

An aerial photograph of a lush green mountain valley. Overlaid on the landscape is a 3D rendering of a laser interferometer facility, likely the Kamioka Gravitational Wave Experimental Facility. The facility consists of several long, parallel green tubes (arms) extending across the valley floor, connected by a central area with various instruments and structures. The background shows rolling green hills under a clear sky.

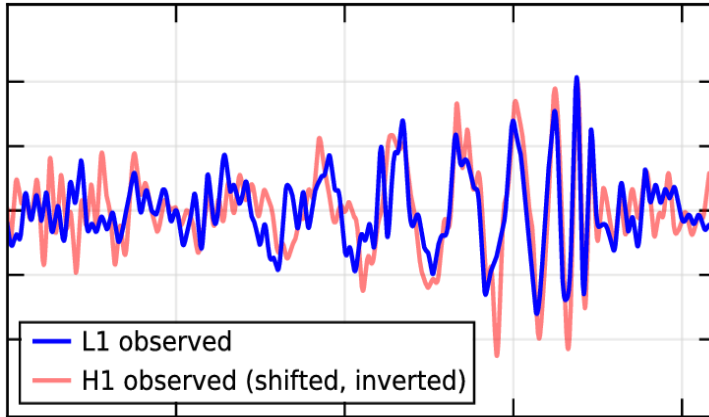
ICRR Spring School 2024 重力波

内山 隆
(東京大学宇宙線研究所)
(スライド: 田越秀行)

ICRR Spring School 2024年3月7日

登場人物

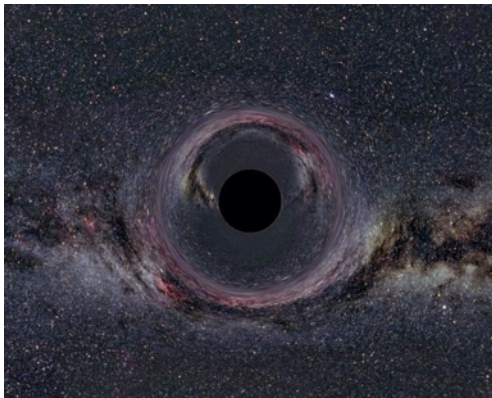
重力波



レーザー干渉計型 重力波検出器

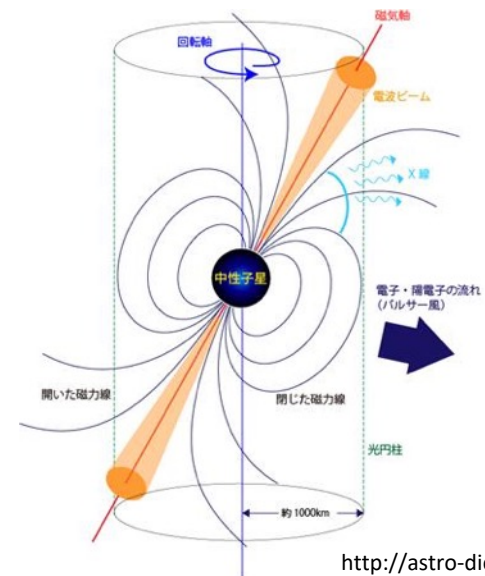


ブラックホール



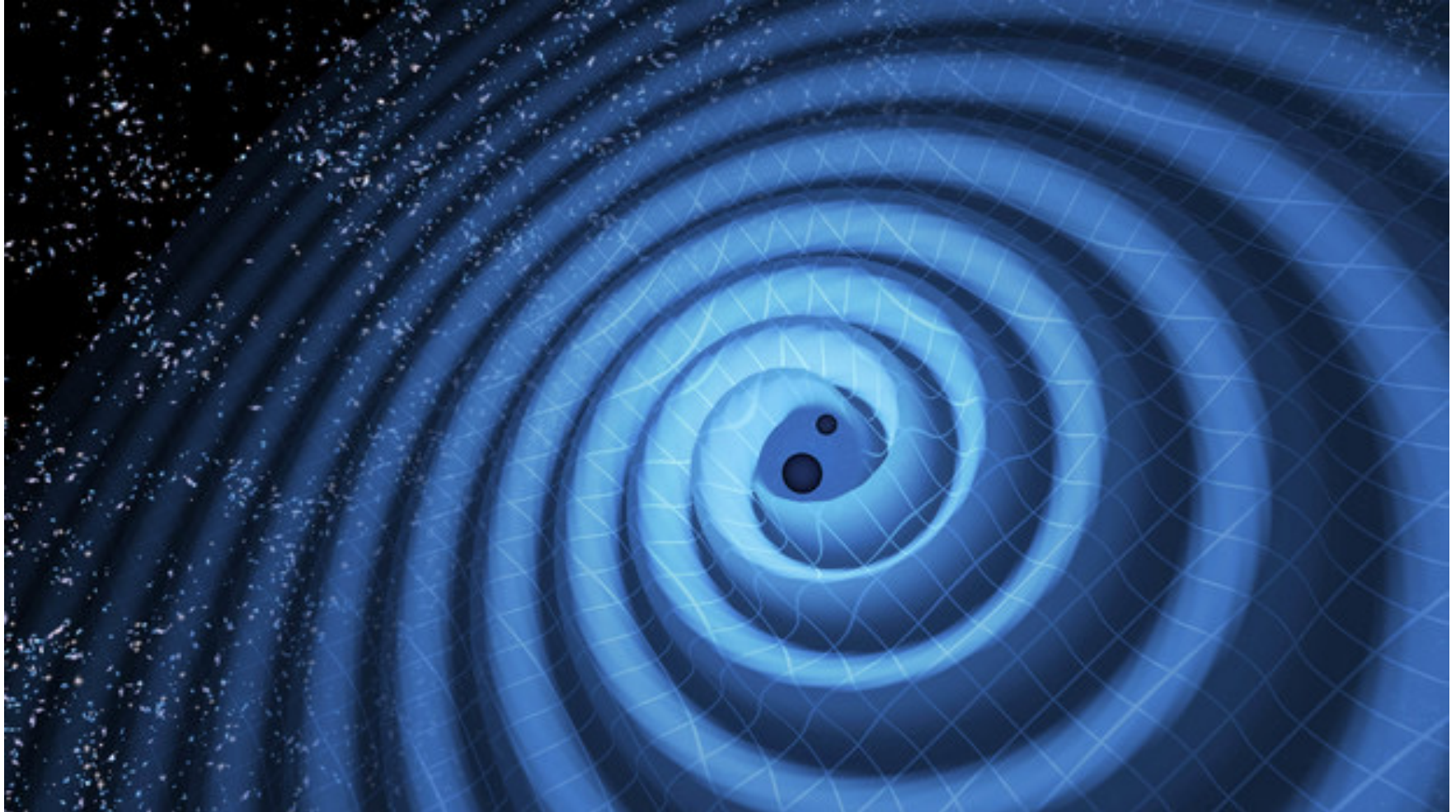
Ute Kraus, Physics education group Kraus, Universität Hildesheim, Space Time Travel, (background image of the milky way: Axel Mellinger) - Gallery of Space Time Travel, CC 表示-継承 2.5,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=370240>による

中性子星



<http://astro-dic.jp/pulsar/>

重力波

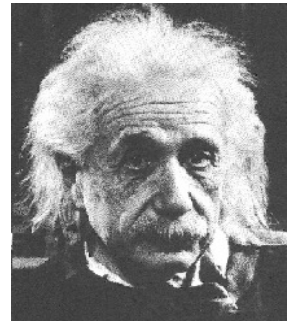


物体の運動 \Rightarrow 時空のゆがみの振動 \Rightarrow 波動として伝搬

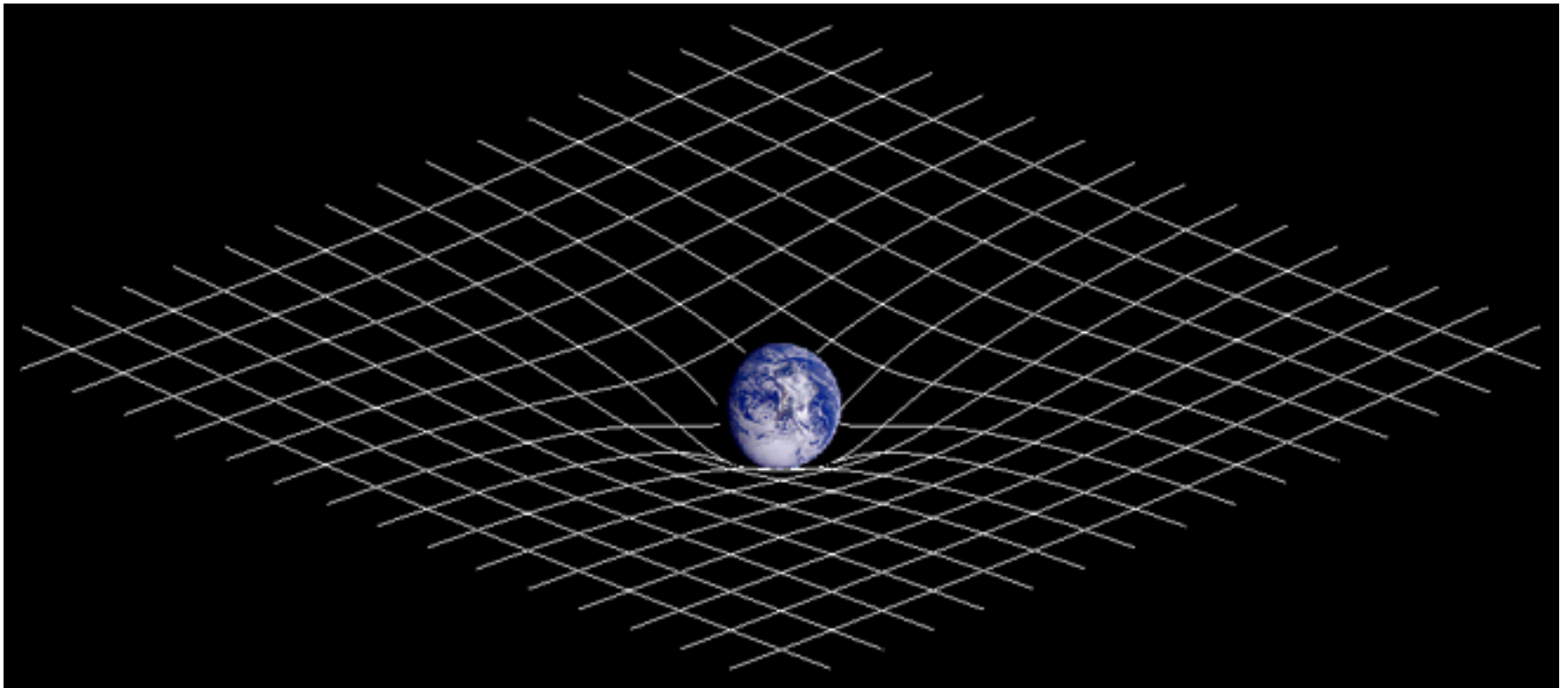
時空：時間・空間

画像：<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160615f>

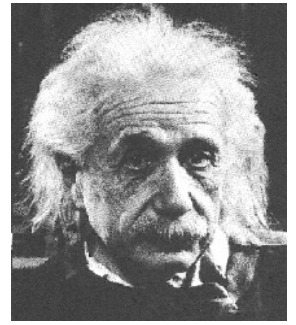
一般相対性理論



(時空の曲がり) = (質量エネルギー)



重力波とは



時空のゆがみが波動として光速で伝搬する現象

アインシュタイン方程式により重力波の存在は示される

しかし、非常に微弱なため、実験的な確認が長らく出来なかった。

重力波の発生源

強い重力波を出すには、
強い重力場と高速運動が必要

ブラックホール
中性子星

及びこれらが関係する天体現象
(超新星爆発, ガンマ線バースト, . . .)

