

重力波天文学

～宇宙の音を聴く～

名古屋大学 KMI 西澤篤志

2017年ノーベル物理学賞

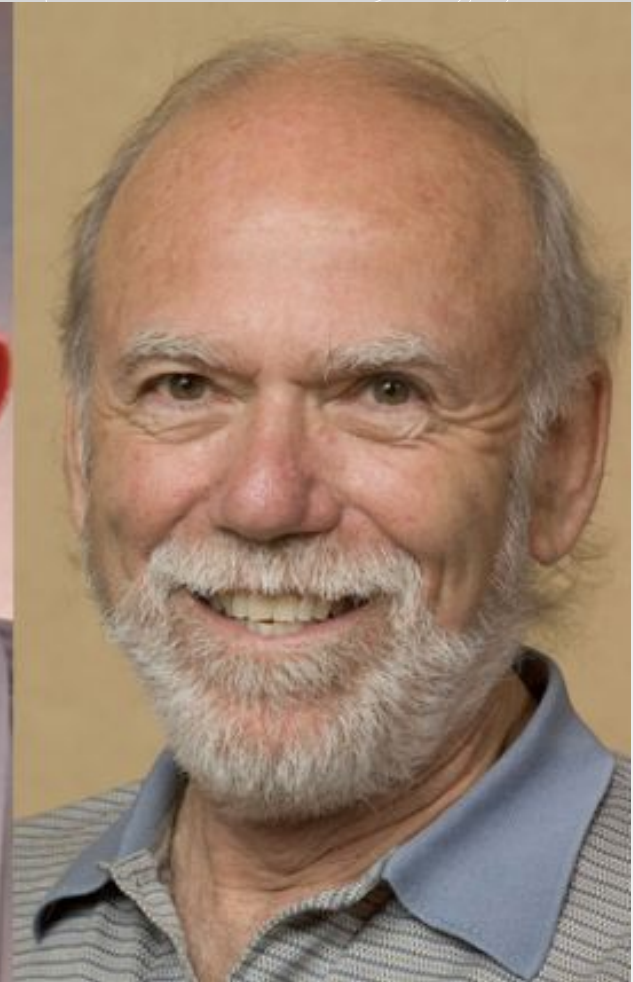
LIGO 検出器および重力波の観測への決定的な貢献



Rainer Weiss



Kip S. Thorne



Barry C. Barish

ブラックホールが合体する瞬間をとらえた！

We have detected gravitational waves. We did it!
(我々は重力波を検出しました。やりました！)

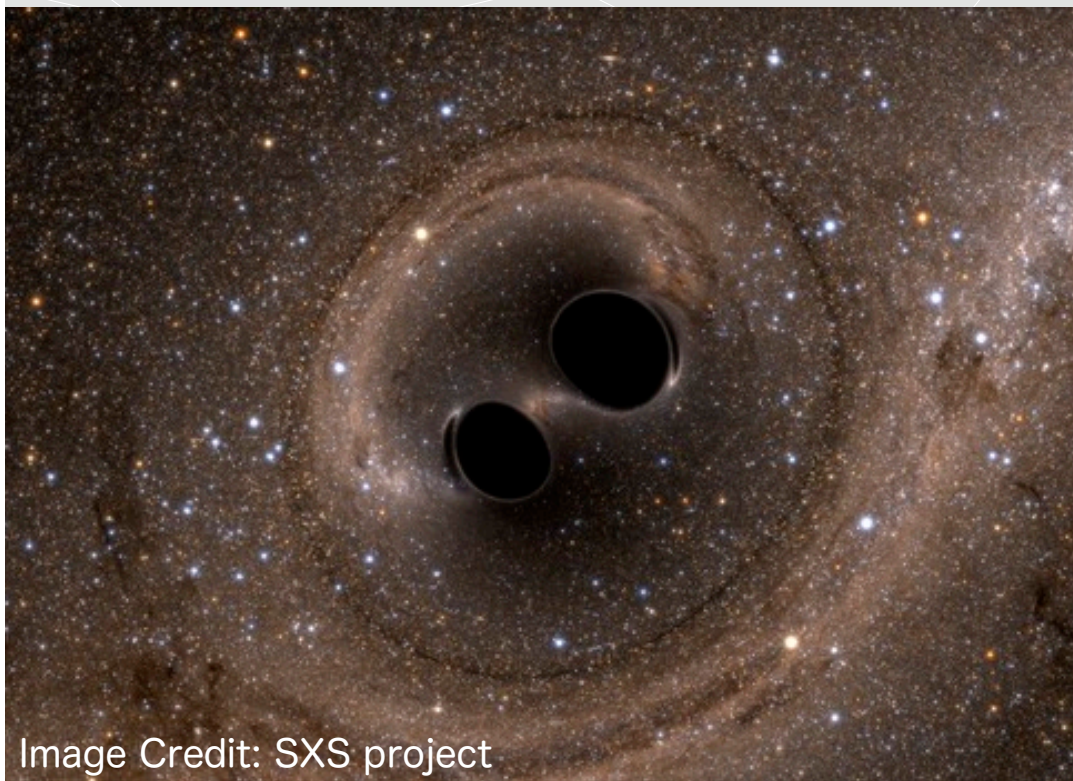


Image Credit: SXS project

508575172

gettyimages®
SAUL LOEB

本日の内容

- 重力波とは？
- どうやって検出するのか？
- 重力波を観測して何が分かったのか？
- これからは重力波で天文学

重力波とは？

重力波とは

- 一般相対性理論発表の翌年
(今から 101 年前) に
アインシュタインが予言した時空の波
- 光と同じ速さで伝わる
- 物質が激しく加速されると発生する (星の爆発や衝突など)
- 期待される重力波振幅は非常に小さい

