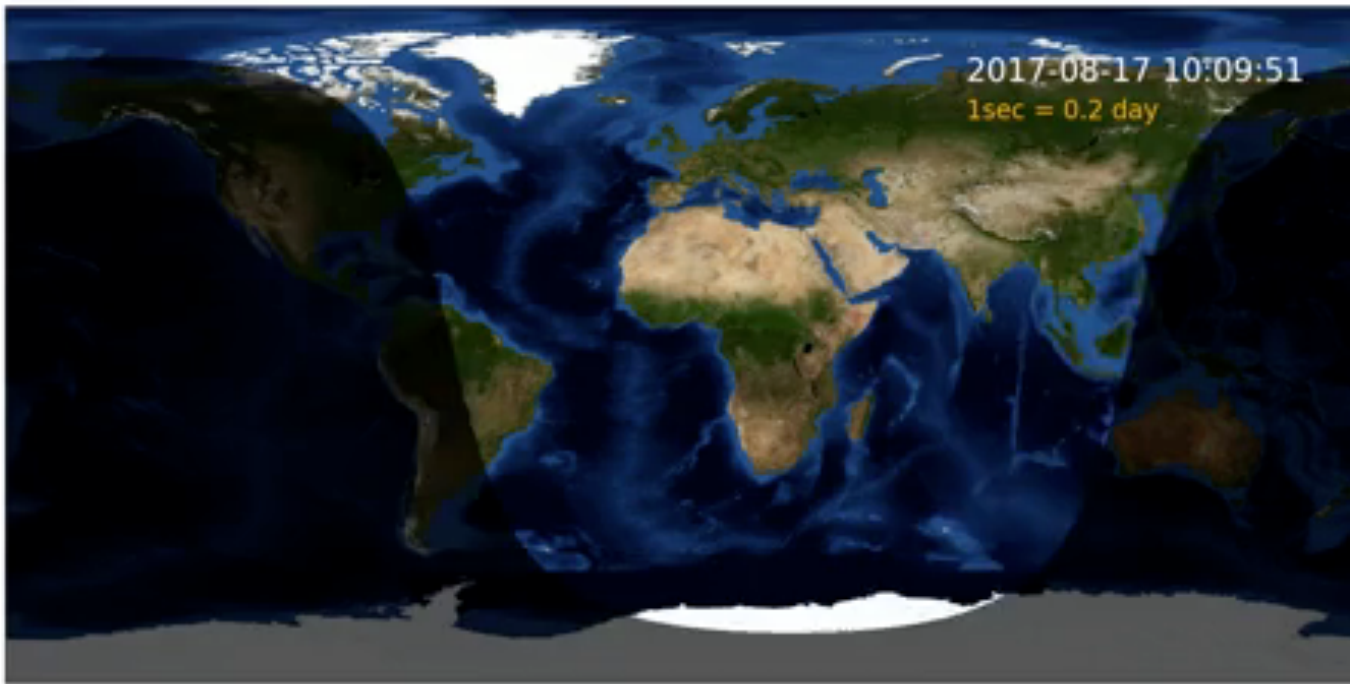
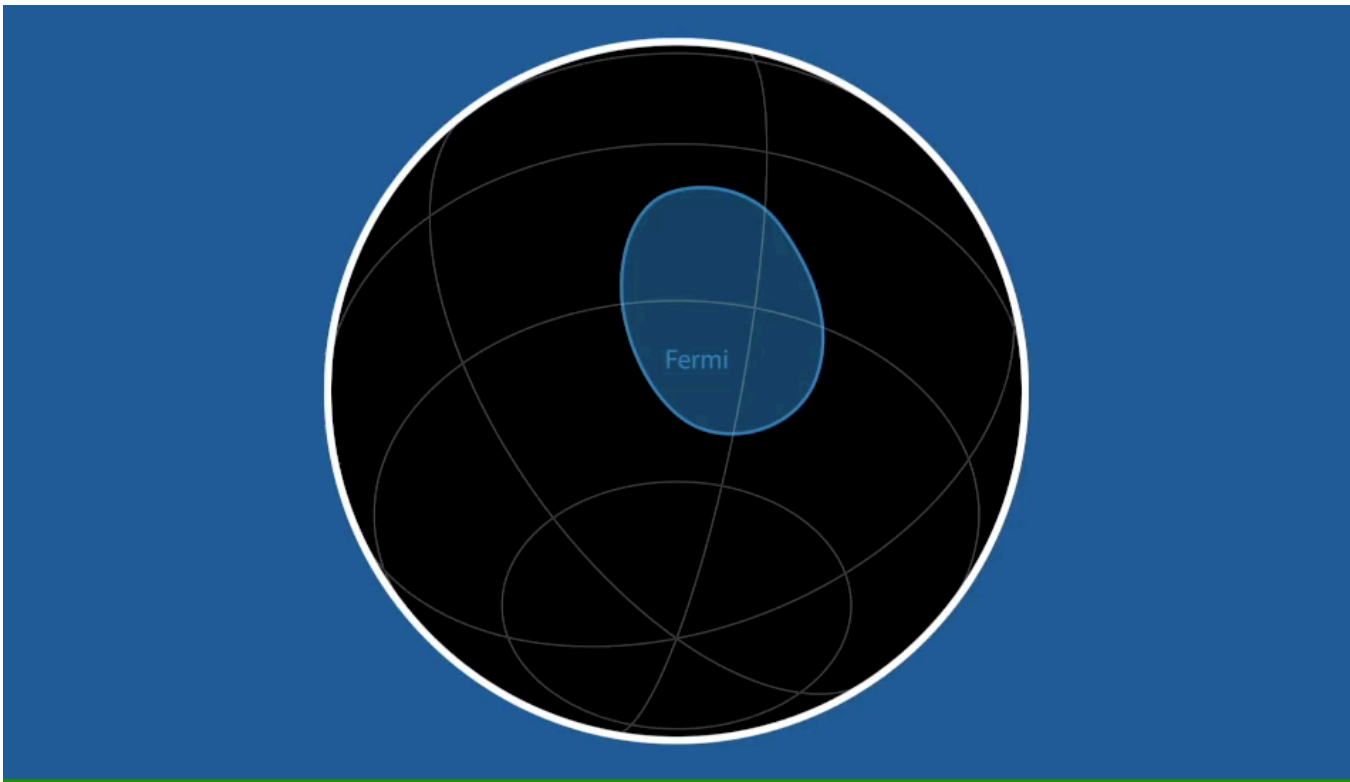
連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817