普通の恒星や惑星も発生源だが, 弱い

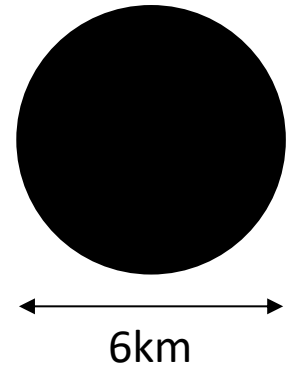
ブラックホール(BH)

光すら外に出ることが出来ない, 強い重力場をもつ
時空の領域

太陽がブラックホールに
なったら直径は約6km

時空の「穴」

物質はない



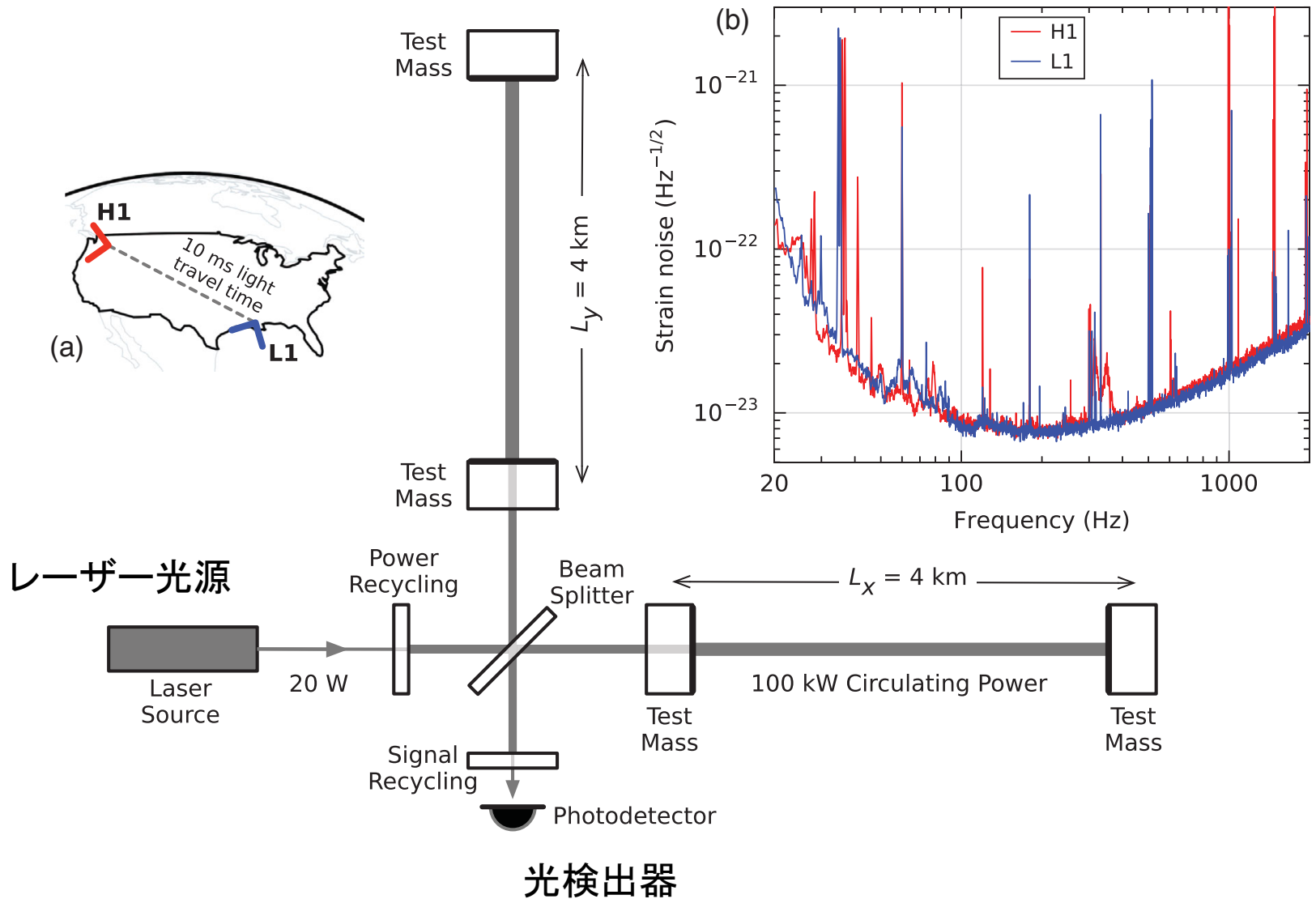
2つのBHが衝突しても光(電磁波)は放射されない

アインシュタイン方程式の解

1916年 球対称ブラックホール解 (Schwarzschild1873-1916)

1963年 回転ブラックホール解(Roy P. Kerr 1934-)

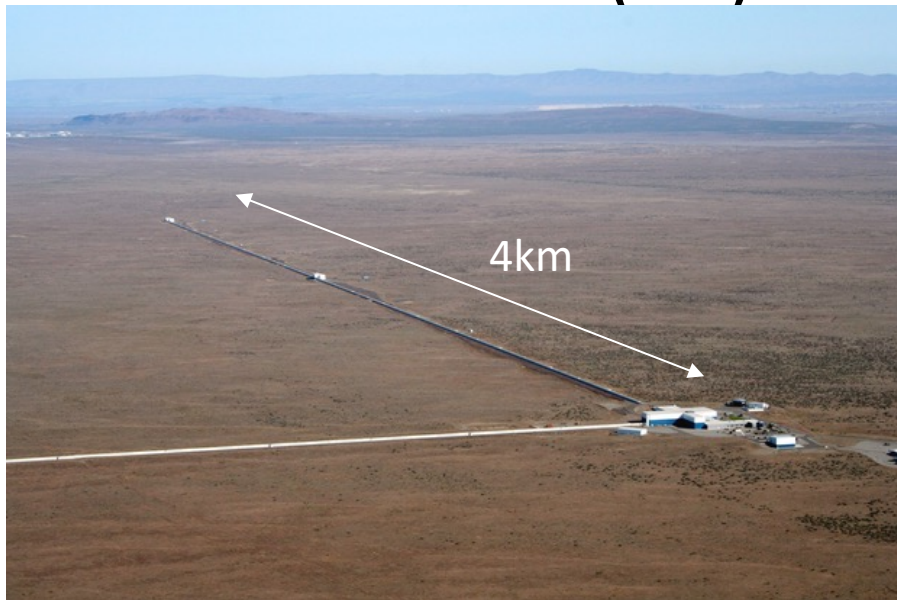
レーザー干渉計



アメリカ LIGO(ライゴ)



LIGO-Hanford(H1)

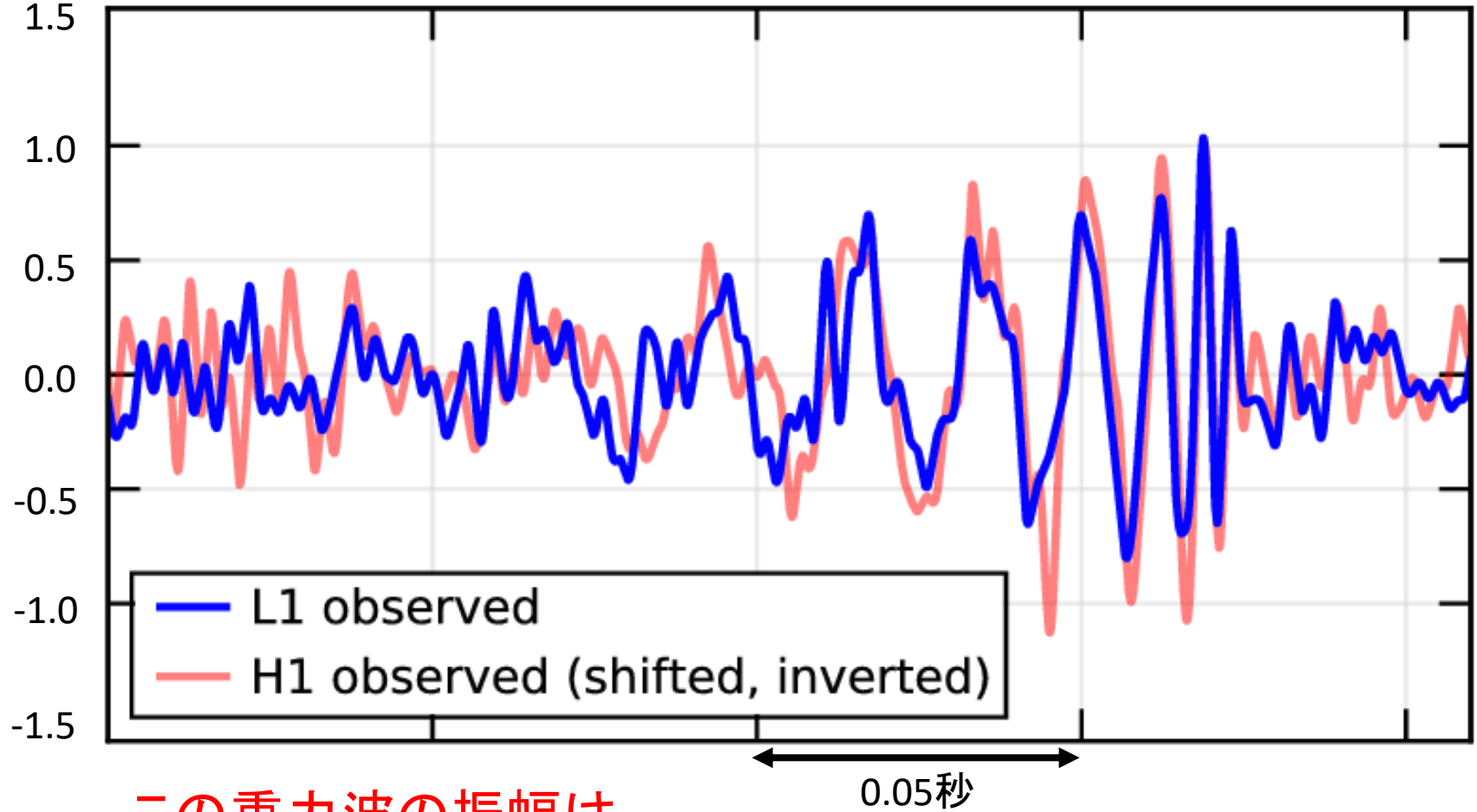


LIGO-Livingston(L1)