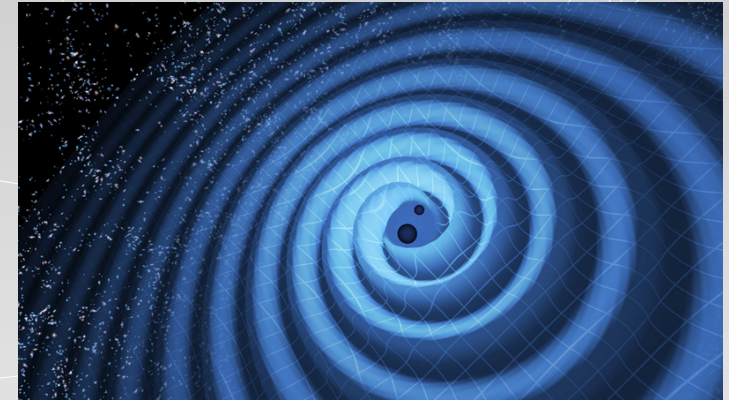
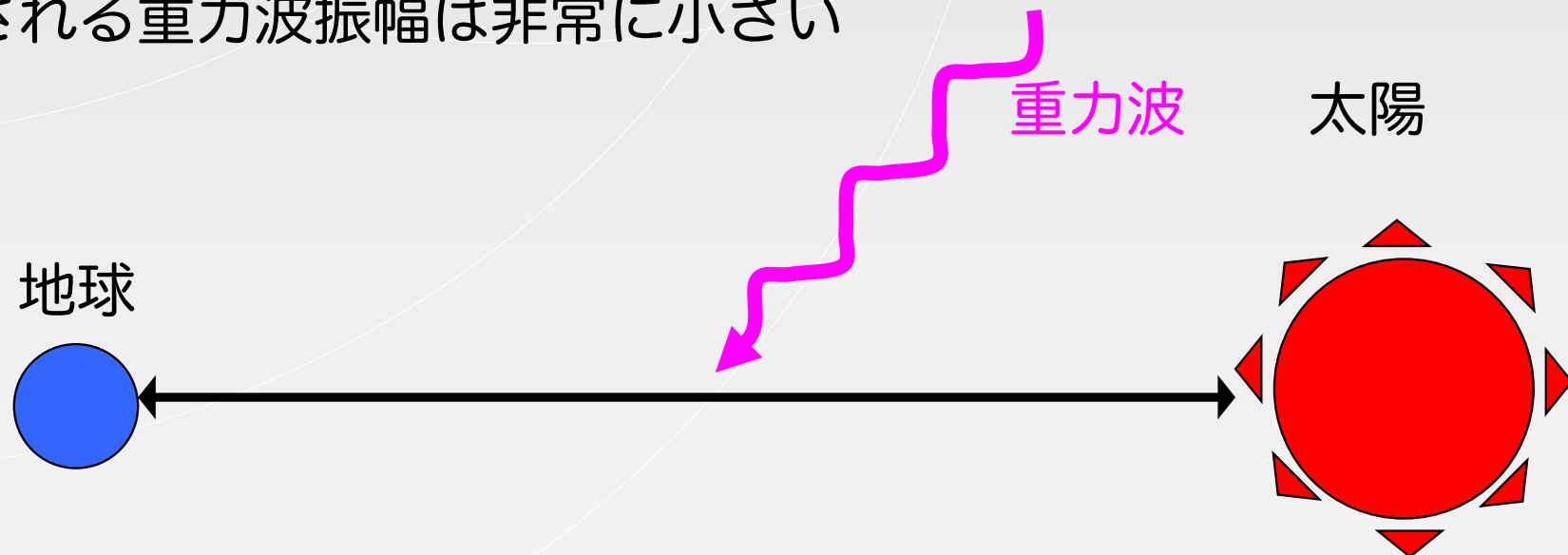


Image credit: LIGO/T. Pyle



問題：重力波によって地球と太陽の距離はどれくらい変わるのか？

1. 髪の毛の太さくらい
2. バクテリアの大きさくらい
3. 水素原子の大きさくらい

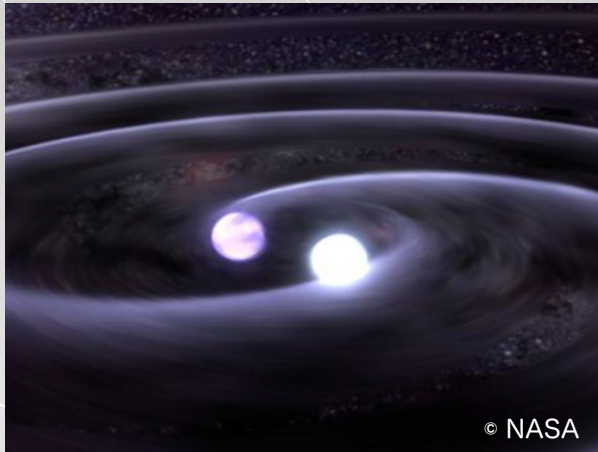
答え：

3. 水素原子 1 個分くらい

地球と太陽の距離 約1億5000万 キロメートル

水素原子の大きさ 100億分の1 メートル

重力波を放射する天体



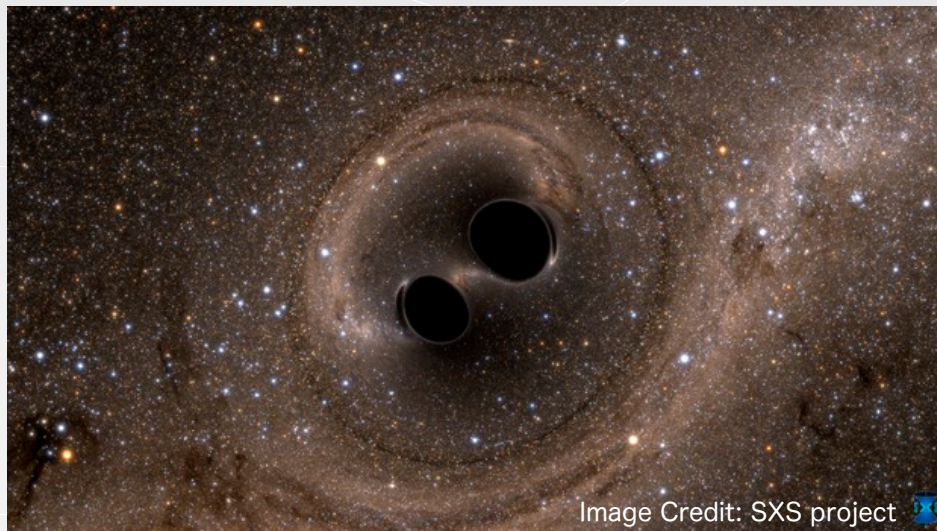
星の合体



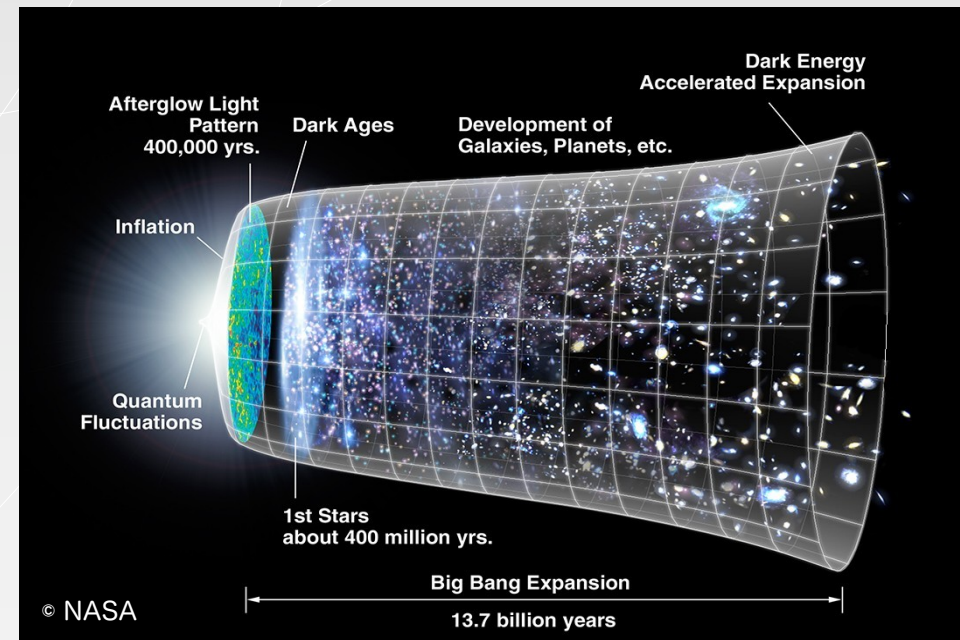
超新星爆発



全く未知の天体



ブラックホールの合体



宇宙の始まり (ビッグバン)

