

重力波とはなにか、 そして宇宙を探る

山元 一広

富山大学 理学部 物理学科

新潟明訓高等学校
2017年6月21日

目次

1. 重力波とはなにか
2. 重力波の検出
3. ブラックホールと重力波
4. 重力波検出器の将来
5. まとめ

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

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)

所長: 梶田隆章 (2015年ノーベル物理学賞)



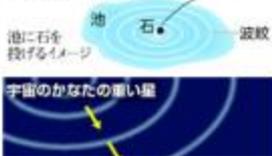
アメリカのLIGOが重力波初観測！

菅山 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

アインシュタインの



重力波 未知の窓開く

時時刻刻

アインシュタインの「最後の遺言」にされた重力波を初めて観測した米研究チームが発表した。重力波は、これまでの望遠鏡で見えなかった光や電磁波の観測が、重力波の観測によって初めて可能になる。

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 資金法制化へ
政府方針

円高進行一時

NEWSLINE
1 政府増税記録
2 増税賛否
3 増税賛否
4 増税賛否
5 増税賛否
6 増税賛否
7 増税賛否
8 増税賛否
9 増税賛否
10 増税賛否
11 増税賛否
12 増税賛否

THE YOMURI SHIMBUN
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 山本台

天文学 新たな段階

四国新聞

かけうどん235.7円

増税以降 円値上がり

重力波、世界初観測

宇宙の起源に迫

苦渋の決断

古い泥棒

幻の五輪

老いなき

経済政策

GIS入門

西村書店

NOVAアプリ

185分収録
スマホで学べる
英語学習
アプリ
1,000円

あの日

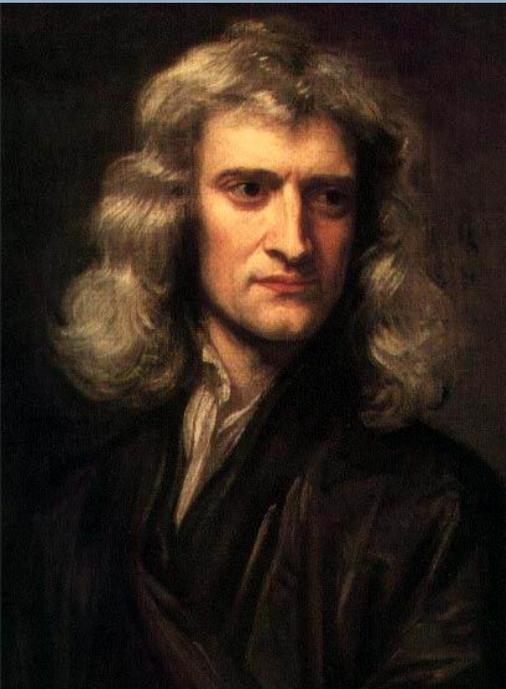
1.重力波とはなにか

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)

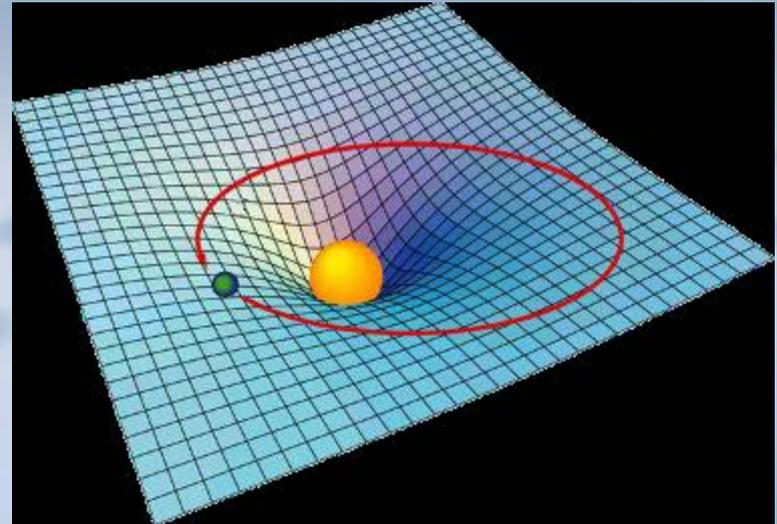
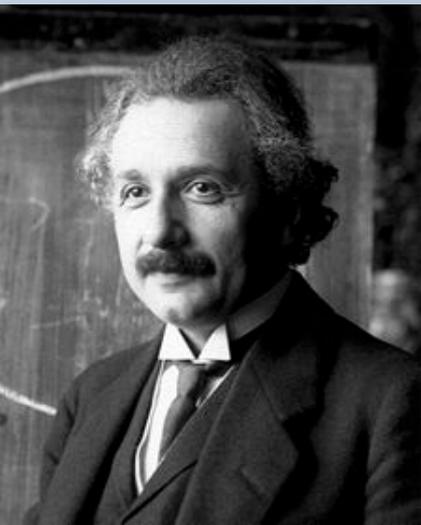
1.重力波とはなにか

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)



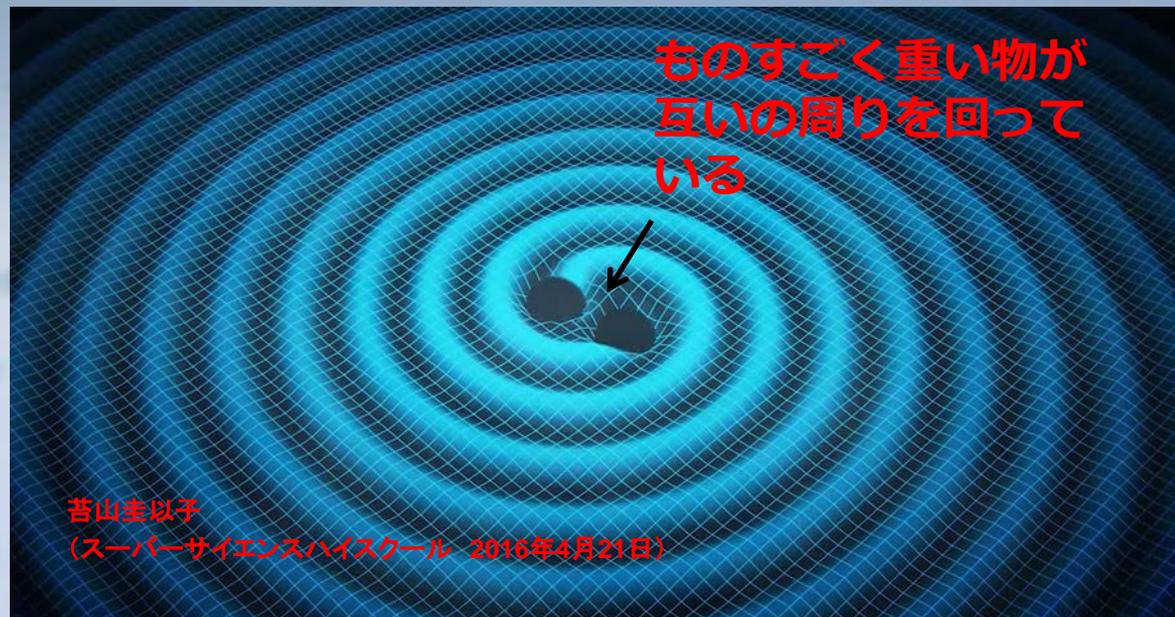
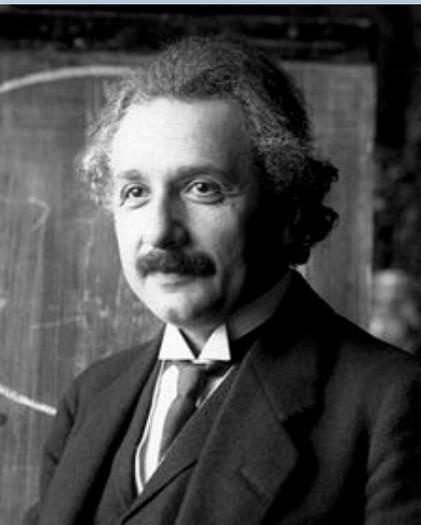
アルバート アインシュタイン (ウィキペディア 英語版)

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”

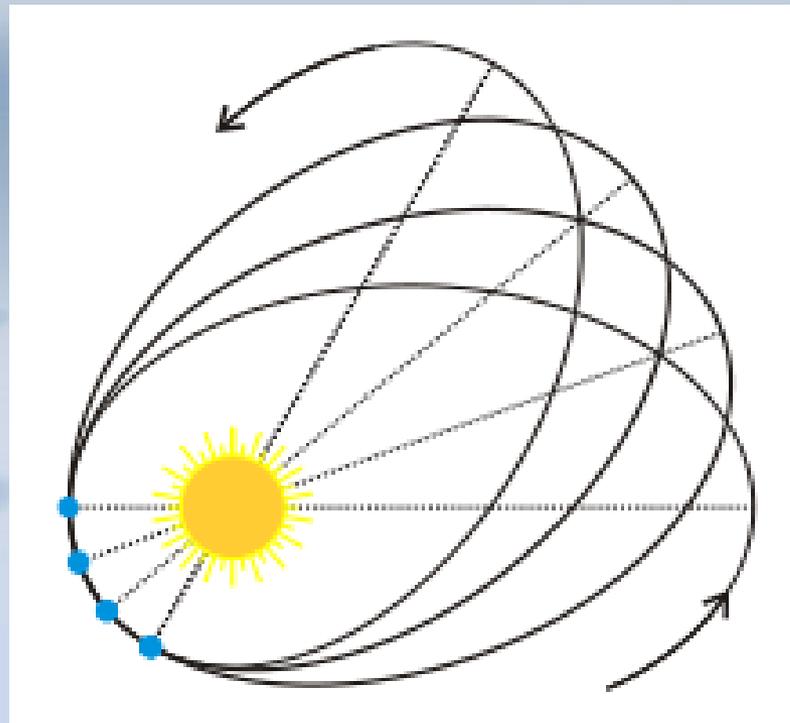
1.重力波とはなにか

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)



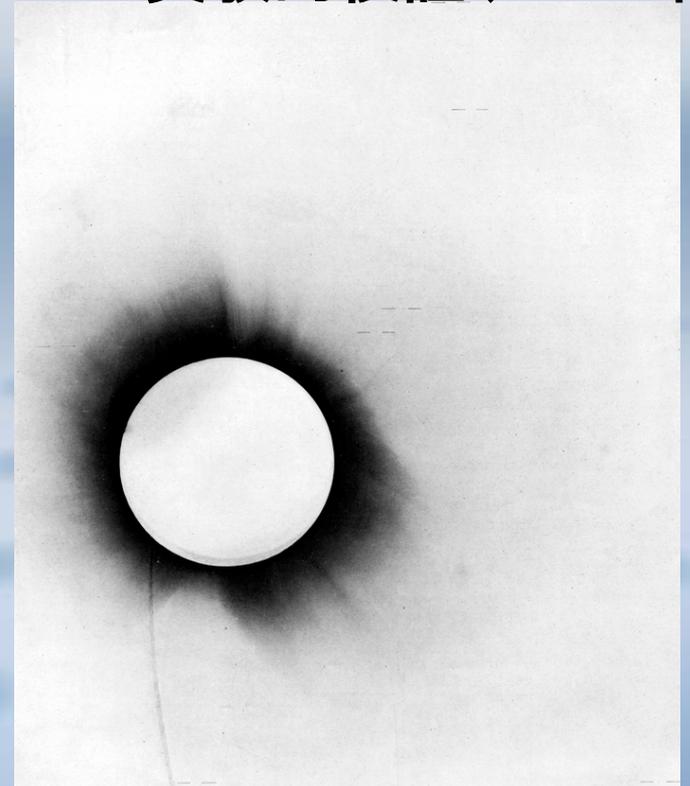
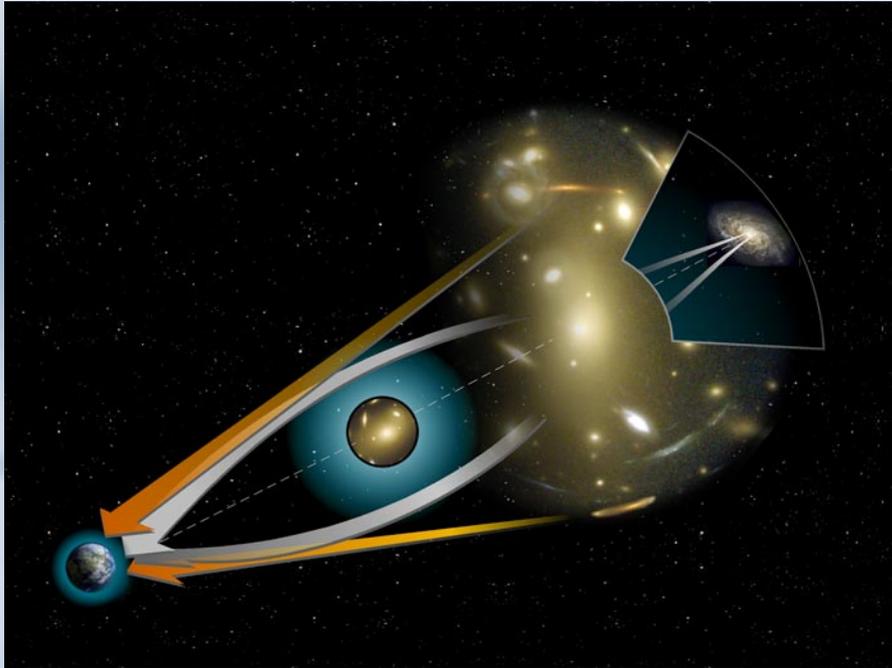
1.重力波とはなにか

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)



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

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、...