波源はNGC4993 (40Mpc先) !
1 億3000万光年先

ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

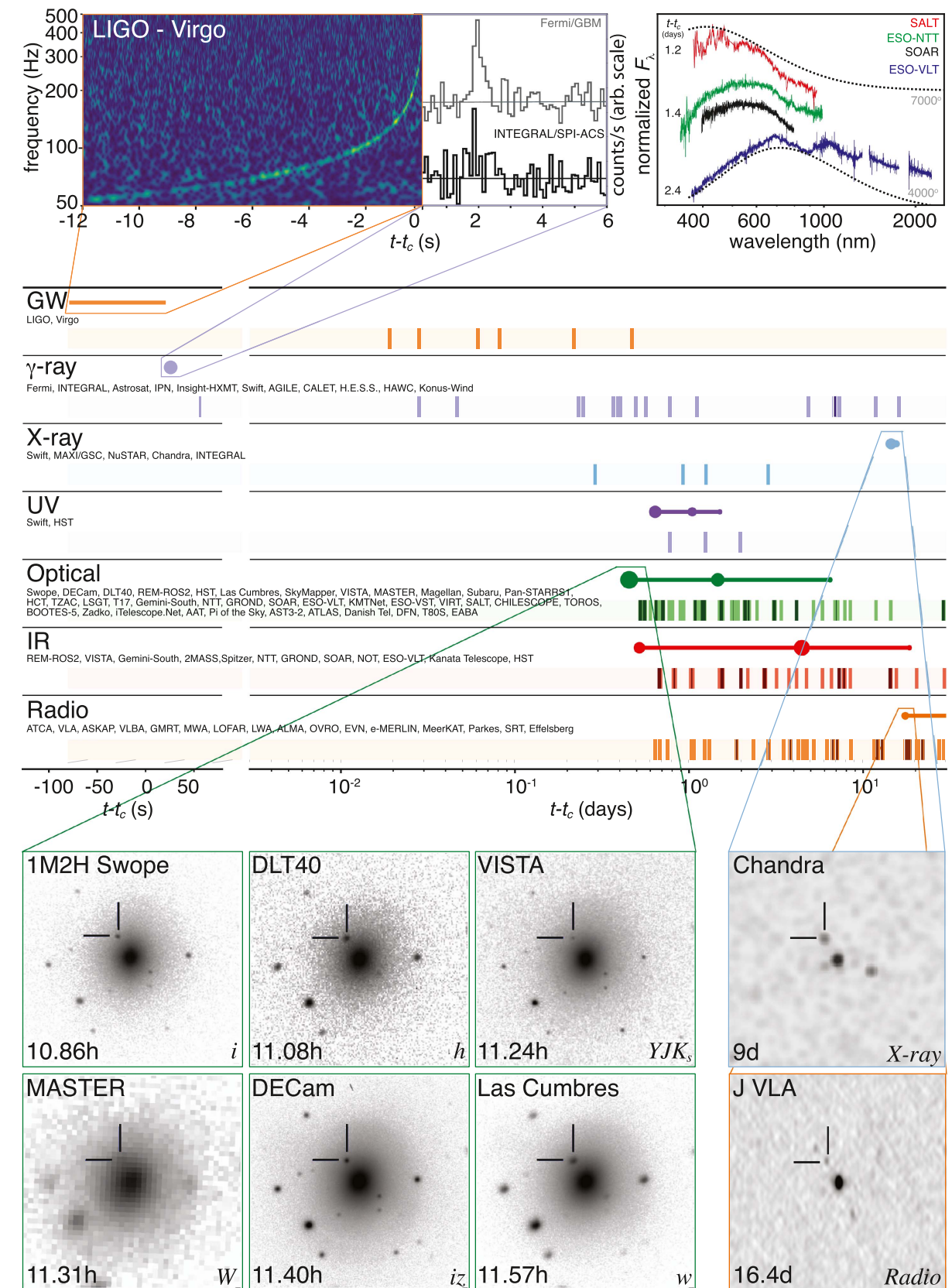


Figure 2. Timeline of the discovery of GW170817, GRB 170817A, SSS17a/AT 2017gfo, and the follow-up observations are shown by messenger and wavelength relative to the time t_c of the gravitational-wave event. Two types of information are shown for each band / messenger. First, the shaded dashes represent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

連星中性子星合体 重力波検出, 多くの天文台が同時観測

GW170817

FIRST COSMIC EVENT OBSERVED IN GRAVITATIONAL WAVES AND LIGHT

Colliding Neutron Stars Mark New Beginning of Discoveries

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

Gravitational wave lasted over 100 seconds

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

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

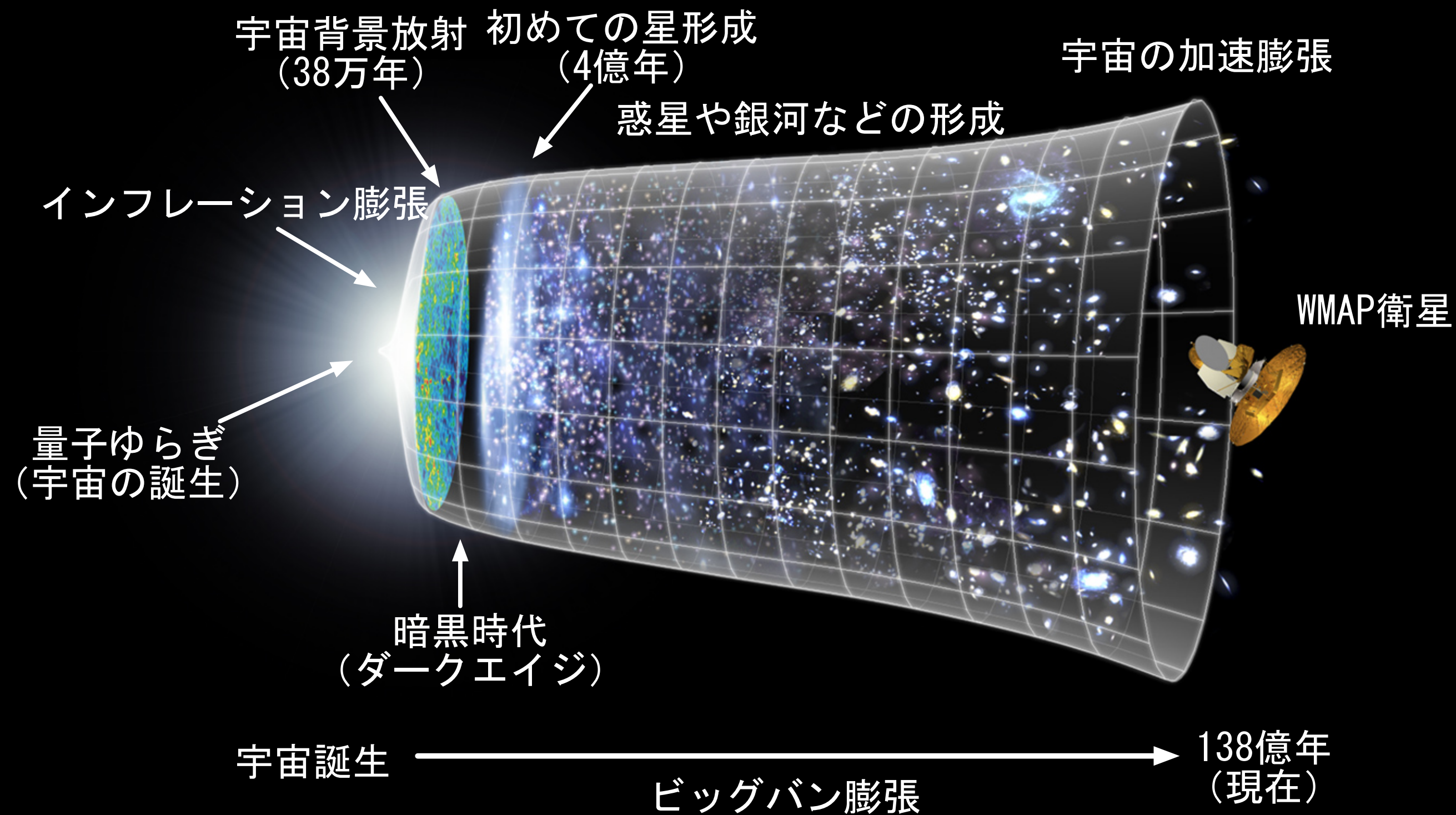
LIGO

Georgia Tech Center for Relativistic Astrophysics



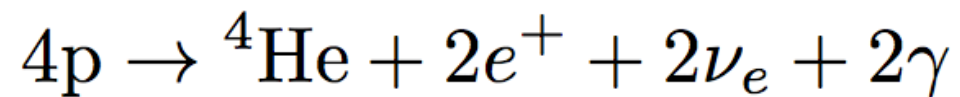
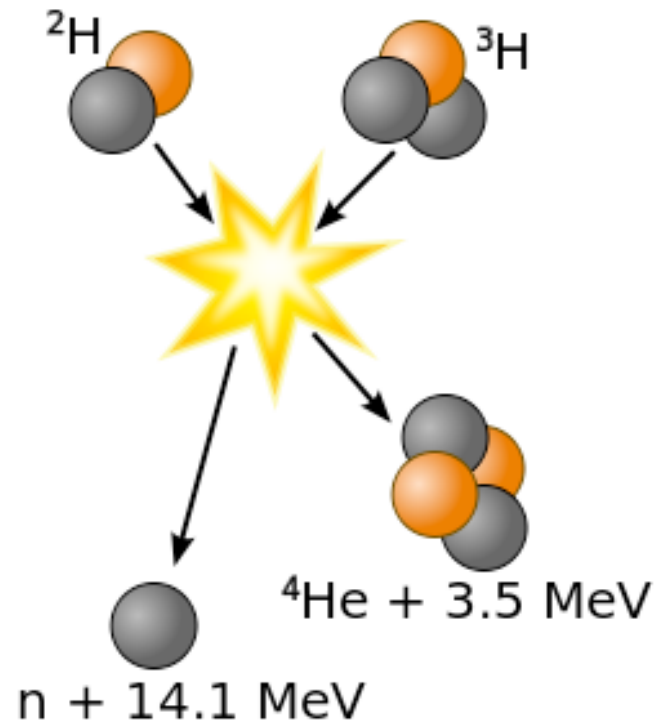
周期表 (periodic table)

