

重力波で宇宙を探る

山元 一広

富山大学 理学部 物理学科

富山大学見学(富山東高校)
富山大学理学部多目的ホール
富山県富山市
2020年7月7日

自己紹介

山元 一広 (やまもと かずひろ)

富山大学理学部物理学科 (2017/3-)

東京大学宇宙線研究所 (-2017/2)

重力波検出器 (KAGRA) の開発

目次

1. **重力波とはなにか**
2. **重力波検出器**
3. **検出された重力波**
4. **重力波検出器の将来**
5. **富山大学の貢献**
6. **まとめ**

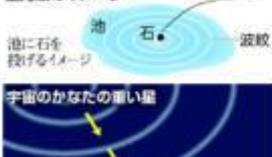
アメリカのLIGOが重力波初観測！

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

重力波を初観測

重力波のイメージ



米研究チーム

朝日新聞

2月12日 金曜日

号外

朝日新聞

速報

アインシュタインの



重力波 未知の窓開く

時時刻刻

重力波 初観測

一般相対性理論裏付け

米チーム 宇宙の謎に光

同日 賃金法制化へ

円高進行一時

新毎日 2月12日(金)

読売新聞 2.12(金)

重力波を初観測

初期宇宙解明に

アインシュタイン

米チーム

北、開城を軍統制下に

韓国資産を凍結

円急騰一時100円台

苦渋の決断

185分のオンライン英語学習アプリ

1,000円

NOVAサブ

重力波 世界初観測

宇宙の起源に迫

かけうどん235.7円

増税以降は円値上がり

四国新聞

円急騰

本人も貢献

LIGOの論文には十八人以上の研究者の名を連ね、日本人は少数ながら、成果には大きく貢献した。成果の力となった大層の感謝にあたり、精度を上げるための機器の総合調整を担当したが、LIGOハンフオウ、顧問の岡村浩太郎、合テト主任、高精度の光検出器、出が極めて安定したレーザー、熱にも振動が起きにくい鏡、地面の振動を遮断する「ピエゾ」をつづり組みあげた。

LIGOの論文には十八人以上の研究者の名を連ね、日本人は少数もたなくあった。また最新の観測をえは、最終的な性能に達してはならず、仕事ははげらも勝。

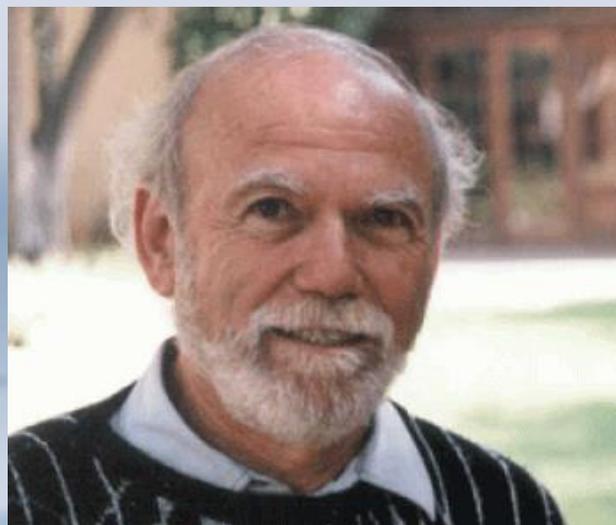
LIGO研究所の山本博樹上級研究員は計画初期の94年からチームに加わり、初代の設置は予定感度を達成するまでに5年もの歳がかかった。原因不明の雑音に長期間まよった時もあった。その長い経緯が生じた一語。

あの日

あの方子

アメリカのLIGOが重力波初観測！

2017年：LIGOメンバーにノーベル物理学賞



レイナー ワイス

バリー バリッシュ

キップ ソーン

富山大学理学部物理学科5研ののノーベル賞の解説参照

<http://www.sci.u-toyama.ac.jp/phys/5ken/>

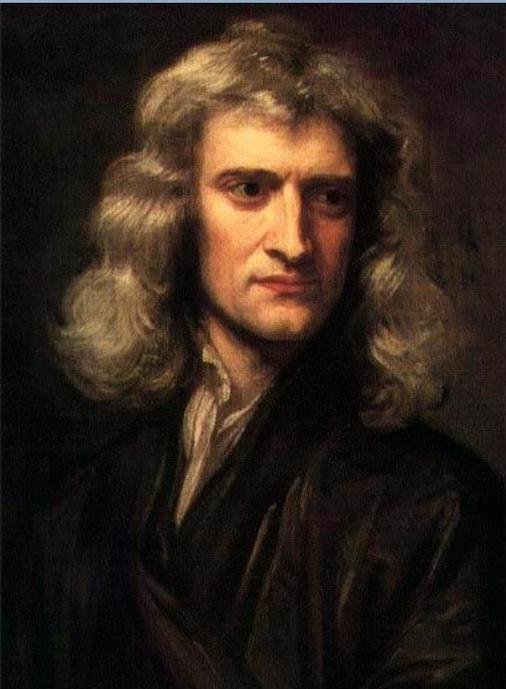
1.重力波とはなにか

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

ニュートンの法則



アイザック ニュートン (ウィキペディア 英語版)

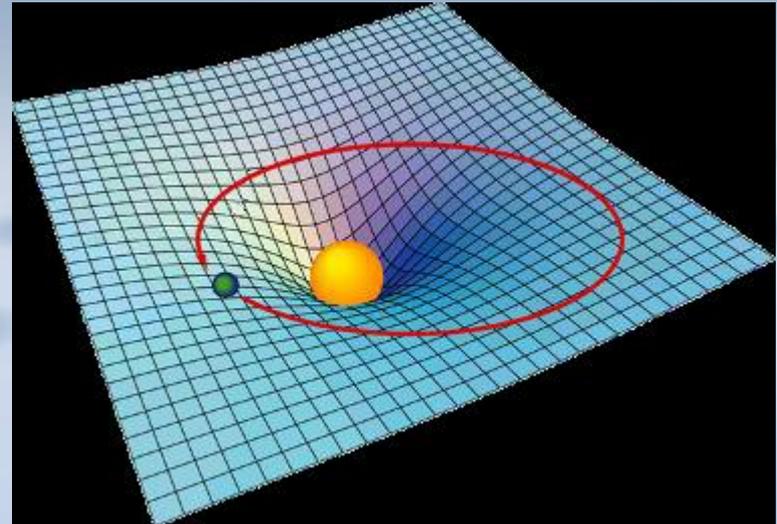
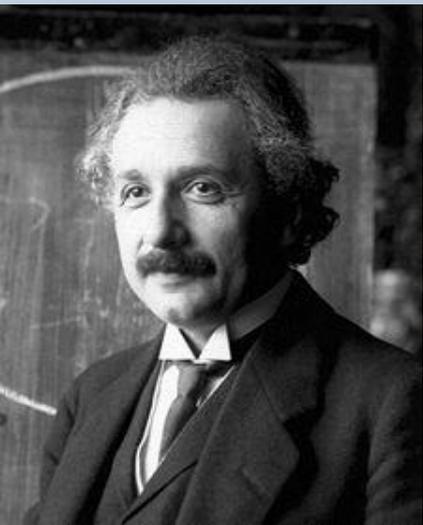
1.重力波とはなにか

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)



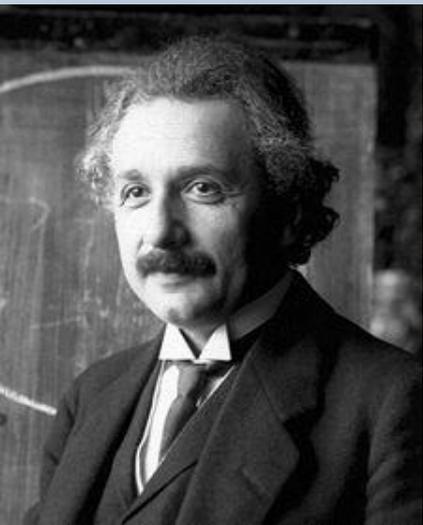
アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

1.重力波とはなにか

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。”



アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

1. 重力波とはなにか

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

1.重力波とはなにか

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”

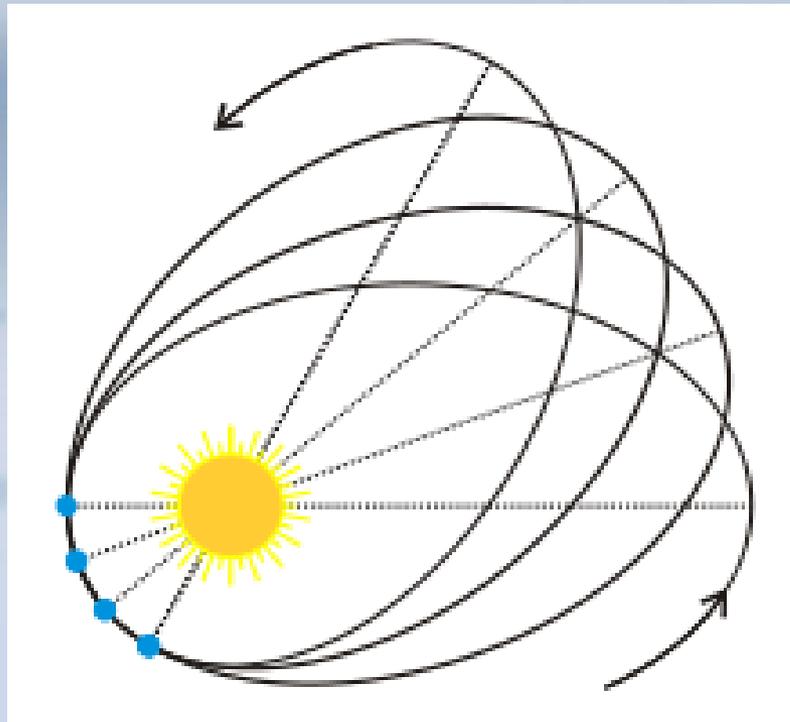
1.重力波とはなにか

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

(水星の) 近日点移動

初めての実験的検証(根拠)



1.重力波とはなにか

(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.

ベルン



旧市街は世界遺産
アインシュタインが住んでいた

ベルン



アインシュタインが住んでいた家は
公開されている。
受付の机は当時職場(特許局)で使っていたもの

ベルン

アインシュタインが住んでいた家は
公開されている。



1.重力波とはなにか

重力波を検出する意義

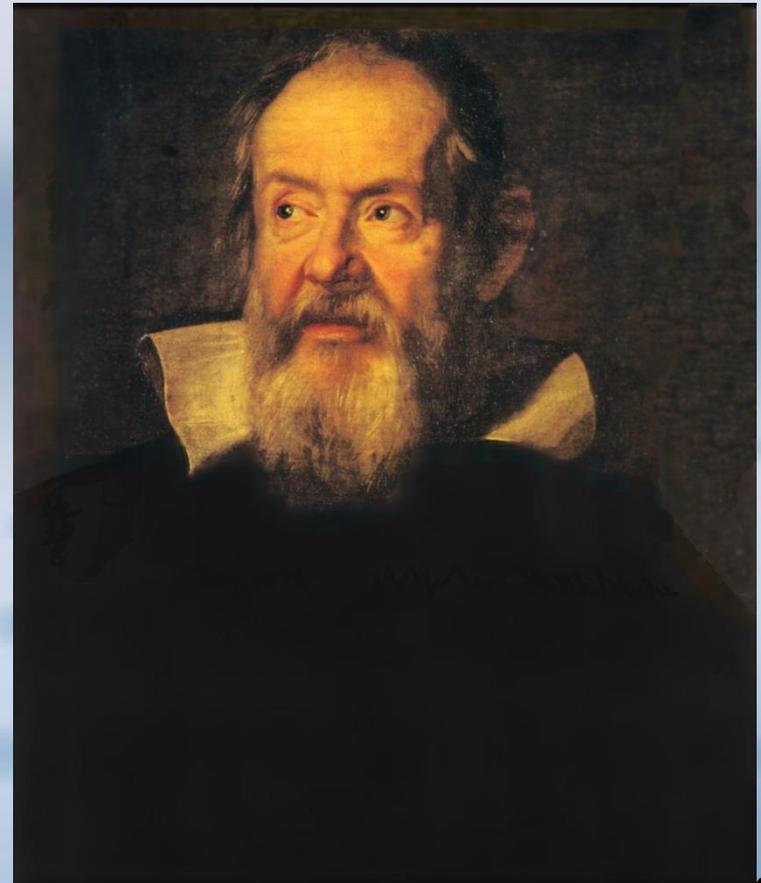
(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生

可視**光**(人間の目で
見える光)による観測:

宇宙からやってくる可視光を
捉えて**宇宙の情報**を得る。

他に宇宙からやってくる
ものはないか？

ガリレオ ガリレイ (ウィキペディア 日本語版)
による望遠鏡による観測

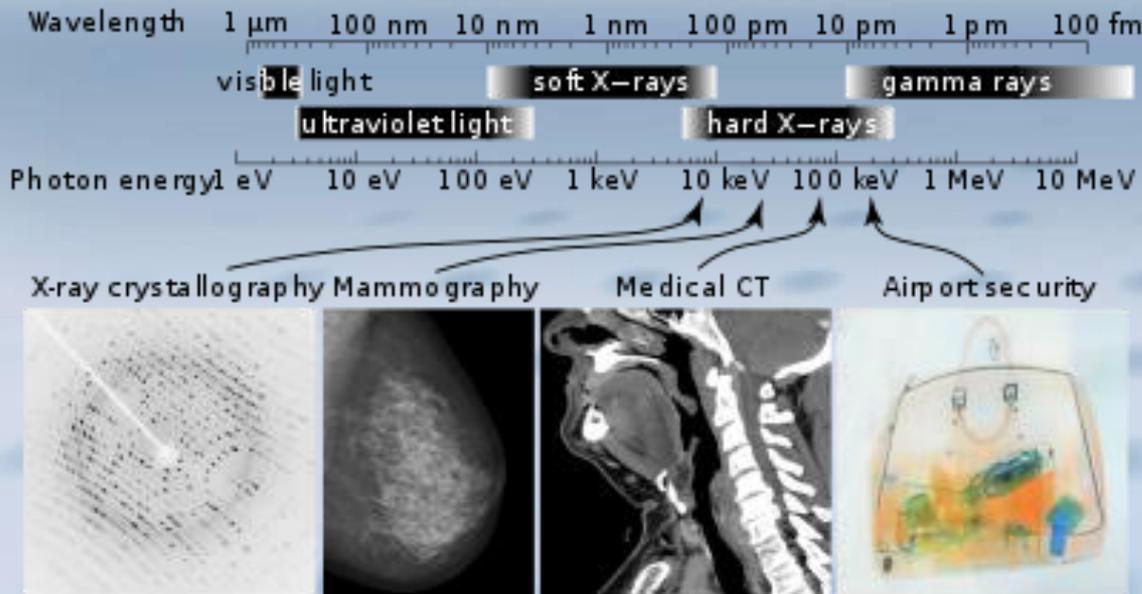


1.重力波とはなにか

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

一例として**X線**(医療、空港のセキュリティチェック)



X線 (ウィキペディア 英語版)

1.重力波とはなにか

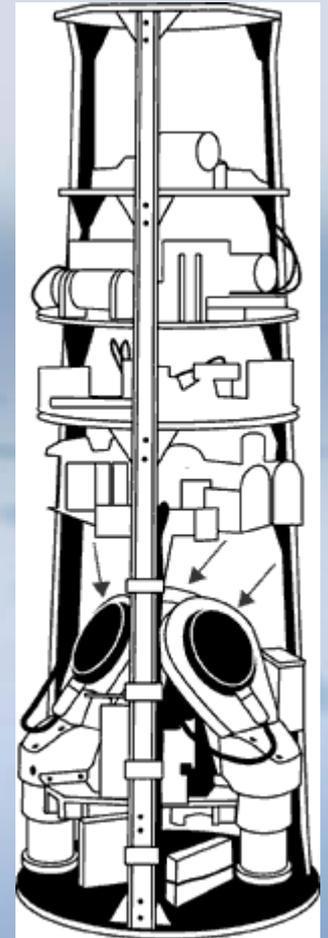
重力波を検出する意義

(2)天文学的な意義:重力波天文学の創生
人工衛星で**宇宙からのX線**を捉える
ブラックホールの観測など



リカルド ジャコーニ
2002年 ノーベル物理学賞

ノーベル財団のwebから



1.重力波とはなにか

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

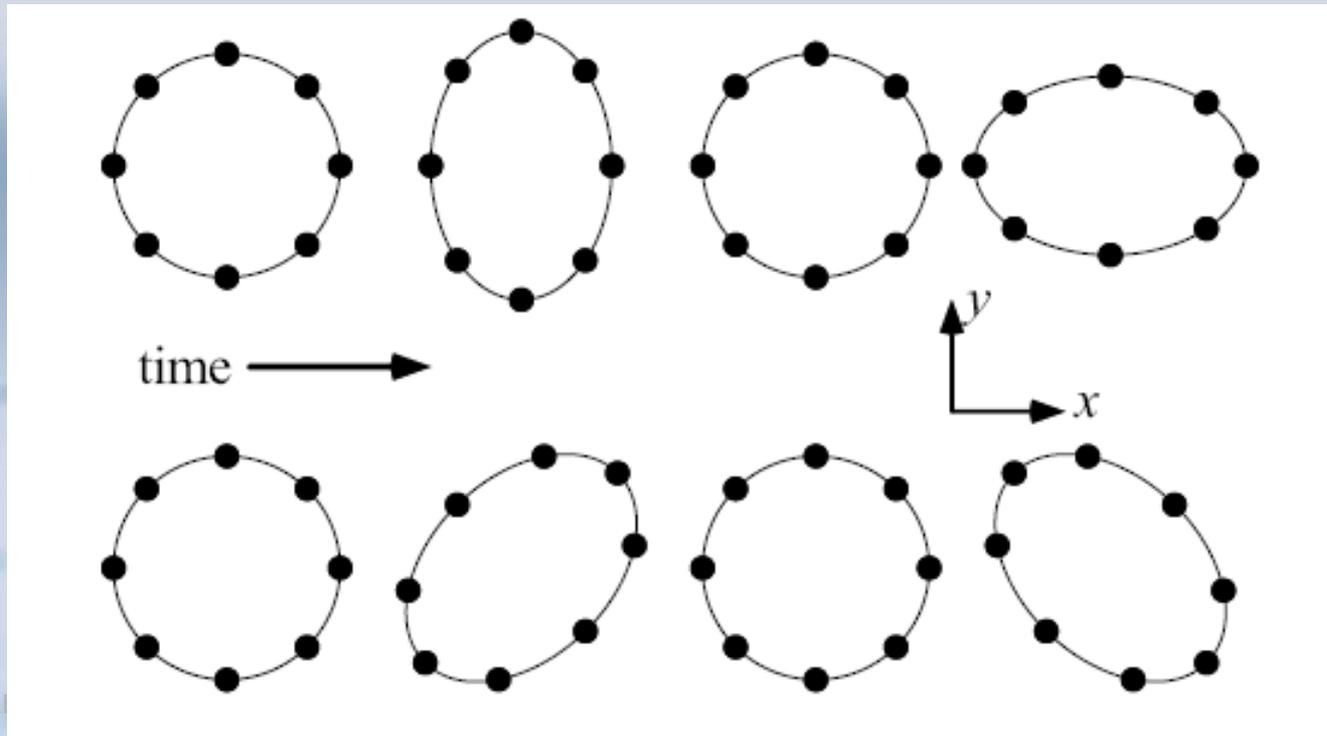
重力波から**星や宇宙に関する情報**を得る
発生後吸収や散乱されずに地球にやってくる

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.重力波検出器

重力波とは何か

重力波が画面の垂直方向から来ると....



<http://spacefiles.jp>

2.重力波検出器

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？

(例) 地球-太陽間の距離変動

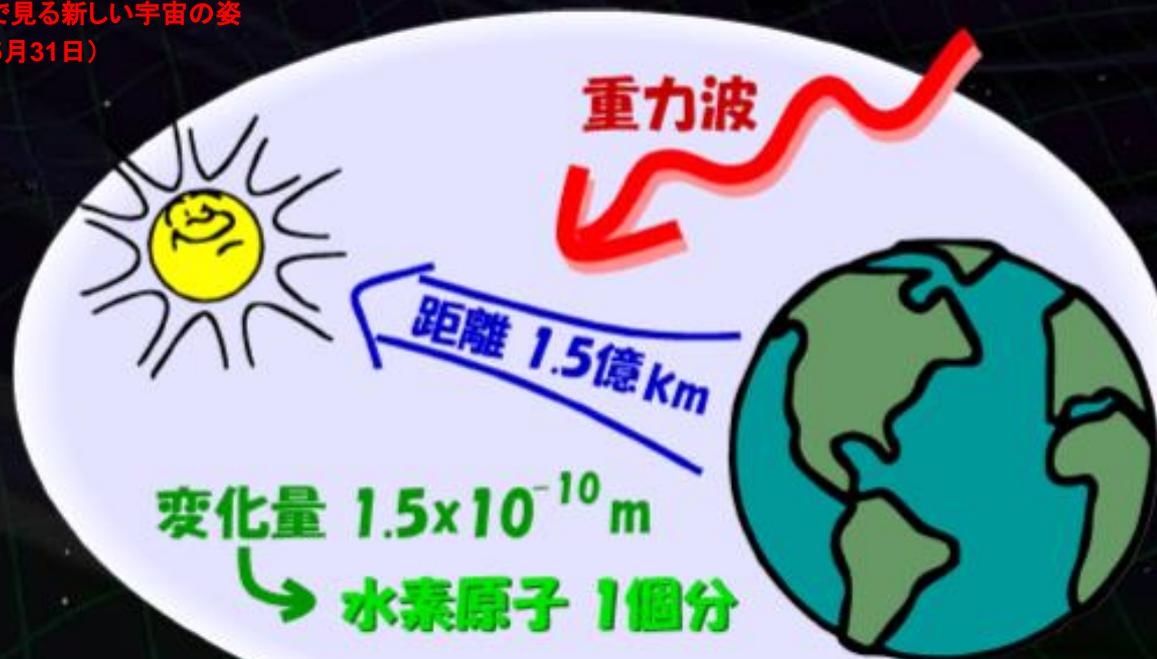
距離 1.5×10^{11} m



1.5×10^{-10} m の距離変動

重力波振幅 10^{-21}

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. 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）

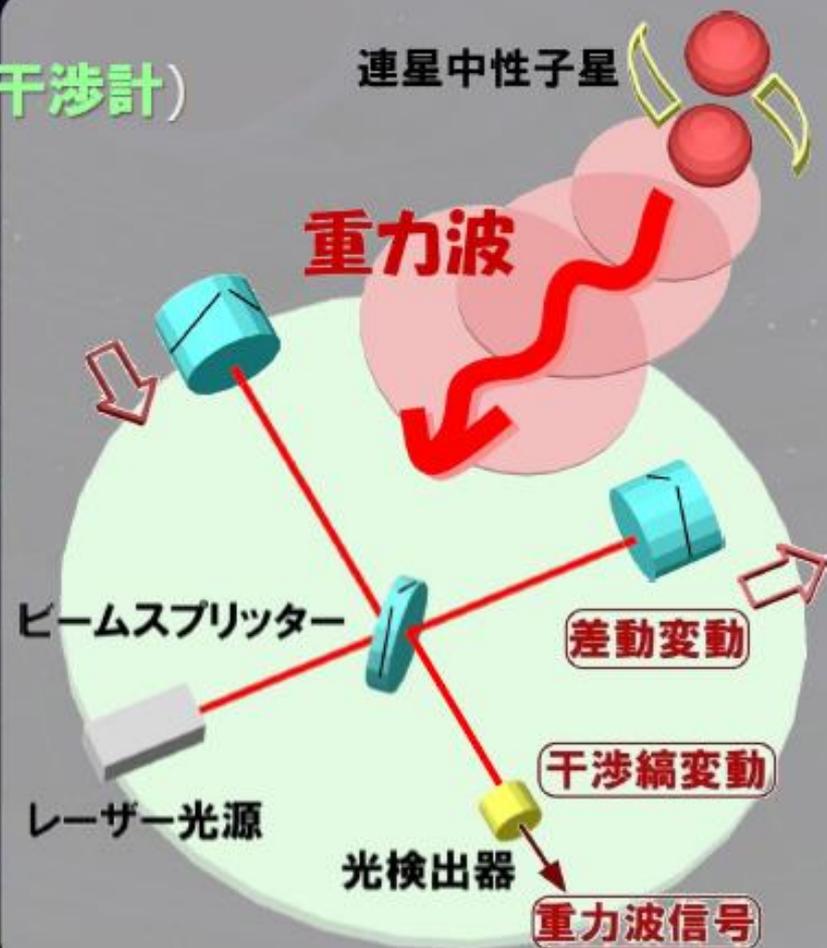
レーザー干渉計（マイケルソン干渉計）

- レーザー光源からの光を直交する2方向に分岐.
- 懸架された鏡で打ち返し干渉.
- 光検出器で観測.

