

## 重力波、KAGRA、CLIO

内山 隆、山元 一広

東京大学 宇宙線研究所

GEO SPACE ADVENTURE 2016年7月16-17日 @岐阜県飛騨市神岡坑山



# 目次

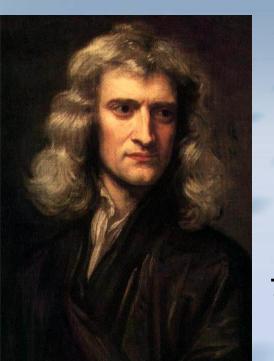
- 1. 重力波
- 2. KAGRA
- 3. CLIO
- 4. まとめ



#### 重力とは何か?

全てのものはお互いに引きつけあう 例えば地球と地球の上にあるもの 手を放すと物は落ちる





アイザック ニュートン (ウィキペディア 英語版)

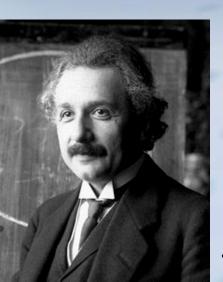


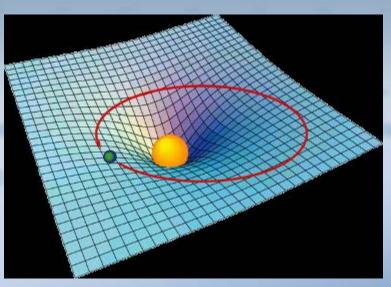
重力とは何か?

1915年 アルバート アインシュタイン: 一般相対性理論 "重力は時空(時間と空間)の曲がりである。 物体によって時空は曲がり、その中を進む

物体の軌道が曲がる。"

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)





アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)



重力波とは何か?

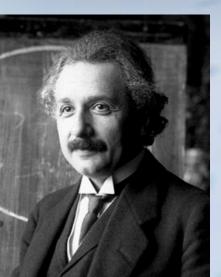
1916年 アルバート アインシュタイン:重力波

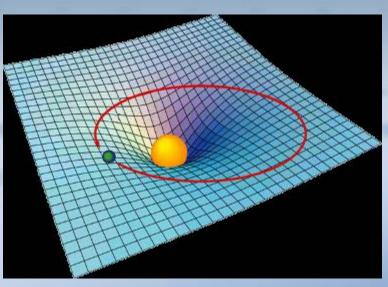
"重力(時空の曲がり)の源となる物体が

激しい運動などをすると時空のさざなみ(重力波)

が光と同じ速さで伝わっていく。"

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)

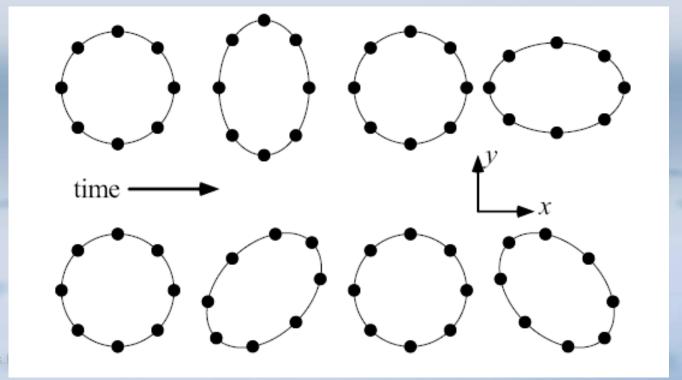




アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)



重力波とは何か 重力波が画面の垂直方向から来ると....



nttp://spacefiles



#### 重力波を検出する意義

(1)物理的な意義:一般相対性理論の検証 "アインシュタインからの最後の宿題"

(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生 重力波から星や宇宙に関する情報を得る 発生後吸収や散乱されずに地球にやってくる



#### 重力波を検出する意義

(1)物理的な意義:一般相対性理論の検証

1915年:一般相対論が発表される

ニュートンの法則と異なる様々な予言

(水星の)近日点移動、光の屈折、重力赤方変異、

シャピロ時間遅れ、ジャイロスコープへの測地線効果...