Period																	18 VIII A	
	1 IA																2	
	1s																1s	
	1																1	
	↑ 非金属元素																↓ 金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																↑ 非金属元素	
	↓ 金属元素																	



核反応 原子核の組み替えによって莫大なエネルギーが放出

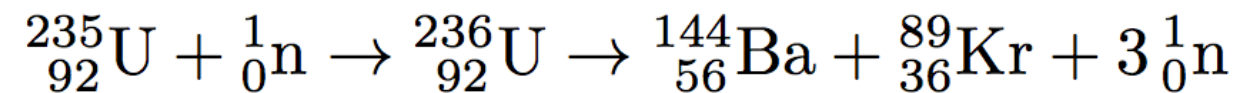
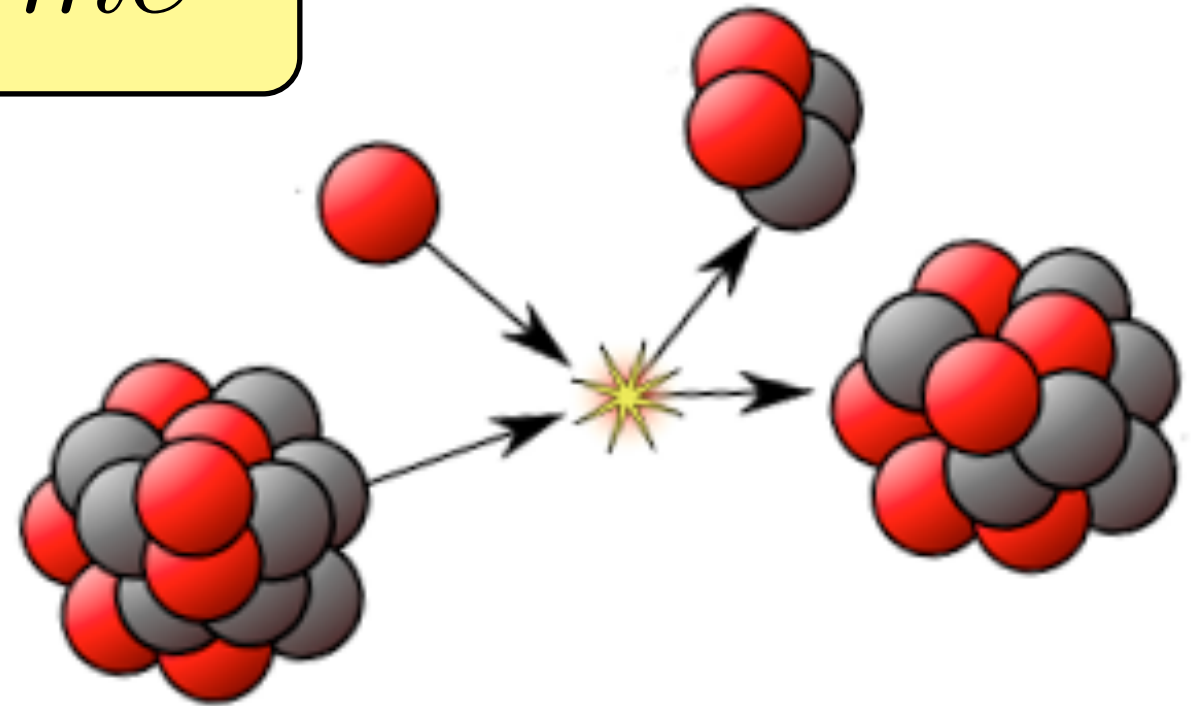
$$E = mc^2$$



核融合

(nuclear fusion)

合体した方が安定
(エネルギー放出)



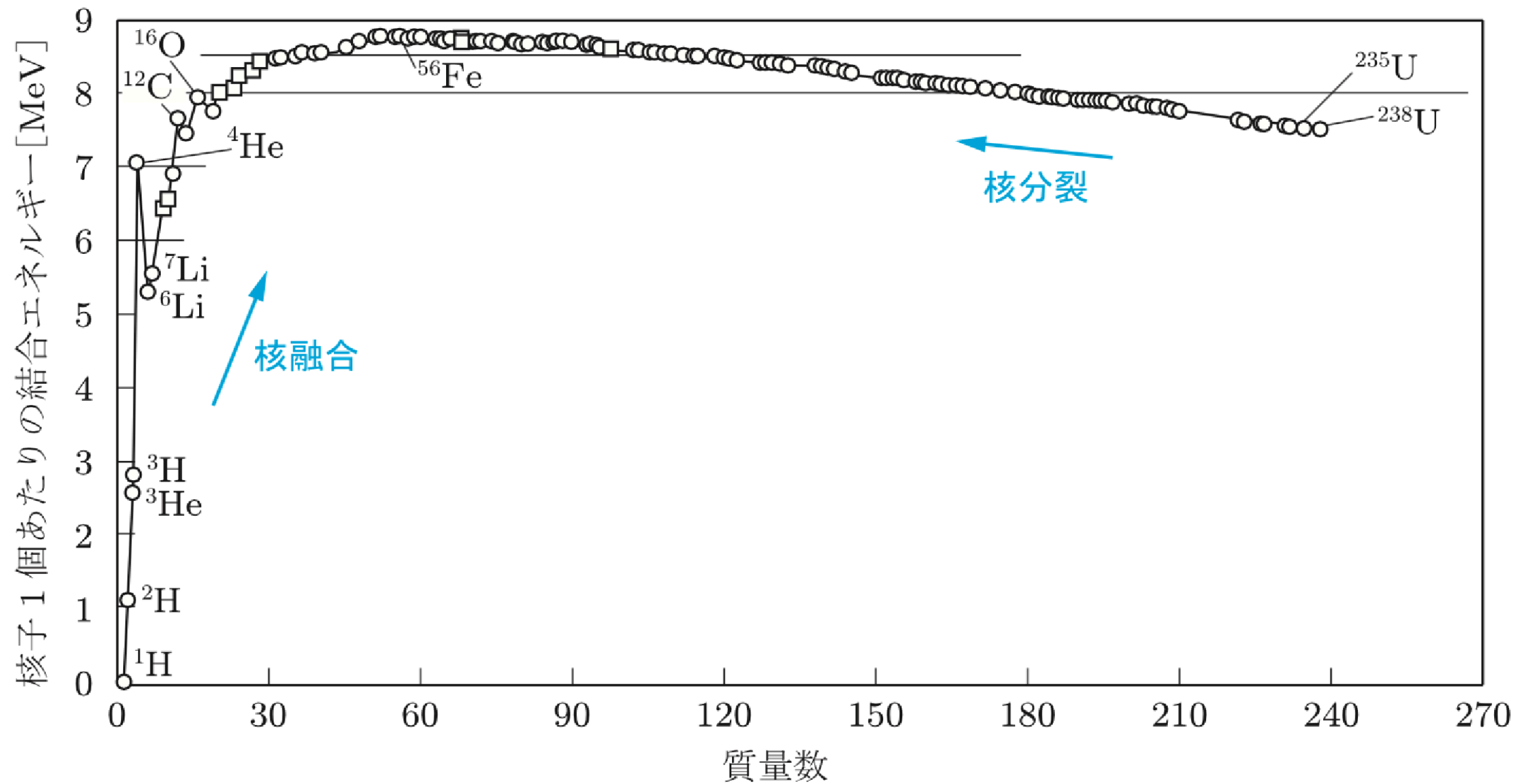
核分裂

(nuclear fission)