人類最初の重力波GW150914のデータ

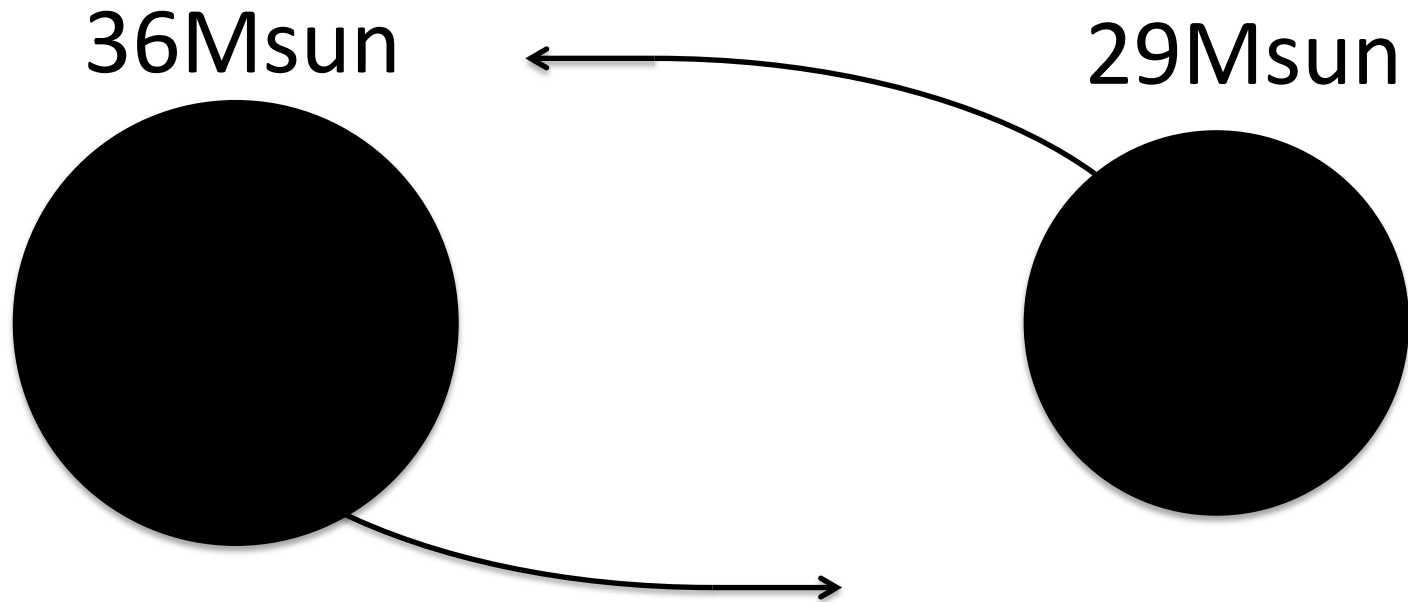
$$(x10^{-21}) \quad h = \frac{L_1 - L_2}{L} = \frac{\text{2つの腕の長さの差}}{\text{重力波が無いときの腕の長さ}}$$



この重力波の振幅は
4kmの腕の長さが、

→ $4\text{km} \times 10^{-21} = 4 \times 10^{-18} \text{ m}$ 変化する大きさ！

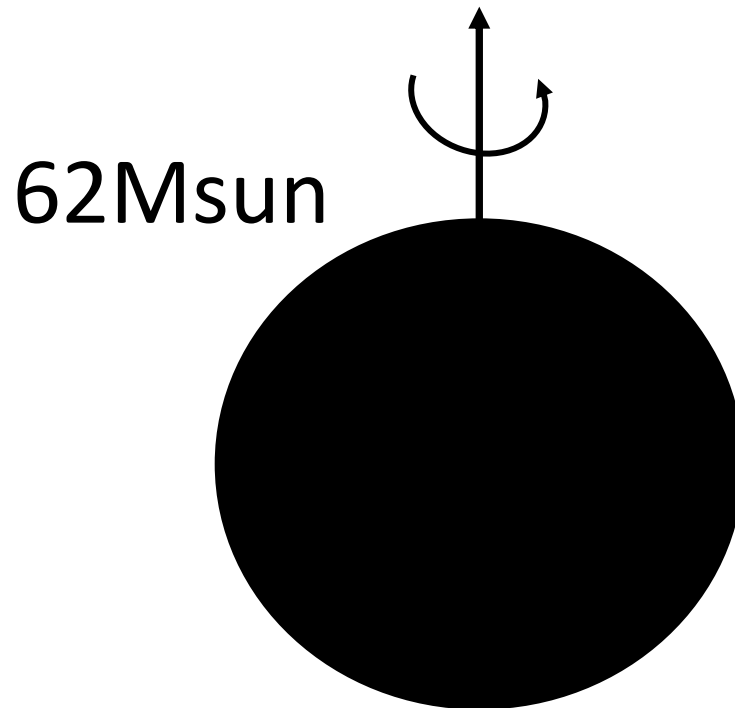
GW150914



連星ブラックホールが合体し、

$$M_{\text{sun}} = M_{\odot} = \text{太陽質量} = 2 \times 10^{33} \text{ g}$$

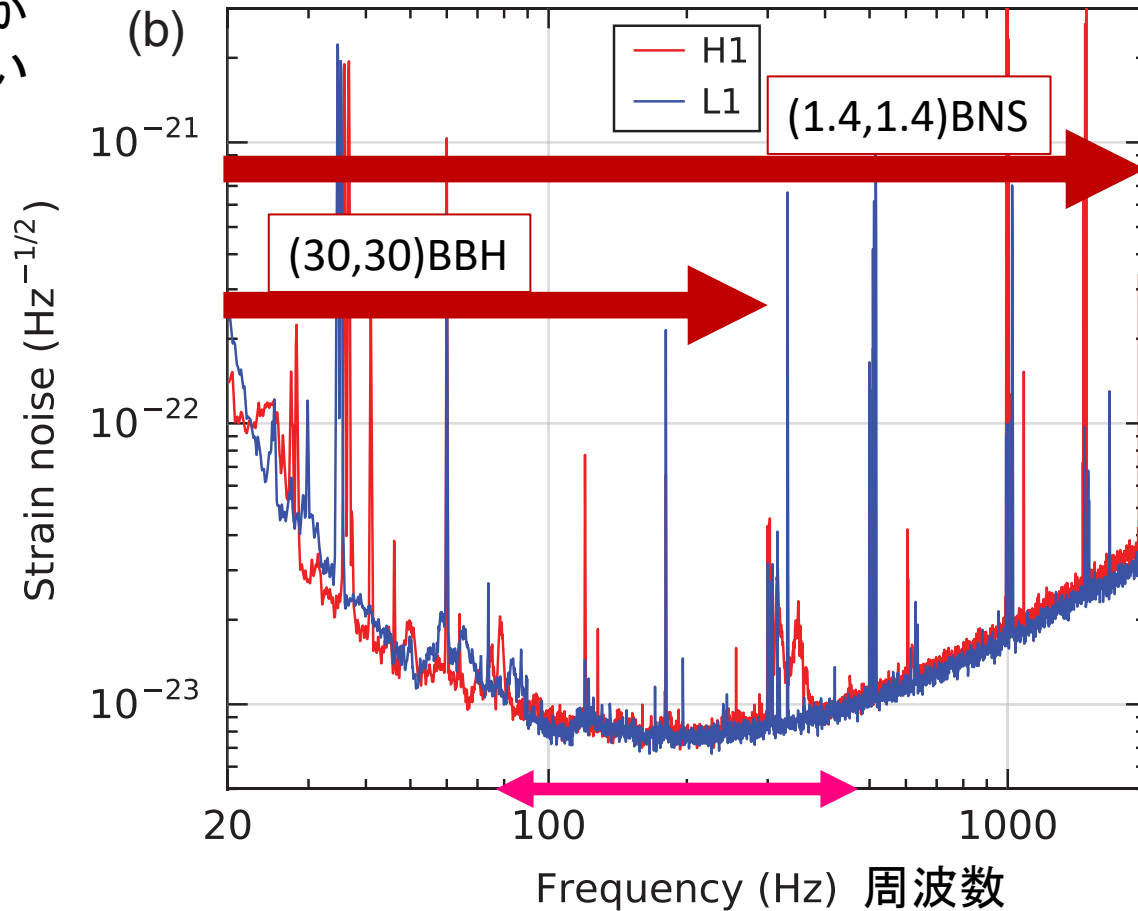
GW150914



回転ブラックホールになった
 $q=0.67$: 最大回転角運動量の67%で
回転している

レーザー干渉計の感度(ノイズレベル)

歪み雑音レベル
小さい方が
感度が良い



軽い連星は高周
波数で合体

重い連星は低周
波数で合体

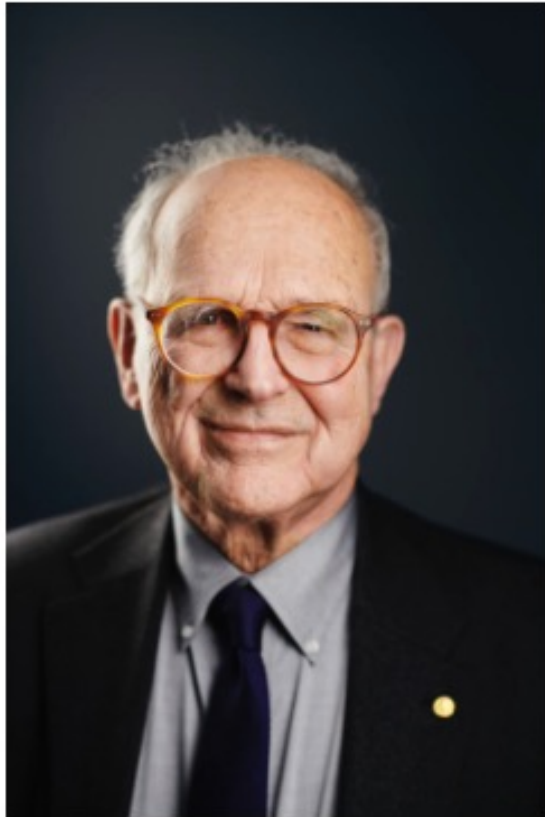
大体80/90Hzから500Hzくらいが一番感度が良い。

初観測の意義，何がわかったか？

- 人間は重力波を検出出来る
- 重力波はやはりあった.
- 地球まで伝搬している.
- 連星ブラックホールの初めての存在確認
- 30倍太陽質量のブラックホールの初の存在確認

The Nobel Prize in Physics 2017

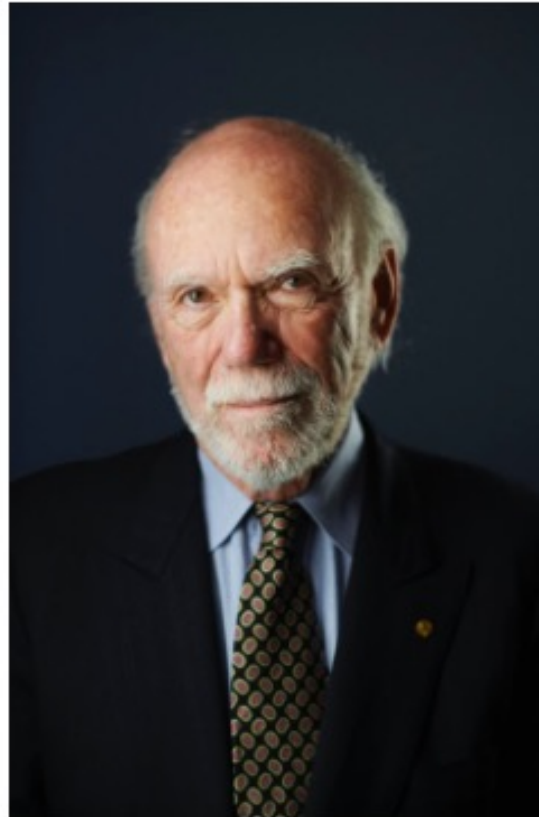
2017年ノーベル物理学賞



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Rainer Weiss

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Barry C. Barish

Prize share: 1/4



© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Kip S. Thorne

Prize share: 1/4



ブラックホールの写真! との違いは何か?

