

---

第23回 ICEPPシンポジウム 特別講義

# 重力波天文学入門 (2)

安東 正樹

(東京大学 / 国立天文台)

## 1. 一般相対性理論と重力波

- \* 重力波の性質, 放出
- \* 存在証明

## ⇒ 2. 重力波の観測

- \* 観測の原理
- \* LIGOによる初観測
- \* KAGRA

## 3. 相対論の検証と初期宇宙の観測

- \* 一般相対性理論の検証
- \* 初期宇宙の観測

# 重力波天文学

- 重力波望遠鏡による  
新しい天文学 -



# 重力波による天文学

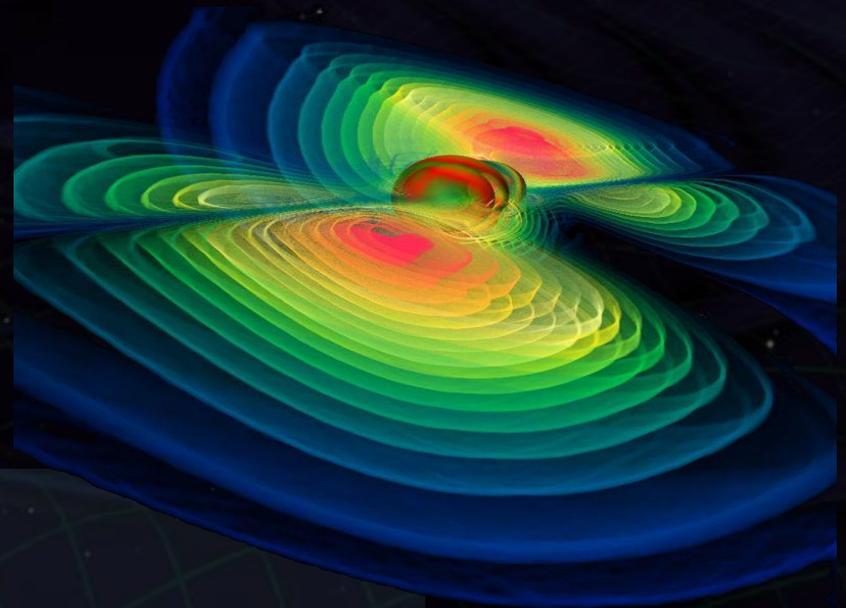
## 重力波の特徴

- ・質量の加速度運動から放射
- ・物質に対して 強い透過力



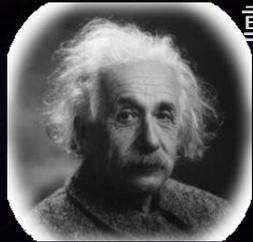
## 宇宙を観測する新しい手段

- ・電磁波と相補的な観測
- ・電磁波などでは見ることの出来ない現象  
(初期宇宙, ブラックホール,  
高エネルギー天体現象の内部)



# 重力波検出実験の歴史

一般相対性理論  
(アインシュタイン, 1916)



重力波の予言  
アインシュタイン, 1916)



共振型アンテナ  
(ウェーバー, 1960-)

重力波観測の報告  
(ウェーバー, 1969)

連星パルサーの発見  
(ハルス・テイラー, 1974)

重力波存在の証明  
(ハルス・テイラー, 1979)



低温アンテナ  
(Explorer etc, 1990-)

極低温アンテナ  
(Nautilus etc, 1996-)

国際共同観測  
(IGEC, 1997-)



干渉計型アンテナ  
(1970頃-)

大型干渉計の建設  
(1995頃-)

TAMAによる観測開始  
(1999-)

LIGOによる観測開始  
(2002-)

共同観測観測  
(2003-)

重力波の初観測 (2015)

望遠鏡による観測  
(ガリレオ, 1609)

宇宙放射線の発見  
(ヘス, 1912)

銀河中心からの  
電波観測  
(ジャンスキー, 1931)

さそり座X線源の観測  
(ジャコーニ, 1962)

宇宙背景放射の発見  
(ペンジアス・ウィルソン, 1964)

太陽ニュートリノ観測  
(デービス, 1964)

超新星爆発からの  
ニュートリノ観測  
(小柴, 1987)



# 重力波検出の最初の試み

- ジョセフ-ウェーバー：1960年頃から共振型検出器を用いて重力波の直接検出を目指した観測。
- ⇒ 1969年 重力波の初観測を報告。しかし、世界各国で行われた追実験の結果、検出は確認できなかった。

最初の本格的な共振型重力波検出器  
(1960年- ジョセフ-ウェーバー)



共振型検出器：重力波による潮汐力  
変動を弾性体振動として検出。

質量： 1.4 ton , 常温に設置

共振周波数: 1.66 kHz, PZTトランスデューサ

約1000km離れた 2か所での観測

(メーランド大学, アルゴンヌ国立研究所)

# ウェーバーイベント

## 「ウェーバーイベント」 (1969年)

J. Weber, PRL (1969)

### EVIDENCE FOR DISCOVERY OF GRAVITATIONAL RADIATION\*

J. Weber

Department of Physics and Astronomy, University of Maryland, College Park, Maryland 20742  
(Received 29 April 1969)

Coincidences have been observed on gravitational-radiation detectors over a base line of about 1000 km at Argonne National Laboratory and at the University of Maryland. The probability that all of these coincidences were accidental is incredibly small. Experiments imply that electromagnetic and seismic effects can be ruled out with a high level of confidence. These data are consistent with the conclusion that the detectors are being excited by gravitational radiation.

### 重力波検出の報告

1000km離れた 2台の検出器での同時信号

1日に数回のイベント

銀河中心方向から多くのイベント

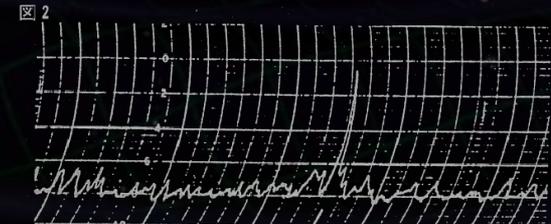
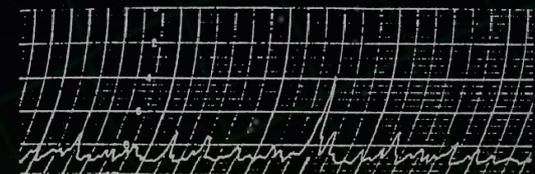


図 2  
コインシデンスのタイム・マーク ↓ メリーランド大学の検出器



コインシデンスのタイム・マーク ↓ アルゴンヌ研究所の検出器

坪野公夫「時空のさざ波」より

# 国内での反応

1969年6月16日 朝日新聞朝刊

坪野公夫 最終講義資料より (2013.3)

大子法案成立は望み薄  
無理  
各  
防衛二平

育成方針変えぬ  
成田委員長、総評に反論

6・15集会  
生が統一行動

1969年6月17日  
朝日新聞朝刊 社説

重力波の存在確認  
二カ所で同時検出  
論議他の原因すべて消去  
相対性理論を証明

中国も承認  
南ベトナム

木当なら大変な業績

小切手に

「重力波の存在確認の意義」  
重力波の存在は、1916年、アインシュタインの一般相対性理論から理論的に導かれた。その存在は、重力場の擾乱が光速で伝播することを示している。近年、重力波望遠鏡の観測が進展し、2015年に重力波の存在が初めて観測された。これは、宇宙の大規模な現象、例えばブラックホールの合体や中性子星の衝突などを示している。この発見は、物理学の歴史において重要な一歩を踏み出したことを意味する。

社説  
波乱を含むボンビードー時代の開幕  
邦交正常化後、日米関係は急速に進展した。しかし、冷戦構造の下では、安全保障の面で依然として課題が残る。特に、中国の台頭と北朝鮮の核開発は、東アジアの平和と安定に重大な脅威を及ぼしている。日本は、自衛隊の役割を再定義し、国際社会と連携して平和を維持する必要がある。同時に、経済協力を通じた対外関係の構築も重要な課題である。

安倍晋三氏に賛同  
声  
本物の映像を大事に  
二部授業料  
君臨編に御容赦を

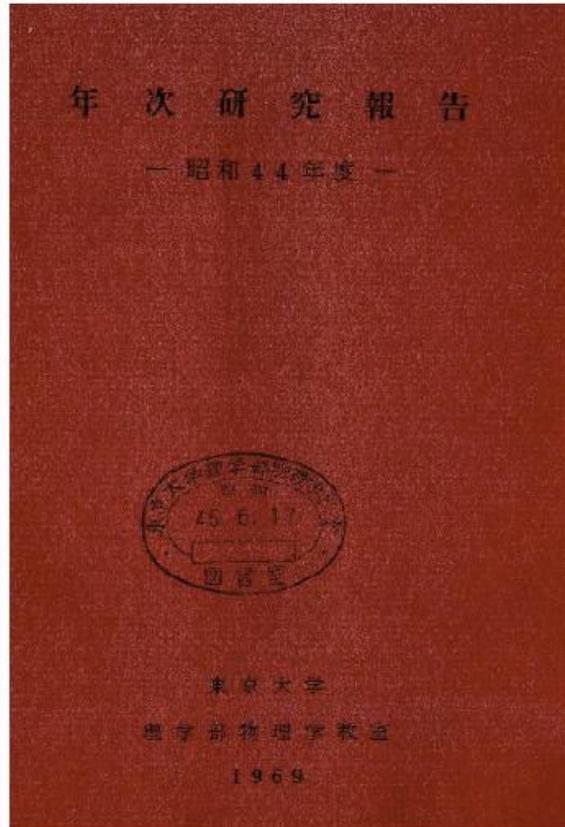
# 国内での重力波検出の試み

- 1970年ころから、**平川浩正**先生（東京大学 理学部）：  
独自の方式の重力波検出器を開発。  
→ ‘ウェーバーイベント’の検証。国内の重力波研究の始まり。



理学部旧1号館中庭のバラック小屋に設置された重力波検出器と  
平川浩正先生 1971年の写真 (坪野公夫先生 退職記念講演会資料 (2013年)より)

## 1969年 物理学教室年次報告



坪野公夫 最終講義資料より (2013.3)

## 4. 相対論および宇宙論

### 素粒子論研究室

#### 重力理論

江沢・山口は Weber の重力波検出の報告の信憑性を理論的に確かめる為に、Kepler運動をする2体系より放出される重力波の強度や振動数分布を Einstein 方程式の線型近似のもとに計算した。<sup>1)</sup>江沢は代表的な天体からの重力波放出の振動数分布を推定し Weber の実験に対する推察を行った。<sup>2)</sup>

#### 報 文

- 1) Z.F.Ezawa and Y.Yamaguchi, "Gravitational Waves Radiated from Two-Body Systems," J.Phys.Soc.Japan 28 4 (1970)
- 2) Z.F.Ezawa, "Frequency Spectra of Gravitational Waves in the Universe," J.Phys.Soc.Japan 28 6 (1970)

### 平川研究室

#### 重力波

天体からの重力波の検出を目的とする可聴周波帯域の振動子、増巾器、信号処理装置について信号感度、 $S/N$ 比、指向性などに重点をおいてシステムのデザインを行っている。平面内の四重極振動を使って指向性を上げること、重力波に対し、対称性の上で活性および不活性な2つのモードの間の反相関を利用して雑音をおとすこと、振動子の冷却により熱雑音のレベルを下げることなどをねらっている。

#### 報 文

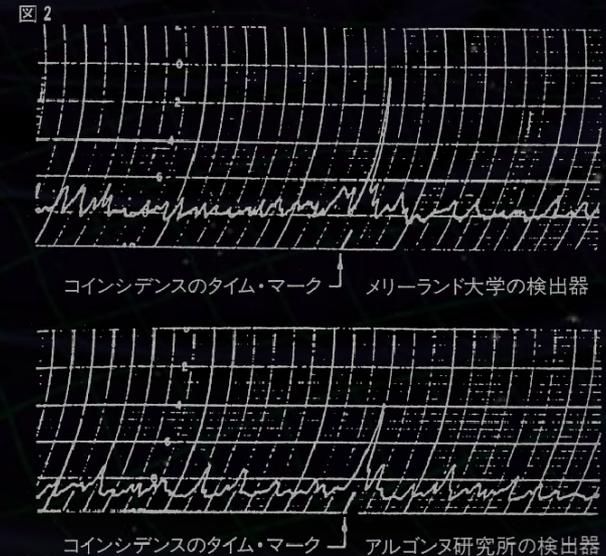
平川浩正：重力波，科学 40 (1970) 2。

# ウェーバーイベントの議論と追試

否定的な結論：

- 頻度・振幅が大きすぎる  
1000万年で銀河が消滅する程度に  
相当するエネルギー放出レート。
- 追試(~19台)では検出されなかった。

重力波検出実験が始まる契機となった。



坪野公夫「時空のさざ波」より

# 第1世代 重力波検出器

その後、レーザー干渉計方式の重力波望遠鏡の開発が進展。  
プロトタイプ開発などを経て、2000年前後より、**大型のレーザー干渉計型望遠鏡**が観測を開始。



我々の銀河、近傍銀河のイベントがあれば検出可能な性能。  
国際的観測ネットワーク：1年を超える観測データ

# 重力波の効果

重力波

重力波の振幅  $h$  : 歪み量

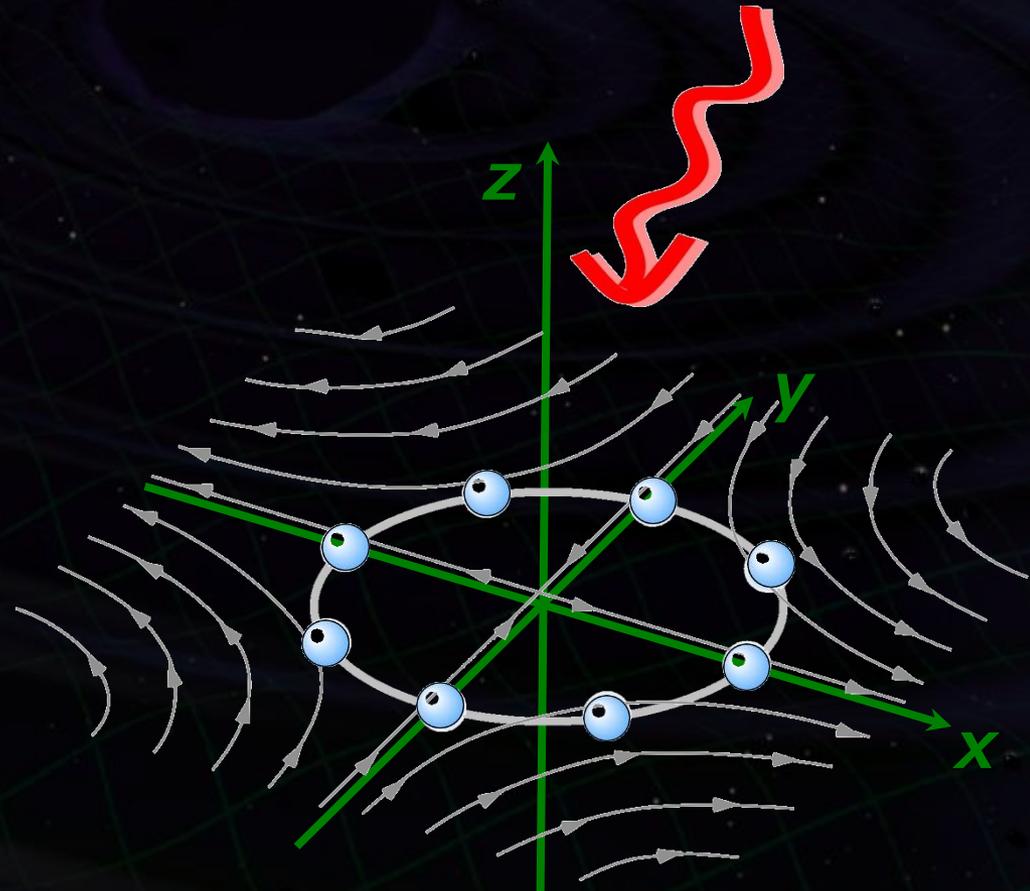
$$h \sim \delta L / L$$

$\delta L$  : 距離変動

$L$  : 2点間の距離

基線長が長いほど有利

→ レーザー干渉計

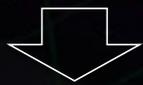


$h = 10^{-21} \rightarrow 1\text{m}$ の距離が $10^{-21}\text{m}$ 伸縮.

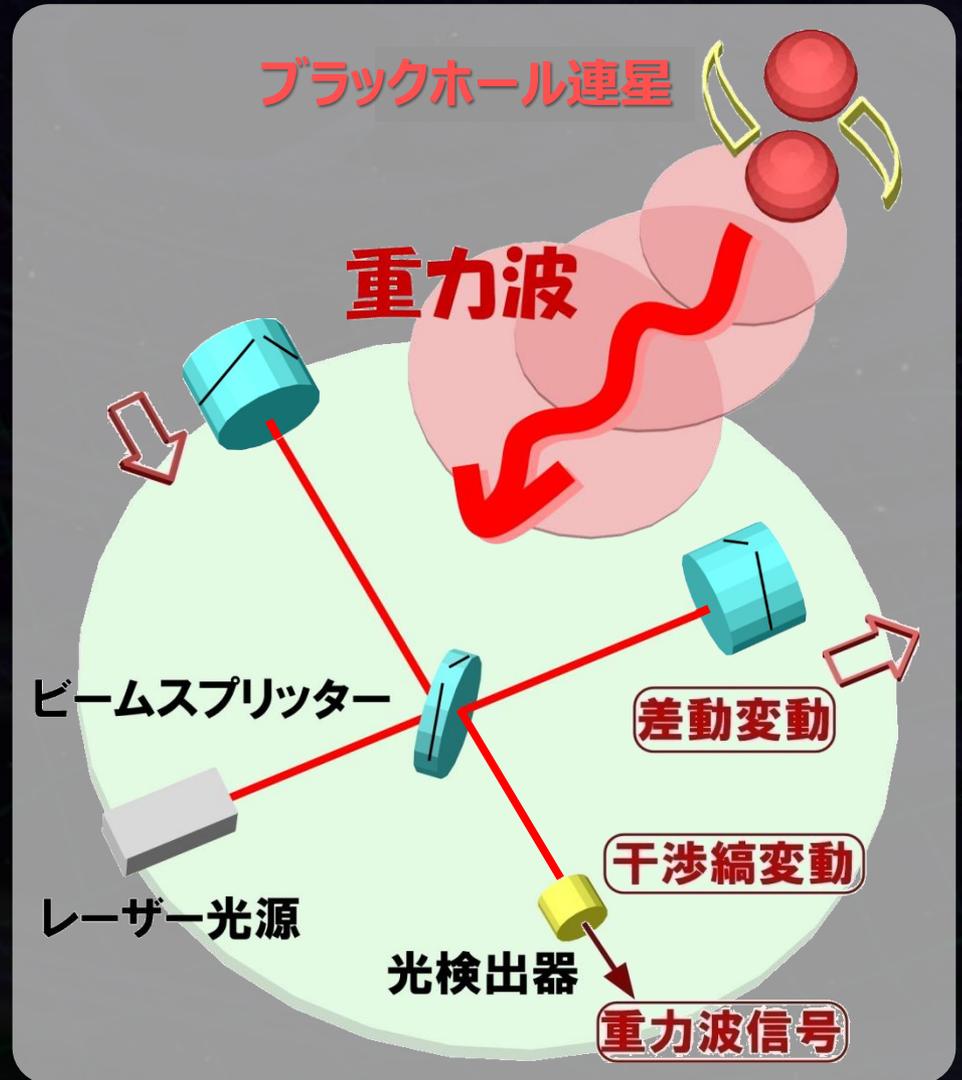
# 重力波望遠鏡の原理

レーザー干渉計  
(マイケルソン干渉計)

重力波の到来  
→ 直交する2方向に  
差動の歪み.