重力波が入射

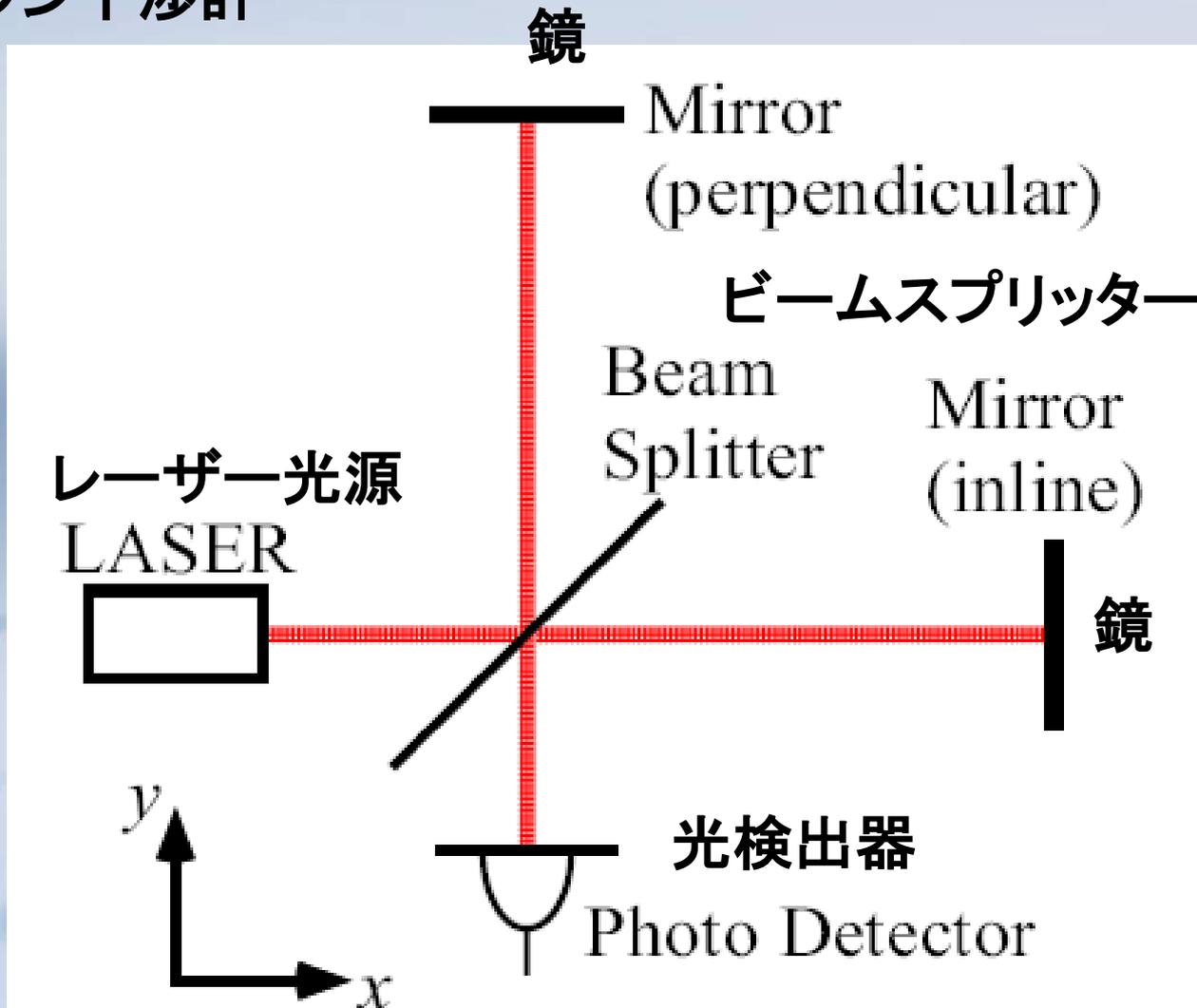


腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



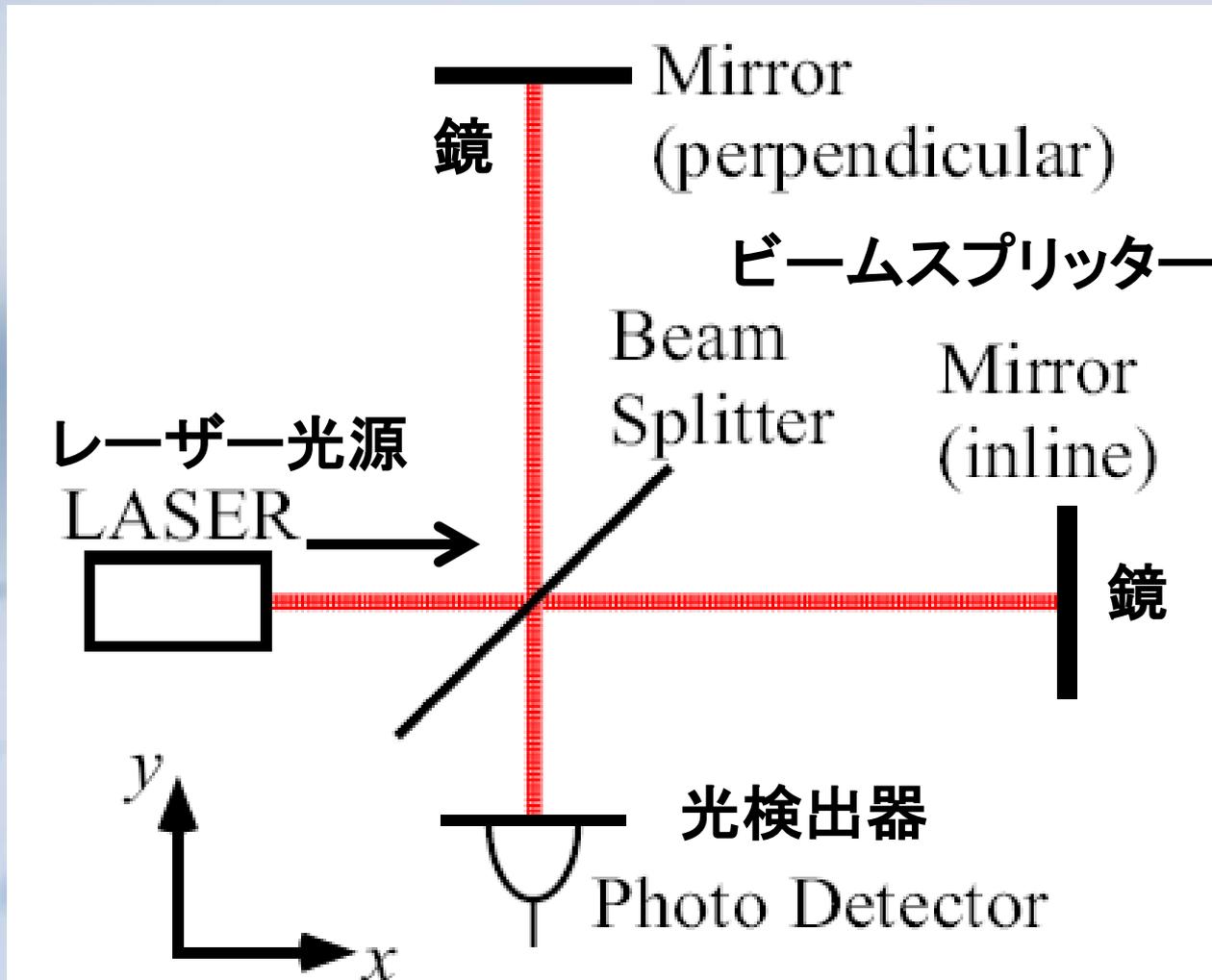
2.重力波検出器

マイケルソン干渉計



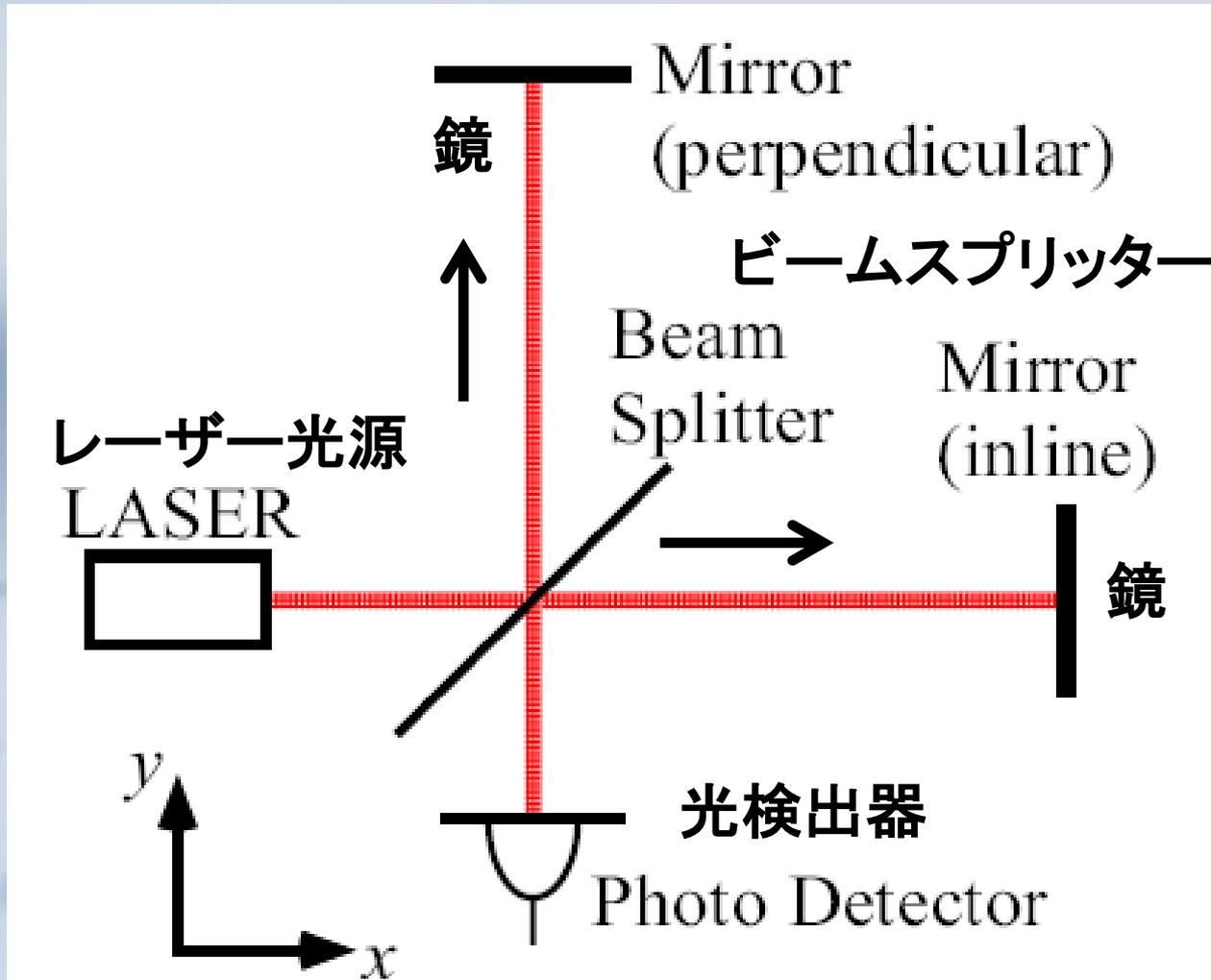
2.重力波検出器

(1)レーザー光源から光が出る



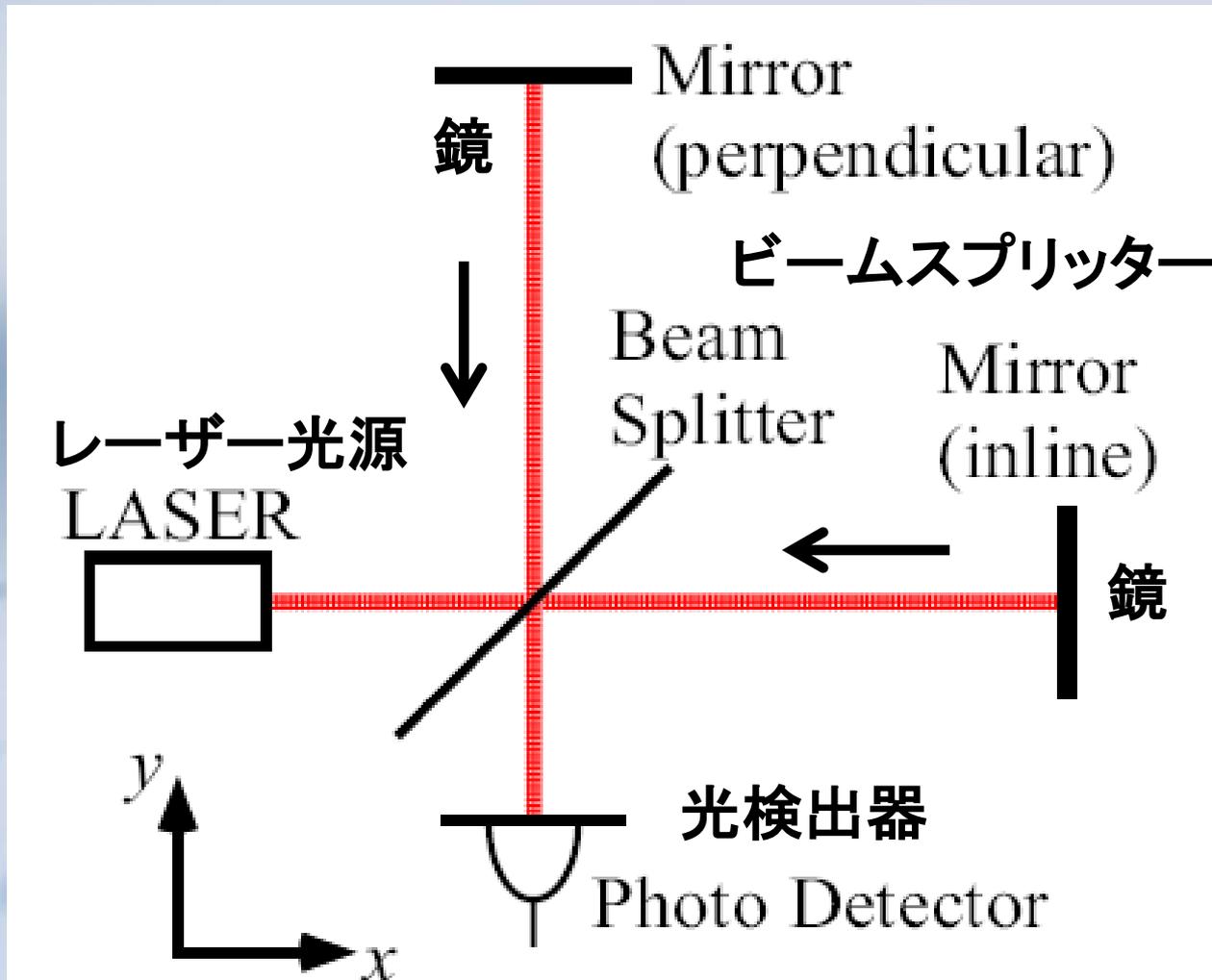
2.重力波検出器

(2)ビームスプリッターで分けられてそれぞれの腕を進む



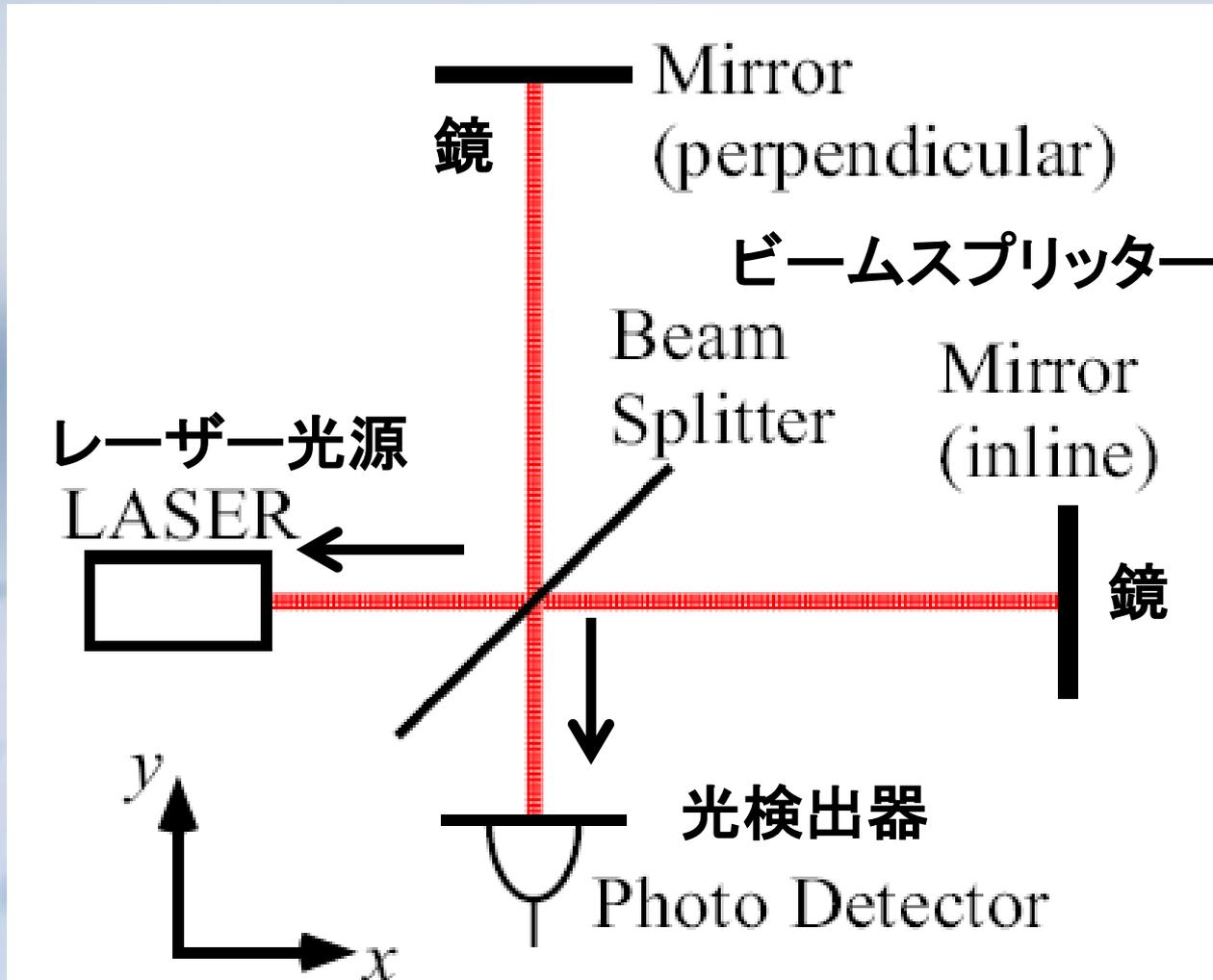
2.重力波検出器

(3) 鏡で反射されて戻る



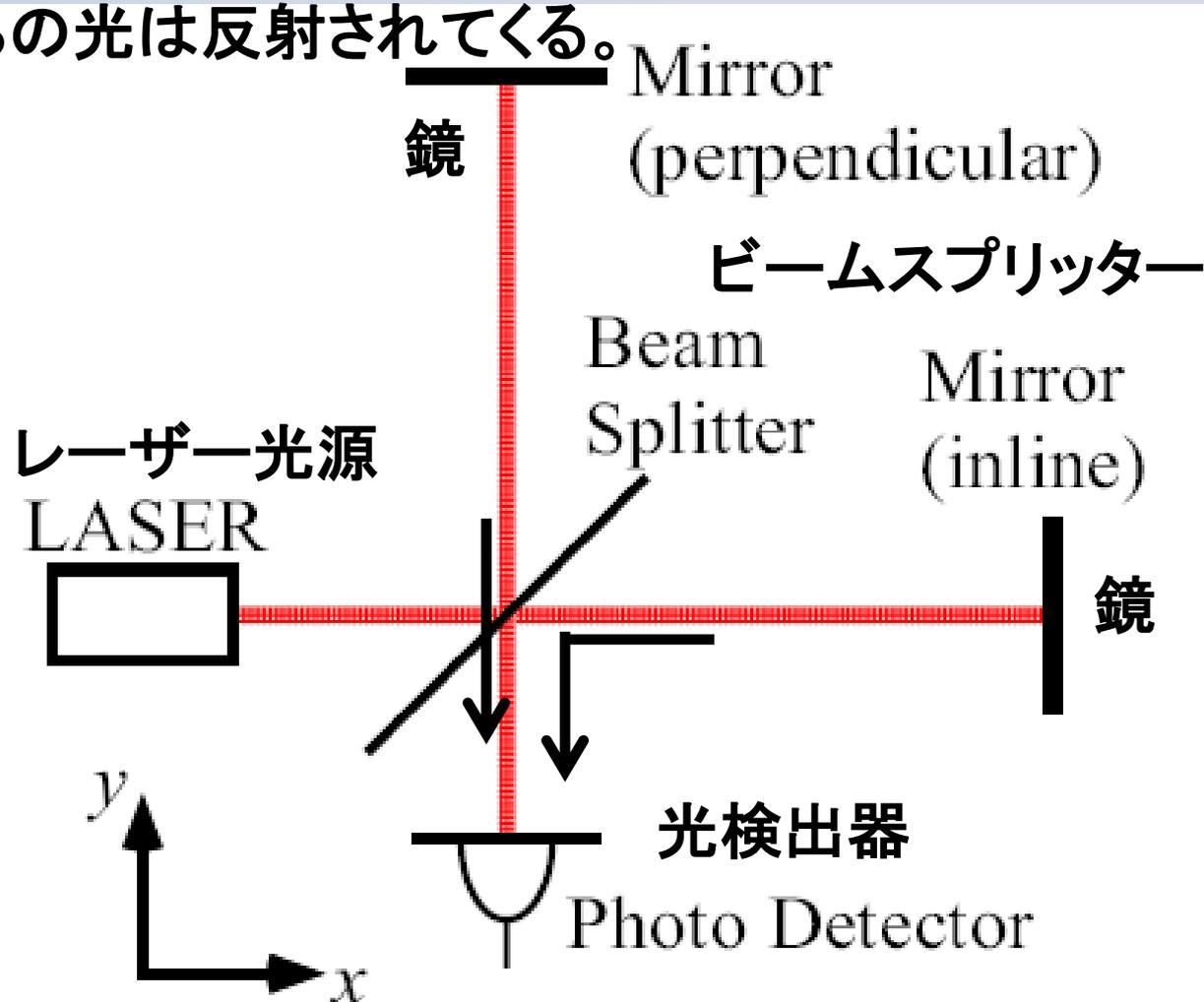
2.重力波検出器

(4)ビームスプリッタで一部反射、一部透過ののち光検出器もしくは光源へ



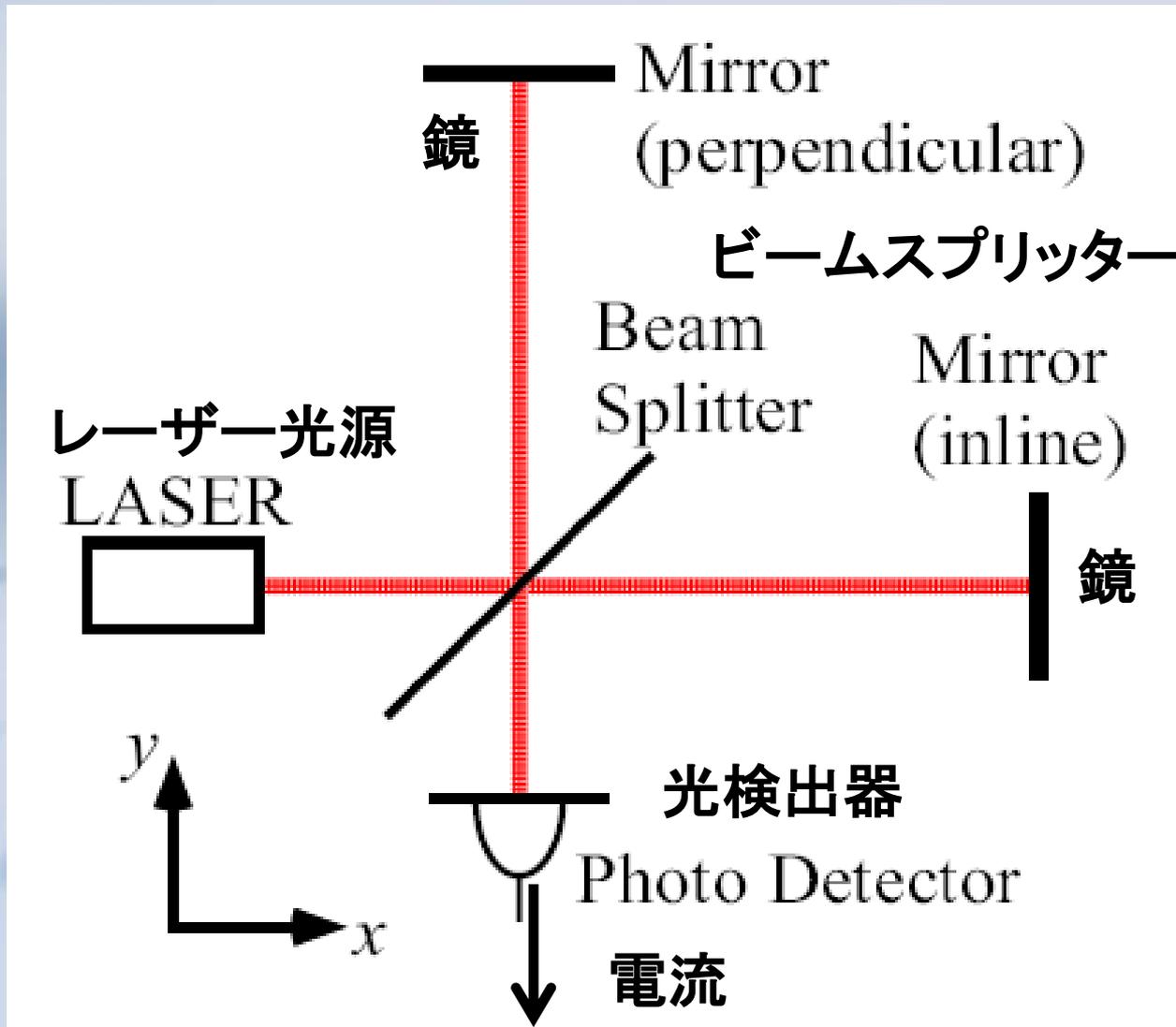
2.重力波検出器

特に光検出器に注目すると画面上からの光はビームスプリッターを透過、右からの光は反射されてくる。



2.重力波検出器

(5) 光検出器から光の強さに比例した電流が出る。



2.重力波検出器

光検出器に来る光

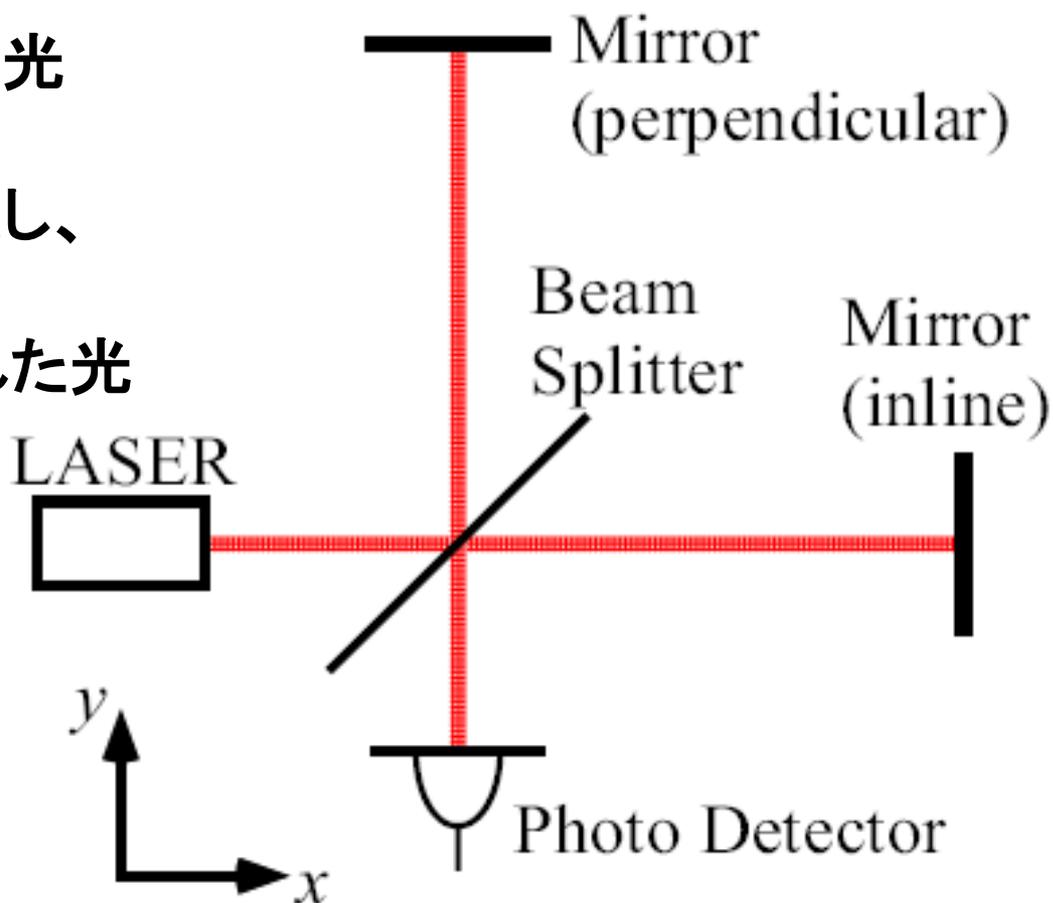
(1)ビームスプリッターで反射され、
画面上の鏡で反射され、
ビームスプリッターを透過した光

(2)ビームスプリッターを透過し、
画面右の鏡で反射され、
ビームスプリッターで反射された光

光検出器に来る光

(1)と(2)の足し算

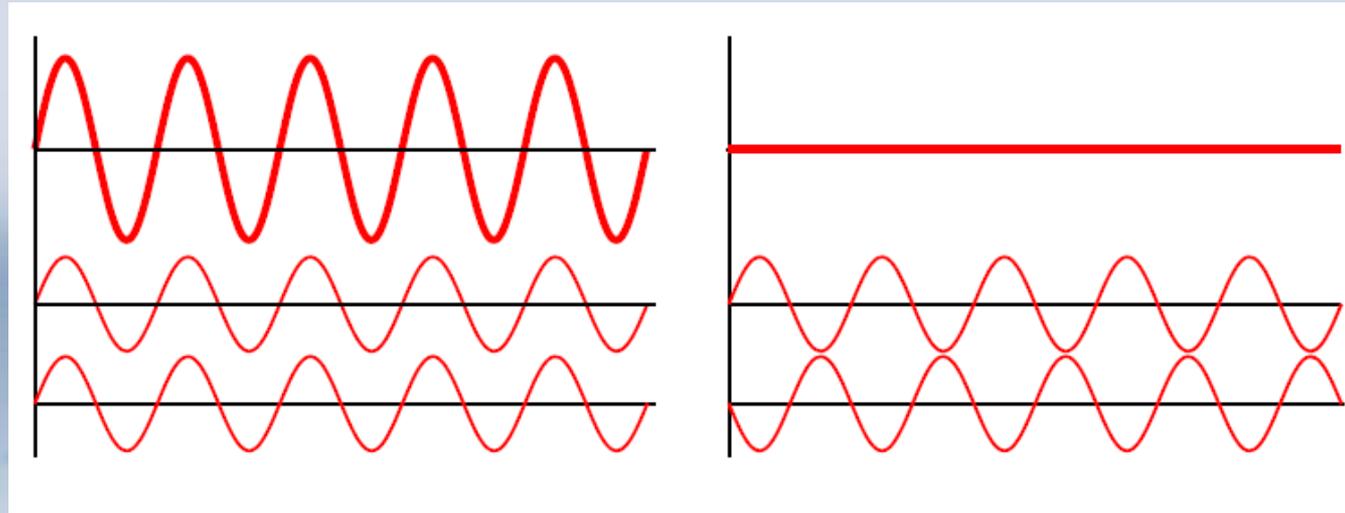
光の干渉



2.重力波検出器

光検出器に来る光
(1)と(2)の足し算
光の干渉

鏡が動くと...
光のタイミングが
ずれて光の量が
変わる

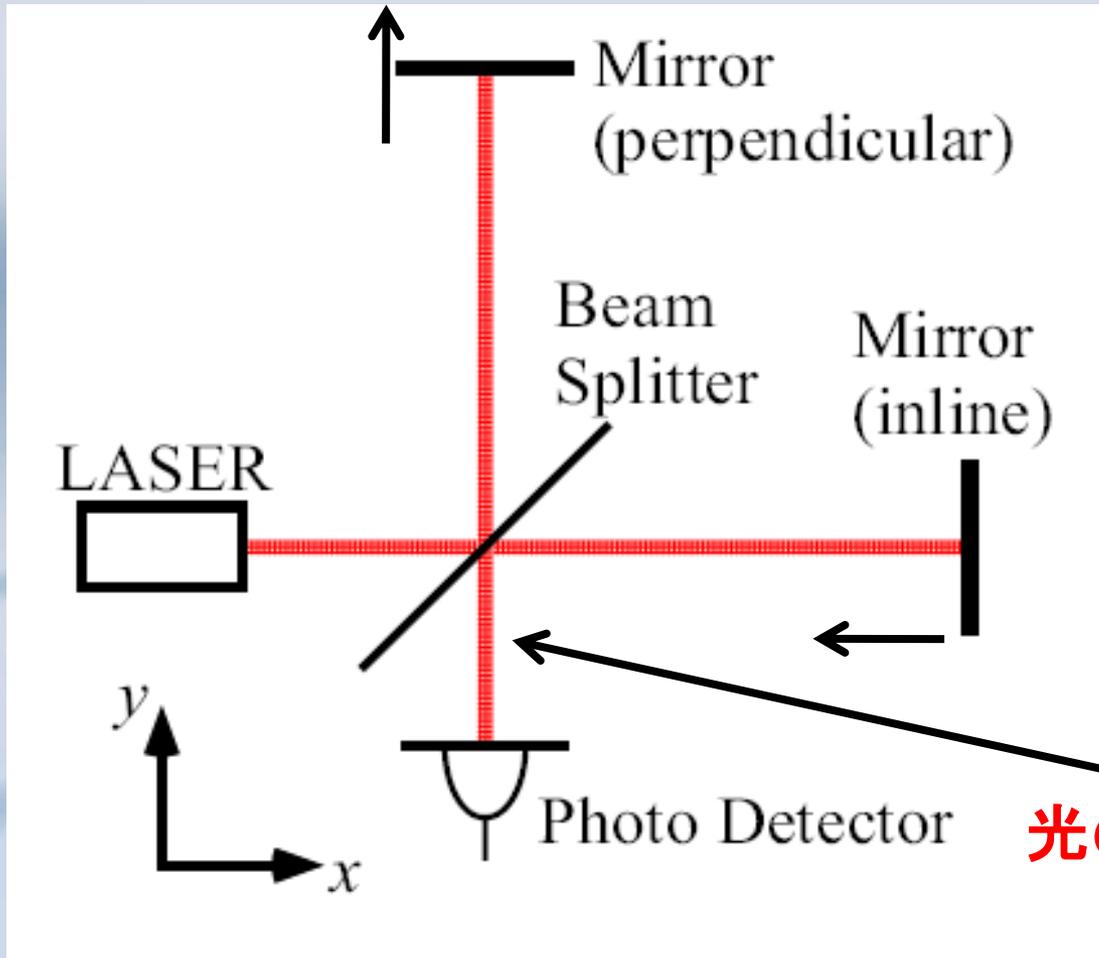


一波長
(1/1000ミリメートル！)
の鏡の動きも見逃さない。

干渉 (ウィキペディア 英語版)