Event Horizon Telescopeグループによる観測



Credit: EHT Collaboration

楕円銀河M87の中心(5500万光年, 16.7Mpc)
太陽の65億倍の質量, 半径190億km

2019年4月10日国立天文台web
ApJ.Lett.875,L1(2019)

中性子星(NS)

超高密度の物質で出来ている。

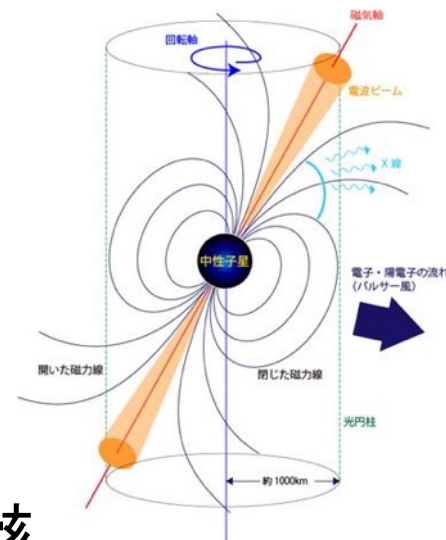
(太陽と同じくらいの質量をもつが、半径は10km程度)

従って、電磁波を放射する可能性がある



かに星雲(M1)
1054年の超新星爆発の残骸
(藤原定家「明月記」に記述)

中心に「かにパルサー」という
中性子星がある



LIGO-Virgoネットワーク

Advanced LIGO

O1: 2015/9/12 - 2016/1/19

O2: 2016/11/30 - 2017/8/25

O3: 2019/4/1 - 2020/3/27



LIGO-Hanford (H)



LIGO-Livingston (L)

Advanced Virgo

O2: 2017/8/1- 8/25

O3: 2019/4/1- 2020/3/27



Virgo (V)

連星中性子星合体信号 GW170817

2017/8/17

LIGO(H) 1台検出器でまず**重力波検出**

LIGO(L), Virgoと3台で方向決定

Fermi GBMが検出した**ショートガンマ線バースト**

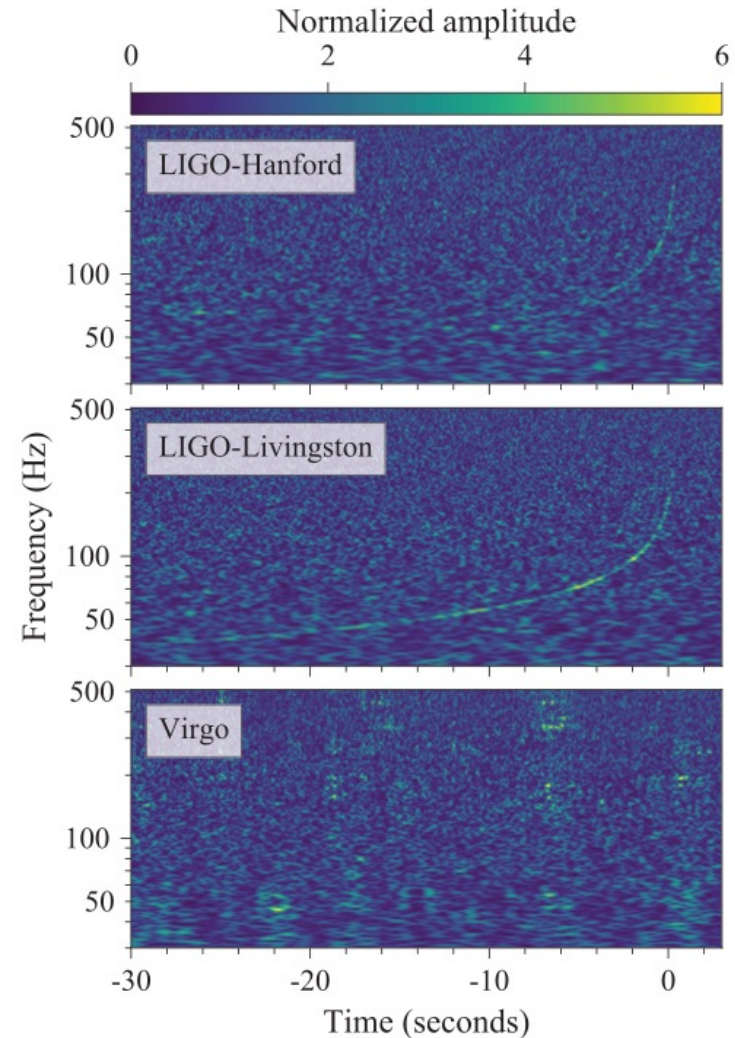
GRB170817Aと時刻と方向が一致.

(ガンマ線バーストが1.7秒遅い)

重力波で決めた方向に, **光学望遠鏡**で

新しい天体が発見された

その後, 電磁波のあらゆる波長で観測された



GW170817の光学対応天体の発見

重力波: GW170817

ガンマ線バースト: GRB170817A (59pp), 2017 October 20

Abbott et al.

光学: SSS17a / AT2017gfo

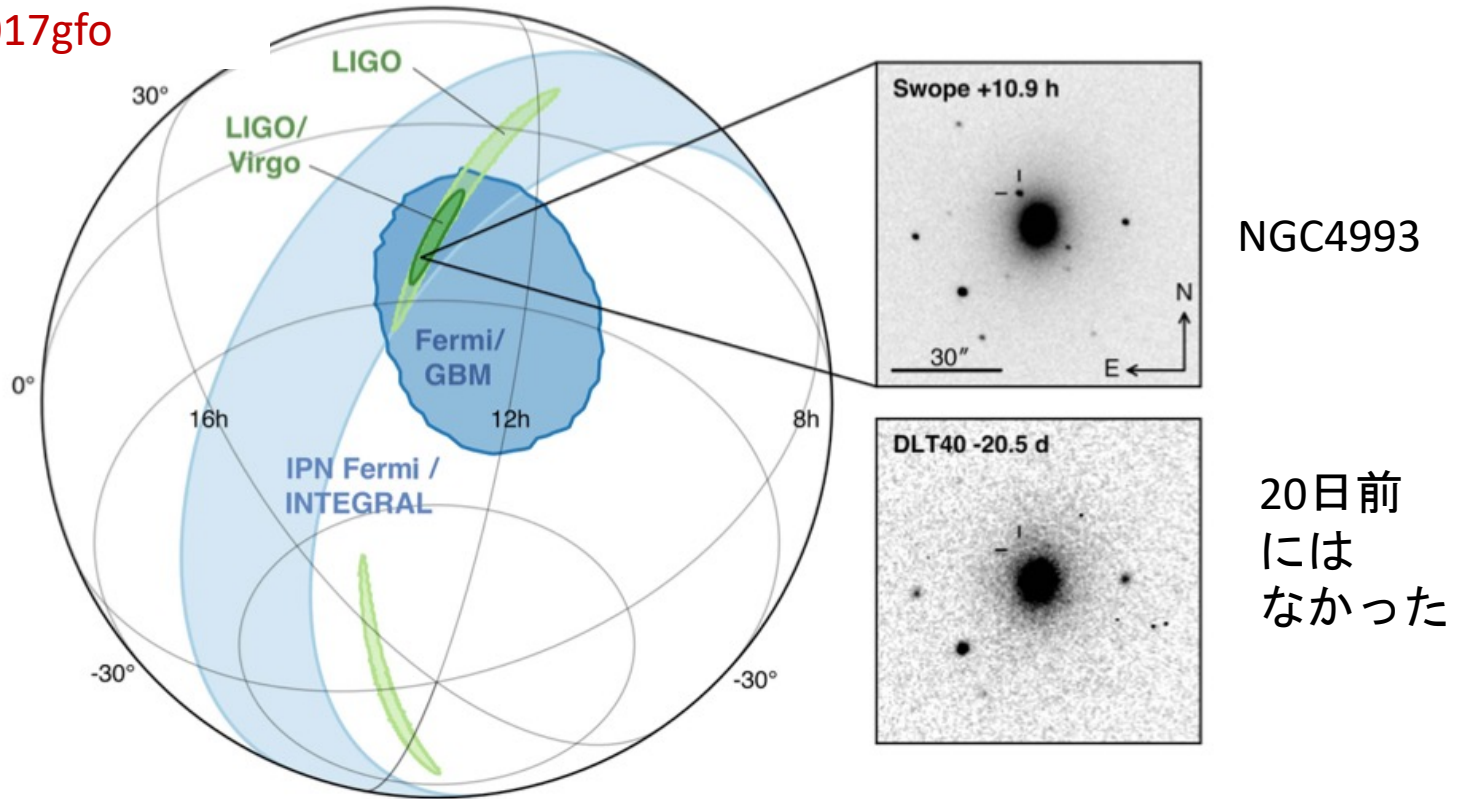
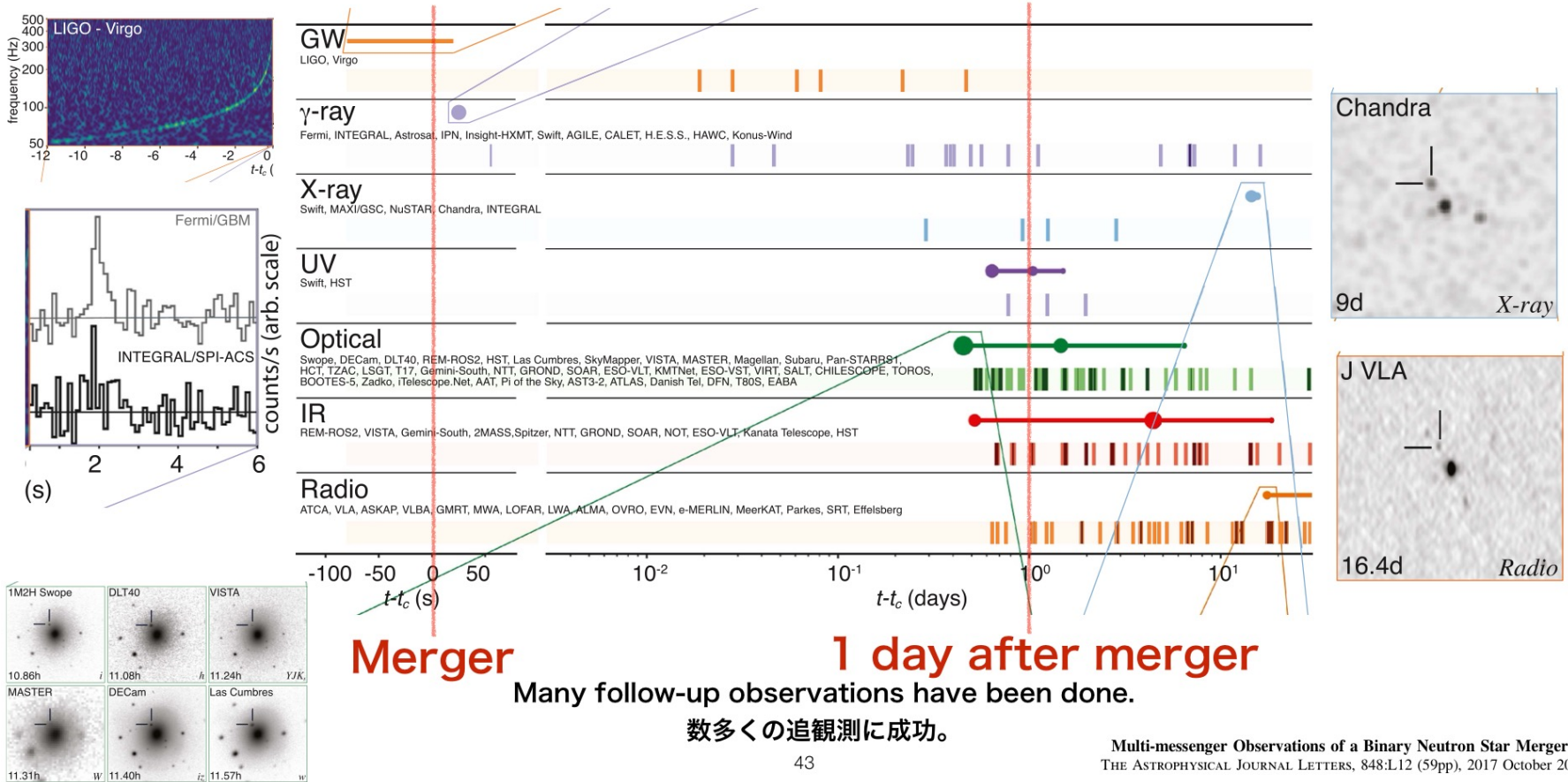