ブラックホールの連星（ペア） からの重力波



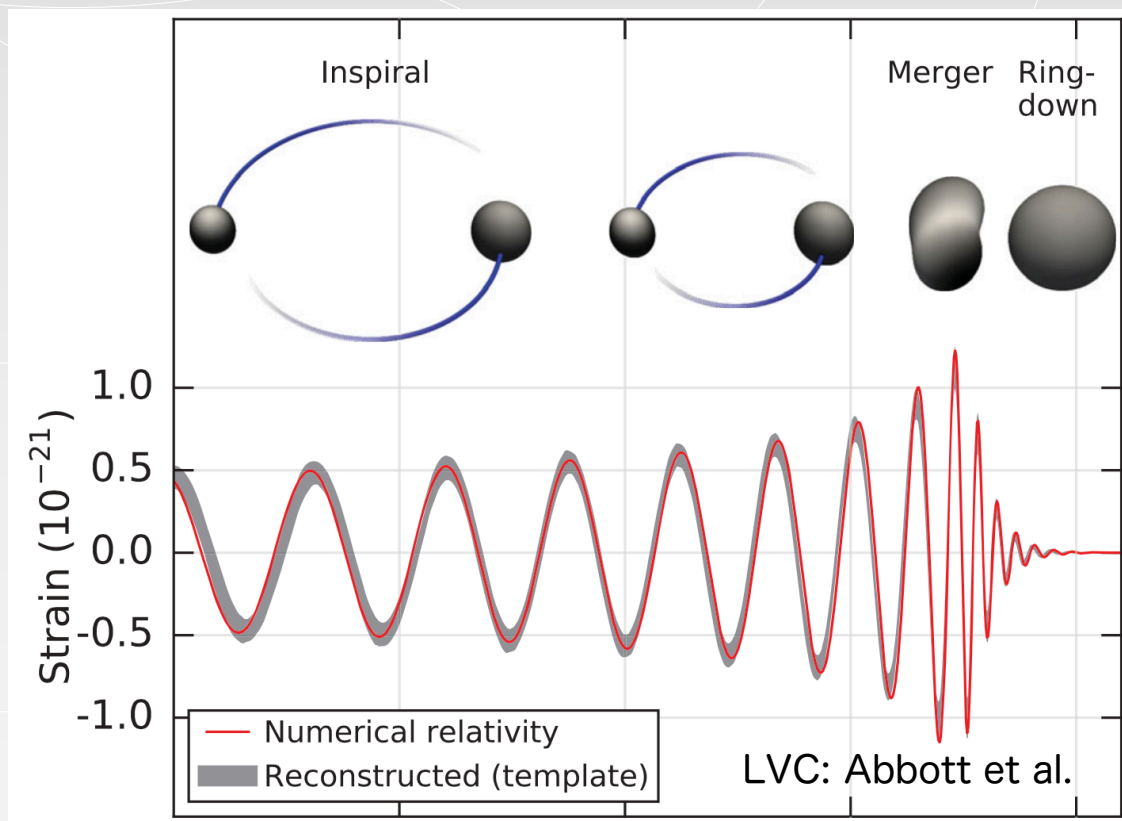
Credit: LIGO/T. Pyle

重力波の音

検出器で観測されるような連星は1秒間に数十回～数千回も回る

→ 重力波の周波数 数十～数千 Hz

(人間が聞こえる音の周波数 20～20,000 Hz)