2.重力波検出器

マイケルソン干渉計: 腕の長さの差を精密に測定する装置
 両方の鏡が同じ方向にずれても検出できない。

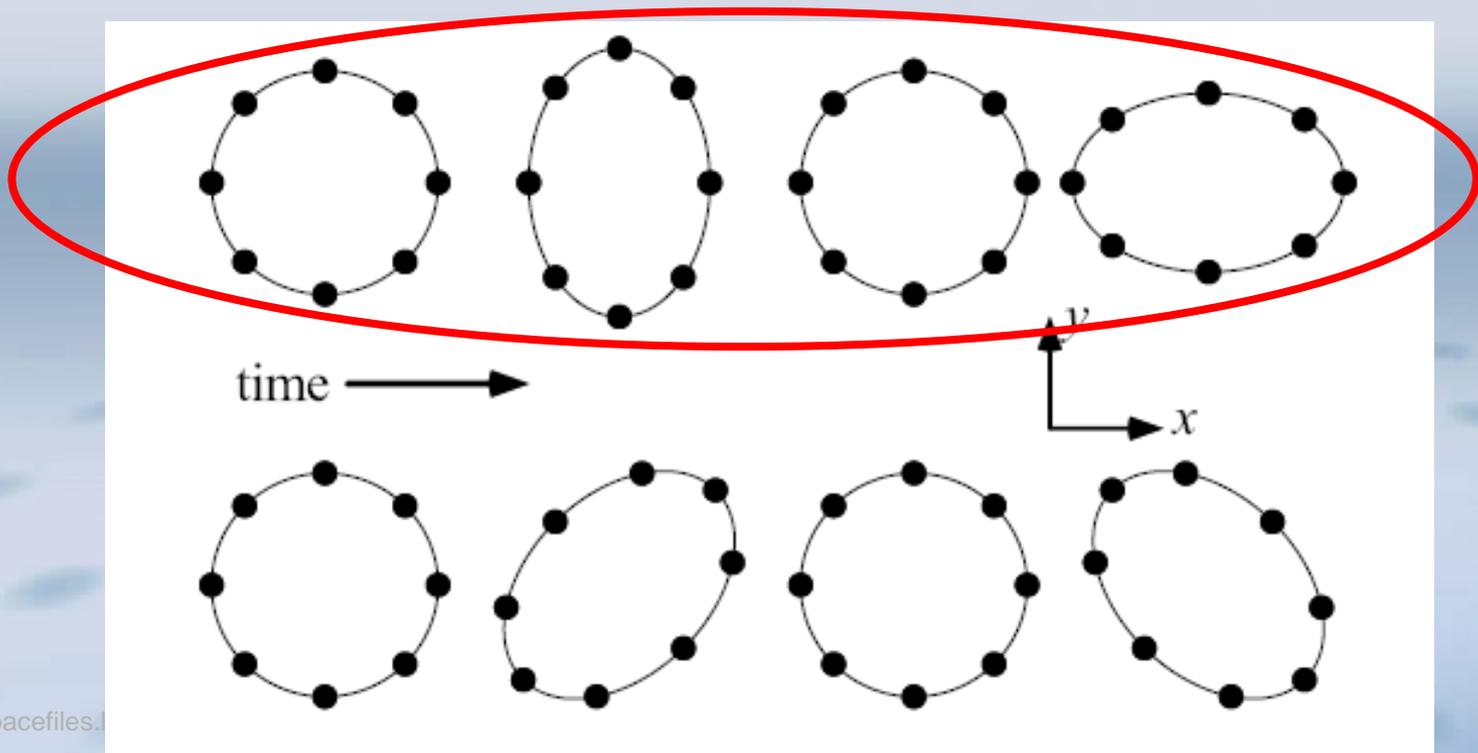


光の強さが変わる

2.重力波検出器

重力波とは何か

重力波が画面の垂直方向から来ると....



<http://spacefiles.jp>

2.重力波検出器

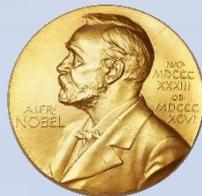
干渉計の歴史

Rainer Weiss, Quarterly Progress Report of Research Laboratory of Electronics of the Massachusetts Institute of Technology 105(1972)54. <https://dcc.ligo.org/P720002/public>

最初の具体的な提案

(感度をあげるにはどうしたらよいか、
そのような雑音があるのか、どうやって低減するかなどなど)
->まるで**教科書**のよう！

ワイスは干渉計も作って実験もした(が論文にはしていない)



2.重力波検出器

干渉計の歴史

G.E. Moss, L.R. Miller, R.L. Forward,
Applied Optics 10 (1971) 2495.

査読付き論文となった最初の観測

$$h = 2 \cdot 10^{-16} / \text{Hz}^{1/2}$$

First detection : $h = 10^{-23} / \text{Hz}^{1/2}$

Physical Review Letters

116(2016)061102

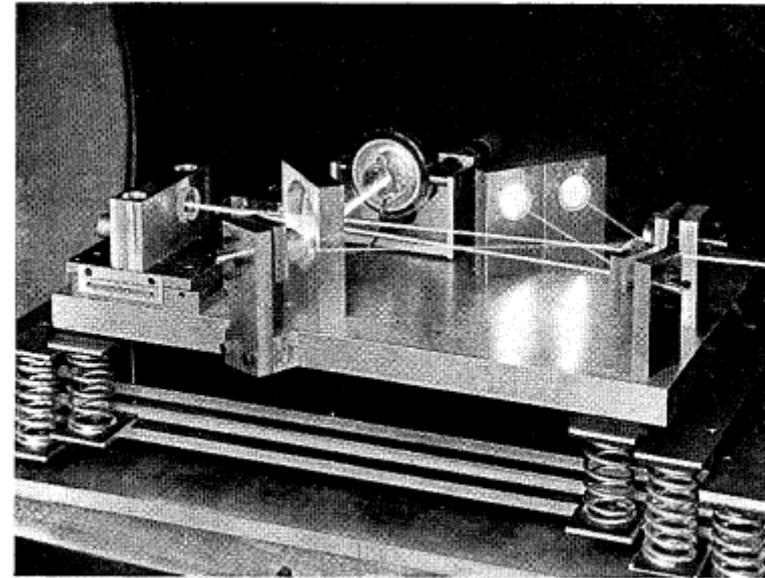
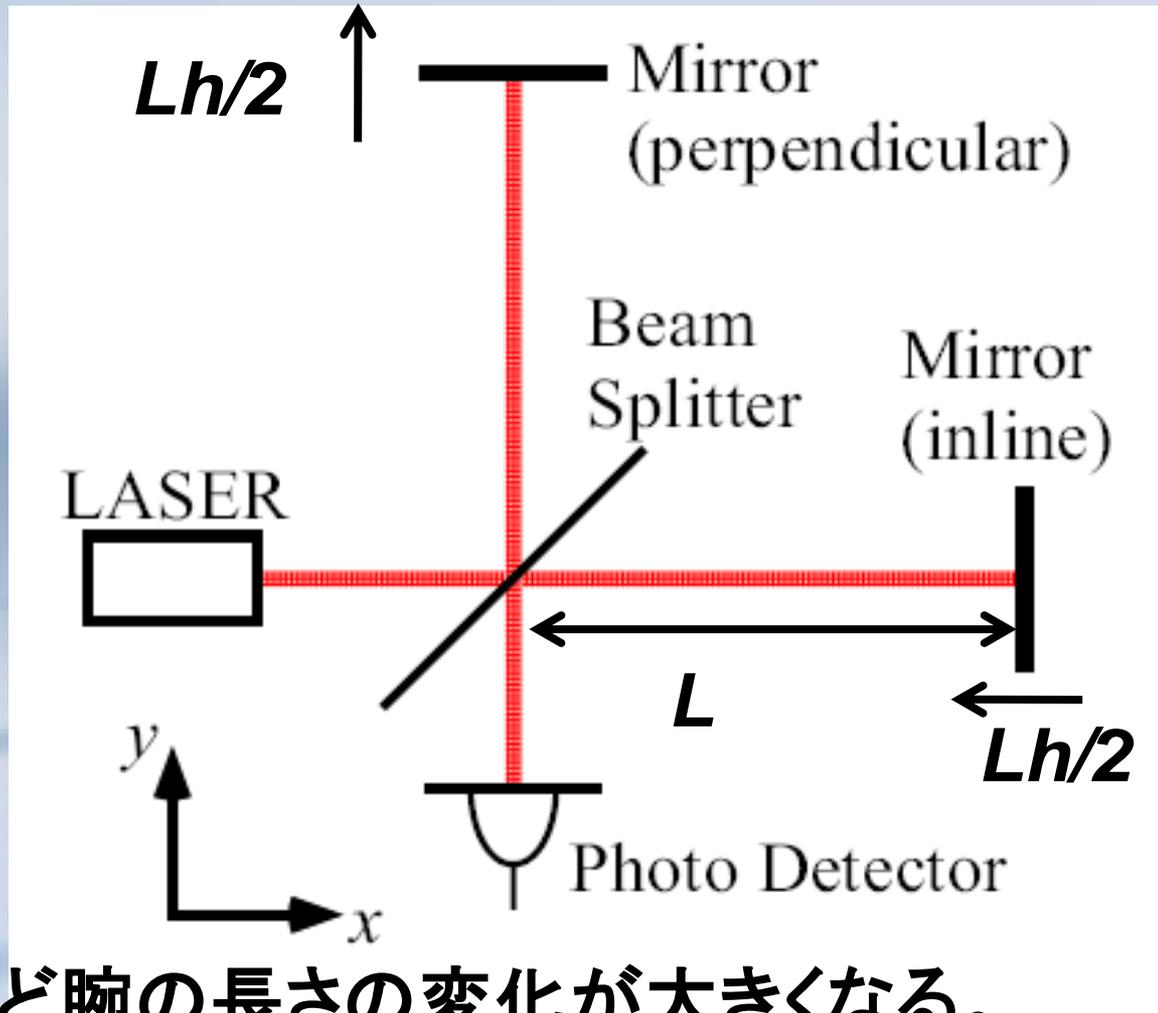


Fig. 4. Photograph of interferometer setup on 3-Hz isolation suspension.

- (1)40年強かけて雑音の大きさを一千万分の一まで低減
- (2)1971年の感度は(いまから見ると)劇的なものではない。

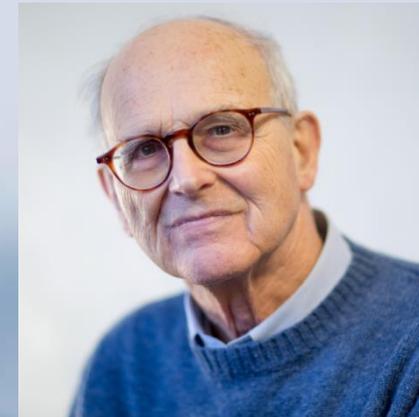
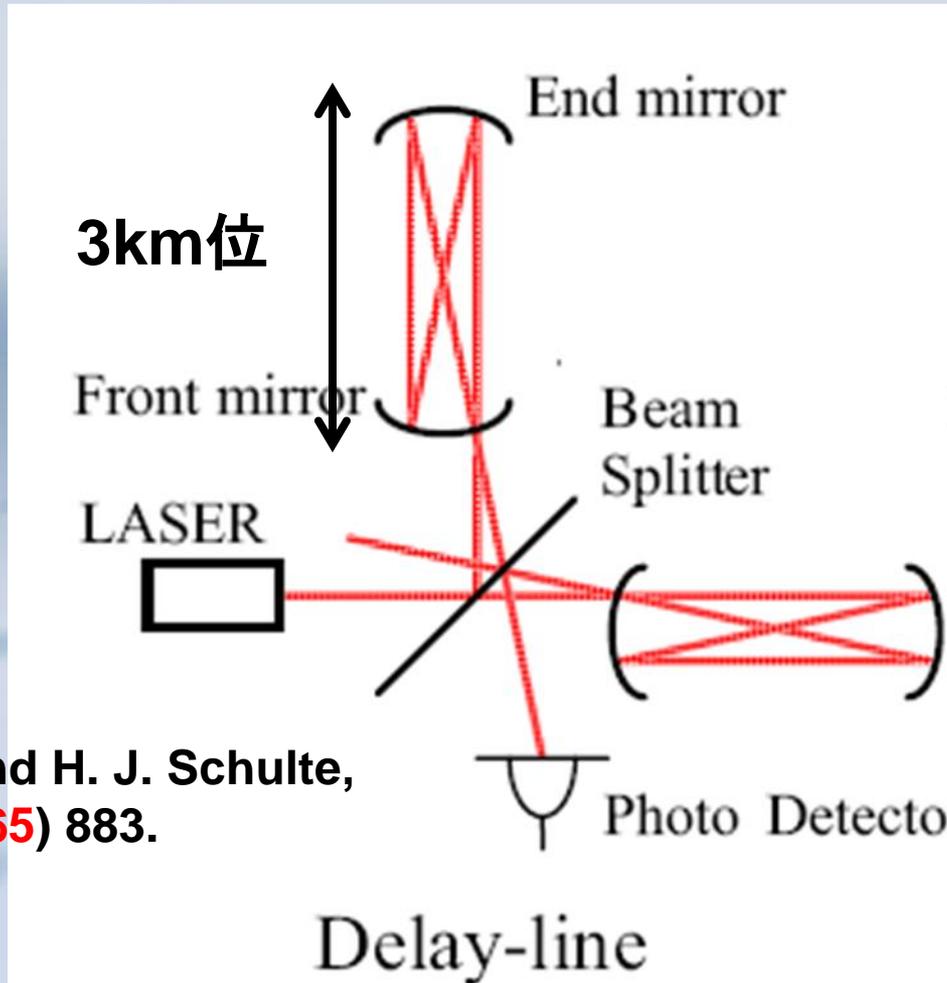
2.重力波検出器



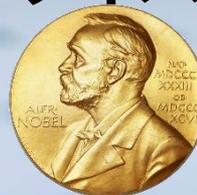
腕が長いほど腕の長さの変化が大きくなる。
 -> **大きい**干渉計が必要

2.重力波検出器

Delay line:コンパクトかつ長い腕



レイナー ワイス



Herriott, D. R., and H. J. Schulte,
Appl. Opt. 4, (1965) 883.

2.重力波検出器

1970年代、80年代：欧米、日本に10m前後(高々100m)のプロトタイプ干渉計が作られ、技術開発や雑音低減が行われた。

Ronald Dreverによる**新しい干渉計の方式とその発展**



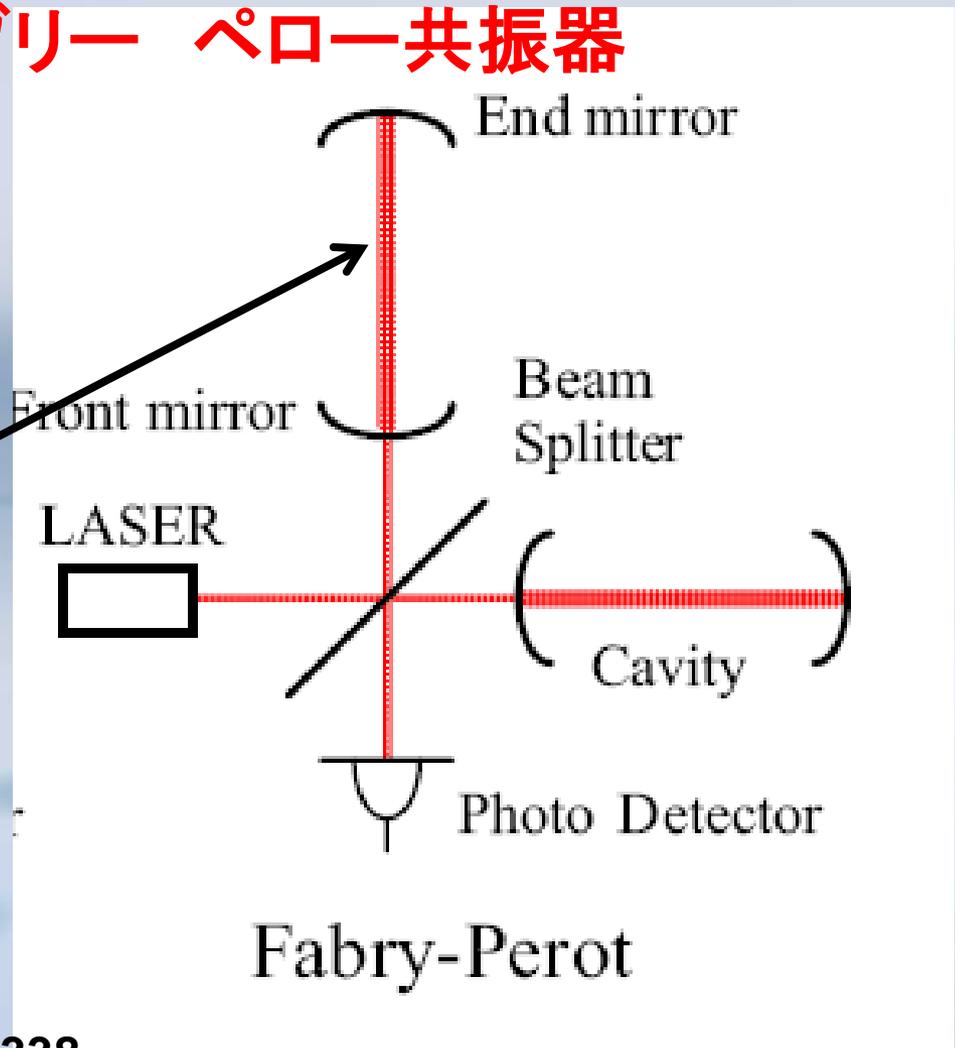
ドレーバーはたくさんアイデアを出していますが一例のみ

2.重力波検出器

ドレーバーのアイデア: **ファブリー ペロー共振器**

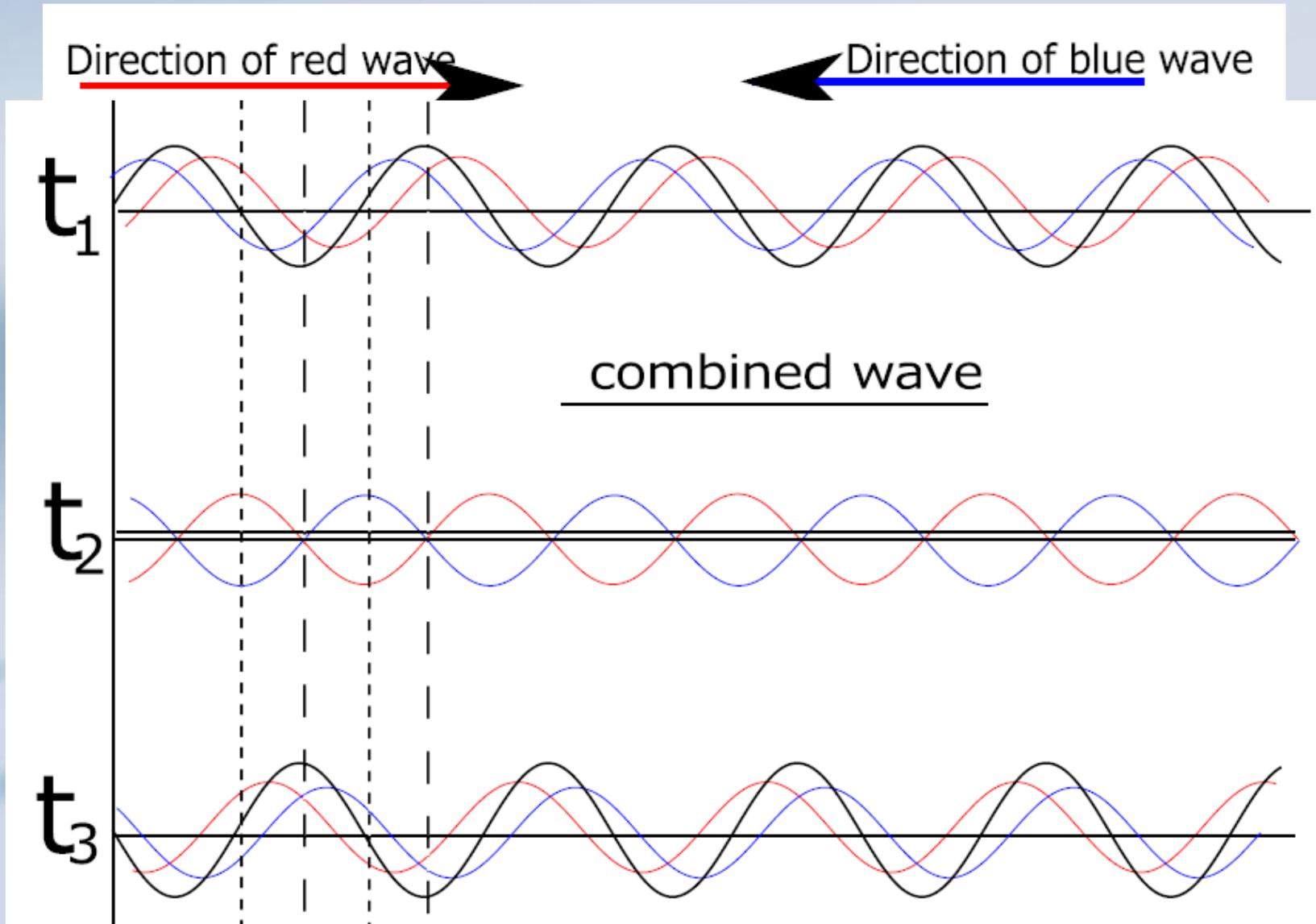


光が**同じところ**を往復して
定在波が出来る。
 現在**すべて**の干渉計型検出
 器が採用



2.重力波検出器

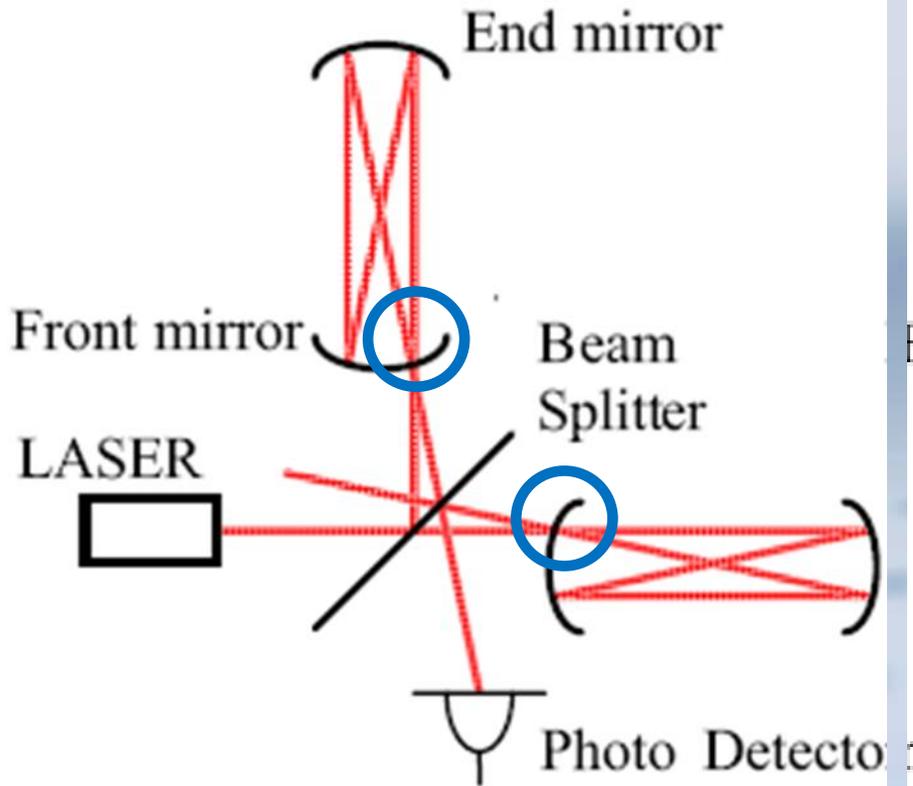
定在波：バイオリンやギターの弦



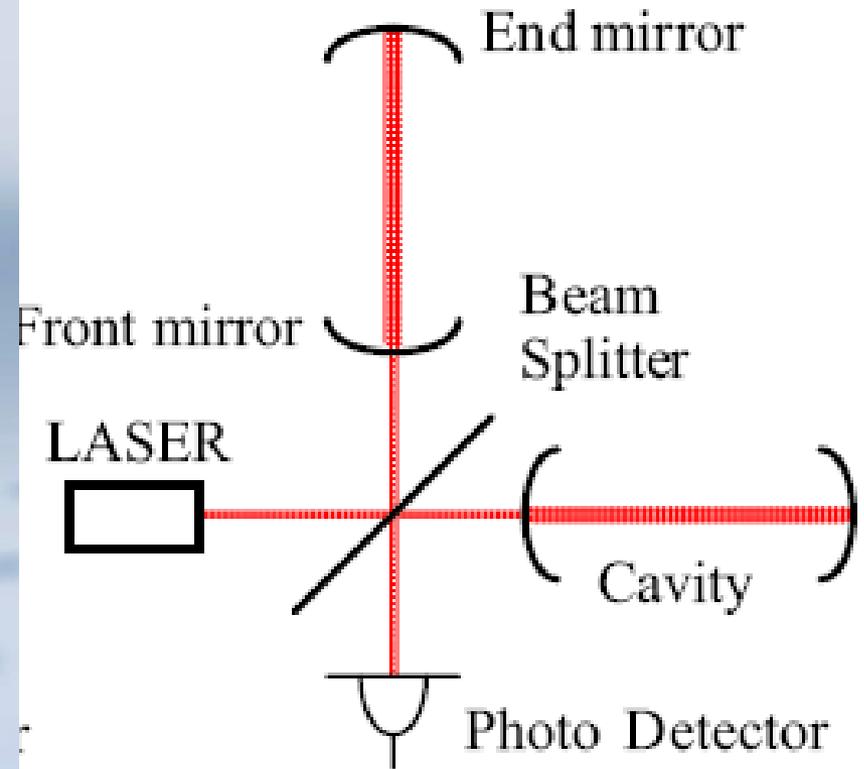
2.重力波検出器

Delay-lineは光を通す穴が必要

Fabry Perotは不必要: 干渉(定在波)の効果



Delay-line



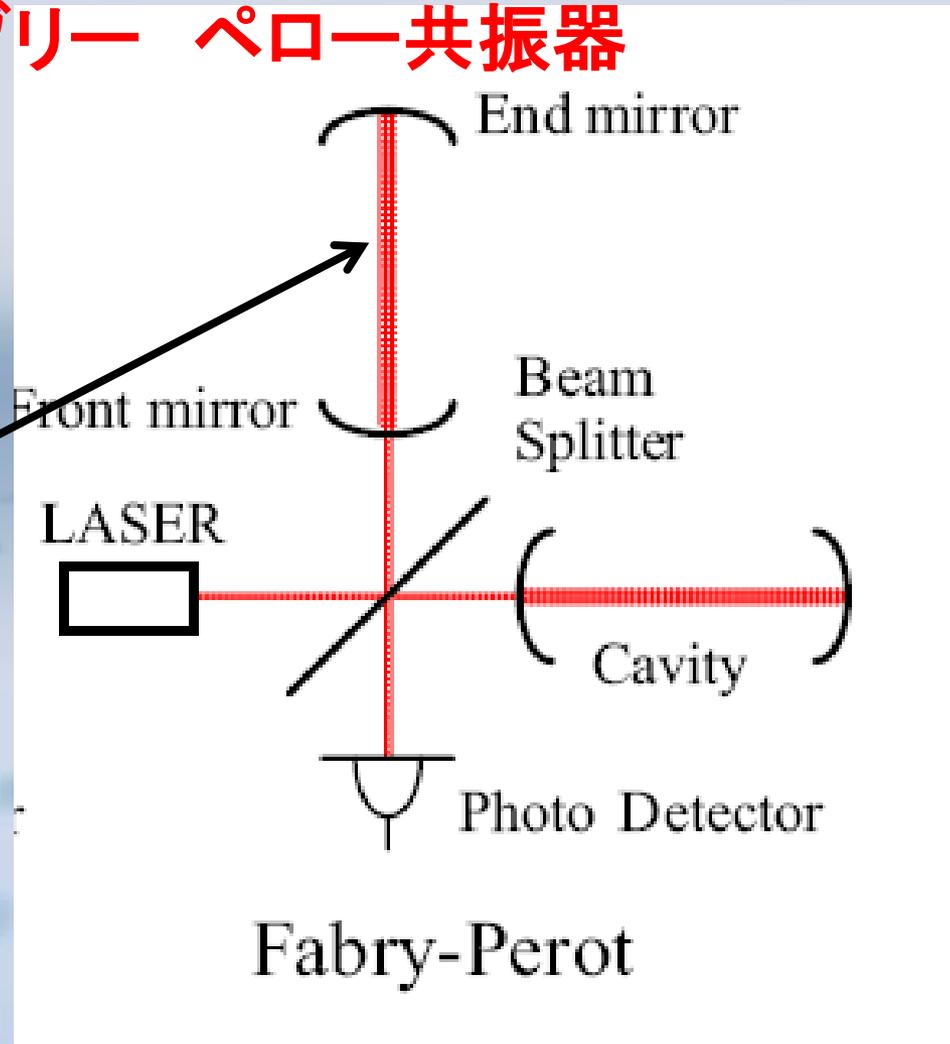
Fabry-Perot

2.重力波検出器

ドレーバーのアイデア: **ファブリー ペロー共振器**



鏡の間の距離を極めて
正確に
(10万分の1mm以下！)
で**制御**する必要あり。
どのように**距離を測る**か？
Pound Drever Hall法



キップ ソーン登場

1940年 ユタ(アメリカ)生まれ

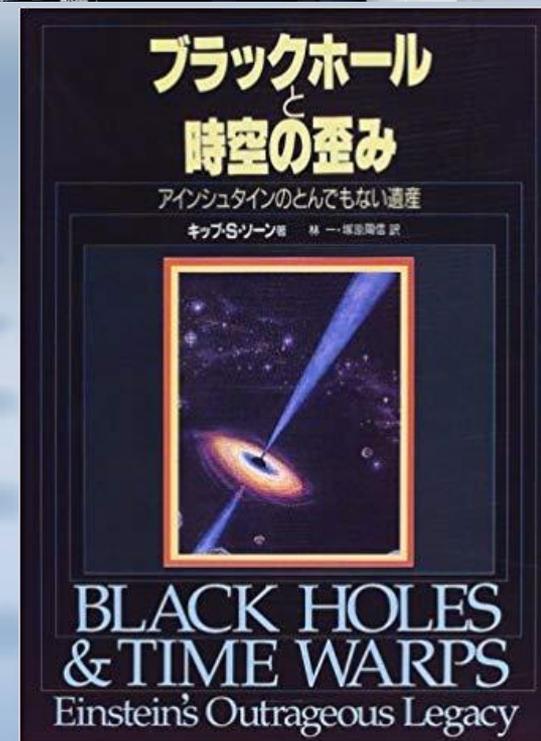


重力波の**理論的研究**
データ解析含む

教科書や啓蒙書の執筆、
映画の監修(Intersteller)....