Figure 1. Localization of the gravitational-wave, gamma-ray, and optical signals. The left panel shows an orthographic projection of the 90% credible regions from LIGO (190 deg^2 ; light green), the initial LIGO-Virgo localization (31 deg^2 ; dark green), IPN triangulation from the time delay between *Fermi* and *INTEGRAL* (light blue), and *Fermi*-GBM (dark blue). The inset shows the location of the apparent host galaxy NGC 4993 in the Swope optical discovery image at 10.9 hr after the merger (top right) and the DLT40 pre-discovery image from 20.5 days prior to merger (bottom right). The reticle marks the position of the transient in both images.

Multi-messenger Observation in GW170817



連星中性子星合体観測の成果

- 中性子星を構成する超高密度物質の性質
- 電磁波による観測
 - 短いガンマ線バーストとの同時観測
 - 可視光赤外線(キロノバ, マクロノバ)
=> 重元素合成の現場か?
- 宇宙の膨張則(ハッブル定数)の新しい制限
 - 重力波による距離の決定
- これらを可能にしたのは、重力波観測で方向を絞り込めたことが大きい

地球70個分の金!!

ガンマ線バースト

ガンマ線バースト・・・ガンマ線が数秒から数時間に渡り地球に降り注ぐ現象。
天球上の様々な方向で1日数回発生している。
1967年、アメリカの核実験監視衛星Velaによって発見された。

何がバーストを発生させているかが謎。

2秒以下の短いバースト波は、連星中性子星合体である可能性が言われていた。

GW170817は、連星中性子星合体がガンマ線バーストを起こしたことが確認された初めての例となった



J-GEM

2017.08.18-19

2017.08.24-25

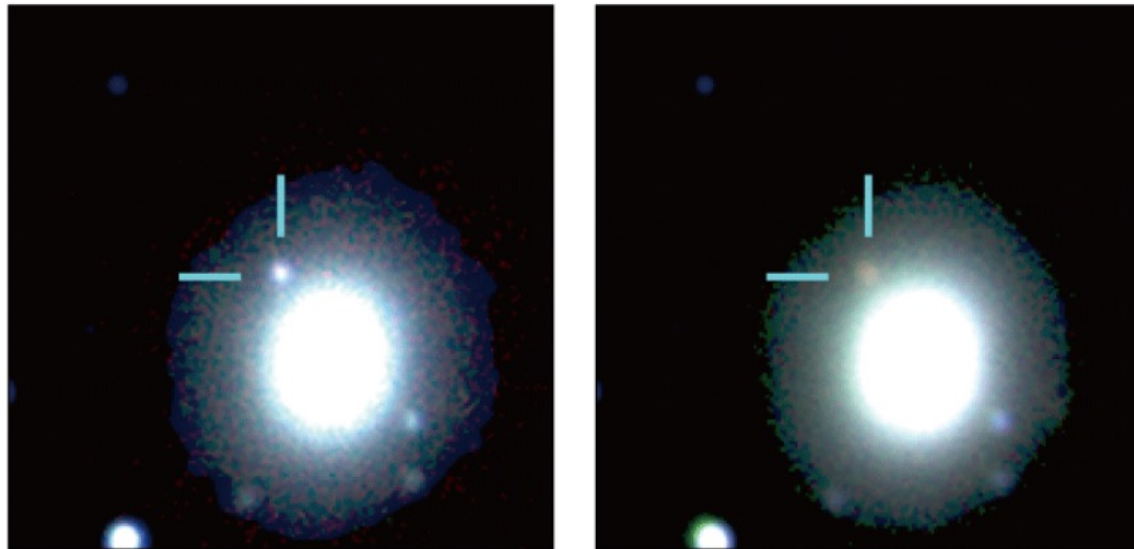


図1: 日本の重力波追跡観測チーム J-GEM が撮影した重力波源 GW170817。うみへび座の方向にある銀河 NGC 4993 で発見され、地球からの距離は約 1 億 3000 万光年。ハワイにあるすばる望遠鏡の HSC による可視光線観測 (z バンド: 波長 0.9 マイクロメートル) と、南アフリカにある IRSF 望遠鏡の SIRIUS による近赤外観測 (H バンド: 波長 1.6 マイクロメートル、Ks バンド: 波長 2.2 マイクロメートル) を 3 色合成したもの (青: z バンド、緑: H バンド、赤: Ks バンド)。2017年8月24日-25日の観測では、天体が減光するとともに赤い色を示している (近赤外線で見ると明るく光る) ことが分かります。文字や矢印を省いた画像は [こちら](#)。(クレジット: 国立天文台/名古屋大学)

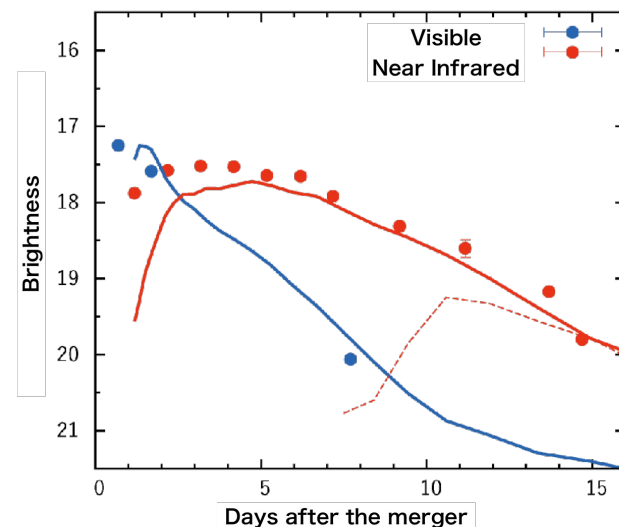
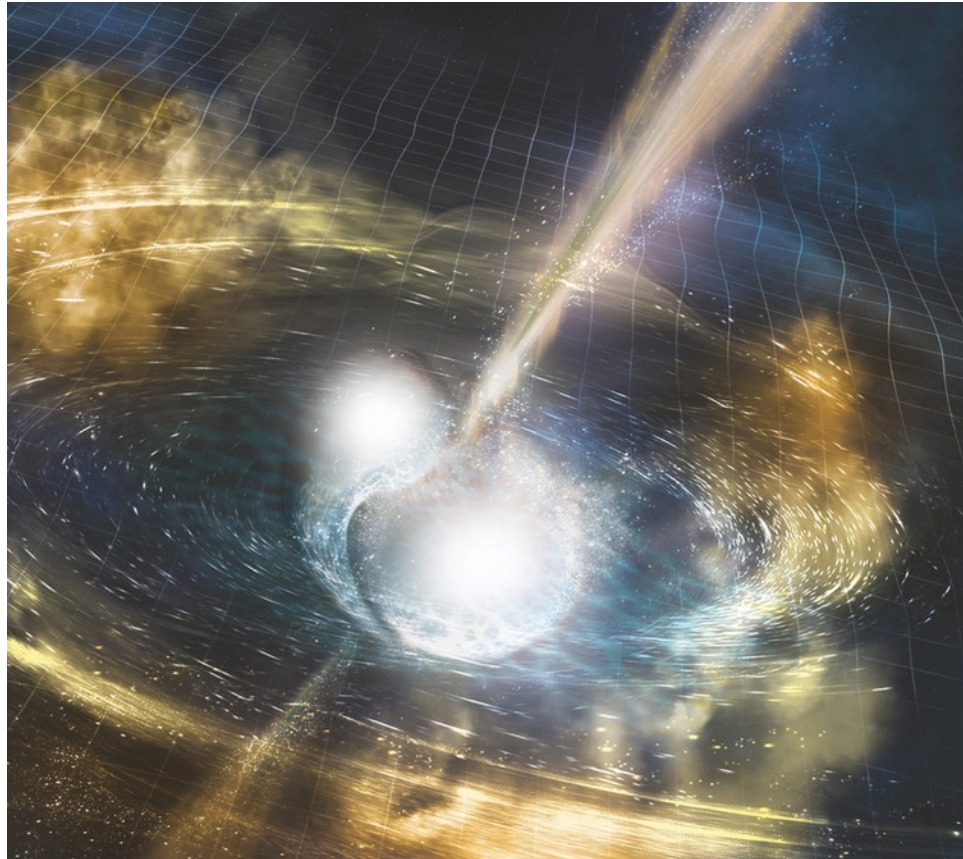