重力波で、何がわかる？

重力波による天文学

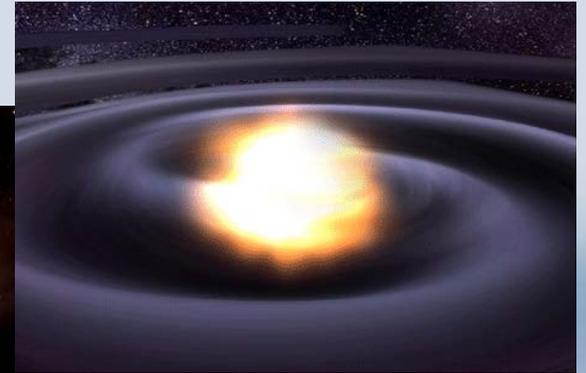
ブラックホール連星合体



超新星爆発



中性子星連星合体



ガンマ線バースト

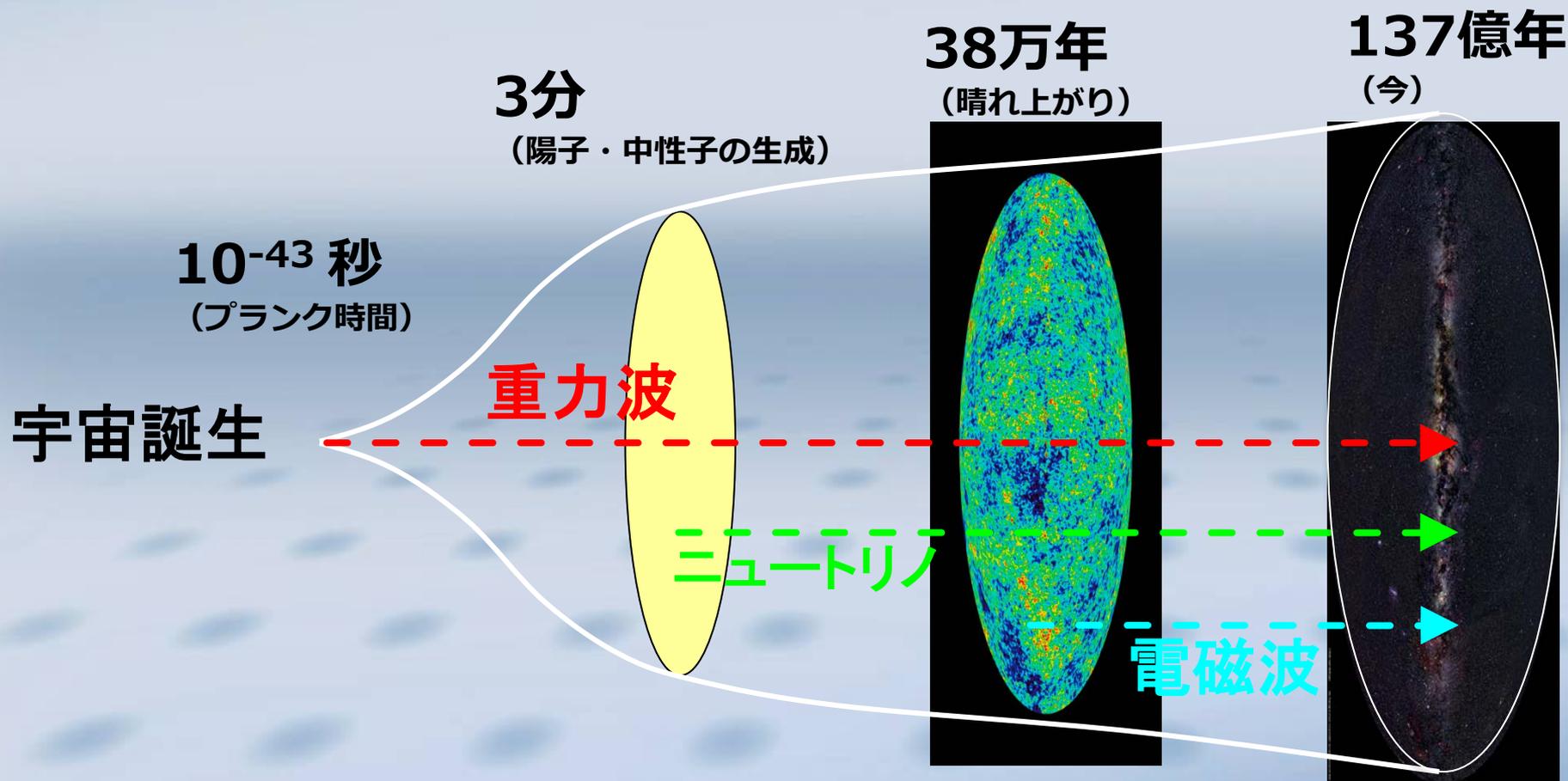


まったく未知の天体



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.重力波の検出

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

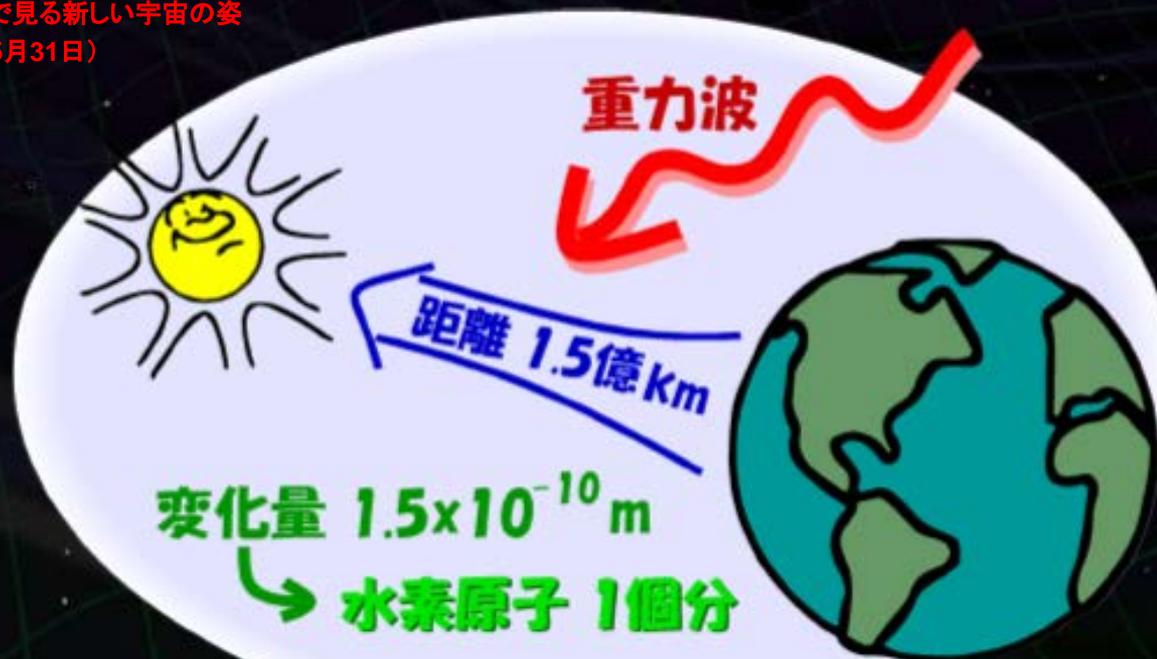
距離 1.5×10^{11} m



1.5×10^{-10} m の距離変動

重力波振幅 10^{-21}

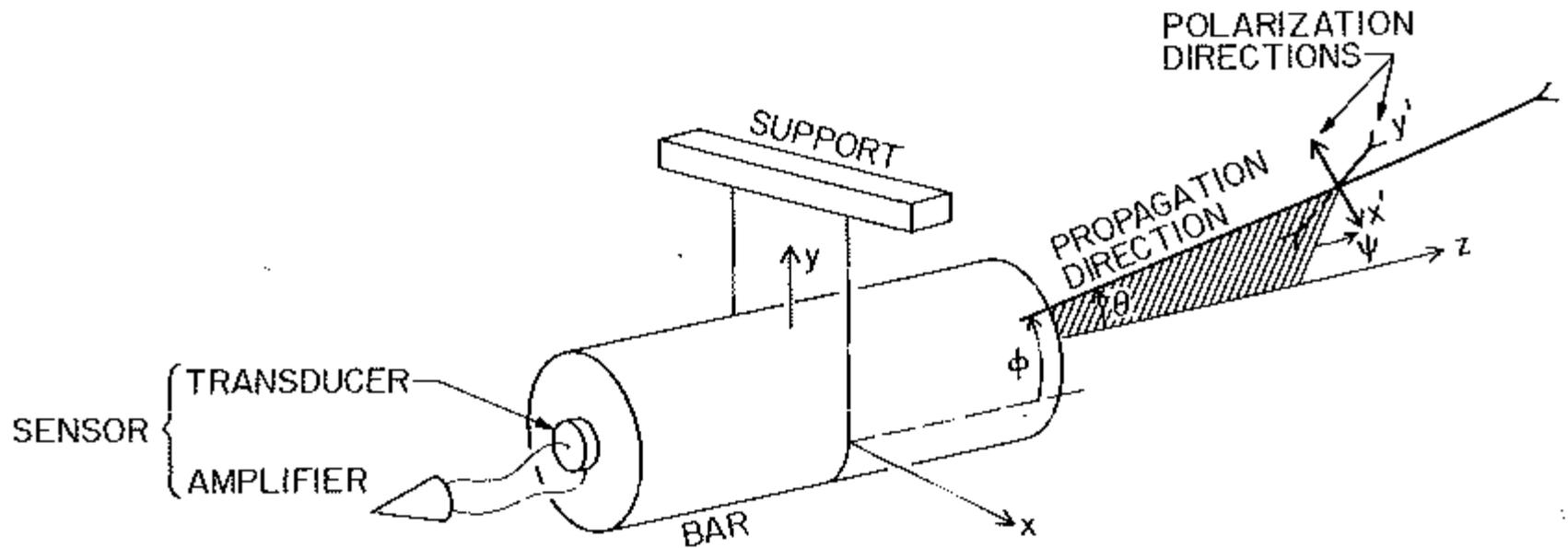
安東正樹 重力波望遠鏡KAGRAで見る新しい宇宙の姿
(東大物理学教室談話会 2013年5月31日)



2.重力波の検出

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

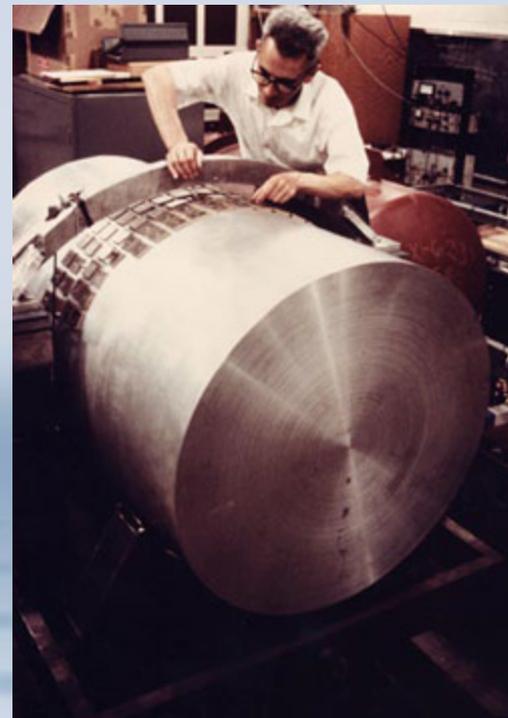
2.重力波の検出

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.重力波の検出

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

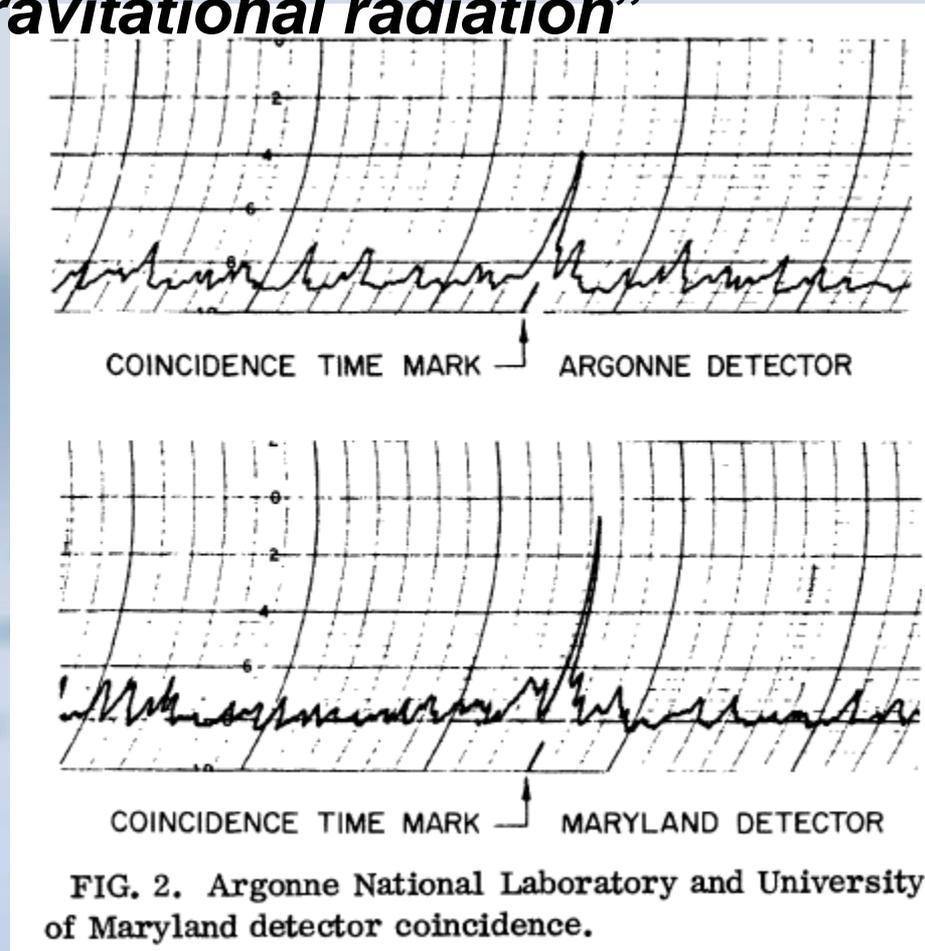


FIG. 2. Argonne National Laboratory and University of Maryland detector coincidence.