分裂した方が安定
(エネルギー放出)

結合エネルギー

核融合も核分裂もどちらもおきる理由は何か？



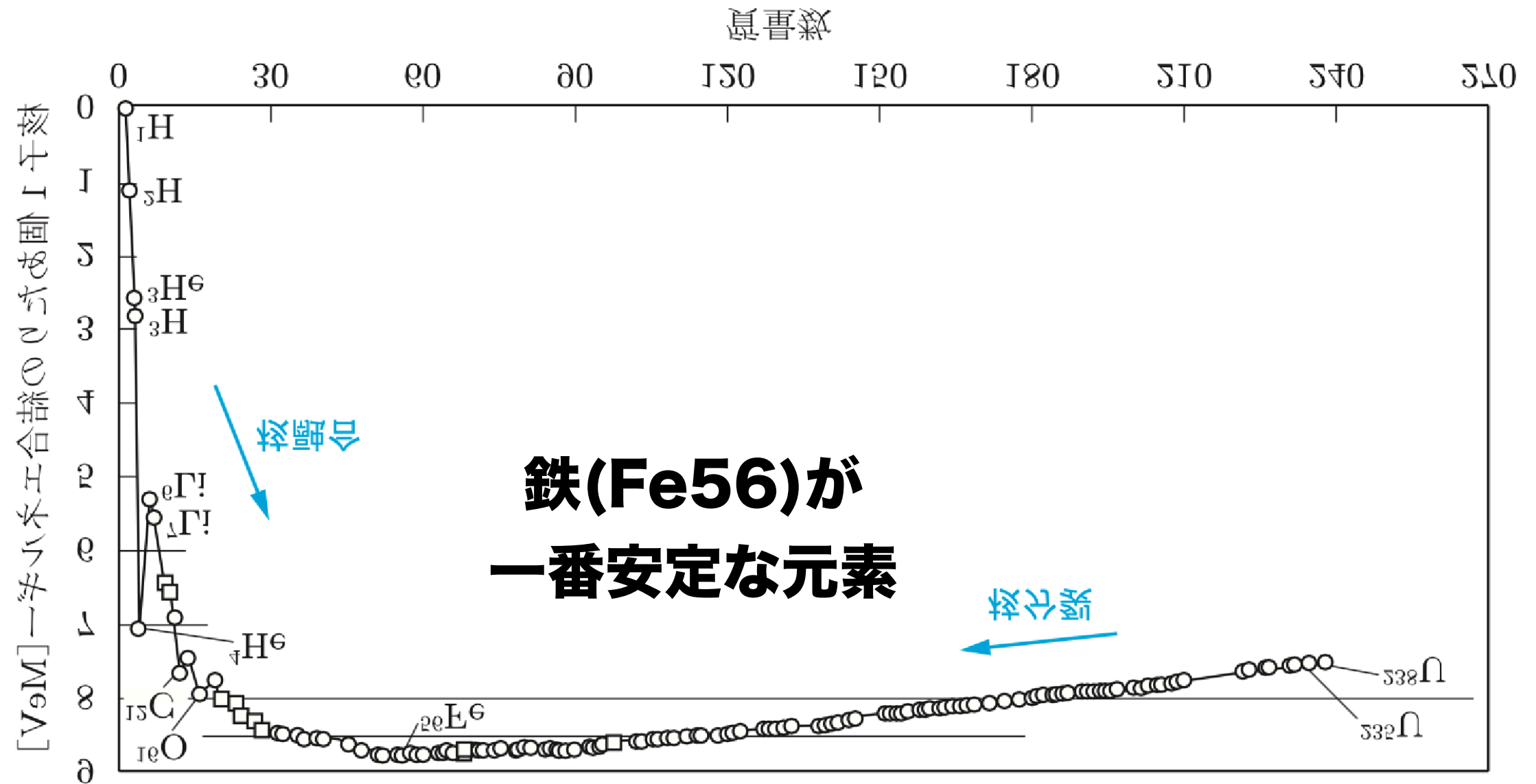
↑ ↑
結合エネルギー (大)

→ → 質量数 (大)

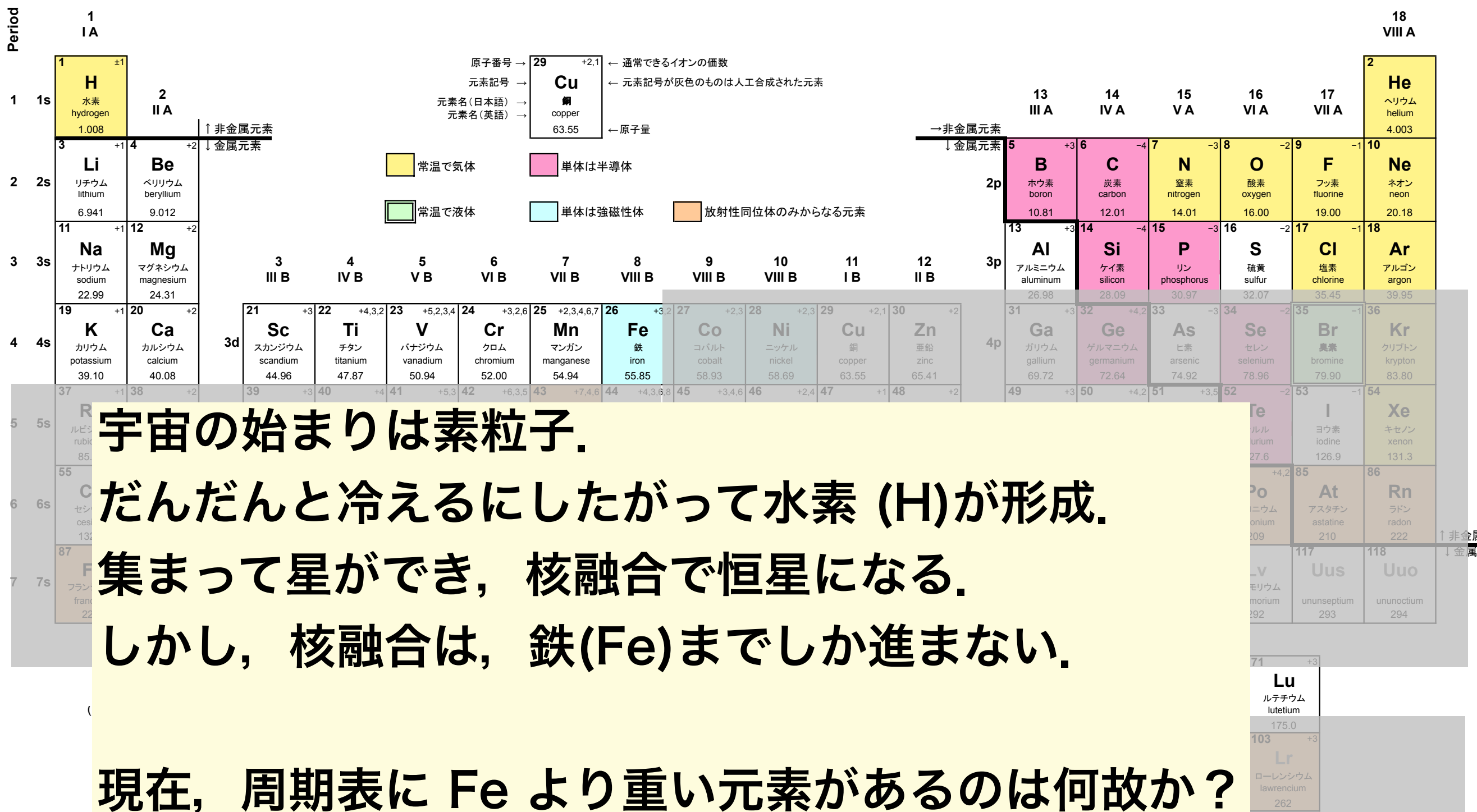
結合エネルギー

核融合も核分裂もおきる理由は何か？

↓ ↓ ↓
結合エネルギー (大)