1960年以降:劇的な技術革新により一般相対論の予言が極めて高い精度で正しいことが検証される。

最後に残ったのが重力波の直接検出

"アインシュタインからの最後の宿題"



(1)物理的な意義:一般相対性理論の検証 "アインシュタインからの最後の宿題"

スイス、ベルンのアインシュタイン博物館の 一般相対性理論の説明より (2009年11月27日撮影) General Theory of Relativity

The effects of the General Theory of Relativity can only be shown in astronomical distances.

Einstein made four predictions to support the General Theory of Relativity.

#### They concern:

- 1. Precession of Mercury's orbit
- 2. Deflection of light
- 3. Redshift
- 4. Gravitational Waves

The proof of gravitational waves is still lacking.

The other predictions have been experimentally proved, with an exactitude up to 13 decimal points.



#### 重力波を検出する意義

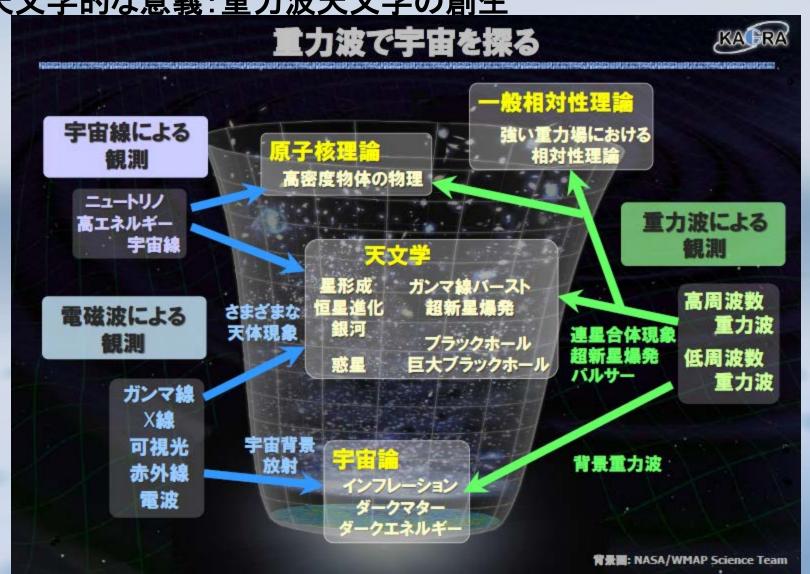
(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生 重力波から星や宇宙に関する情報を得る 発生後吸収や散乱されずに地球にやってくる

他の手段では見えないものが見える 宇宙始まりのビッグバン、ブラックホール、 超新星爆発、中性子星、...



(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)





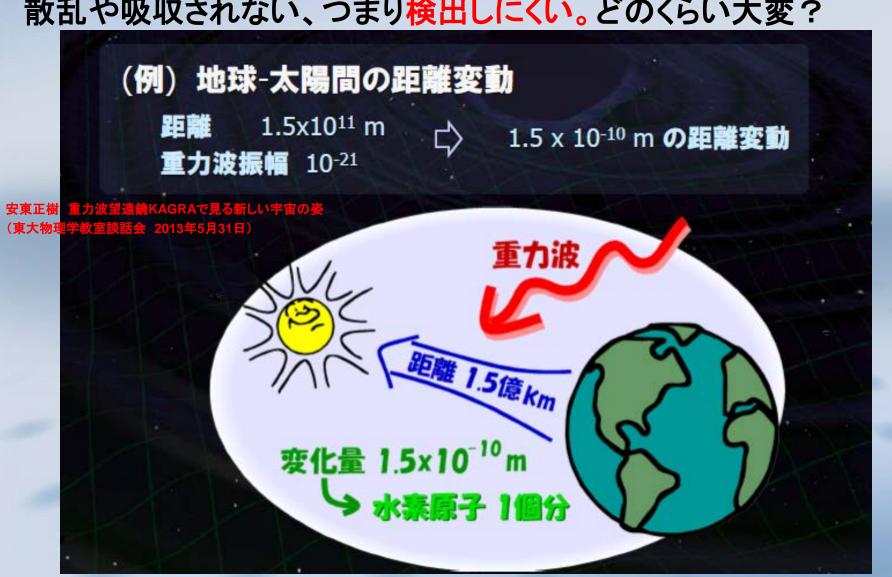
(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)





散乱や吸収されない、つまり検出しにくい。どのくらい大変?