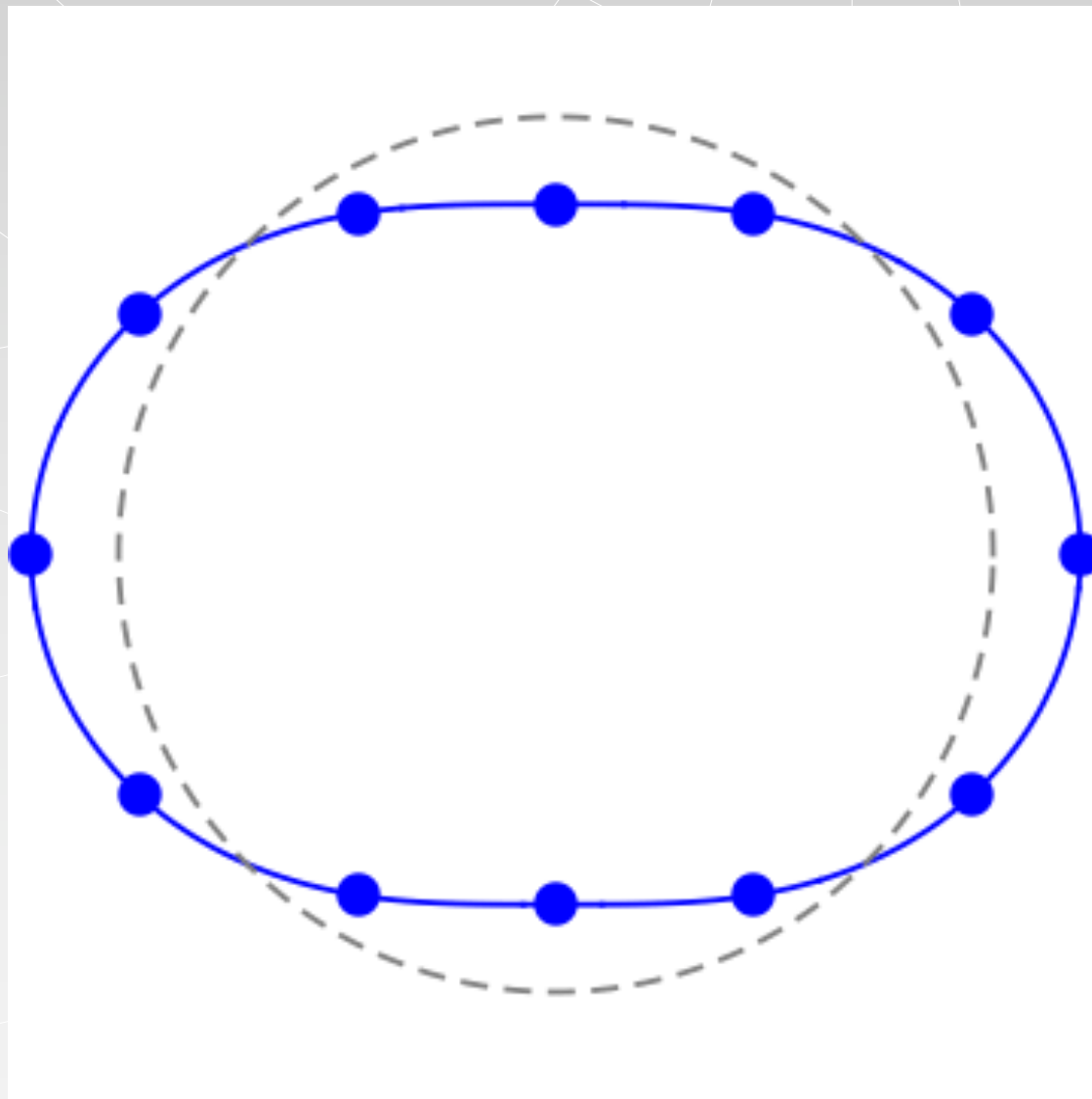
60 Hz → 733 Hz



M. Favata et al.
soundsofspacetime.org

どうやって検出するのか？

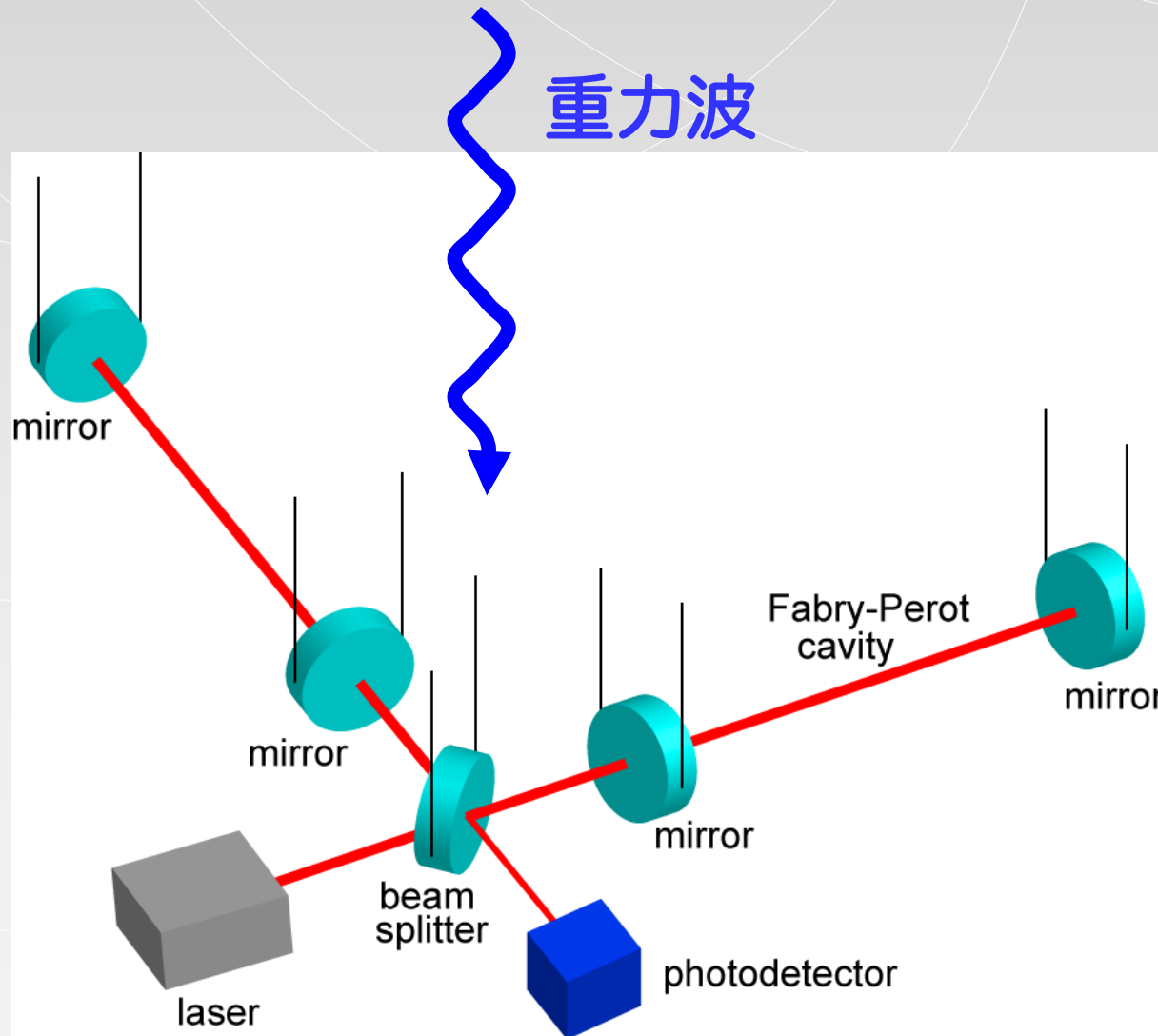
重力波が通り過ぎると



スクリーンの方から
伝播してくる場合

重力波検出器の原理

レーザー型干渉計を用いる



それぞれの方向での
レーザー光の伝播時間の違い
(光の波のずれ)



