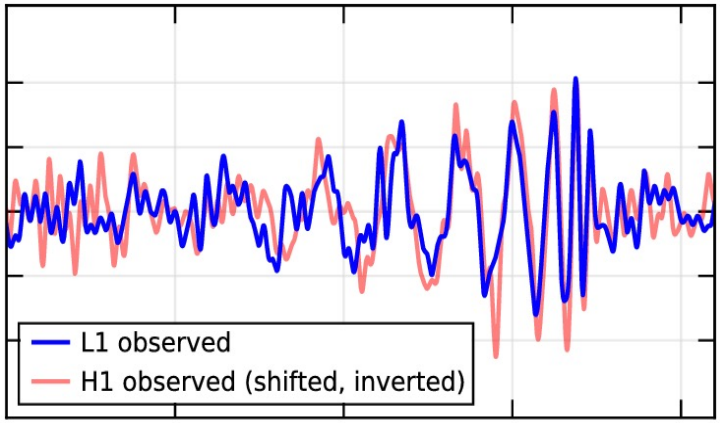


ICRR Spring School 2022
重力波

内山　隆
（東京大学宇宙線研究所）
（スライド：田越秀行）

登場人物

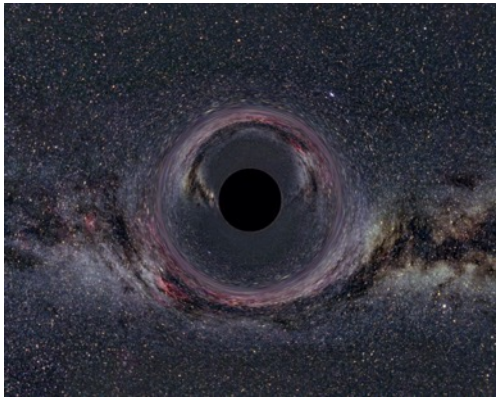
重力波



レーザー干渉計型重力波検出器

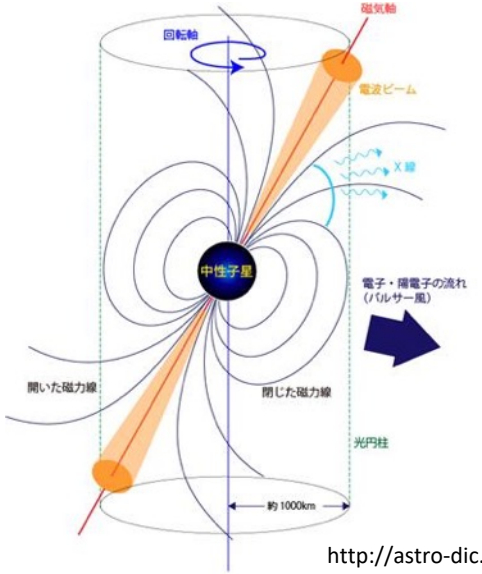


ブラックホール



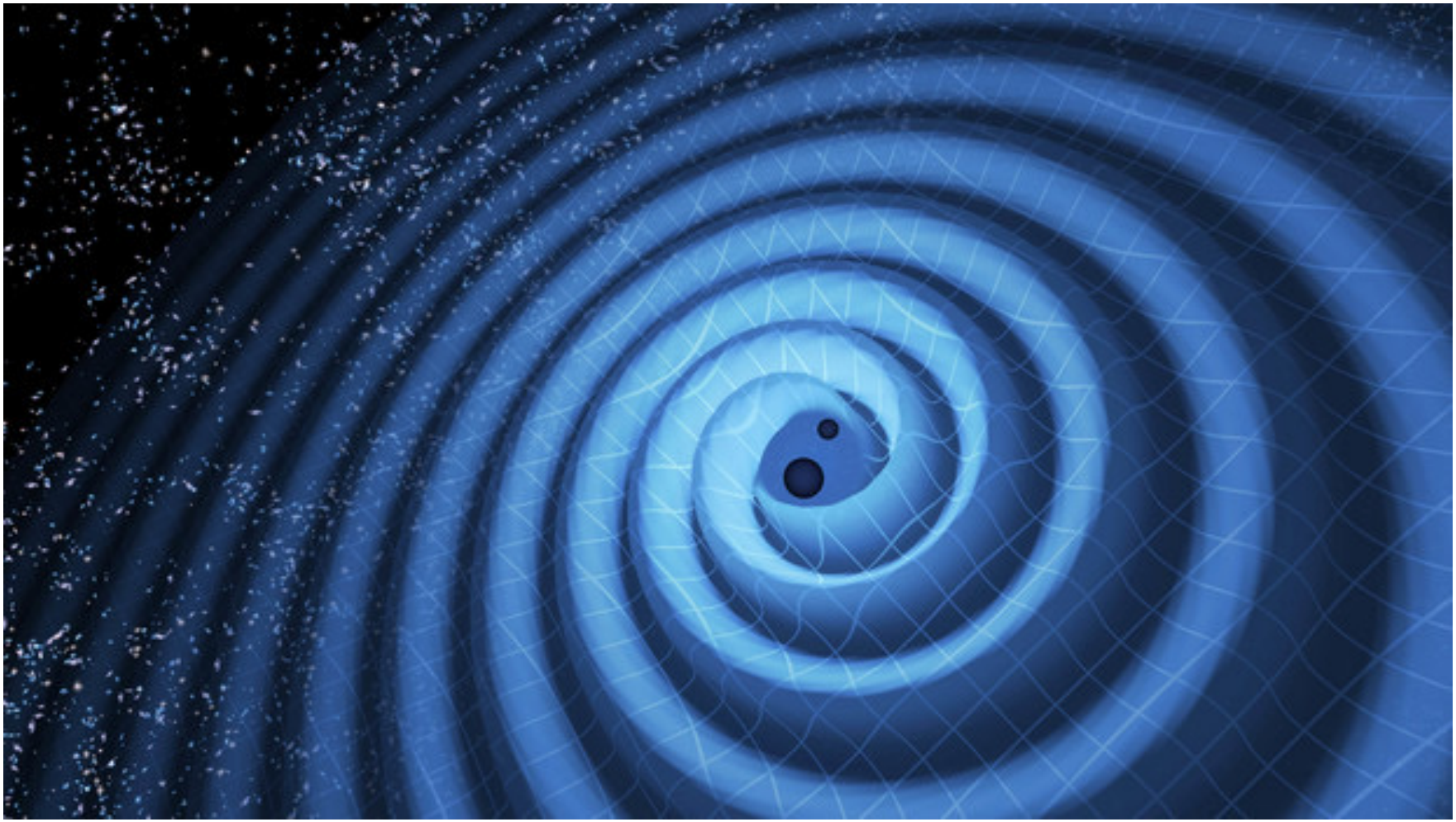
Ute Kraus, Physics education group Kraus, Universität Hildesheim, Space Time Travel, (background image of the milky way: Axel Mellinger) - Gallery of Space Time Travel, CC 表示-継承 2.5, https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=370240による

中性子星



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

重力波

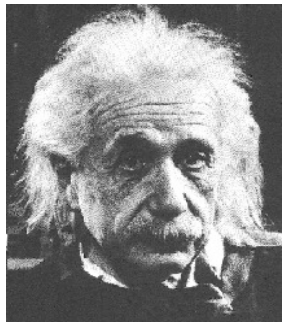


物体の運動 => 時空のゆがみの振動 => 波動として伝搬

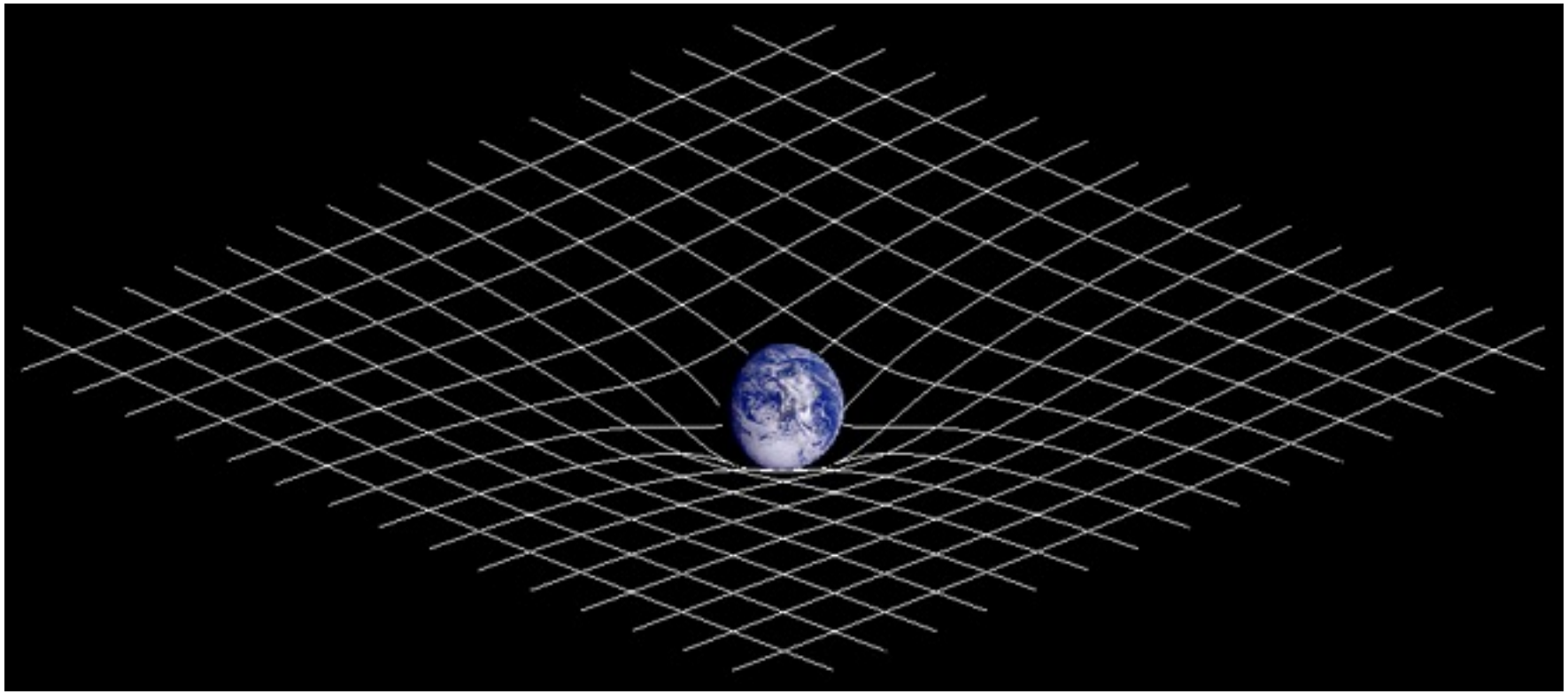
時空：時間・空間

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

一般相対性理論

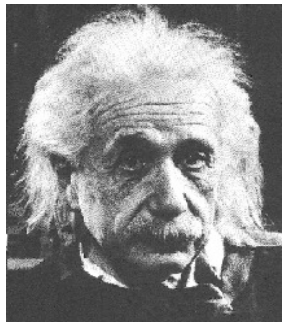


(時空の曲がり) = (質量エネルギー)



wikipediaより

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，．．．)

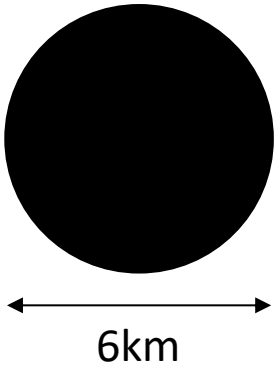
普通の恒星や惑星も発生源だが，弱い

人工的に発生させた重力波を検出することは更に困難…

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



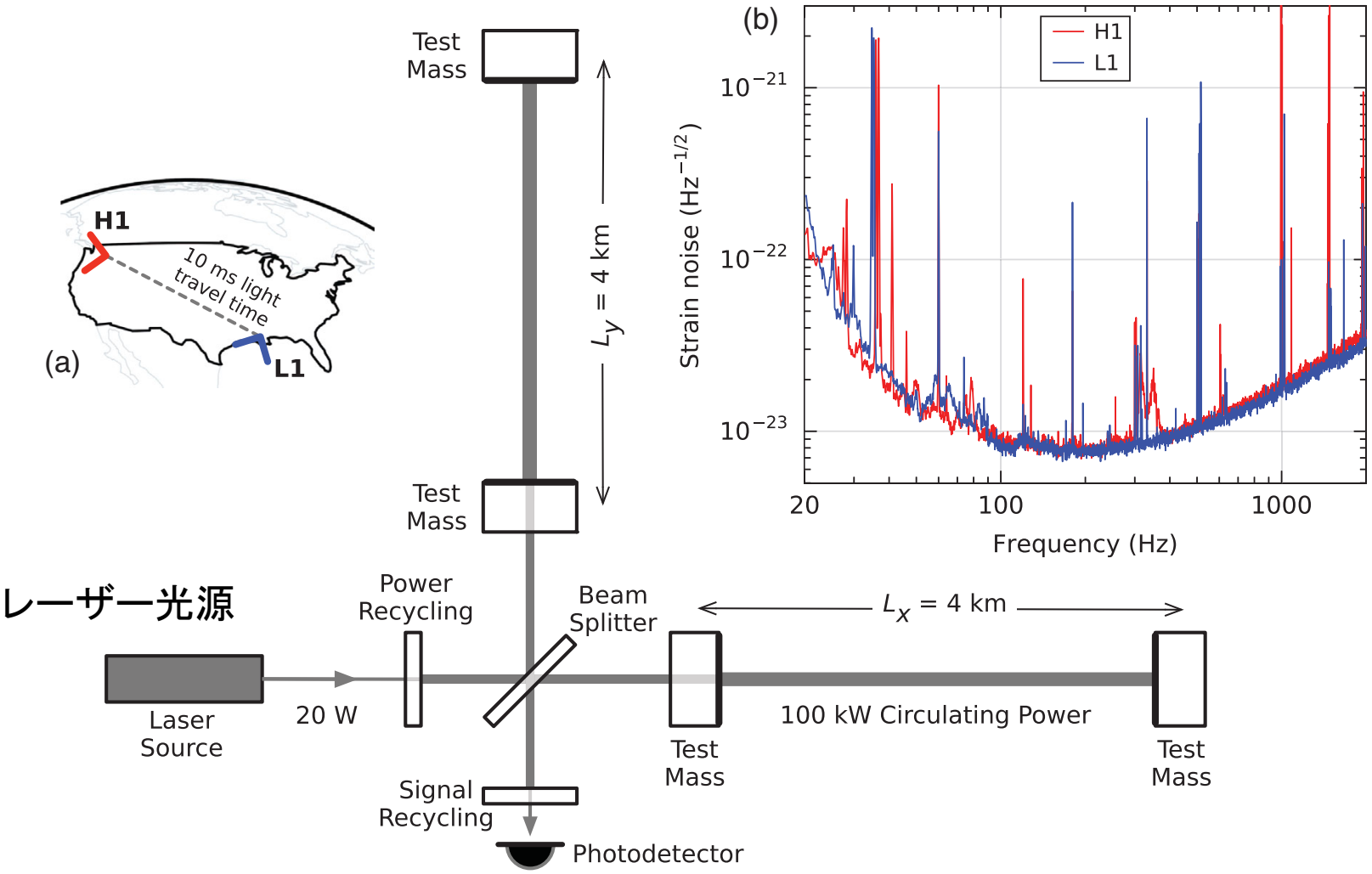
時空の「穴」

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

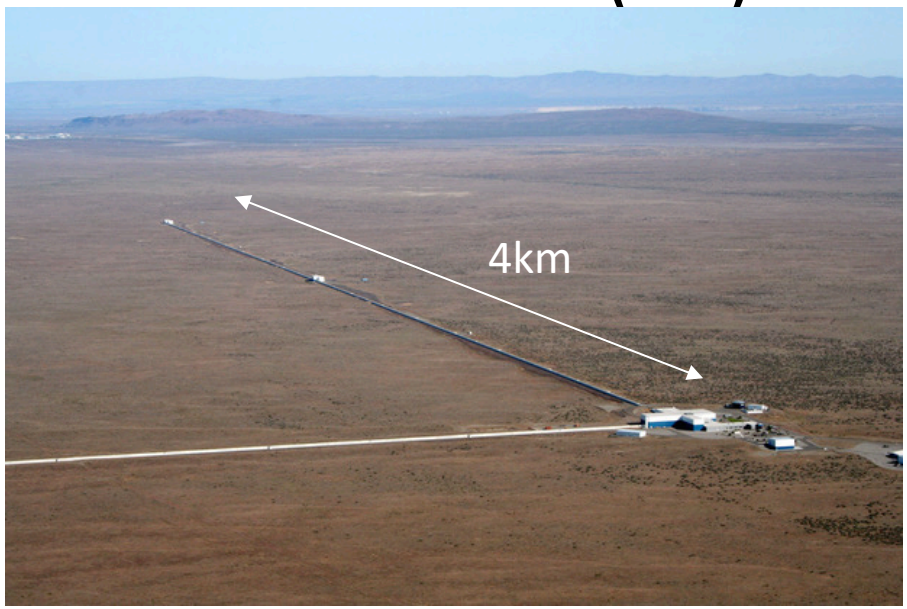


LIGO detection paper, PRL 116, 061102 (2016)