ホーキングとの賭け



キップ ソーン
白揚社(1997)

キップ ソーン登場

1940年 ユタ(アメリカ)生まれ



重力波の**理論**的研究
データ解析含む

教科書や啓蒙書の執筆、映画の監修(Interstellar)....

1979年:グラスゴー(スコットランド)からDreverを招聘。

1984年:LIGO計画スタート

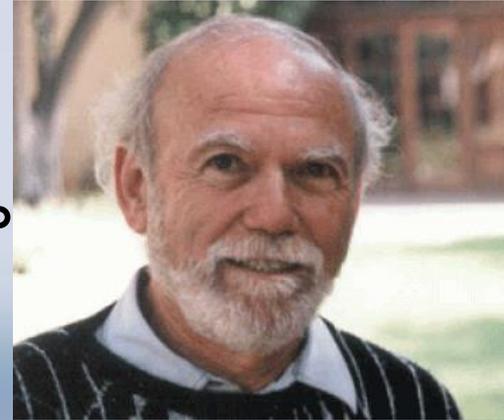
トップはワイス, ドレーバー, ソーンの3人(トロイカ)

->計画は巨大となり、運営はより、むつかしいものに。

Barry C. Barish 登場

1936年 ネブラスカ(アメリカ)生まれ

素粒子実験のいろいろな大型計画に携わる。
Superconducting Super Colliderの
主要メンバーの一人だった
->SSCは打ち切り。

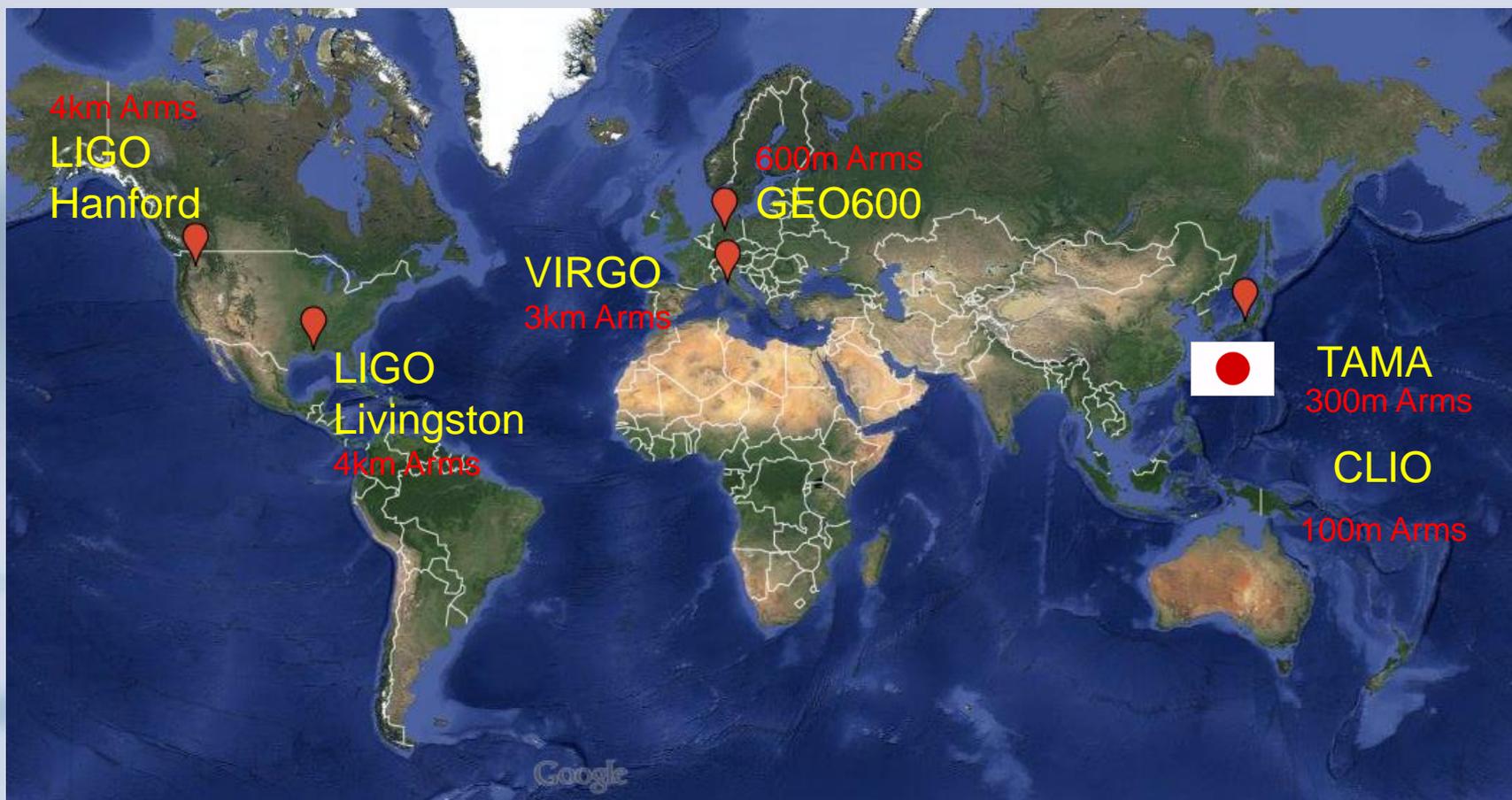


1994年: LIGOを率いることになる(2005年まで)。

International Liner Colliderのメンバーの一人

1990年代から2000年代

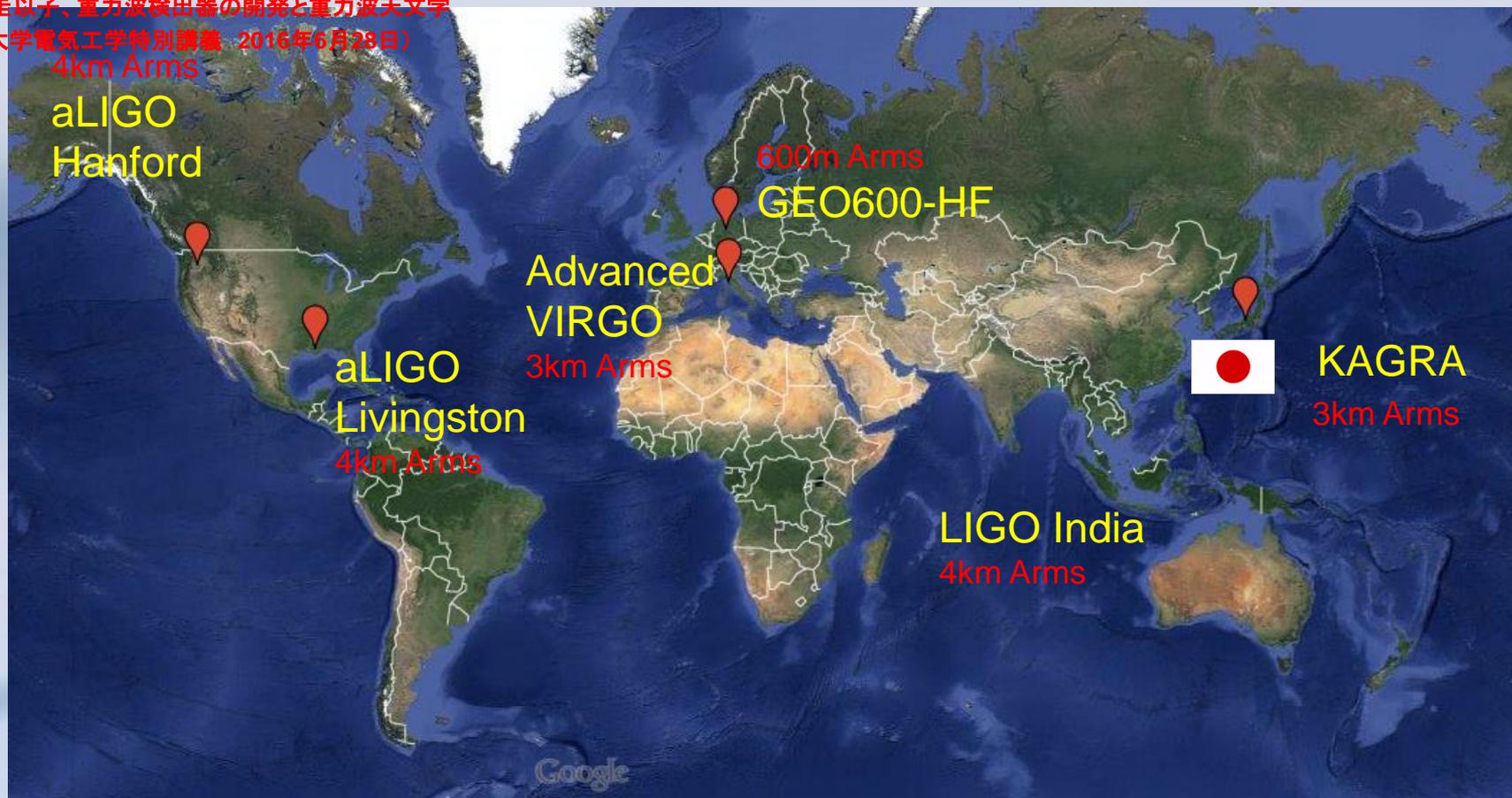
大型干渉計型重力波検出器(第1世代)の建設と観測運転
 感度は検出を期待できるものではない



2010年代

大型干渉計型重力波検出器(第2世代)の建設と観測運転
10倍の感度向上を目指す。**初検出**が成し遂げられた

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)



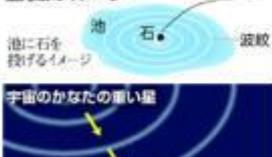
アメリカのLIGOが重力波初観測！

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

重力波を初観測

重力波のイメージ



米研究チーム

朝日新聞

2月12日

号外

アインシュタインの



重力波 未知の窓開く

時時刻刻

重重力波 初観測

一般相対性理論裏付け

米チーム 宇宙の謎に光

同日 賃金法制化へ

円高進行一時

読者新聞 THE YOMERI SHIMBUN

2.12.金

重重力波を初観測

初期宇宙解明に

アインシュタイン

米チーム

北、開城を軍統制下に

韓国資産を凍結

円急騰一時100円台

苦渋の決断

185分のオンライン英語学習アプリ

1,000円

NOVAサブ

苦渋の決断

古書泥棒

幻の東洋五輪

老いない

経済政策

GIS入門

4次元

西村書店

苦渋の決断

重重力波 世界初観測

宇宙の起源に迫

かけうどん235.7円

増税以降は円値上がり

四国新聞

円急騰

本人も貢献

LIGOの論文には18人以上の研究者の名を連ね、日本人は少数ながら、成果には大きく貢献した。成果の力となった大層の感謝にあたり、精度を上げるための機器の統合調整を担当したが、LIGOハンフォード・観測所の副所長、統合チームの副所長、高精度の光検出器、出が極めて安定したレーザー、熱にも振動も起きにくい鏡、地面の振動を遮断する「ピエゾ」をつづり組みあげた。

LIGOの論文には18人以上の研究者の名を連ね、日本人は少数ながら、成果には大きく貢献した。成果の力となった大層の感謝にあたり、精度を上げるための機器の統合調整を担当したが、LIGOハンフォード・観測所の副所長、統合チームの副所長、高精度の光検出器、出が極めて安定したレーザー、熱にも振動も起きにくい鏡、地面の振動を遮断する「ピエゾ」をつづり組みあげた。

LIGOの論文には18人以上の研究者の名を連ね、日本人は少数ながら、成果には大きく貢献した。成果の力となった大層の感謝にあたり、精度を上げるための機器の統合調整を担当したが、LIGOハンフォード・観測所の副所長、統合チームの副所長、高精度の光検出器、出が極めて安定したレーザー、熱にも振動も起きにくい鏡、地面の振動を遮断する「ピエゾ」をつづり組みあげた。

悲しいニュース

重力波検出に貢献

ロナルド・ドレーバー

さん85歳（英物理学者）
英BBC放送（電子版）
によると、7日、英北部
スコットランドのエディ
ンバラで死去。死因は不
明だが、認知症を患って
いたと伝えられている。

1931年、スコット
ランド生まれ。「重力波」
の検出に世界で初めて成
功した国際実験チーム
「LIGO（ライゴ）」
の創設者の一人。米団
体が顕著な科学研究に贈
る「ブレイクスルー賞」な
どを受賞した。【共同】



Ronald Drever

毎日新聞 2017/3/10

悲しいニュース



ノーベル財団のwebの 一般向けの解説

While Rainer Weiss was developing his detectors at MIT in Cambridge, outside Boston, Kip Thorne also started working with Ronald Drever, who built his first prototypes in Glasgow, Scotland. Drever eventually moved to join Thorne at Caltech in Los Angeles. Together, Weiss, Thorne and

Drever formed a trio that pioneered development for many years. Drever ultimately ended up outside the project's primary path, but he was able to experience its first discovery before passing away at home in Scotland in March 2017.

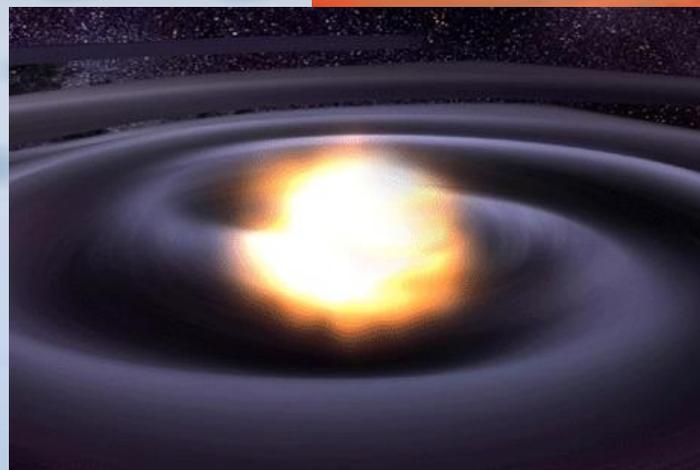
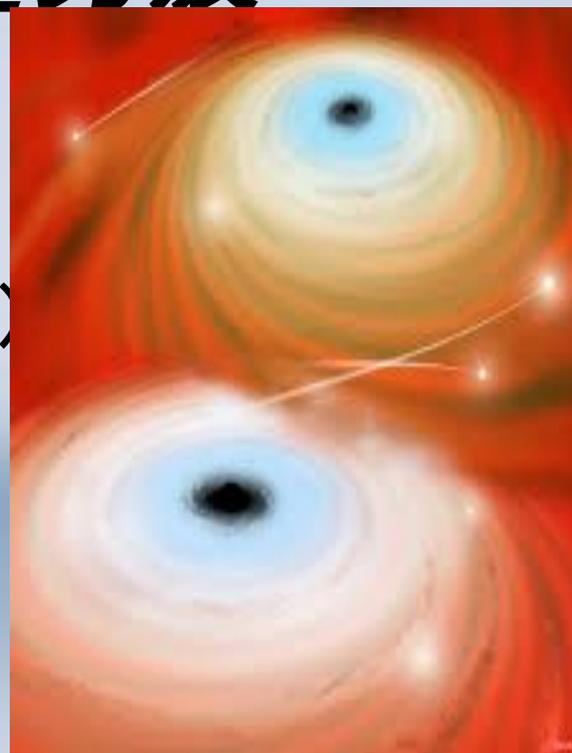
3. 検出された重力波

2020年7月現在:

重い2つの天体の合体からの重力波を
70回弱検出 (LIGOとVirgoとの共同観測)

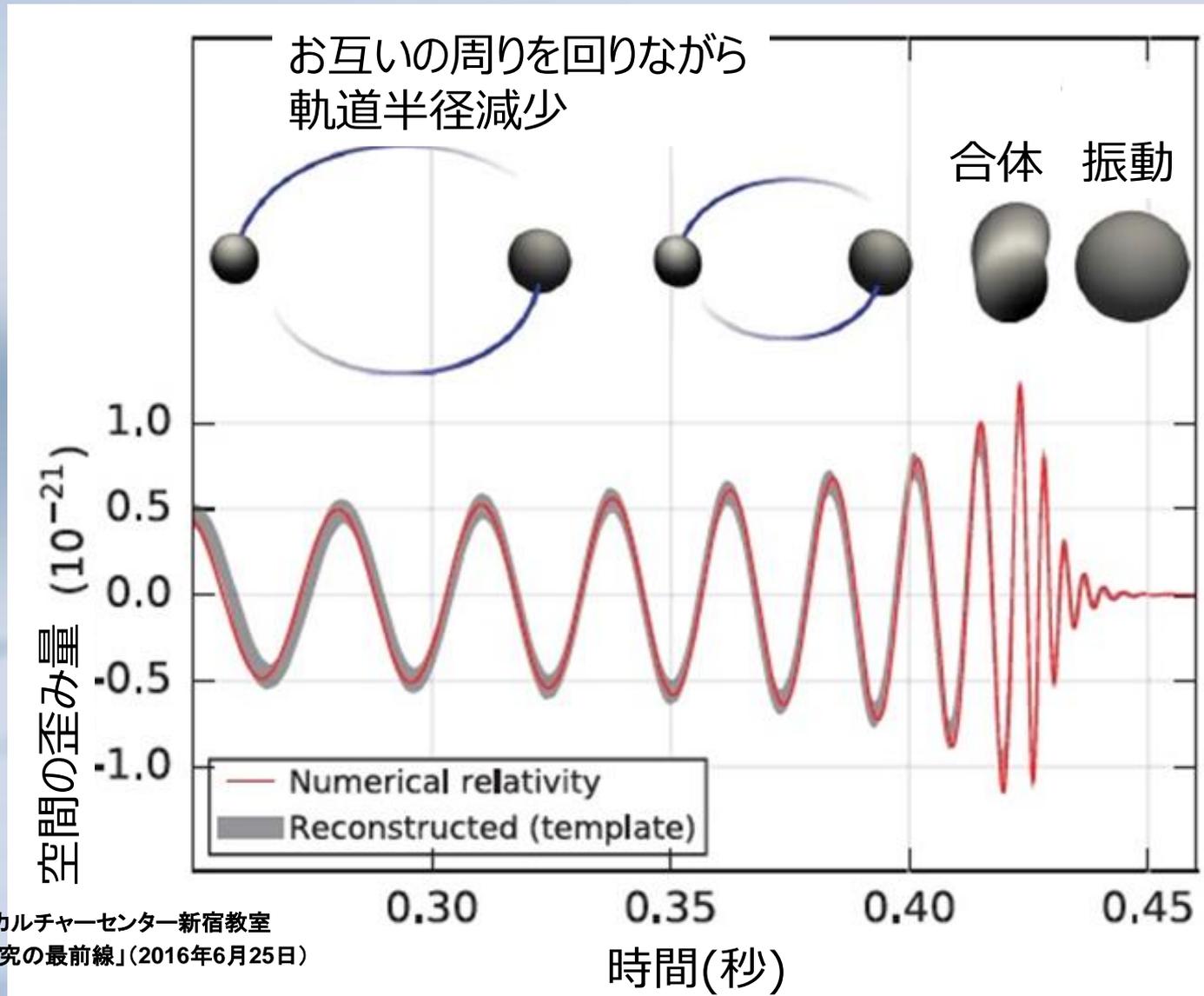
重い星: **ブラックホール**と**中性子星**
いずれも太陽よりずっと重い恒星が
最後に爆発(超新星)したあとの残骸。

ブラックホール: 時空の穴
中性子星: 高密度(およそ
 $10^{13}\text{g}/\text{cm}^3$ で半径は10km)
な天体



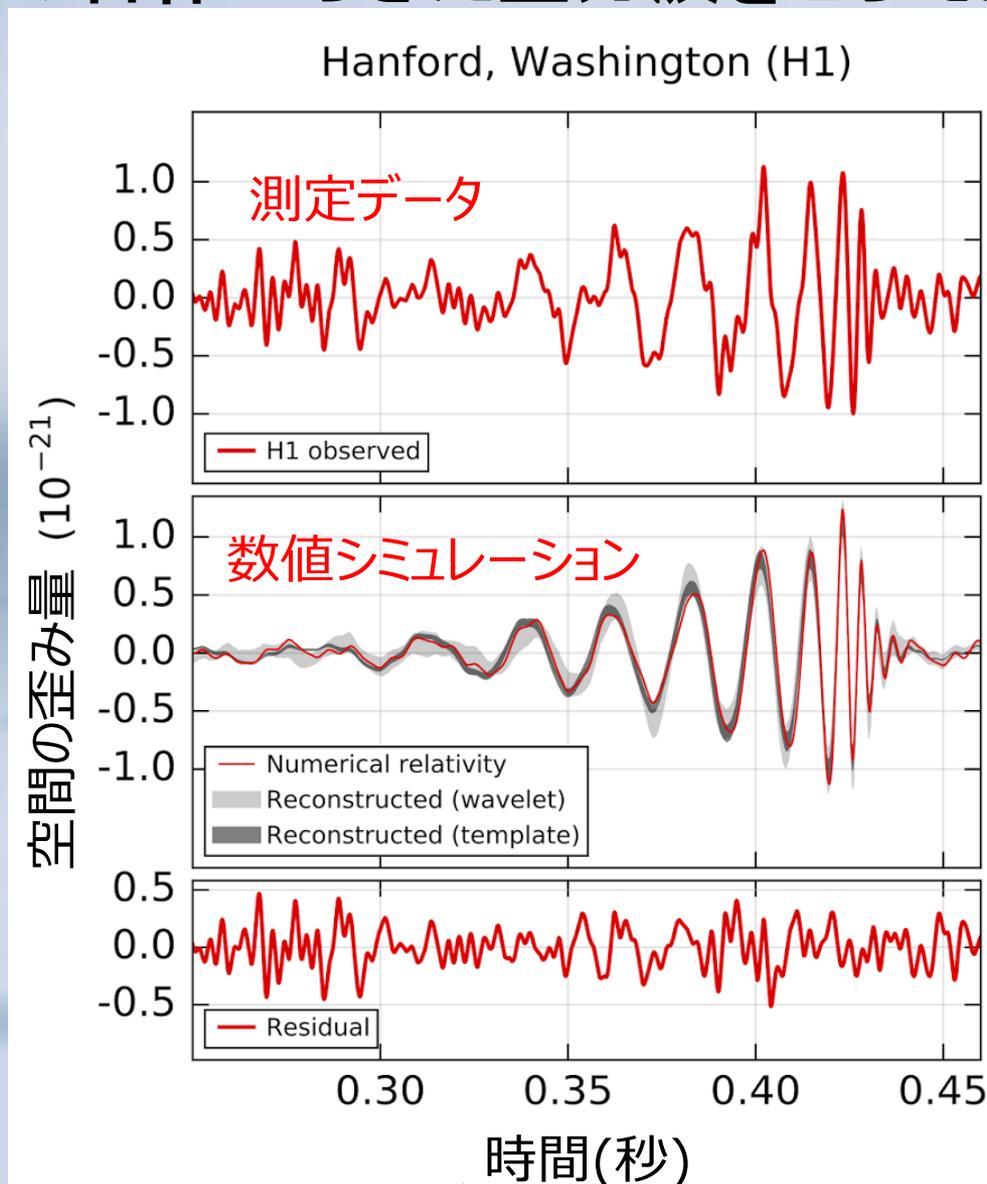
3. 検出された重力波

ブラックホールの合体からきた重力波をとらえた！



3. 検出された重力波

ブラックホールの合体からきた重力波をとらえた！



3. 検出された重力波

© 2016 LIGO Scientific Collaboration

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)

ブラックホールの合体からきた
重力波をとらえた!