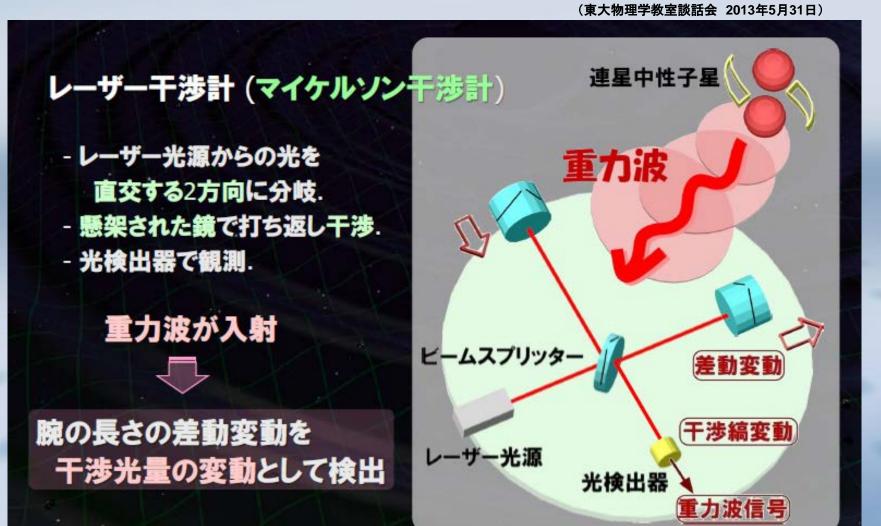




#### 2. 干渉計型重力波検出器

主な直接検出方法:干渉計が主流(腕の長さは3-4km!)

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)





#### アメリカのLIGOが重力波初観測!

苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学 (大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日) 2015年9月14日検出、2016年2月11日発表





#### アメリカのLIGOが2回目の検出!

- 2016年6月15日 2つ目のイベント発表
  - アメリカのLIGOグループ
  - 2015年12月26日に2台の望遠鏡で同時検出
  - ブラックホール連星の合体からの重力波
- アインシュタインの予言から100年

• 重力波天文学の幕開け





#### LIGOの立役者

苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学 (大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



**Kip Thorne** 

**Ronald Drever** 



**Rainer Weiss** 



## 今最もノーベル物理学賞に近い3人

苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学 (大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