アメリカ LIGO(ライゴ)



LIGO-Hanford(H1)



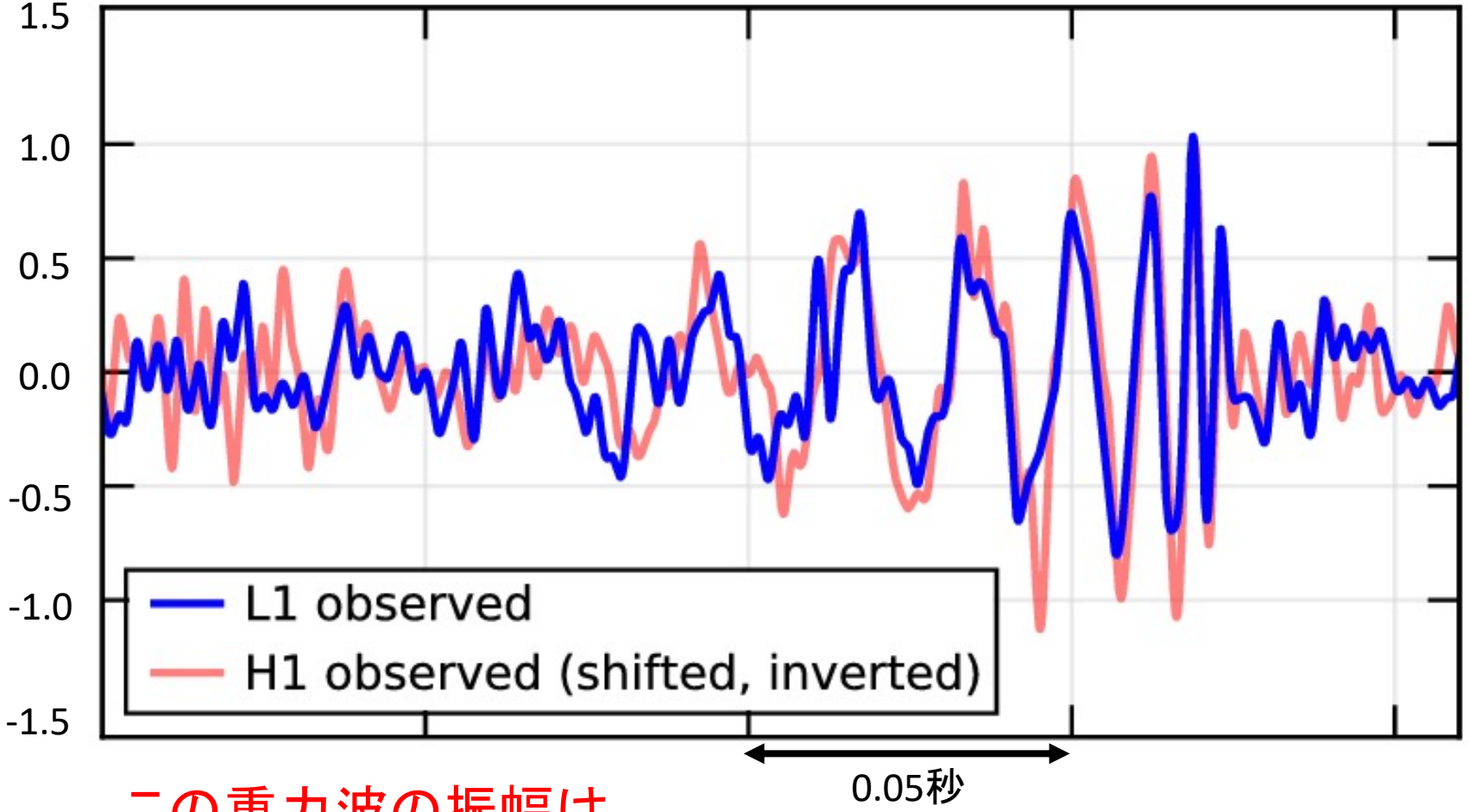
LIGO-Livingston(L1)



写真: https://www.ligo.caltech.edu/

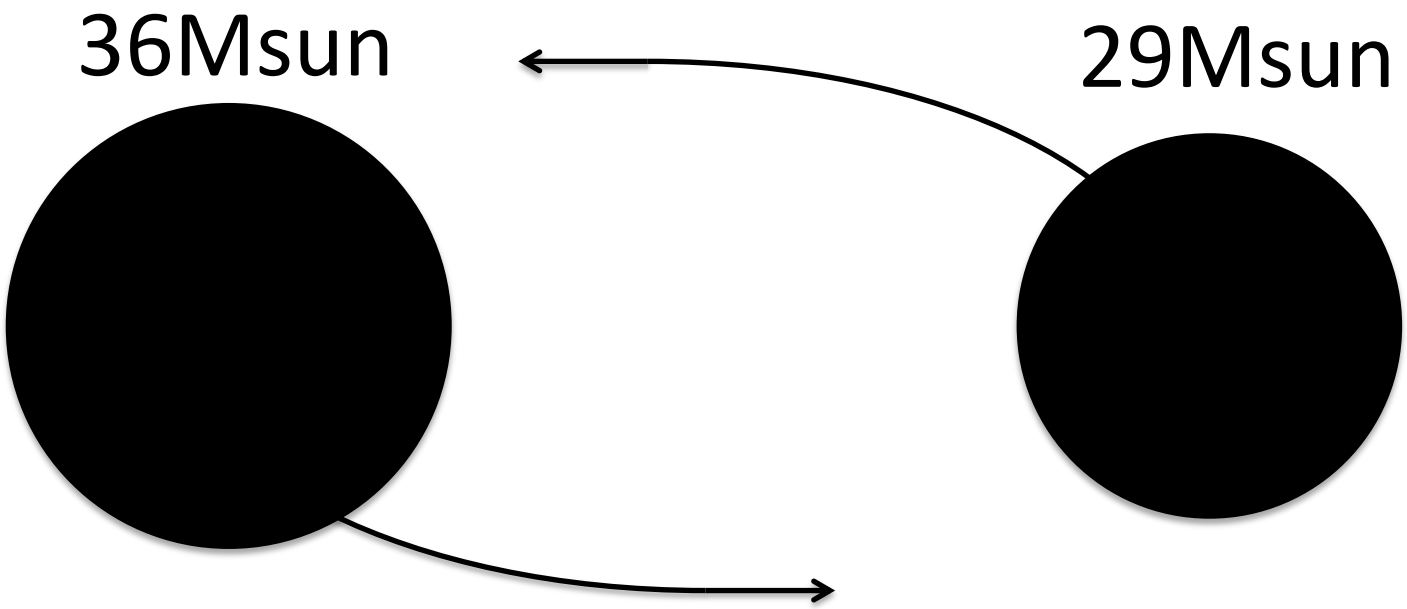
人類最初の重力波GW150914のデータ

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



この重力波の振幅は
4kmの腕の長さが,
4km x 10^{-21} = 4 x 10^{-18} m 変化する大きさ！

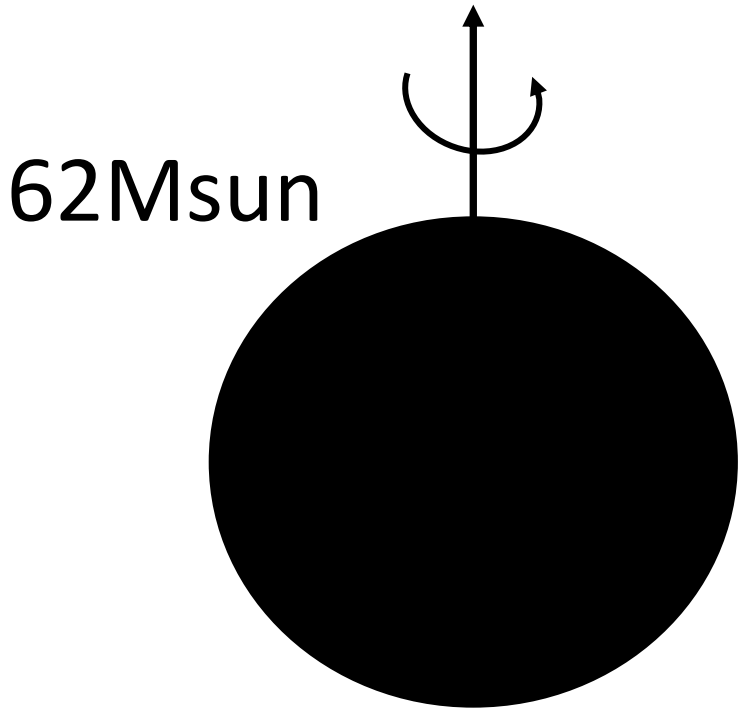
GW150914



連星ブラックホールが合体し，

Msun = $M_\odot$ = 太陽質量 = 2 x 10^{33} g

GW150914

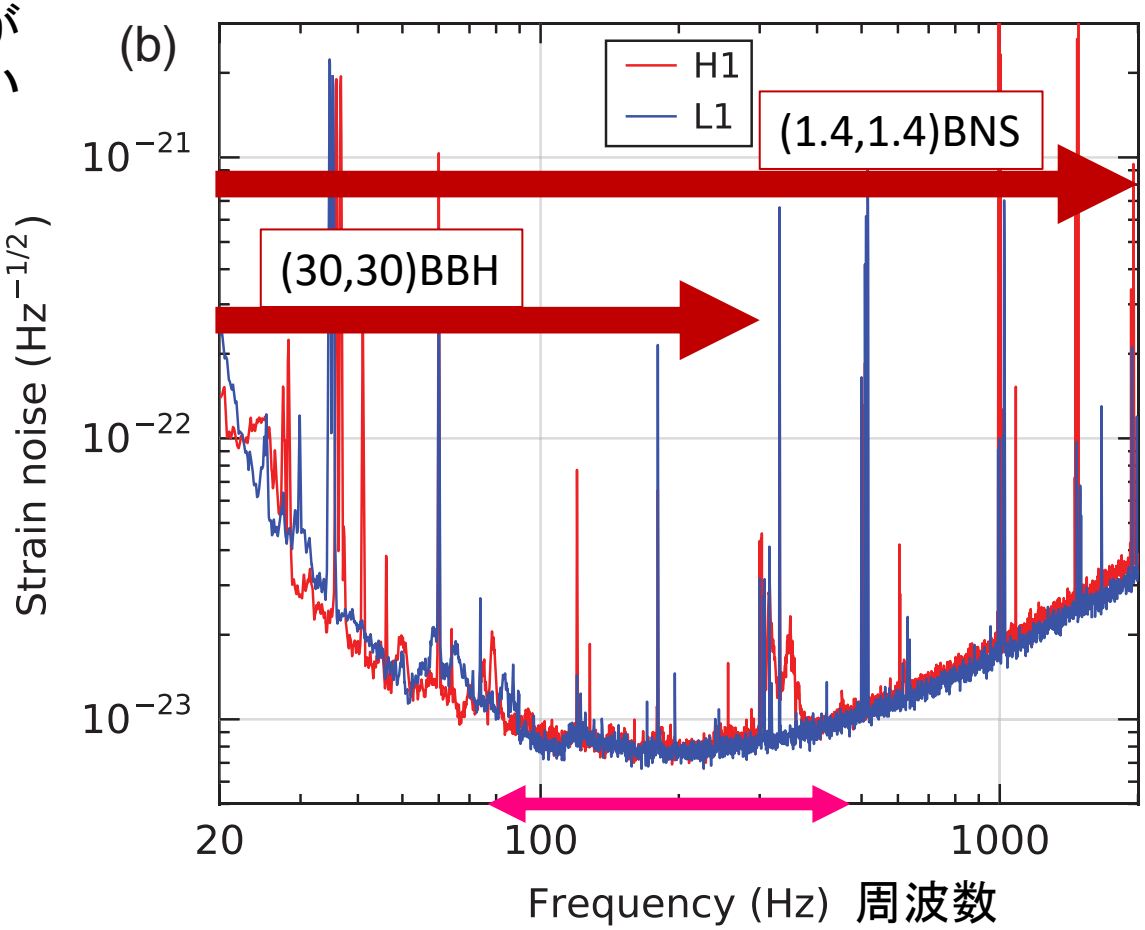


回転ブラックホールになった

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.

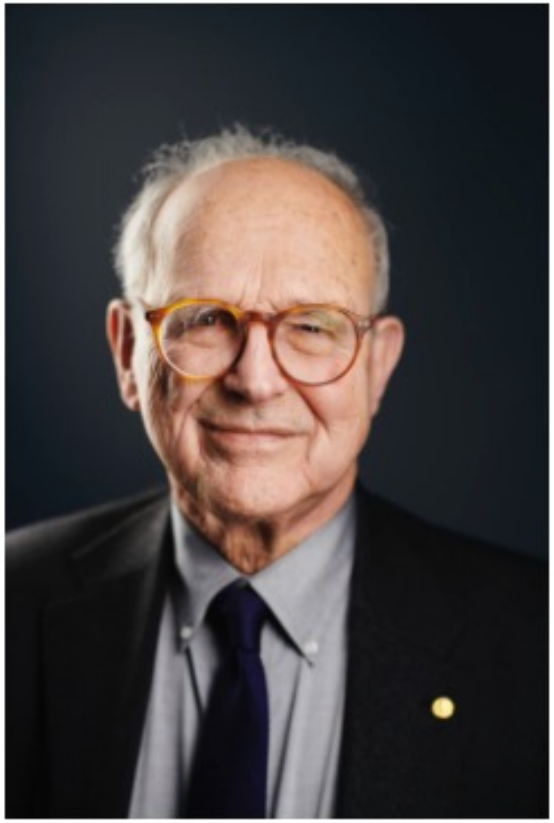
LIGO detection paper, PRL 116, 061102 (2016)