光検出器に漏れる  
光量の変化として観測



# 重力波による位相変化

x軸上を往復する光 (角周波数  $\Omega$ ) を考える

4次元線素の式

$$ds^2 = -(c dt)^2 + [1 + h(t)] dx^2 = 0$$



移項して両辺を積分  
 $h$  の1次の効果まで考慮

$$\Delta t = \frac{2L}{c} + \frac{1}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$



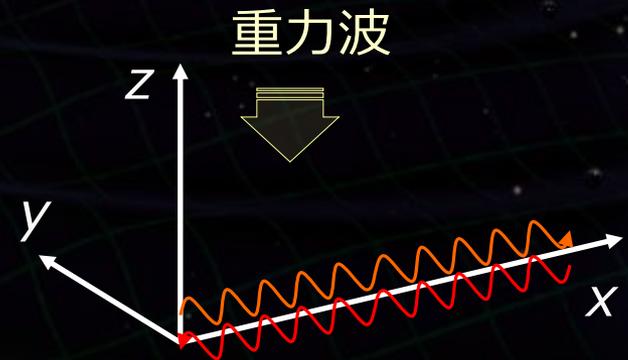
角周波数 $\Omega$ の光

$$\Delta \phi = \frac{2L\Omega}{c} + \frac{\Omega}{2} \int_{t-2L/c}^t h(t') dt'$$

重力波による位相変化



$$h \sim \frac{\delta L}{L} \sim \frac{\delta \nu}{\nu}$$



# 本格的な天文学

ただ… 第1世代干渉計で検出できるような  
重力波イベントは稀だった (だいたい **100年に1回** 程度の頻度)

⇒ **約1桁感度を向上した** 第2世代の重力波望遠鏡

高感度化→より多くの銀河をカバー

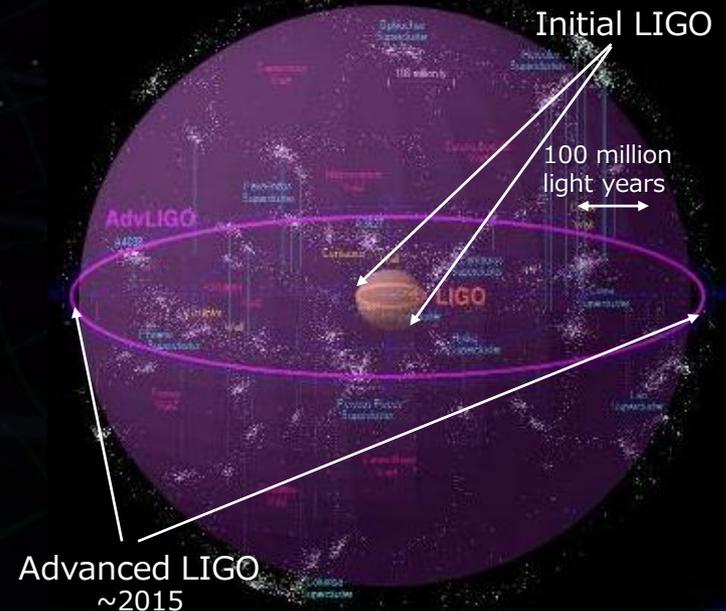
(重力波の振幅)  $\propto 1/(\text{波源までの距離})$



感度が10倍向上

→ 10倍遠くまで観測

→ 検出頻度は  $10^3$ 倍



第2世代望遠鏡では、**検出頻度 ~ 1年に10回程度**

# LIGOによる 重力波初観測

- 何をどのように観測し、  
何が分かったのか -



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

# LIGOによる重力波の初観測

- ・2016年2月11日 米国の重力波観測所 LIGO (ライゴ) が重力波の初観測を発表：地球から13億光年遠方でのブラックホール連星合体からの重力波信号を観測。



2016年2月11日 新聞各紙の朝刊



Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

# LIGOによる重力波の初観測

- 2015年9月14日, 地球から13億光年遠方で発生した  
ブラックホール連星合体からの重力波信号を観測。  
→ このイベントは 'GW150914' と名付けられた。

PRL 116, 061102 (2016)

 Selected for a Viewpoint in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
12 FEBRUARY 2016



## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5} M_{\odot}$  and  $29_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62_{-4}^{+4} M_{\odot}$ , with  $3.0_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

# LIGO

- 基線長4kmの大型レーザー干渉計型の重力波望遠鏡。  
ハンフォード (LHO) とリビングストン(LLO) の約3,000km  
離れた2つの観測所。
- 1992年にプロジェクト承認。1994年から建設開始。2002年に  
本格観測開始 (Initial LIGO)。TAMAを抜いて世界最高感度。  
2008年 性能を向上させた aLIGO (Advanced LIGO)の建設  
を開始。2015年に最初の科学的な観測運転。

Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory



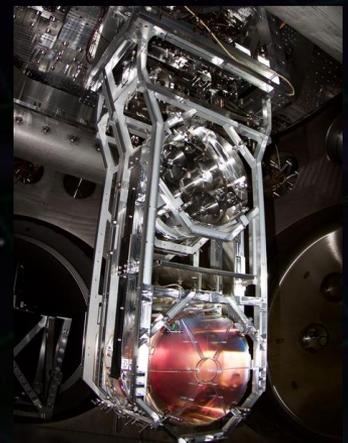
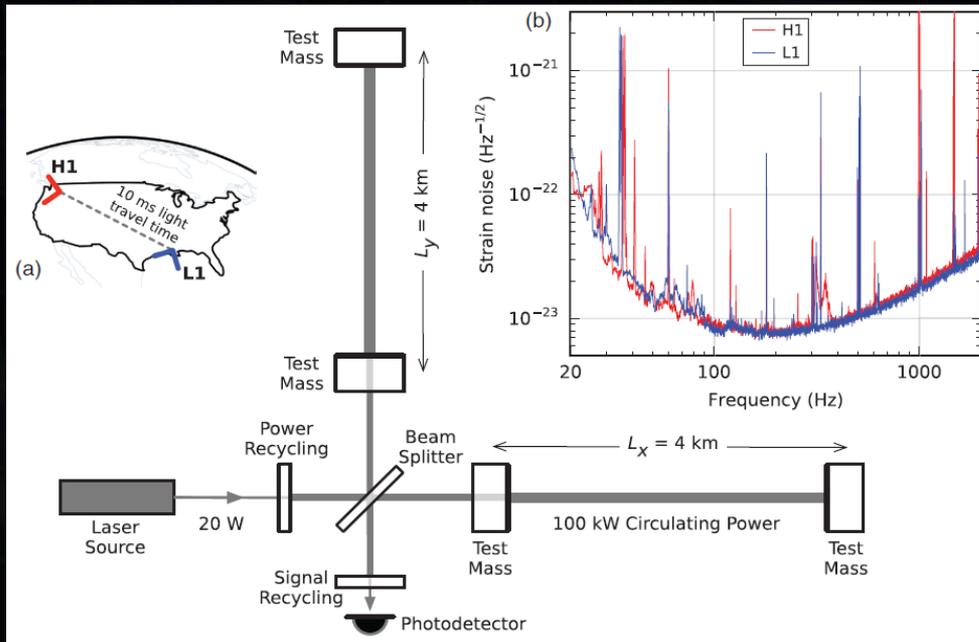
LIGOハンフォード観測所 (LHO), ワシントン州



LIGOリビングストン観測所 (LLO), ルイジアナ州

# LIGOの構成と感度

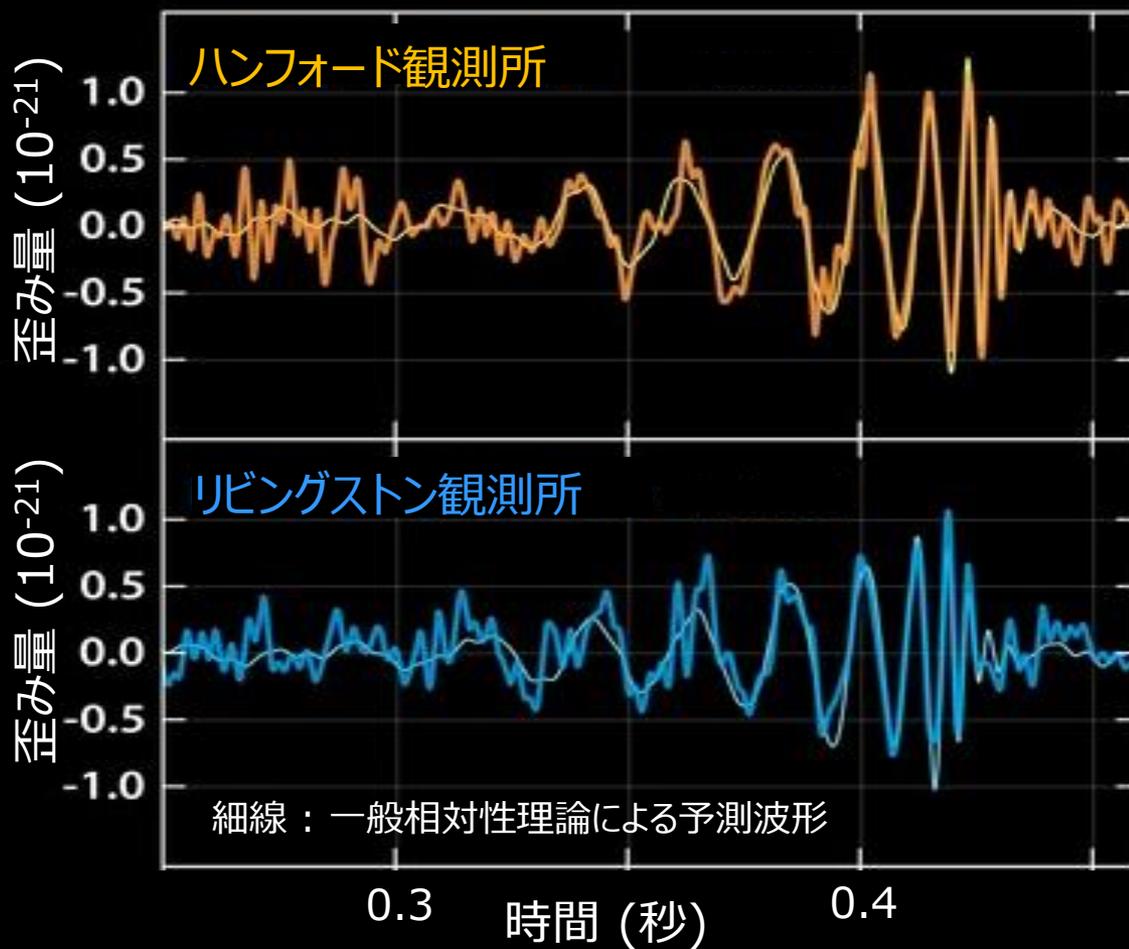
- LIGOの2台の干渉計は、100Hz付近で  $h \sim 10^{-22}$  程度の感度。
- 2015年9月中旬から 2016年1月まで**最初の観測運転 (O1)**。  
重力波信号が現れるチャンネル以外にも、周辺環境や干渉計状態をモニタするため**20万チャンネル以上の補助信号**を記録。



PRL 116, 061102 (2016)

# LIGOで観測された信号：GW150914

- ・非常に大きな信号で波形が明解。(振幅  $h \sim 10^{-21}$ ).
- ・2つの観測所でほぼ同時に観測。一般相対論の予想波形とも一致。



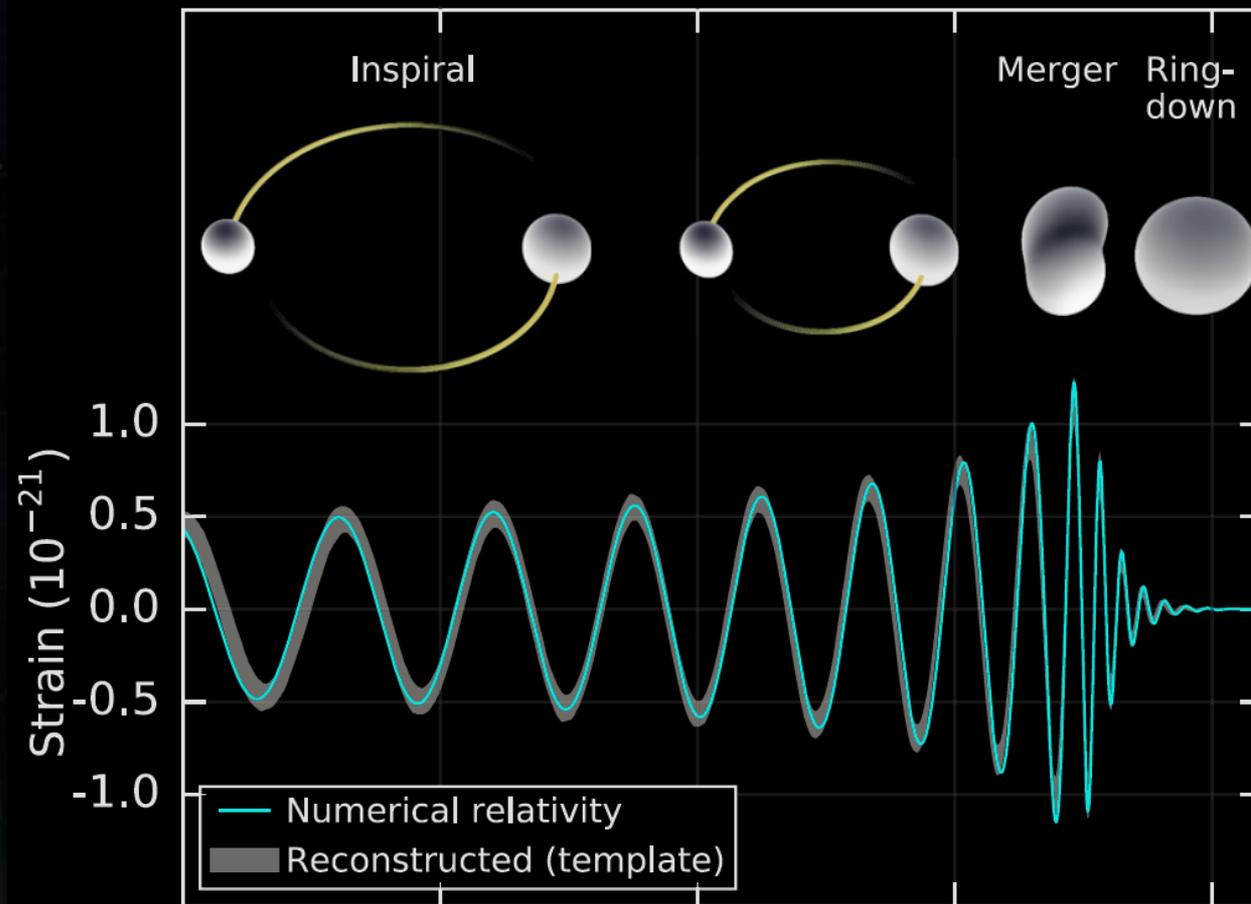
※ 簡単な信号処理：  
35-350Hzのバンドパス  
既知のライン除去



LIGO Webサイト素材を元に作成  
(Courtesy Caltech/MIT/LIGO  
Laboratory)

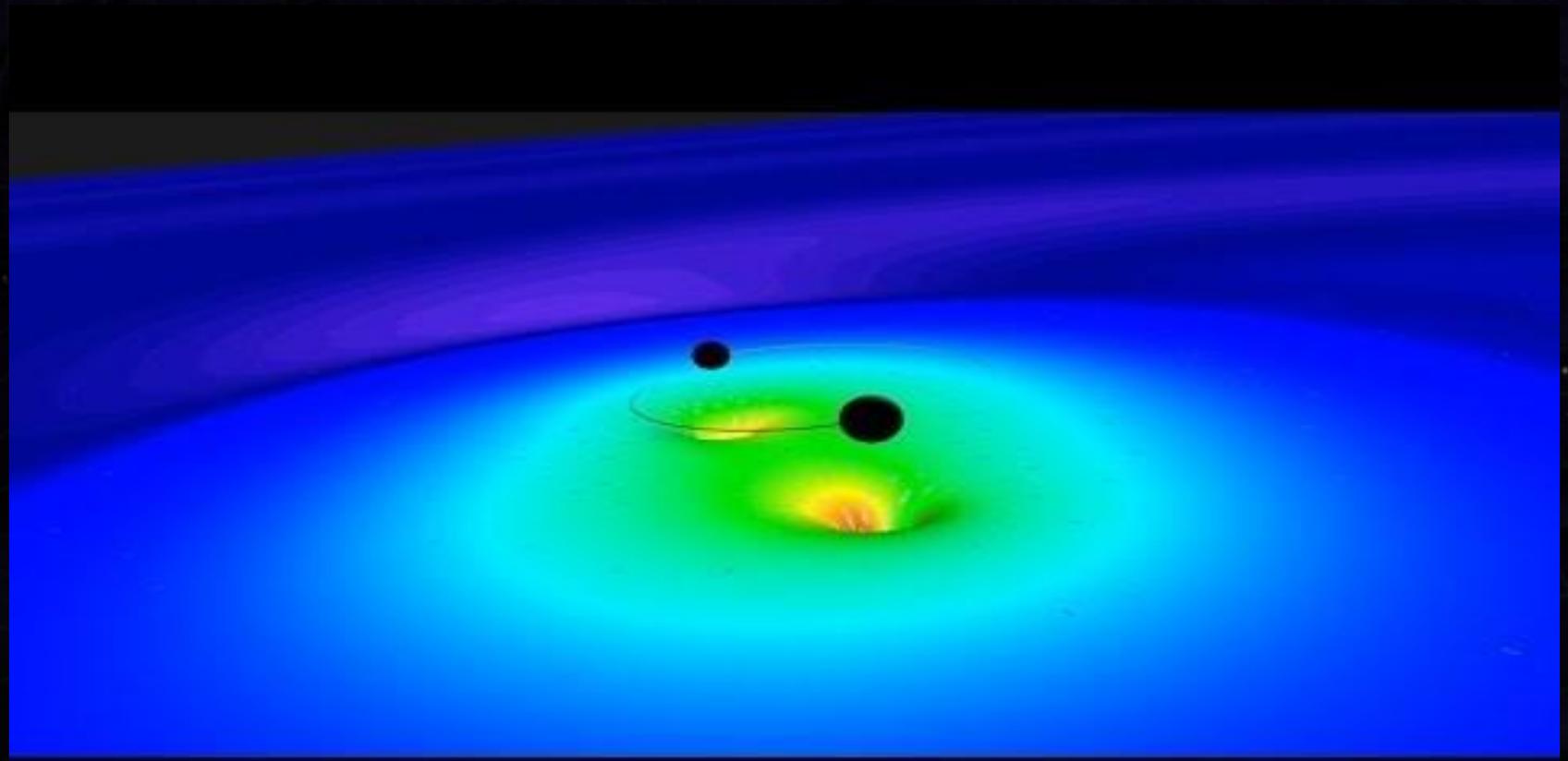
# 何が観測されたのか？

- 2つのブラックホールからなる連星が合体し、新たなブラックホールができた瞬間を観測したもの。



Courtesy  
Caltech/MIT/  
LIGO Laboratory

# 連星ブラックホールの合体からの重力波



Simulation by the SXS (Simulating eXtreme Spacetimes) Project (<http://www.black-holes.org>).