2.重力波の検出

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



坪野公夫、最終講義
(東大物理学教室 2013年3月12日)



2.重力波の検出

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)

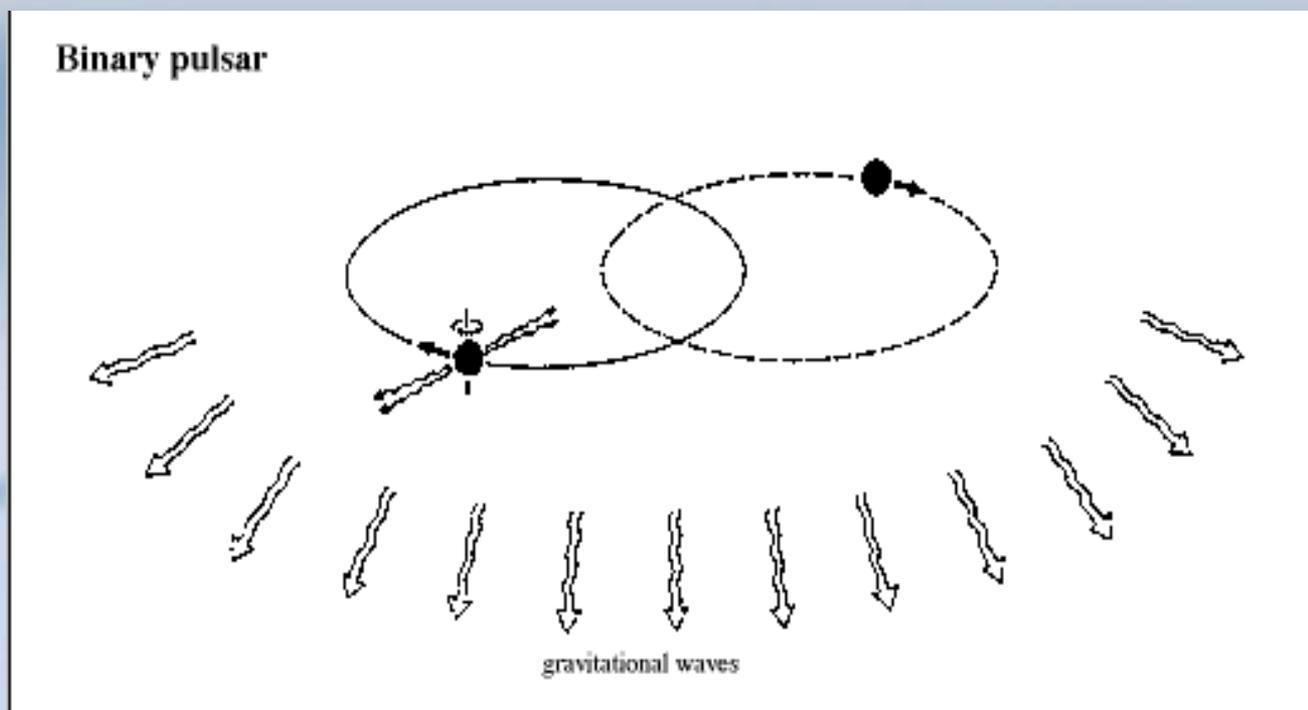


2.重力波の検出

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！)

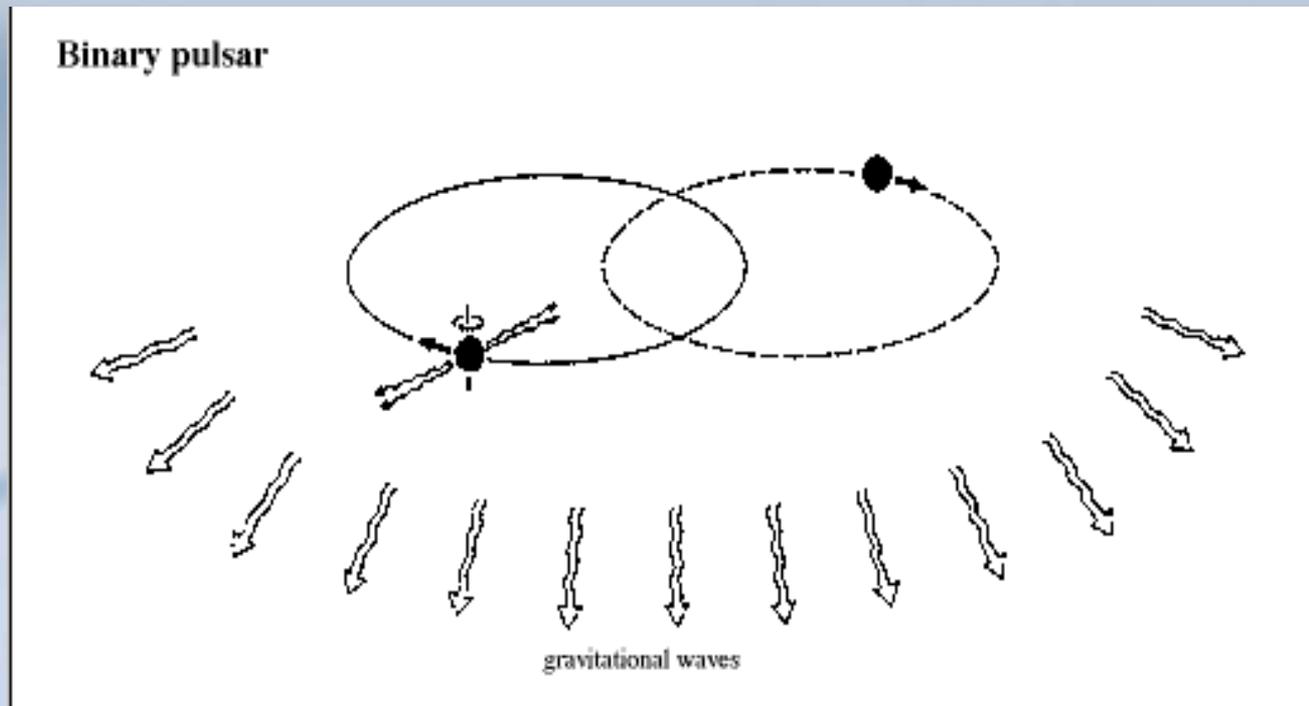


2.重力波の検出

散乱や吸収されない、つまり**検出しにくい**

間接的な証拠

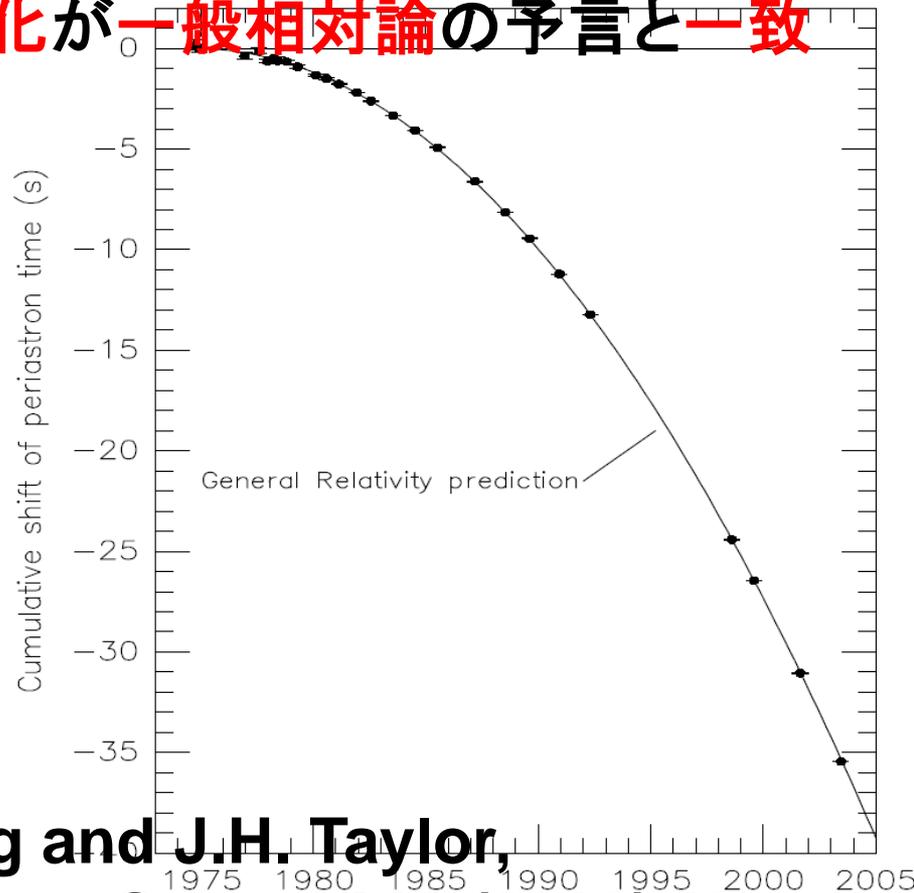
中性子星連星: 重力波を放出して一回転に要する時間(周期)が
変わる



2.重力波の検出

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.重力波の検出



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. 重力波の検出

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)

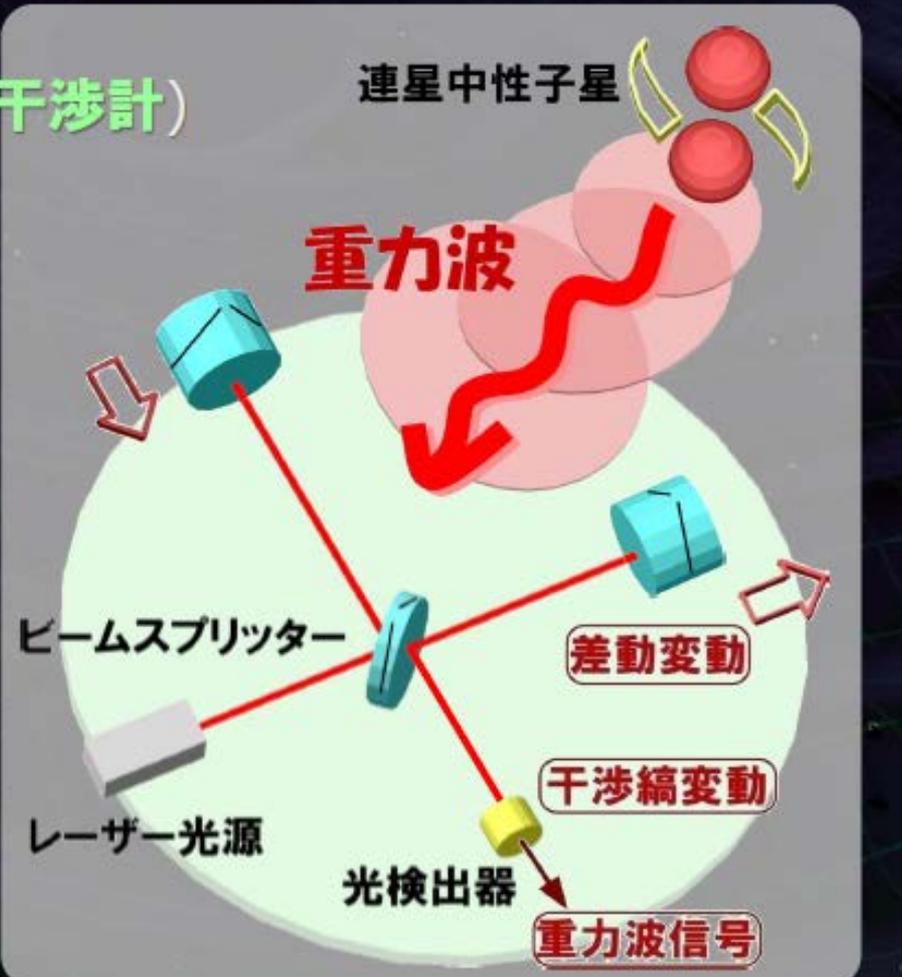
レーザー干渉計 (マイケルソン干渉計)