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

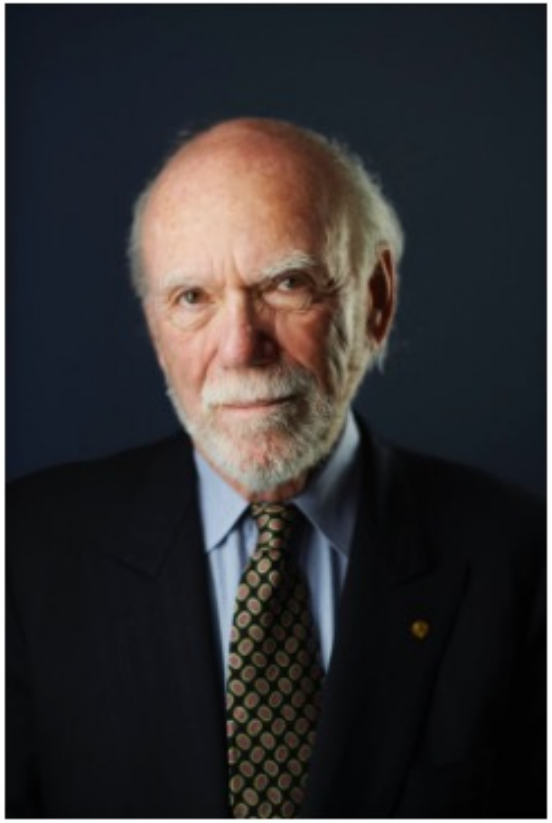
2017年ノーベル物理学賞



© 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



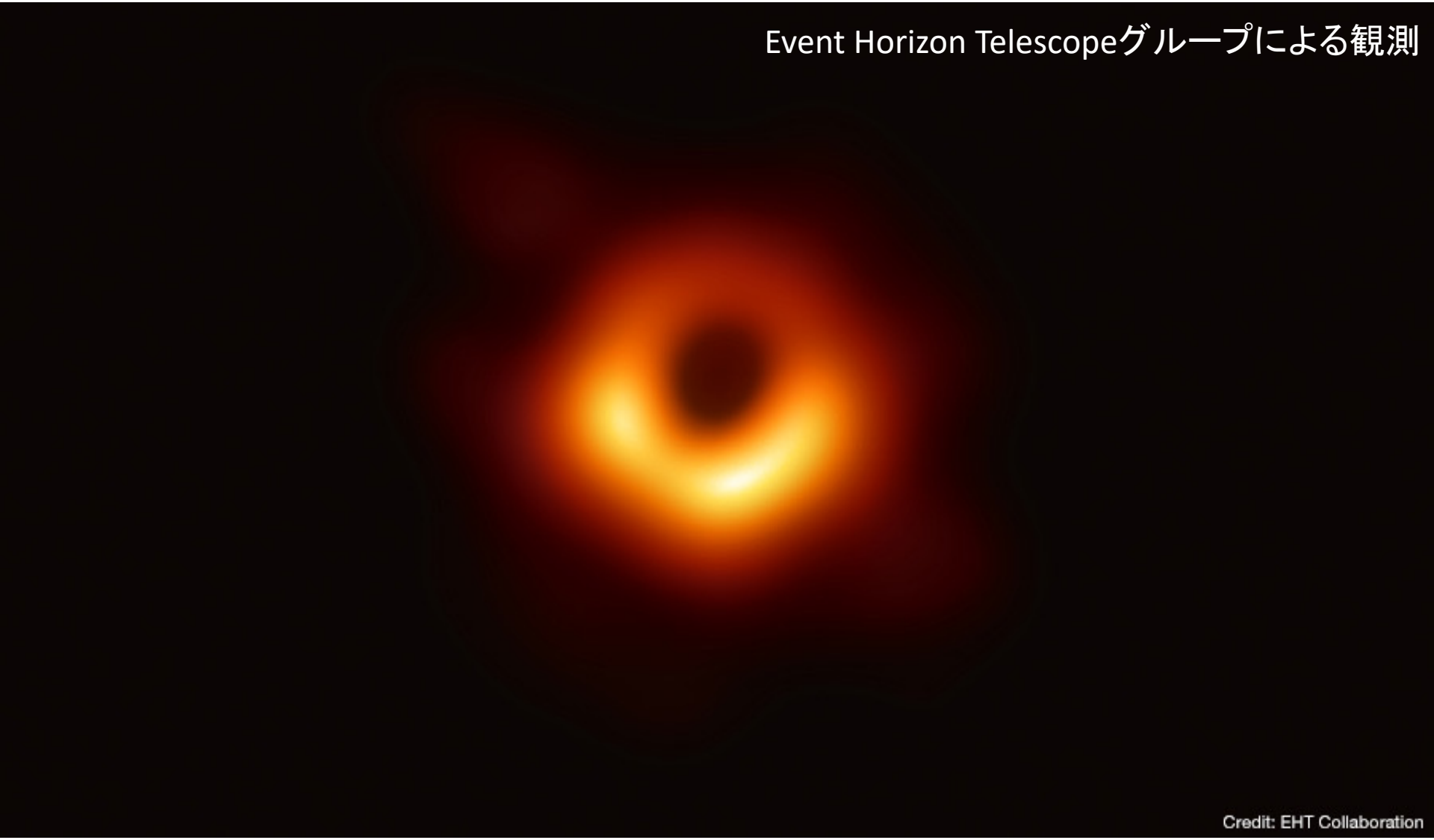
© Nobel Media AB. Photo: A.Mahmoud

Kip S. Thorne

Prize share: 1/4


36Msun
29Msun
札幌
212km
171km
日本海
日本
東京
名古屋
大阪
広島
福岡
부산
民国
200km
Google

ブラックホールの写真! との違いは何か?



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

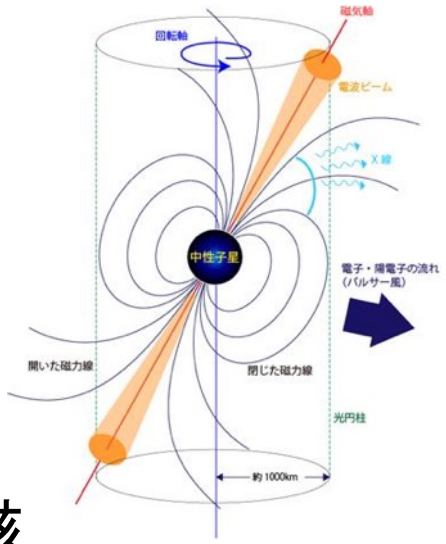
2019年4月10日国立天文台web

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





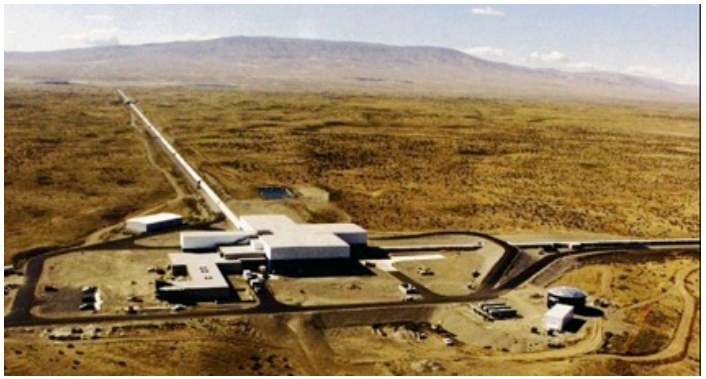
かに星雲(M1)
1054年の超新星爆発の残骸
(藤原定家「明月記」に記述)

中心に「かにパルサー」という
中性子星がある

https://www.nasa.gov/multimedia/imagegallery/image_feature_1604.html

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)

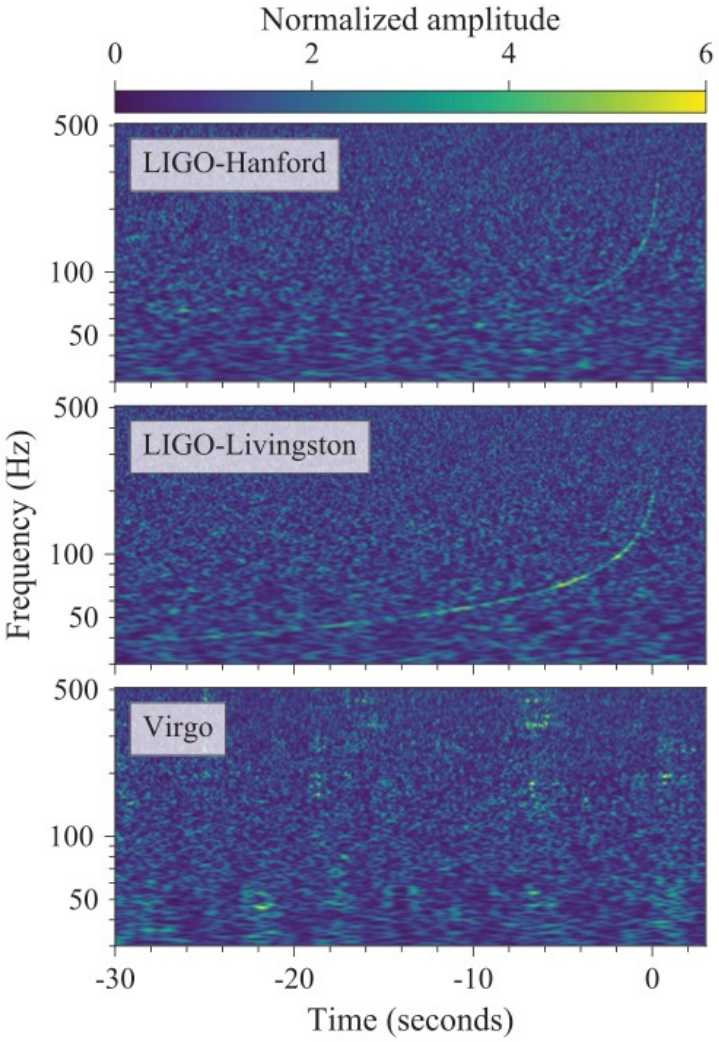
連星中性子星合体信号 GW170817

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

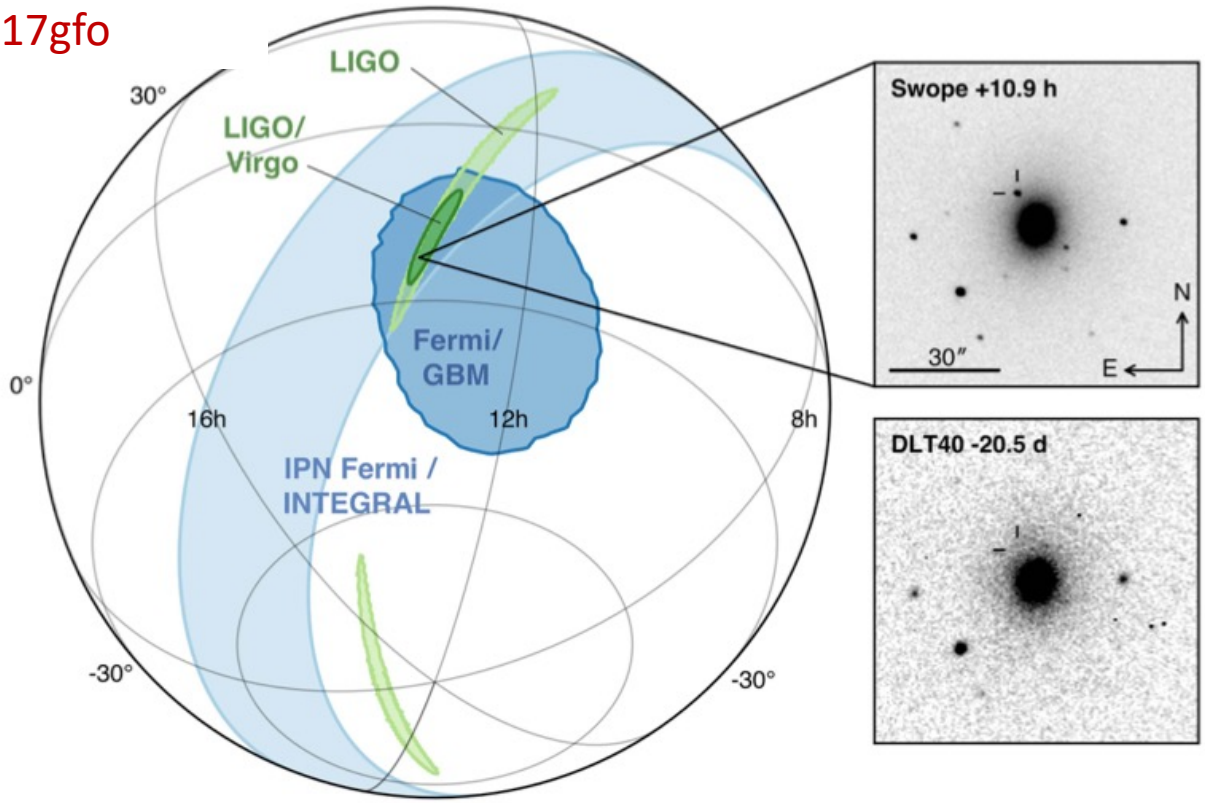
その後，電磁波のあらゆる波長で観測された



PRL 119, 161101 (2017)

GW170817の光学対応天体の発見

重力波：GW170817
ガンマ線バースト：GRB170817A
光学：SSS17a / AT2017gfo

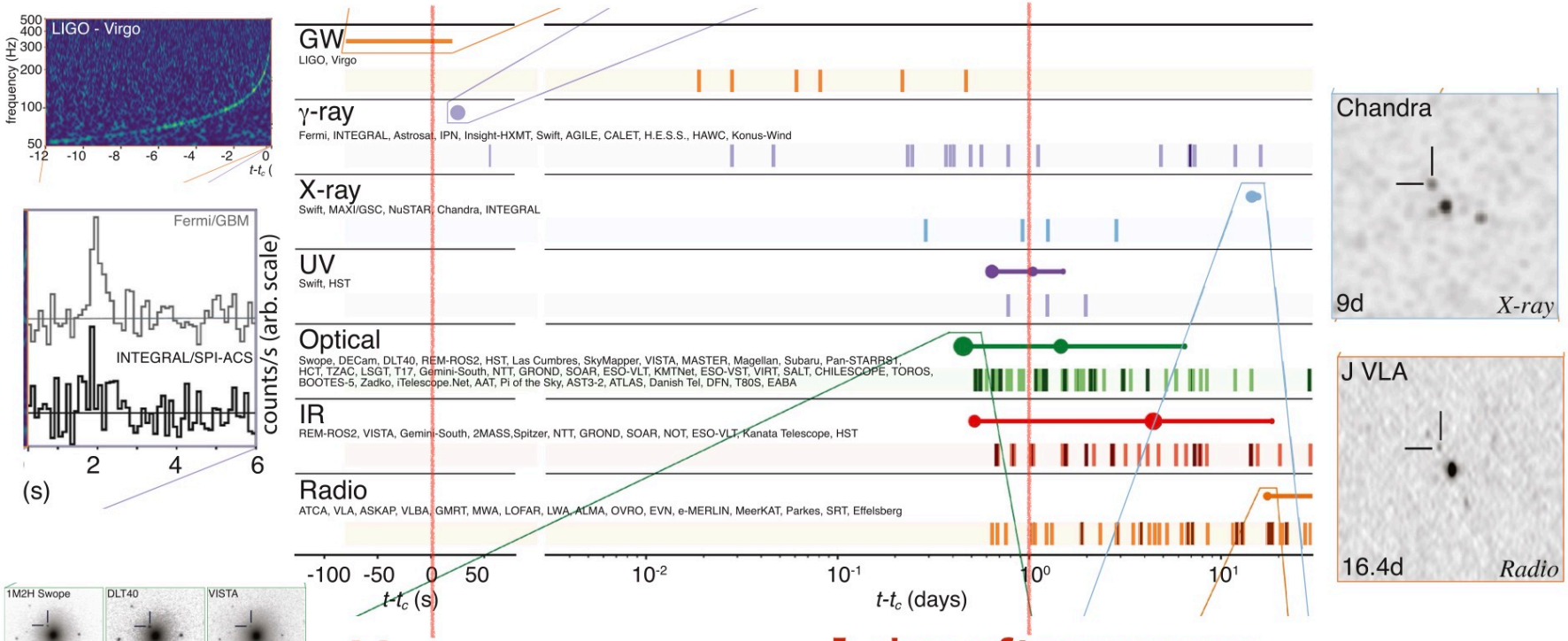


NGC4993

20日前
には
なかった

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



Merger **1 day after merger**

Many follow-up observations have been done.

数多くの追観測に成功。

Multi-messenger Observations of a Binary Neutron Star Merger*
THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 848:L12 (59pp), 2017 October 20

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?

地球70個分の金!!