<https://youtu.be/1agm33iEAuo>

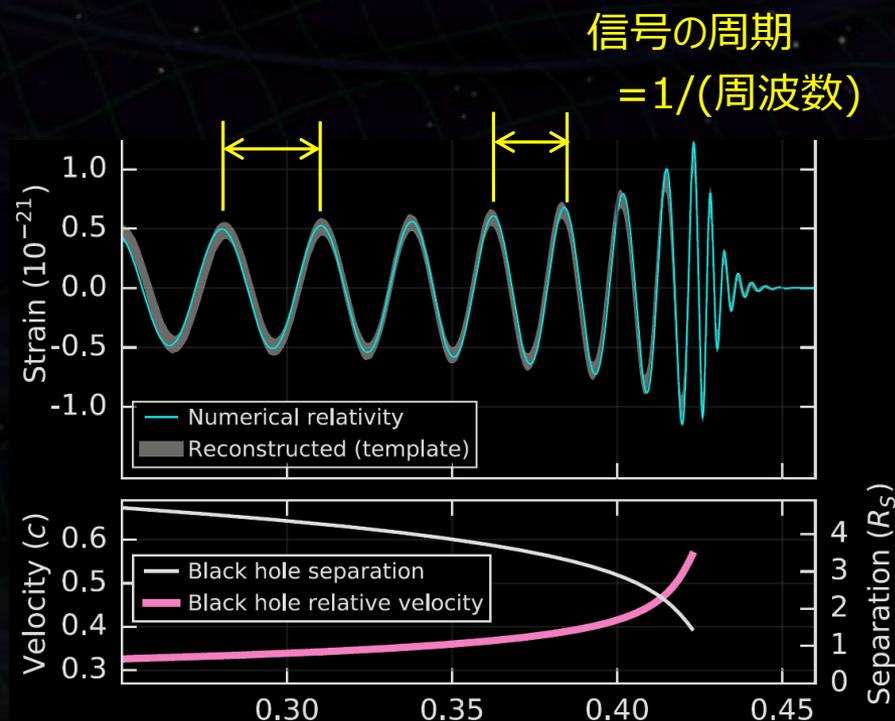
Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory

# 何が分かるのか？

- 観測された**重力波の波形**から連星の情報が得られる。
  - \* 周波数, 周波数変化 → 2つの天体の質量, 軌道半径, ...
  - \* 振幅 → 連星系までの距離. 軌道傾斜角, ...
  - \* 合体後の減衰振動 → 合体後の質量, スピン.



- 連星ブラックホールの質量:  
太陽質量の **29倍** と **36倍**.
- 合体後のブラックホールの質量:  
太陽質量の **62倍**.
- 連星系までの距離:  
**13億光年 (410Mpc)**.



# ブラックホール

## ブラックホールって何？

- \* 重力が強すぎて  
光すら出て来れない天体.
- \* 恒星が燃え尽きた最期に  
できると考えられている.
- \* 銀河の中心にはとても重たい  
ブラックホールがある.

太陽の30倍の質量  
→ 直径 200km程度.



# チャープ波信号を記述するパラメータ

## ・波源の物理量 3つ

チャープ質量  $\mathcal{M}_c = (m_1 \cdot m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$

換算質量比  $\eta = \mu/M = (m_1 \cdot m_2) / (m_1 + m_2)^2$

合体時刻  $t_c$

## ・望遠鏡との位置関係 5つ

光度距離  $D_L$

軌道傾斜角  $i$

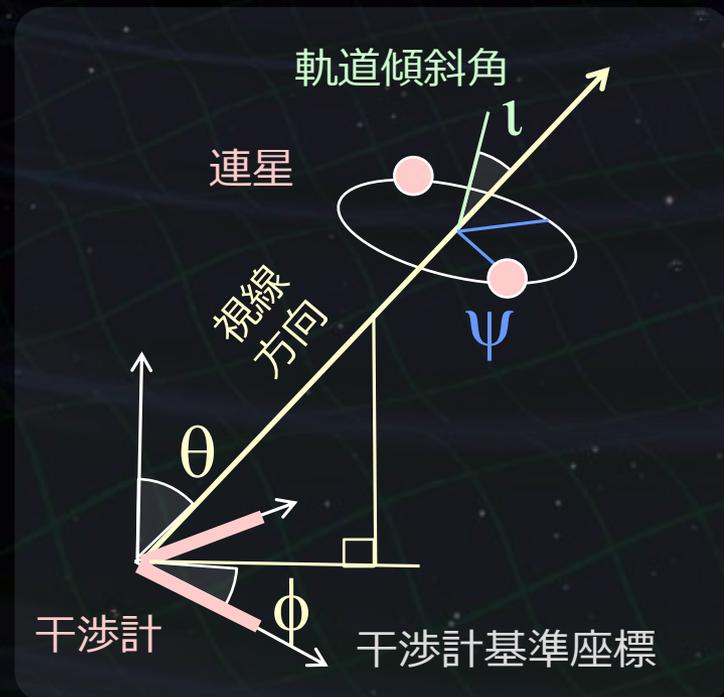
波源の方向  $\theta, \phi$

偏極角  $\psi$

## ・観測時のパラメータ 2つ

初期位相  $\phi_0$

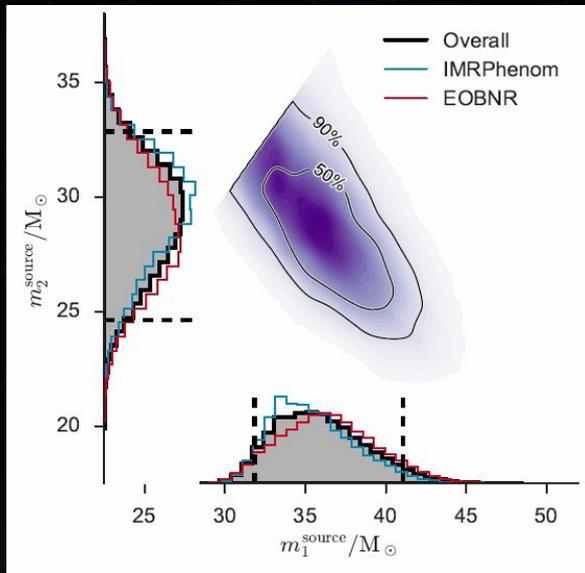
初期周波数  $f_0$



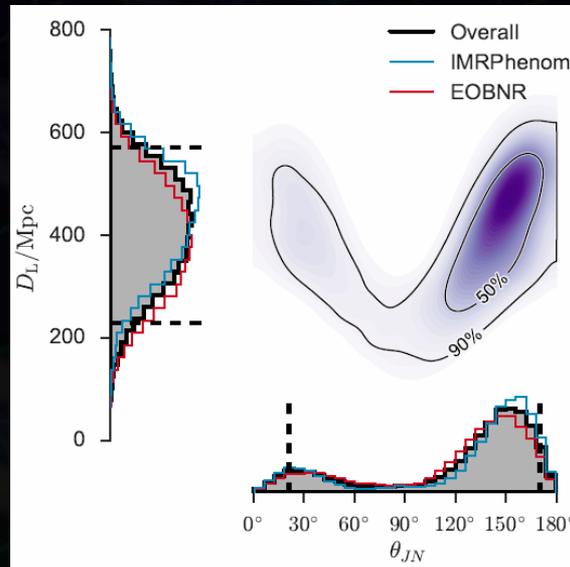
# 実際のパラメータ推定解析

- さまざまなパラメータを用いた理論波形 (テンプレート) と、観測された波形を比較。  
→ どの程度良く合うかを基準に、各パラメータを推定。

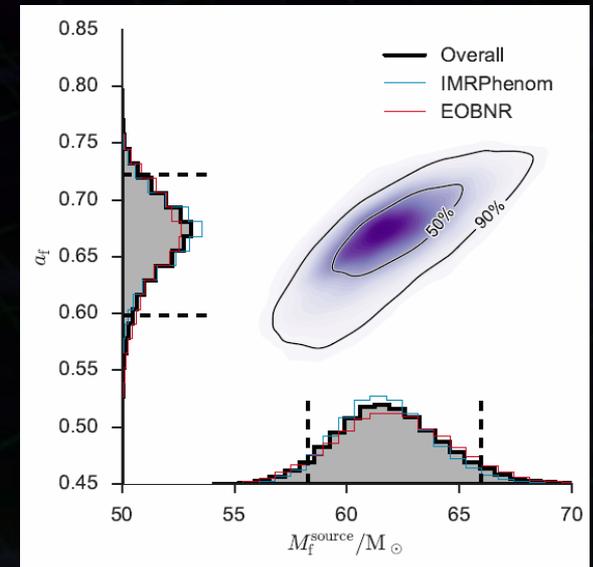
ブラックホールの質量の確率分布



距離と軌道傾斜角の確率分布



合体後の質量とスピンの確率分布



LIGO-P1500218-v12

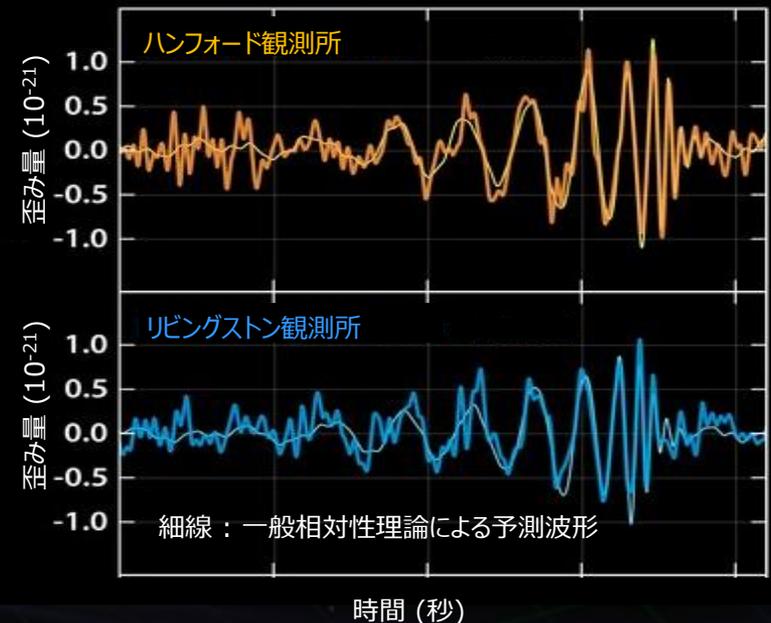
# LIGO観測の意義

## (1) 重力波の直接観測

100年前に一般相対性理論で予言された重力波が初めて直接観測された。その波形は、**理論波形と驚くほど良く一致した**。  
→「**アインシュタインの最後の宿題**」を解決。

## (2) 重力波天文学の幕開け

人類が、**宇宙をみる全く新しい手段**を手に入れた。予想より重たいブラックホールが存在し、それが連星系をなしているという発見。電磁波では観測できないものだった。



LIGO Webサイト素材を元に作成 (Courtesy Caltech/MIT/LIGO Laboratory)

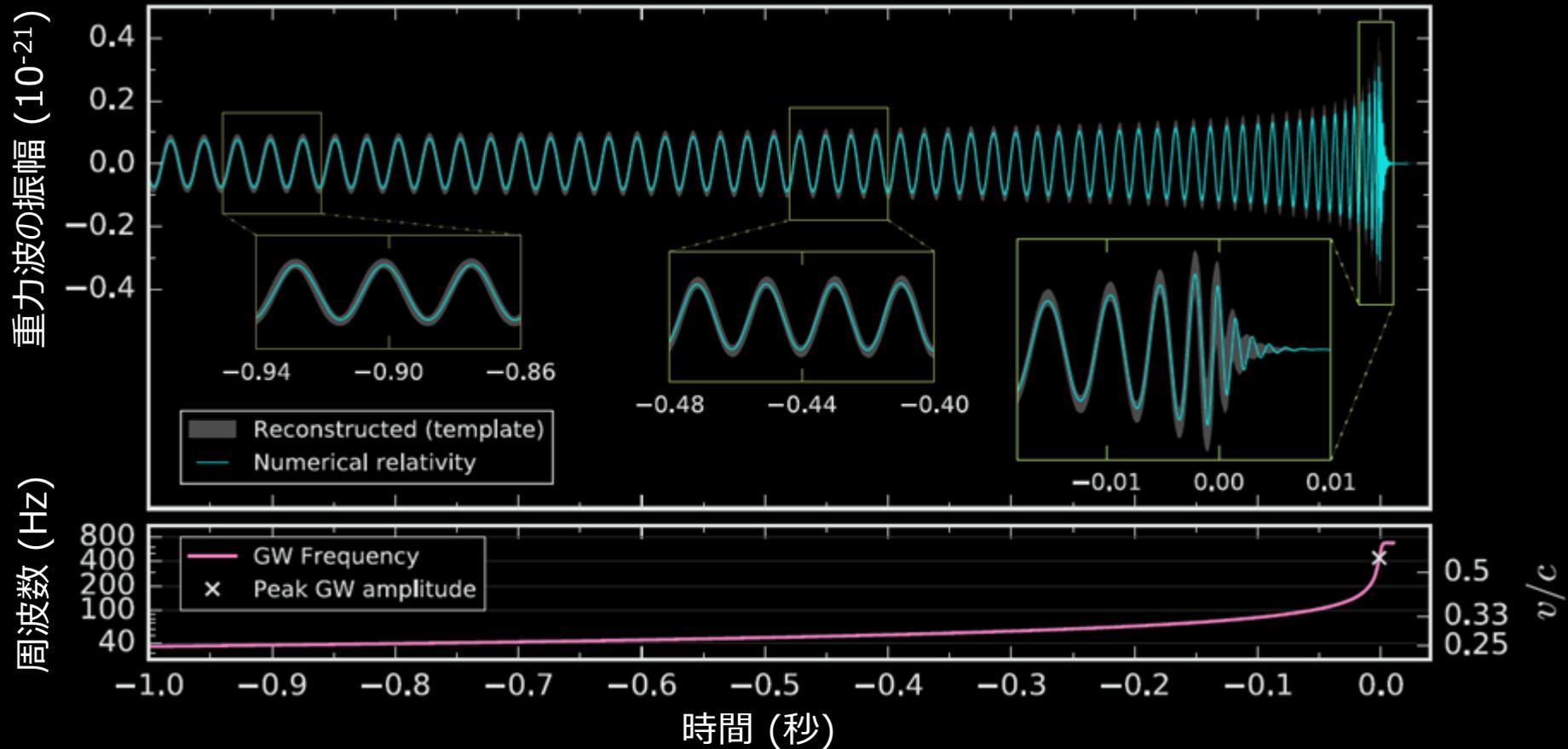
# 驚きもあった

---

- ・予想されていたよりも早く初観測が実現された。
- ・信号が非常に大きく、波形が明確だった。
- ・理論的な予想波形と非常によく一致した。
  
- ・最初に観測されたのがブラックホール連星合体だった。
- ・ブラックホールの質量が大きかった。

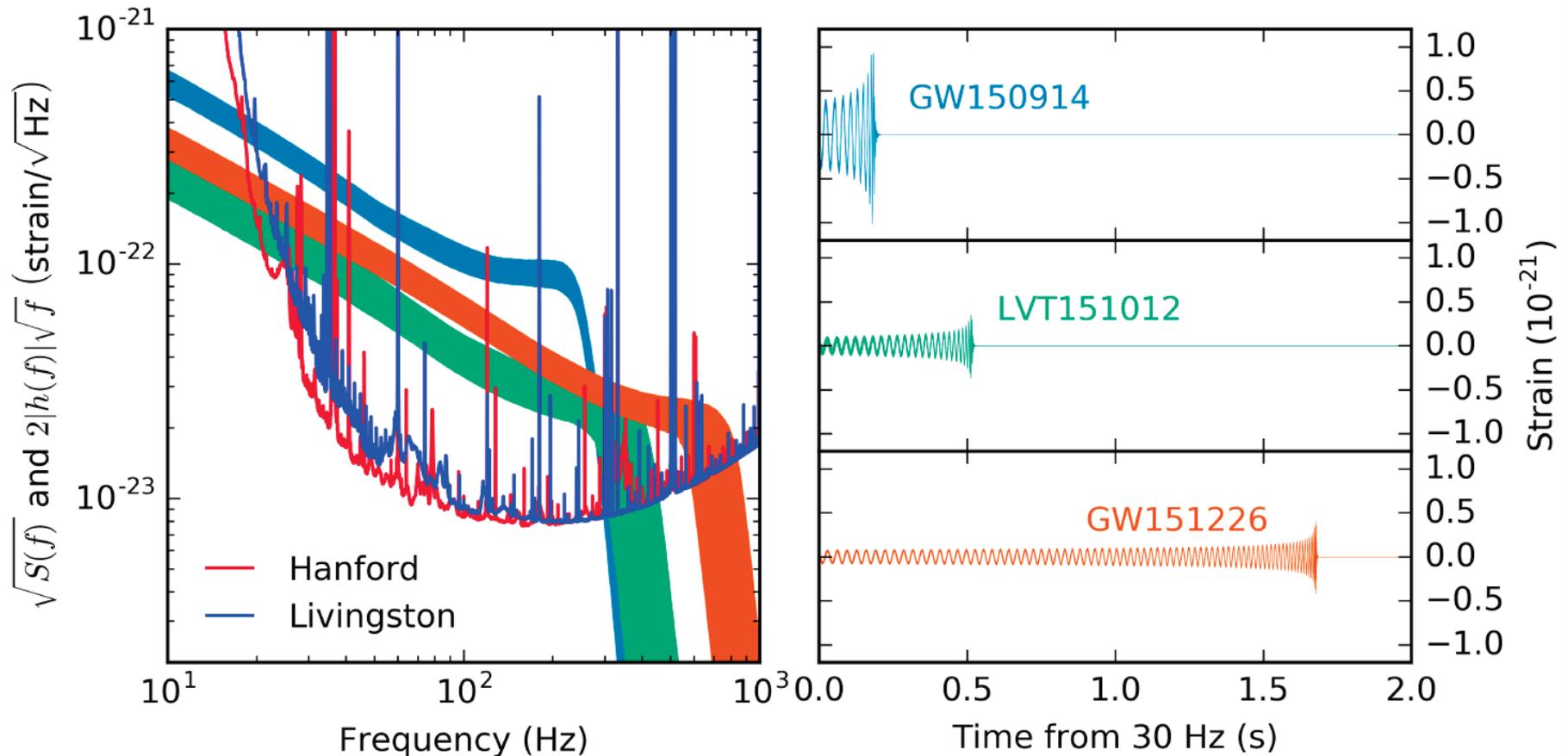
## 第2のイベント発見 (GW151226)

- 今度も連星ブラックホールの合体だった。  
少し軽い:  $14M_{\odot}$  と  $7.5M_{\odot}$  の連星合体. → 1秒間 信号継続.