- 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

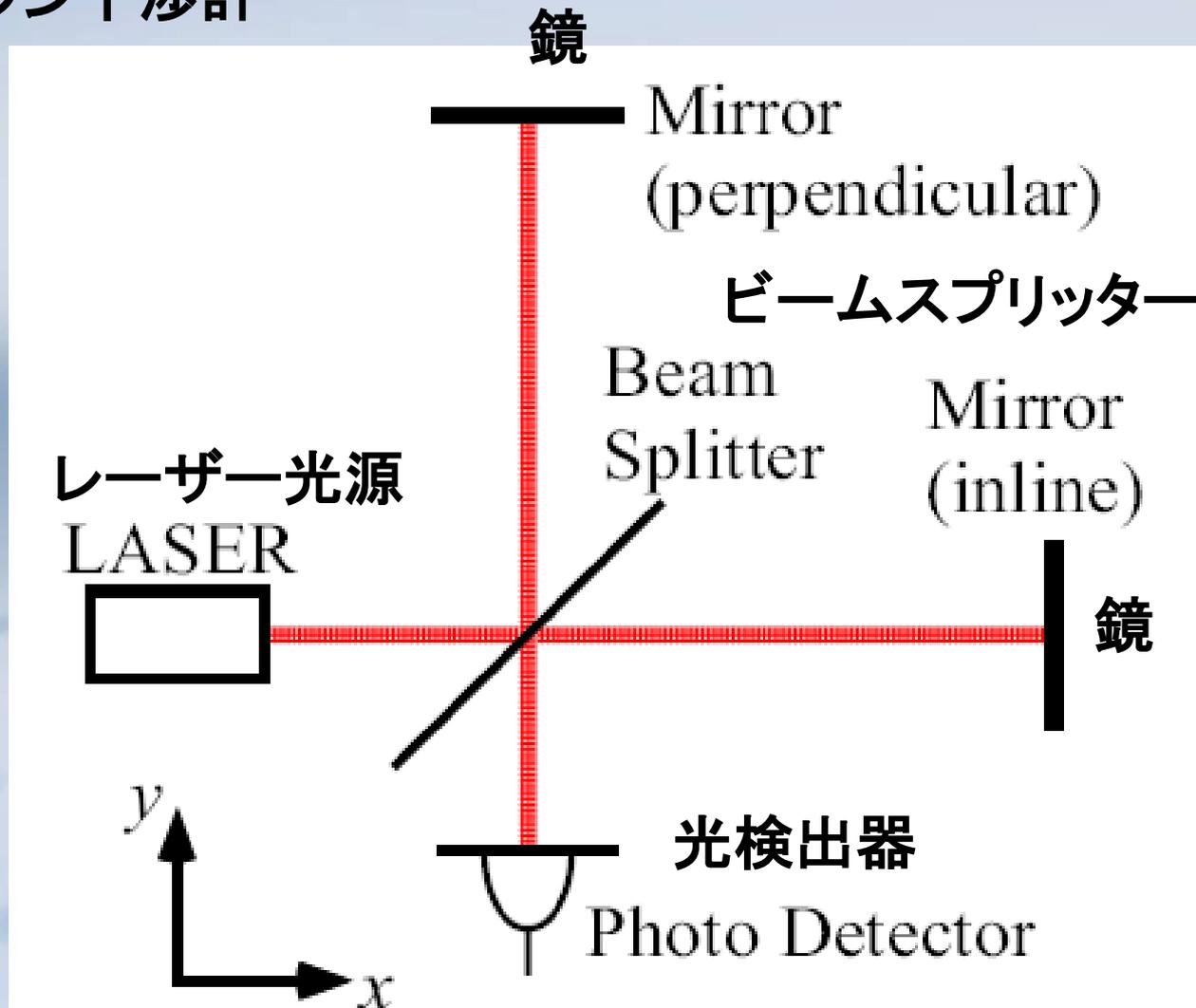


腕の長さの差動変動を
干渉光量の変動として検出



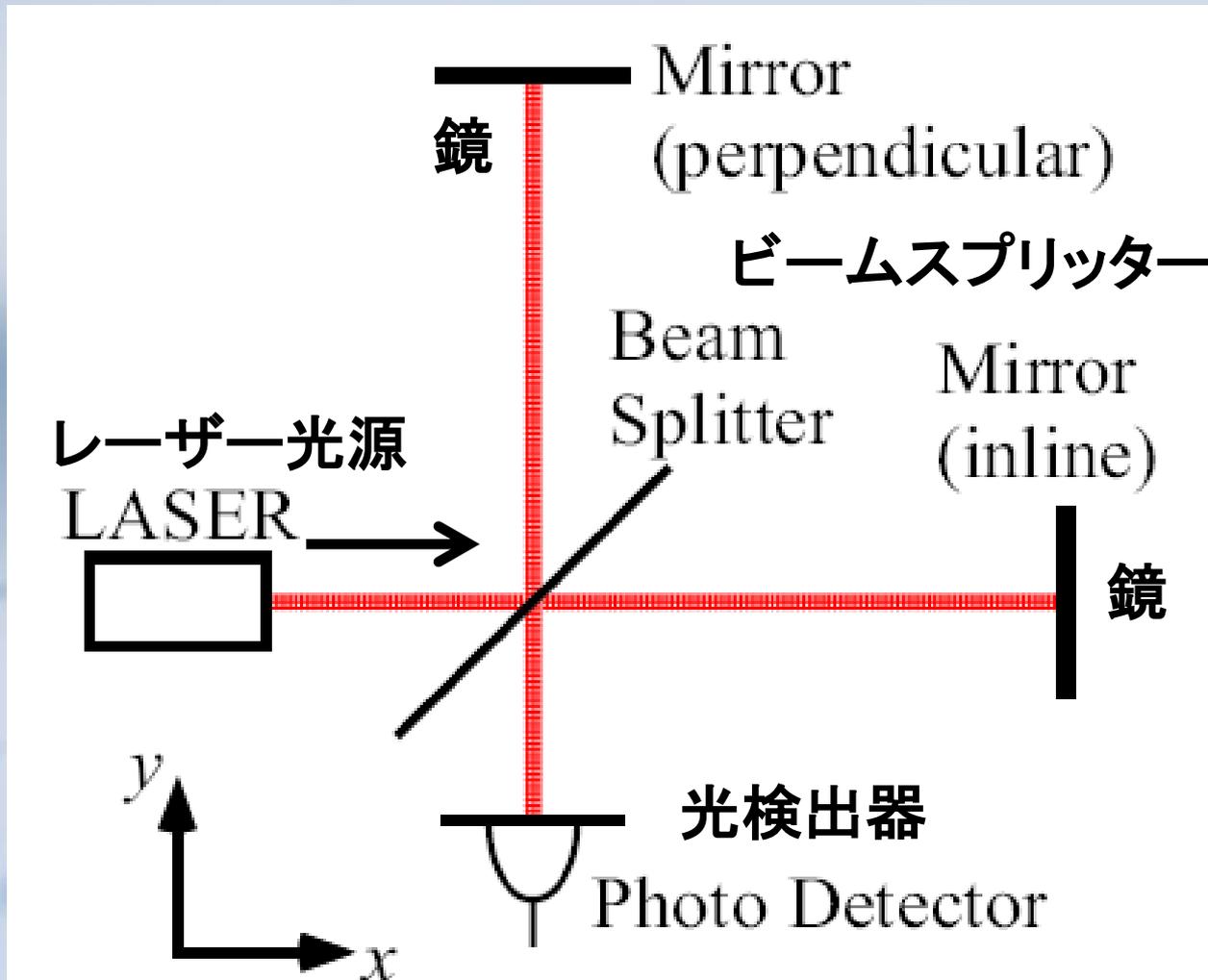
2.重力波の検出

マイケルソン干渉計



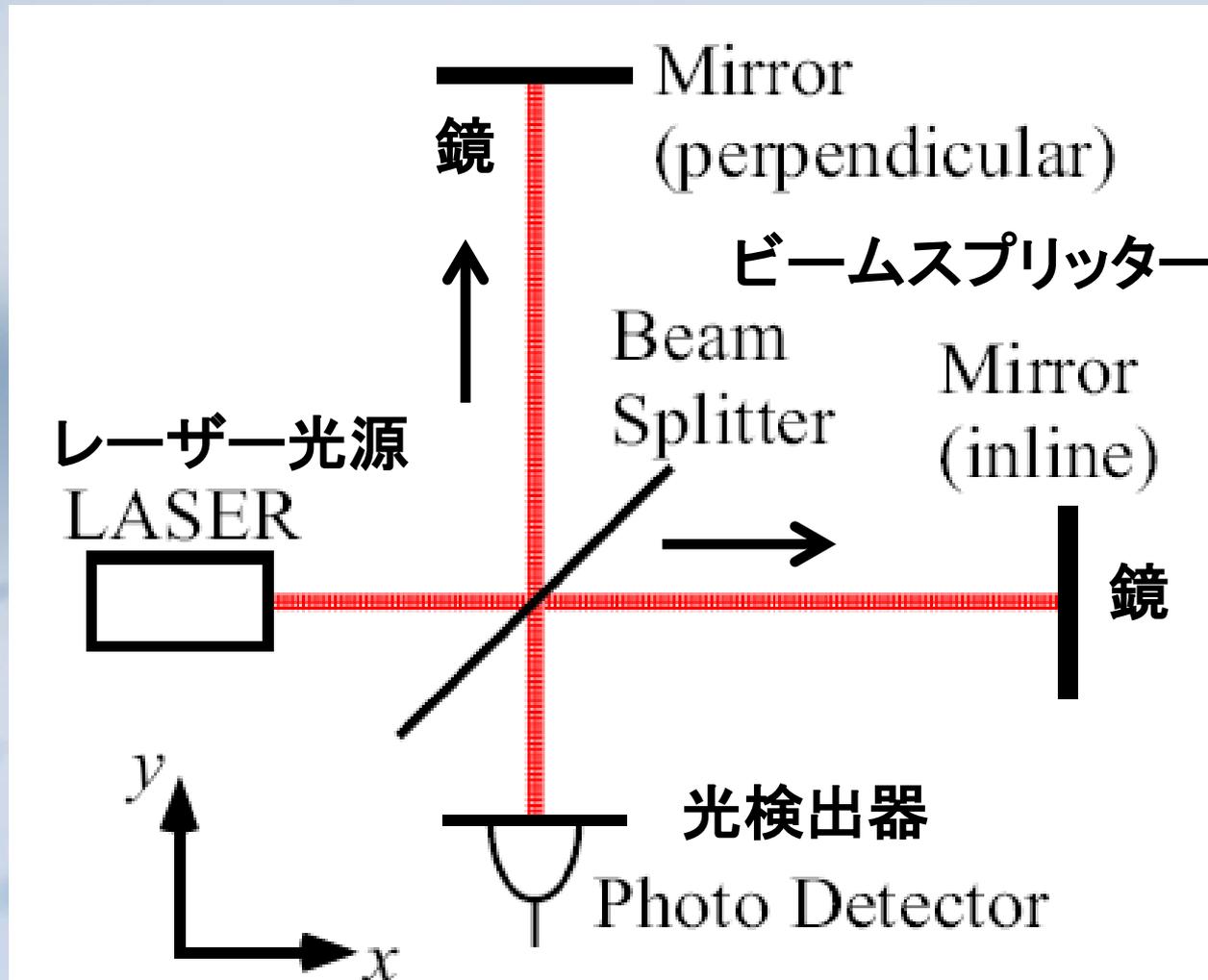
2.重力波の検出

(1)レーザー光源から光が出る



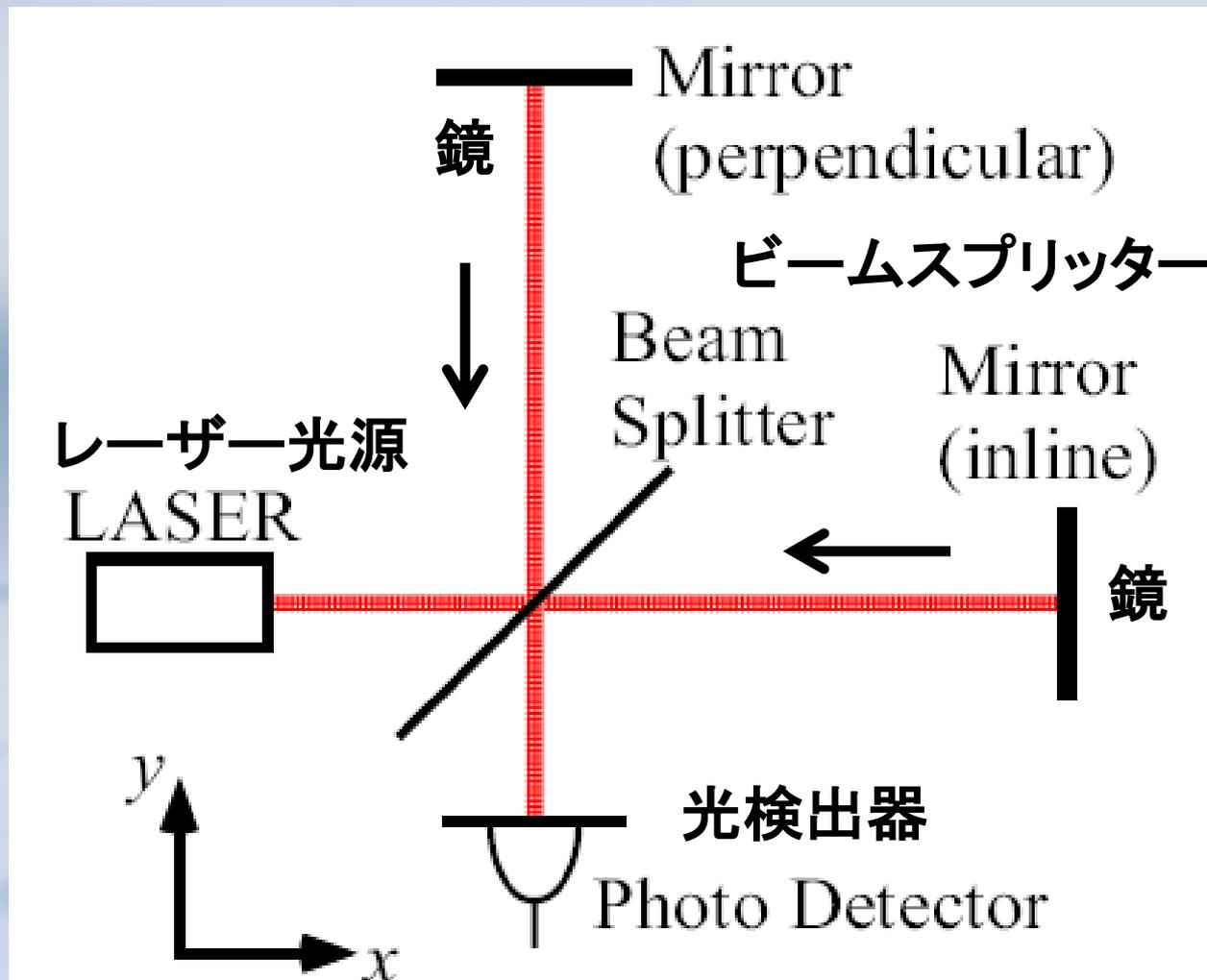
2.重力波の検出

(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



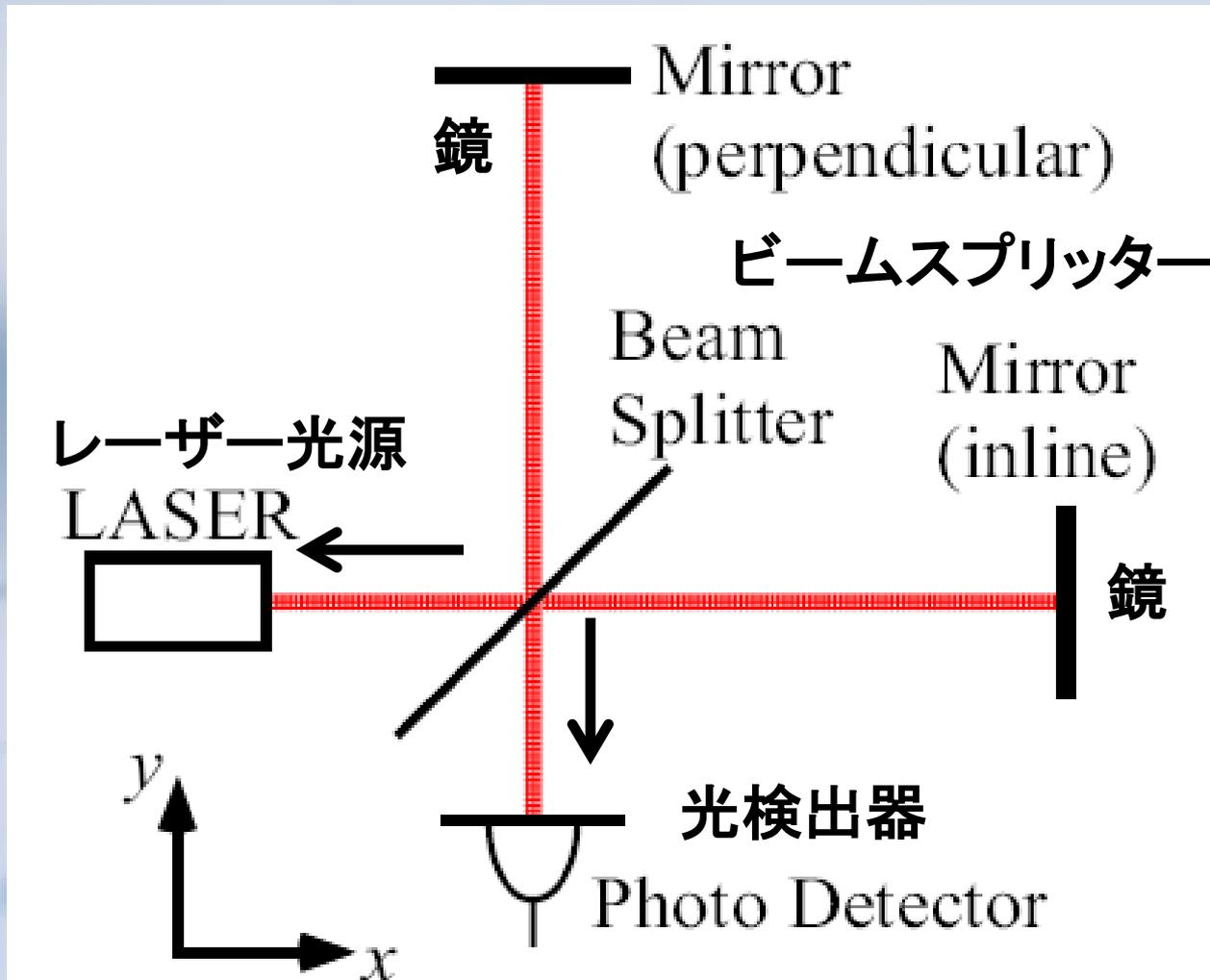
2.重力波の検出

(3) 鏡で反射されて戻る