図3: 重力波源 GW170817 で実際に観測された明るさの変化 (●) と、シミュレーション (実線・破線) の比較。青が可視光線、赤が近赤外線を表しています。実線は r プロセスが起こる場合、破線は r プロセスが起こらない場合に予測される明るさの変化を表しています。r プロセスが起こる場合のシミュレーション結果と観測とがよく一致していることが分かります。(クレジット: 国立天文台)

どのように光ったのか？

<https://www.natureasia.com/ja-jp/nature/highlights/89854>



中性子星の合体の際に、まき散らされる中性子が沢山含まれる物質で、r過程元素合成がおき、鉄より重い元素が生成された。その過程で生じる放射性元素の崩壊によって発生する放射線で物質が温められて、可視光や近赤外線で光ったと考えられている。

元素の周期律表

ビッグバン

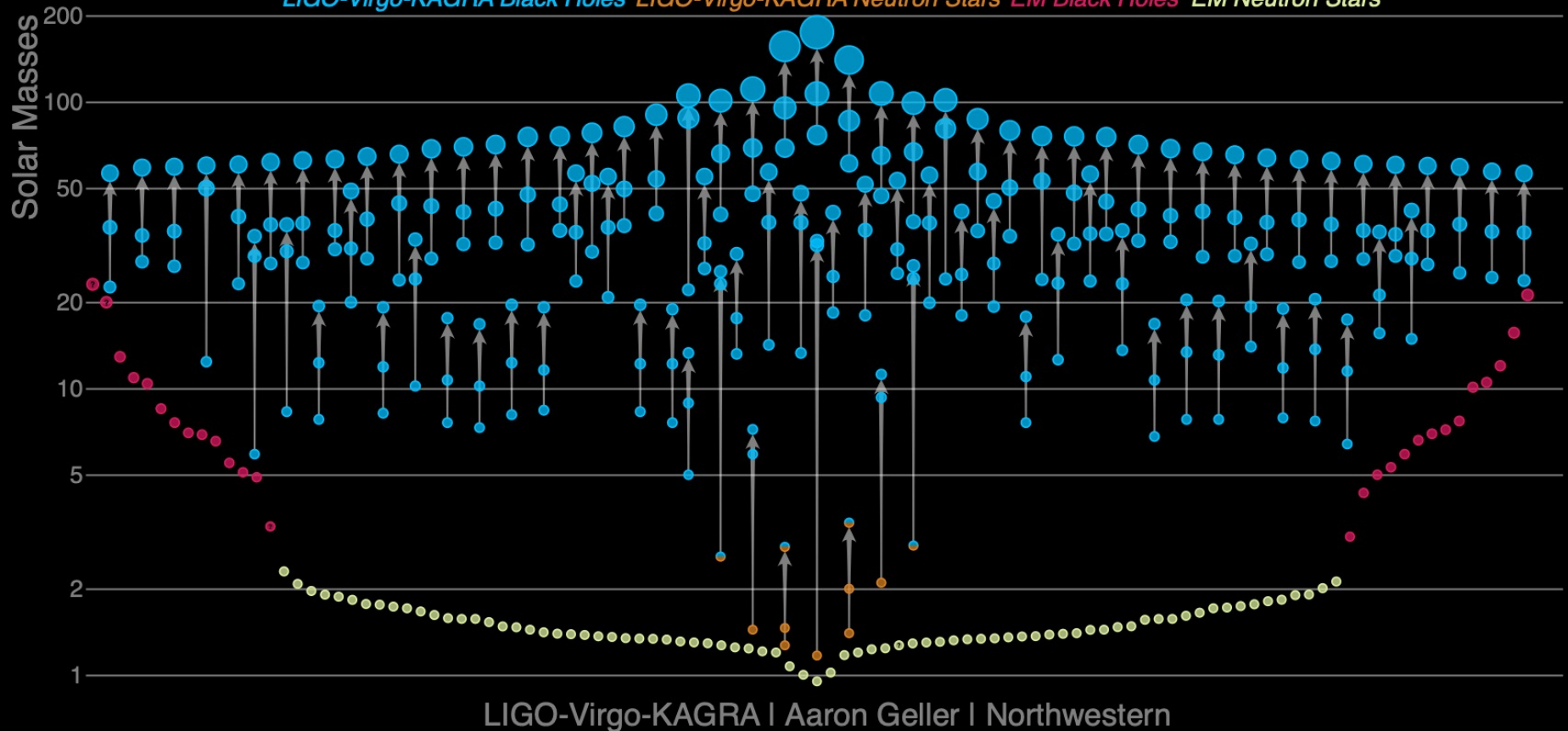


これらは、連星中性子星合体で生成されたのかもしれない

プラチナ, 金

Masses in the Stellar Graveyard

LIGO-Virgo-KAGRA Black Holes LIGO-Virgo-KAGRA Neutron Stars EM Black Holes EM Neutron Stars



LIGO-Virgo-KAGRA | Aaron Geller | Northwestern

これまでに重力波および電磁波観測により発見された中性子星とブラックホール

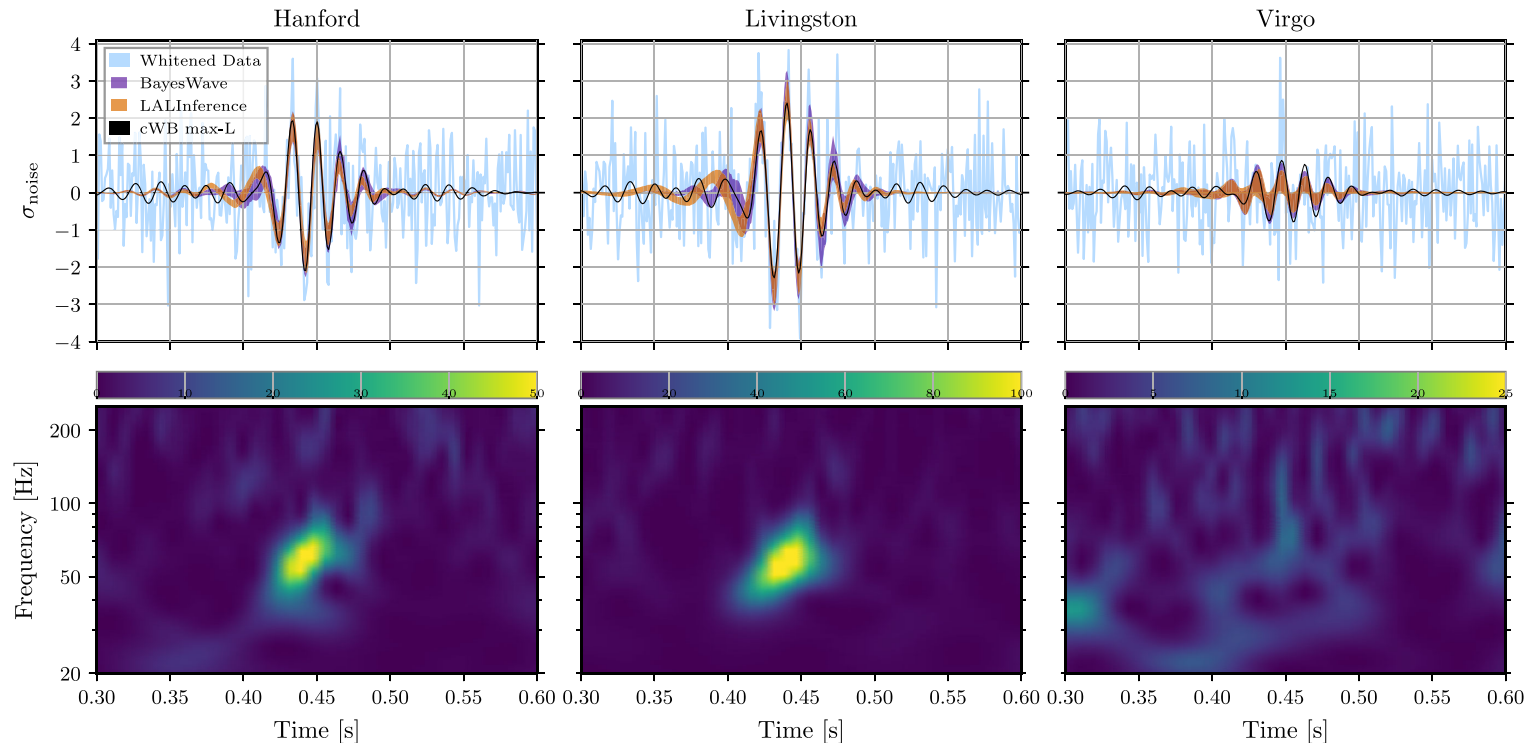
- 重力波観測O1(2015/9-2016/1), O2(2016/11-2017/8), O3(2019/4-2020/3)
- これまでに90回の連星合体による重力波観測を実現(O3では50回！！)
- BH-BH: 84, NS-NS: 2, BH-NS: 2, BH-BH/NS: 2
- 電磁波追観測に成功したのはGW170817のみ

GW190521

Phys.Rev.Lett. 125, 101102 (2020)

85倍太陽質量(カタログ論文では91倍)と66倍太陽質量ブラックホールの合体

- 合体後の質量は142倍太陽質量
=> 中間質量ブラックホール (超巨大BHと恒星質量BHの間)
(太陽の100倍から1万倍程度)
- 85倍太陽質量は, 1つの星からは出来ないと思われる(Mass Gap)
- 他にもGW190426_190642、GW200220_061928など



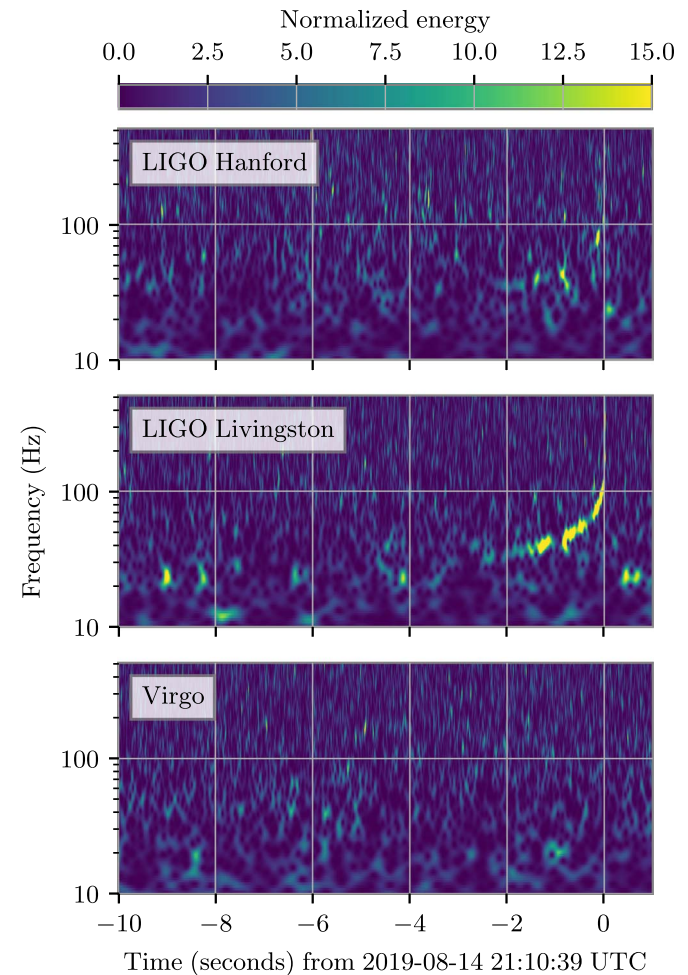
GW190814

ApJ, 896, L44 (2020)