**Kip Thorne** 

**Ronald Drever** 



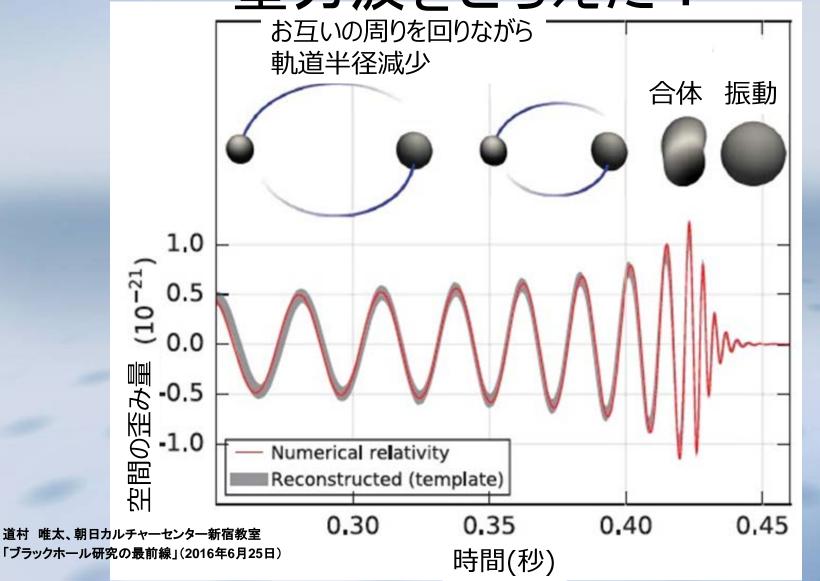
**Rainer Weiss** 

# ブラックホールの合体からきた 重力波をとらえた!





# ブラックホールの合体からきた 重力波をとらえた!

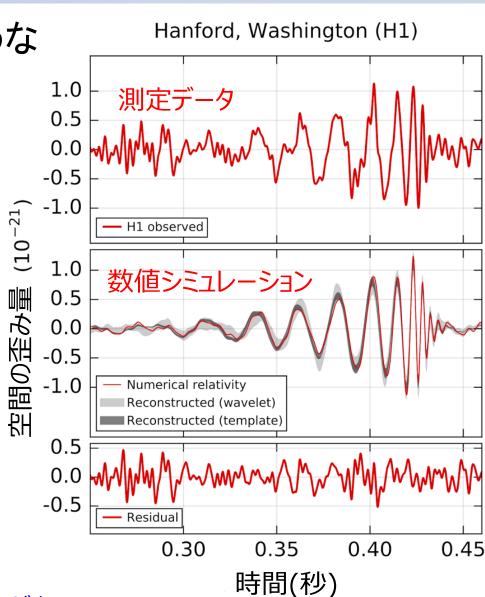


# 波形が相対論の計算とぴったり

唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)

- 見てわかる教科書のような 波形
- 一般相対論は ブラックホールの ような強い重力でも



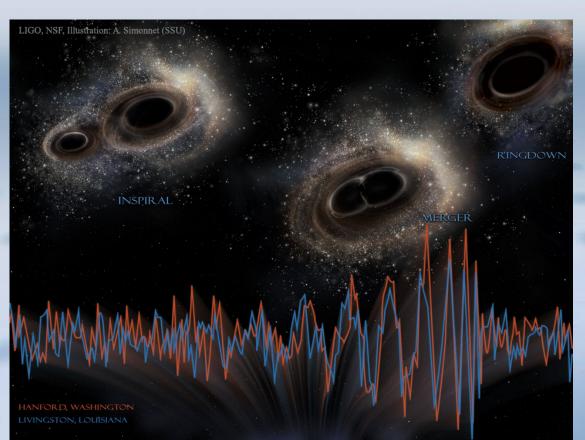




#### 重力波形からわかったこと

- ブラックホール連星が存在する:重力波でなければ見 えないため今まで確証がなかった。
- しかも稀な現象ではなさそうだ。

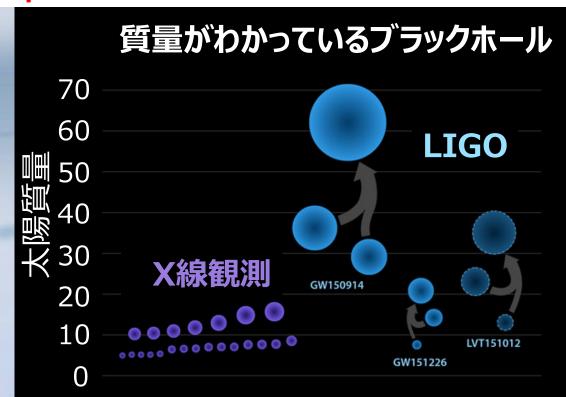
道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)





#### ブラックホール質量の謎

- これまでX線の観測で見つかっていたブラックホールは せいぜい10太陽質量程度だった
- 新たな謎: 30太陽質量程度のブラックホールはどのようにしてできたのか?