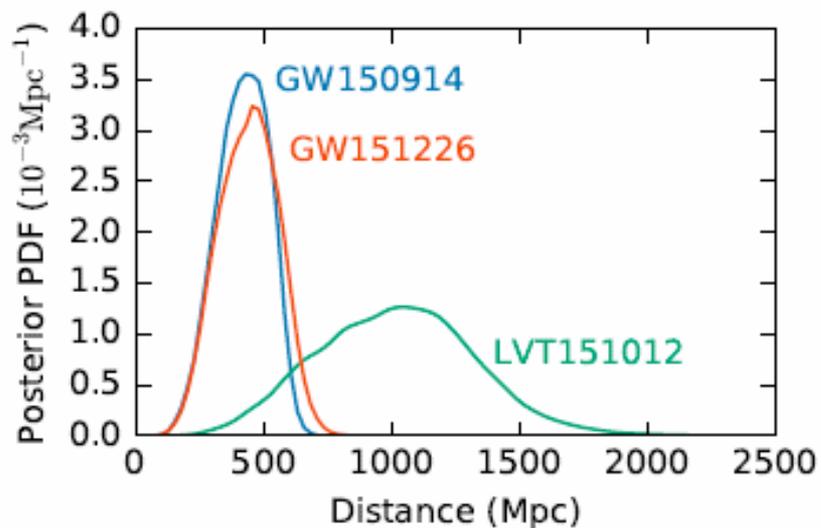
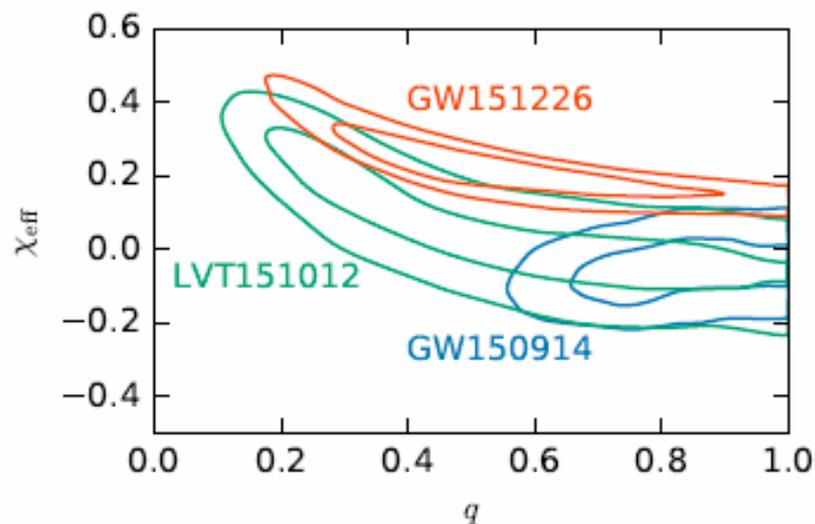
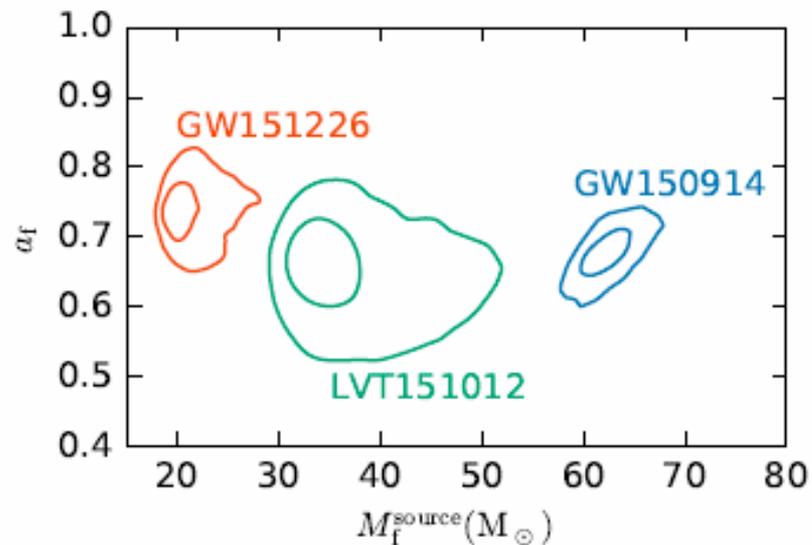
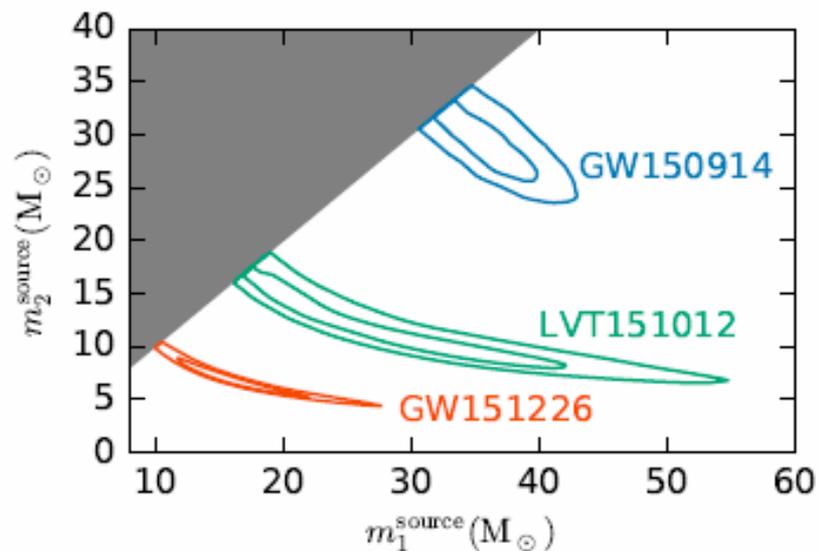


# LIGO O1の観測結果

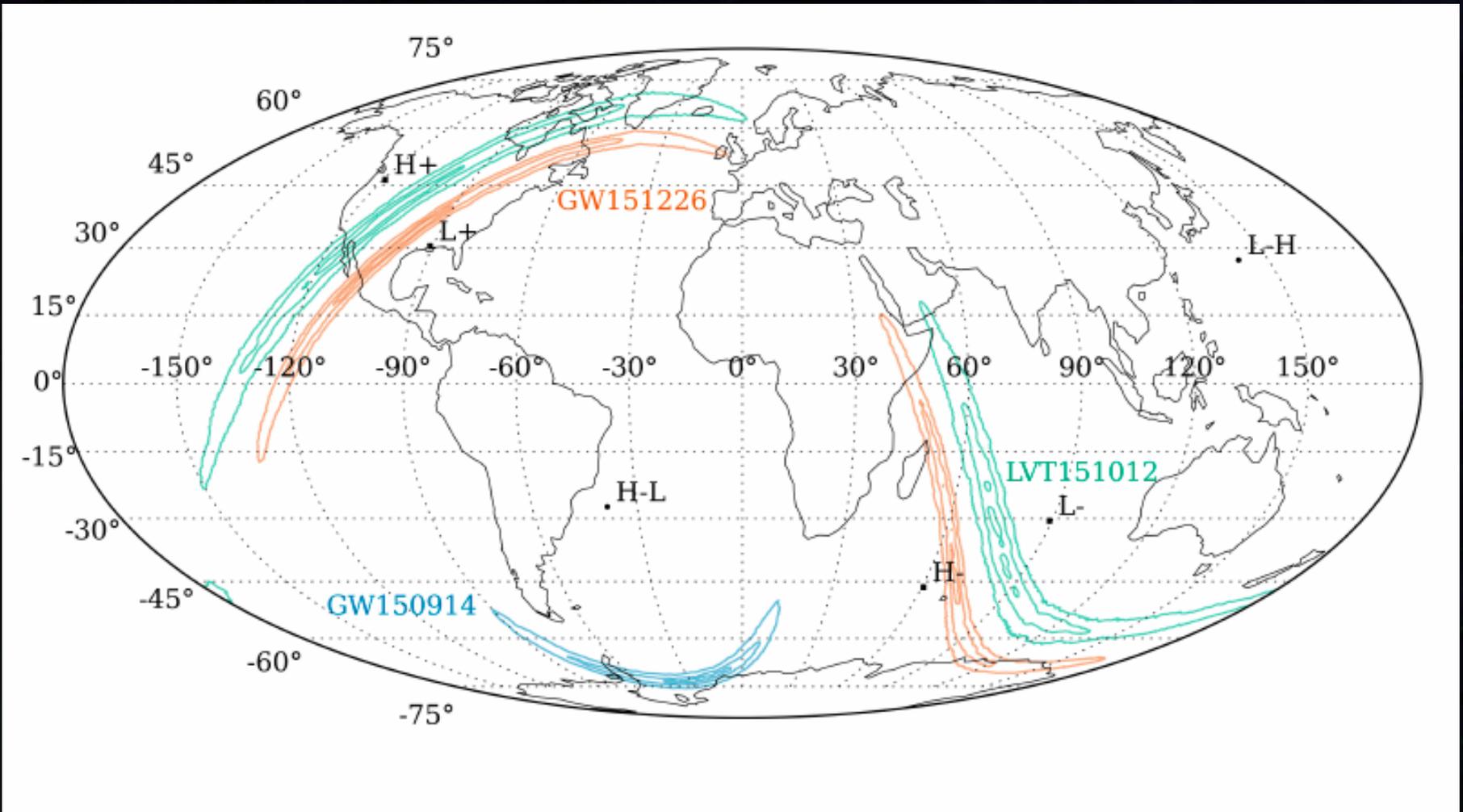
観測期間中に、2つのイベント (GW150914, GW151226) と1つの候補 (LVT151012, 87% CL) が見つかった。



# パラメータ推定結果



# Sky Localizations



# LIGOによる重力波の初観測 !!!

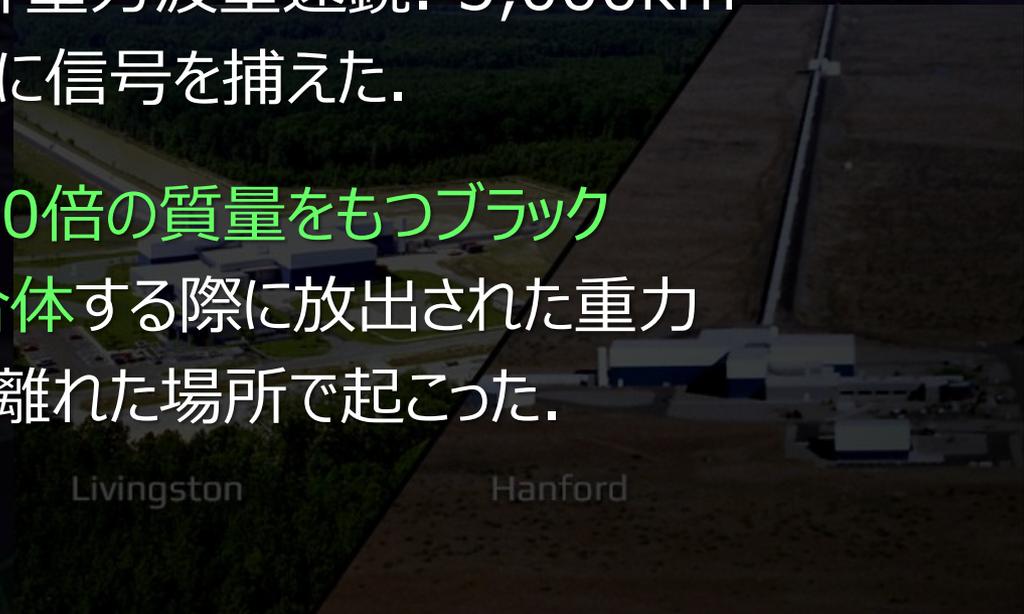
- **LIGO** (**L**aser **I**nterferometer **G**ravitational-wave **O**bservatory):  
米国の大型レーザー干渉計重力波望遠鏡。3,000km  
はなれた2箇所ではほぼ同時に信号を捕えた。

- 観測されたのは、**太陽の約30倍の質量をもつブラックホール** 2つからなる**連星が合体**する際に放出された重力波。地球から約13億光年離れた場所で起こった。

- 2つの大きな意義:

- (1) 一般相対性理論で予言された**重力波の直接観測**。

- (2) 人類が、**宇宙をみる全く新しい手段**を手に入れた。



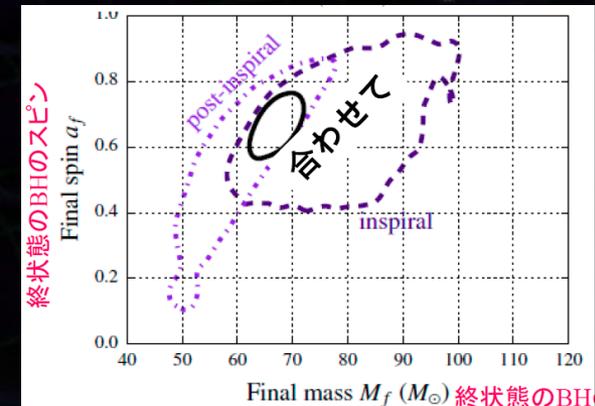
# あまり分からなかったこと

## ・あまり分からなかったこと

- \* **波源の位置** : LIGOの2台の時間差 7msec  
+ 干渉計指向性 → 590平方度  
(すばるHSCの視野 約2平方度).
- \* **スピン** : インスパイラル軌道とリングダウンのQ値からそれぞれ求まる.  
→ 無矛盾であるという以上は言える  
段階にはない.

arXiv:1602.03841

田中さん 日本物理学会資料より  
(2016.3.22)



# 新たな謎

田中さん 日本物理学会資料より(2016.3.22)

## 新たな謎

### \* $30M_{\odot}$ のブラックホール連星の起源.

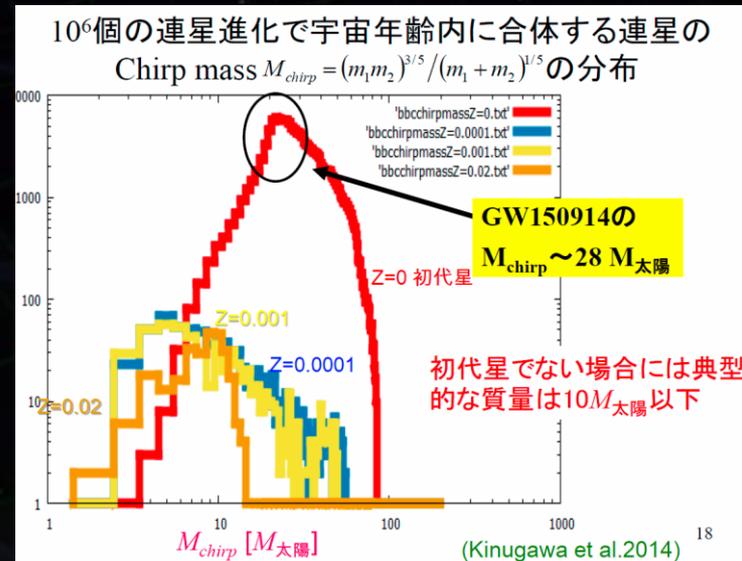
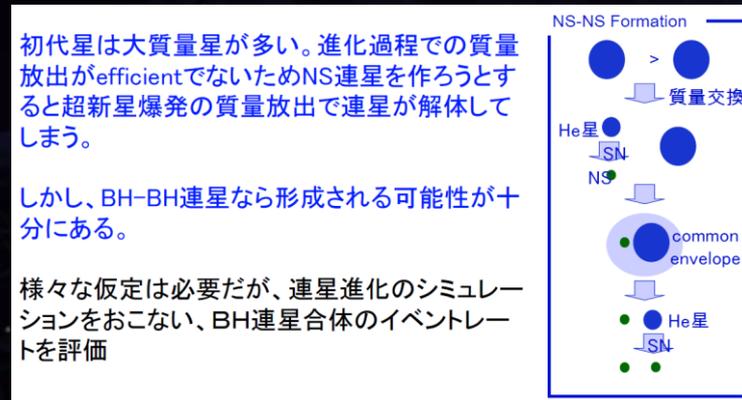
たくさんの可能性:

- (1) 初代星などの進化.
- (2) 原始ブラックホールの連星.
- (3) 多体散乱による連星形成.

→ スピンの情報, 多数の観測による統計の蓄積で分かるかも.

### \* このようなBH連星の分布・合体頻度.

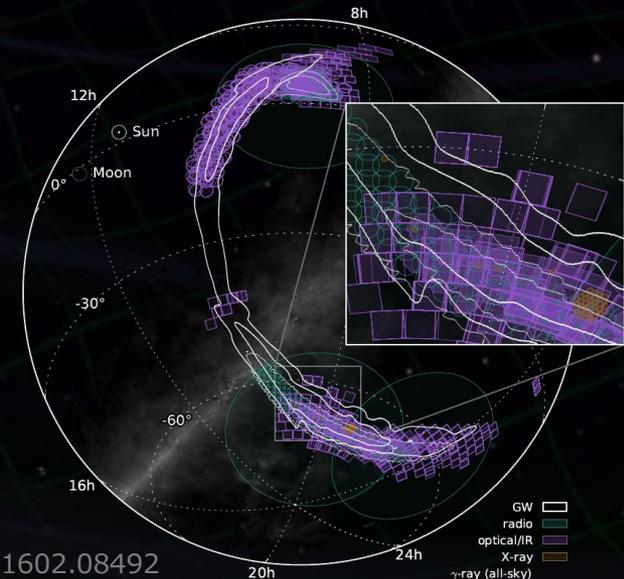
→ 今後の観測に期待.