光の干渉が変化

干渉計が大きいほど
重力波の効果は大きくなる

重力波観測実験の歴史

共振型

レーザー干渉型

1960年～

- Weber の重力波イベント

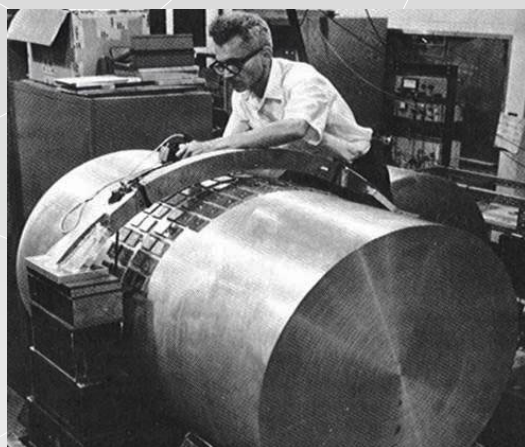
1970年～

1980年～

1990年～

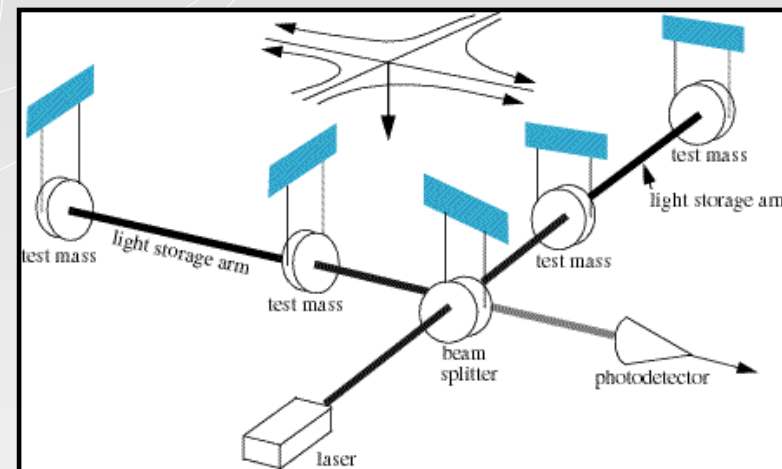
2000年～

- 衰退期



主要な検出器
デザイン

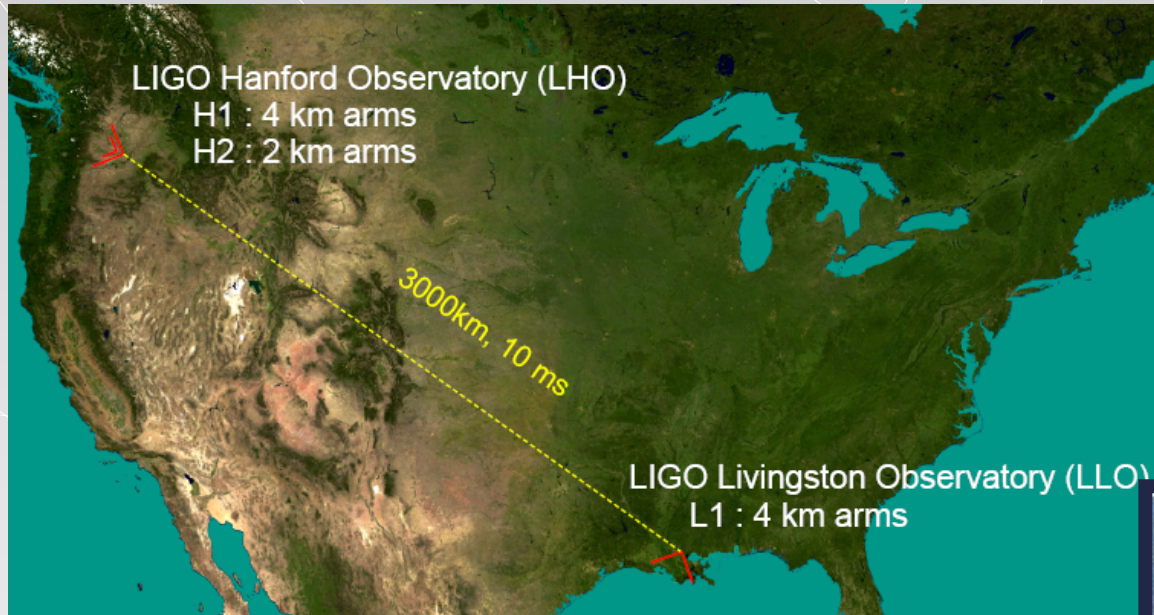
- 本格的な研究の開始



- 大型検出器の建設

主要な検出器
デザイン

LIGO (ライゴ)



1972年 検出器の構想

1994年-2000年 建設

2002年 最初の観測

2015年 改良後、再稼働



雑音との戦い

重力波を検出するには地球上のあらゆる振動が雑音となる。

- 地面振動（地震、海の波、交通、人間活動、 . . . ）
- 大気のゆらぎ（風、飛行機、雷、地磁気、 . . . ）
- 熱振動（鏡表面の分子、鏡を吊るすワイヤ、）
- レーザー光のゆらぎ（光強度、光周波数、 . . . ）

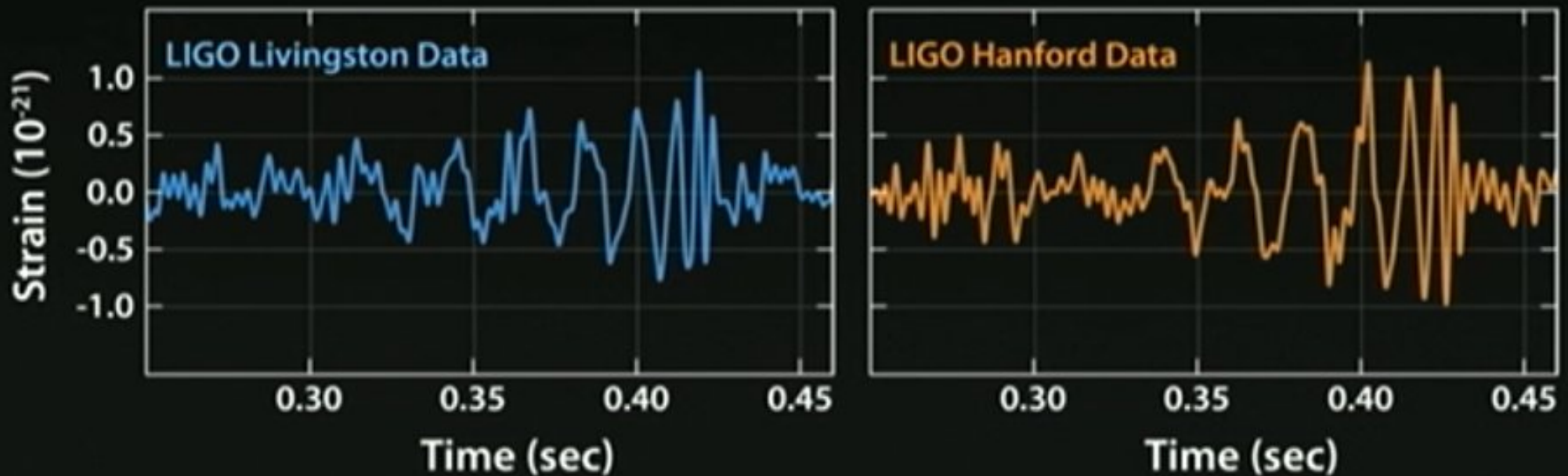
他にも様々な雑音がある

検出器のほとんどの部品が世界最高精度

それを同時に動かして、最高のパフォーマンスを実現

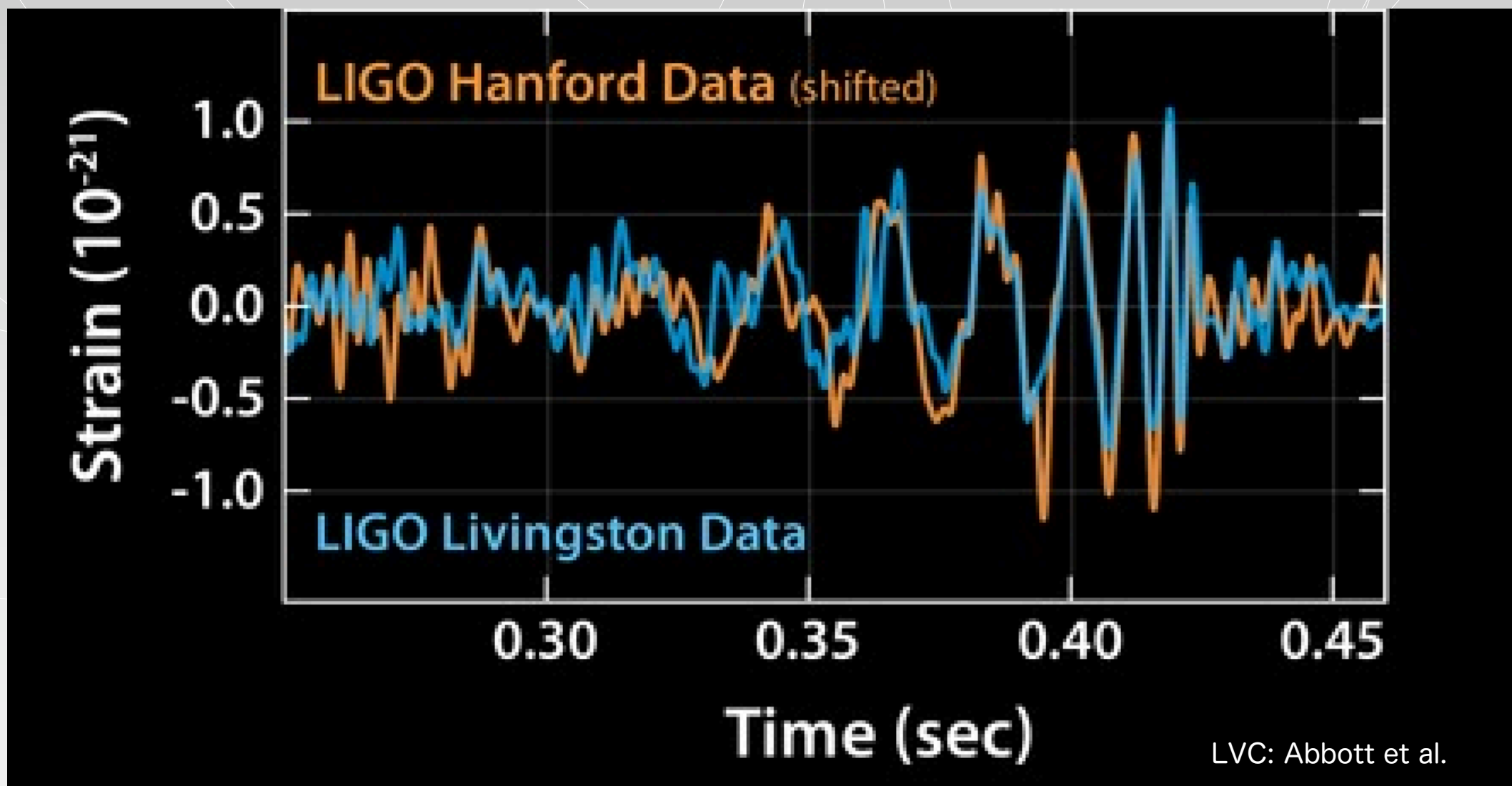
2015年9月14日
(本観測開始の4日前)

2つの検出器がほぼ同時刻に同じような信号をとらえた！



LVC: Abbott et al.