3. 検出された重力波

ブラックホールとは？

一般相対性理論から導出：**光さえ抜け出せない時空の穴**

地上でボールを上に打ち上げることを考える。
最初は上がっていくが重力のために下に落ちる。
打ち上げる速さを大きくするとより高いところに到達できる。
地球上では秒速11キロメートル以上で打ち上げると地球から脱出できる。

重力の大きい(それ自身が重い)星では脱出のためにより**大きい速さ**が必要。

3. 検出された重力波

ブラックホールとは？

一般相対性理論から導出：**光さえ抜け出せない時空の穴**

重力の大きい（それ自身が重い）星では脱出のためにより**大きい速さ**が必要。

星があまりに重いと**光でさえ脱出できなくなる**。

->ブラックホール

ブラックホールは**時空の穴**：硬い表面があるわけでない。通常の星のように物質からできていない。

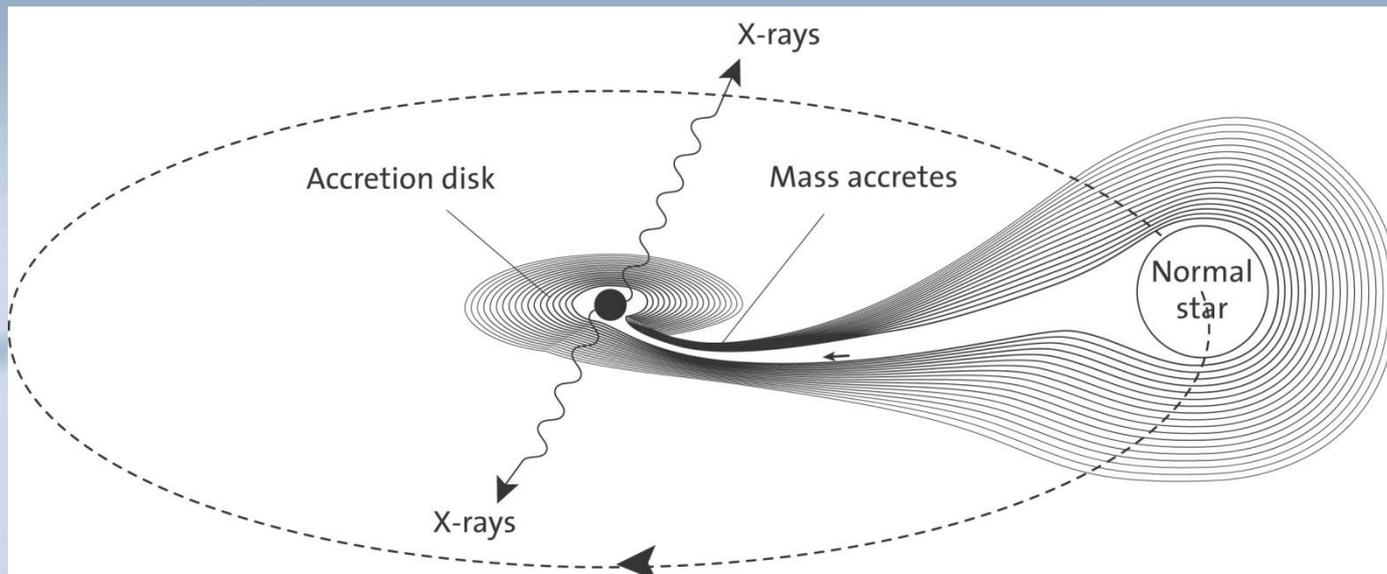
3. 検出された重力波

ブラックホールとは？

一般相対性理論から導出：**光さえ抜け出せない時空の穴**

どうやって**観測することができるのか**

一例として物が吸い込まれるとき出るX線が出る



3. 検出された重力波

ブラックホールとは？

一般相対性理論から導出：**光さえ抜け出せない時空の穴**

どうやって**観測することができるのか**

まわりに物質があるとそれがブラックホールの影響受けるので物質を**観測**することでブラックホールを見ることができる。

->**まわりに物質がなかったら、見る**ことができない

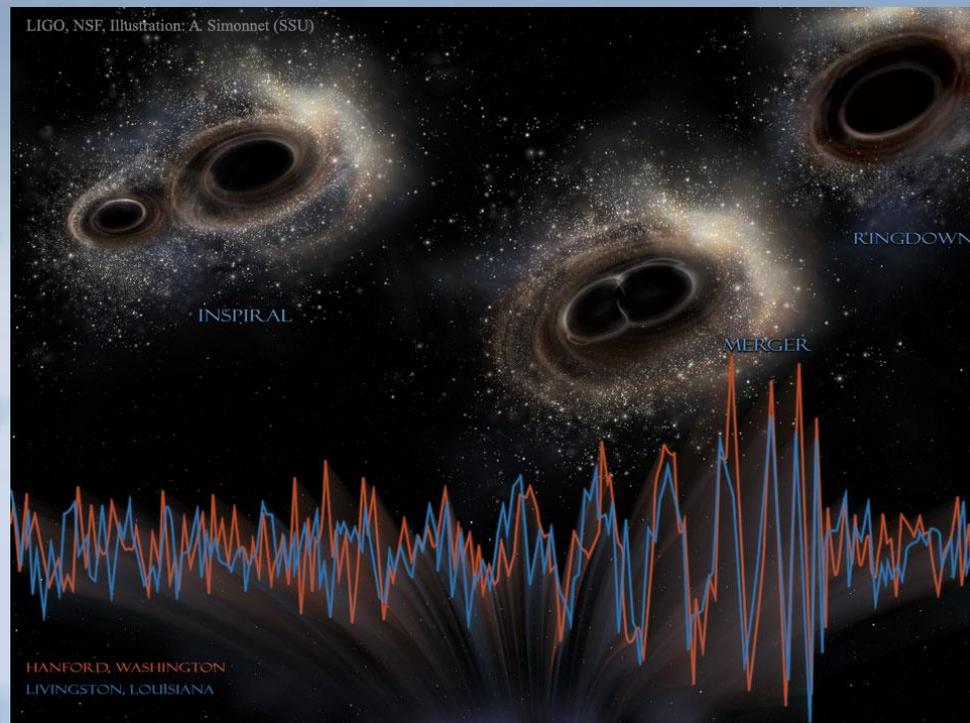
->今回は2つのブラックホールのみなので何も出ない。**重力波を除いては。**

3. 検出された重力波

重力波形からわかったこと

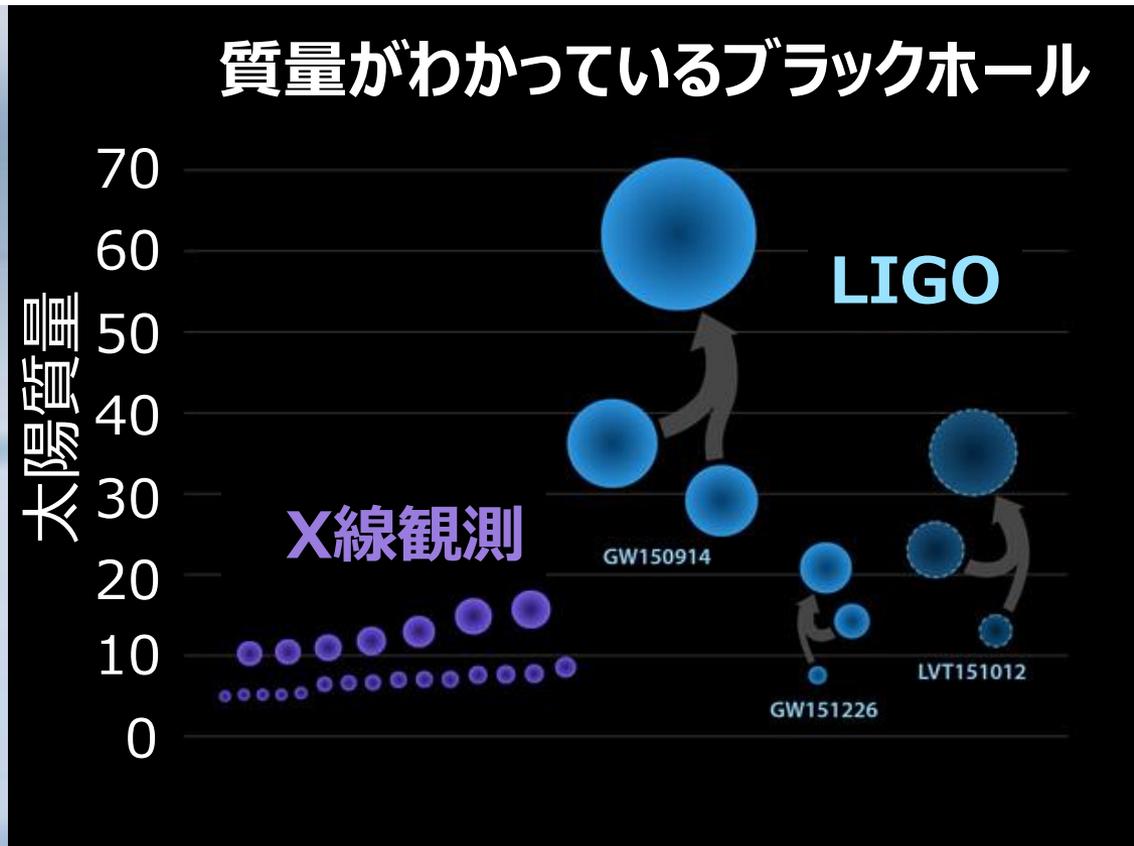
- ブラックホール連星が存在する：**重力波でなければ見えない**ため今まで確認がなかった。

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. 検出された重力波

- これまでX線の観測で見つかっ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?**



4.重力波検出器の将来

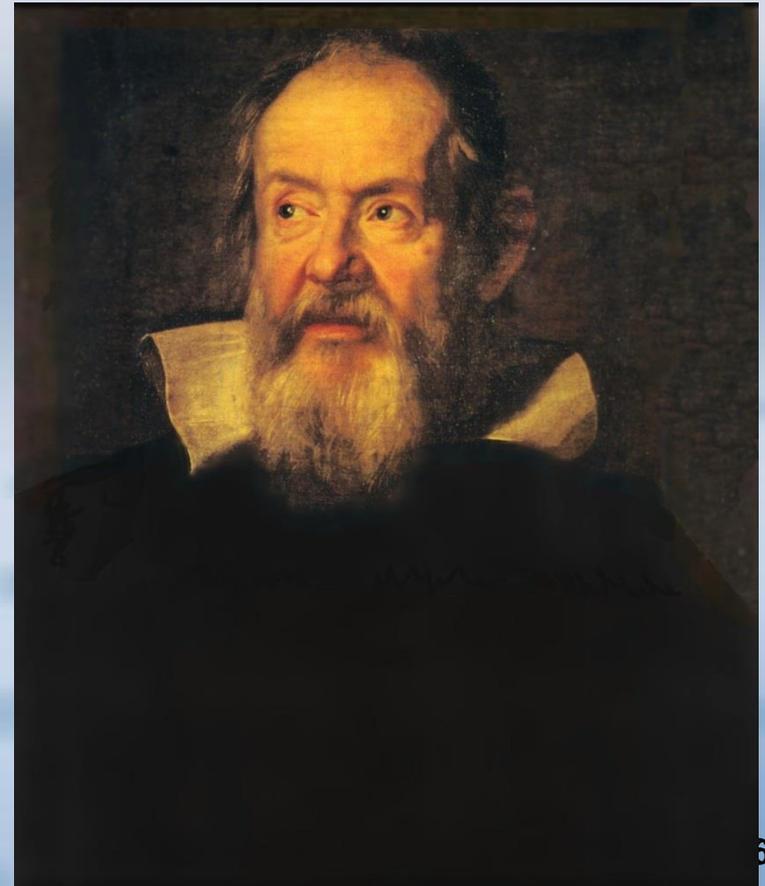
100年越しの宿題が解決してすべてめでたしめでたしか
(もうなにもすることはない?)

光学望遠鏡の例

ガリレオ ガリレイの観測は
人類の天文的な知識を完全に
塗り替えた。

...が、これで**終わりではない**。
光学望遠鏡は長足の進歩を
遂げた

ガリレオ ガリレイ (ウィキペディア 日本語版)



4.重力波検出器の将来

たとえば すばる望遠鏡

規模も性能もガリレオのものとは**桁違い**



4.重力波検出器の将来

なぜすばる望遠鏡は大きいのか？



- (1)より**遠い**(暗い)星を見る
- (2)**方向**をより**精度よく**決める

重力波検出器も同じ方針

4.重力波検出器の将来

より**遠く**まで見る:より多く、より昔を見る。

より小さい重力波を見なければならない
より**雑音が小さい**重力波検出器が必要

雑音が小さいと正確に重力波の波形がわかる。

->それが重要な意味をもつことがある。

->**マス ギャップの発見**

4.重力波検出器の将来

マス ギャップの発見

2019年8月14日の観測

太陽質量の23倍と**2.6倍**の星の合体からの重力波

重い方は確実にブラックホール

軽い方は？

中性子星には最大質量がある(それを越えるとブラックホールになる)。その最大質量は太陽質量の2倍から3倍の間であることは确实だが、それ以上のことはわかっていない。

軽い方が中性子星なら今までで一番重い。逆にブラックホールなら今までで一番軽い。->**中性子星とブラックホールの境界に一番近い。**

4.重力波検出器の将来

マス ギャップの発見

2019年8月14日の観測

太陽質量の23倍と**2.6倍**の星の合体からの重力波

重い方は確実にブラックホール

軽い方は？

ブラックホールなのか、中性子星なのか？

->ブラックホールの可能性が高いが断言はできない。

衝突した瞬間の重力波をきちんと捉えることで区別できる。

瞬間的な重力波なので雑音が小さい検出器が必要。

4.重力波検出器の将来

より**遠く**までみる:より**雑音が小さい**検出器



第1世代: 検出できず

第2世代: 初検出!
目標感度目指して開発を進めている

第3世代: 本格的な重力波天文学が開く

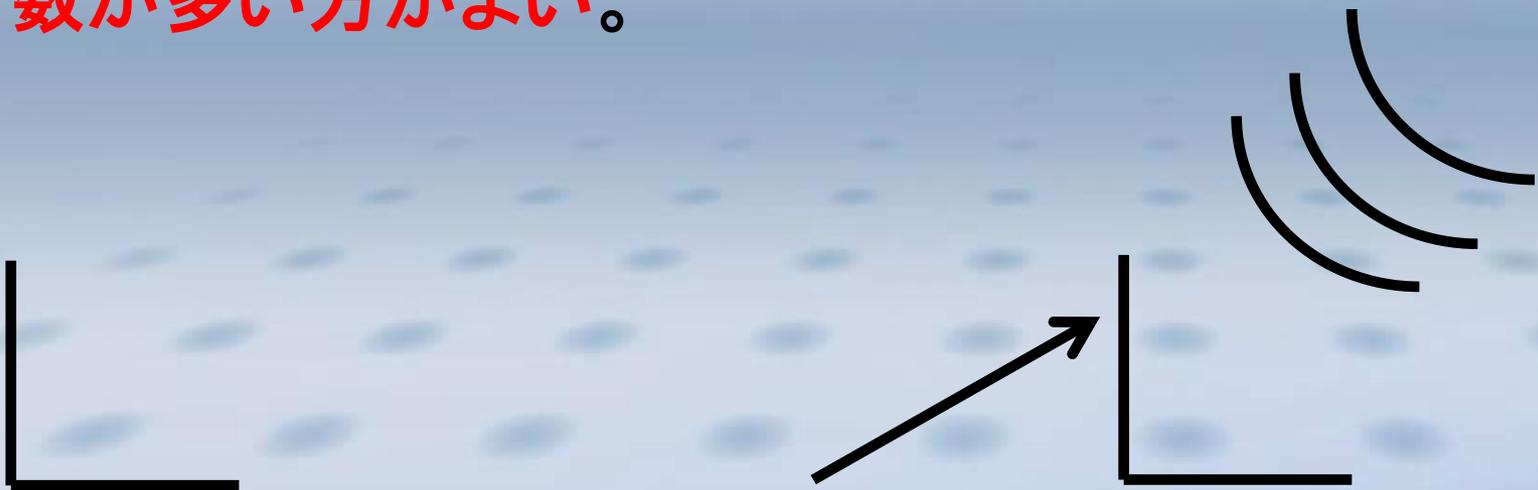
4.重力波検出器の将来

より精度よく**方向**をきめる

1台の検出器だけでは重力波が来た方向をきめるのは**不可能**(重力波は地球を貫ける)。

複数台あると**到達時間の差**から方角がわかる。

台数が多い方がよい。

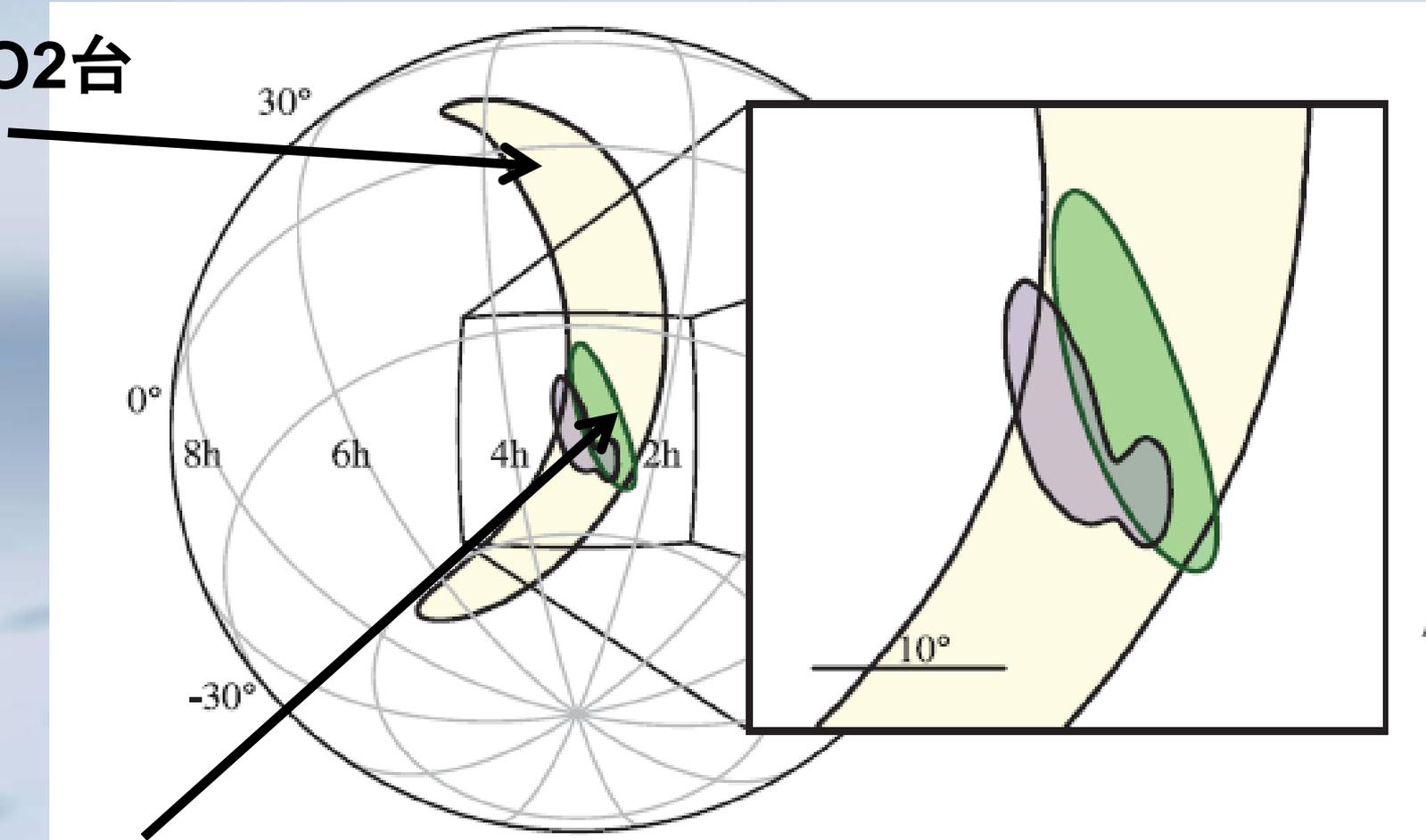


こちらの検出が早く重力波を捉えた
なら右側から来たことがわかる。

4.重力波検出器の将来

LIGO2台とVirgo1台(GW170814)

LIGO2台



LIGO2台とVirgo1台

Physical Review Letters 119 (2017) 141101

4.重力波検出器の将来

複数台あることの利点

現在LIGO, Virgoは観測していない。装置の改良を行っているはず(コロナの影響でスケジュールは流動的)。片方のみ運転しても意義が薄れるため同時に改良中(ライバルであり協力相手)。

->さらに検出器があると交互に改良期間をおいてすくなくとも3台が**常時**観測できるようになる。

->**KAGRA**が第2世代の**4台目**となるべく開発中。次のLIGO-Virgoとの共同観測に参加(2021? 2022?)

4.重力波検出器の将来

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)

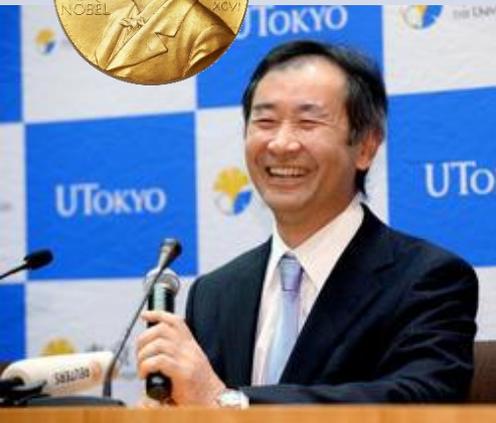


重力波検出器ネットワーク(第2世代)



4.重力波検出器の将来

KAGRA



プロジェクト代表:
梶田隆章

岐阜県の
神岡鉦山内に
建設

3kmの腕



4.重力波検出器の将来

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)

->鉱山の入口の地面振動はそこまで小さくない。地下であることが重要

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。

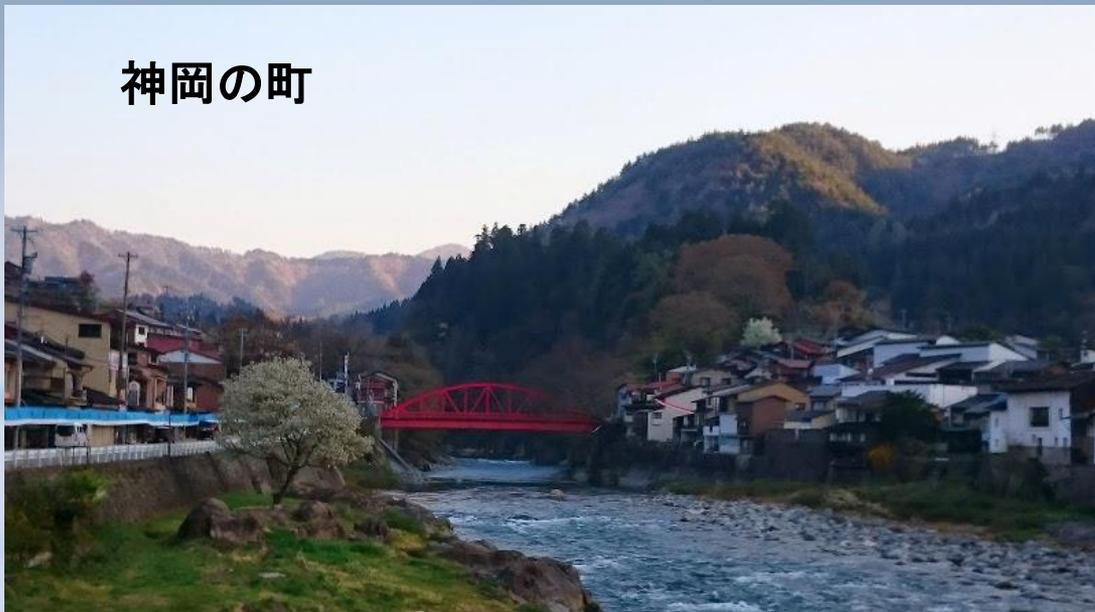
いずれも**将来の性能向上に不可欠**。

神岡の風景



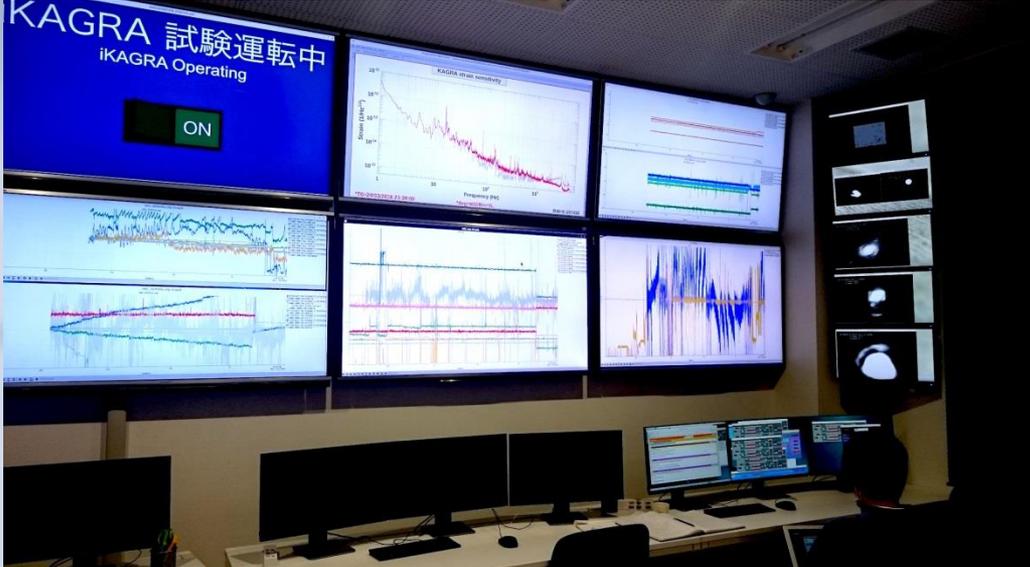
重力波オフィスの近く（茂住）

神岡の町



冬のオフィス

KAGRA風景



マイケルソン部分

トンネル入り口

重力波オフィスのコントロールルーム
(KAGRAの脳みそ)

4.重力波検出器の将来

KAGRA
3kmの
ダクト



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)



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 電動自転車

KAGRAの特徴

地下サイト

Y arm



X arm



低温ミラー



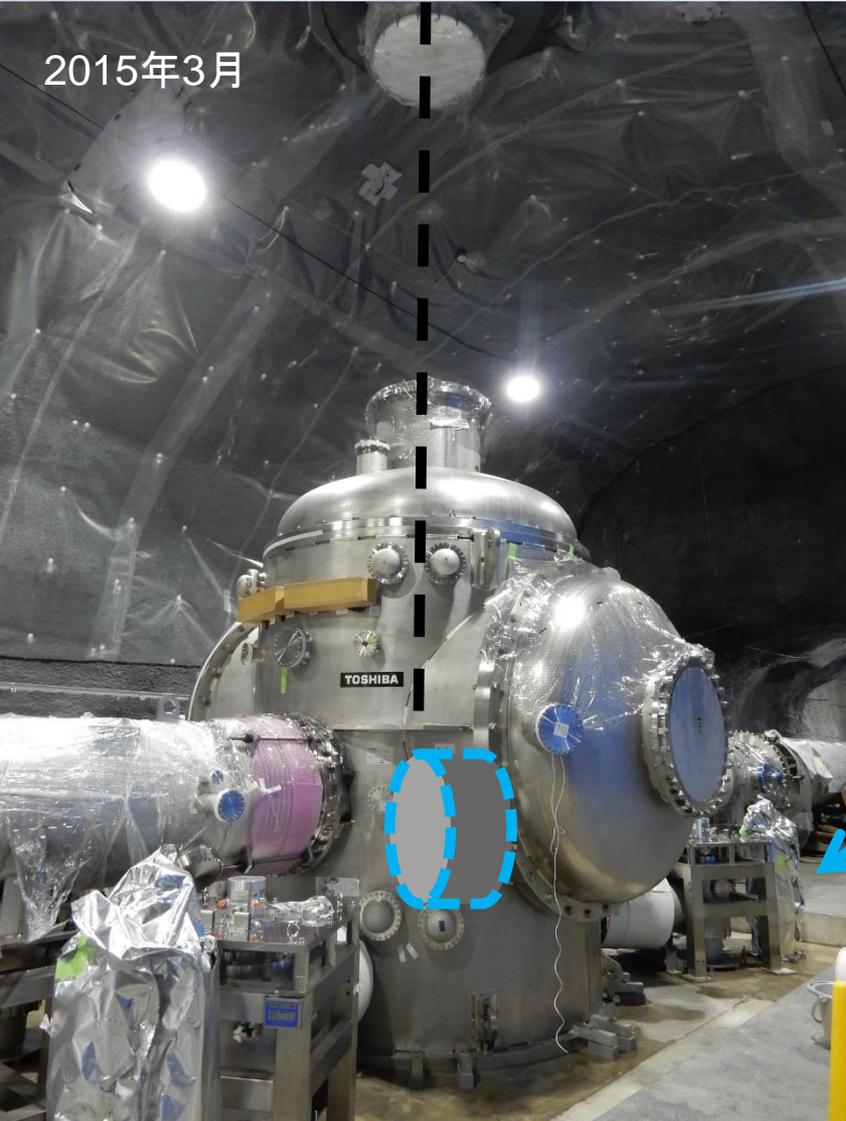
鏡の冷却装置 (クライオスタット)