→ → 質量数 (大)



超新星爆発で作られた！

中性子星連星合体で作られた！

世界の重力波干渉計

LIGO Hanford
USA



LIGO Livingston
USA



GEO600 Hanover
Germany



Virgo Pisa
Italy



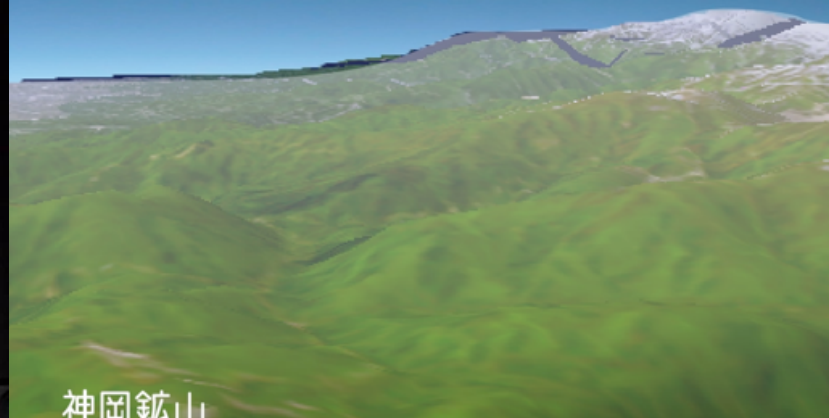
KAGRA Hida
Japan



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

Kamioka Gravitational wave detector

大型低温重力波望遠鏡



神岡鉱山
(岐阜県飛騨市神岡町)



望遠鏡の大きさ：基線長 3km

望遠鏡を神岡鉱山内に建設

鏡をマイナス250度 (20K) まで冷却

熱雑音を小さくするため

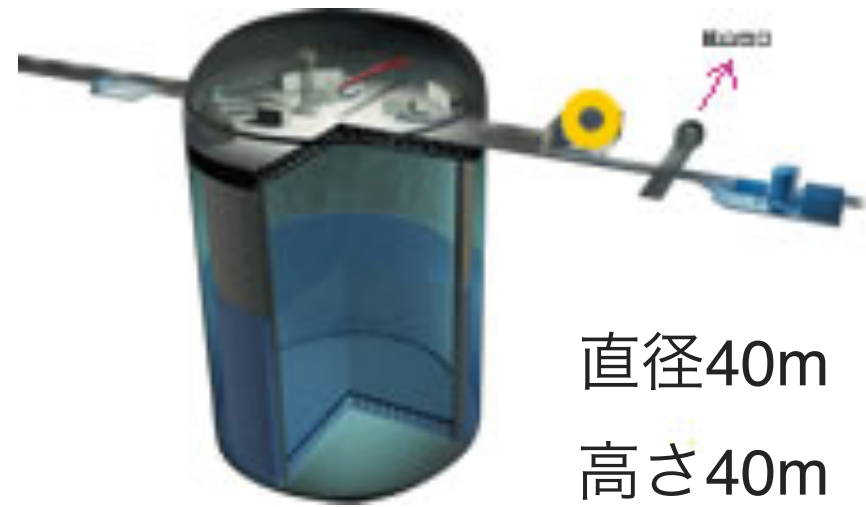
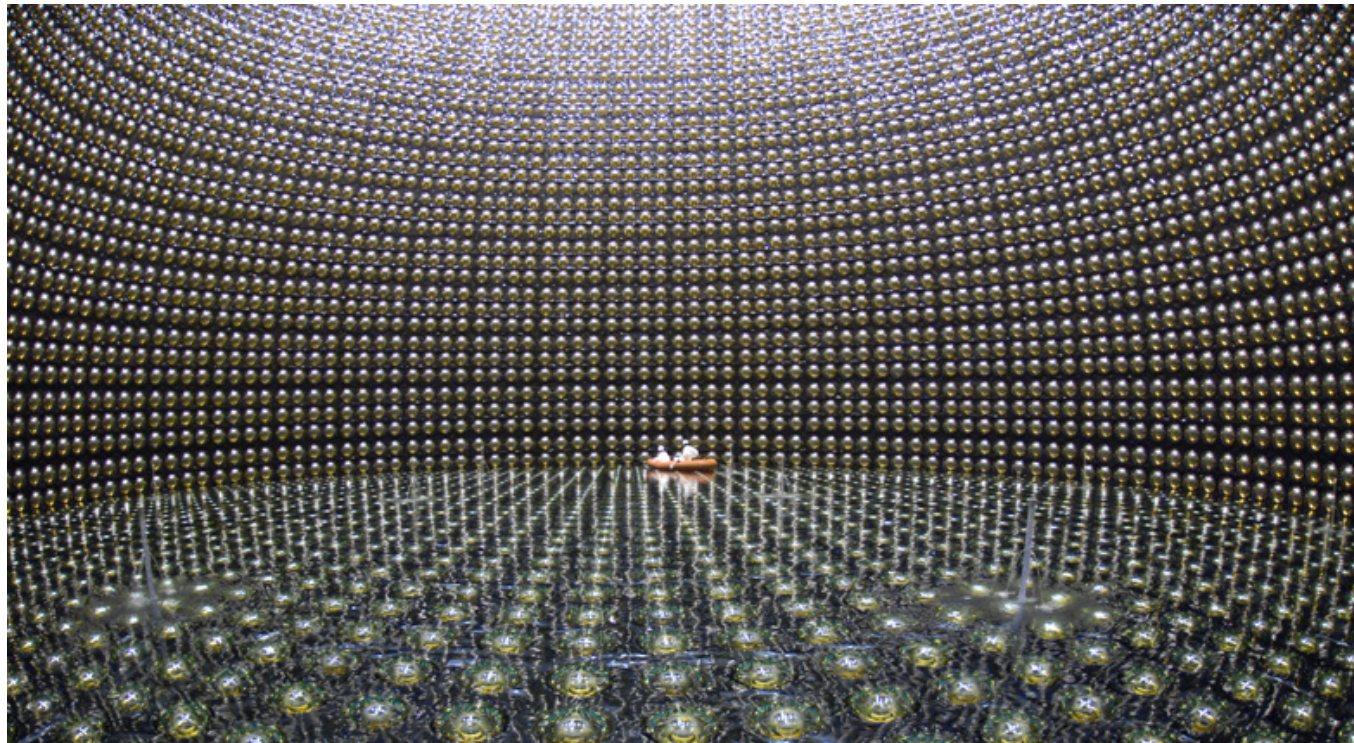
鏡の材質としてサファイア

光学特性に優れ、低温に冷却すると熱伝導や機械的損失が少なくなる

スーパー・カミオカンデ (ニュートリノ観測装置)