道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



#### 重力波初検出後の展望

- ゴールではなくスタート。人類は新たなる観測装置を手に入れた。
- 重力波を出すと期待される天体などはまだまだある。
- より遠く、より多くの重力波源を観測する。これには検 出器の性能向上が必須。
- 天文学的には到来方向を正確に決める必要がある。 LIGOだけでは不可能。他にも検出器が必要。

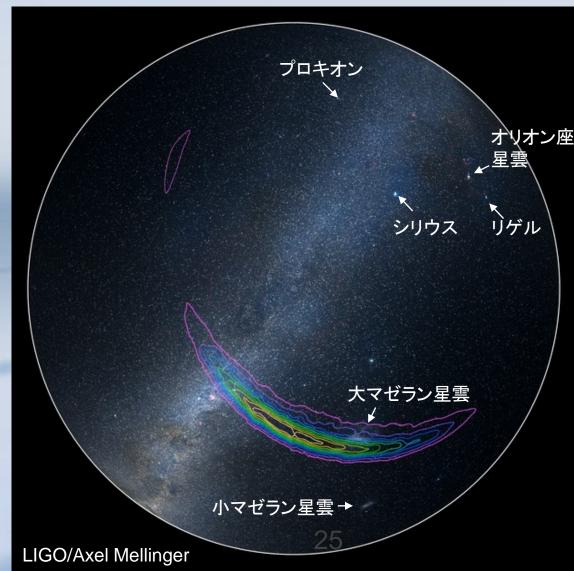


#### 重力波はどこから来たのか

LIGOの2台の検出器では到来方向があまり

特定できない

約600平方度 満月の3000倍 の広さ 冬の大三角形 の2倍の広さ



道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



#### 世界の重力波検出器ネットワーク





# WIOKYO UTO

プロジェクト代表: 梶田隆章

岐阜県の 神岡鉱山内に 建設 3kmの腕

#### 2.KAGRA





KAGRAの重要な特徴 (1)岐阜県の神岡鉱山内に建設 地面振動が小さい(都市近郊の1/100) 小さい雑音、安定な運転

(2)熱雑音低減のために鏡を冷却。

kmスケールでは初。 いずれも将来の性能向上に不可欠。









苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学 (大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



#### Working Underground...





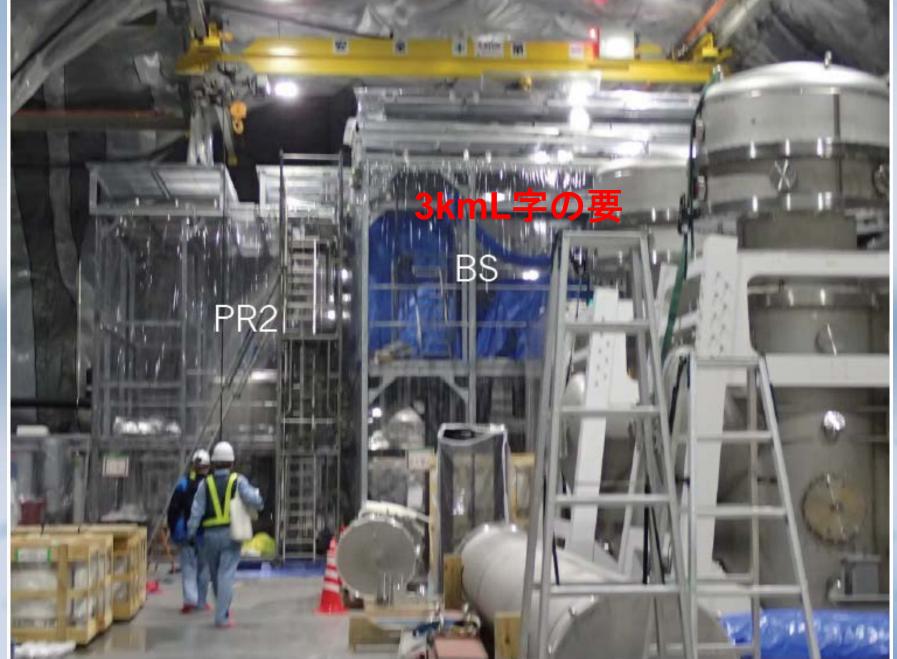
坑内作業スタイル

- •作業服、軍手、長靴
- •ヘルメット
- •ヘッドライト
- •反射板
- •酸素濃度計
- •電動アシスト自転車

光岡自動車の 電動自動車

苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学 (大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)