  - 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

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Vera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

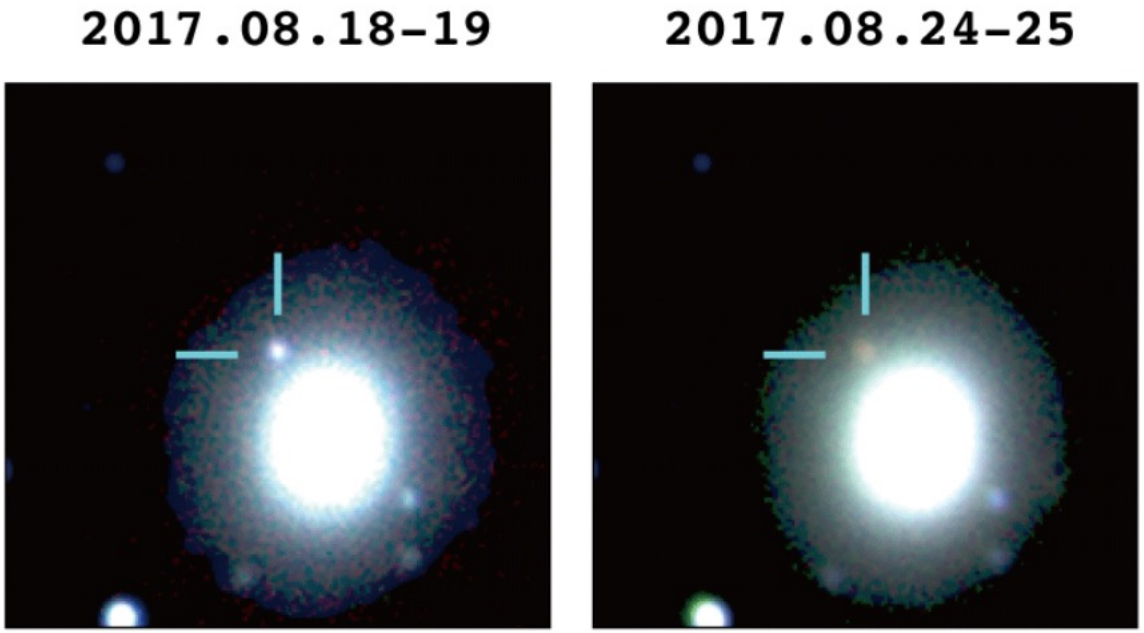


図1：日本の重力波追跡観測チーム J-GEM が撮影した重力波源 GW170817。うみへび座の方向にある銀河 NGC 4993 で発見され、地球からの距離は約 1 億 3000 万光年。ハワイにあるすばる望遠鏡の HSC による可視光線観測 (z バンド：波長 0.9 マイクロメートル) と、南アフリカにある IRSF 望遠鏡の SIRIUS による近赤外観測 (H バンド：波長 1.6 マイクロメートル、Ks バンド：波長 2.2 マイクロメートル) を 3 色合成したもの (青：z バンド、緑：H バンド、赤：Ks バンド)。2017年8月24日-25日の観測では、天体が減光するとともに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)

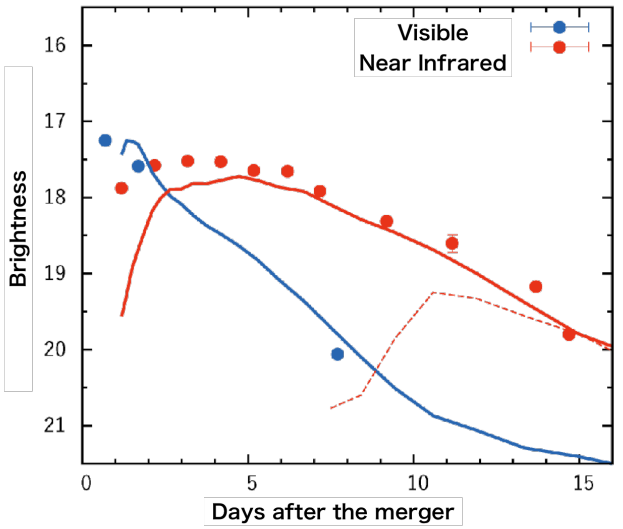
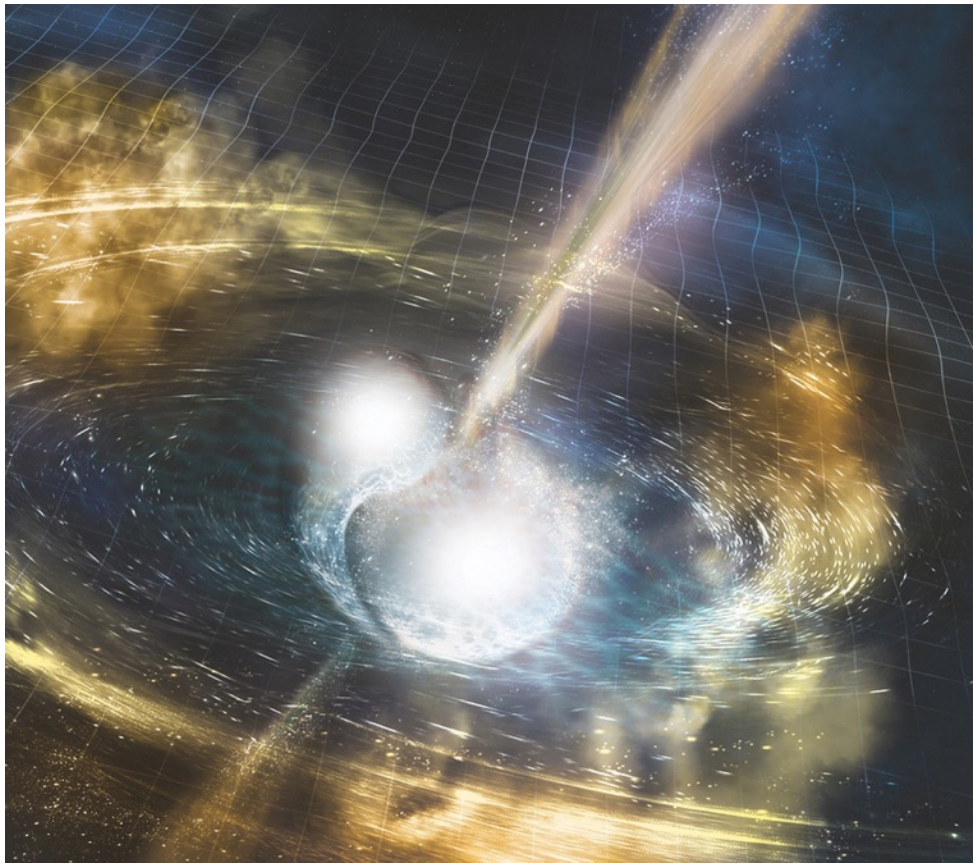


図3: 重力波源 GW170817 で実際に観測された明るさの変化 (●) と、シミュレーション (実線・破線) の比較。青が可視光線、赤が近赤外線を表しています。実線は r プロセスが起こる場合、破線は r プロセスが起こらない場合に予測される明るさの変化を表しています。r プロセスが起こる場合のシミュレーション結果と観測とがよく一致していることが分かります。(クレジット: 国立天文台)

https://www.subarutelescope.org/Pressrelease/2017/10/16/j_index.html

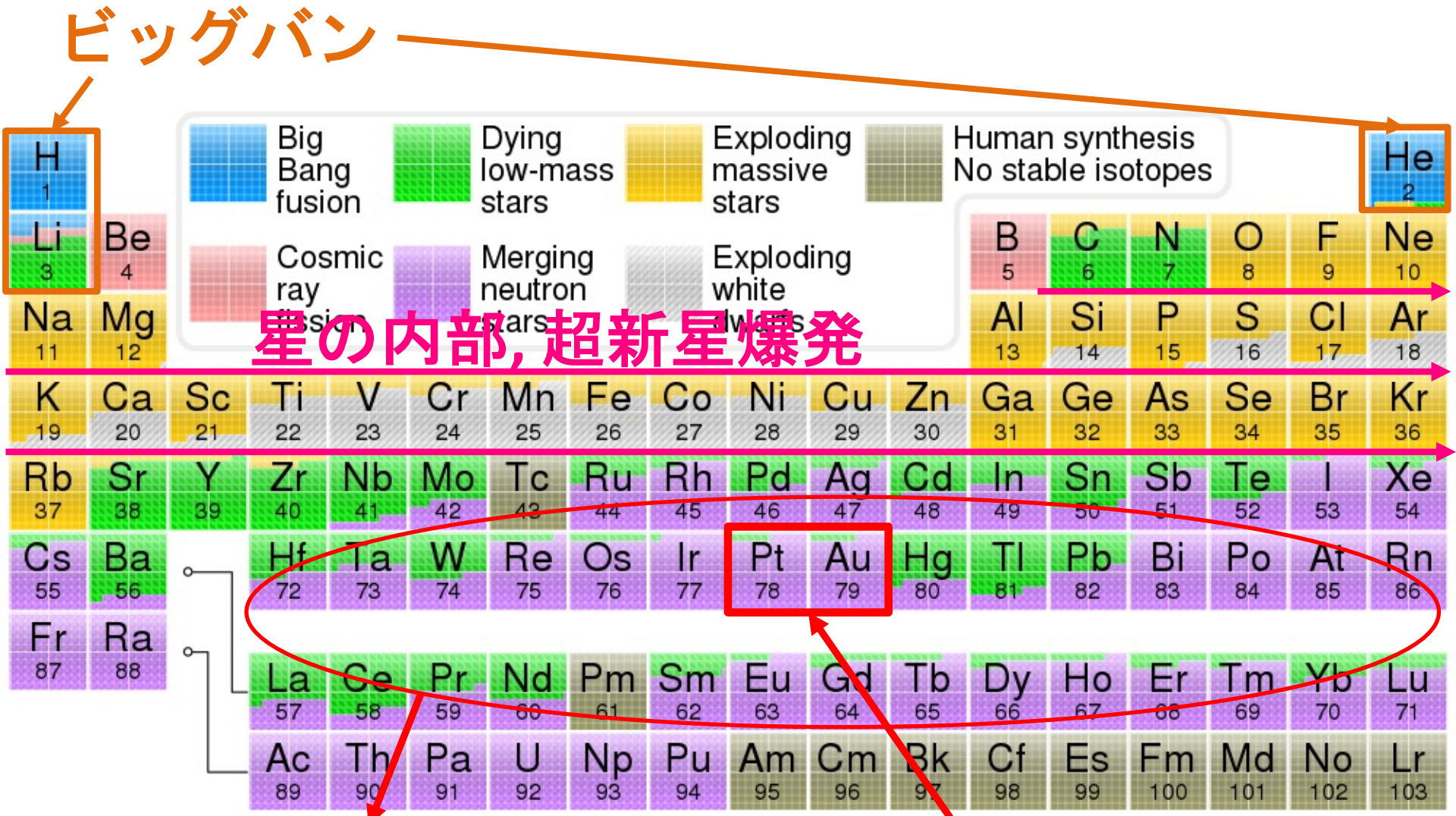
どのように光ったのか？

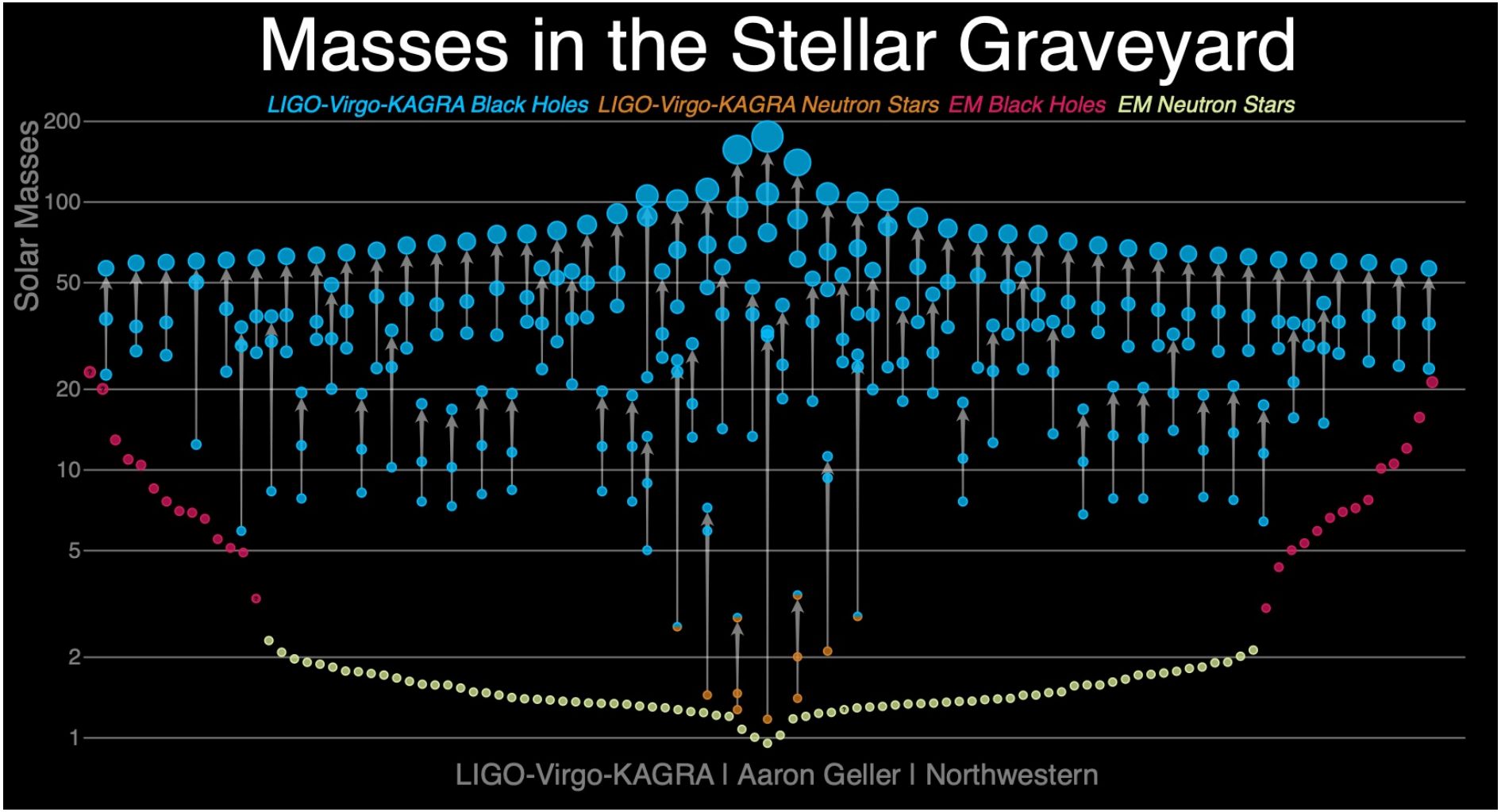
https://www.natureasia.com/ja-jp/nature/highlights/89854



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
Big Bang fusion
Dying low-mass stars
Exploding massive stars
Human synthesis No stable isotopes
Cosmic ray fission
Merging neutron stars
Exploding white dwarfs
星の内部, 超新星爆発
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



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5O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

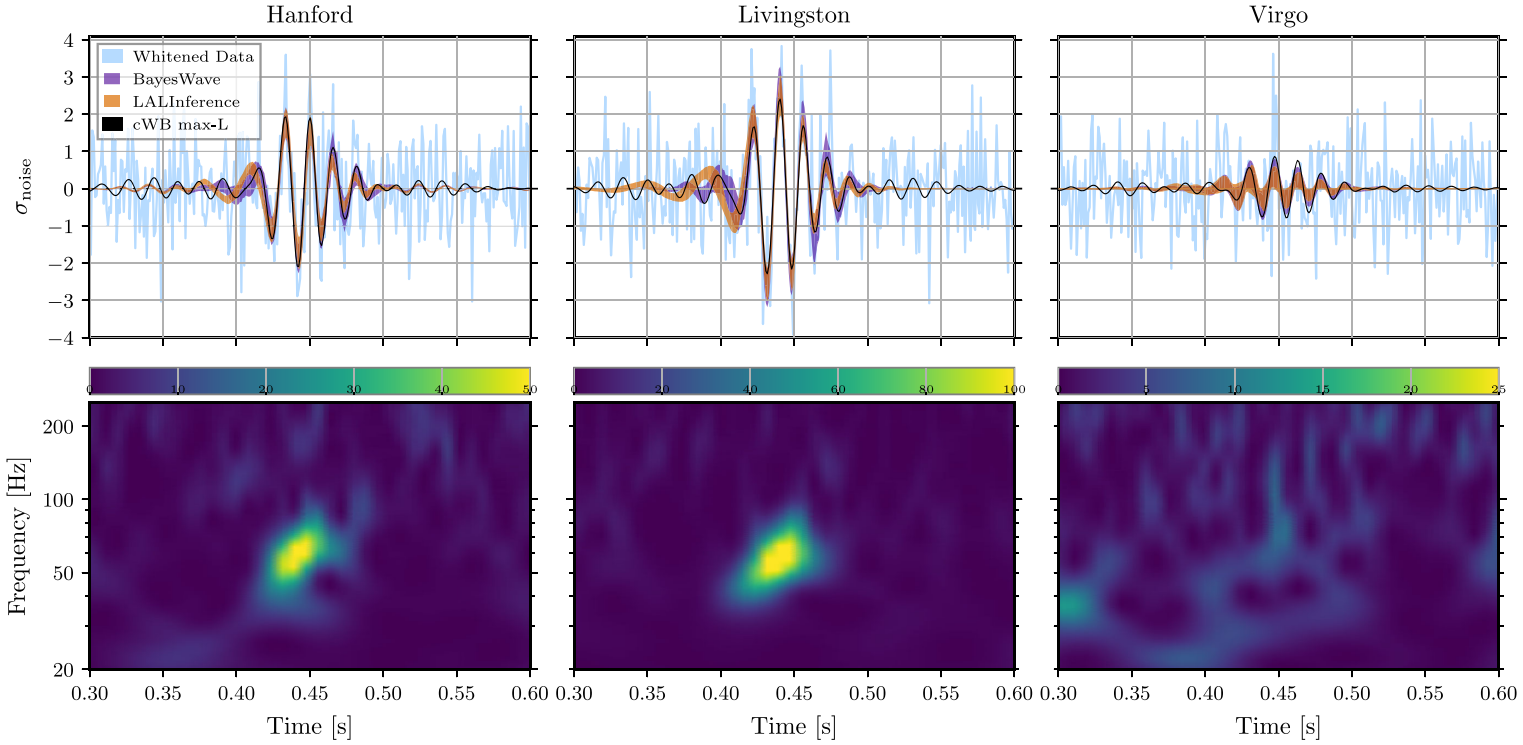
https://ligo.northwestern.edu/media/mass-plot/index.html