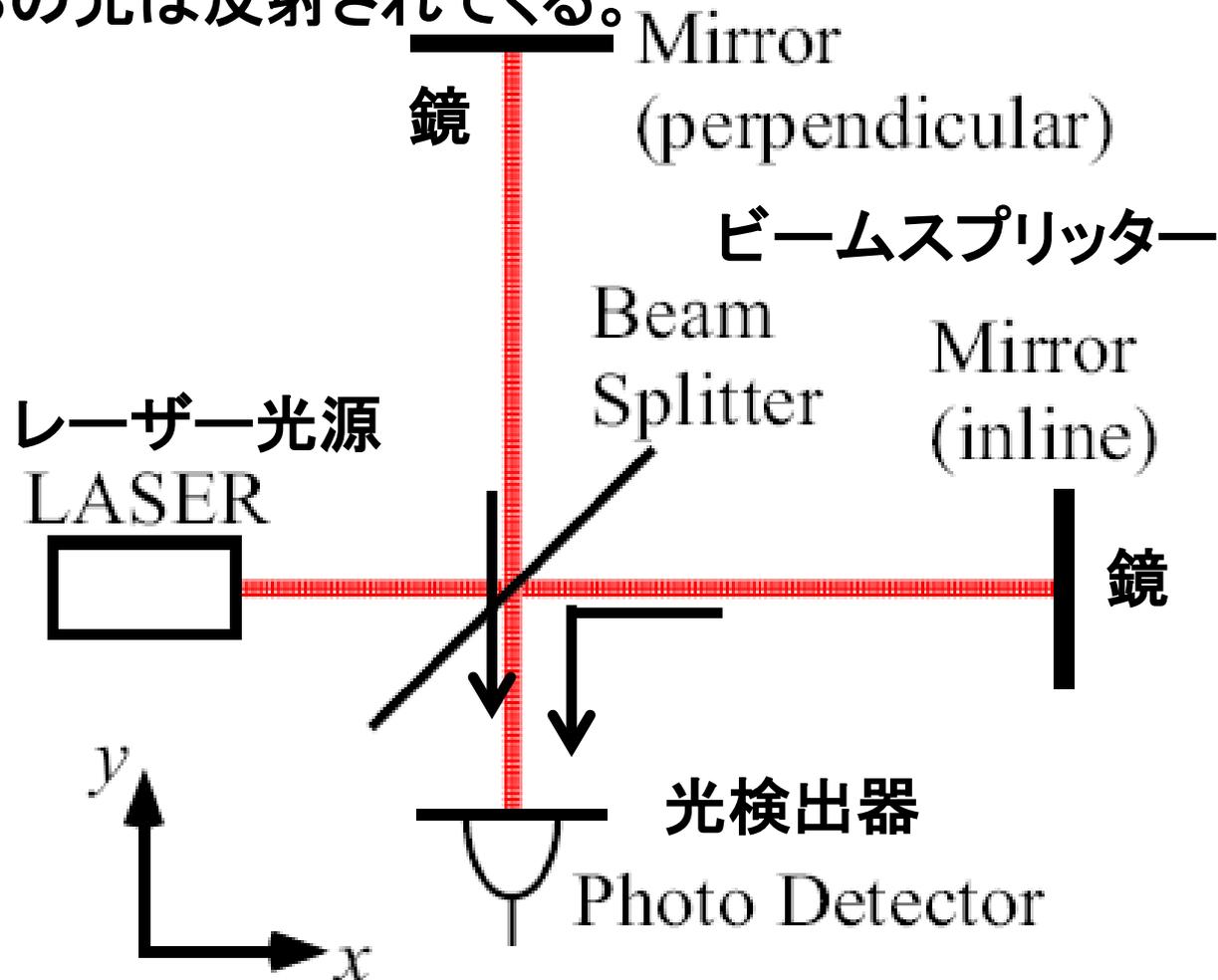
2.重力波の検出

(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



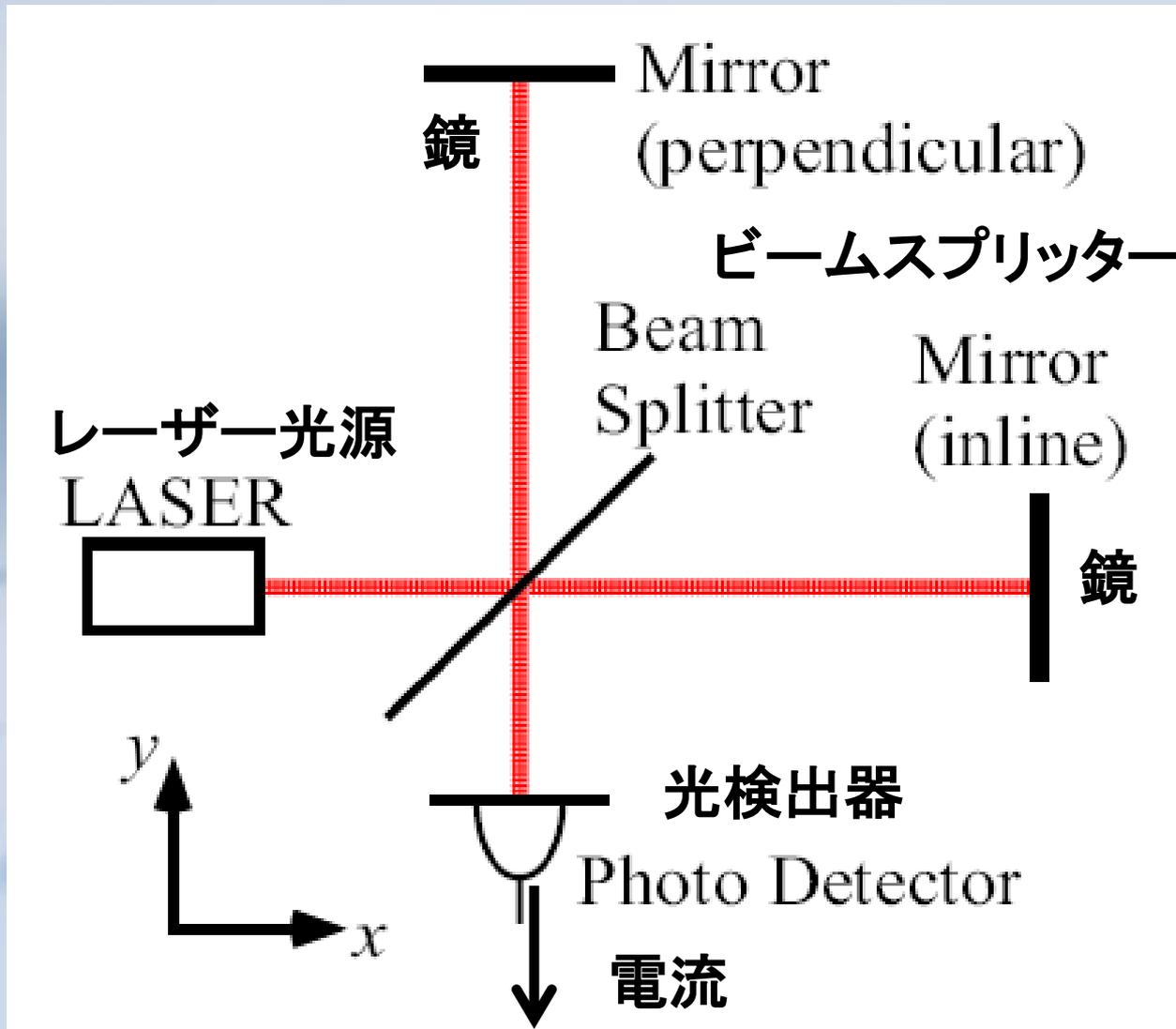
2.重力波の検出

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.重力波の検出

(5) 光検出器から光の強さに比例した電流が出る。



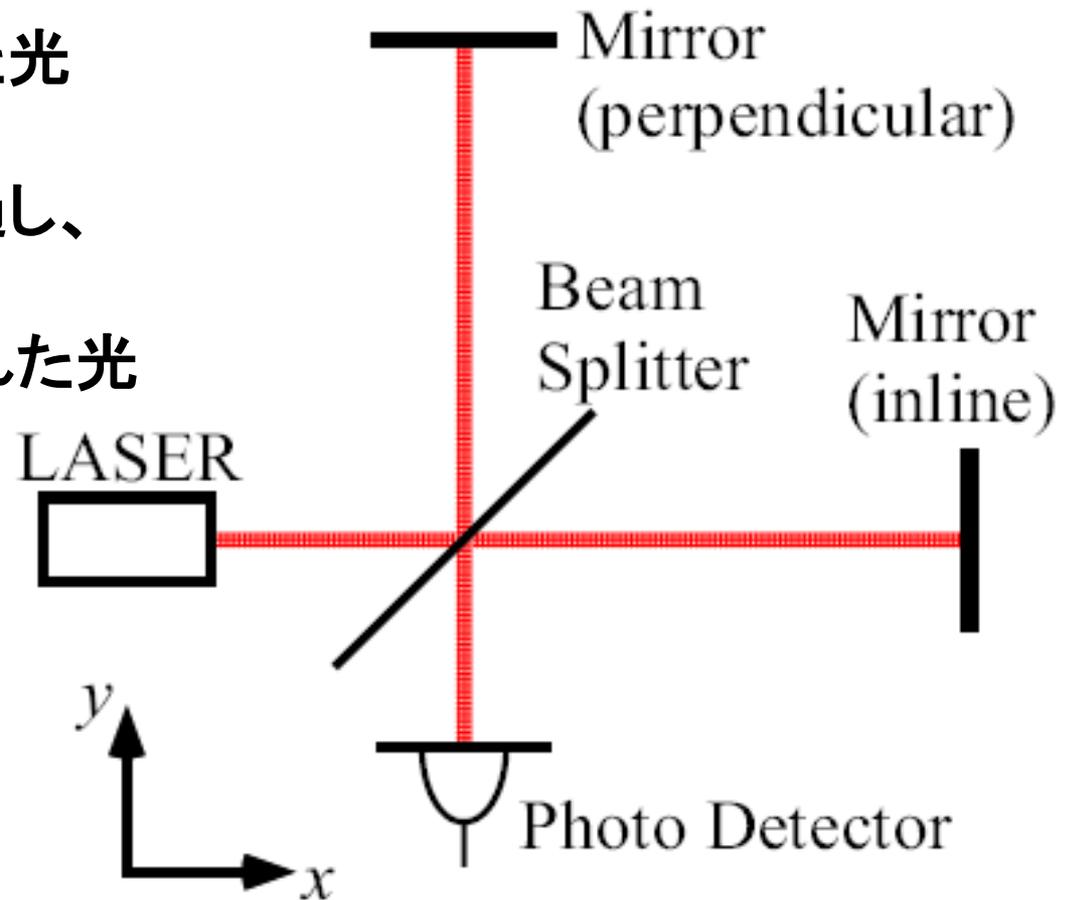
2.重力波の検出

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

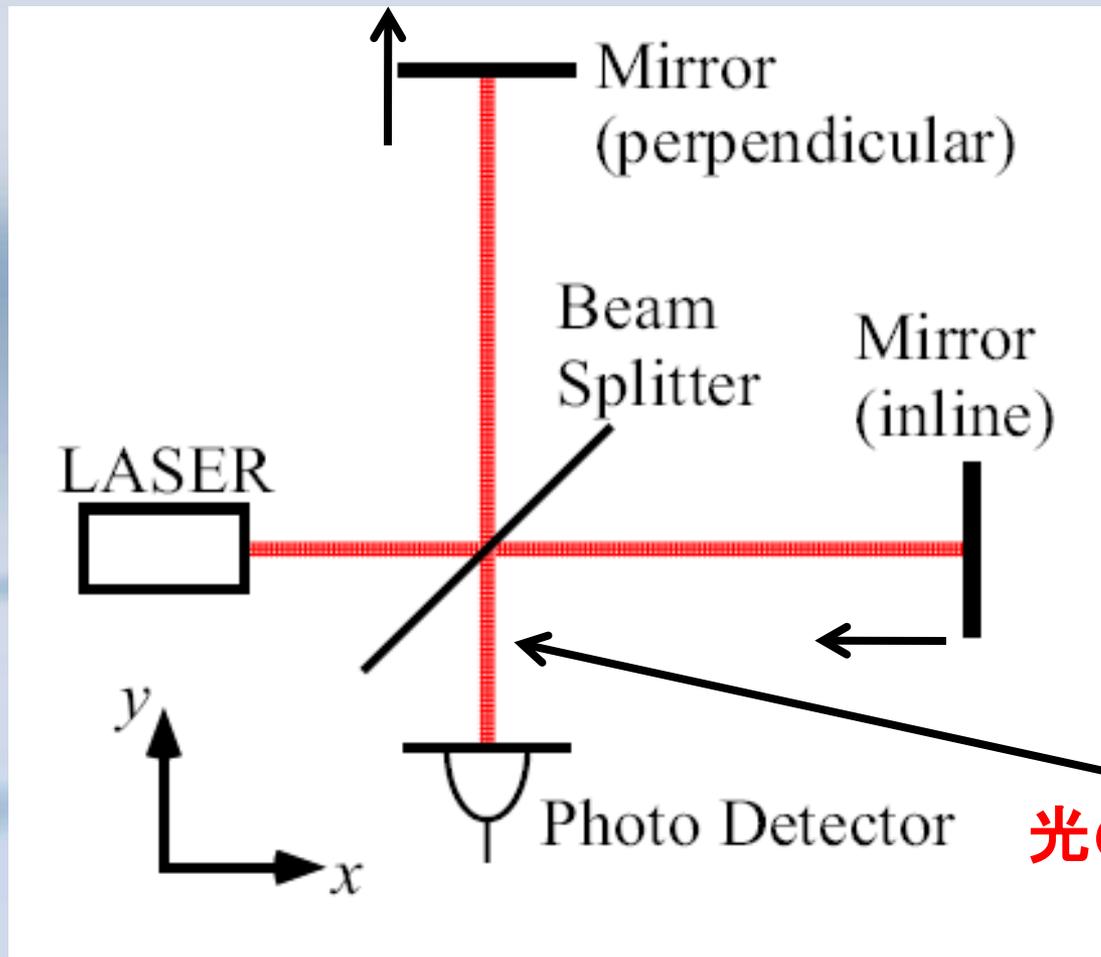
(2)ビームスプリッターを透過し、
画面右の鏡で反射され、
ビームスプリッターで反射された光