大石奈緒子、国立天文台 職員みんなの天文レクチャー(2016年6月23日)



スケジュール 2015年度内に常温干渉計で観測 2017年度内に低温干渉計で観測



## 2016年3月25日9:00運転開始





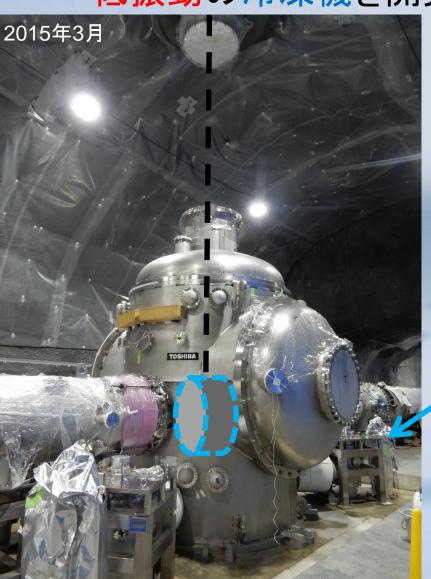


スケジュール 2015年度内に常温干渉計で観測 2017年度内に低温干渉計で観測



# KAGRAの低温装置

• 低振動の冷凍機を開発

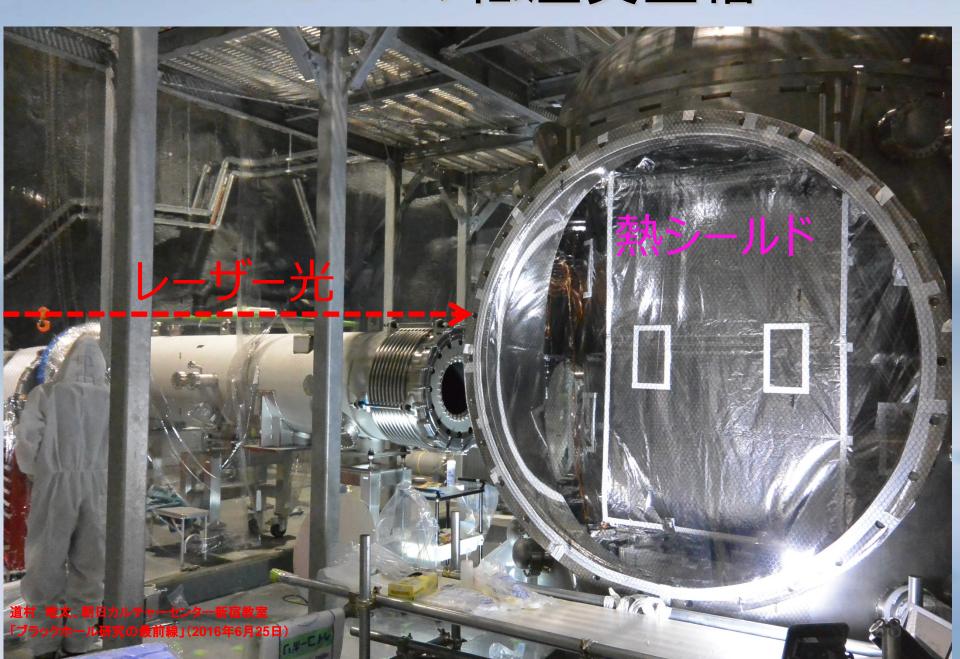


道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)