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の中間)
  (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

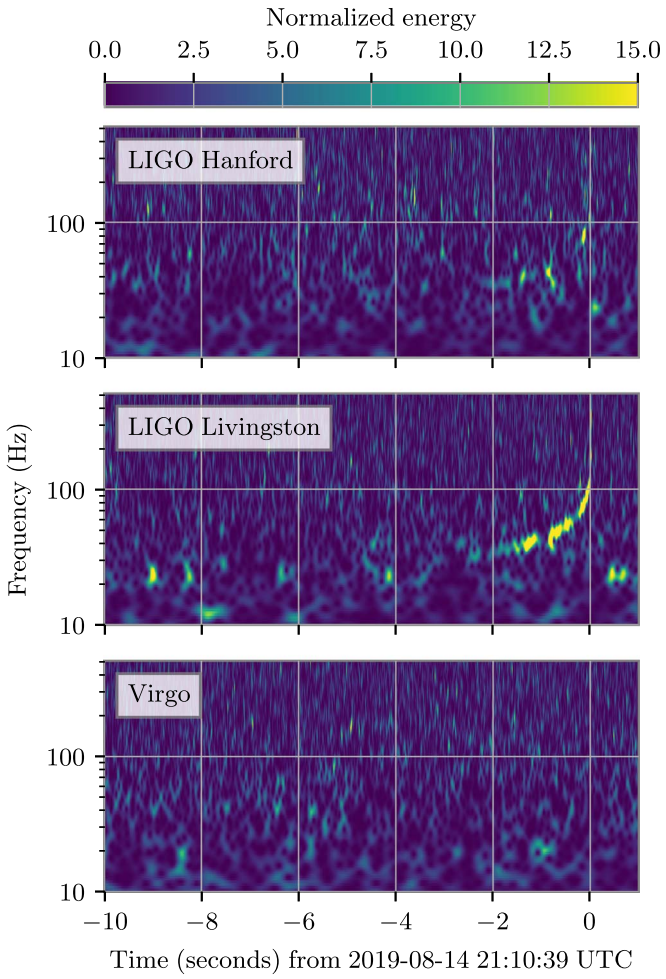


GW190814

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

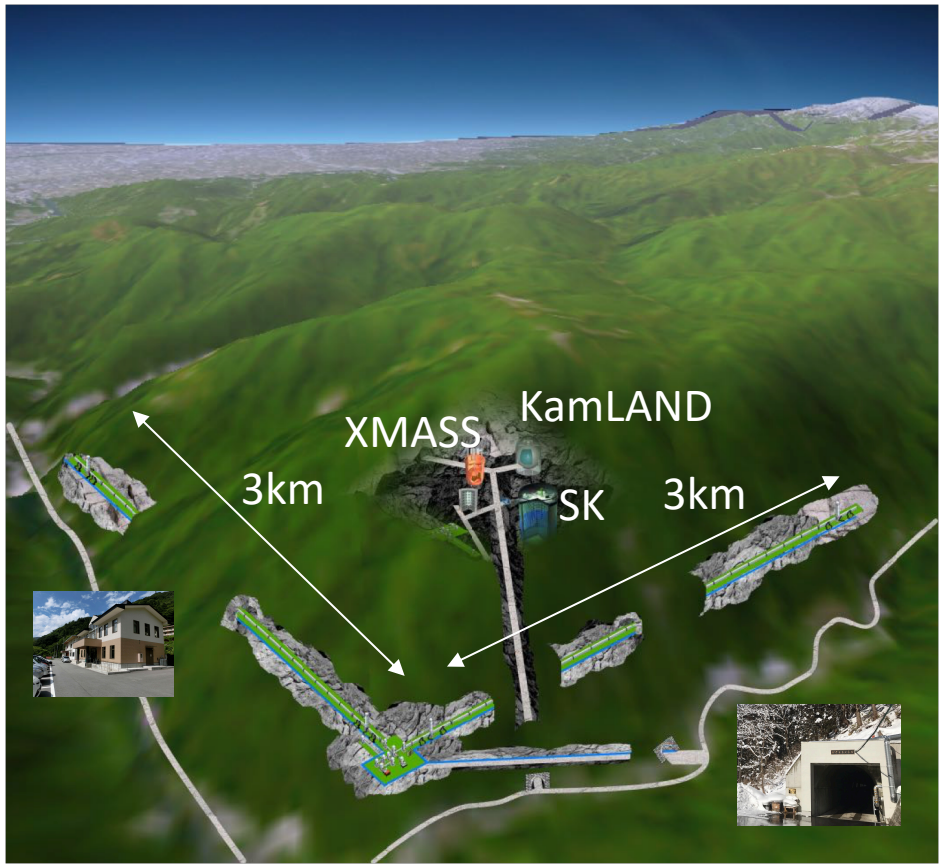
- 2.6倍太陽質量の星
- ブラックホールと中性子星の中間質量
- どちらなのか，決定的証拠がない.
- 波形データからは判別出来ない



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)

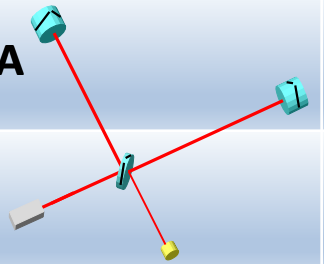


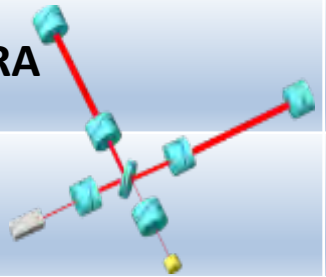
- 岐阜県飛騨市神岡町　神岡鉱山
- 3kmレーザー干渉計
- 地下
- 低温鏡



KAGRAの歴史

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
プロジェクト予算化	→										
トンネル掘削工事			■	■							
iKAGRA	■	■	■	■	■	■					
初期運転							■				
3km 低温レーザー干渉計							■	■			
本格運転								■	■		
干渉計高度化									■		
bKAGRA	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
コミッショニングおよび観測										■	■









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



低温容器
（冷凍機付）

デジタル回路





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



2019年10月4日

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した.
- 観測データの解析実施中.

- 現在と今後
- 検出器改修と感度向上作業
- 2022年12月中旬ごろから，LIGO, Virgoと共に長期間観測(O4)実施見込み

KAGRAの貢献：到来方向の決定

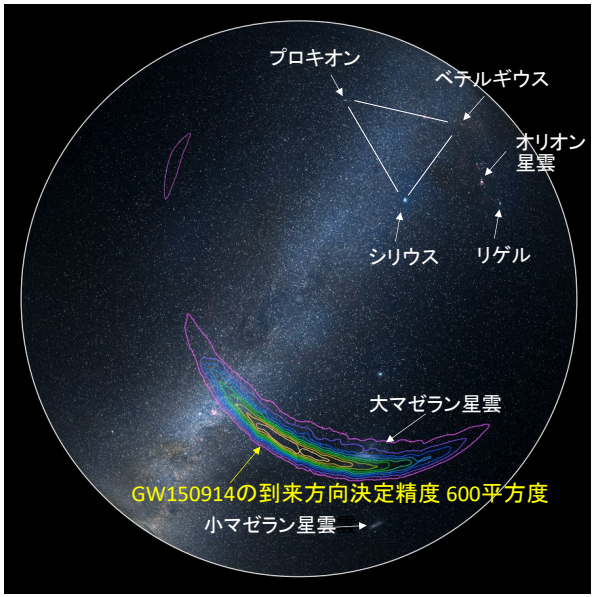
２台の検出器では
到来方向の特定は出来ない

3台以上の検出器で方向が
絞れてくる

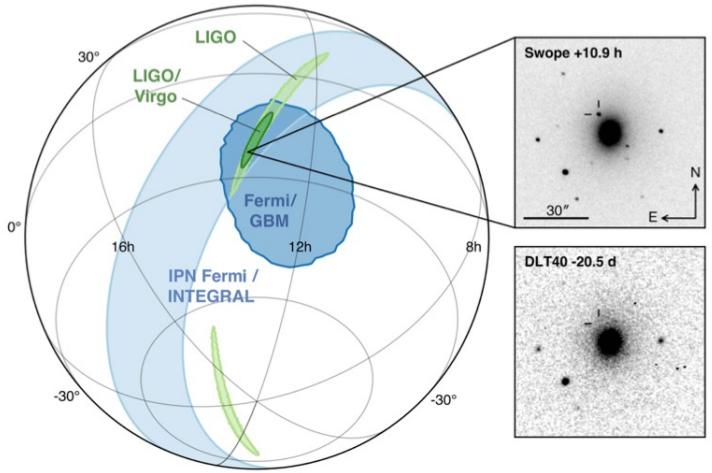
KAGRAにより，３台で観測
出来る確率が増える

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

GW150914



GW170817



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

超新星爆発

The Nobel Prize in Physics 2002


Raymond Davis Jr.
Prize share: 1/4


Masatoshi Koshiba
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 Koshiba *"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

The Nobel Prize in Physics 2015


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

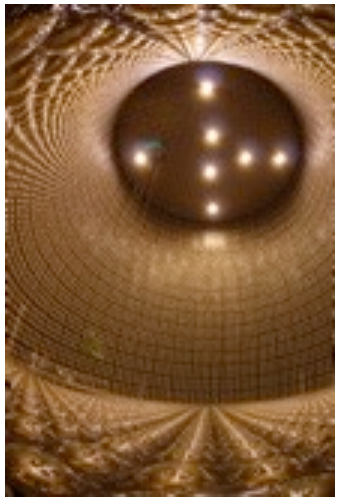

Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

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


スーパーカミオカンデ

重力波


KAGRA

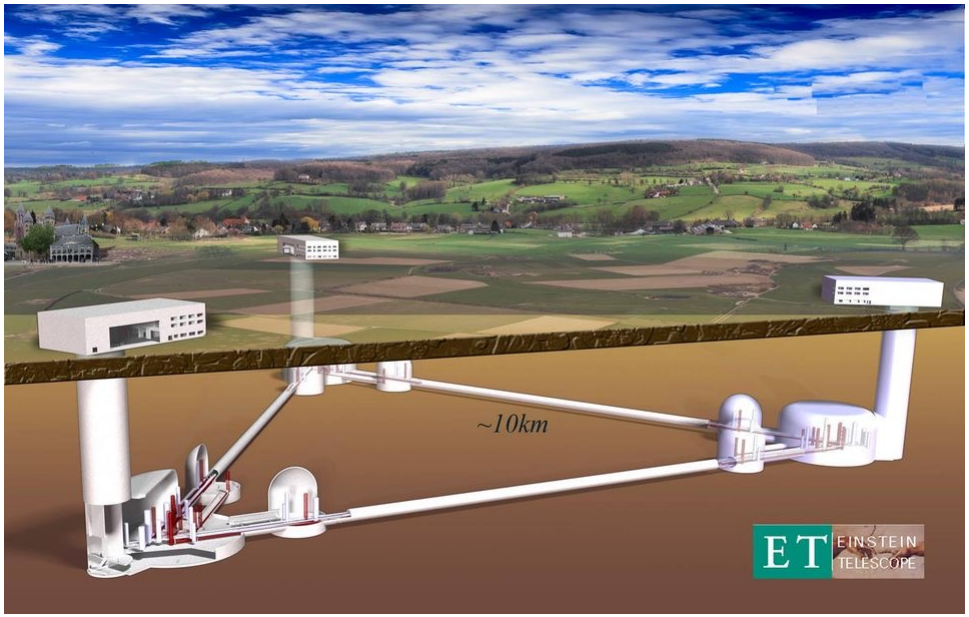
同時観測
超新星爆発メカニズム解明

銀河系近傍で起これば可能（おそらく数十年に1回）

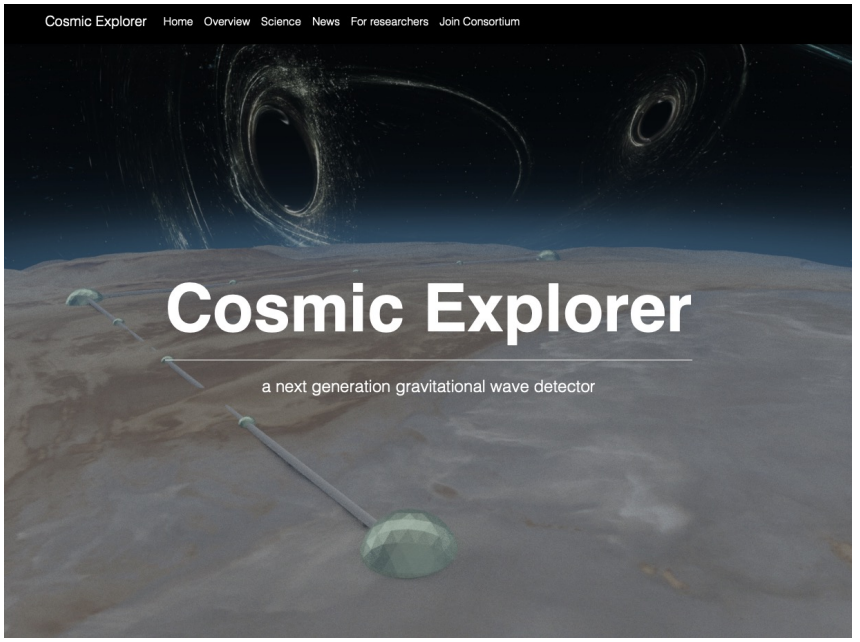
将来の検出器

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)