<https://arxiv.org/abs/2006.12611>

23倍太陽質量のブラックホールと
2.6倍太陽質量の星の合体

- 2.6倍太陽質量の星
- ブラックホールと中性子星の中間質量
- どちらなのか, 決定的証拠がない.
- 波形データからは判別出来ない

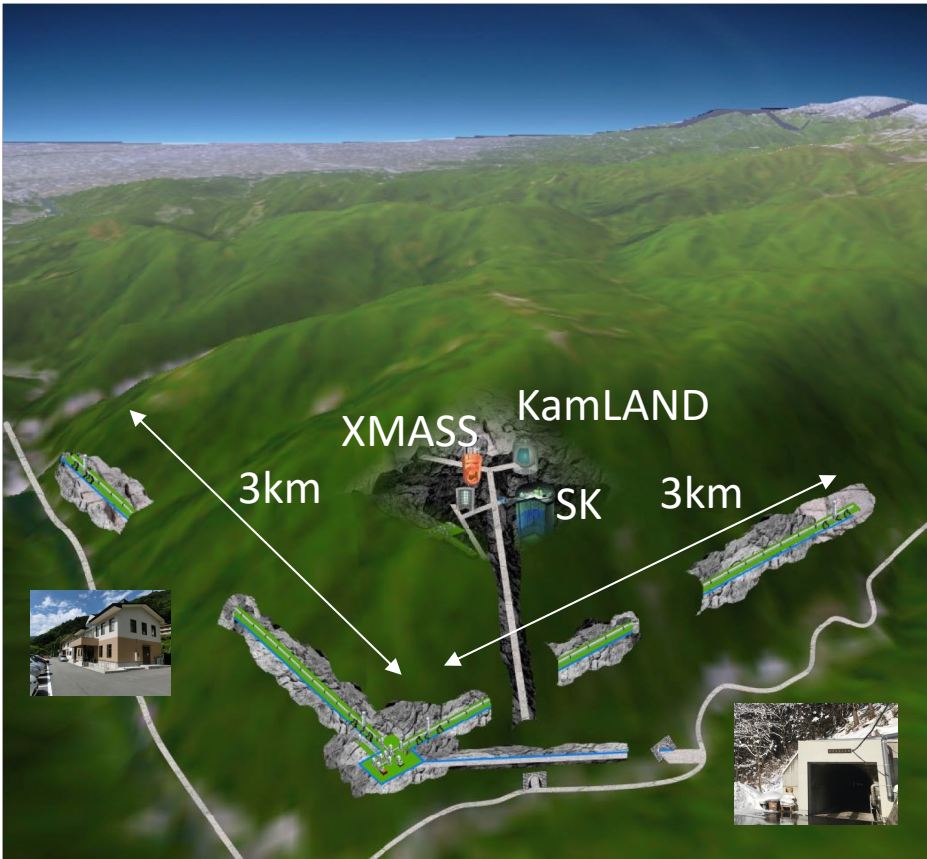


KAGRA

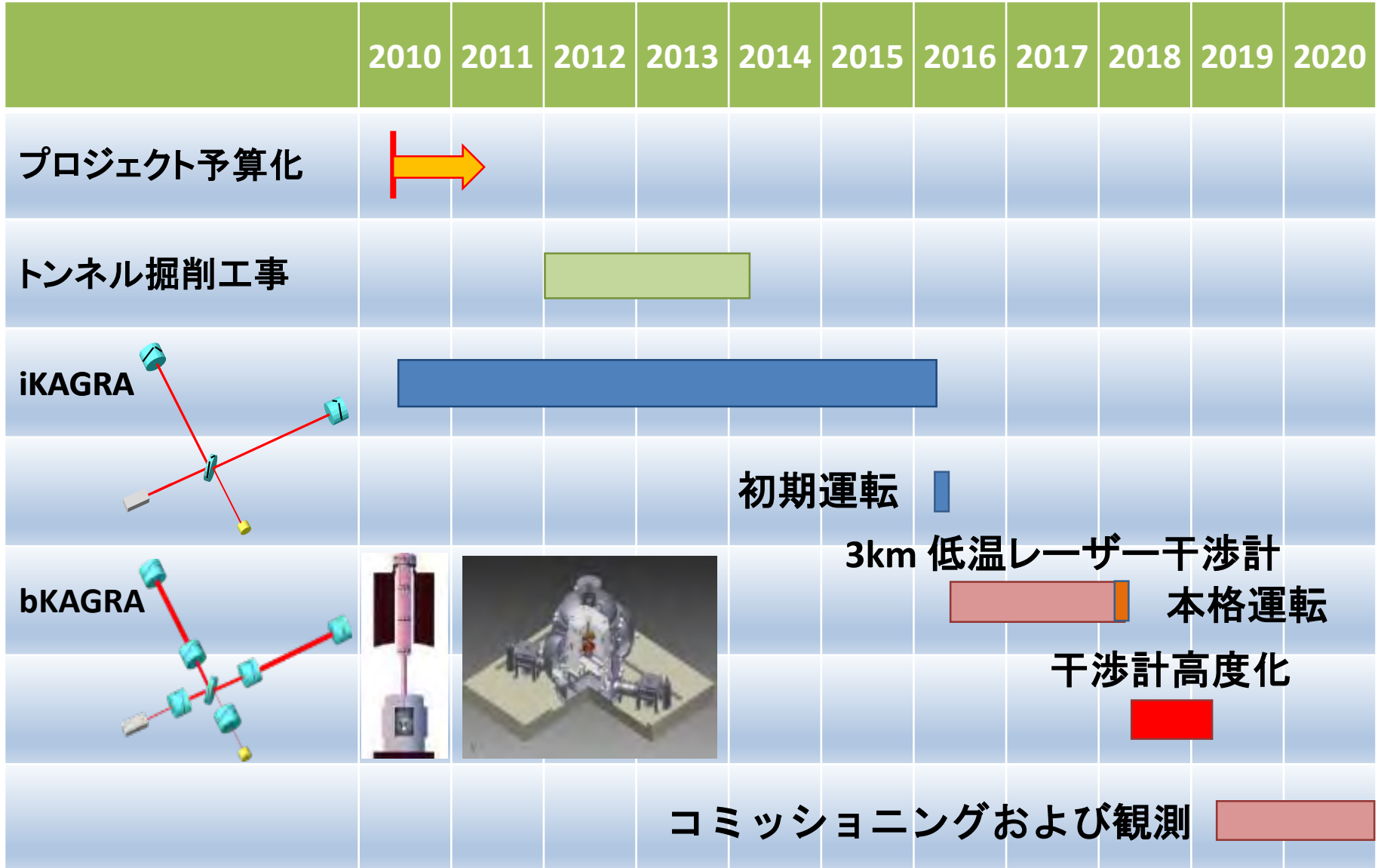
KAGRA

ホスト機関: 東京大学宇宙線研究所
国立天文台, KEK, 他国内外の多数の研究機関(～400名, ～80機関)

- 岐阜県飛騨市神岡町 神岡鉱山
- 3kmレーザー干渉計
- 地下
- 低温鏡



KAGRAの歴史



トンネル完成(2014年7月)

(掘削終了は2014年5月)



トンネル完成披露会(2014/7/4)

2010-2014

真空パイプ(6km)の
製作、現地搬入

デジタル回路

低温容器
(冷凍機付)





飛騨市北部会館&重力波解析棟



飛騨市北部会館&重力波解析棟



国際共同観測の協定書に調印



国際重力波観測ネットワークへ仲間入り

KAGRAの状況

- 2018年4月5月に初の低温鏡での試験運転を実施
- LIGO-Virgo O3中(2020年4月末まで)の観測運転を目指して作業
- 2020年3月27日 新型コロナウイルスによりLIGO-Virgo観測中断
- コロナ禍の中、2020年4月7日から4月21日まで、LIGO-Virgo-KAGRAの枠組みで、ドイツにあるGEO600と国際共同観測を実施
- 観測データの解析の結果、重力波イベントはなかった
- 現在と今後
- 2023年5月24日から、LIGO, Virgoと共に長期間観測(O4)が始まった。終了は2025年1月の予定。
- KAGRAは最初の4週間の間観測に参加→2024年春に復帰の予定だった
- 2024年1月1日の能登半島地震により復旧作業を実施中

KAGRAの貢献：到来方向の決定

2台の検出器では
到来方向の特定は出来ない

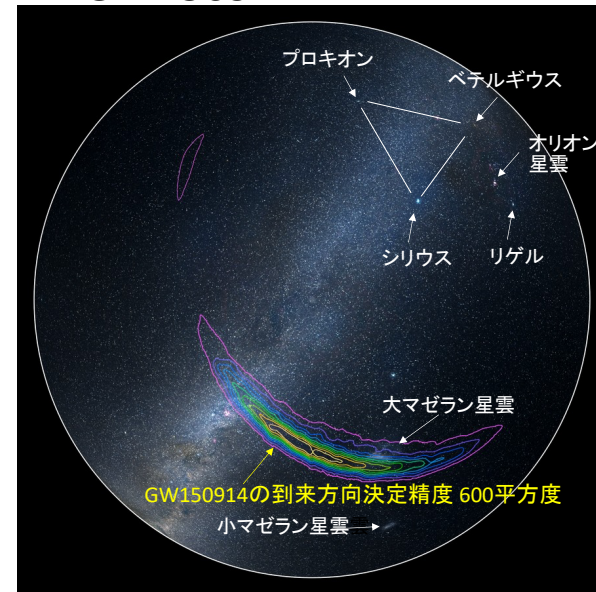
3台以上の検出器で方向が
絞れてくる

KAGRAにより、3台で観測
出来る確率が増える

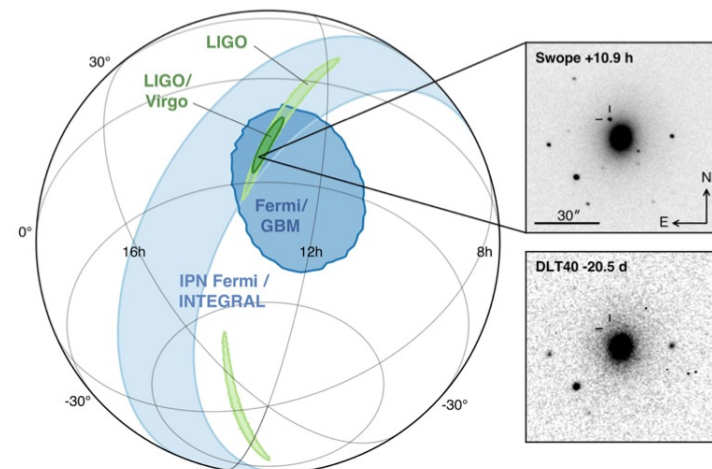
LIGO2台, Virgo, KAGRA
の計4台では、平均10平方度
程度まで決まる