# 波源の位置特定と電磁波追観測

- 重力波信号と同時に**電磁波** (電波, 赤外線, 可視光, X線, ガンマ線)などによる追観測を行うことで,得られる知見は大幅に広がる.
- GW150914: LIGOの2台の重力波望遠鏡だけが信号を観測.
  - 位置特定精度: **590平方度**. 電磁波望遠鏡での追観測も行われたが, 関連した信号は確認されていない.

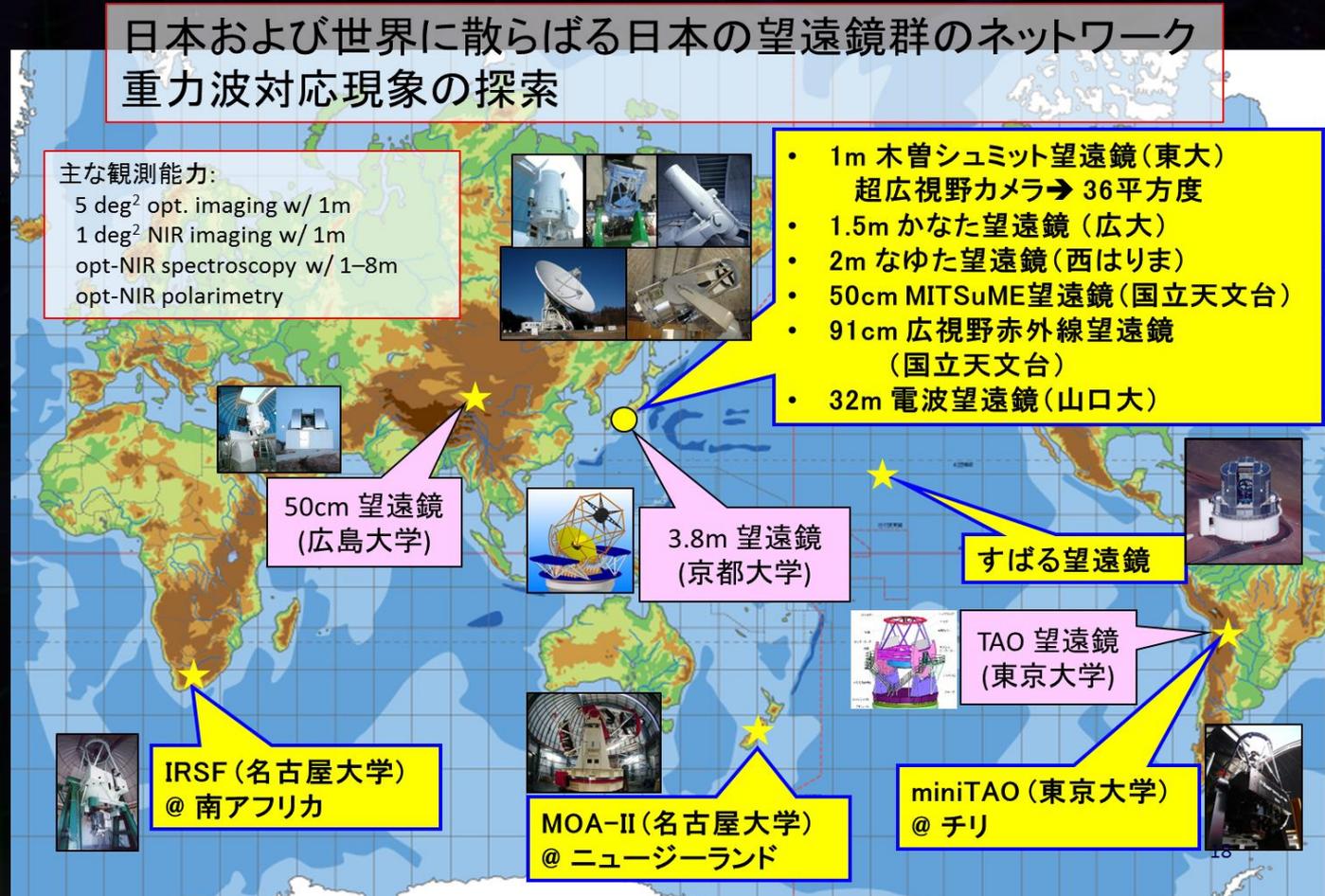
LIGOは, 事前に20以上の観測グループと協力の申し合わせ(MoU)をしていたGW150914の際には, イベント2日後に連絡 → 電磁波(電波, 可視・赤外線, X線, ガンマ線)とニュートリノで追観測.



・日本からも参加：

X線ガンマ線衛星MAXI, 重力波追跡観測網 J-GEM

## 日本および世界に散らばる日本の望遠鏡群のネットワーク 重力波対応現象の探索



吉田道利(広島大)  
日本物理学会講演資料  
(2016)

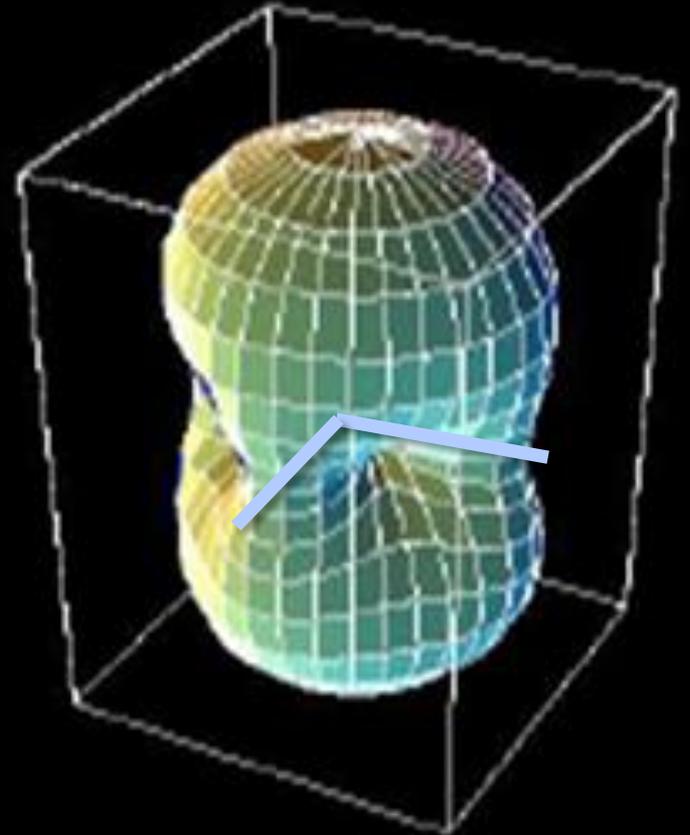
# 干渉計の指向性

重力波検出器は**指向性が小さい**。

- \* ほぼどこから来ても観測可能。
  - 重力波が真上から来たか真下から来ても同じ感度。
  - 真横から来ても半分の感度。
- \* どこから来たのか分かりにくい。

⇒ 1台の干渉計で**重力波源の位置を特定することはできない**。

干渉計のアンテナパターン



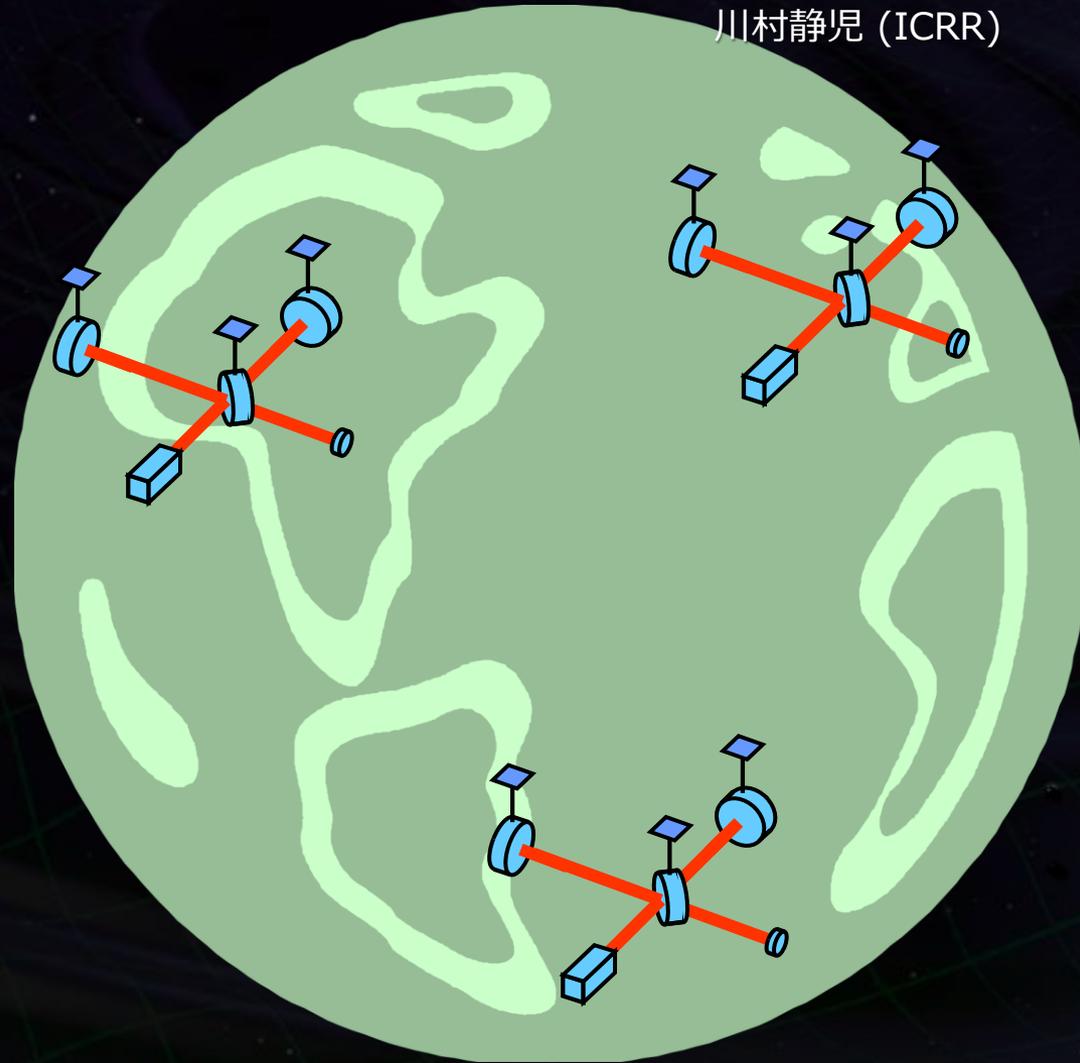
# 国際観測網での同時観測

アニメーション：  
川村静児 (ICRR)

複数台で同時観測



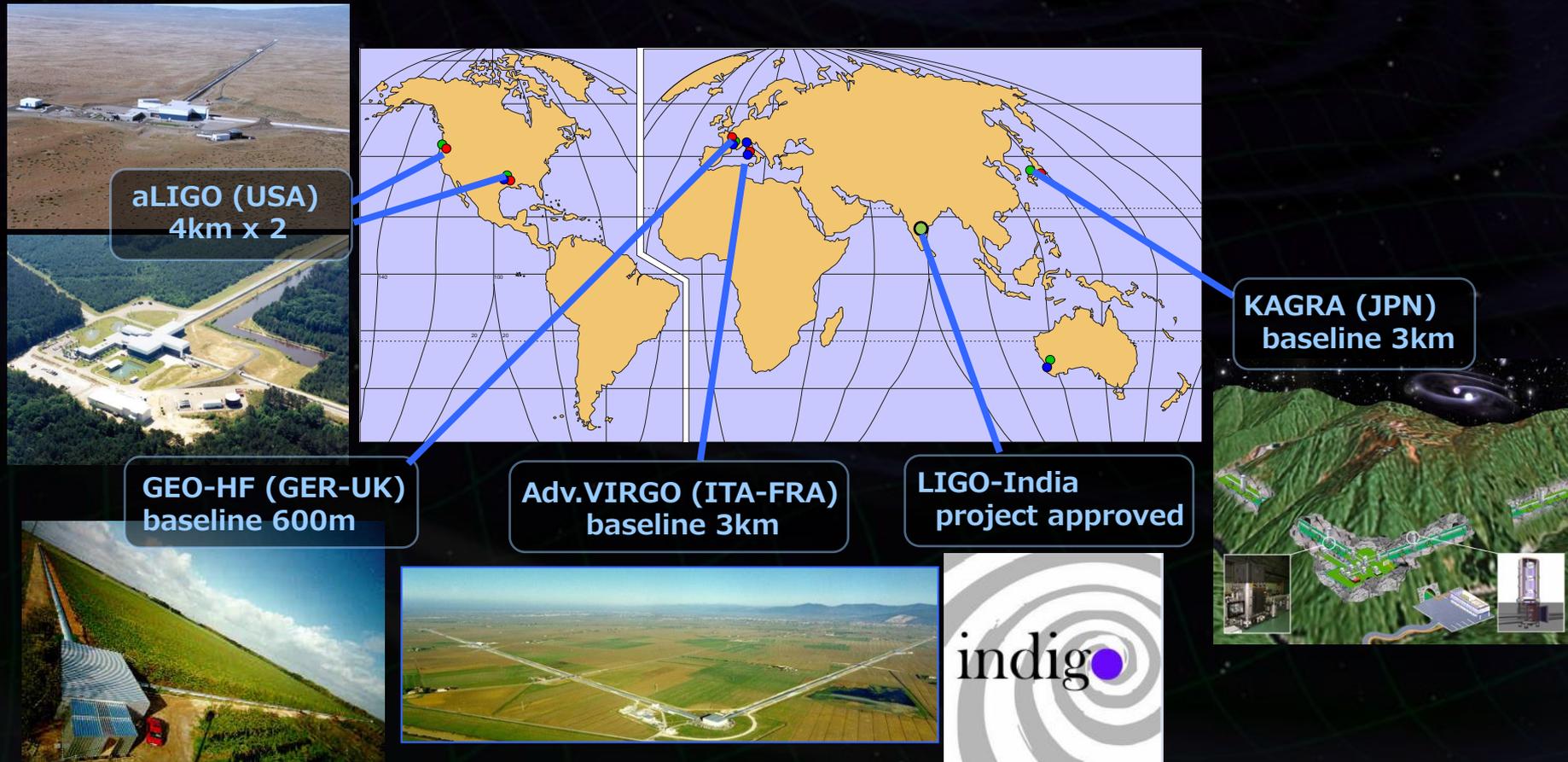
到着時間の差から  
波源の方向が分かる！



# 第2世代 重力波望遠鏡

国際観測ネットワークが形成される (現在から 約3-5年後)

→ 重力波天文学 (重力波の検出, 位置, 物理情報, ...)

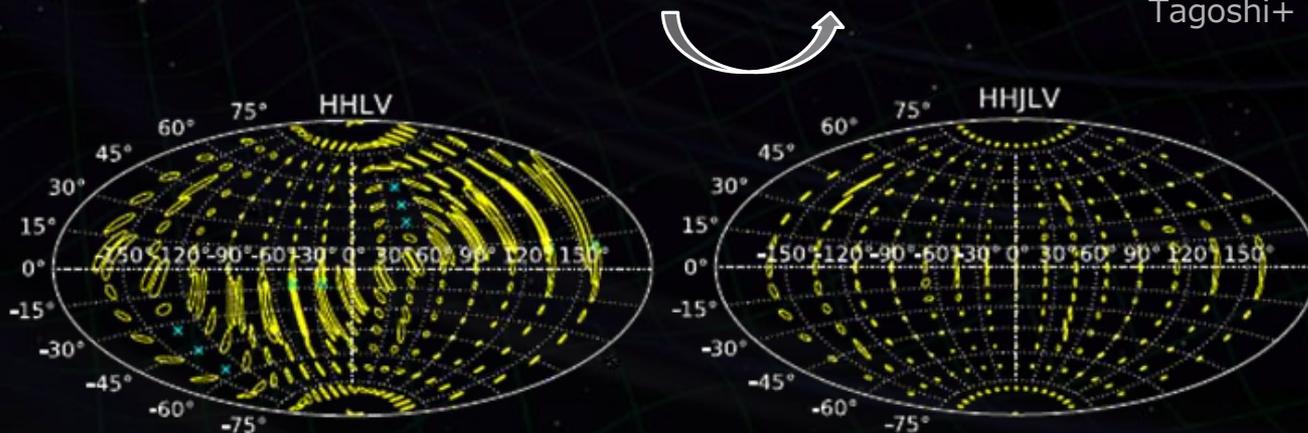


# 重力波源の方向特定精度

NS-NS coalescence @180Mpc (95%CI)		
(1.4,1.4)Msun	LHV	LHV <b>K</b>
median of $\delta\Omega$ [Deg <sup>2</sup> ]	30.25	9.5

H: LIGO--Hanford  
 L: LIGO--Livingston  
 V: Virgo,  
 K: KAGRA  
 I: LIGO-Indea

From presentation by H. Tagoshi  
 J.Veitch+, PRD85, 104045 (2012)  
 Tagoshi+ (2014)



S.Fairhurst  
 CQG 28(2011)  
 105021

観測ネットワークに **KAGRA** が加わる (aLIGO + adv. VIRGO)  
 → 角度分解能が 3-4 倍向上.  
 干渉計稼働率 80%程度 → 4台目以降の存在も非常に重要.