重ねてみると



こんな偶然が起こるのは 20 万年に 1 回程度！

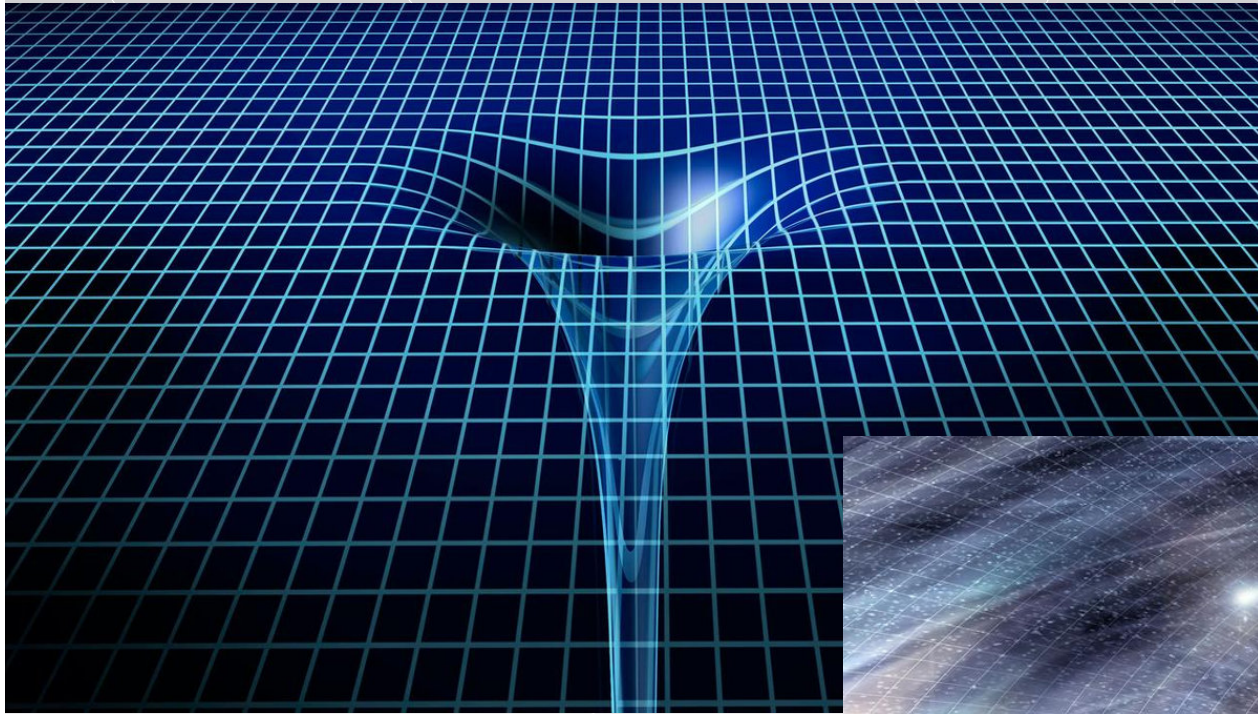
初めて重力波をとらえた直後

- 2015年9月14日 試験運転中に LIGO が警報を出した
 - LIGO ハンフォード観測所 午前2時50分
 - LIGO リビングストン観測所 午前4時50分
 - ドイツのデータ解析チーム 午前11時50分
- ドイツの2人の共同研究者がアラートに気がついた
「信号の注入？ 本観測は9月18日からだし・・・」
- LIGO 実験グループ全体にメールが送られる
「誰か信号を注入しましたか？」
- 大量のメールが行き交う
「誰も実験装置を触るな！」 「観測を継続せよ！」
- 2016年2月11日、初検出の論文が発表される

重力波を観測して何が分かったのか？

ブラックホール

物質が時空の一点にさらに集中すると、時空に「穴」が開いたようになる



光ですら脱出できないので、真っ黒な「穴」のように見える



分かったこと

(1) 2つのブラックホールが合体し、1つのブラックホールになった

ブラックホールが初めて直接的に観測された。

ブラックホールの連星も宇宙に存在していることが分かった。

(2) 合体が起こったのはおよそ 14 億光年の距離

重力波は伝播する！しかも、一般相対性理論の予言の通り。

分かったこと

(3) ブラックホールの質量

太陽質量：地球の質量の約30万倍

合体前

合体後

3.6 太陽質量 + 2.9 太陽質量 → 6.2 太陽質量

足したら 6.5 太陽質量？

3 太陽質量は重力波のエネルギーとして放出された

$$\left[E = mc^2 \quad \text{エネルギーは質量と等しい} \right]$$

これまで知られていた、宇宙で最も明るい天体現象よりも
1000倍も「明るい」！！ → 宇宙最強の衝突



30太陽質量の
ブラックホール

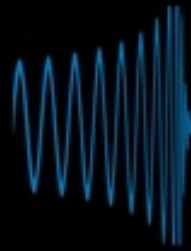
183.08 km

62太陽質量の ブラックホール

183.08 km



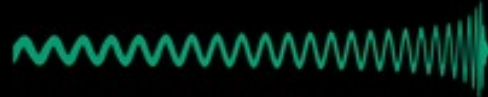
LIGO は他にも重力波を検出した



GW150914

1つ目の重力波

すべてブラックホールの
合体による重力波



LVT151012

重力波信号の候補



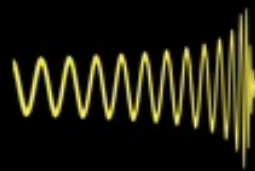
GW151226

2つ目の重力波



GW170104

3つ目の重力波



GW170814

4つ目の重力波

LIGO/Caltech/MIT/LSC

0 sec.