Super-Kamiokande

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



直径40m

高さ40m

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



ノーベル物理学賞を受賞

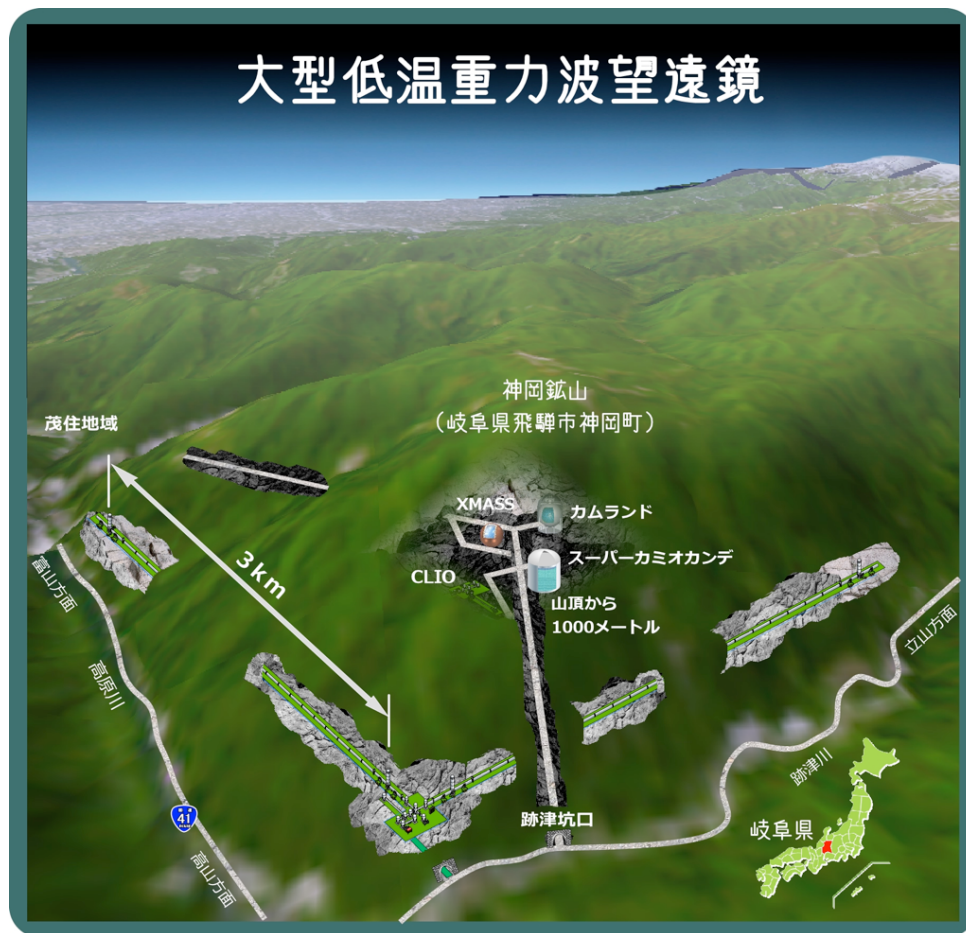
小柴昌俊 (2002年)



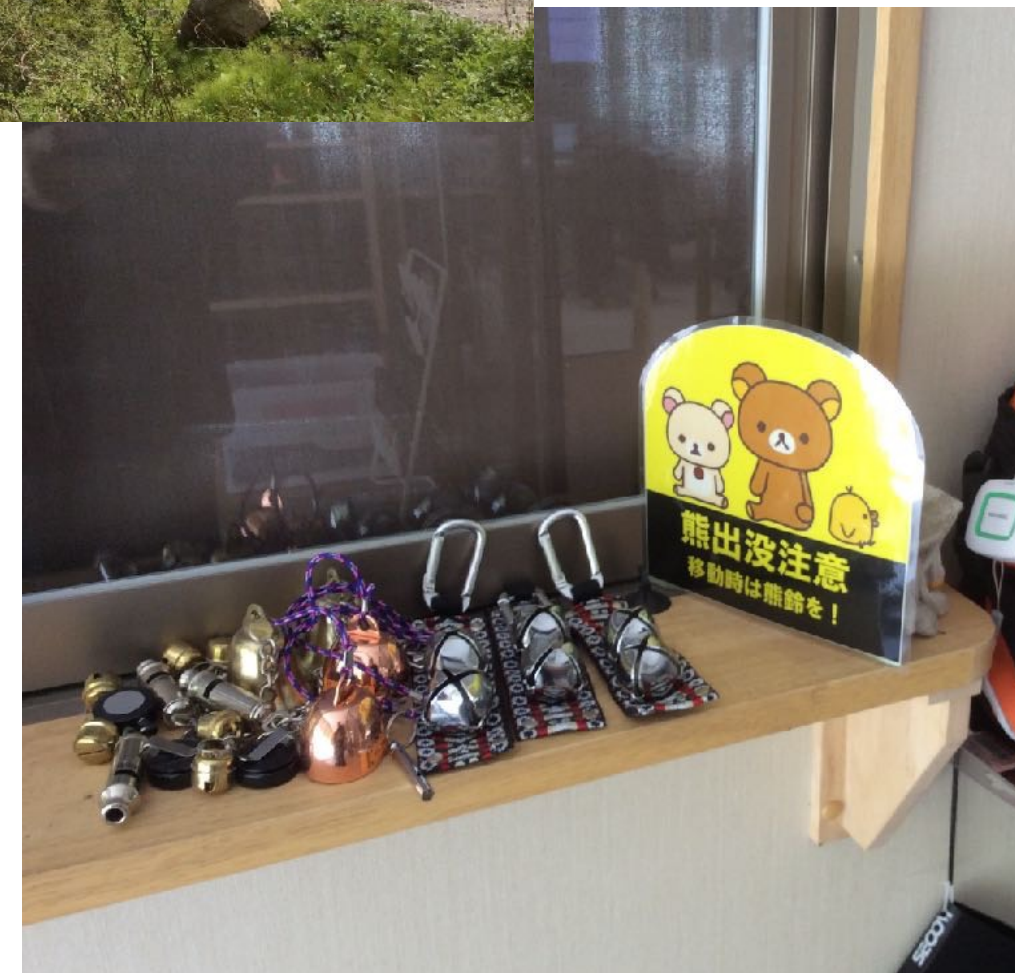
梶田隆章 (2015年)



KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



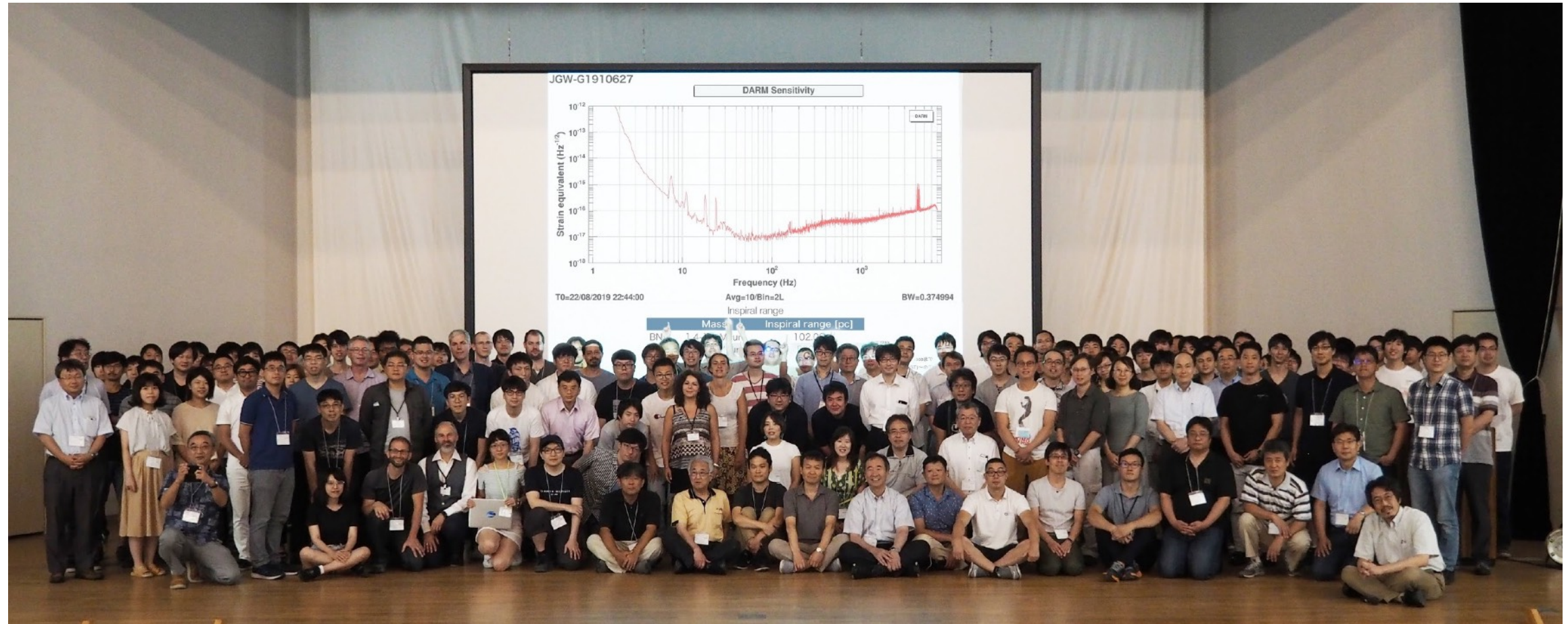
2016年4月



KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)