# 参考 : LIGO 01 Events

## Parameters

\* Chirp mass :  $(m_1 m_2)^{3/5} / M^{1/5}$

\* Mass ratio :  $q = m_2/m_1 < 1$

\* Angular momentum :

$$a_{1,2} = \frac{c}{Gm_{1,2}^2} |\mathbf{S}_{1,2}|$$

\* Component aligned with orbit

$$\chi_{1,2} = \frac{c}{Gm_{1,2}^2} \mathbf{S}_{1,2} \cdot \hat{\mathbf{L}}$$

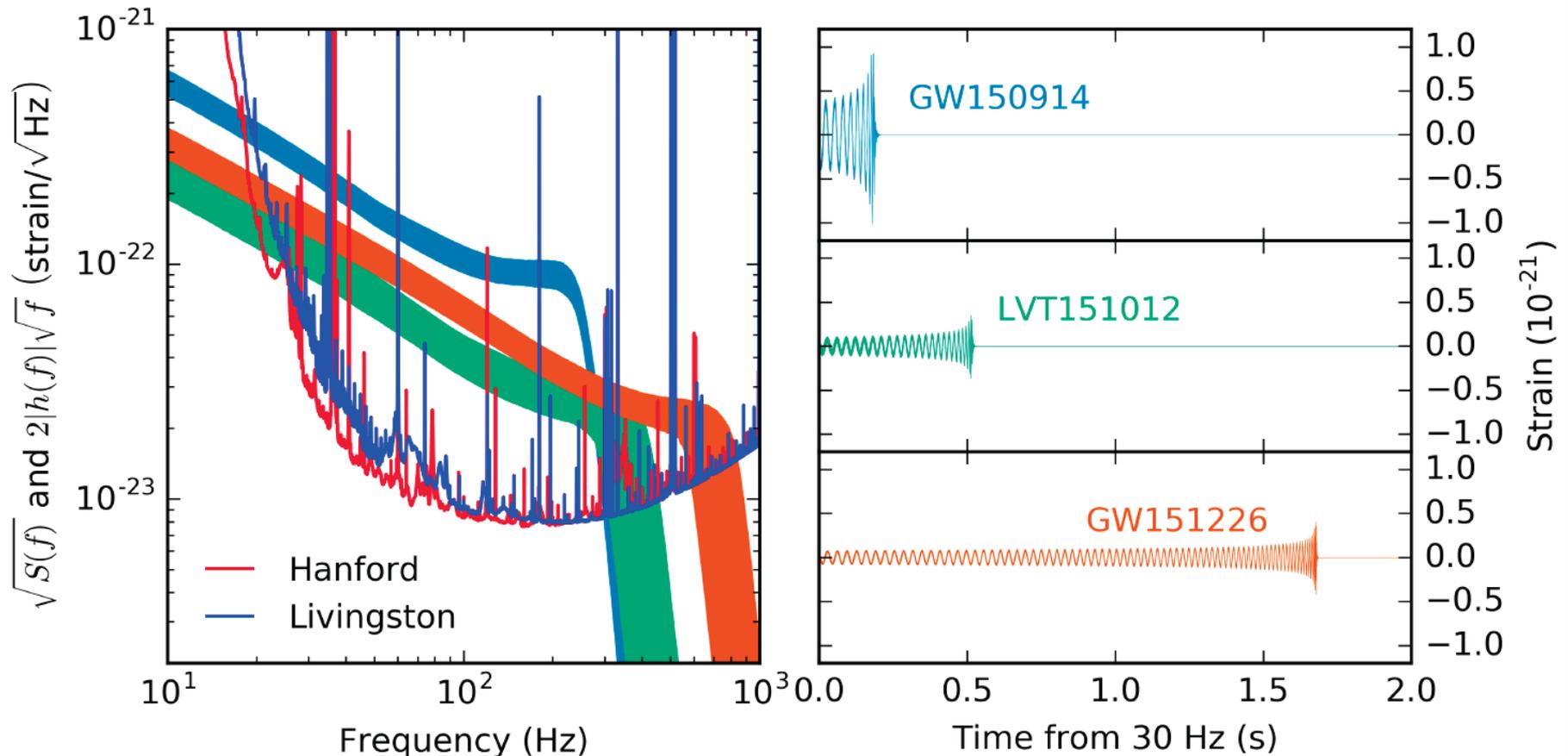
\* Effective spin parameter

$$\chi_{\text{eff}} = \frac{m_1 \chi_1 + m_2 \chi_2}{M}$$

Event	GW150914	GW151226	LVT151012
Signal-to-noise ratio	23.7	13.0	9.7
$\rho$			
False alarm rate FAR/yr <sup>-1</sup>	$< 6.0 \times 10^{-7}$	$< 6.0 \times 10^{-7}$	0.37
p-value	$7.5 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-8}$	0.045
Significance	$> 5.3 \sigma$	$> 5.3 \sigma$	$1.7 \sigma$
Primary mass $m_1^{\text{source}}/M_{\odot}$	$36.2^{+5.2}_{-3.8}$	$14.2^{+8.3}_{-3.7}$	$23^{+18}_{-6}$
Secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_{\odot}$	$29.1^{+3.7}_{-4.4}$	$7.5^{+2.3}_{-2.3}$	$13^{+4}_{-5}$
Chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_{\odot}$	$28.1^{+1.8}_{-1.5}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$15.1^{+1.4}_{-1.1}$
Total mass $M^{\text{source}}/M_{\odot}$	$65.3^{+4.1}_{-3.4}$	$21.8^{+5.9}_{-1.7}$	$37^{+13}_{-4}$
Effective inspiral spin $\chi_{\text{eff}}$	$-0.06^{+0.14}_{-0.14}$	$0.21^{+0.20}_{-0.10}$	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$
Final mass $M_f^{\text{source}}/M_{\odot}$	$62.3^{+3.7}_{-3.1}$	$20.8^{+6.1}_{-1.7}$	$35^{+14}_{-4}$
Final spin $a_f$	$0.68^{+0.05}_{-0.06}$	$0.74^{+0.06}_{-0.06}$	$0.66^{+0.09}_{-0.10}$
Radiated energy $E_{\text{rad}}/(M_{\odot}c^2)$	$3.0^{+0.5}_{-0.4}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$1.5^{+0.3}_{-0.4}$
Peak luminosity $\ell_{\text{peak}}/(\text{erg s}^{-1})$	$3.6^{+0.5}_{-0.4} \times 10^{56}$	$3.3^{+0.8}_{-1.6} \times 10^{56}$	$3.1^{+0.8}_{-1.8} \times 10^{56}$
Luminosity distance $D_L/\text{Mpc}$	$420^{+150}_{-180}$	$440^{+180}_{-190}$	$1000^{+500}_{-500}$
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$	$0.20^{+0.09}_{-0.09}$
Sky localization $\Delta\Omega/\text{deg}^2$	230	850	1600

# LIGO O1の観測結果

観測期間中に, 2つのイベント (GW150914, GW151226) と1つの候補 (LVT151012, 87% CL) が見つかった。

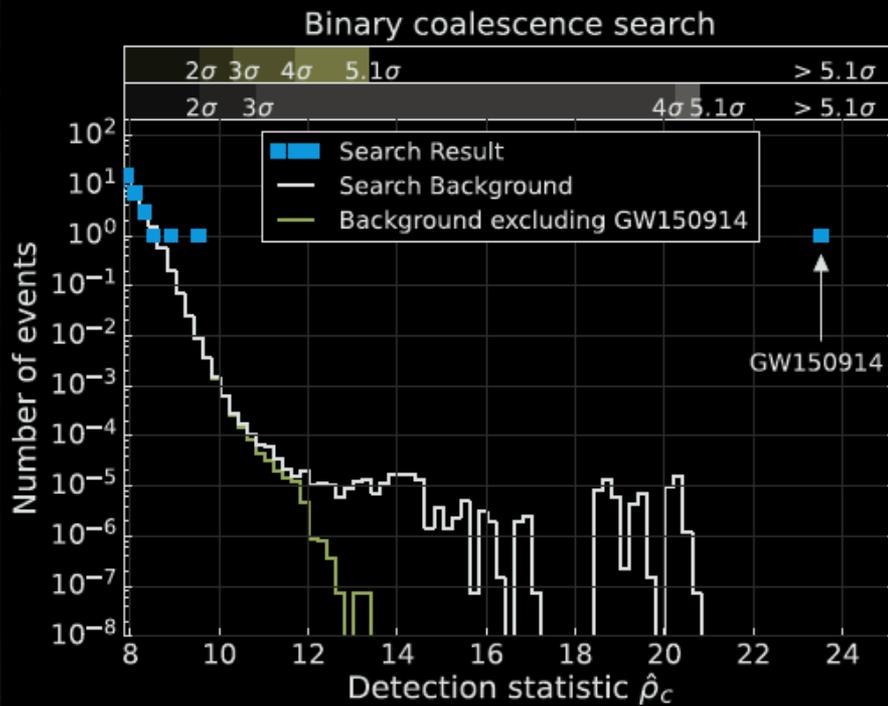


# LIGO O1 の観測結果

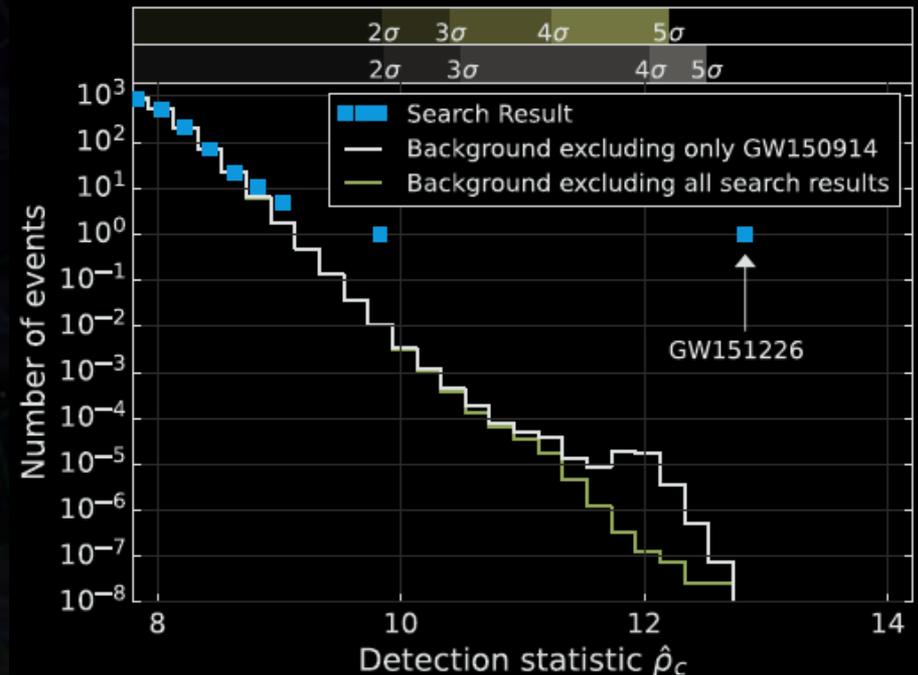
- 重力波探査結果：有意度の評価
  - 探査結果：時間ウィンドウ内での同時観測。
  - バックグラウンド：時間シフトされたデータから推定。

最初の発表 (最初の16日分のデータから)

O1の全データ解析結果



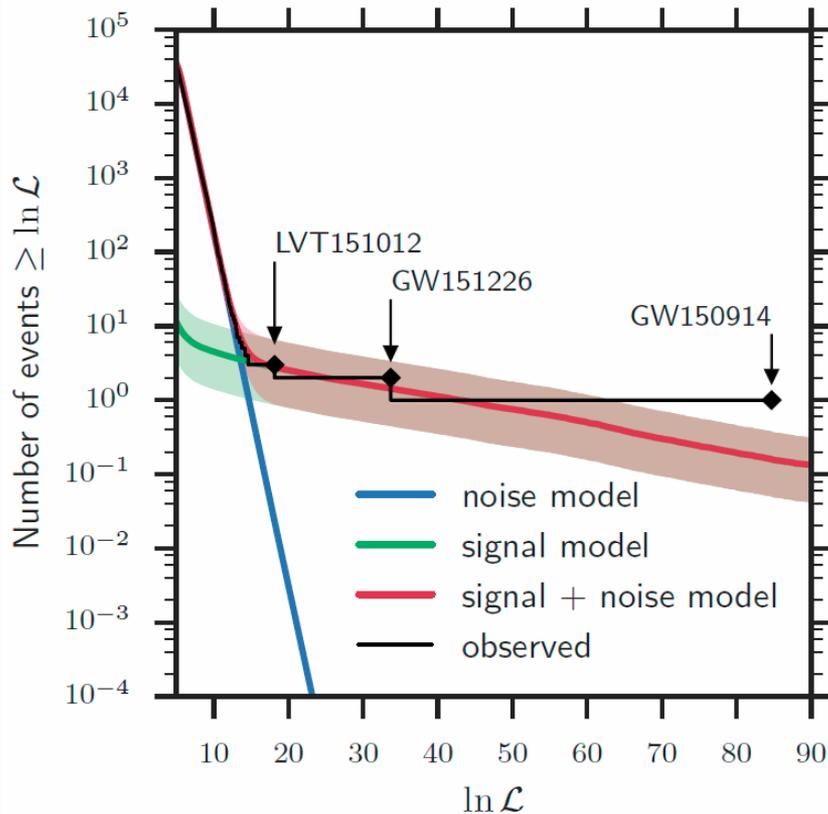
PRL 116, 061102 (2016)



PRL 116, 241103 (2016)

# イベントレートの推定

BBH merger rate :  $9 - 240 \text{ Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$



Mass distribution	$R/(\text{Gpc}^{-3} \text{ yr}^{-1})$		
	PyCBC	GstLAL	Combined
	Event based		
GW150914	$3.2^{+8.3}_{-2.7}$	$3.6^{+9.1}_{-3.0}$	$3.4^{+8.6}_{-2.8}$
LVT151012	$9.2^{+30.3}_{-8.5}$	$9.2^{+31.4}_{-8.5}$	$9.4^{+30.4}_{-8.7}$
GW151226	$35^{+92}_{-29}$	$37^{+94}_{-31}$	$37^{+92}_{-31}$
All	$53^{+100}_{-40}$	$56^{+105}_{-42}$	$55^{+99}_{-41}$
	Astrophysical		
Flat in log mass	$31^{+43}_{-21}$	$30^{+43}_{-21}$	$30^{+43}_{-21}$
Power Law ( $-2.35$ )	$100^{+136}_{-69}$	$95^{+138}_{-67}$	$99^{+138}_{-70}$

TABLE II. Rates of BBH mergers based on populations with masses matching the observed events, and astrophysically motivated mass distributions. Rates inferred from the PyCBC and GstLAL analyses independently as well as combined rates are shown. The table shows median values with 90% credible intervals.

# KAGRA (かぐら)

- 大型低温重力波望遠鏡 -





大型低温重力波望遠鏡

かぐら (KAGRA)

岐阜県・神岡で建設中の  
次世代重力波検出器  
(本格観測 2018年-)



重力波天文学の創成

・大型低温重力波望遠鏡 LCGTに愛称.

(Large Cryogenic Gravitational-wave Telescope)

かぐら KAGRA

- かぐら (神楽) : 神に奉げる歌や踊り.
- 略語ではないが、

KA (Kamioka)

+ GRA (Gravitational Wave Antenna)

の意味合いもある.



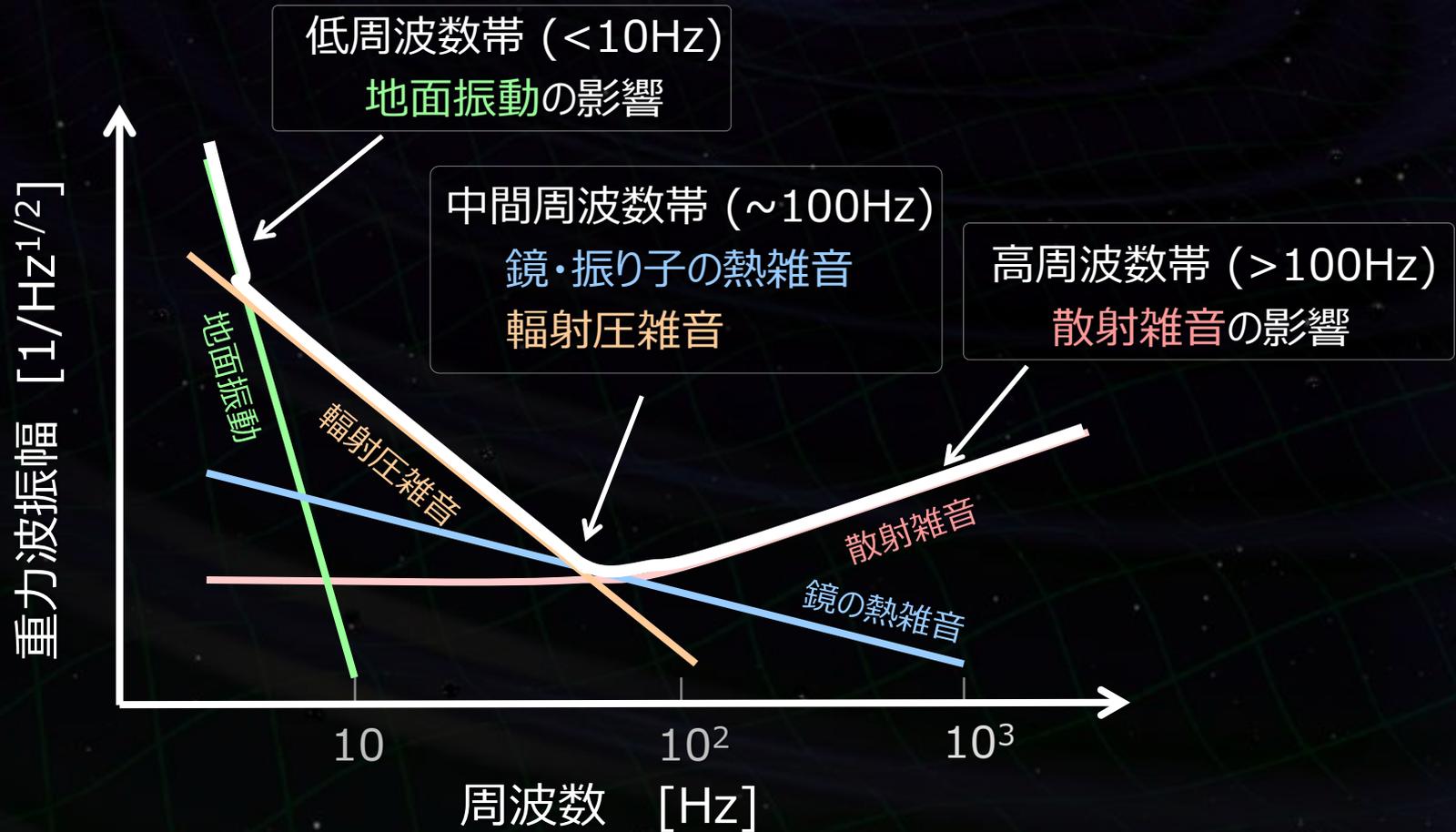
- 大型のレーザー干渉計：基線長 3km
- 地下に設置：安定な地面振動環境.
- 低温に冷却：熱変動による雑音を低減.