光検出器に来る光
(1)と(2)の足し算
光の干渉



2.重力波の検出

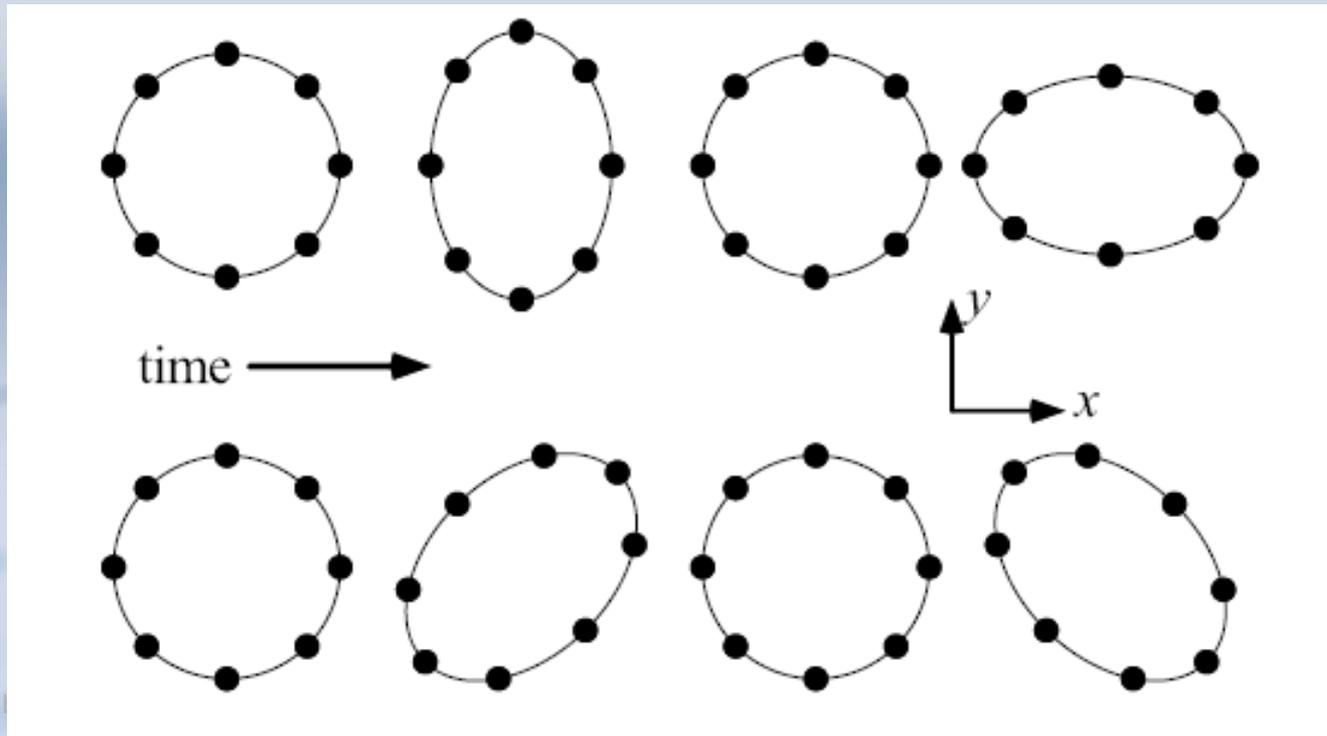
マイケルソン干渉計: 腕の長さの差を精密に測定する装置
両方の鏡が同じ方向にずれても検出できない。



2.重力波の検出

重力波とは何か

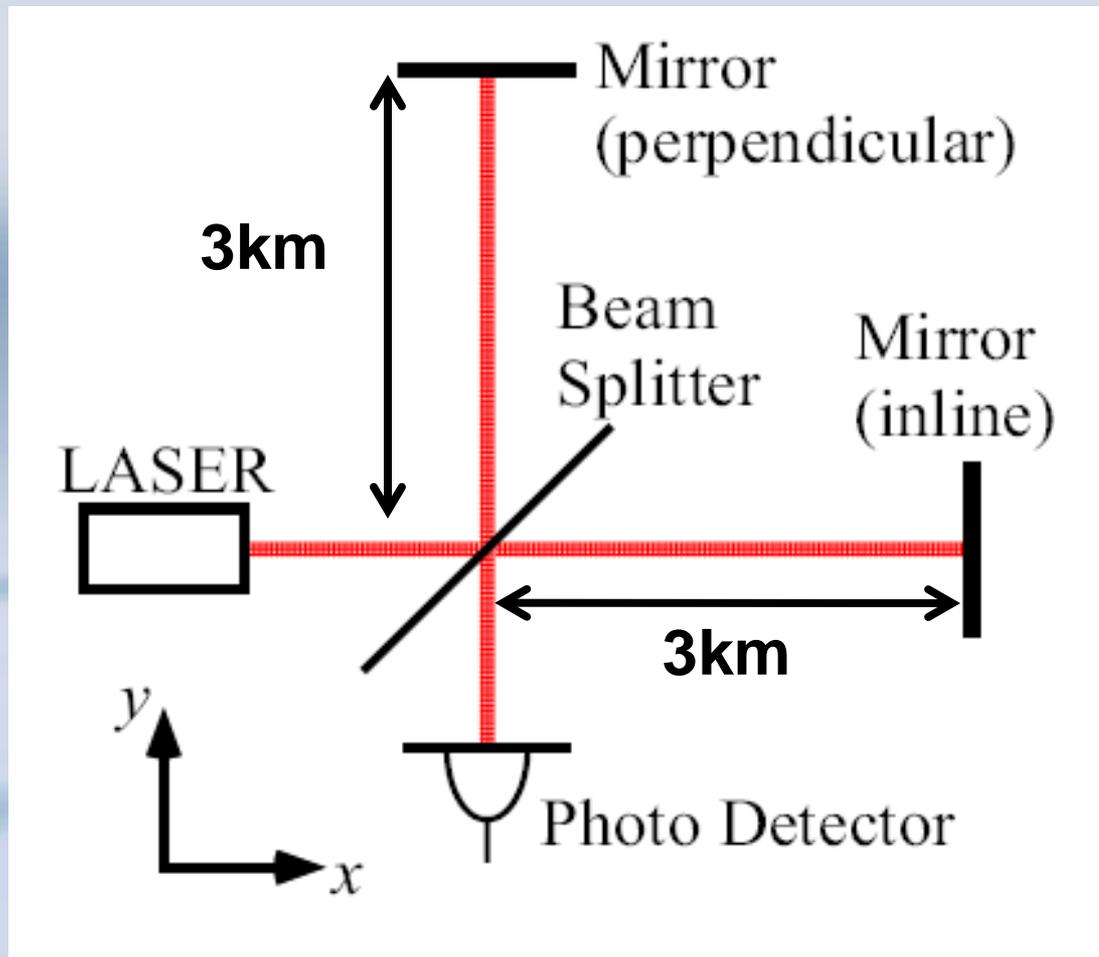
重力波が画面の垂直方向から来ると....



<http://spacefiles.jp>

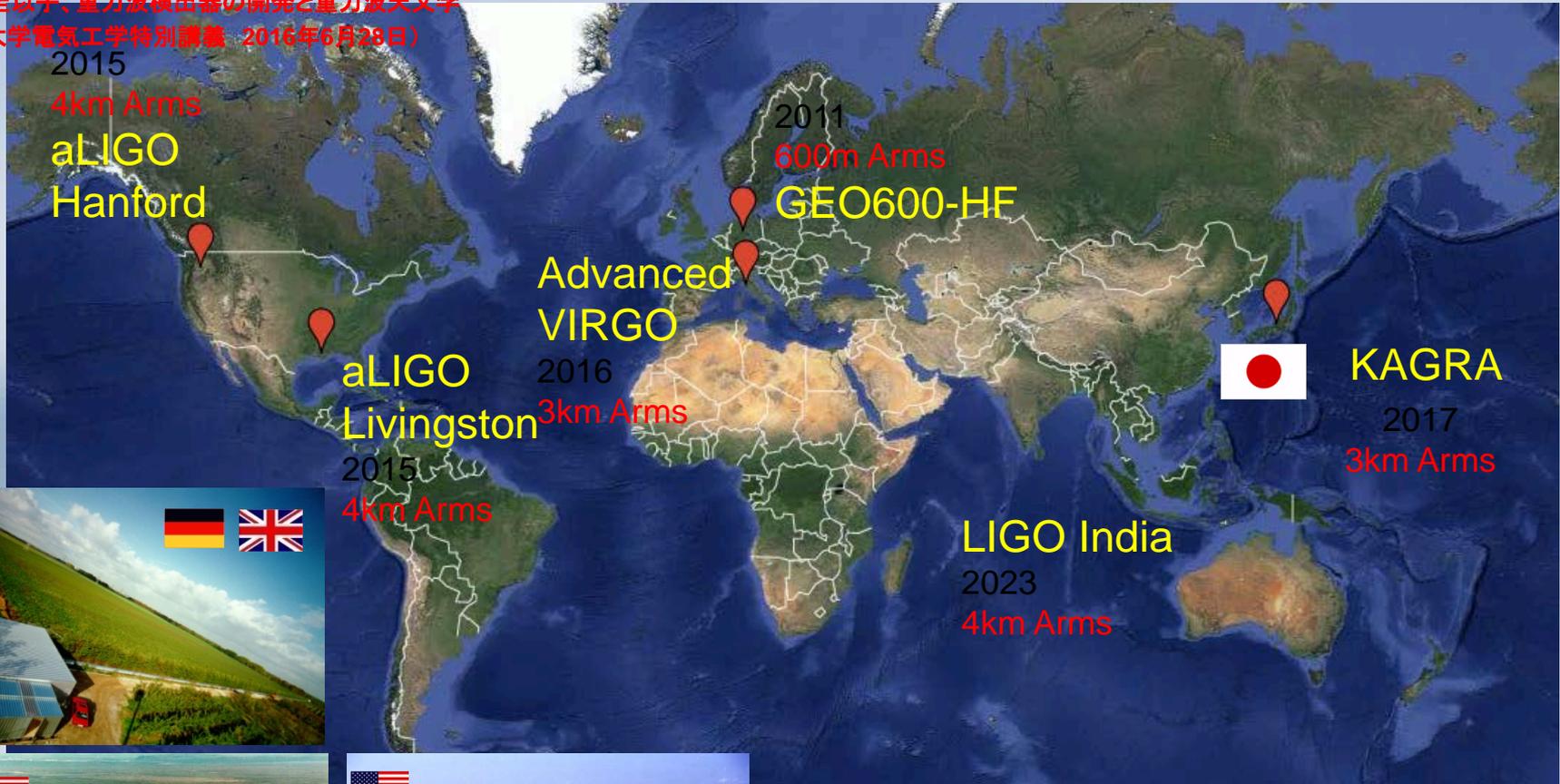
2.重力波の検出

腕が長い方が検出しやすいので....

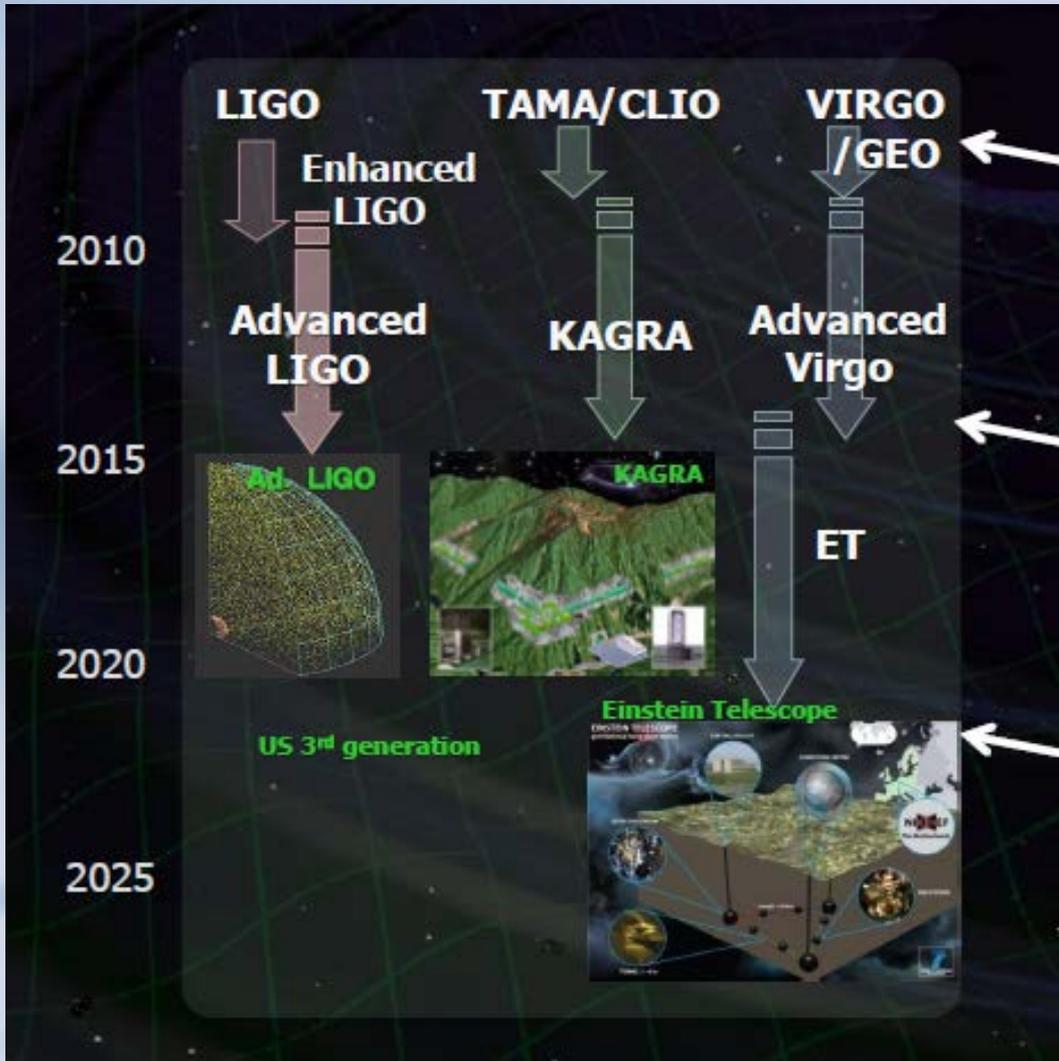


世界の重力波検出器ネットワーク

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)