冷凍機



# KAGRAの低温真空槽



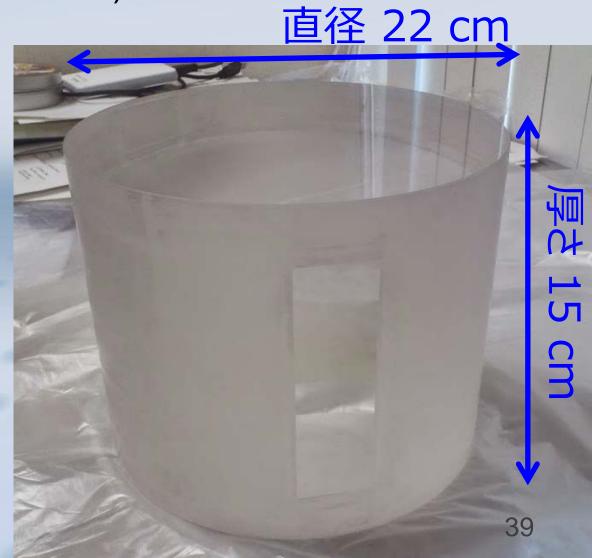


## KAGRAの鏡

- 人工サファイア
- 冷やした時(20K, -253°C)の性能が優れている
- 超高反射率 (99.99 %以上)
- 超低損失
- ものすごく なめらか



道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室 「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)





### 3.CLIO

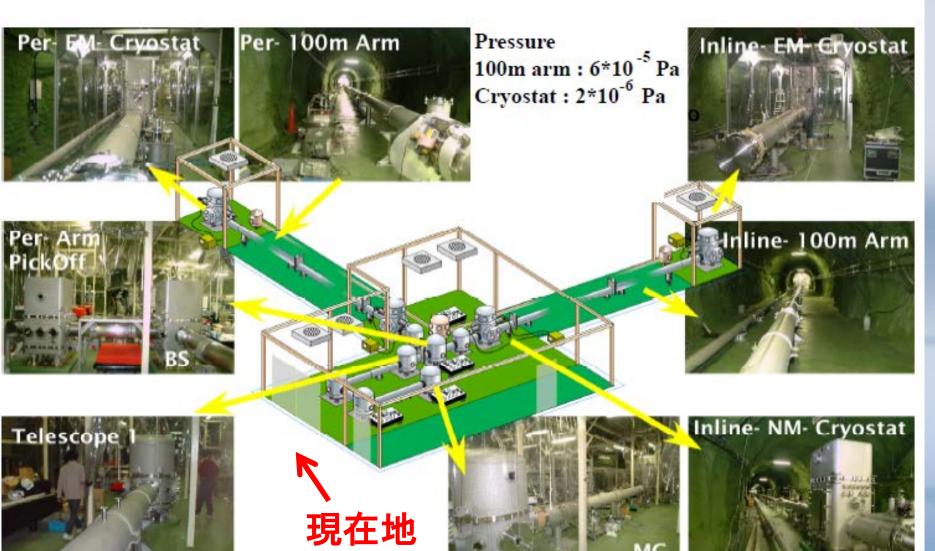
CLIO KAGRAの前身 100mの腕をもつ低温干渉計

今みなさんはCLIOの部屋の前にいます!