日本独自の  
先進技術



# 重力波検出器の感度

- レーザー干渉計の感度は、様々な技術的な雑音源を取り除いた後、主に **地面振動**、**熱雑音**、**光の量子雑音** で制限させる。



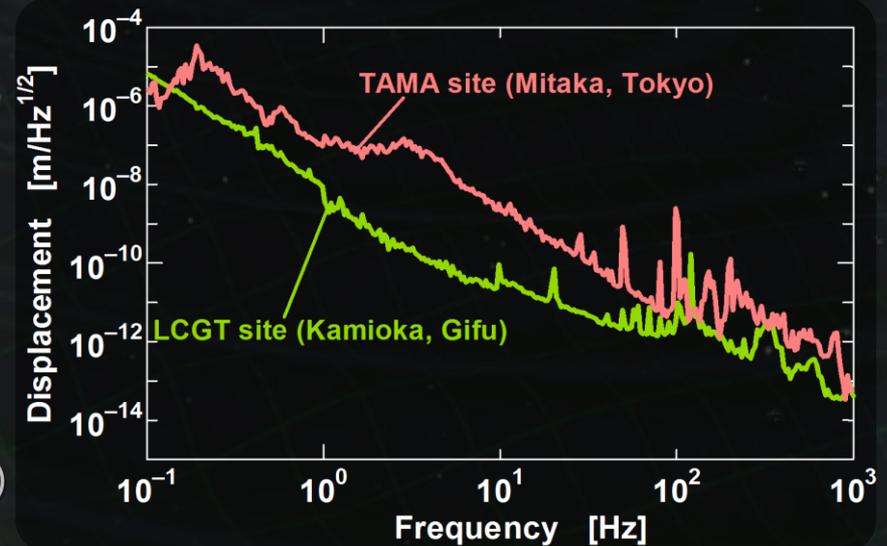
- 地面振動：低周波観測帯域と長期安定度に影響。

## 地面振動レベル

- 地下サイトでは2-3桁小さい
- 高周波数で低減。

$$\delta x_{\text{seis}} \sim \frac{10^{-9}}{f^2} \quad [\text{m}/\sqrt{\text{Hz}}]$$

(神岡サイトでの値,  $f$ : 周波数, )



KAGRA：地下サイトに建設 → 低地面振動・長期安定な環境。  
高性能防振装置 SAS：多段・低周波の防振装置。

## 熱雑音 --- 干渉計の原理的雑音

干渉計の構成コンポーネントの機械損失

→ 揺動力 (揺動散逸定理)

熱雑音

$$\text{Thermal noise} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

$T$  : 温度 [K]  
 $Q$  : 機械損失の逆数

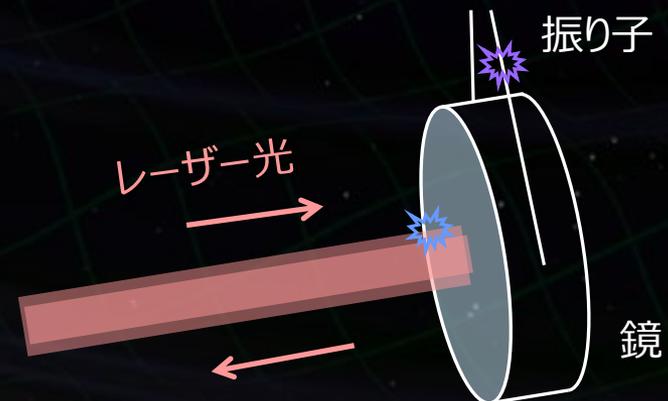
温度を下げる  
 良い材質を選ぶ  
 低減する干渉計構成

### 振り子の熱雑音

鏡の懸架ワイヤ等での損失.

### 鏡の熱雑音

鏡基材, コーティング面の損失.



# 光の量子雑音

- ・レーザー干渉計の感度は、光の量子雑音で制限される。

↳ 光の原理的な揺らぎ

\*位相揺らぎ  
→ 散射雑音



\*振幅揺らぎ  
→ 輻射圧雑音



片方の影響を低減すると、  
他方が悪化するという、  
トレードオフの関係。  
(不確定性関係)



安定・高出力なレーザー光源を用いるとともに、  
レーザー干渉計の方式を工夫することで感度を高める。

# 光の量子雑音の低減

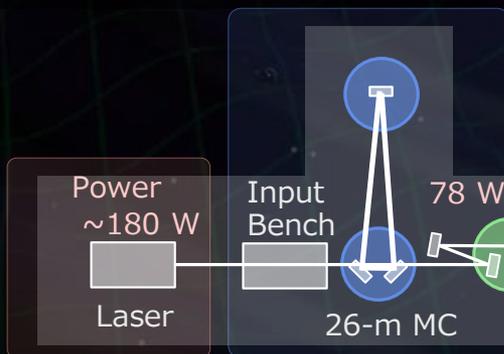
- ・ ハイパワー・安定なレーザー光源
- ・ RSE (Resonant-Sideband Extraction) 干渉計方式



- ・ 腕共振器内に高いレーザーパワーを実現  
光のロスの影響を受けにくい。
- ・ 鏡基材での熱吸収を低減  
ITMでの熱吸収の影響を低減。
- ・ 観測周波数帯域を調整可能。  
観測対象に応じて干渉計応答を最適化。

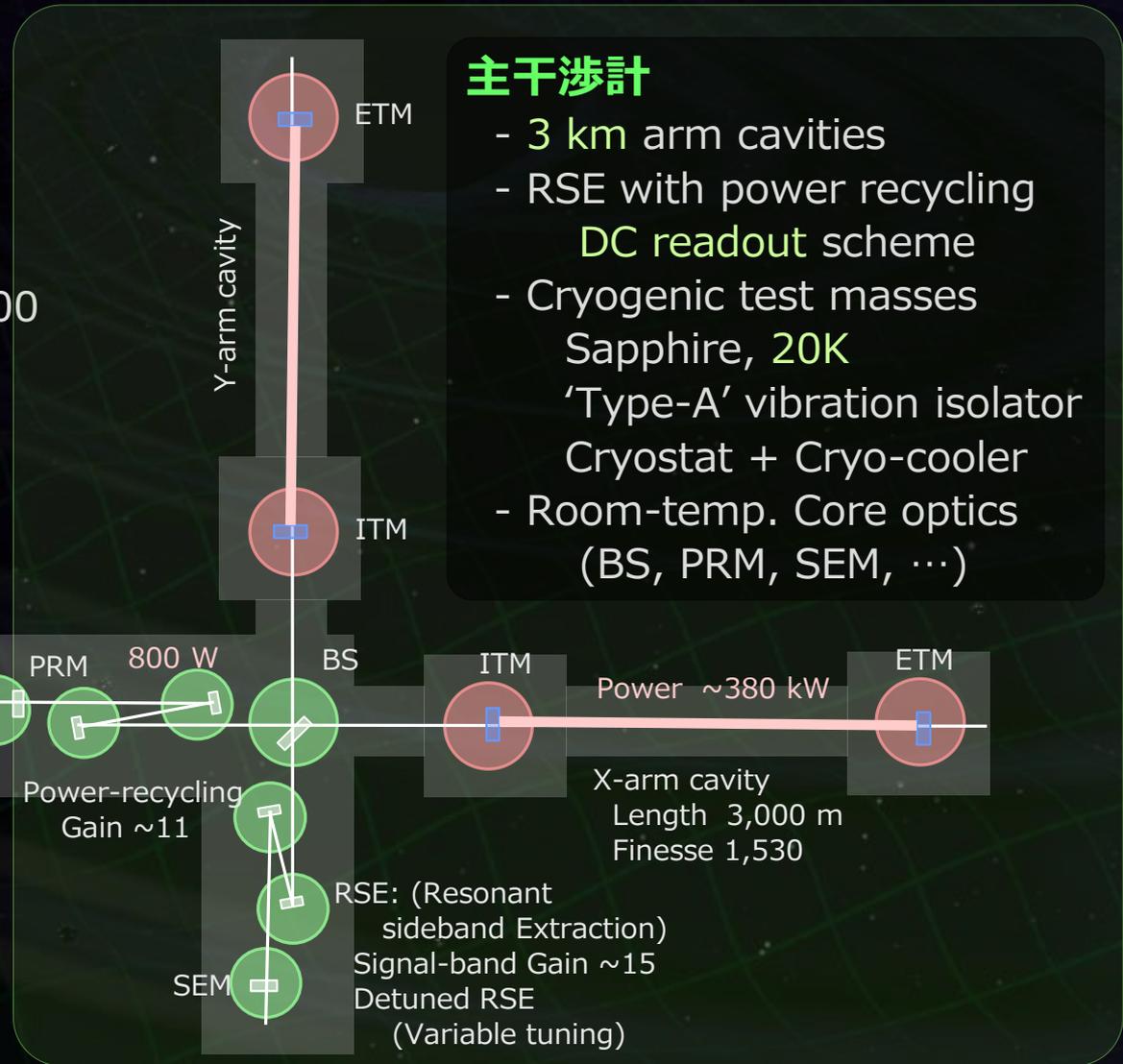
## 入出射光学系

- Beam Cleaning and stab.
- Modulator, Isolator
- Fixed pre-mode cleaner
- Suspended mode cleaner  
Length 26 m, Finesse 500
- Output MC
- Photo detector



## レーザー光源

- Wavelength 1064 nm
- Output power 180 W
- High-power MOPA



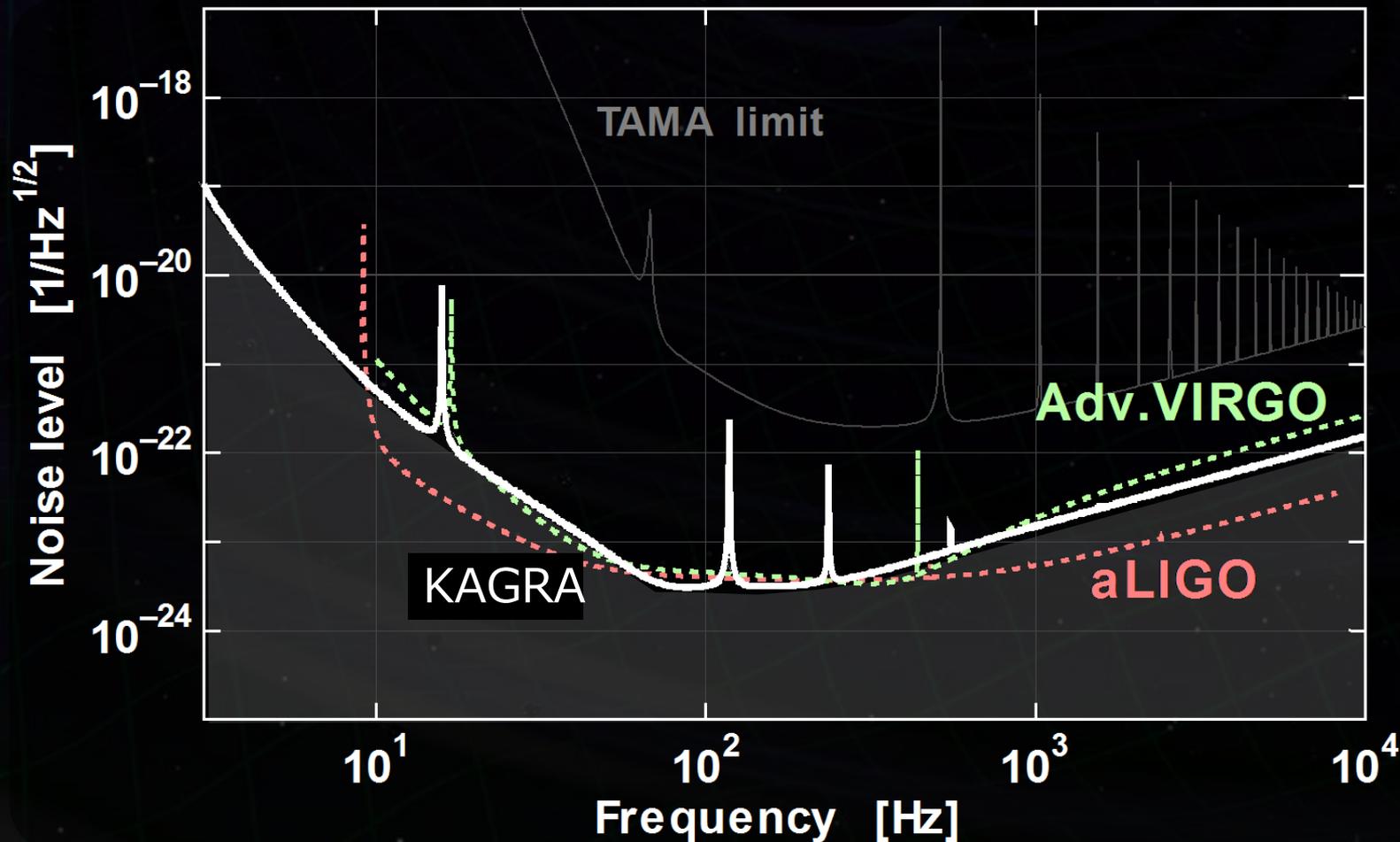
## 主干渉計

- 3 km arm cavities
- RSE with power recycling  
DC readout scheme
- Cryogenic test masses  
Sapphire, 20K
- 'Type-A' vibration isolator  
Cryostat + Cryo-cooler
- Room-temp. Core optics  
(BS, PRM, SEM, ...)

主要な雑音源で決まる限界感度  
aLIGO や Ad.VIRGOと同等



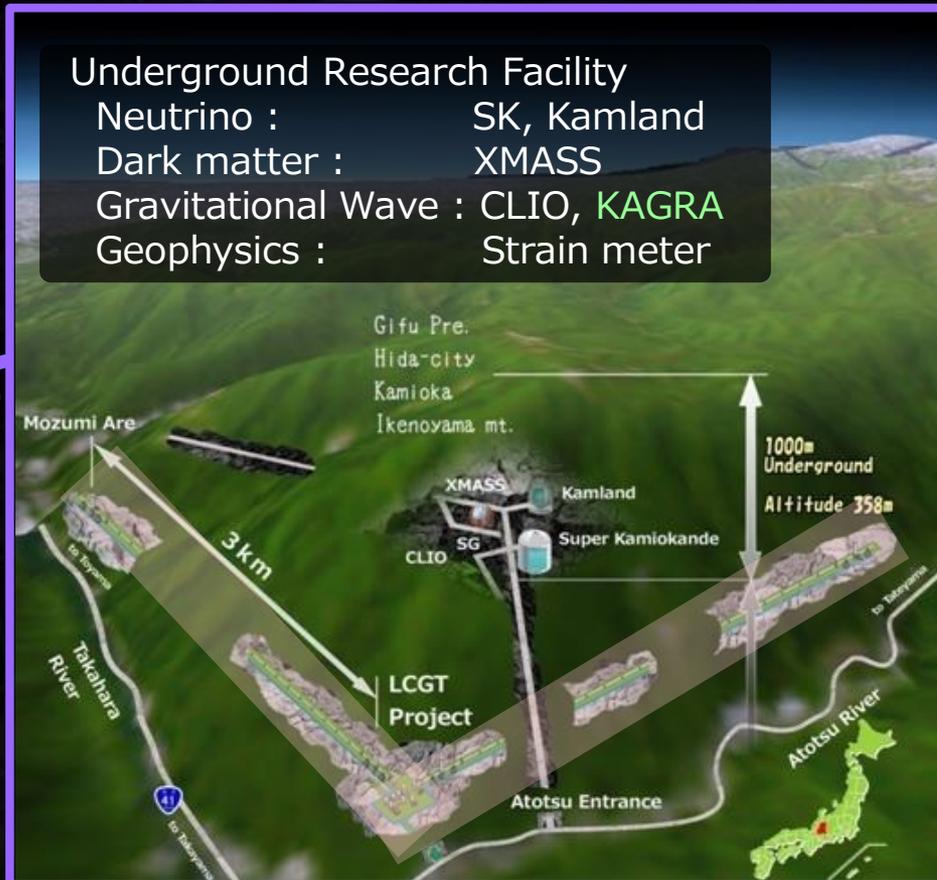
国際観測網を形成



KAGRA : 岐阜県・神岡 の地下にトンネルを掘削し建設。  
(東京大学宇宙線研究所の施設)



Map by Google



Underground Research Facility  
Neutrino : SK, Kamland  
Dark matter : XMASS  
Gravitational Wave : CLIO, **KAGRA**  
Geophysics : Strain meter

- ・トンネル掘削：2014年3月に終了。
- ・長さ 3kmの2本の真空ダクト (直径80cm)の設置と試験完了。
- ・真空槽の設置もほぼ完了。残りも2016年度に完了予定。



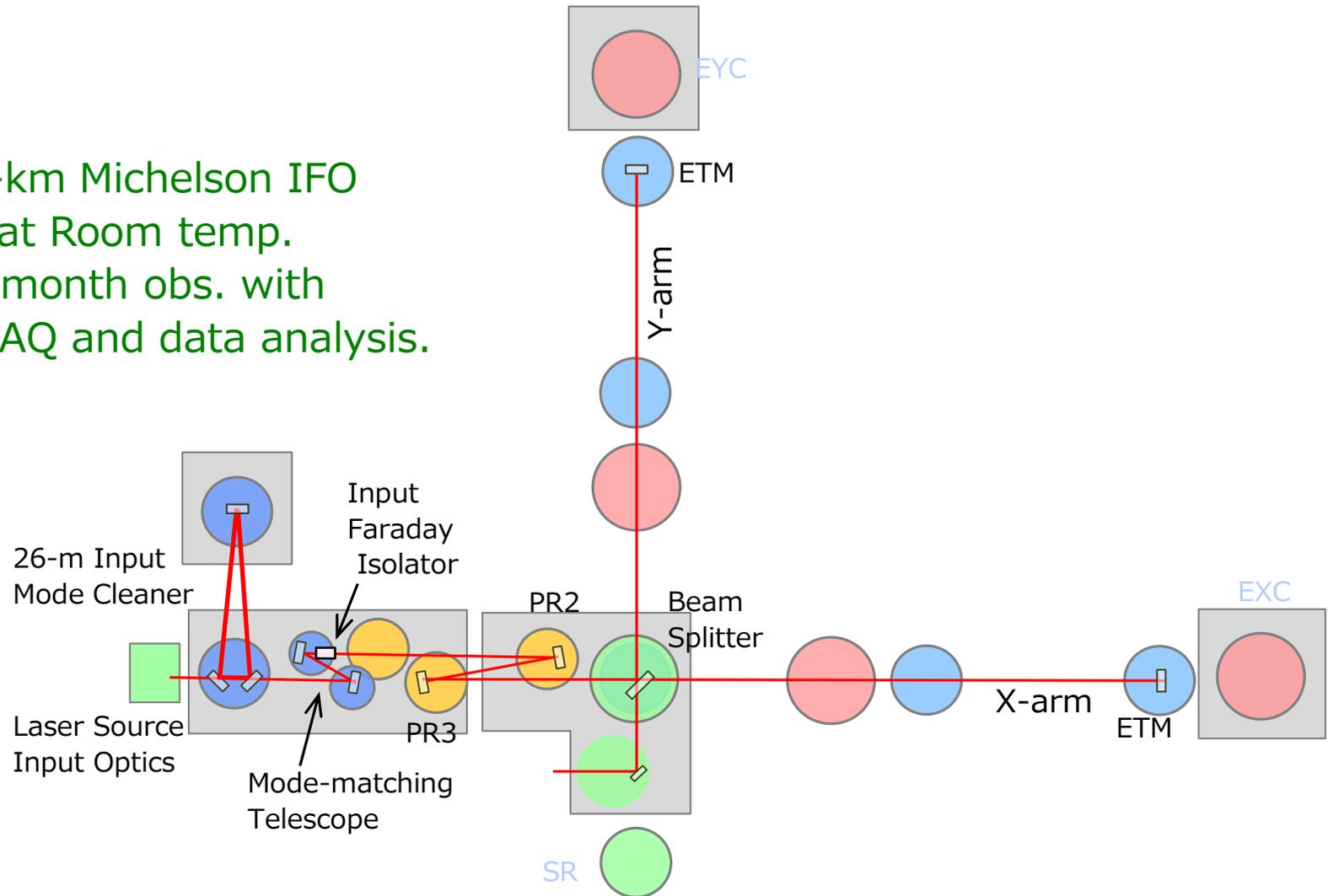
長さ 3-kmのトンネルと真空ダクト (写真: 東京大学宇宙線研究所)



中央実験室 (2015年3月時点)

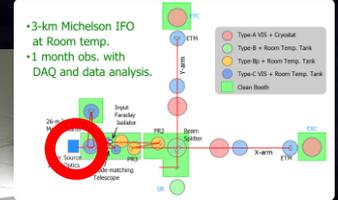
# iKAGRAの干渉計構成

- 3-km Michelson IFO at Room temp.
- 1 month obs. with DAQ and data analysis.