2.重力波の検出



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

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



LIGOの立役者

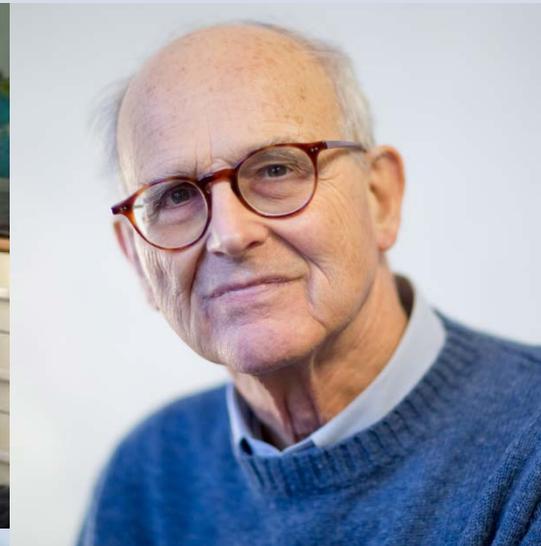
苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学
(大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



Kip Thorne



Ronald Drever



Rainer Weiss

今最もノーベル物理学賞に近い3人

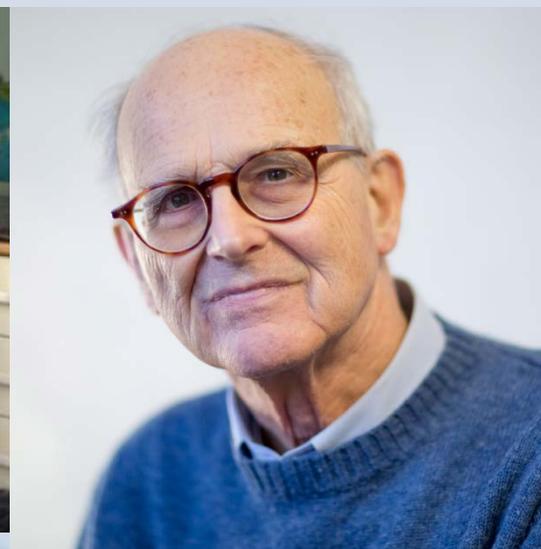
苔山 圭以子、重力波検出器の開発と重力波天文学
(大阪大学電気工学特別講義 2016年6月28日)



Kip Thorne



Ronald Drever



Rainer Weiss

今最もノーベル物理学賞に近い3人 だったのですが...

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「ブレークスルー賞」な
どを受賞した。【共同】



Ronald Drever

毎日新聞 2017/3/10

3. ブラックホールと重力波

© 2016 ICG, SoSe, No. 0, Introduction

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. ブラックホールと重力波

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

(1)物が吸い込まれるとき出るX線を見る

(2)連星の片方がブラックホールだったらもう片方の星の運動からブラックホールかどうか判断できる。

->まわりに物質がなかったら、見ることはできない

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

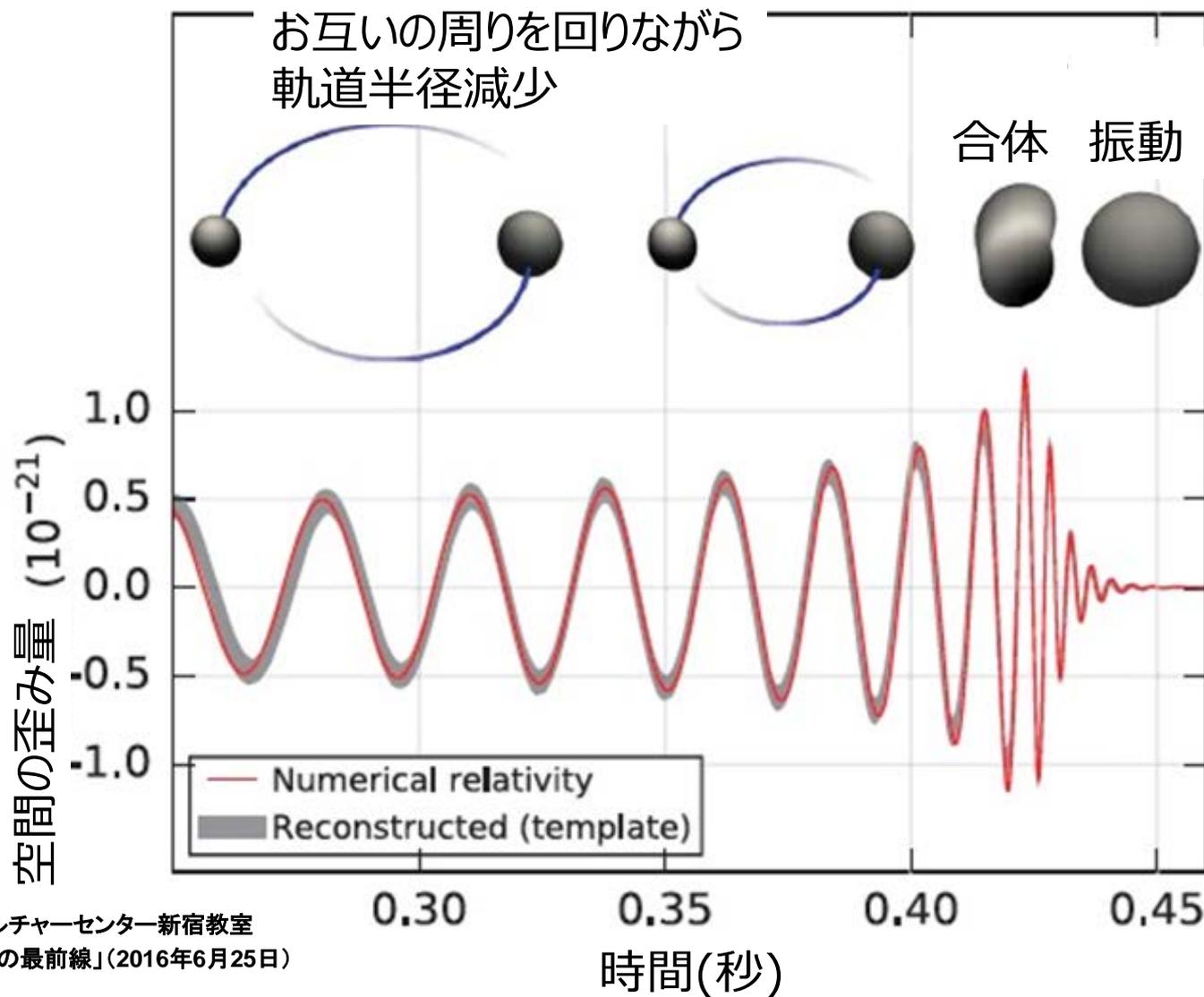
比較的重い星が最後に爆発してできる

高質量：太陽質量の100万倍以上

銀河中心に存在している

3. ブラックホールと重力波

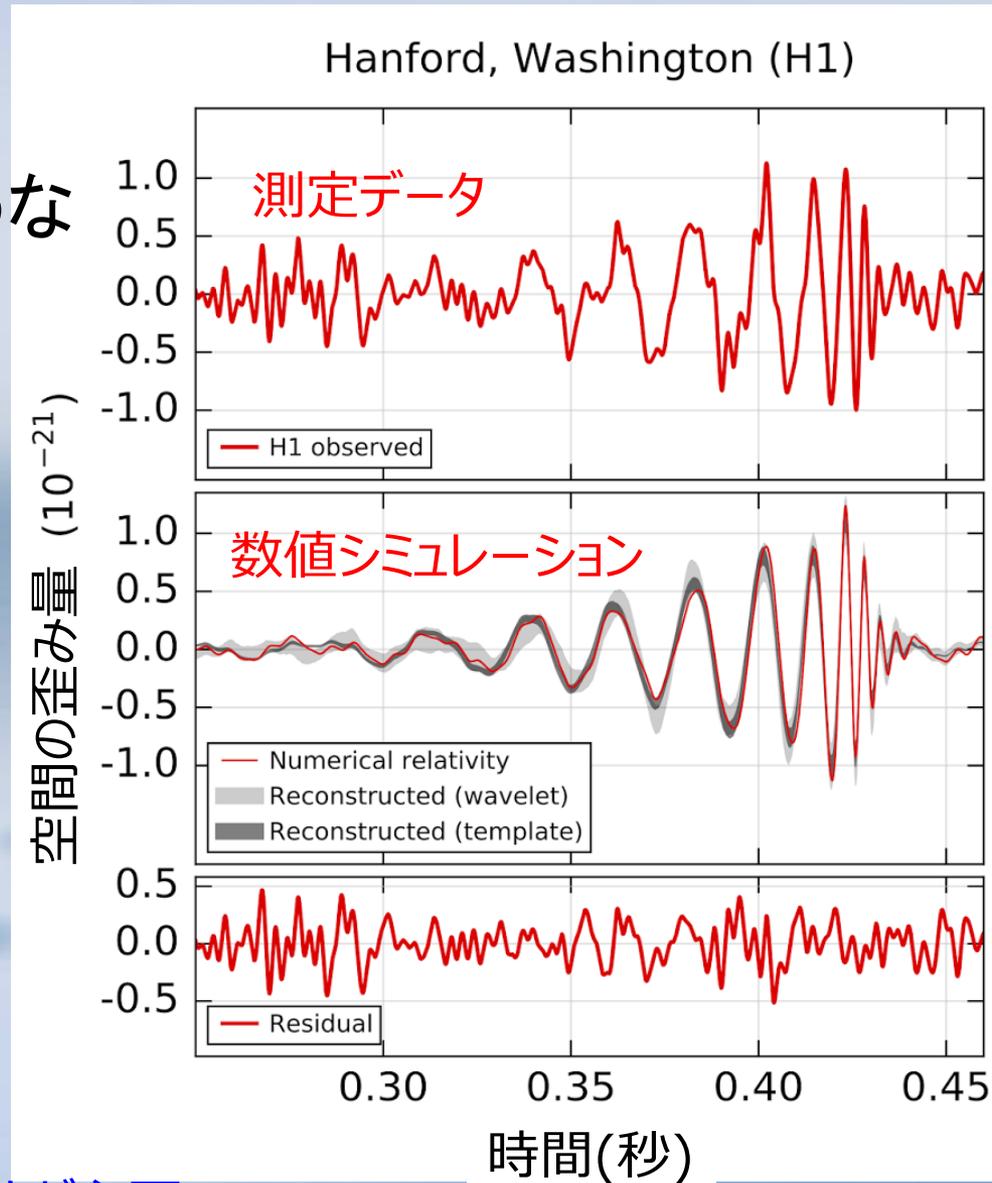
ブラックホールの合体からきた重力波をとらえた！



3. ブラックホールと重力波

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。



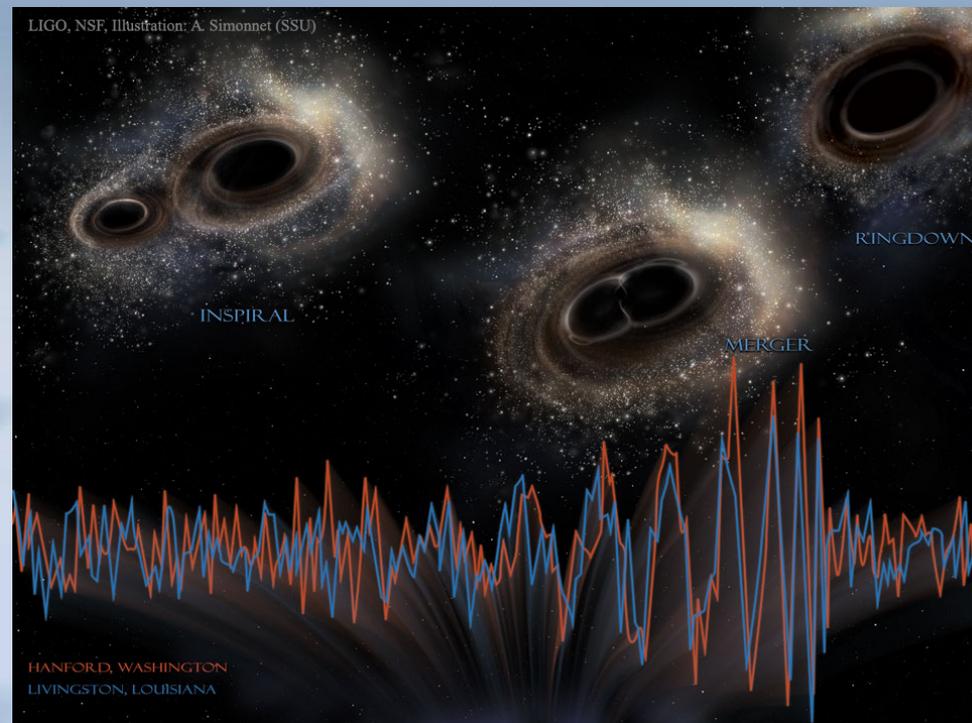
重力波の波形の計算にはスーパーコンピュータが必要

3. ブラックホールと重力波

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)