### 3.CLIO

by S. Miyoki and S. Telada



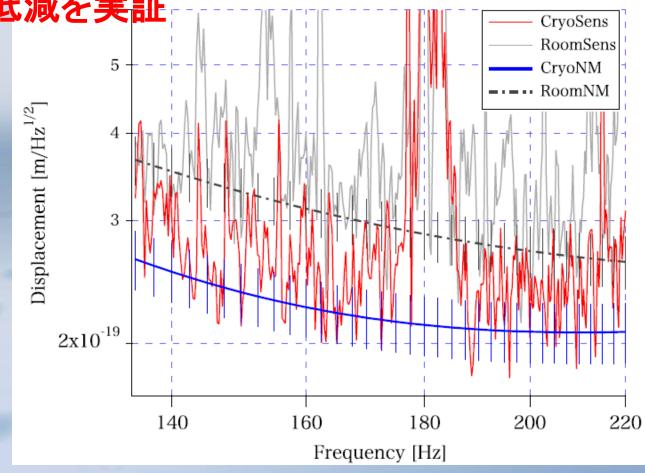


### 3.CLIO

### CLIOの最も重要な成果

冷却による雑音の低減を実証

このあとに KAGRAの予算が 承認される。



T. Uchiyama et al., Physical Review Letters 108(2012)141101



### 4. まとめ

重力波: アインシュタインが予言した(1916)時空のさざなみ

直接検出は困難を極めた(アインシュタインからの最後の宿題)が 2015年にアメリカのLIGOが検出した。人類は宇宙を探る新たな手段 を得た。

さらなる性能向上とLIGO以外の検出器が必要。

現在神岡でKAGRAを建設中。地下と冷却が他にない特徴。

これらは将来への性能向上に必須。

2018年始めの低温運転を目指す。

CLIO:KAGRAの前身。冷却による雑音低減を実証した。

# おわり



## 1.重力波

散乱や吸収されない、つまり検出しにくい

#### 間接的な証拠

中性子星連星: 非常に重くかつ星としてはコンパクト(10km程度) な2つの星が重心の周りを回転



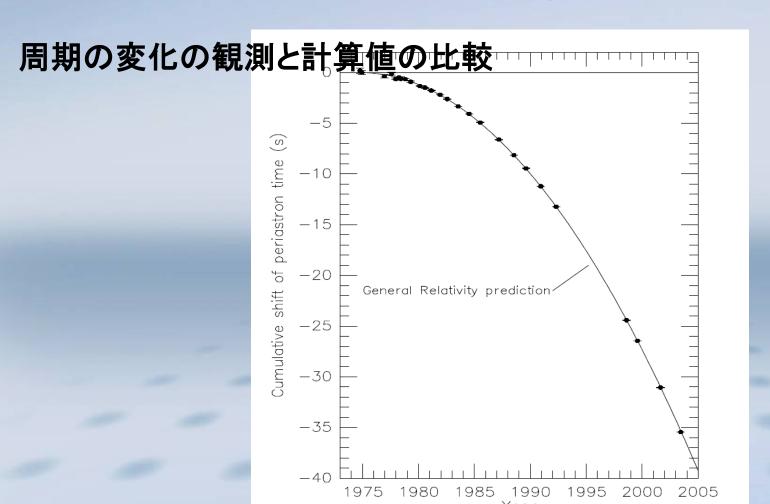
重力波を放出して一回転に要する時間(周期)が変わる

観測された周期変化が一般相対論の予言と一致

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)



## 1.重力波



J.M. Weisberg and J.H. Taylor, ASP Conference Series, 328 (2005) 25 (arXiv:astro-ph/0407149).



## 1.重力波

### The Nobel Prize in Physics 1993

### 1993年度 ノーベル物理学賞

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



Russell A. Hulse



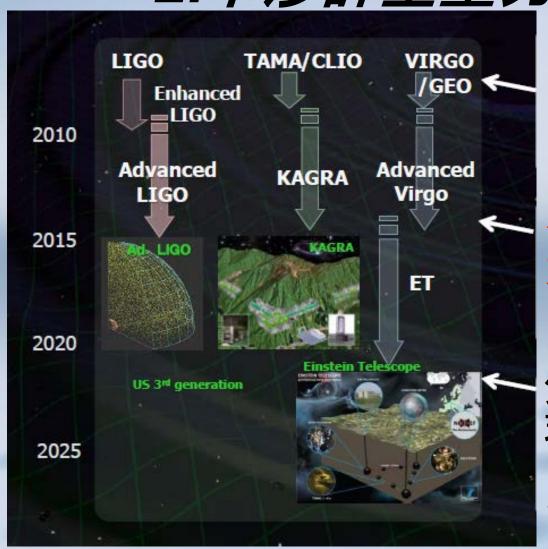
Joseph H. Taylor Jr.

ノーベル財団のウェブ

直接検出目指し(次のノーベル賞?)世界各地で検出器を建設開発中



# 2. 干渉計型重力波検出器



第1世代:検出できず

第2世代:初検出目指して建設開発が進行中

第3世代:本格的な重力波 天文学が花開く

安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿 (東大物理学教室談話会 2013年5月31日)