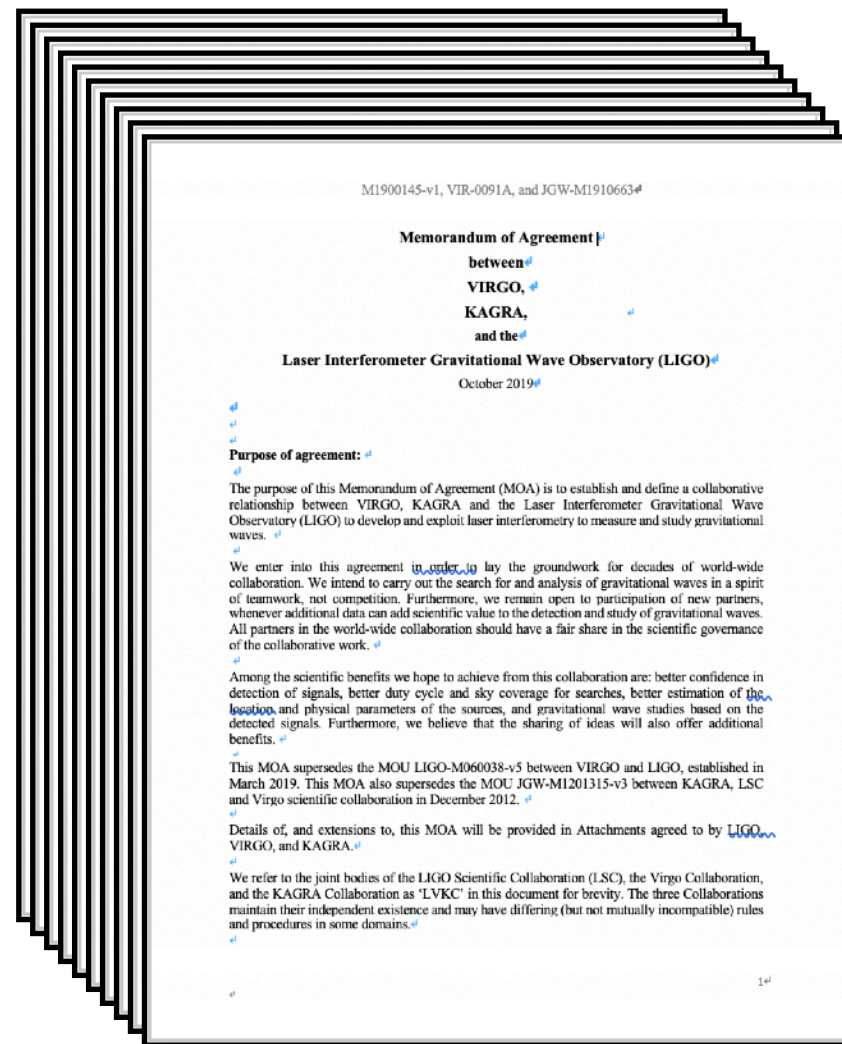
KAGRA (かぐら : 大型低温重力波望遠鏡)



360 members
200 authors
110 groups
14 regions

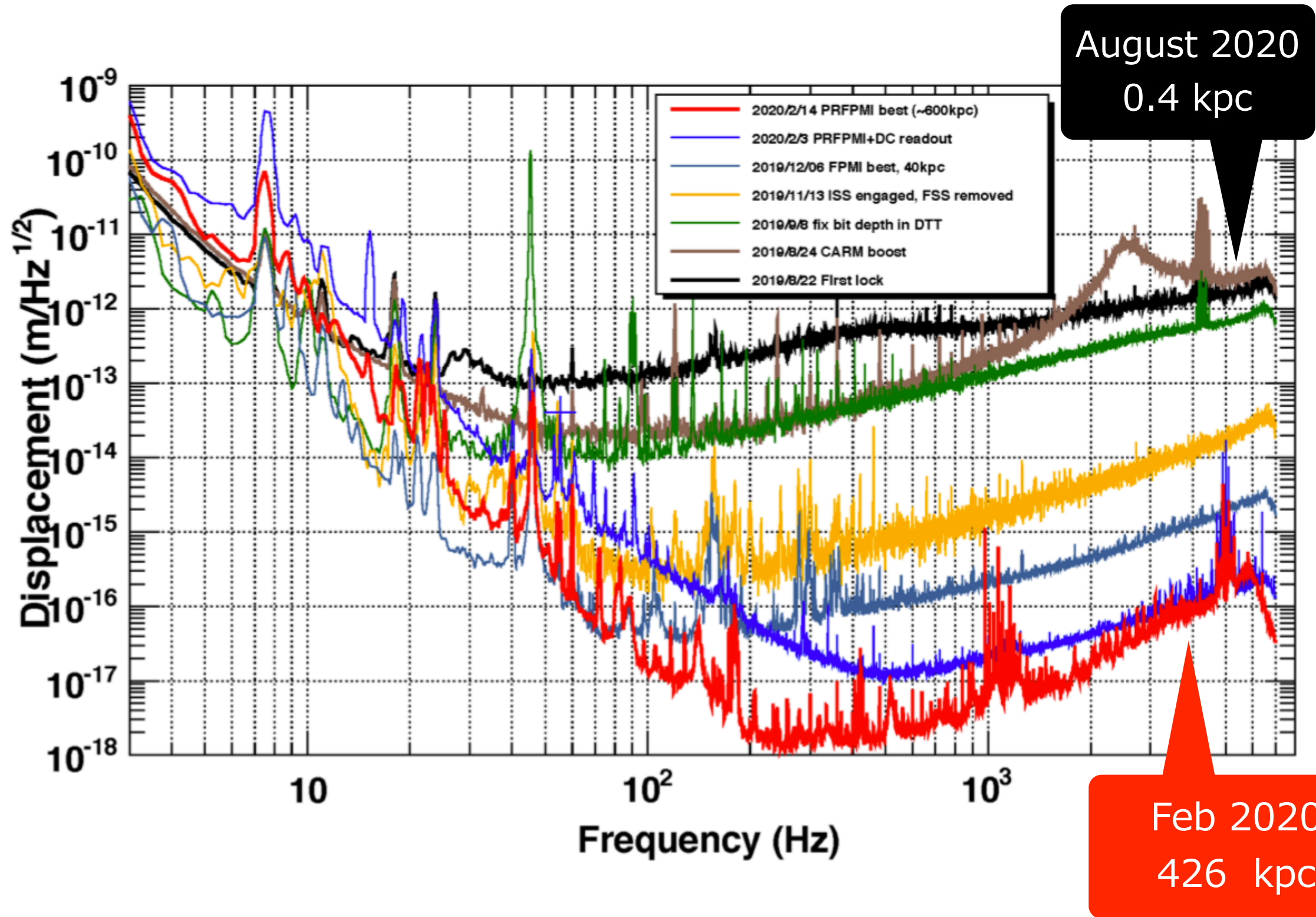


KAGRA (かぐら：大型低温重力波望遠鏡)