KAGRAの低温装置

- **低振動の冷凍機を開発**

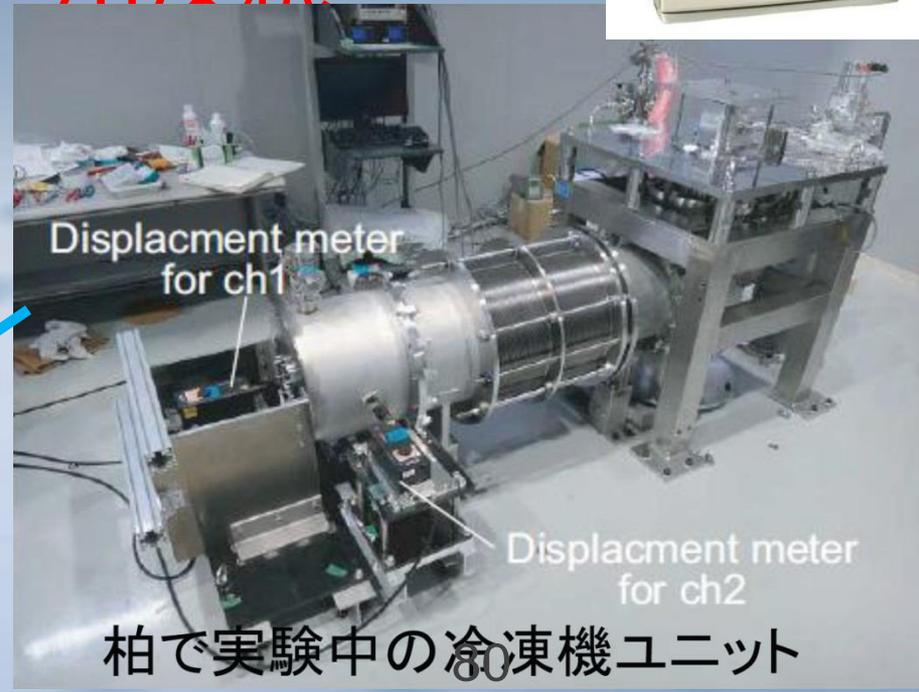
2015年3月



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



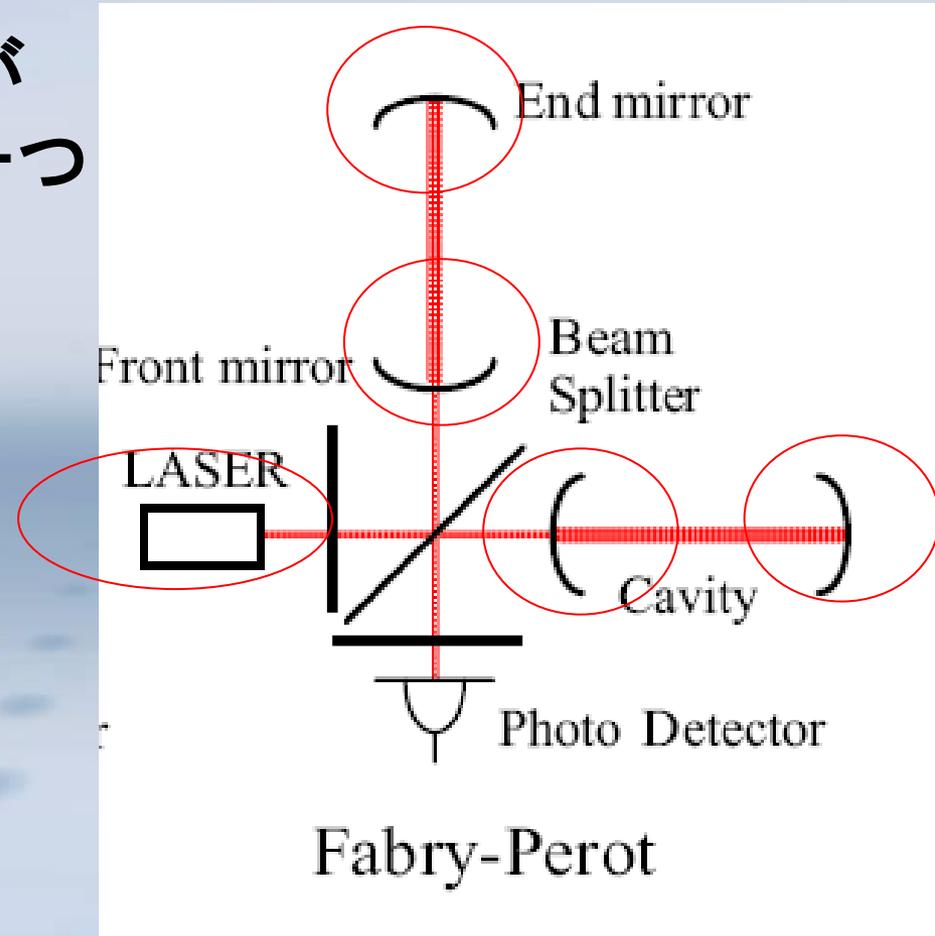
柏で実験中の冷凍機ユニット

5. 富山大学の貢献

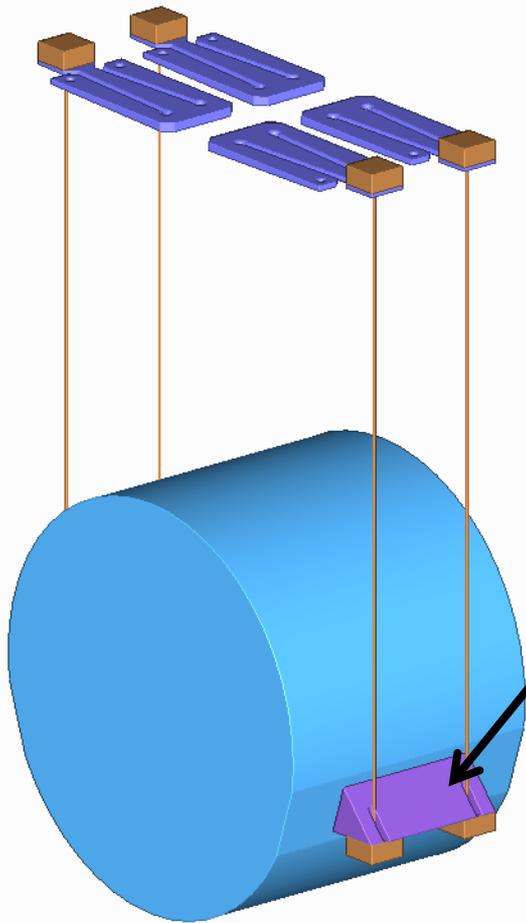
KAGRAには多くの研究機関が参加しており富山大学もその一つ

富山大学で行っていること

レーザー関係の開発
鏡の設置の準備



5. 富山大学の貢献



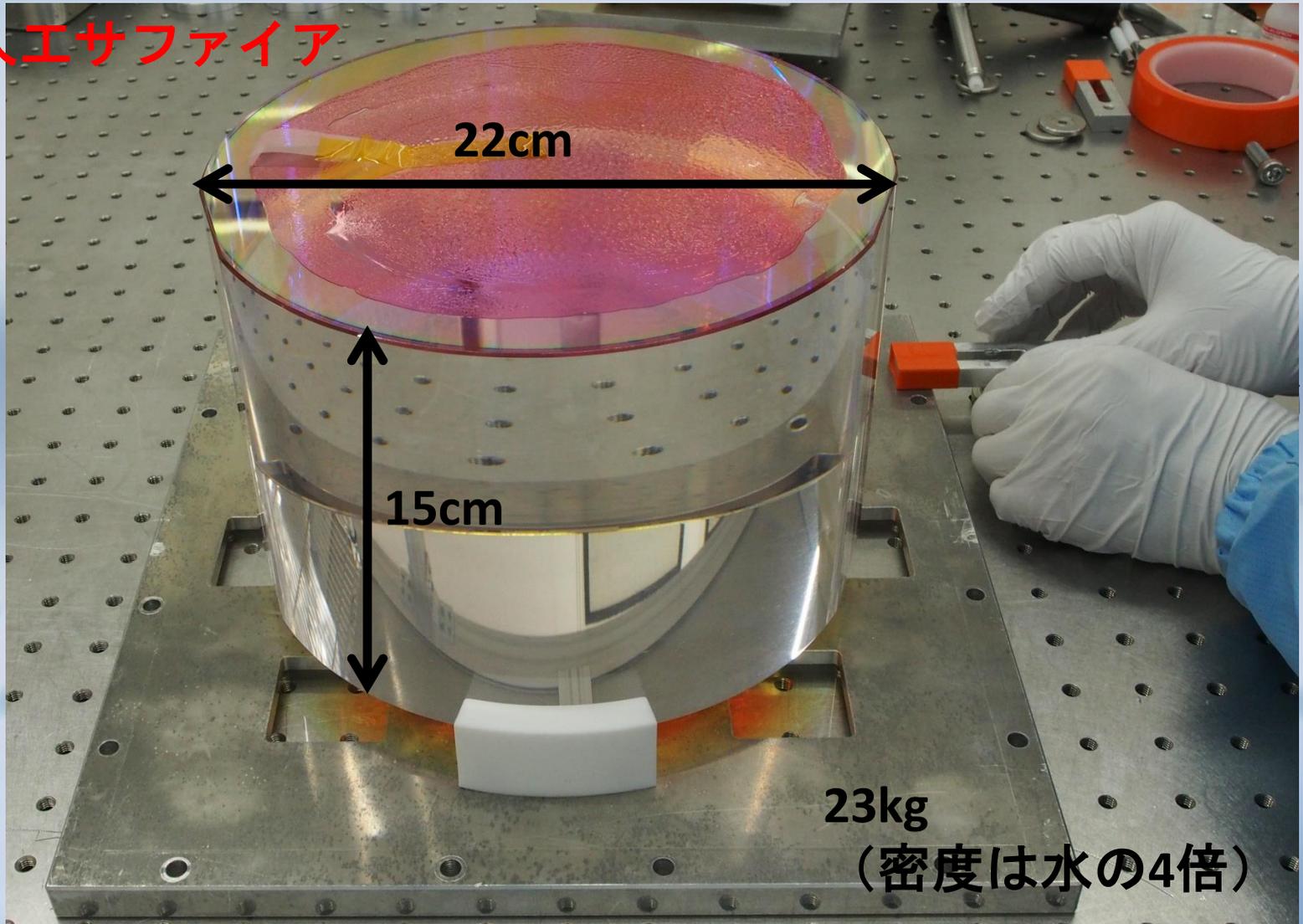
サファイアの鏡をサファイアの
ファイバで吊るす
重力波を一番最初の感じる部品

吊るすためには耳という部品を貼り
付ける必要がある。

この貼り付けを富山大学クリーン
ルーム(多目的ホール下)で行った。

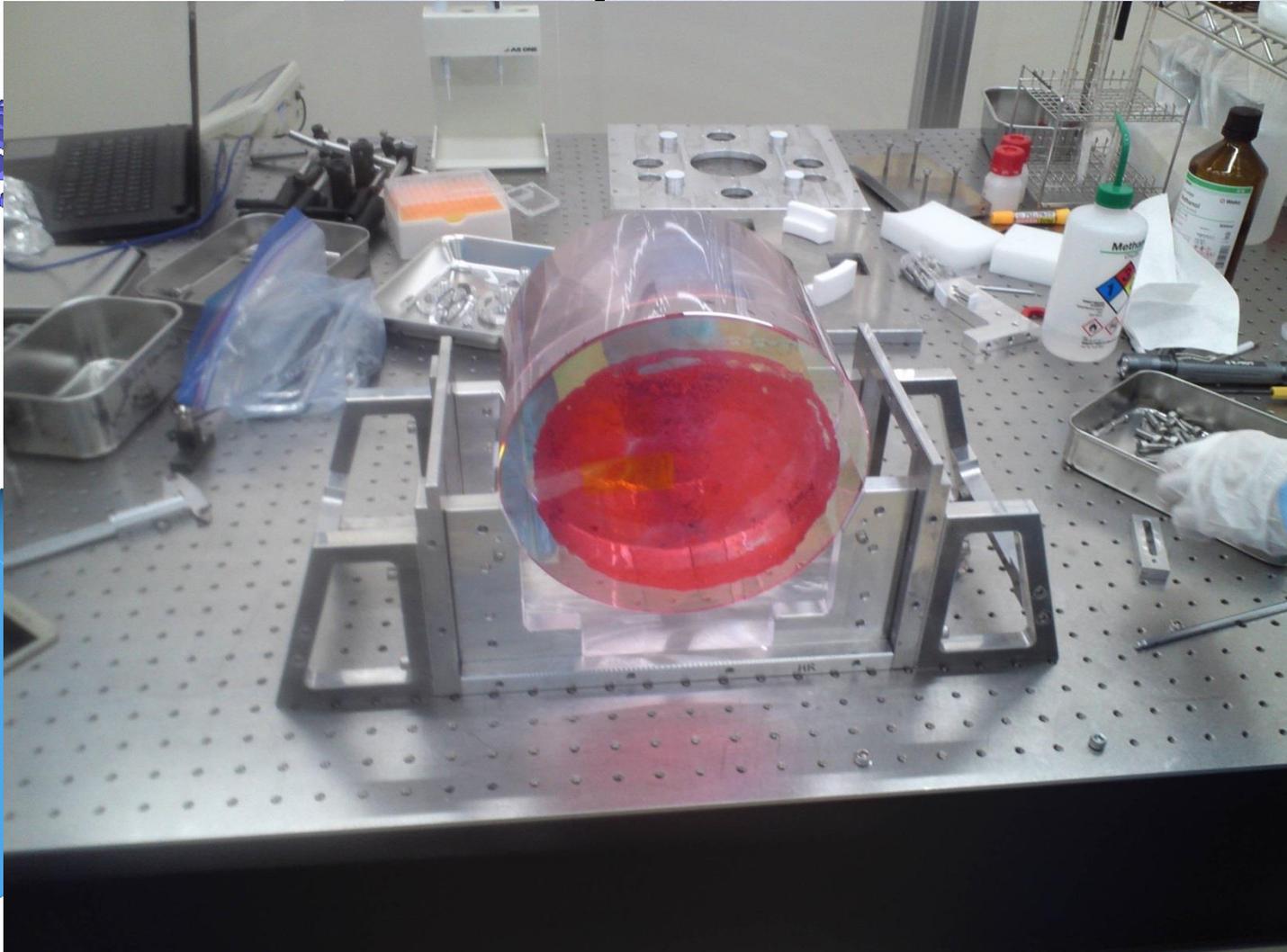
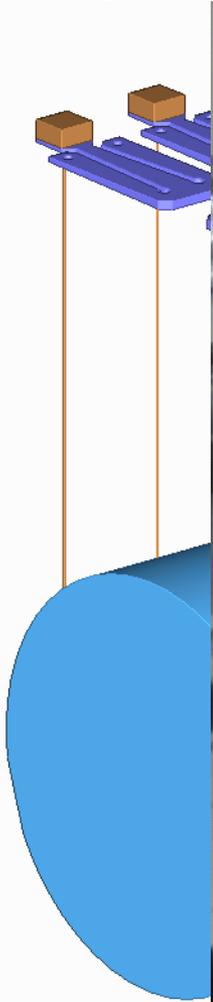
5. 富山大学の貢献

単結晶人工サファイア



5. 富山大学の貢献

Cooled mirror and its suspension

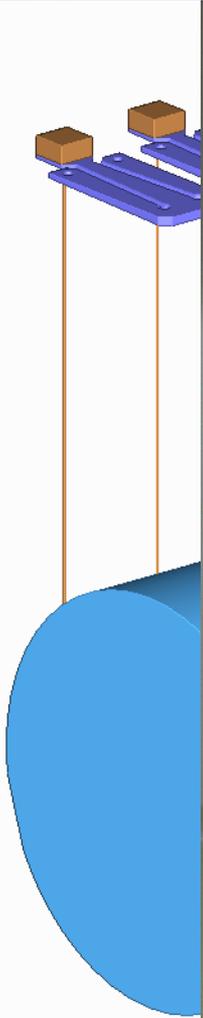


ise

貼り

って
る)。

5. 富山大学の貢献



貼り

ン
って
る)。

5. 富山大学の貢献

KAGRAの国際会議

院生へのポスター賞：ここ最近は富山大学と東京大学で2分。

富山大学の院生、学生はKAGRAに貢献している。

6. 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。実際に他の手段では観測できないブラックホール連星を発見した。

さらなる**性能向上**と**LIGO以外の検出器が必要**。

日本では岐阜県飛騨市神岡町に**KAGRAを建設**。次のLIGO-Virgoの共同観測に参加するため、改良調整を急ピッチで進めている。

富山大学も貢献。皆さんもぜひ参加を!

興味を持った人は....

安東正樹、重力波とはなにか、講談社ブルーバックス、2016年

川村静児、重力波とは何か、幻冬舎新書、2016年

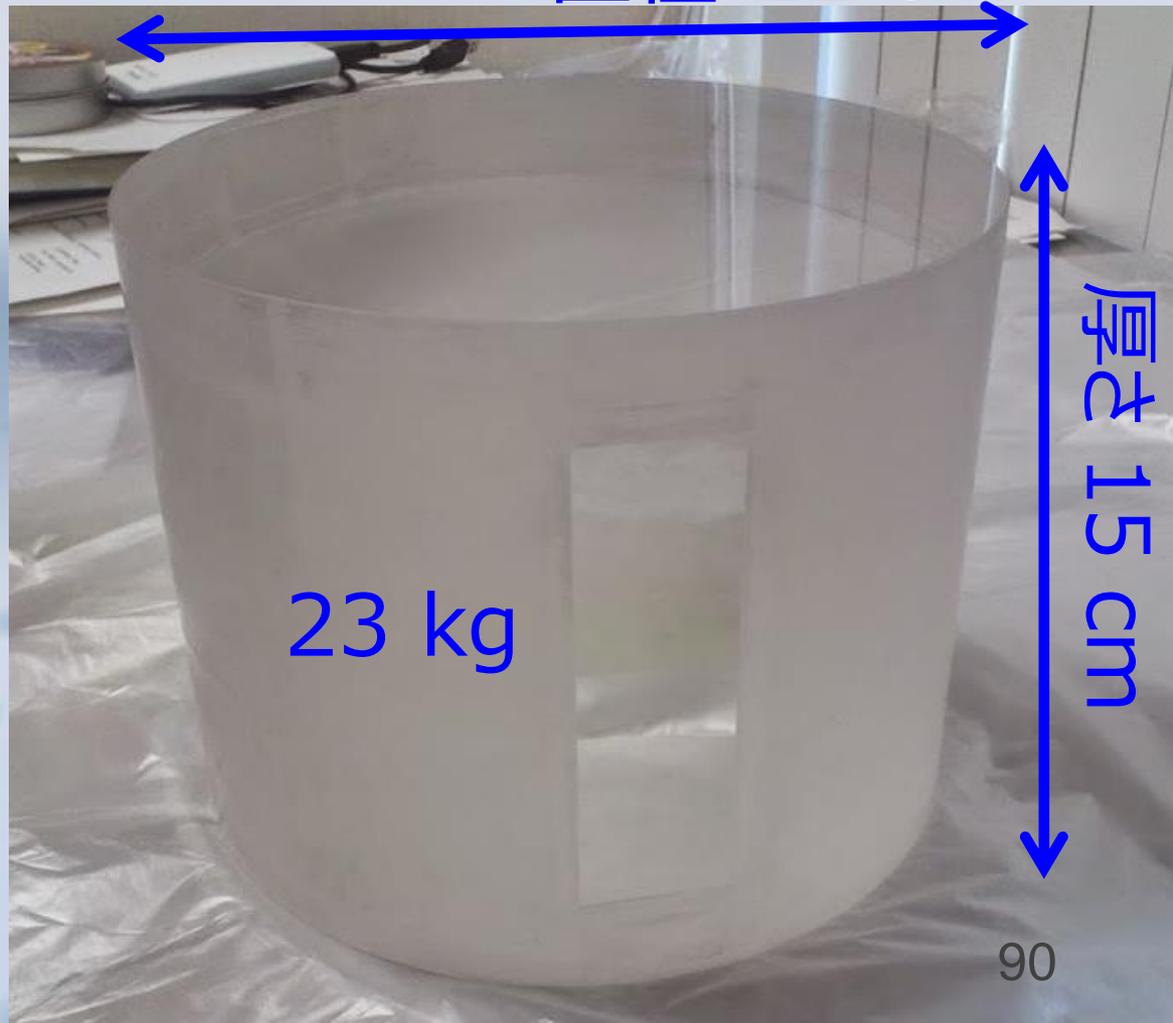
川村静児、重力波物理の最前線、共立出版、2018年

クリフォード・M・フィル(松田卓也、二間瀬敏史訳)、
アインシュタインは正しかったのか?、TBSブリタニカ、1989年

おわり

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



直径 22 cm

厚さ 15 cm

23 kg

90

 を専攻したいとまだ決めなくてよいと思いますが....

理系の授業、講義の内容をきちんと理解することは大事。
無味乾燥に見えるかもしれませんが(スポーツでいう基礎体力)。
汎用性が高いので理系のどの分野にいても必要。

今日の講義をもっと理解するために必要なことは高校の物理の授業でも出てくる。

波動、ニュートン力学、ニュートン重力、ケプラー運動....

大学の物理の講義でも出てくる

特殊相対論(大学1,2年)、一般相対論(大学4年、大学院)

物理学実験

数学も必要

KAGRA 兎も自分の手を動かしてみる。

一般的な話を聞いて理解したつもりでも具体的に考えるとあれということが多い。

英語

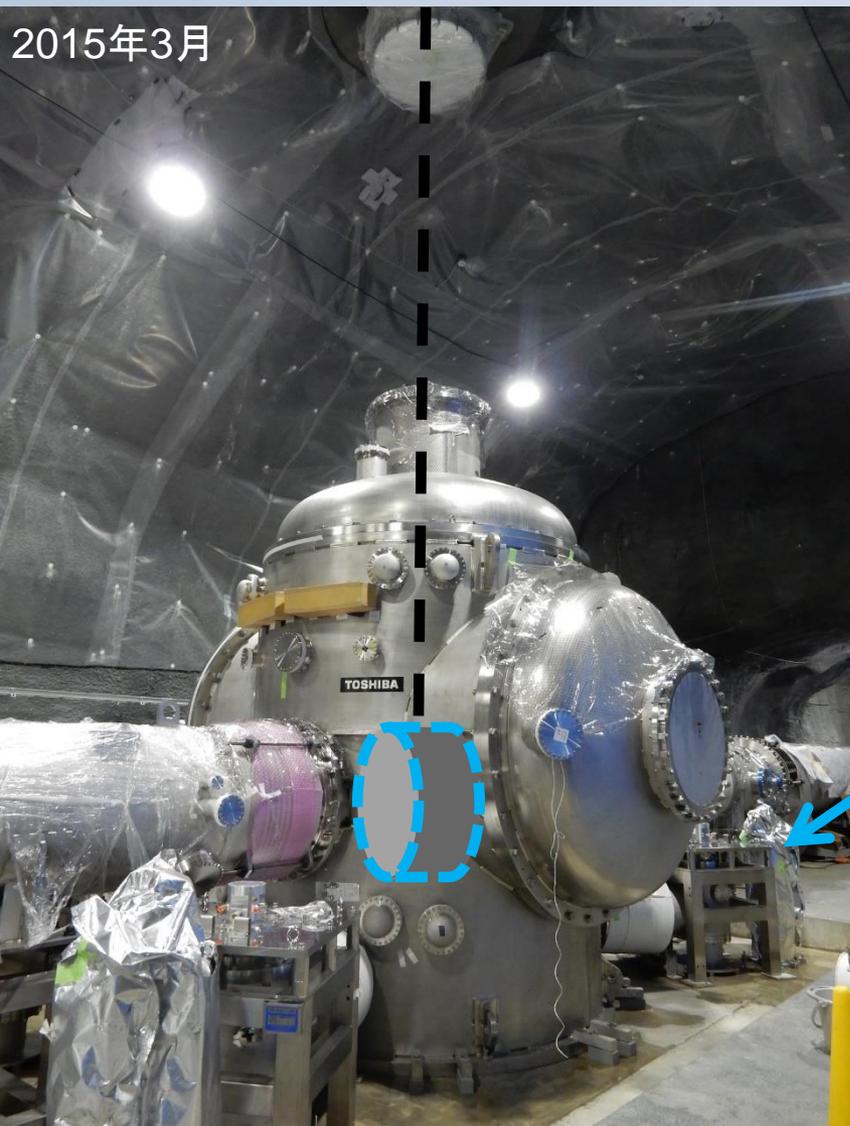
日本人は英語が苦手。逆に話せればアドバンテージ。
大学によっては短期留学(1ヶ月)が可能なので参加。
自分から話しかければ半分はわかる。

国語

論理的な文章(論文、レポート)を書く訓練は意外となされていない。
木下是夫、理科系の作文技術、中公新書

めげないことは大事。自分が得意なことを見つける。

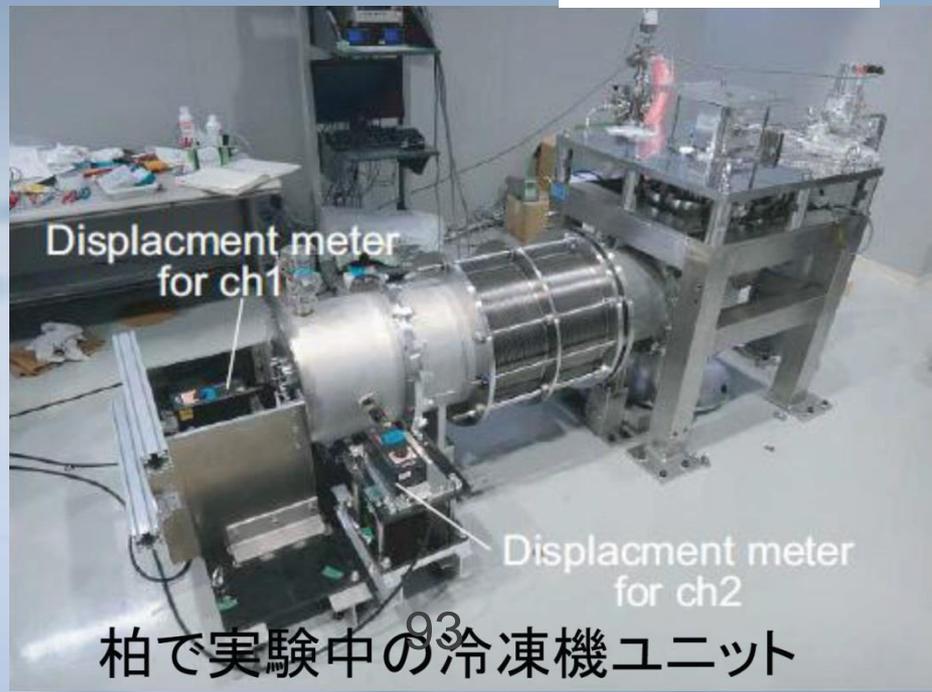
- 低振動の冷凍機を開発

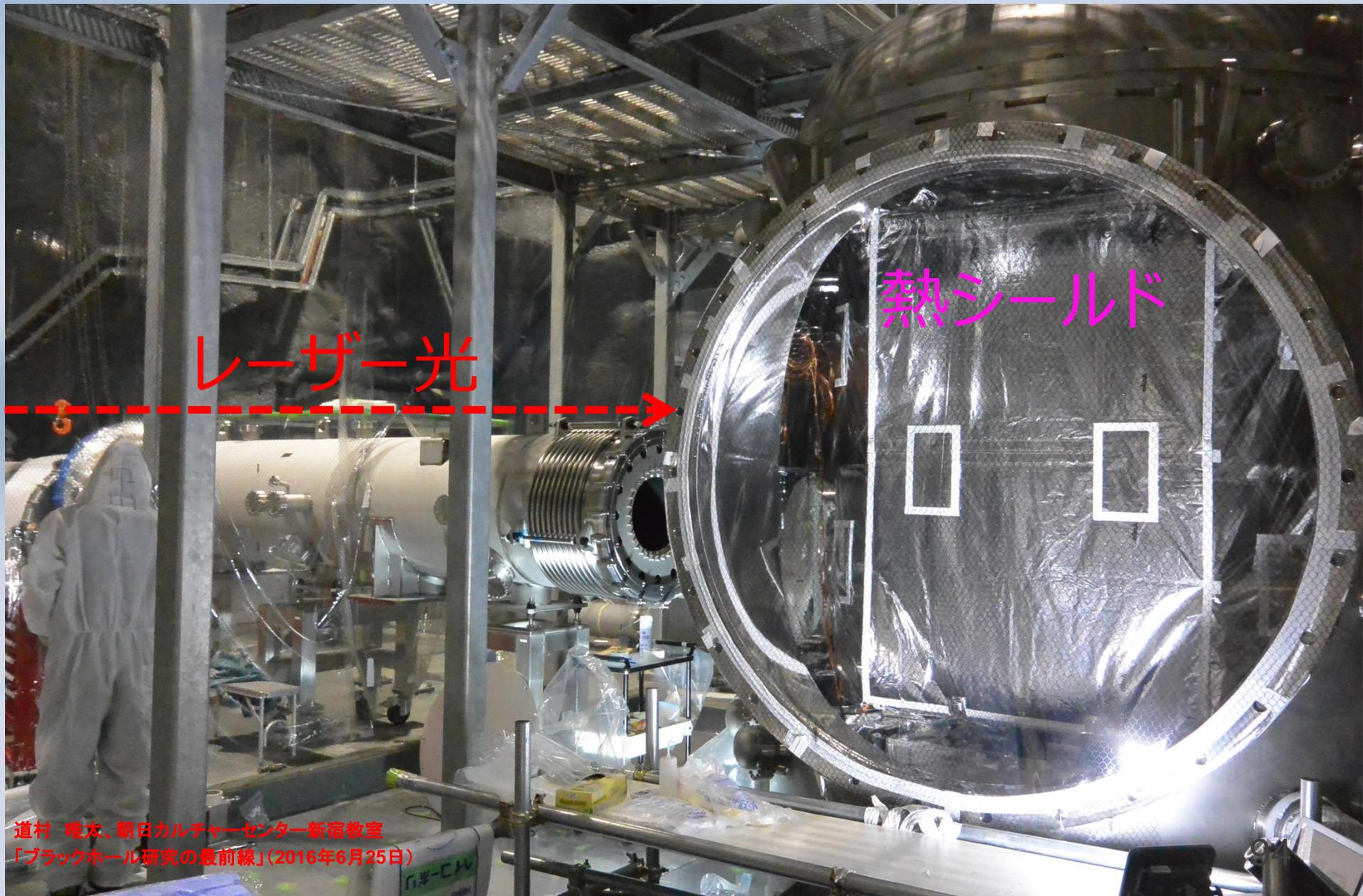


道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室
「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