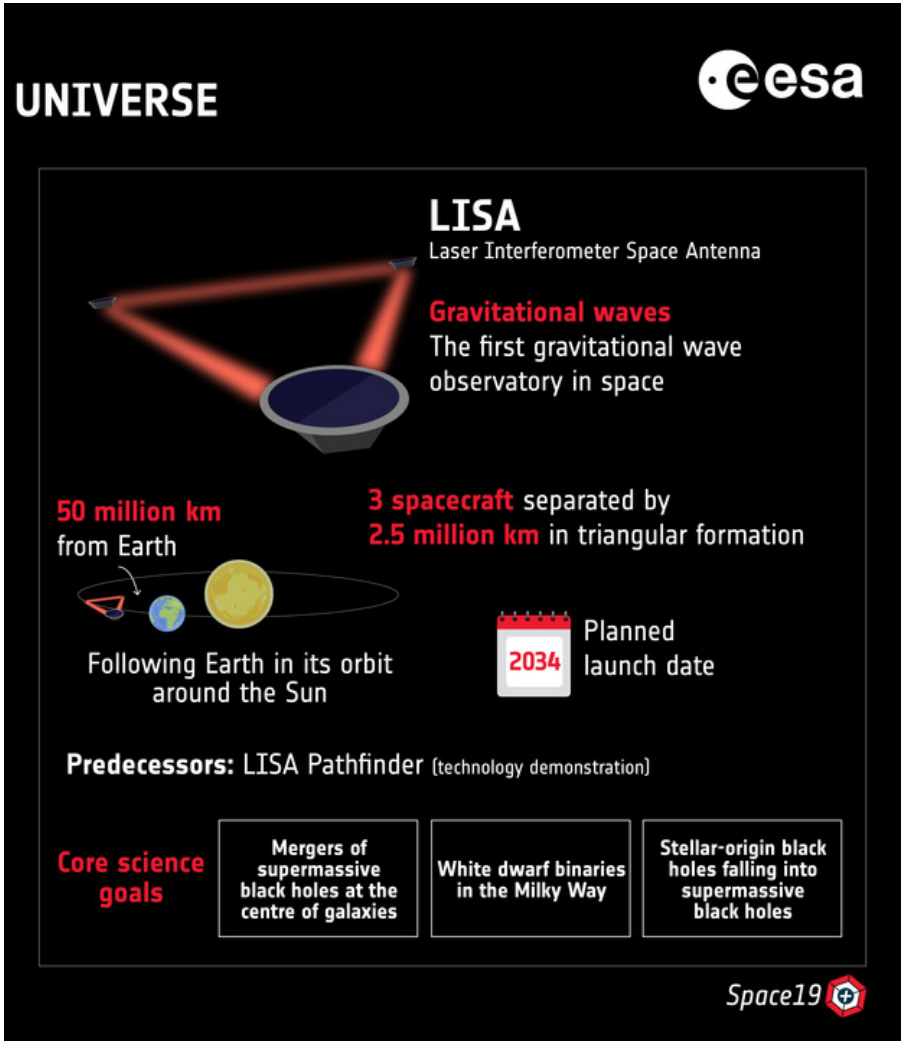


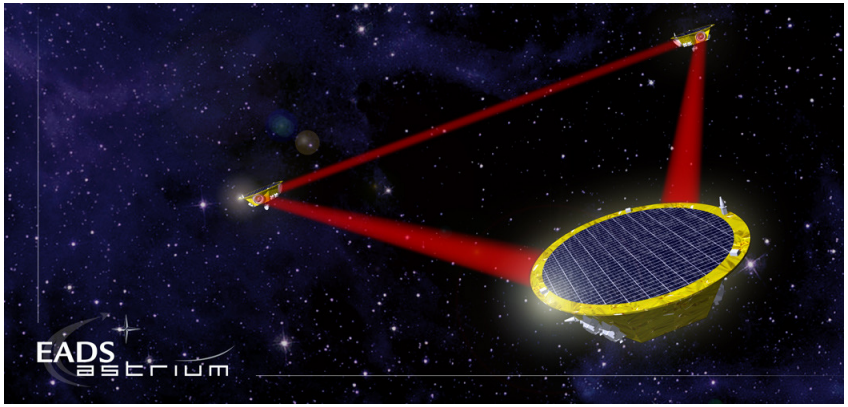
宇宙空間レーザー干渉計 LISA

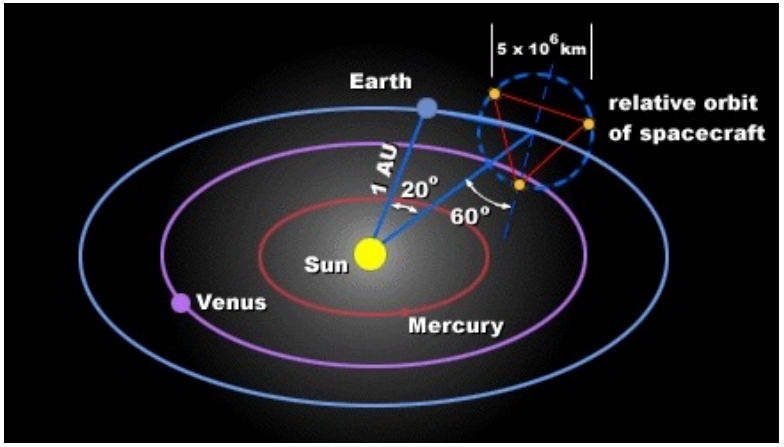
低周波重力波(0.1mHz – 0.1 Hz)

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







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.

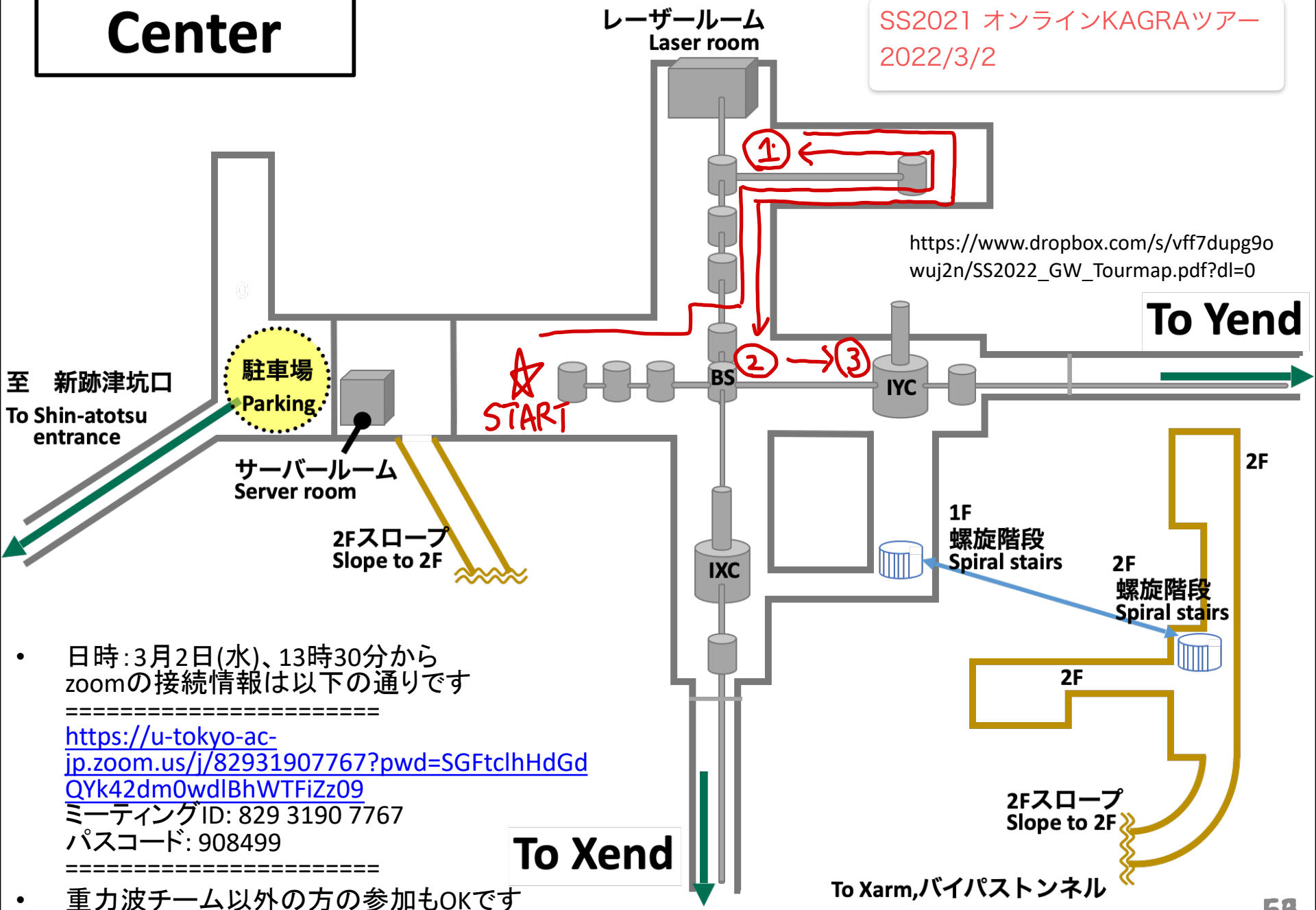
- 地上検出器の将来計画として，ヨーロッパのEinstein Telescope, アメリカのCosmic Exploreが提唱されいる.

- 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

Center

SS2021 オンラインKAGRAツアー
2022/3/2



- 日時:3月2日(水)、13時30分から
  zoomの接続情報は以下の通りです
  ==========
  https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/j/82931907767?pwd=SGFtclhHdGdQYk42dm0wdlBhWTFiZz09
  ミーティングID: 829 3190 7767
  パスコード: 908499
  ==========
- 重力波チーム以外の方の参加もOKです

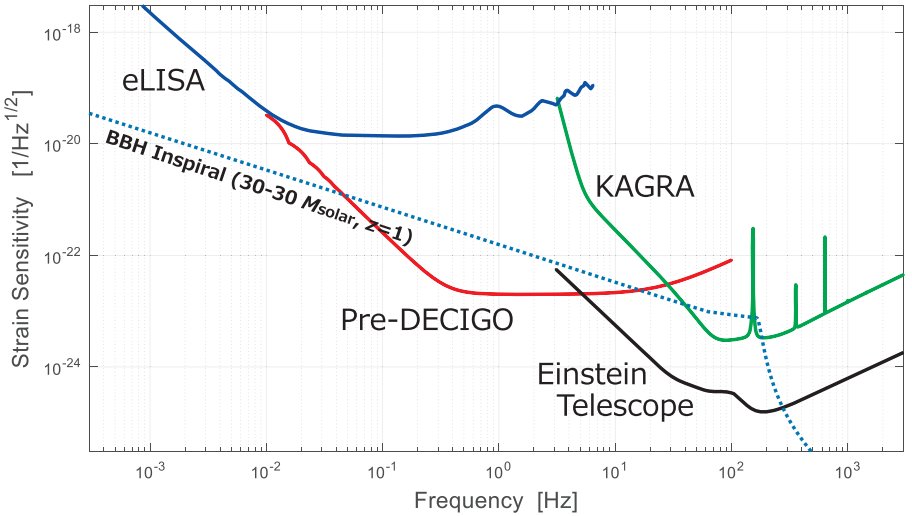
付録

DECIGO, B-DECIGO

日本グループが提唱する宇宙空間レーザー干渉計



PTEP 2016, 093E01 (2016)



今後の観測で期待されること

多数のコンパクト連星合体の観測

例えば感度が2倍 => 距離が2倍 => 体積8倍 => 発生率 8倍

連星ブラックホール (おおよそ2日に1-2個)

- 連星ブラックホールの分布と起源
- 一般相対論はどこまで正しいか?

連星中性子星(1年に10-20個)
ブラックホール中性子星連星 (1年に10-20個)

- 中性子星を構成する超高密度物質の性質の解明

- 電磁波による追観測
  - 短いガンマ線バーストとの関係の明確化
  - キロノバ, 重元素合成の現場の確認
  - 宇宙の膨張則(ハッブル定数)の新しい制限
  - . . .

LIGO-Virgo 第3回観測 観測例

GW190425

ApJ 892, L3 (2020)
https://arxiv.org/abs/2001.01761

- ２例目の連星中性子星合体
- 電磁波対応天体は発見されなかった.
- 中性子星の質量が，前回より少し重い.
  - ２つの質量の和 太陽の3.4倍程度

Table 1
Source Properties for GW190425

	Low-spin Prior ($\chi < 0.05$)	High-spin Prior ($\chi < 0.89$)
Primary mass m_1	1.60–1.87 $M_\odot$	1.61–2.52 $M_\odot$
Secondary mass m_2	1.46–1.69 $M_\odot$	1.12–1.68 $M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$ $M_\odot$	$1.44^{+0.02}_{-0.02}$ $M_\odot$
Detector-frame chirp mass	$1.4868^{+0.0003}_{-0.0003}$ $M_\odot$	$1.4873^{+0.0008}_{-0.0006}$ $M_\odot$
Mass ratio m_2/m_1	0.8 – 1.0	0.4 – 1.0
Total mass $m_{\rm tot}$	$3.3^{+0.1}_{-0.1}$ $M_\odot$	$3.4^{+0.3}_{-0.1}M_\odot$
Effective inspiral spin parameter $\chi_{\rm eff}$	$0.012^{+0.01}_{-0.01}$	$0.058^{+0.11}_{-0.05}$
Luminosity distance $D_{\rm L}$	159^{+69}_{-72} Mpc	159^{+69}_{-71} Mpc
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	$\leqslant$600	$\leqslant$1100

推定された到来方向

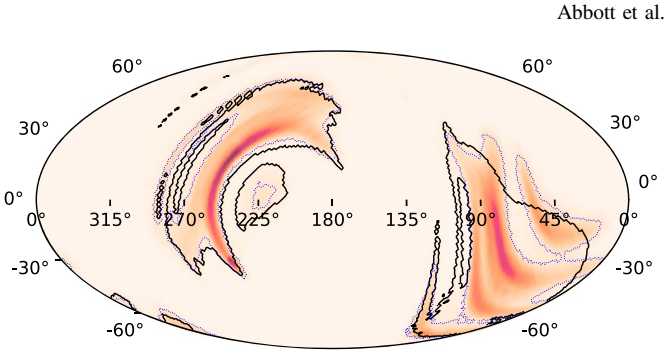


Figure 2. Sky map for GW190425. The shaded patch is the sky map obtained from the Bayesian parameter estimation code LALINFERENCE (Veitch et al. 2015) (see Section 4) with the 90% confidence region bounded by the thin dotted contour. The thick solid contour shows the 90% confidence region from the low-latency sky localization algorithm BAYESTAR (Singer & Price 2016).

連星ブラックホールはどうやってできたか?

以前まで知られていたものより重い，恒星質量ブラックホールが多い

1．大きな恒星が進化してブラックホールになった.

- 重元素量が少ない恒星ならば可能
- 宇宙のかなり昔に出来た星である可能性
- 宇宙で最初に誕生した星が起源である可能性

2．小さいブラックホールが合体して大きくなった

3．宇宙の誕生直後に出来た（原始ブラックホール）

- 宇宙誕生後，約0.005秒後に宇宙の密度のむらむらから誕生した

ハッブル=ルメートルの法則

宇宙の膨張法則

(ある銀河の遠ざかる速さ) = (ハッブル定数) × (銀河までの距離)

天体望遠鏡による
銀河の分光観測

いくつかの天文
観測の組み合わせ

電磁波観測：

Ia型超新星爆発の観測	73.24±1.74 km/s/Mpc
宇宙マイクロ波背景放射のプランク衛星による観測	67.74±0.46 km/s/Mpc

ハッブル=ルメートルの法則

宇宙の膨張法則

(ある銀河の遠ざかる速さ) = (ハッブル定数) × (銀河までの距離)

天体望遠鏡による
銀河の分光観測

重力波による観測

電磁波観測:

Ia型超新星爆発の観測	73.24±1.74 km/s/Mpc
宇宙マイクロ波背景放射のプランク衛星による観測	67.74±0.46 km/s/Mpc

重力波観測(GW170817) $H_0 = 70.0^{+12.0}_{-8.0} \mathrm{km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$

時空

時間と空間

ニュートン力学に代表される19世紀までは，不変で絶対的な概念.

特殊相対性理論(1905)

時空の絶対性が崩れた.
相対的：誰が観測するかによって，時間空間の長さなどが変わる.

一般相対性理論(1915)

時空の不変性も崩れた.
時空は変化する.
=>
時空の曲がり，宇宙の膨張，重力波

初観測前の重力波の間接的示唆

連星中性子星

例：PSR 1913+16 (Hulse-Taylor binary)
1974年発見．1993年ノーベル物理学賞

軌道の変化

↕ 一般相対論の予測と一致

重力波によるエネルギー放出

重力波放射の間接的な証明

The Nobel Prize in Physics 1993



Russell A. Hulse
Prize share: 1/2



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

The Nobel Prize in Physics 1993 was awarded jointly to Russell A. Hulse and Joseph H. Taylor Jr. *"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"*

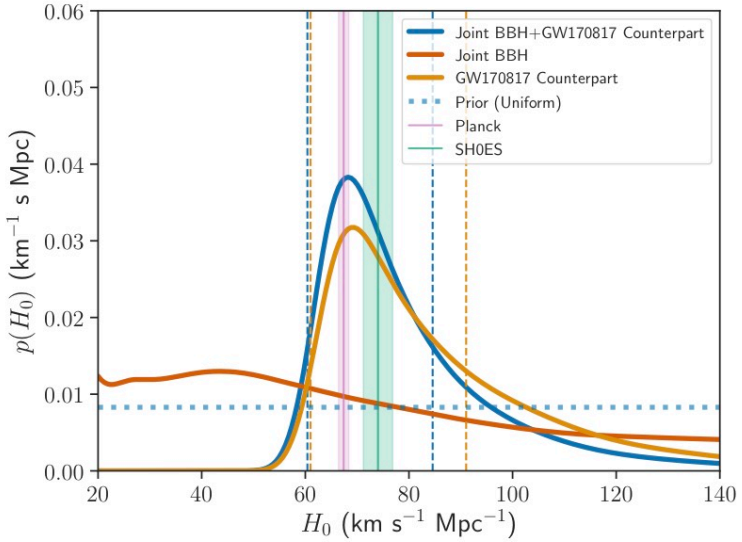
Photos: Copyright © The Nobel Foundation

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1993/

でも直接観測することがやはり重要

Distance and Hubble Constant

Event	$\Delta\Omega/\mathrm{deg}^2$	d_L/Mpc	z_{event}
GW150914	182	440^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$
GW151012	1523	1080^{+550}_{-490}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$
GW151226	1033	450^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$
GW170104	921	990^{+440}_{-430}	$0.20^{+0.08}_{-0.08}$
GW170608	392	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$
GW170729	1041	2840^{+1400}_{-1360}	$0.49^{+0.19}_{-0.21}$
GW170809	308	1030^{+320}_{-390}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$
GW170814	87	600^{+150}_{-220}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$
GW170817	16	40^{+7}_{-15}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$
GW170818	39	1060^{+420}_{-380}	$0.21^{+0.07}_{-0.07}$
GW170823	1666	1940^{+970}_{-900}	$0.35^{+0.15}_{-0.15}$



$$H_0 = 68^{+14}_{-7}\ \mathrm{km\ s^{-1}\ Mpc^{-1}}$$

68.3 % probability range

- Hubble constant (H_0): Expansion rate of the Universe to distance ratio. $V = H_0 d$
- Using GW170817 with 10 BBH observations, H_0 has been evaluated.