## 安定化レーザー光源

- 市販の 2Wレーザー光源を使用.
- プレ・モードクリーナーと入射モードクリーナーを用いて周波数安定化.
- デジタルシステムに接続. データ解析棟からリモートに制御できる.



Pre-Stabilized Laser (Dec 2015)



- ・iKAGRA試験運転を実施。
  - 施設や環境の総合評価, 観測システムの試験.
  - 前半 : 2016年3月25日 - 31日の1週間.
  - 後半 : 2016年4月11日 - 25日の2週間.



iKAGRA試験運転開始のためにデータ解析棟に集まったメディアクルー (2016年3月25日)

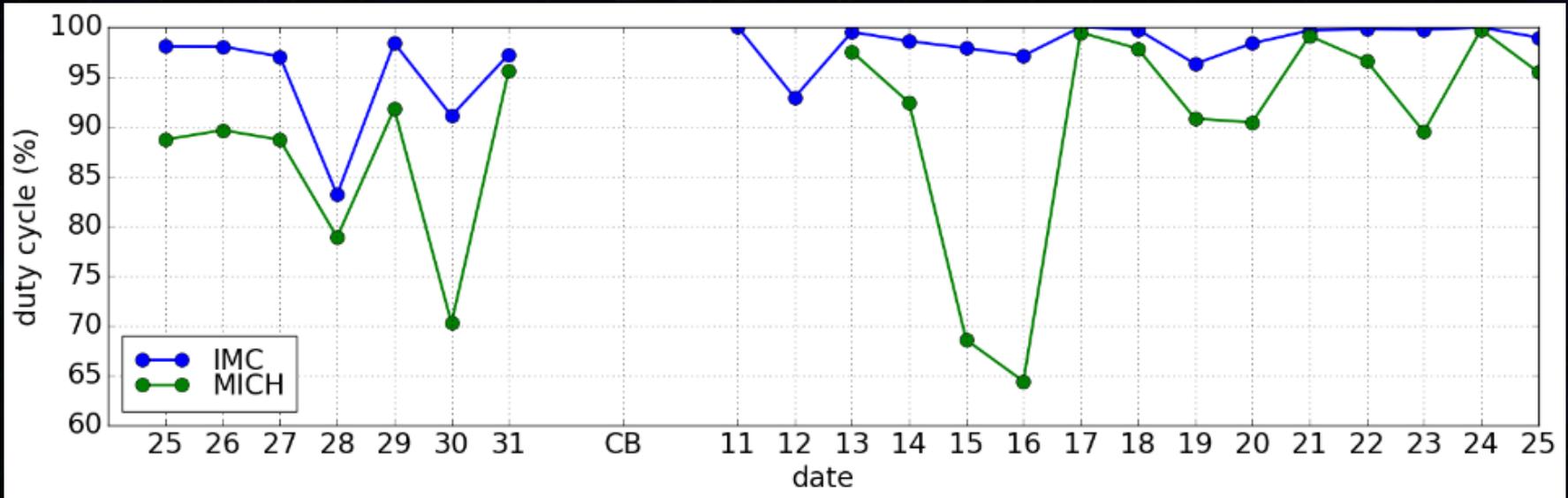


データ解析棟にあるKAGRA制御室. シフトメンバーはここに滞在する. (写真: 飛騨市職員の方提供)

・稼働率: どれくらいの時間ちゃんと動いていたか.

第1期

第2期



熊本地震

- iKAGRA試験運転の目的の1つ：施設や環境の総合評価。  
→ 潮汐による3km基線長変動の観測。

- \*1日に20 $\mu\text{m}$  程度の変動。
- \*理論計算と定性的に一致。

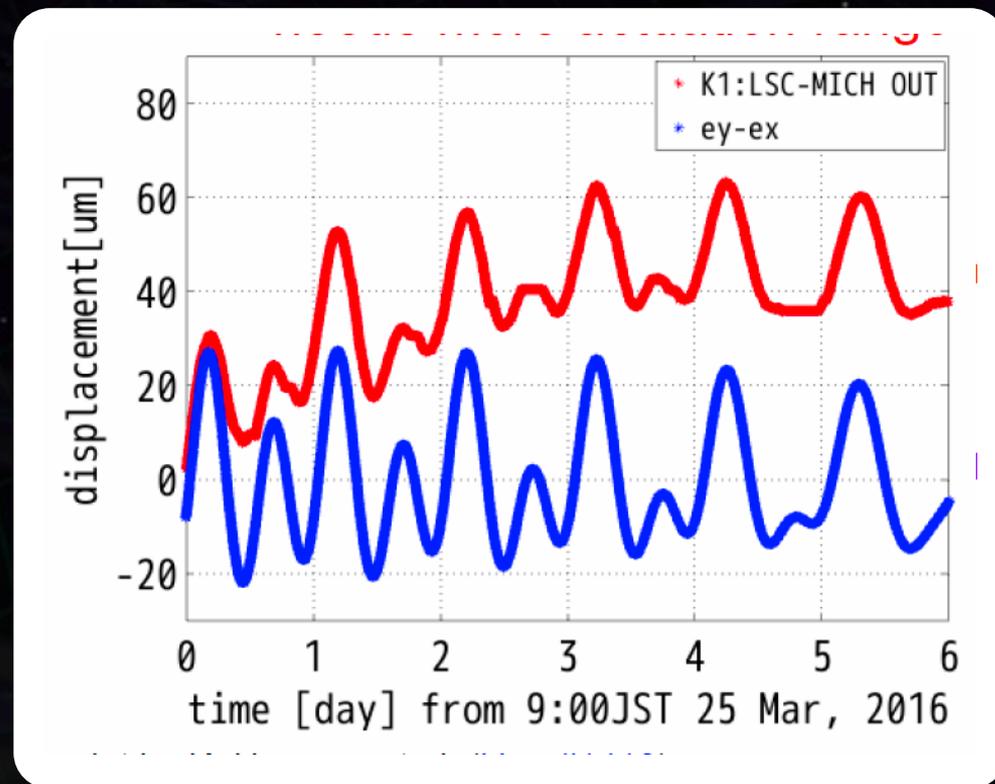


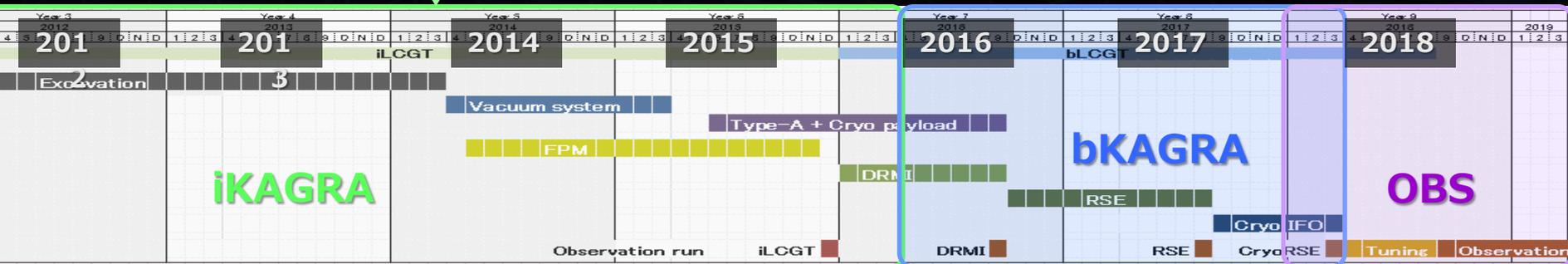
Fig: K.Hayama and Y.Michimura

# KAGRAのスケジュール

## ・iKAGRA (2010.10 – 2016.4)

マイケルソン干渉計

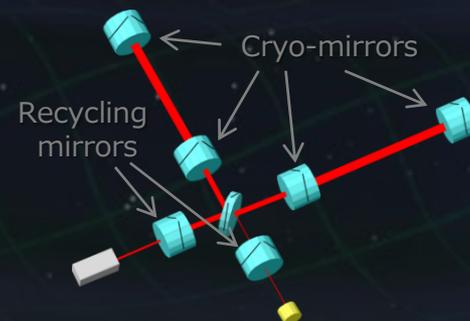
- 基線長 3km, 常温動作.
- 全体システムの動作確認.



## ・bKAGRA (2016.5 – )

最終形での動作.

- 干渉計構成等のアップグレード
- 低温での動作.

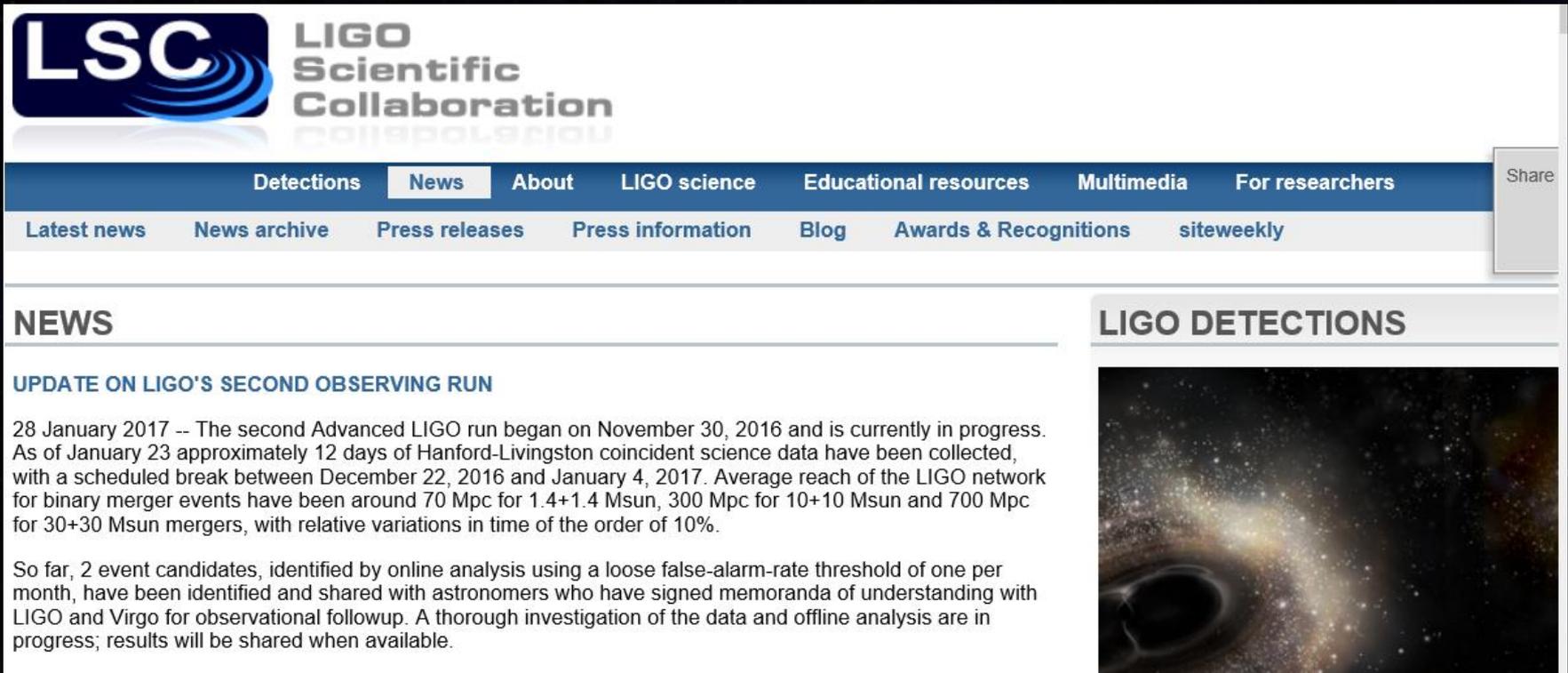


## 日本のKAGRA 建設中 !!!

- 本格的な重力波天文学のための国際観測網における重要な拠点: 波源の位置の特定, 波形, 偏波などの情報や, 電磁波観測も含めた波源の理解.
- 独自の先進的な次世代干渉計技術の先取り.  
低温干渉計・地下のサイトに設置.
- iKAGRA試験運転が4月に無事終了. 今後, アップグレードを進め, 2018年頃の本格観測を目指す.

# 最近の話

- ・LIGO : 性能向上を経て, 2016.11末から O2開始.  
→ 連星中性子星合体に対して 70Mpcの観測レンジ.  
既に2つの重力波信号候補 (FAR 1/month).



The screenshot shows the LIGO Scientific Collaboration website. At the top left is the LSC logo. To its right is the text "LIGO Scientific Collaboration". Below this is a navigation menu with tabs for "Detections", "News", "About", "LIGO science", "Educational resources", "Multimedia", and "For researchers". Under the "News" tab, there are links for "Latest news", "News archive", "Press releases", "Press information", "Blog", "Awards & Recognitions", and "siteweekly". A "Share" button is visible on the right side of the navigation bar. The main content area is divided into two columns. The left column is titled "NEWS" and contains a section titled "UPDATE ON LIGO'S SECOND OBSERVING RUN" with a date of "28 January 2017". The text describes the second Advanced LIGO run, which began on November 30, 2016, and is currently in progress. It mentions that as of January 23, approximately 12 days of Hanford-Livingston coincident science data have been collected, with a scheduled break between December 22, 2016, and January 4, 2017. The average reach of the LIGO network for binary merger events is around 70 Mpc for 1.4+1.4 Msun, 300 Mpc for 10+10 Msun, and 700 Mpc for 30+30 Msun mergers, with relative variations in time of the order of 10%. It also states that so far, 2 event candidates have been identified and shared with astronomers, and a thorough investigation of the data and offline analysis are in progress. The right column is titled "LIGO DETECTIONS" and features a large image of a galaxy cluster with a bright central region.

<http://ligo.org/news.php>

## 第2世代 重力波望遠鏡：今後の期待

### ・連星ブラックホールの合体.

- \* 重たいBHやその連星系の起源
- \* BHの存在証明(準固有振動), 大質量ブラックホールの起源
- \* 一般相対性理論の検証

### ・連星中性子星の合体 + 電磁波フォローアップ観測

- \* 中性子星の状態方程式
- \* ガンマ線バーストの起源
- \* 重元素の起源

### ・その他の重力波源の観測

- \* 超新星爆発 → 状態方程式, 爆発メカニズム.
- \* 自転する中性子星 (パルサー)からの連続波.
- \* 背景重力波 → 初期宇宙の観測 (?)

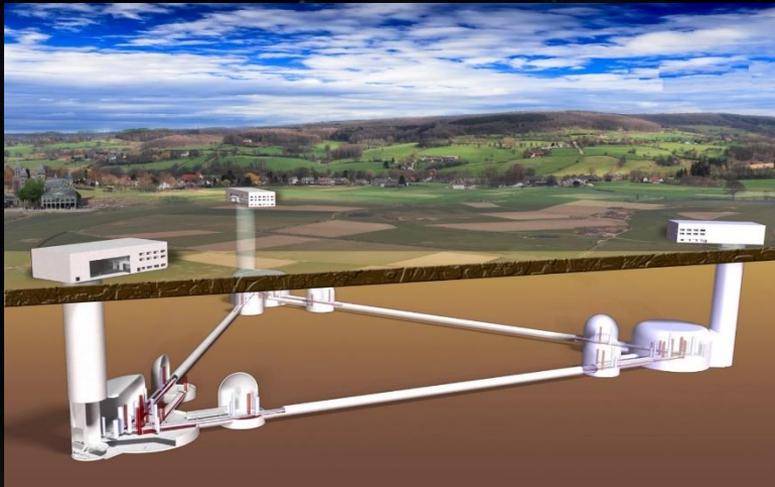
# 第3世代の重力波望遠鏡

## ・次世代の重力波望遠鏡計画

- \* 第2世代の干渉計よりも, 約1桁の感度の向上を目指す。  
→ コンパクト連星合体に対して数Gpc以上の観測レンジ。  
宇宙論的な観測。

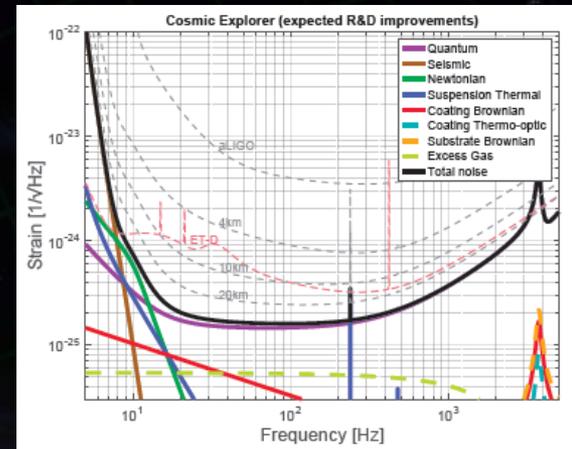
### \* ET (Einstein Telescope)

- 10km, 地下サイト, 低温干渉計
- 欧州中心に設計研究



### \* CE (Cosmic Explorer)

- 40km, 地上サイト, 常温干渉計
- 米国中心に設計研究



Classical and Quantum Gravity, 34 (2017)

---

終わり