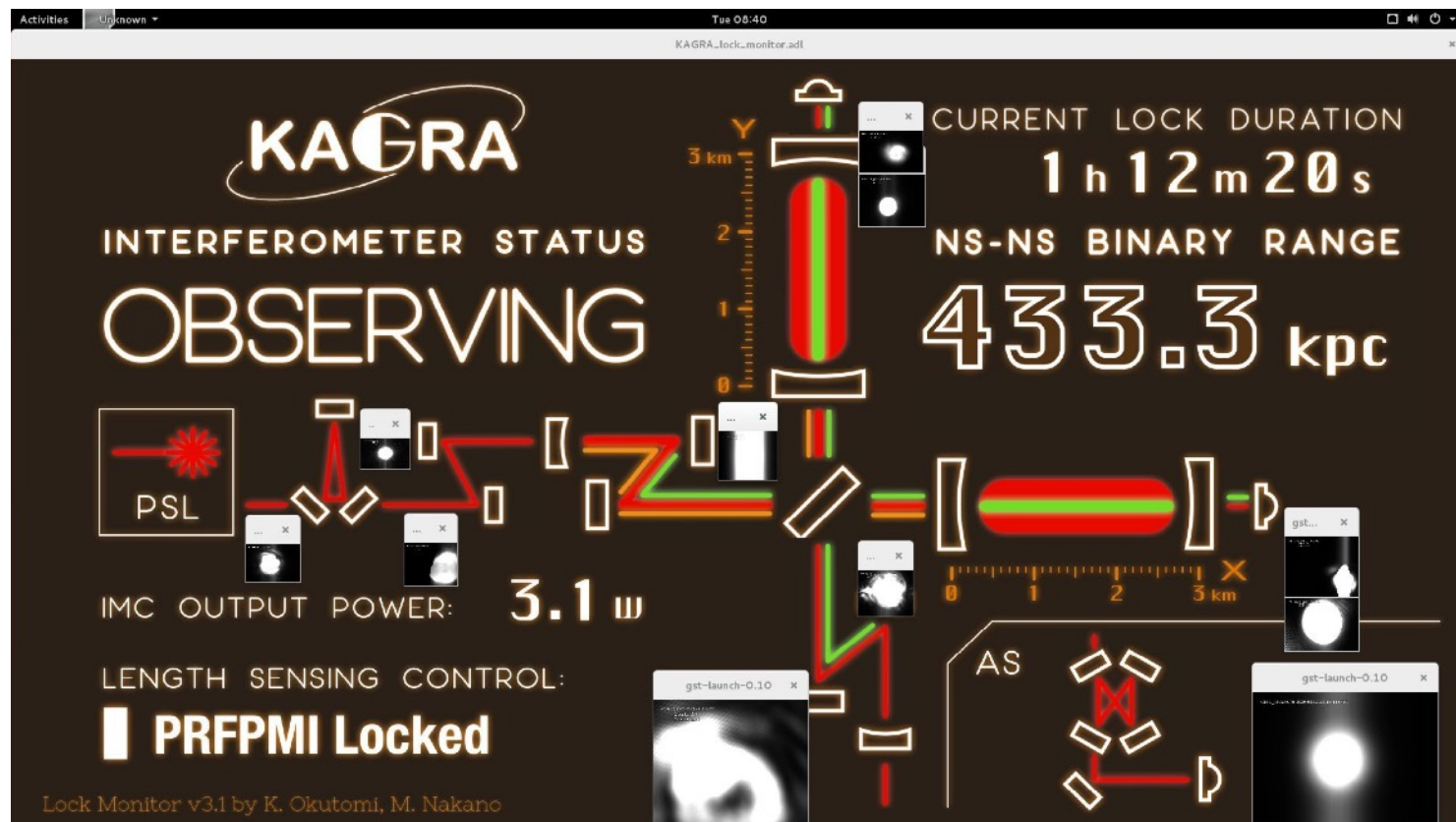


2019年10月, アメリカ・ヨーロッパとの研究協定に調印

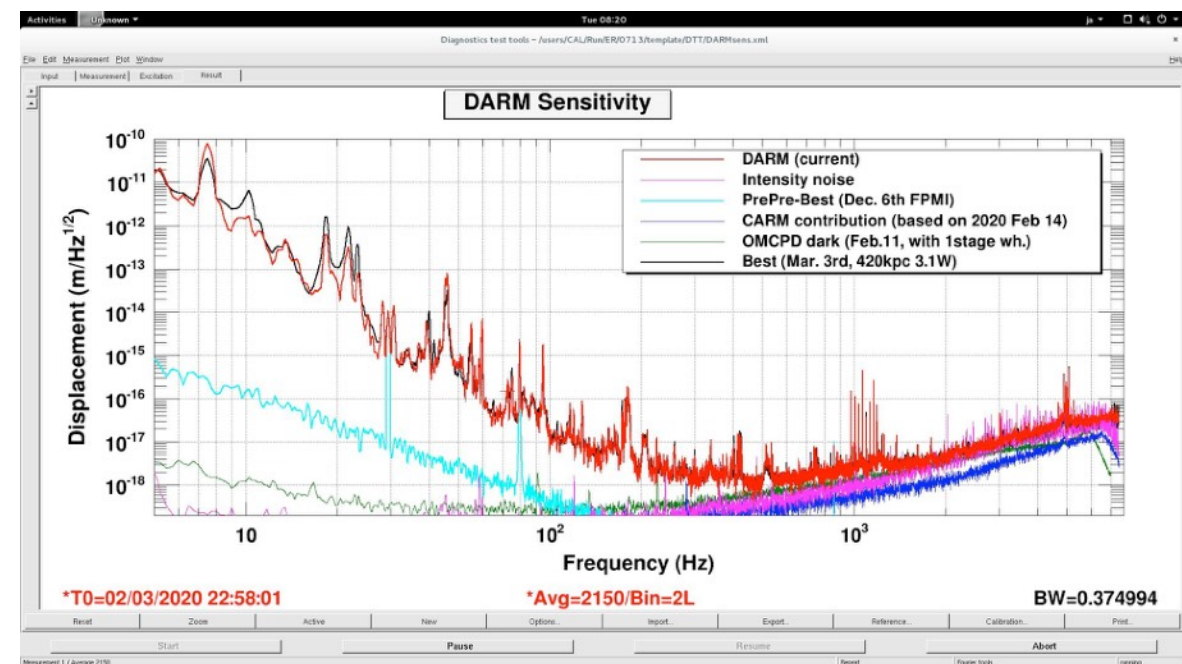
KAGRA 2020年2月25日, 観測開始



KAGRA 2020年2月25日, 観測開始



longest lock: 6h 44m
max. sensitivity: 442 kpc
duty cycle: 60%-74% (24hr)



重力波

時空のゆがみ（トランポリンのゆれ）が伝わる

⇒ 小さな小さな波をとらえることができた！

衝突したときの音を聴くことができた！

重力波天文学で何がわかる？

⇒ どういうブラックホールか

⇒ 銀河系がどうできてきたのか

⇒ 宇宙のはじまりはどうなっていたのか

⇒ アインシュタインは正しかったのか

マルチ・メッセンジャー天文学の誕生

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

ガンマ線

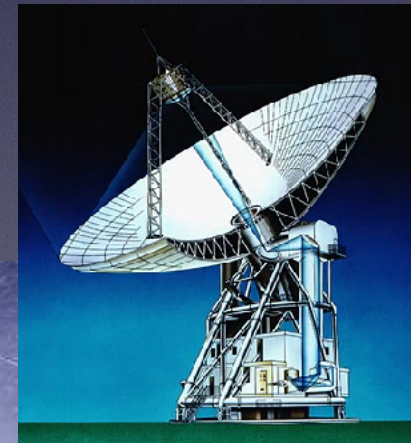
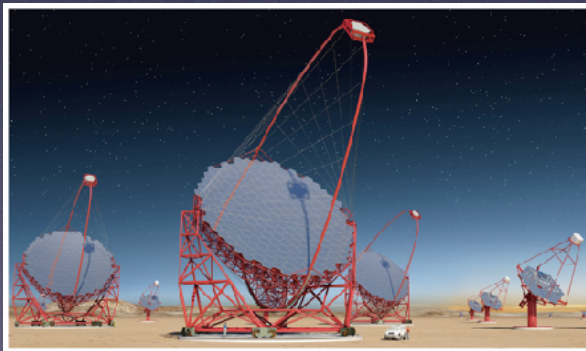
X線

可視光

赤外

電波

重力波



重力波天文学
はじまりました。