- ハッブル定数 (H_0): 宇宙の膨張速度と距離を関係付ける定数。
- GW170817と10のブラックホール連星合体の観測結果を用いて導出された。

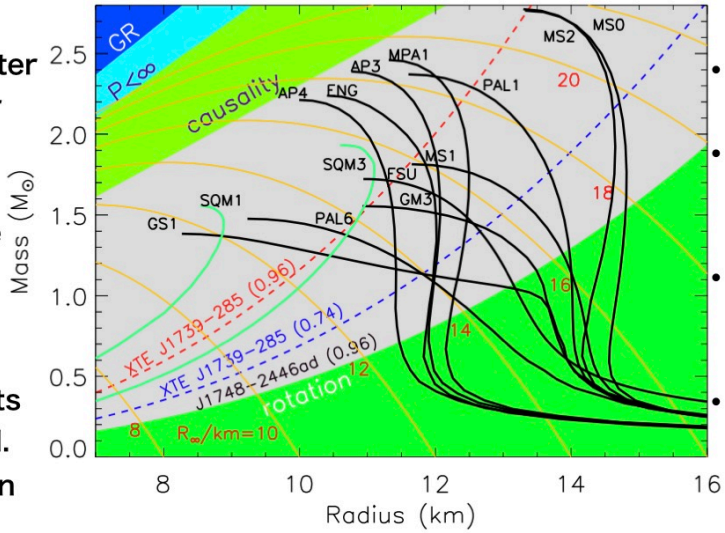
GW observations provided new method to measure the Hubble constant.

重力波観測によりハッブル定数を測定する新しい方法がもたらされた。

arXiv:1908.06060v2 [astro-ph.CO] 21 Aug 2019
A gravitational-wave measurement of the Hubble constant following the second observing run of Advanced LIGO and Virgo

Equation of State of Neutron Stars

- Neutron stars are good for studying the high-density matter which can not be realize in our laboratory.
- Equation of state defines relationship between pressure and density. -> NS mass and radius
- Many theoretical models have been presented. Measurements of mass and radius are critical.
- Investigation of GWs emitted in merger phase of BNS coalescence is important to derive the radius of NSs.



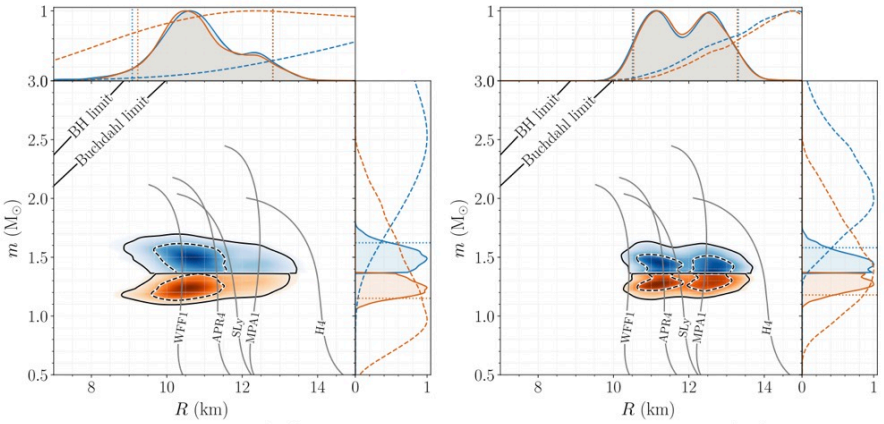
Mass-Radius trajectories fro typical EOSs
典型的な状態方程式のとる質量-半径の軌跡

- 中性子星は実験室では実現できない高密度環境の研究対象である。
- 状態方程式は圧力と密度の関係を定めている。→中性子星の質量と半径の関係につながる。
- 数多くの理論モデルが提唱されている。中性子星の質量と半径の測定が重要。
- 中性子連星の合体フェイズで放出される重力波の解析が中性子星の半径を導くために重要。

arXiv:astro-ph/0612440v1 15 Dec 2006
Neutron Star Observations:
Prognosis for Equation of State Constraints

Mass & Radius Observed in GW170817

- Mass & Radius have been evaluated.
- Left: evaluation based on GW observation.
- Right: evaluation including lower limit of maximum mass of NSs of 1.97 M_{solar} that was obtained by EM observations at that time.



$R_1 = 10.8^{+2.0}_{-1.7}$ [km]

$R_2 = 10.7^{+2.1}_{-1.5}$ [km]

$R_1 = 11.9^{+1.4}_{-1.4}$ [km]

$R_2 = 11.9^{+1.4}_{-1.4}$ [km]

- 質量と半径の分布図
- 左図: 重力波観測から求められた分布図。
- 右図: 中性子星の最大質量の下限値が1.97 M_{solar}であるという条件を加えて評価した分布図。1.97 M_{solar}は、当時の電磁波観測で得られていた値。