冷凍機





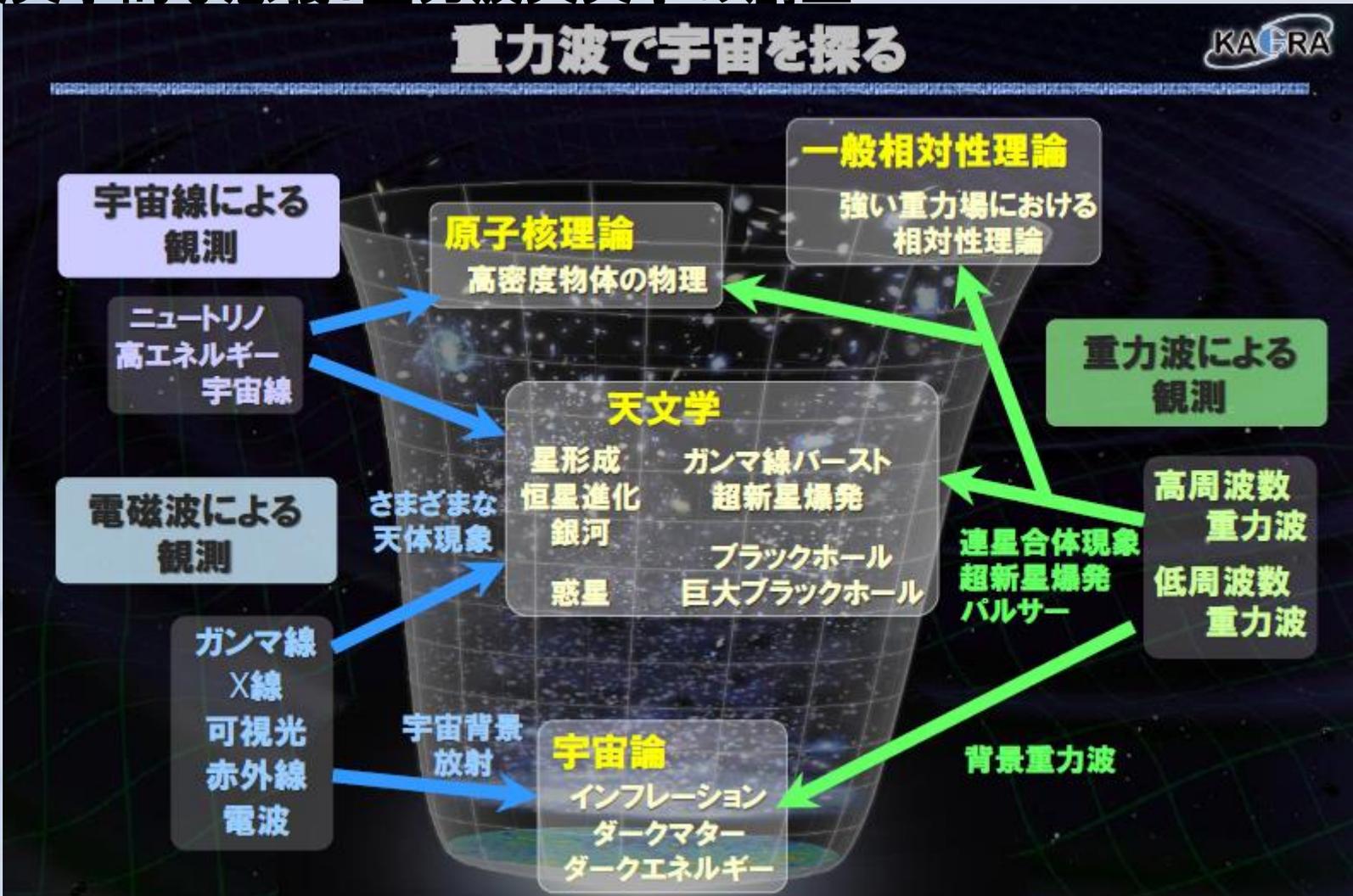
レーザー光

熱シールド

1.重力波

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



1.重力波

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



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 **後に回す**
 - 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



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

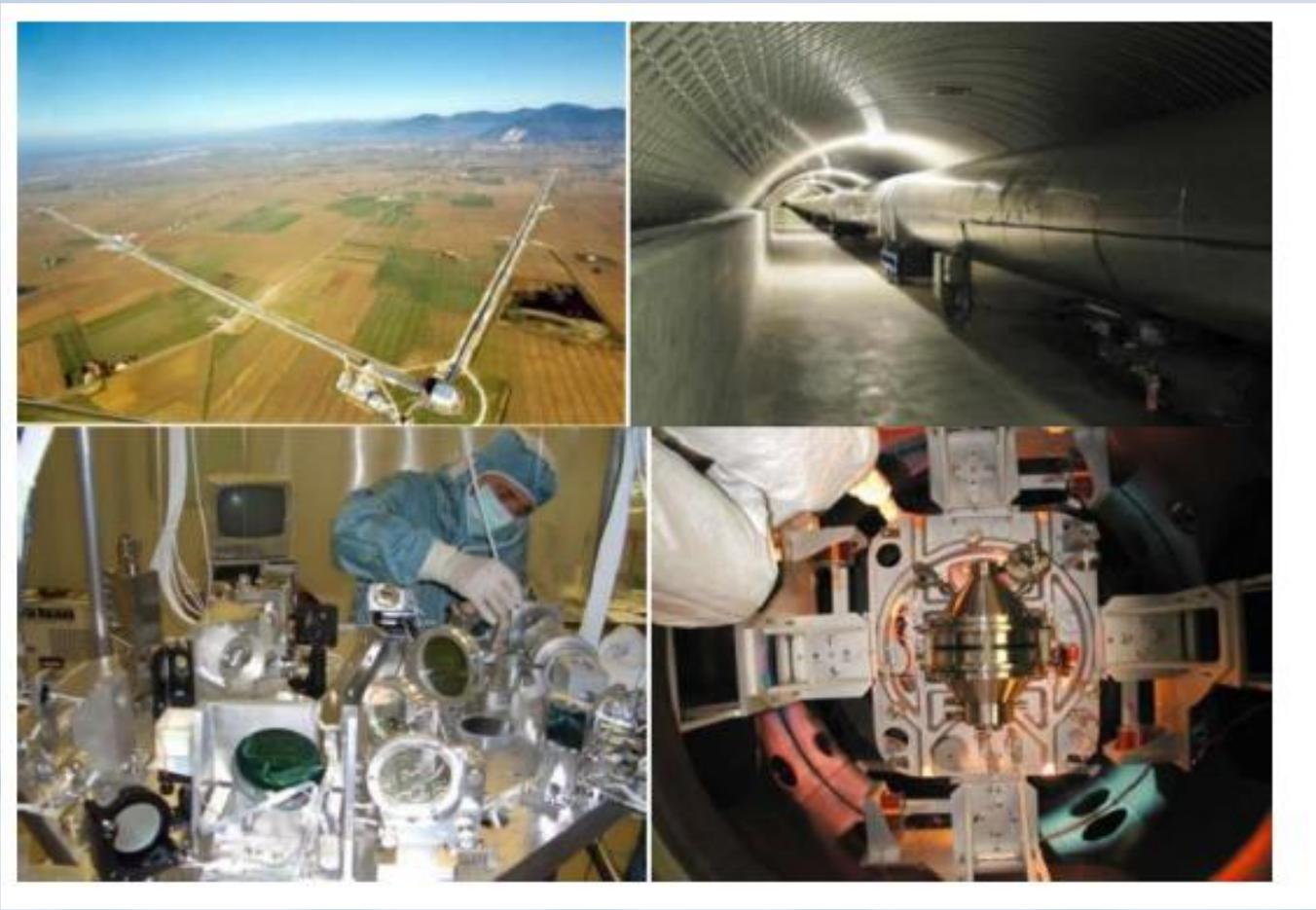
LIGO (U.S.A.)



4 km, Hanford and Livingston (**3000 km distance**) (U.S.A.)

世界の重力波検出器ネットワーク

VIRGO (Italy and France)



3 km, Pisa (Italy)

世界の重力波検出器ネットワーク

GEO (Germany and U.K.)



Figure 8. Aerial view of GEO600 (left) and the instrument inside the central building (right, a 2Pi view) (courtesy of GEO).

600 m, Hannover (Germany)

S. Kawamura, *Classical and Quantum Gravity* 27 (2010) 084001.

TAMA (Japan)



300 m, Tokyo (Japan)

S. Kawamura, *Classical and Quantum Gravity* 27 (2010) 084001.

CLIO (Japan)



100 m, Kamioka (Japan)

S. Kawamura, Classical and Quantum Gravity 27 (2010) 084001.

4.重力波検出器の将来

100年越しの宿題が解決してすべてめでたしめでたしか
(もうなにもすることはない?)

ニュートリノの例

ニュートリノ:素粒子の一種。検出は極めてむづかしく初
検出はノーベル賞。

The Nobel Prize in Physics 1995



© University of California Regents
Frederick Reines
Prize share: 1/2

4.重力波検出器の将来

ニュートリノの例

検出は極めてむつかしく初検出はノーベル賞。

->これでニュートリノの研究は**おしまい**ではない。

その後も**ノーベル賞**が**3回**も出ている。

(1)ニュートリノに種類(世代)があることの発見

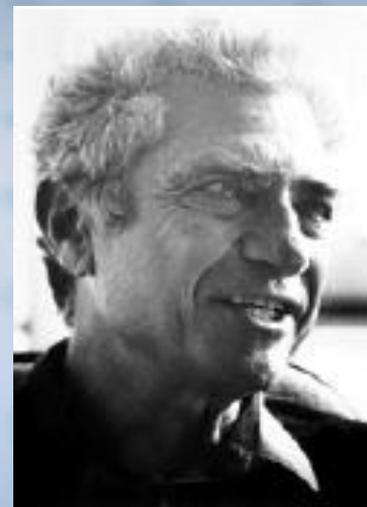
The Nobel Prize in Physics 1988



Leon M. Lederman
Prize share: 1/3



Melvin Schwartz
Prize share: 1/3



Jack Steinberger
Prize share: 1/3

4.重力波検出器の将来

ニュートリノの例

検出は極めてむつかしく初検出はノーベル賞。

->これでニュートリノの研究は**おしまい**ではない。

その後も**ノーベル賞**が**3回**も出ている。

(2)ニュートリノが質量をもつことの発見

The Nobel Prize in Physics 2015



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

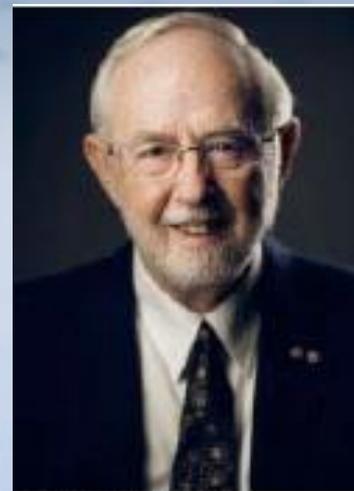


Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

4.重力波検出器の将来

ニュートリノの例

検出は極めてむつかしく初検出はノーベル賞。

->これでニュートリノの研究は**おしまい**ではない。

その後も**ノーベル賞が3回**も出ている。

(3)ニュートリノによる天文学

The Nobel Prize in Physics 2002



Raymond Davis Jr.
Prize share: 1/4



Masatoshi Koshihara
Prize share: 1/4

3. ブラックホールと重力波

ブラックホールとは？
2種類のブラックホール

低質量：太陽質量の10倍程度
比較的重い星が最後に爆発してできる

高質量：太陽質量の100万倍以上
銀河中心に存在している

4.重力波検出器の将来

考えられるシナリオ

- (1) 宇宙初期にできた連星からできた
- (2) 宇宙初期につくられた初期ブラックホール
- (3) 銀河中心や球状星団のブラックホールが連星を形成する

より**遠く**までみてより**精度よく方向**をきめることで区別することが可能となる。

4.重力波検出器の将来

より**遠く**までみる

より**昔**までみるということ

宇宙初期にもブラックホール連星合体があれば初期宇宙ブラックホールの可能性が高い

より小さい重力波を見なければならない

より**感度のよい**重力波検出器が必要

4. 重力波検出器の将来

より精度よく**方向**をきめる

たとえば銀河付近に集中しているのか、もしくは関係なく一様に分布しているのか

1台の検出器だけでは重力波が来た方向をきめるのは不可能。

LIGOは2台持っている。

2.重力波の検出

LIGO : アメリカのハンフォードとリビンググストンに
4kmの干渉計(3000km離れている)
2台同時に検出することでデータの信頼性を高める



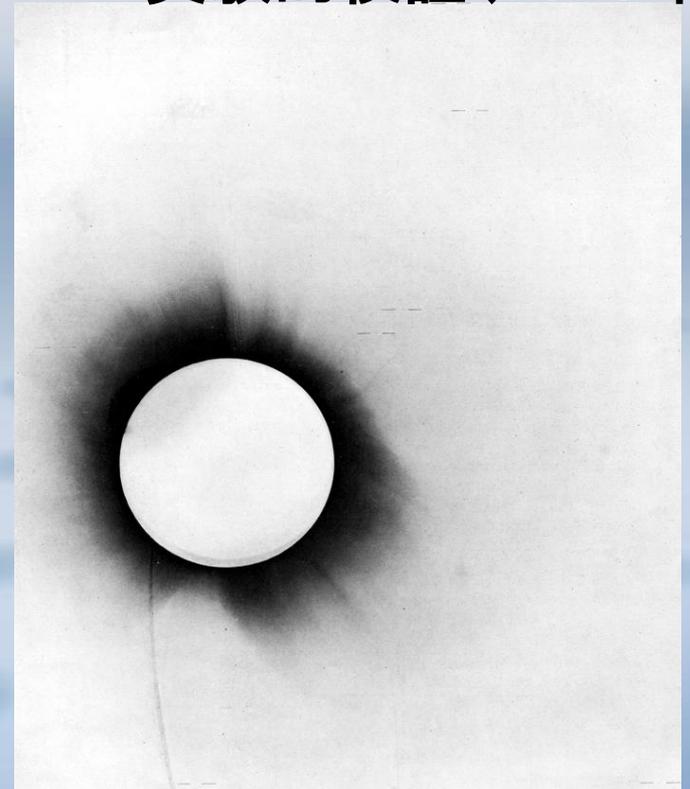
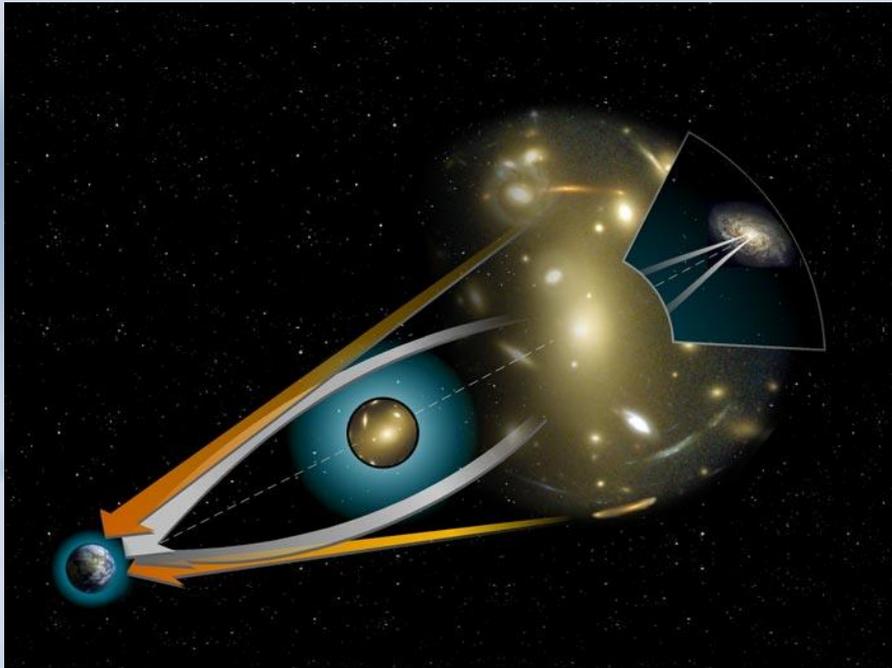
1.重力波とはなにか

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

光の屈折

エディントンによる
実験的検証(1919年)



重力波で、何がわかる？

重力波による天文学

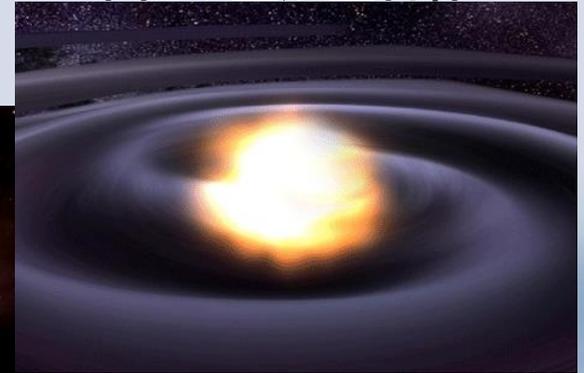
ブラックホール連星合体



超新星爆発



中性子星連星合体



ガンマ線バースト

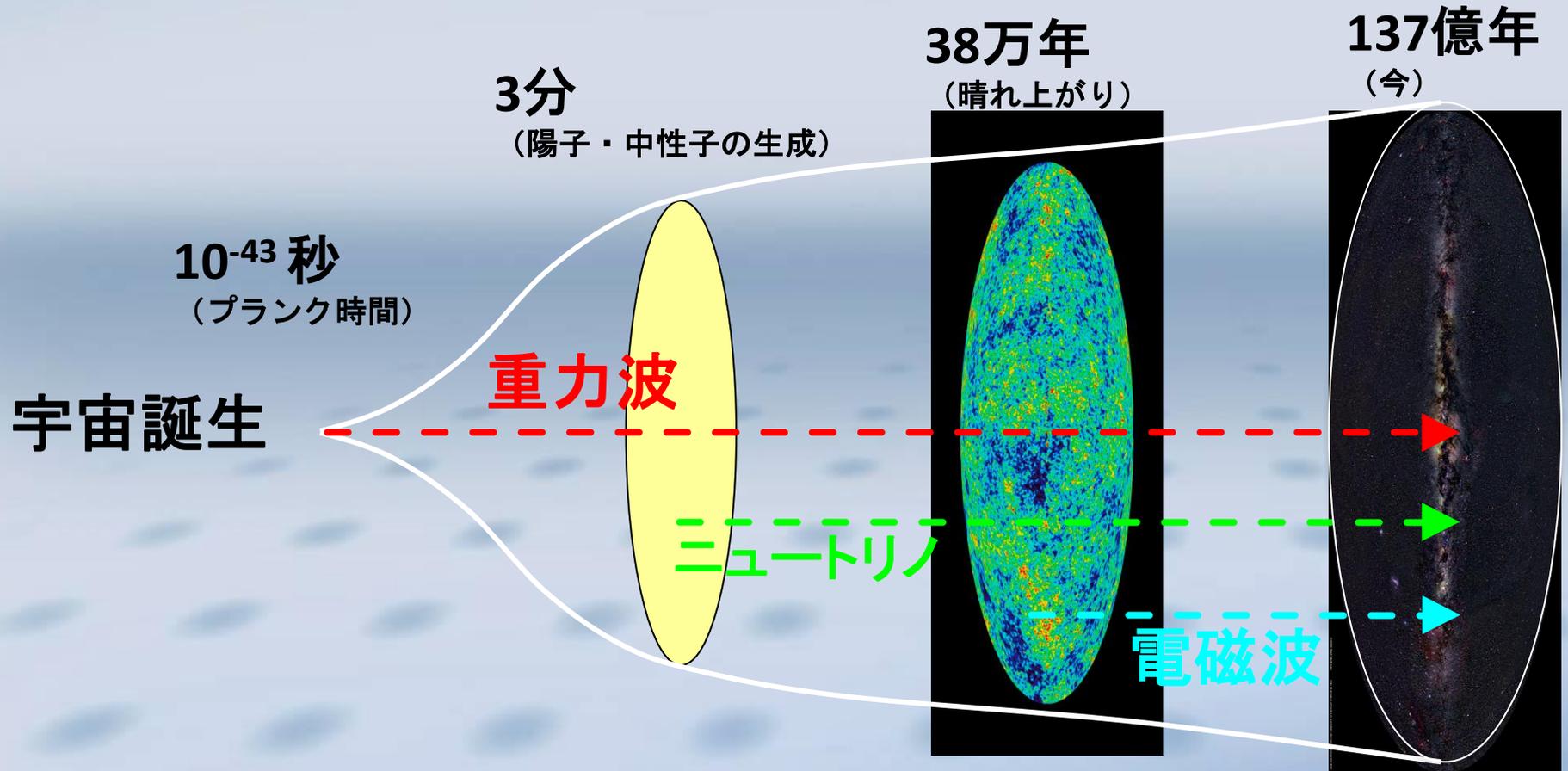


まったく未知の天体



重力波で、何がわかる？

宇宙のはじまりの情報を運んでいる

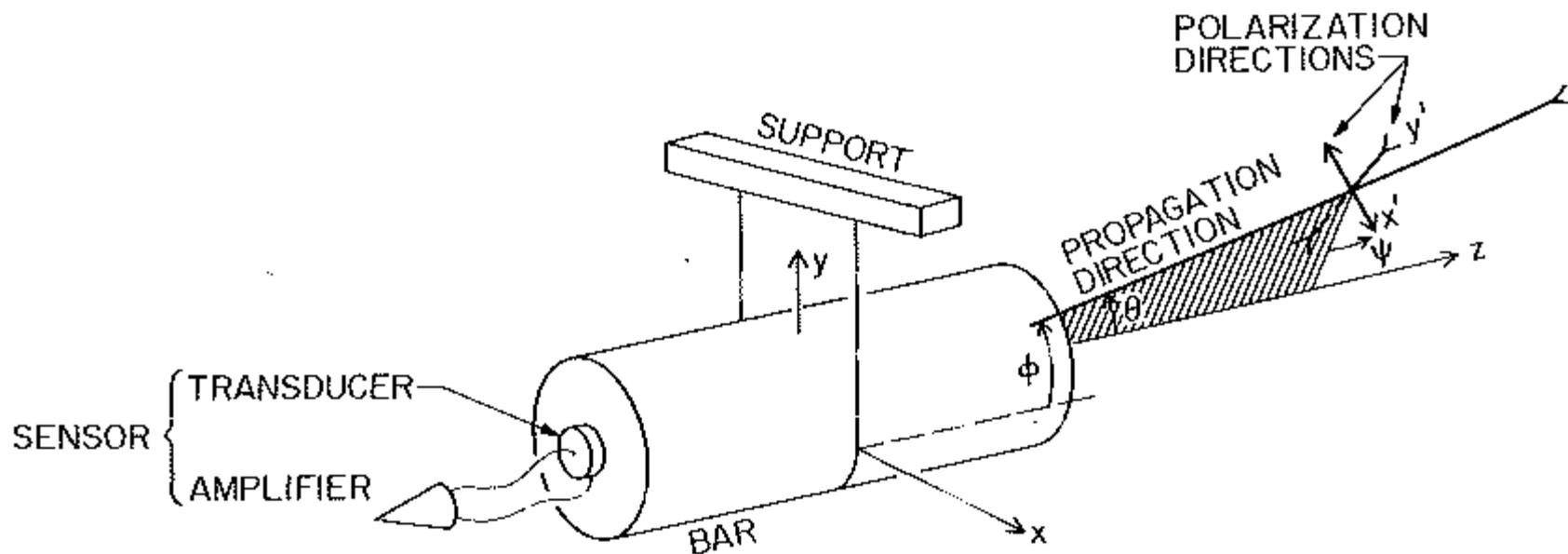


図：川村教授

2.重力波検出器

共鳴型検出器

ウェーバーバー：重力波がバーの振動をおこす。それを検出する。



“300 years of gravitation”
(1987) Cambridge University Press
Fig. 9.8

直径：数十cm

長さ：数m

2.重力波検出器

Joseph Weber (1919-2000)
重力波検出実験のパイオニア

レーザーの概念を提唱した一人

他の人 (C.H. Townes,
N.G. Basov, A.M. Prokhorov) は
ノーベル物理学賞受賞 (1964).

共鳴型検出器の開発を始める
J. Weber, Physical Review 117 (1960) 306.



2.重力波検出器

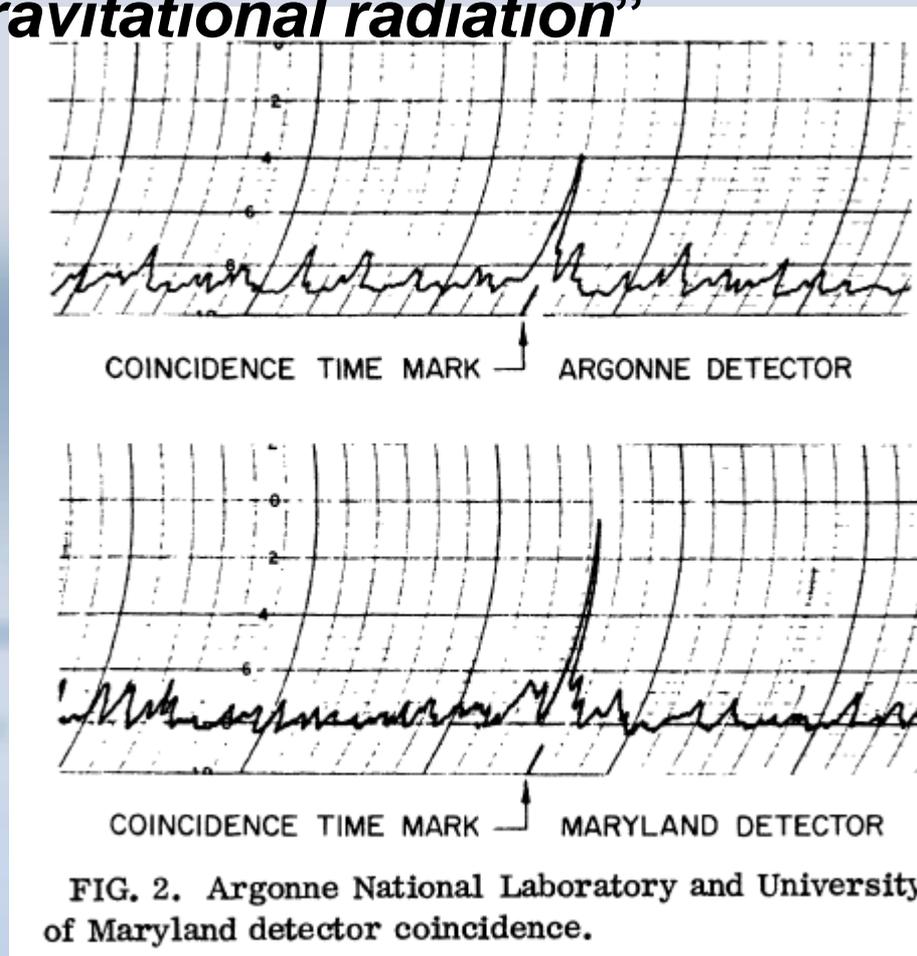
ウェーバーイベント

J. Weber, Physical Review Letters 22 (1969) 1302.

“Evidence for *discovery* of gravitational radiation”

1000 km離れた2台の検出器が
同時に反応

銀河系の中心にたくさんの
重力波源があることを示唆



2.重力波検出器

1969年6月16日 朝日新聞朝刊

1969年6月17日
朝日新聞朝刊 社説

育成分針変えぬ
成田空港再建、建設に反論

6・15集会
一行動

防衛二法
無理

大子去来成望は望み博

坪野公夫、最終講義
(東大物理学教室 2013年3月12日)

重力波の存在確認
二カ所で同時検出

中国も承認
の至るまで

本当なら大変な業績

相対性理論を注

小冊子に

波乱を告ぐペンビドー時代の開幕

重力波の存在確認の意義

二カ所で同時検出

中国も承認

本当なら大変な業績

小冊子に

2.重力波検出器

しかし, ...