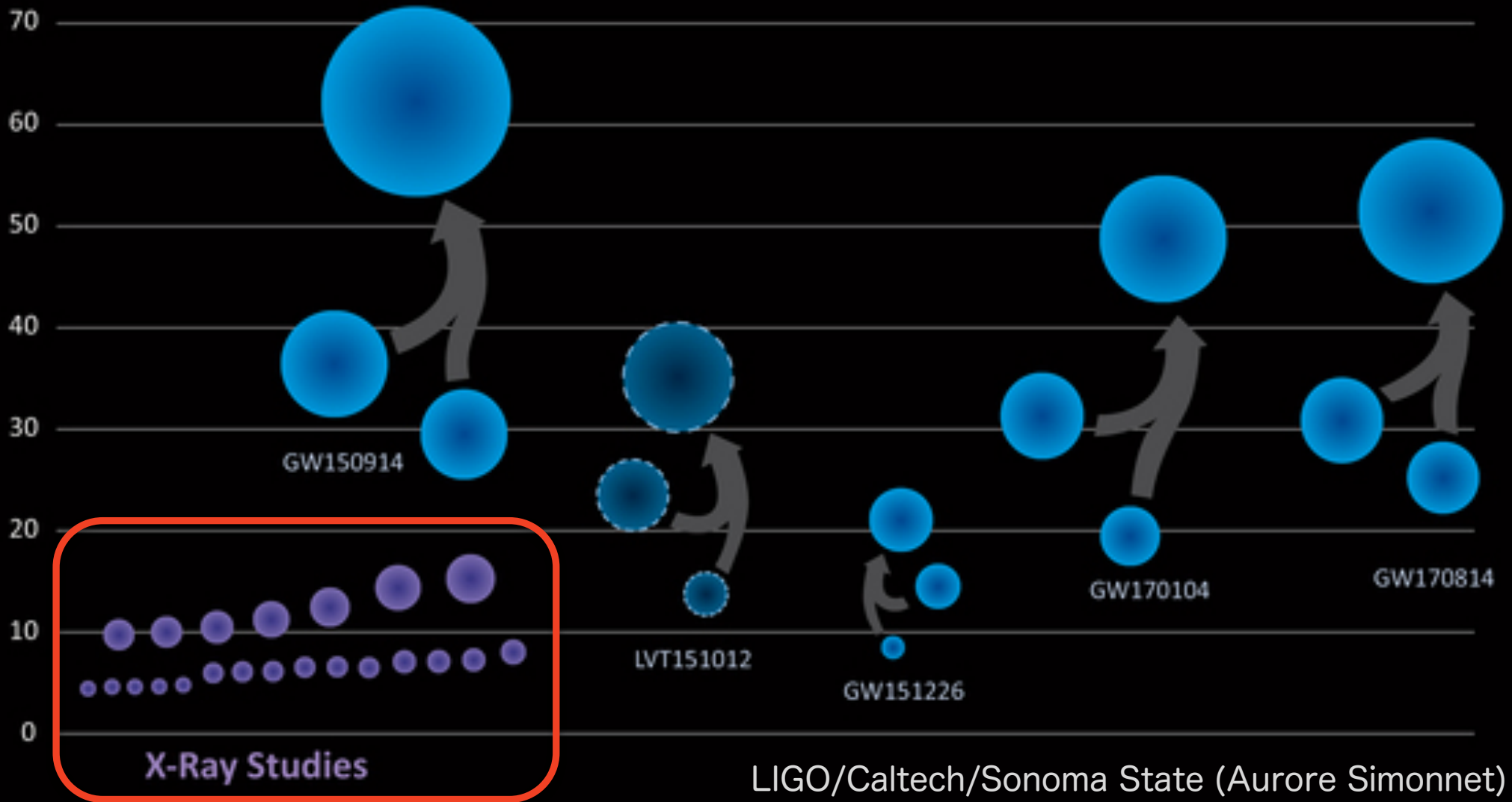
1 sec.

2 sec.