arXiv:1805.11581v2 [gr-qc] 15 Oct 2018

GW170817: Measurements of Neutron Star Radii and Equation of State

SS2022
オンラインKAGRA見学会

内山　隆
東大宇宙線研
2022/03/02

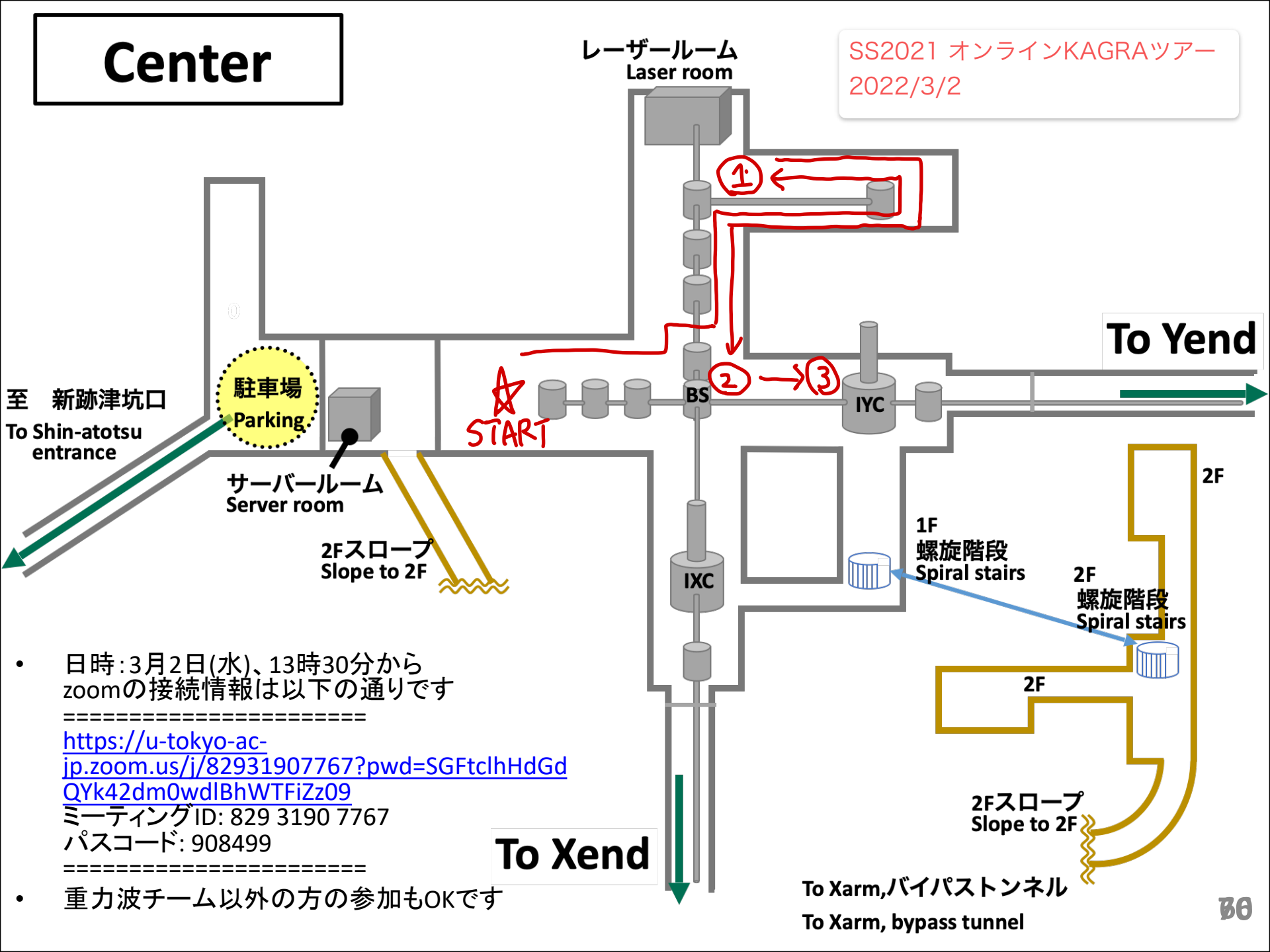

Japan
Tokyo
Yokohama
Nagoya


Toyama airport
富山県
40min.
by car


XMASS
KamLAND
SK
Yarm
3km
Xarm
3km

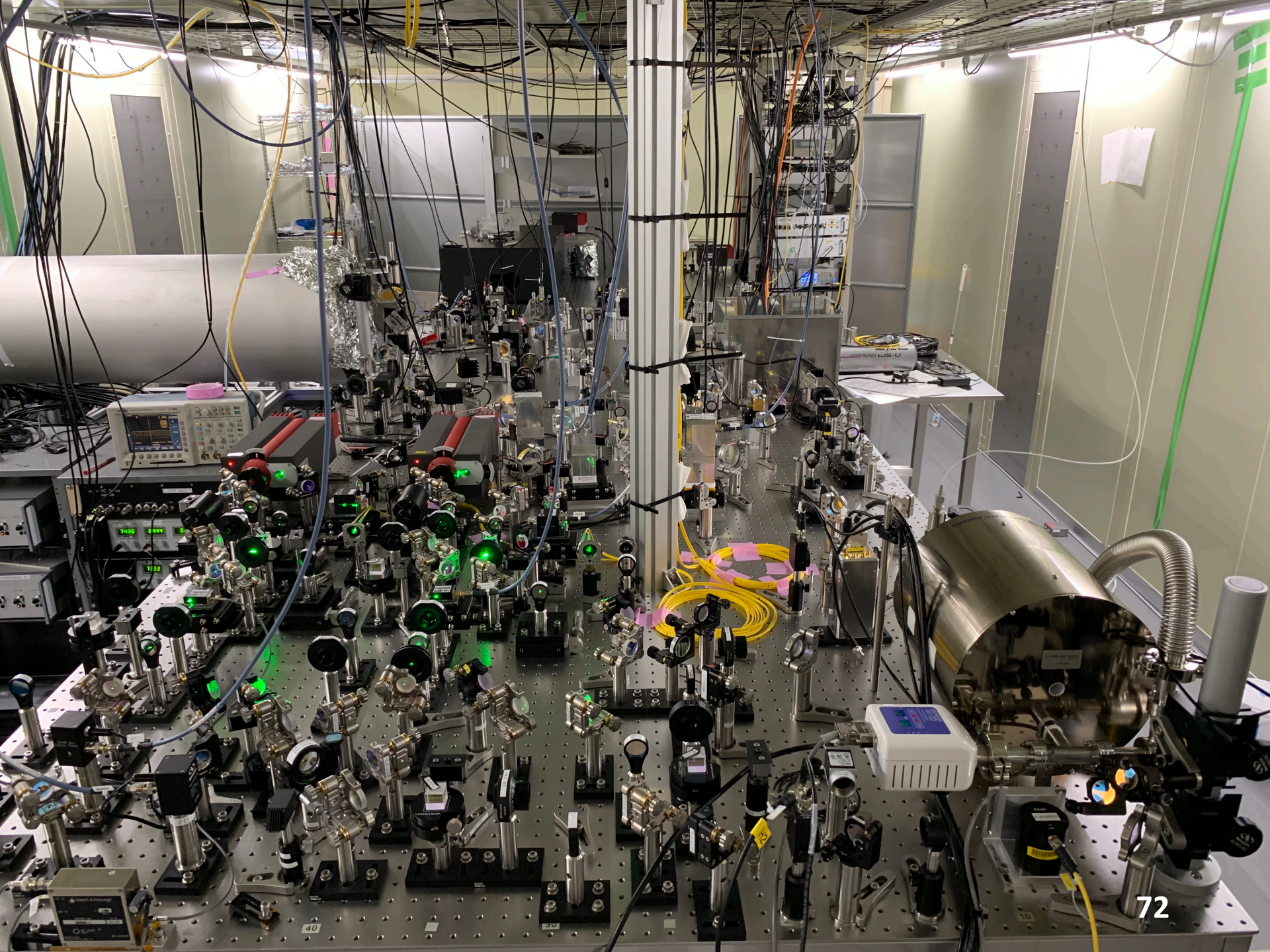
Center

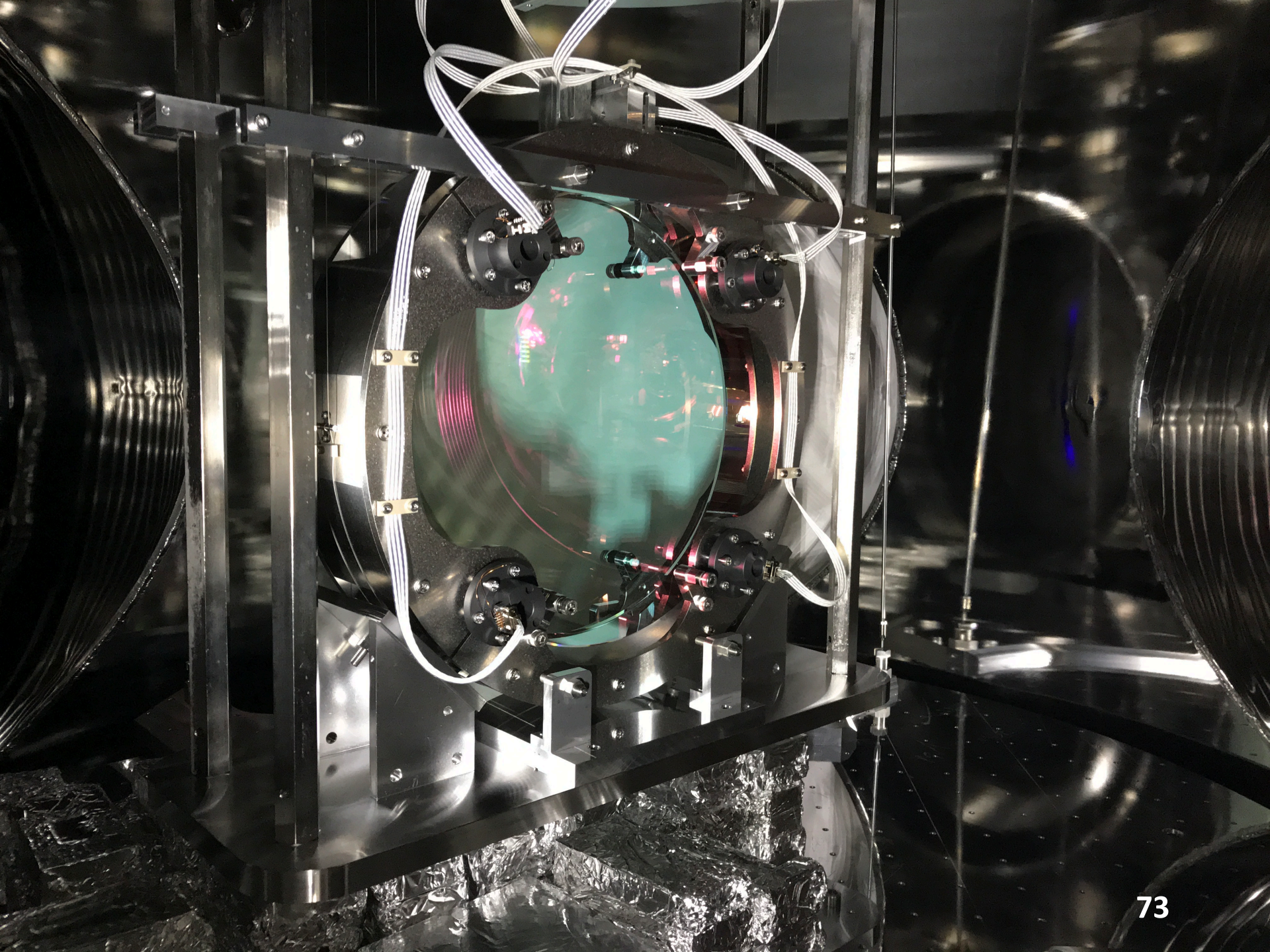
SS2021 オンラインKAGRAツアー
2022/3/2



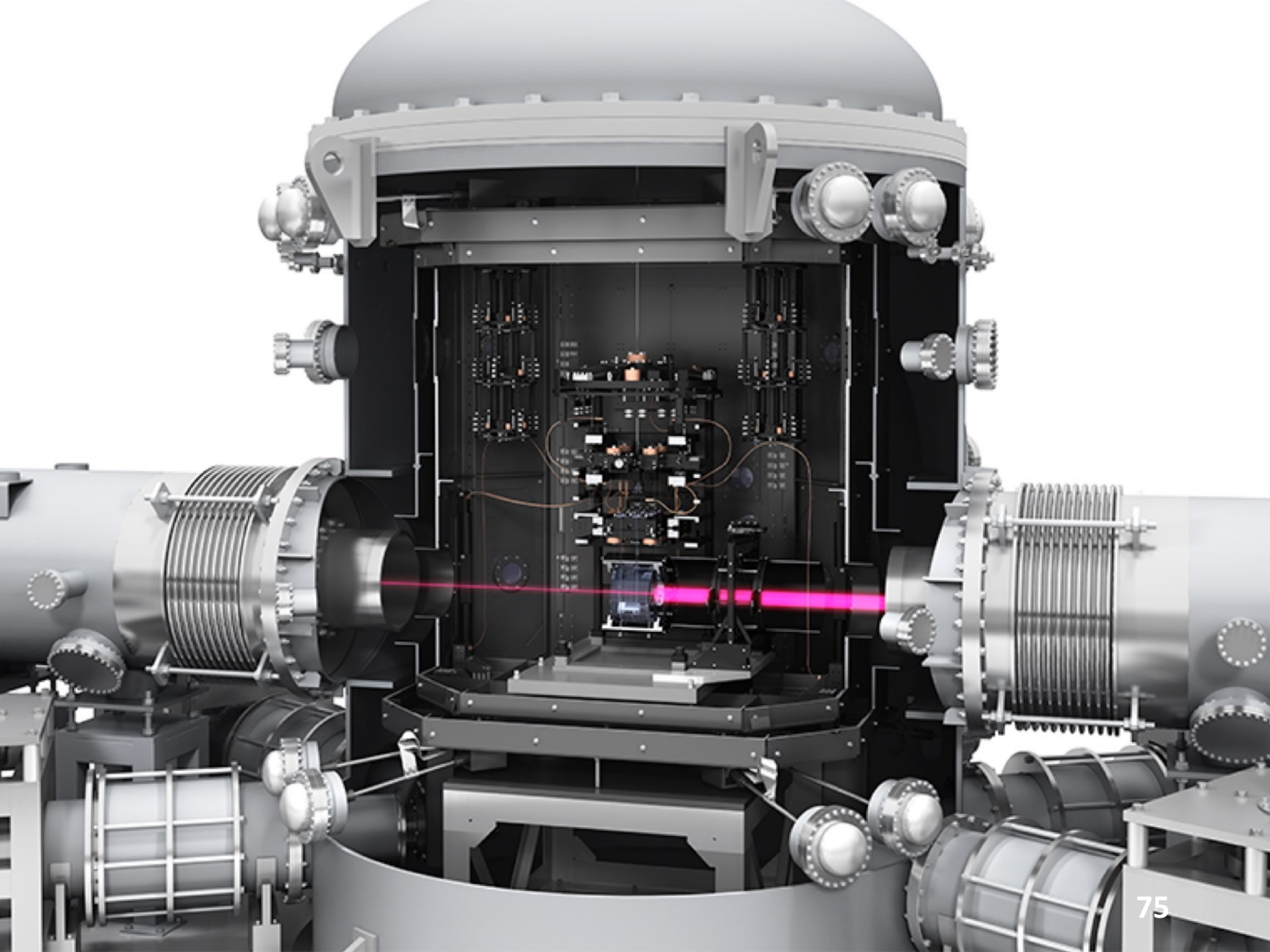
- 日時:3月2日(水)、13時30分から
  zoomの接続情報は以下の通りです
  ==========
  https://u-tokyo-ac-jp.zoom.us/j/82931907767?pwd=SGFtclhHdGdQYk42dm0wdlBhWTFiZz09
  ミーティングID: 829 3190 7767
  パスコード: 908499
  ==========
- 重力波チーム以外の方の参加もOKです


かぐらトンネル

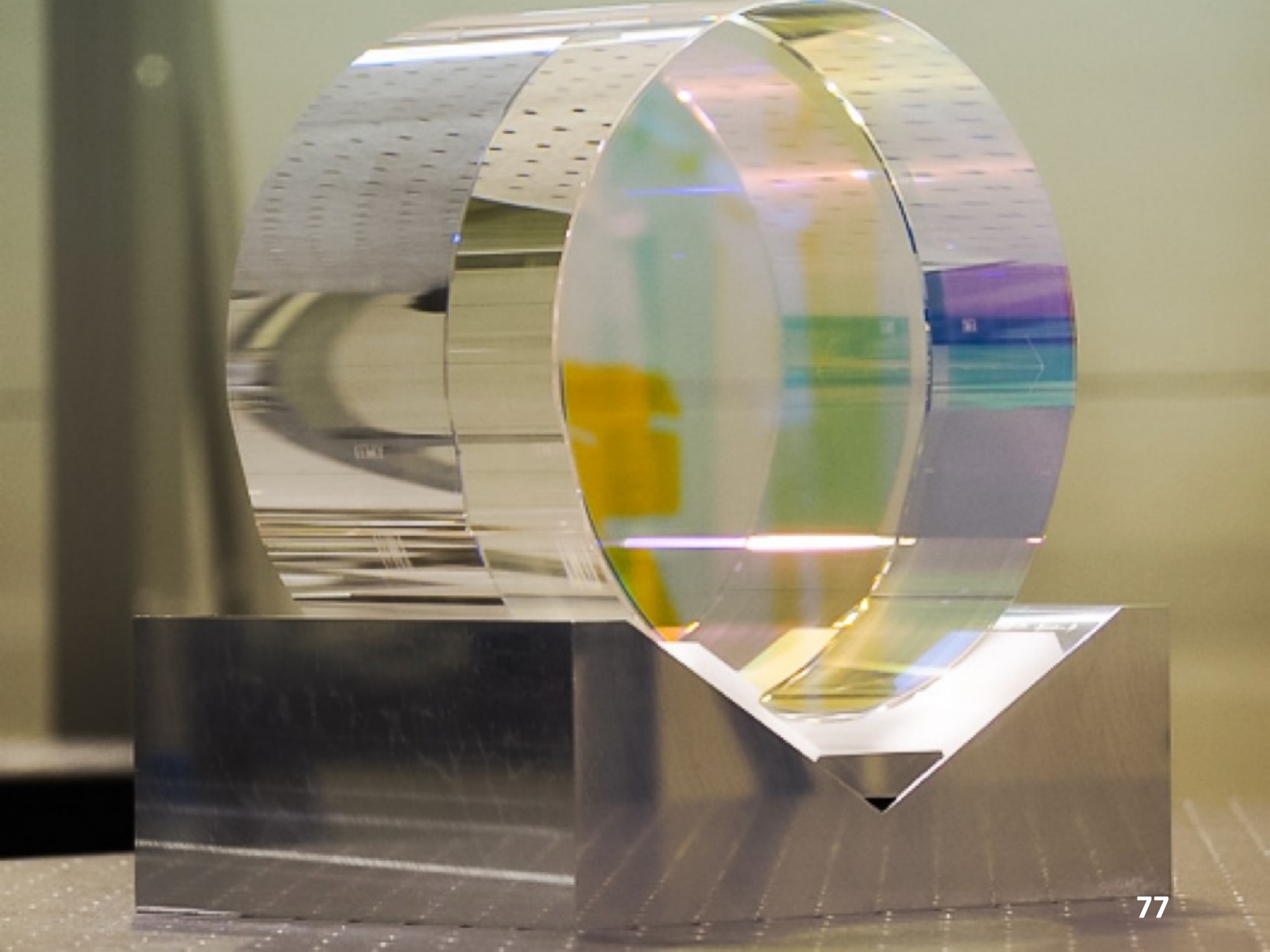


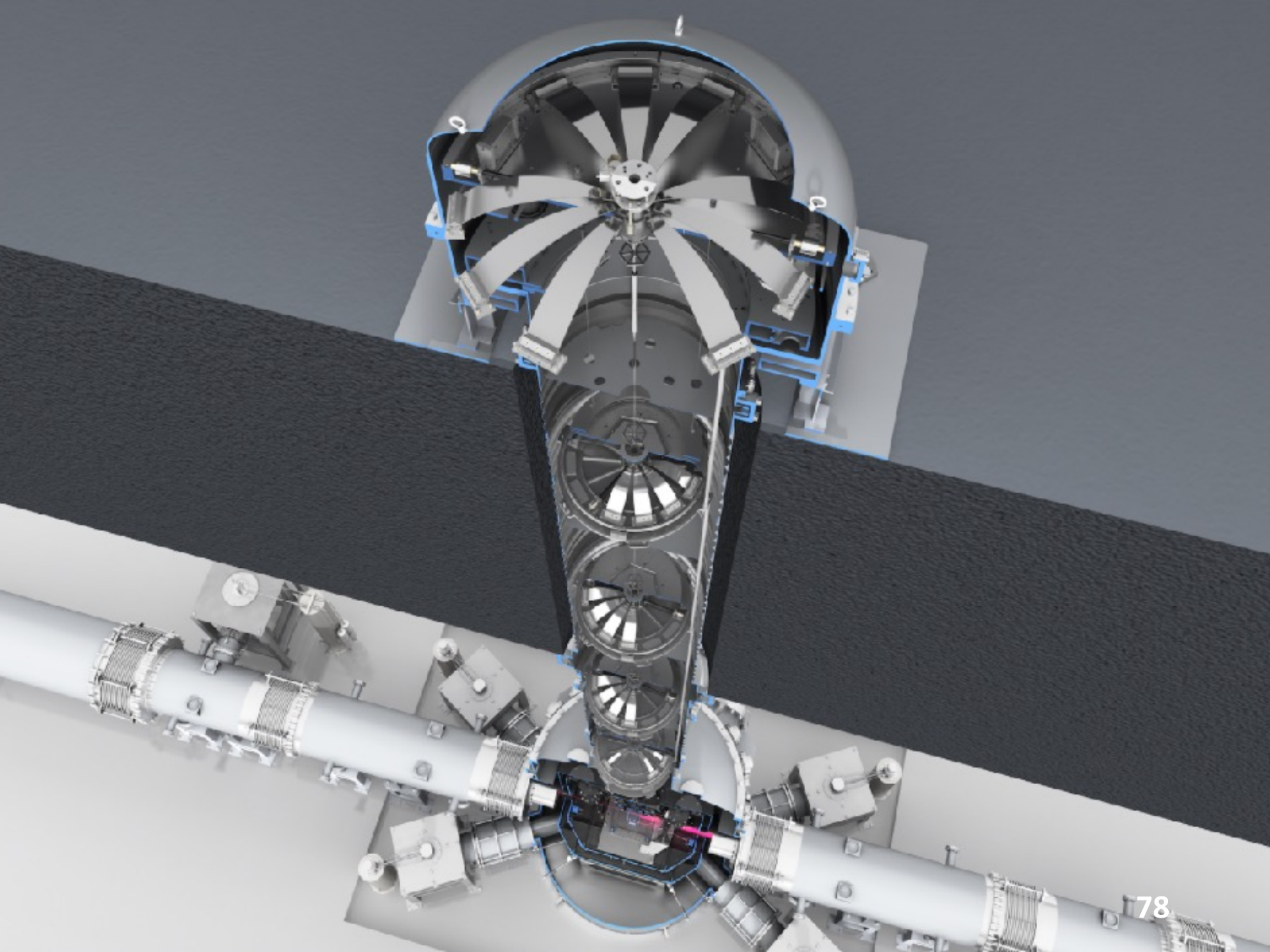


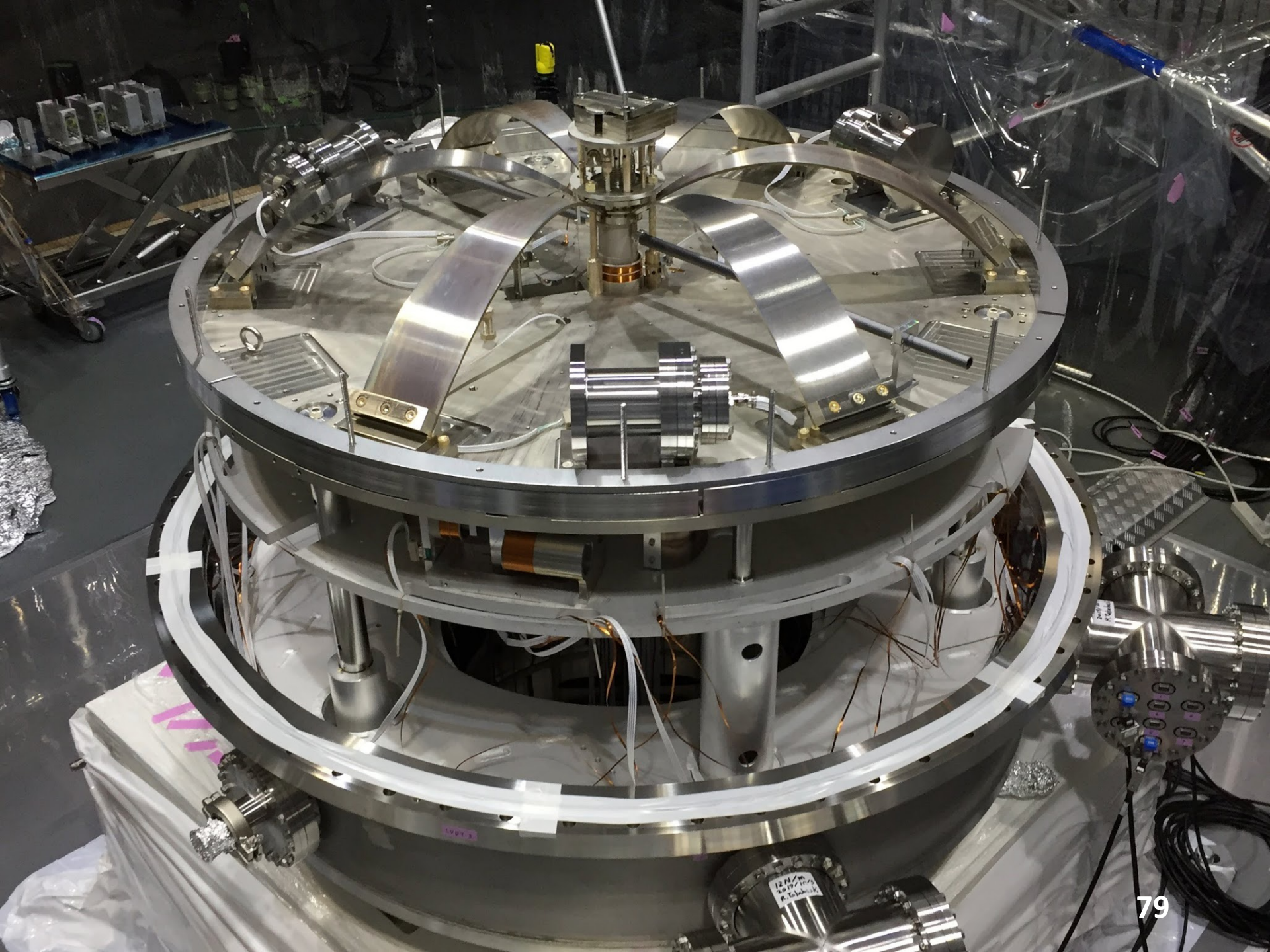













KAGRA
LOCKED