これだけたくさんの重力波源が銀河中心にあると、大量のエネルギーが放出されることになり、**ありえない速さで銀河系が崩壊してしまう。**

他のグループの検出器では**なにも出てこない。**

ウェーバーイベントがなんであったのかはわからないが重力波ではない。

NAUTILUS
INFN - LNF



G. Pizzella, ET first general meeting (2008)

2.重力波検出器

じつはこの人もWeberの話を聞いて検出器の開発をしようとしていました。(他のグループがたちあげるということで断念)

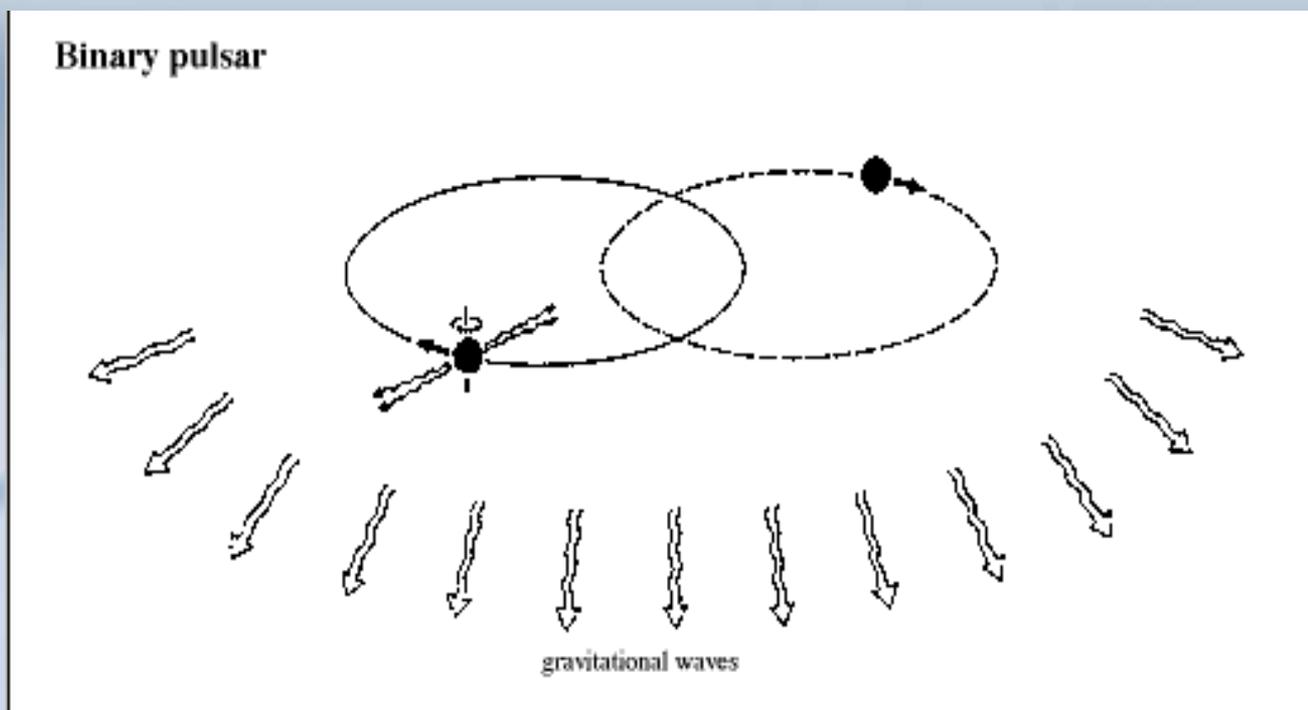


2.重力波検出器

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（密度は水の100兆倍！）

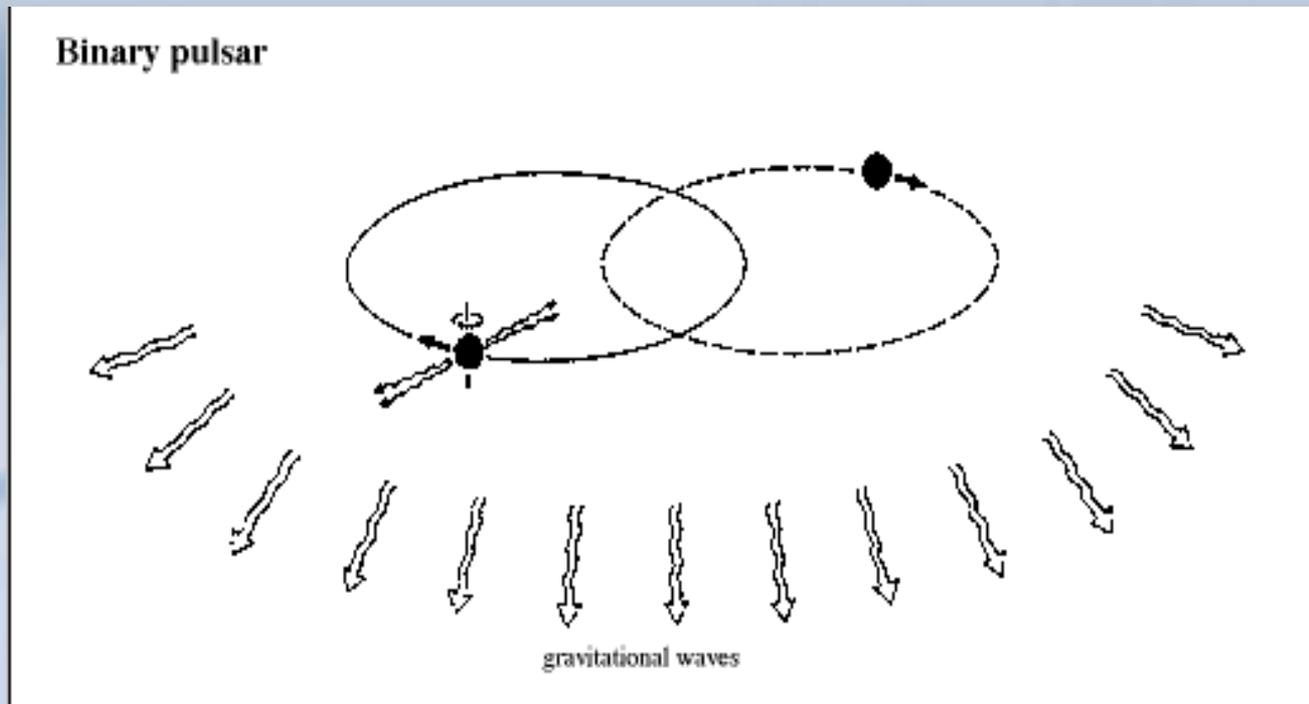


2.重力波検出器

散乱や吸収されない、つまり**検出しにくい**

間接的な証拠

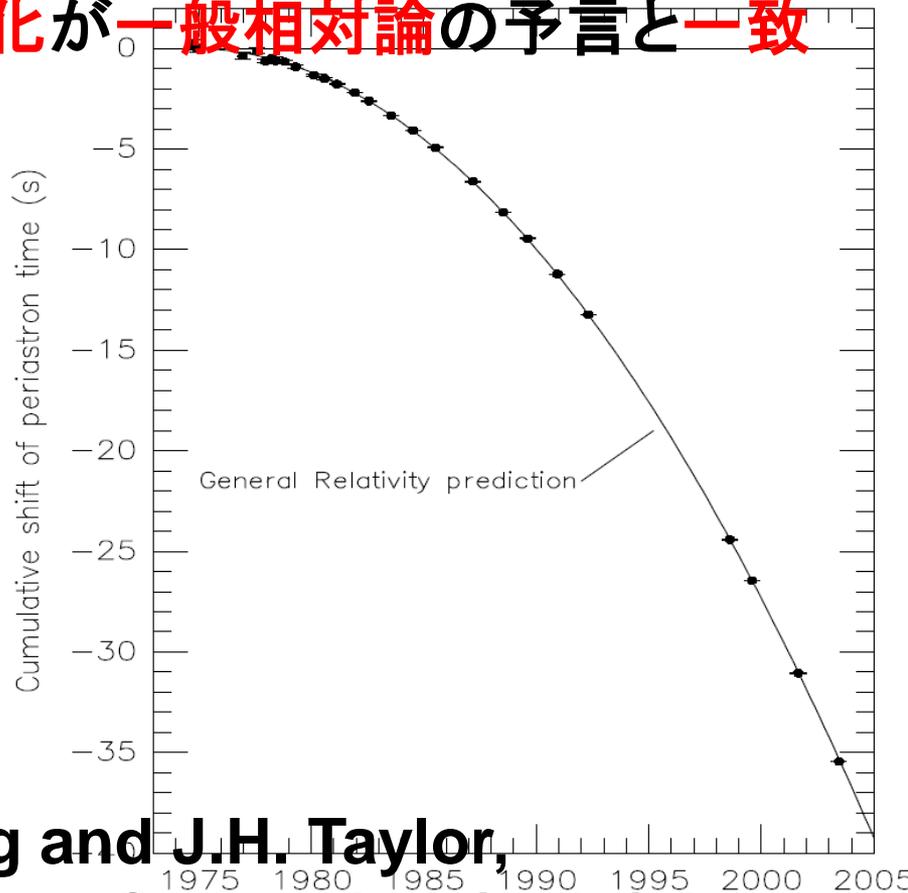
中性子星連星: 重力波を放出して一回転に要する時間(周期)が
変わる



2.重力波検出器

周期の変化の観測と計算値の比較

観測された周期変化が一般相対論の予言と一致



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

2.重力波検出器



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

2.重力波検出器

干渉計の歴史

Brief **early** history of **interferometer**

“300 years of gravitation”(1987) Cambridge University Press

F.A.E. Pirani, Acta Physica Polonica 15 (**1956**) 389.

時空の歪みを測定する**思考実験**

M.E. Gertsenshtein and V.I. Pustovoit

Soviet Physics-JETP 16 (**1962**) 433.

干渉計を用いる最初の提案

J. Weber, **実験ノート (!)**, **1960年代半ば**.



2.重力波検出器

Rainer Weiss

1932年 ベルリン(ドイツ)生まれ
幼少時両親とともにアメリカへ。

もう一つの重要な功績

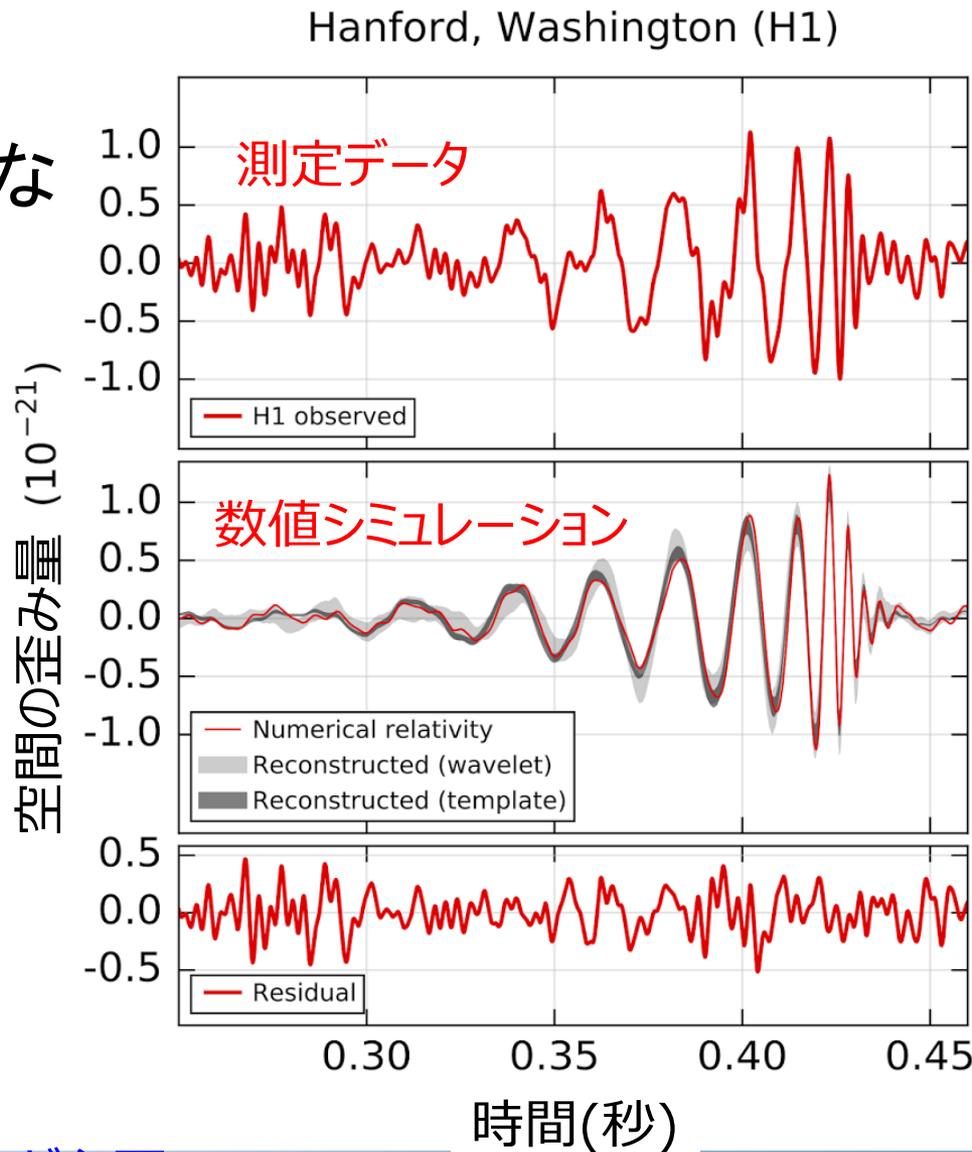
COBE(宇宙マイクロ波背景放射の精密測定および異方性の発見、2006年ノーベル賞)の**主要メンバー**の一人

2006年ノーベル賞受賞講演で名前登場
授賞式にも招かれている。

3. 検出された重力波

重力波形からわかったこと

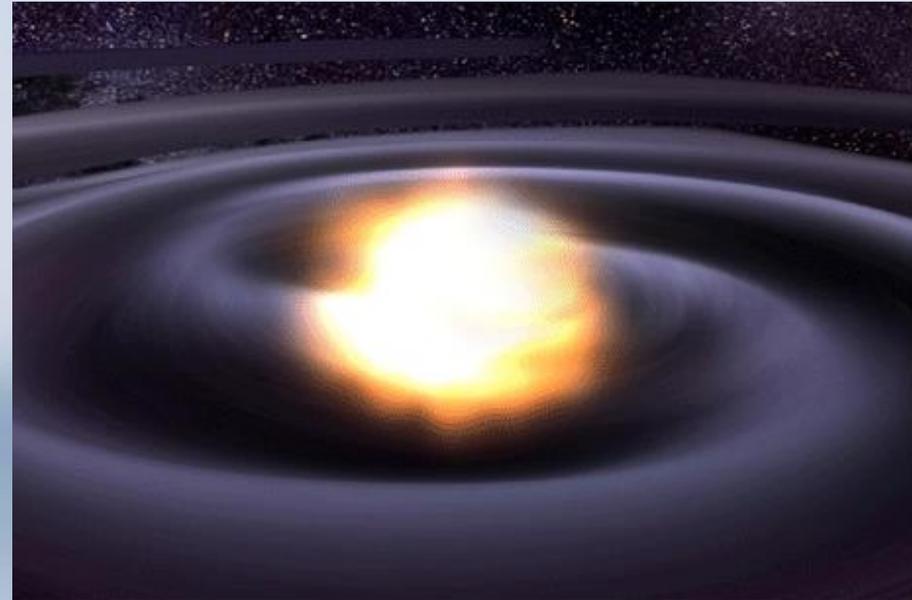
- 見てわかる教科書のような波形
- 一般相対論は
ブラックホールの
ような**強い重力**でも
正しい。



3. 検出された重力波

中性子星連星の合体: 1回
(Virgoとの共同観測)
他の手段と**相補的**な観測

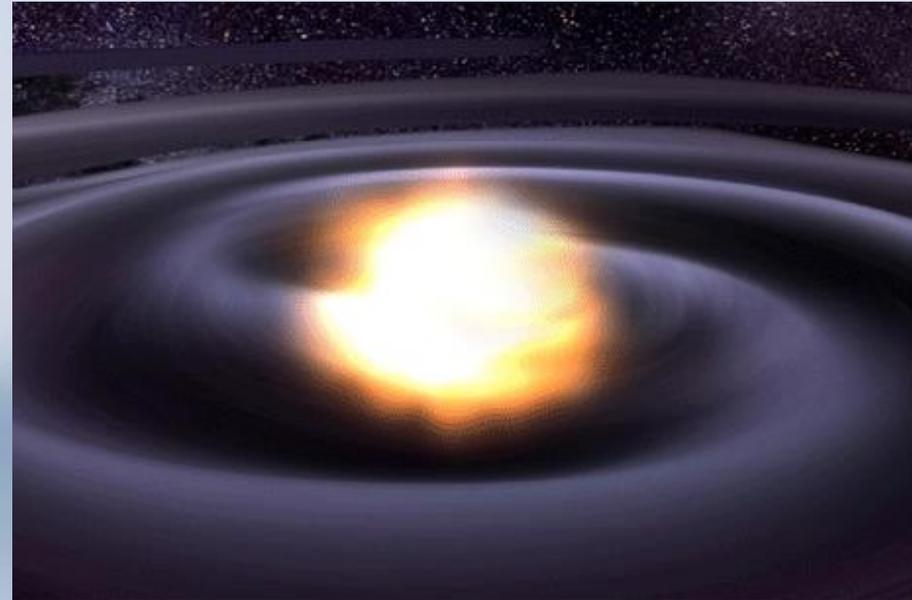
物体同士の合体衝突なので
あらゆる波長の電磁波
(ガンマ線、X線、紫外線、
可視光、赤外線、電波)で観測ができた。
マルチメッセンジャー天文学



3. 検出された重力波

中性子星連星の合体: 1回
(Virgoとの共同観測)
他の手段と**相補的**な観測

マルチメッセンジャー天文学
からなにがわかったか。



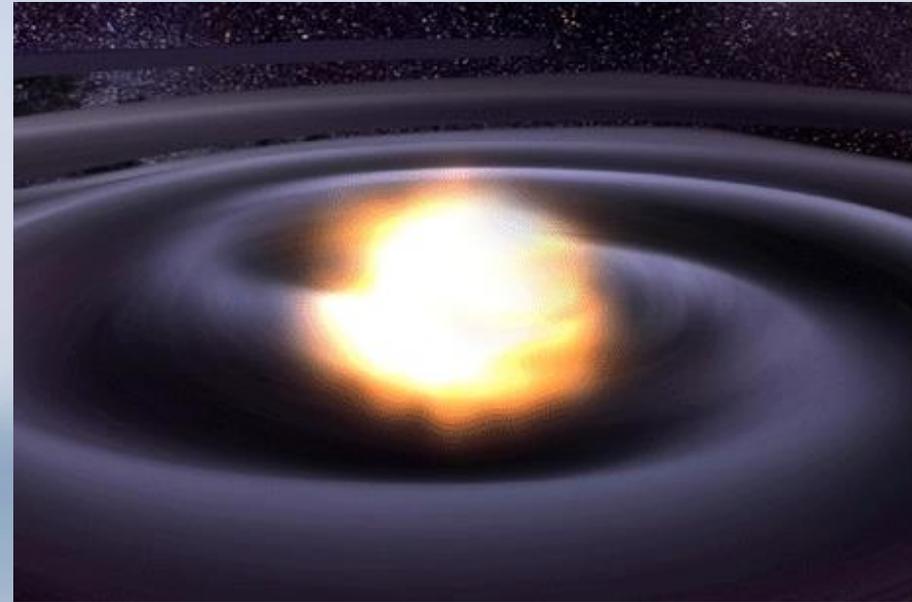
ガンマ線バースト: 突然ガンマ線などを極めて明るく発する現象

->一部のガンマ線バーストは連星中性子合体であることがわかった。

3. 検出された重力波

中性子星連星の合体: 1回
(Virgoとの共同観測)
他の手段と**相補的**な観測

マルチメッセンジャー天文学
からなにがわかったか。



元素合成: 周期律表の元素はどのように合成されてきたか?

水素とヘリウム: 宇宙初期

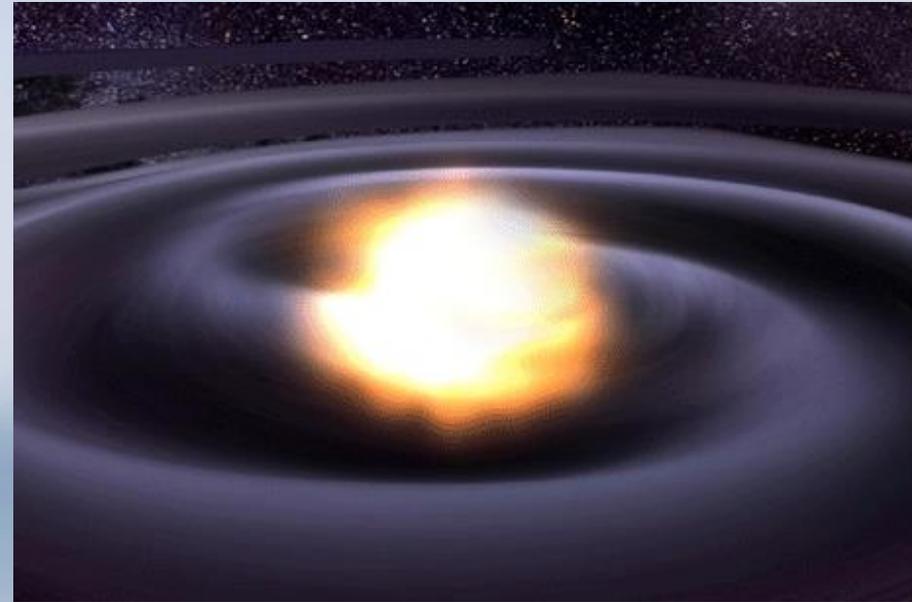
鉄より軽い元素: 星のなかの核反応

鉄より重い元素: 超新星爆発 ← 超新星だけからは説明できない?

3. 検出された重力波

中性子星連星の合体: 1回
(Virgoとの共同観測)
他の手段と**相補的**な観測

マルチメッセンジャー天文学
からなにがわかったか。



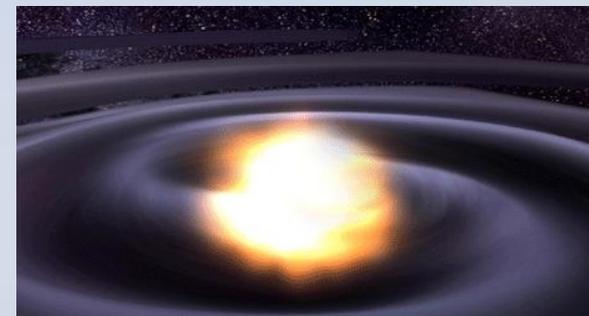
元素合成: 周期律表の元素はどのように合成されてきたか?

鉄より重い元素: 超新星爆発<-超新星だけからは説明できない?

連星中性子星合体で**鉄より重い元素**ができる
量的につじつまがあうかは今後の観測が必要

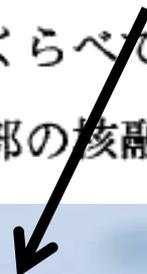
3. 検出された重力波

2018年度センター試験 地学第6問より



問 1 上の文章中の下線部(a)に関連して、宇宙の元素について述べた文として最も適当なものを、次の①～④のうちから一つ選べ。

- ① 炭素，酸素の一部は，ビッグバンによりつくられた。
- ② 超新星爆発によって，鉄より重い元素がつくられた。
- ③ 種族Ⅱの星は，種族Ⅰの星にくらべて重い元素の割合が多い。
- ④ ヘリウムの大部分は，恒星内部の核融合によりつくられた。

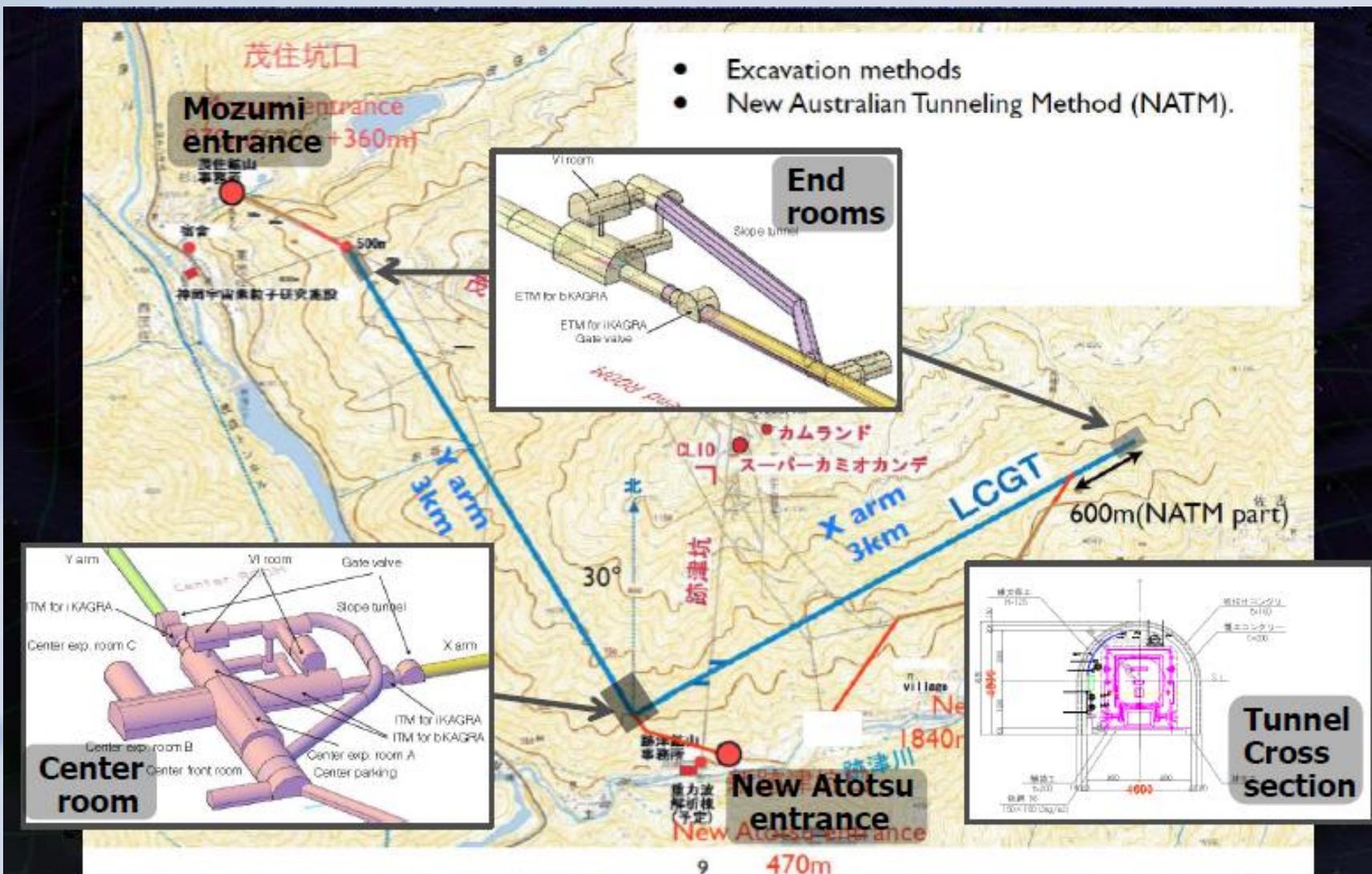


数年後この記述内容は変わっているかも

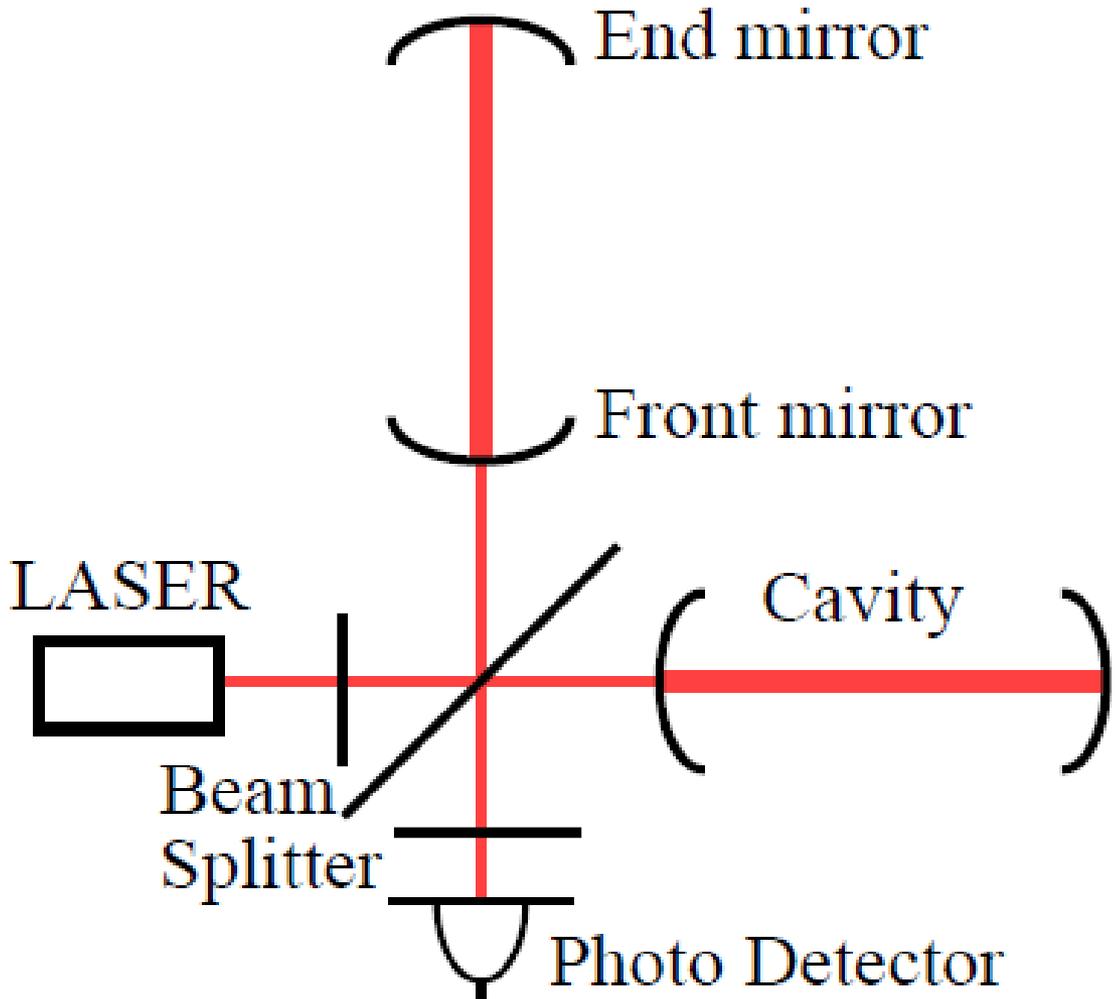
4.重力波検出器の将来

KAGRAの地図

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.重力波検出器



感度向上のため鏡の数を増やす(7枚の光学素子)
 相対的な位置や角度の**制御が常に必要**
 Pound **Drever** Hall法が制御のための**信号**の基礎