time observable by LIGO-Virgo

見つかっているブラックホールの質量

ブラックホールの質量



これまでの X 線の観測

2017年ノーベル物理学賞

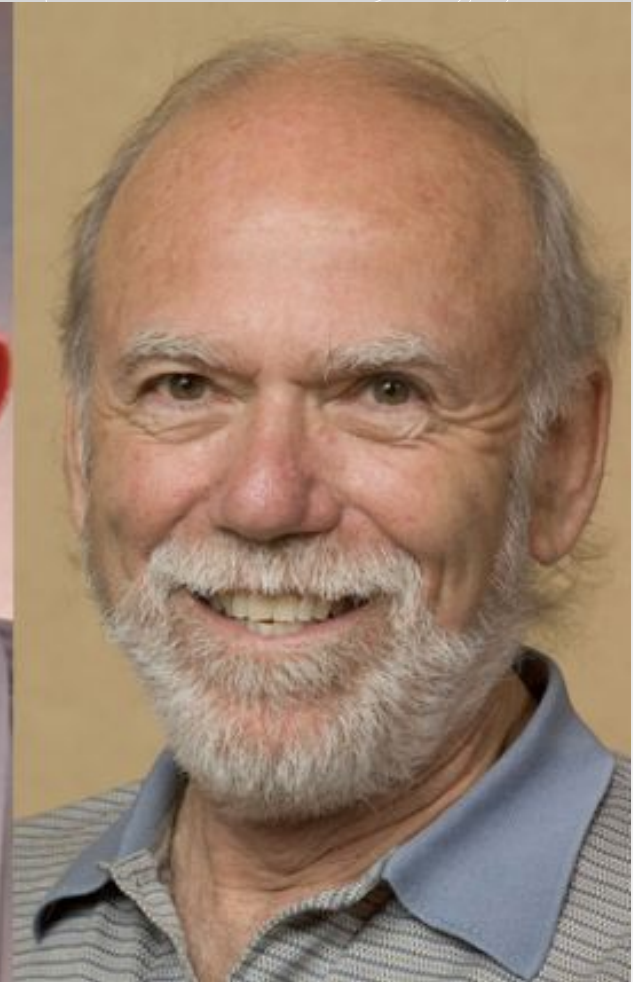
1970年代頃から重力波の研究を開拓した人たち



検出器を設計



重力波の理論研究



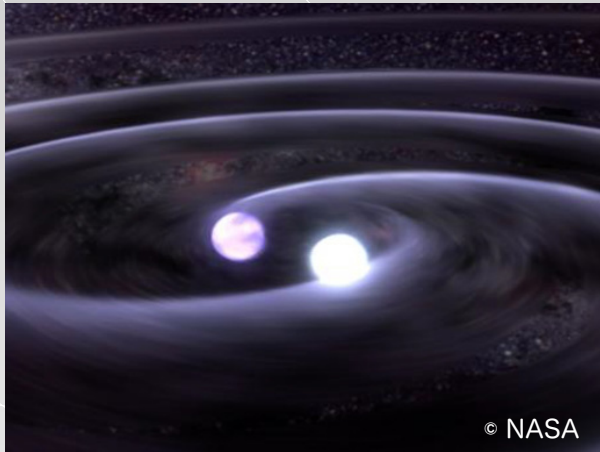
LIGO の組織を作った

これから重力波で天文学

世界の重力波検出器



重力波を放射する天体



星の合体



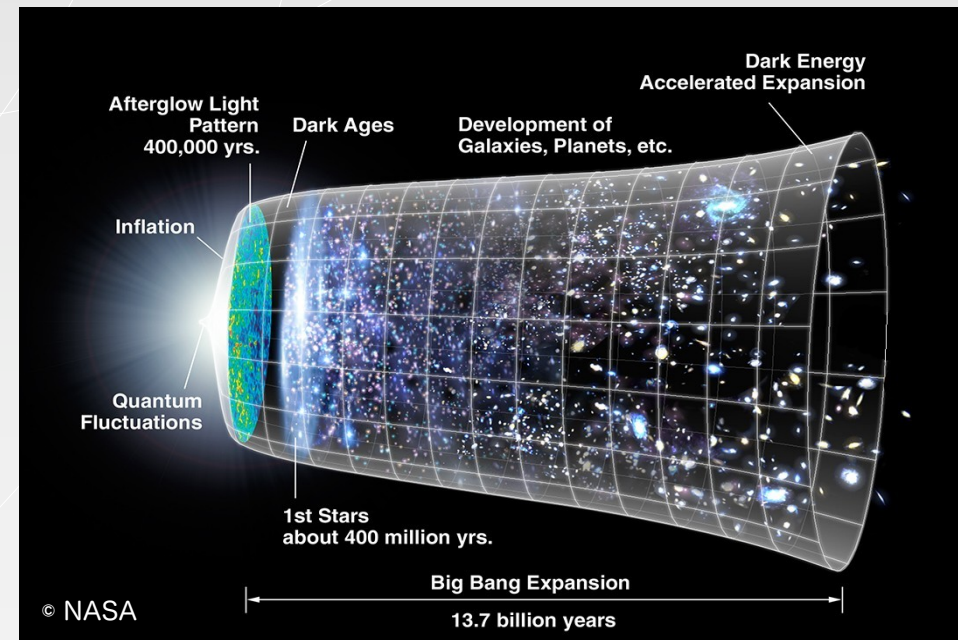
超新星爆発



全く未知の天体



ブラックホールの合体



宇宙の始まり (ビッグバン)

ブラックホールの起源は？

いつ、どこで、どのように作られたのか？

もっと沢山の重力波データを調べなければならない

ブラックホールの質量、回転、軌道、存在している環境、など

そのためには、

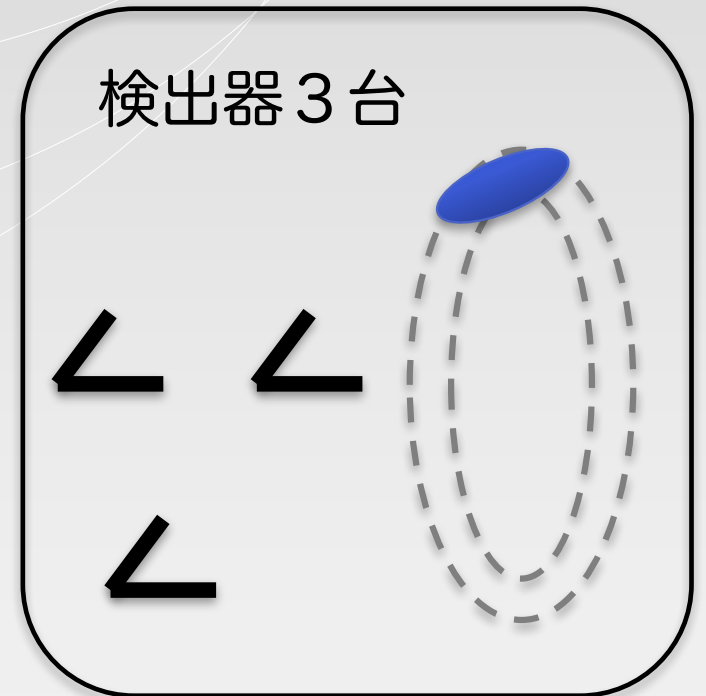
- 検出器の感度をもっと上げる (雑音を小さくする)
- 観測データを詳細に分析する
- 理論を組み立てて、観測データを説明する

どんな銀河の中に居るのか？

重力波源の方向を決める

重力波検出器は重力波が来た方向を決めるのが苦手

天文学をするためには、波源の方向を特定しなければならない



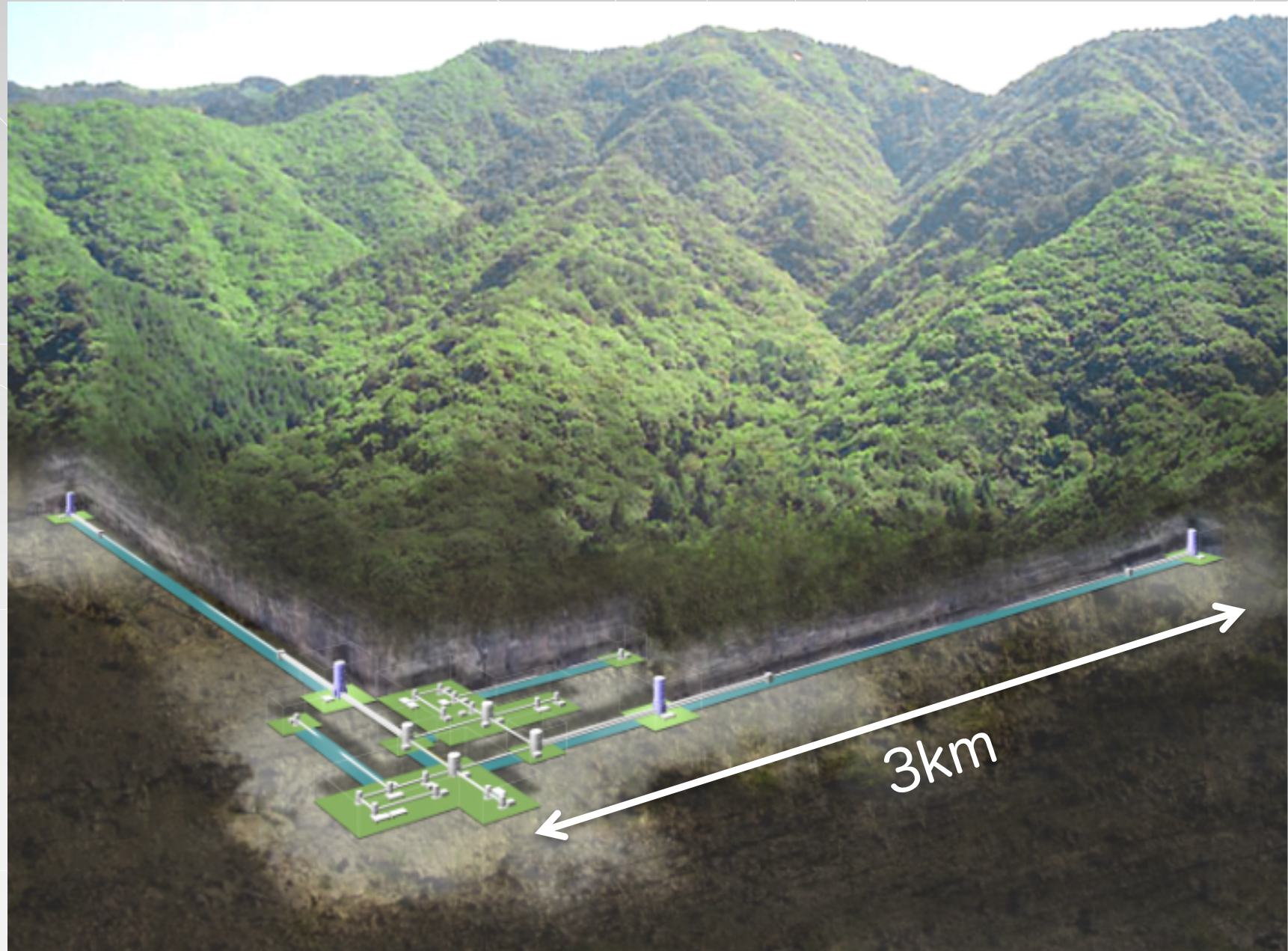
LIGO 2 台 + VIRGO 1 台 + もう 1 台 → 4 台

日本の重力波検出器 KAGRA



富山駅から車で50分ほど

KAGRA



トンネルの入り口



2019年からの観測開始を目指している