<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20160211b>

GW150914



GW170817



The Nobel Prize in Physics 2002



Raymond Davis Jr.
Prize share: 1/4



Masatoshi Koshihara
Prize share: 1/4

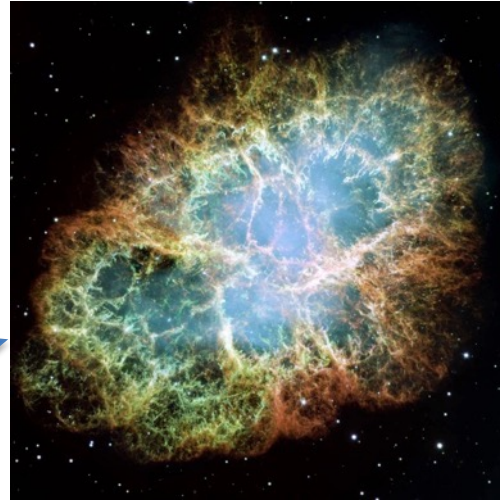


Riccardo Giacconi
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2002 was divided, one half jointly to Raymond Davis Jr. and Masatoshi Koshihara "for pioneering contributions to astrophysics, in particular for the detection of cosmic neutrinos" and the other half to Riccardo Giacconi "for pioneering contributions to astrophysics, which have led to the discovery of cosmic X-ray sources".

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

超新星爆発



The Nobel Prize in Physics 2015



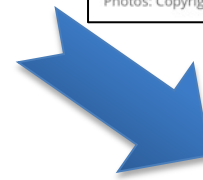
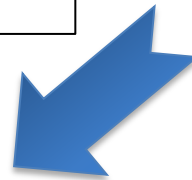
Photo: A. Mahmoud
Takaaki Kajita
Prize share: 1/2



Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

The Nobel Prize in Physics 2015 was awarded jointly to Takaaki Kajita and Arthur B. McDonald "for the discovery of neutrino oscillations, which shows that neutrinos have mass"

Photos: Copyright © The Nobel Foundation

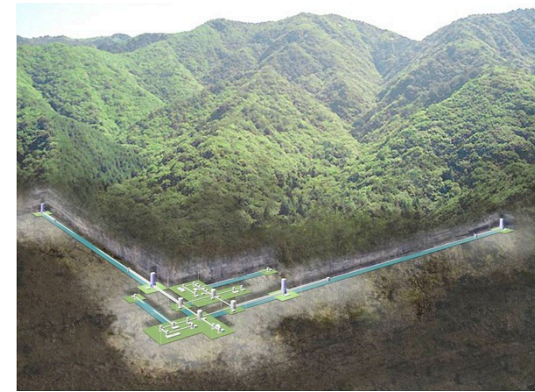


ニュートリノ

重力波



同時観測 超新星爆発メカニズム解明



KAGRA

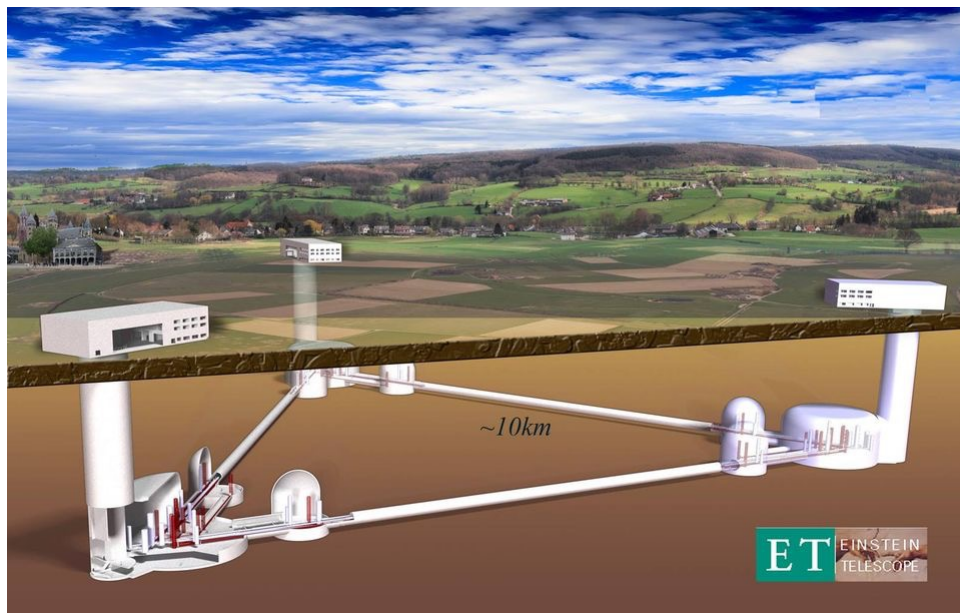
スーパーカミオカンデ

銀河系近傍で起これば可能(おそらく数十年に1回)

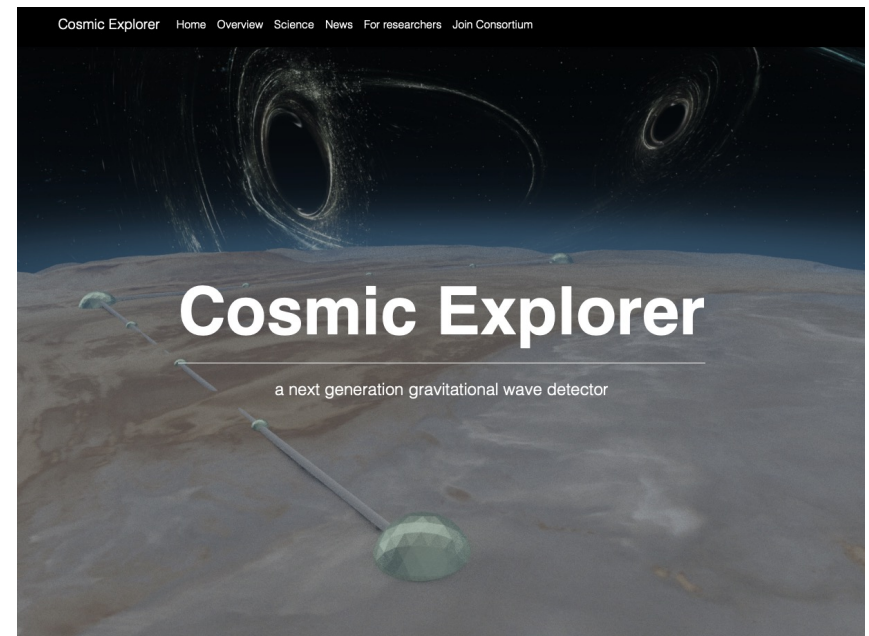
将来の検出器

欧米の地上干渉計将来計画

Einstein Telescope (ヨーロッパ)



Cosmic Explorer (アメリカ)



宇宙空間レーザー干渉計 LISA

低周波重力波(0.1mHz – 0.1 Hz)


基線長 250万km

3 台の衛星の編隊飛行

打ち上げ予定 2034年

主要なターゲット：

超巨大ブラックホールからの重力波

UNIVERSE 

LISA
Laser Interferometer Space Antenna

Gravitational waves
The first gravitational wave observatory in space

50 million km from Earth

3 spacecraft separated by 2.5 million km in triangular formation


Following Earth in its orbit around the Sun

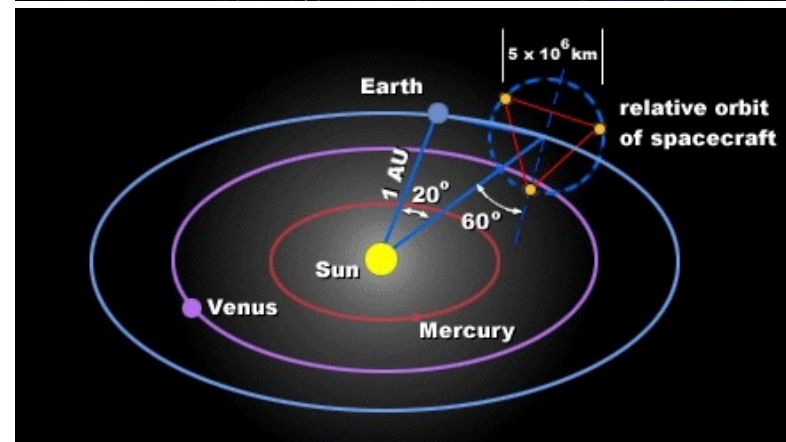
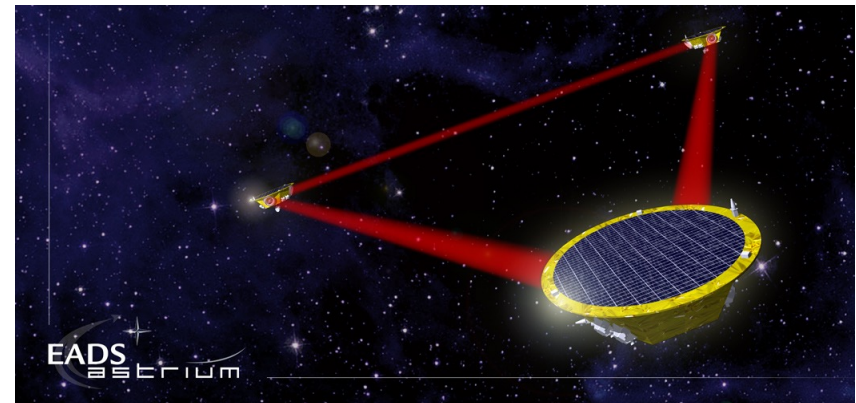
2034 Planned launch date

Predecessors: LISA Pathfinder (technology demonstration)

Core science goals

- Mergers of supermassive black holes at the centre of galaxies
- White dwarf binaries in the Milky Way
- Stellar-origin black holes falling into supermassive black holes

Space19 



まとめと展望

- 重力波天文学は2015年の初観測以来、大きく進展.
- 人類は宇宙を観測する新たな目(耳)を手に入れた.
- しかし、まだ始まったばかり.

- 地上検出器の将来計画として、ヨーロッパのEinstein Telescope, アメリカのCosmic Exploreが提唱されている.

- 宇宙空間の将来計画として、ヨーロッパのLISAがあり、2034年打ち上げを予定している.
- 日本グループはDECIGO, B-DECIGOを提唱している.
- 中国ではTianQin, Taiji計画などがある.

- 今後大きな進歩が期待される