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

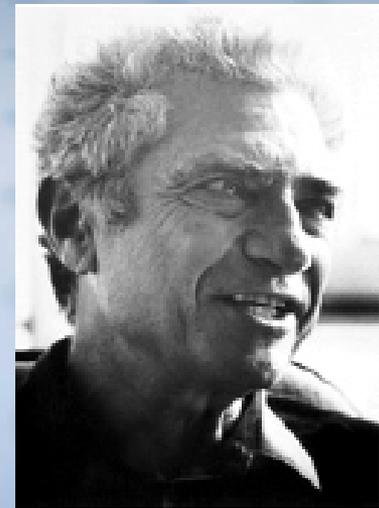
The Nobel Prize in Physics 1988



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

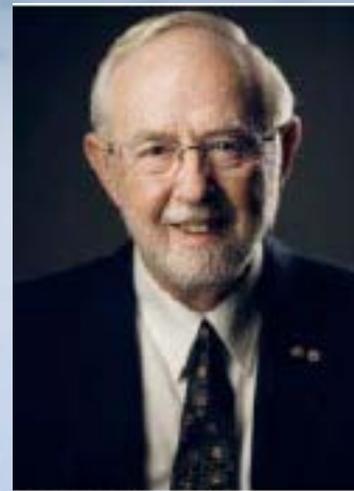


Photo: A. Mahmoud
Arthur B. McDonald
Prize share: 1/2

4.重力波検出器の将来

ニュートリノの例

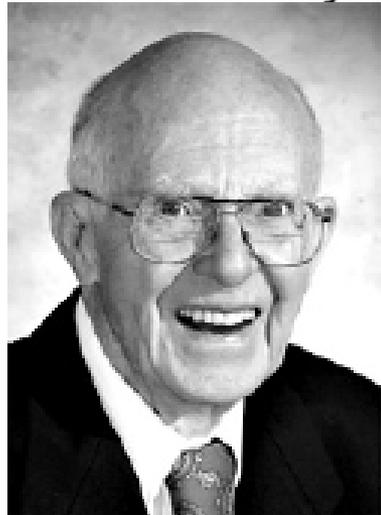
検出は極めてむつかしく初検出はノーベル賞。

->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



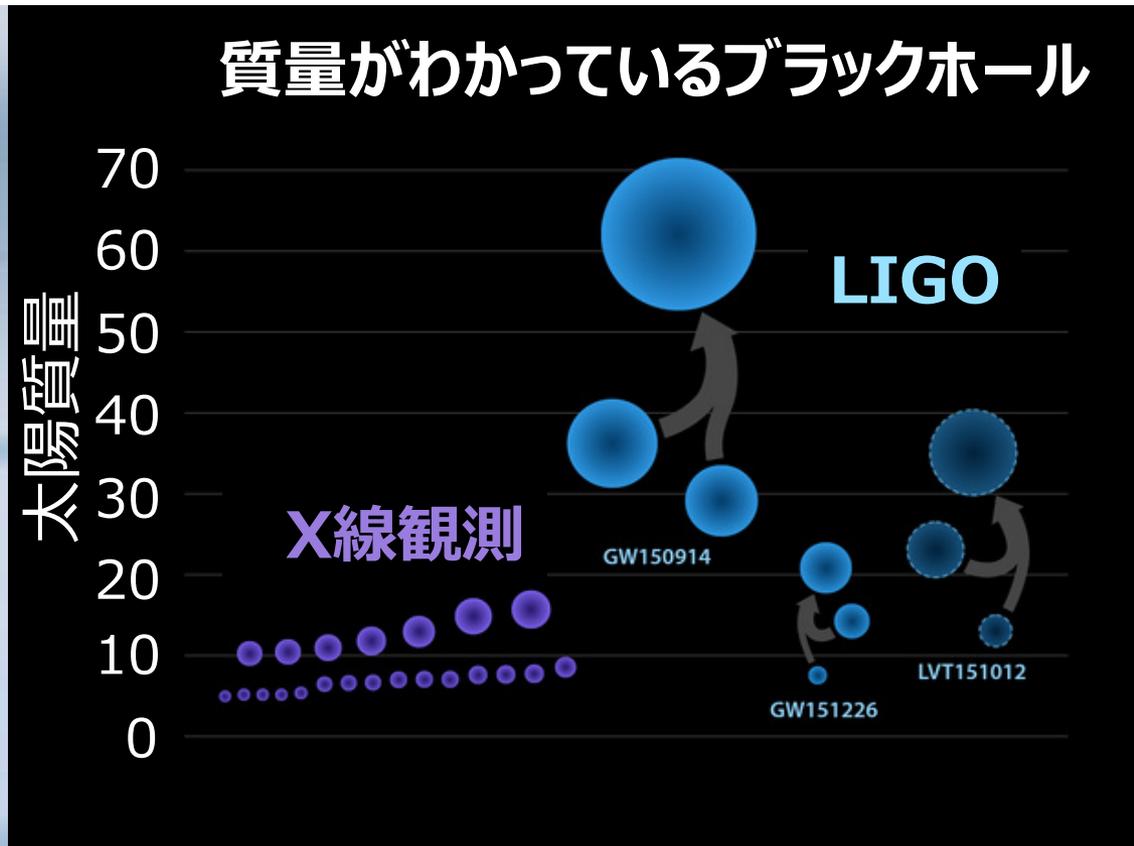
Masatoshi Koshihara
Prize share: 1/4

4.重力波検出器の将来

- **ゴールではなくスタート。**人類は新たな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。
- ブラックホール連星だけ考えても...

4.重力波検出器の将来

- 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

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**遠く**までみる:より**感度**のよい検出器



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
天文学が花開く

4.重力波検出器の将来

より精度よく**方向**をきめる

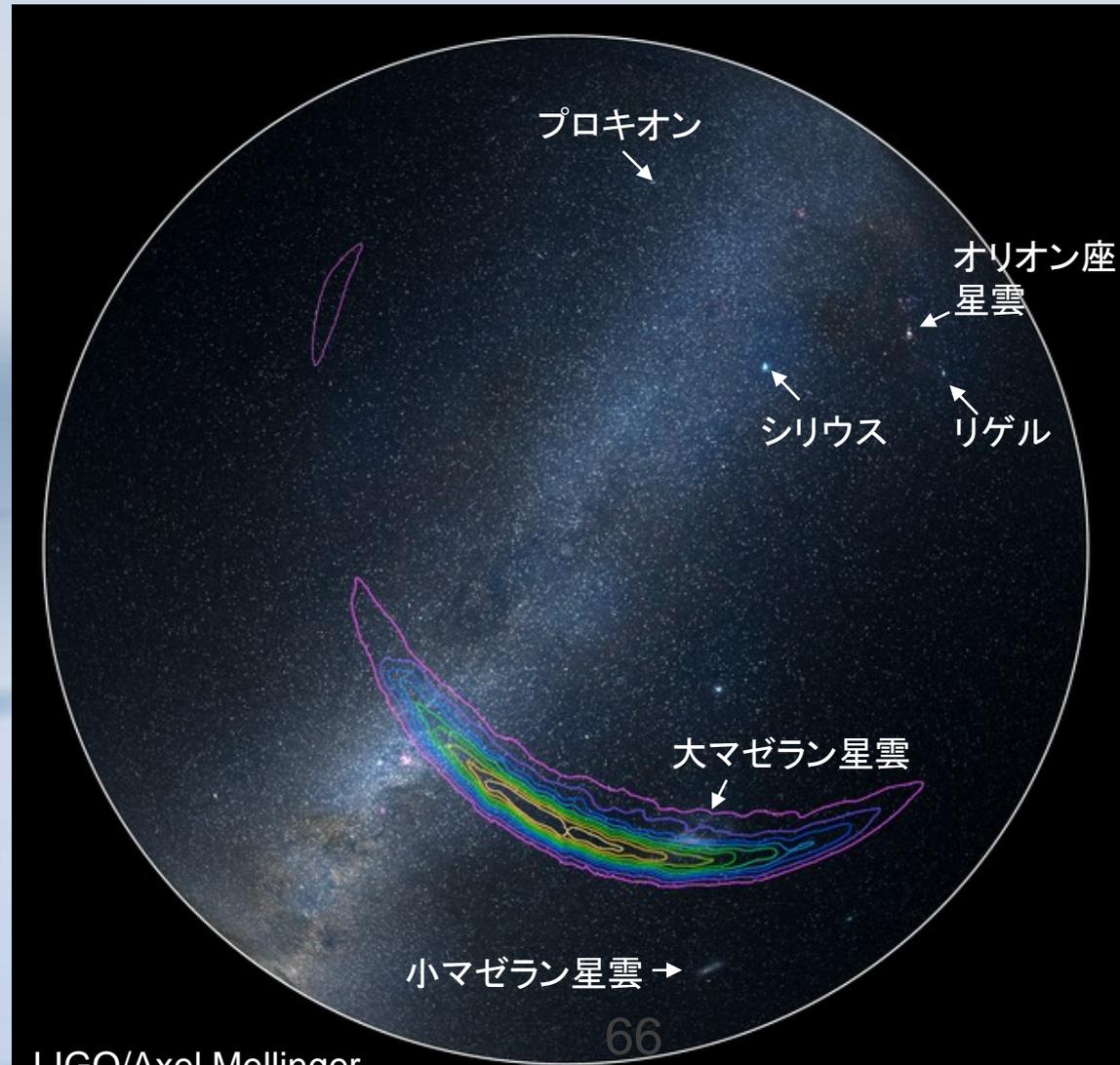
たとえば銀河付近に集中しているのか、もしくは関係なく一様に分布しているのか

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。

4.重力波検出器の将来

- 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
- より多くの
検出器が必要



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のある場所：岐阜県飛騨市神岡町
地下にある鉱山跡のトンネルを利用して、
宇宙線研の最先端研究施設がたくさんある！**



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

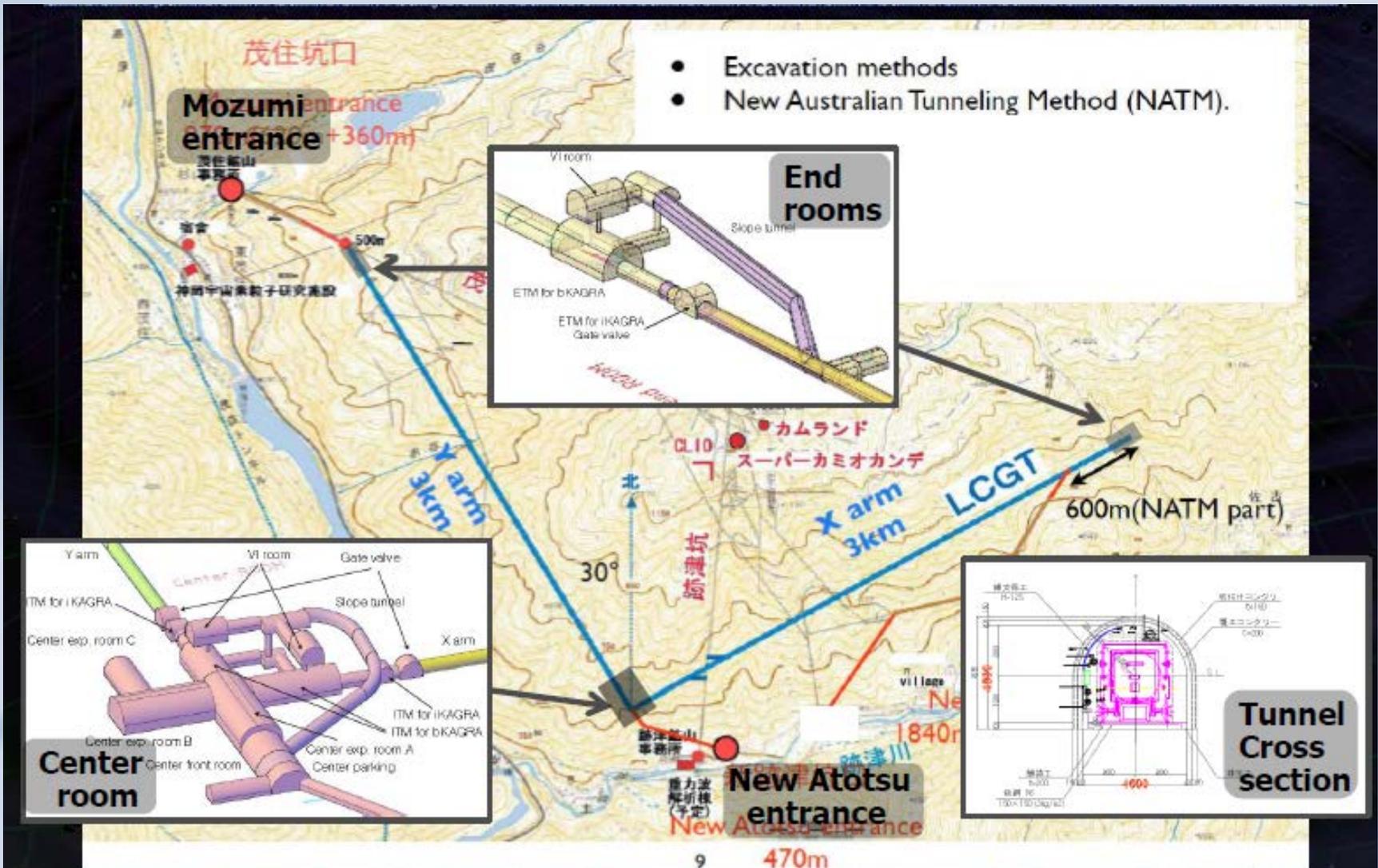


冬のオフィス

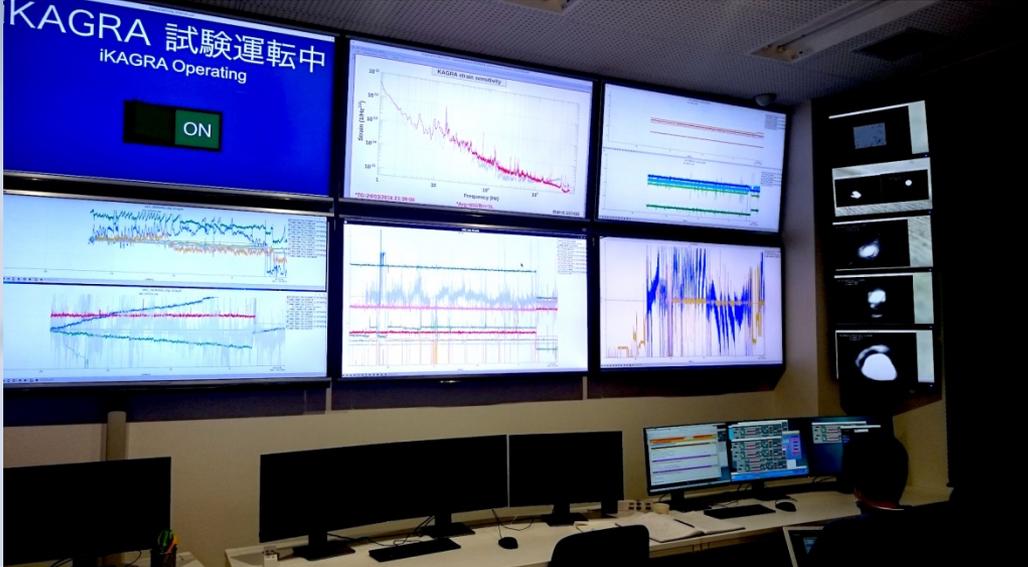
4.重力波検出器の将来

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)



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)

3kmのアームトンネル

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

KAGRAの特徴

地下サイト

Y arm



X arm



低温ミラー

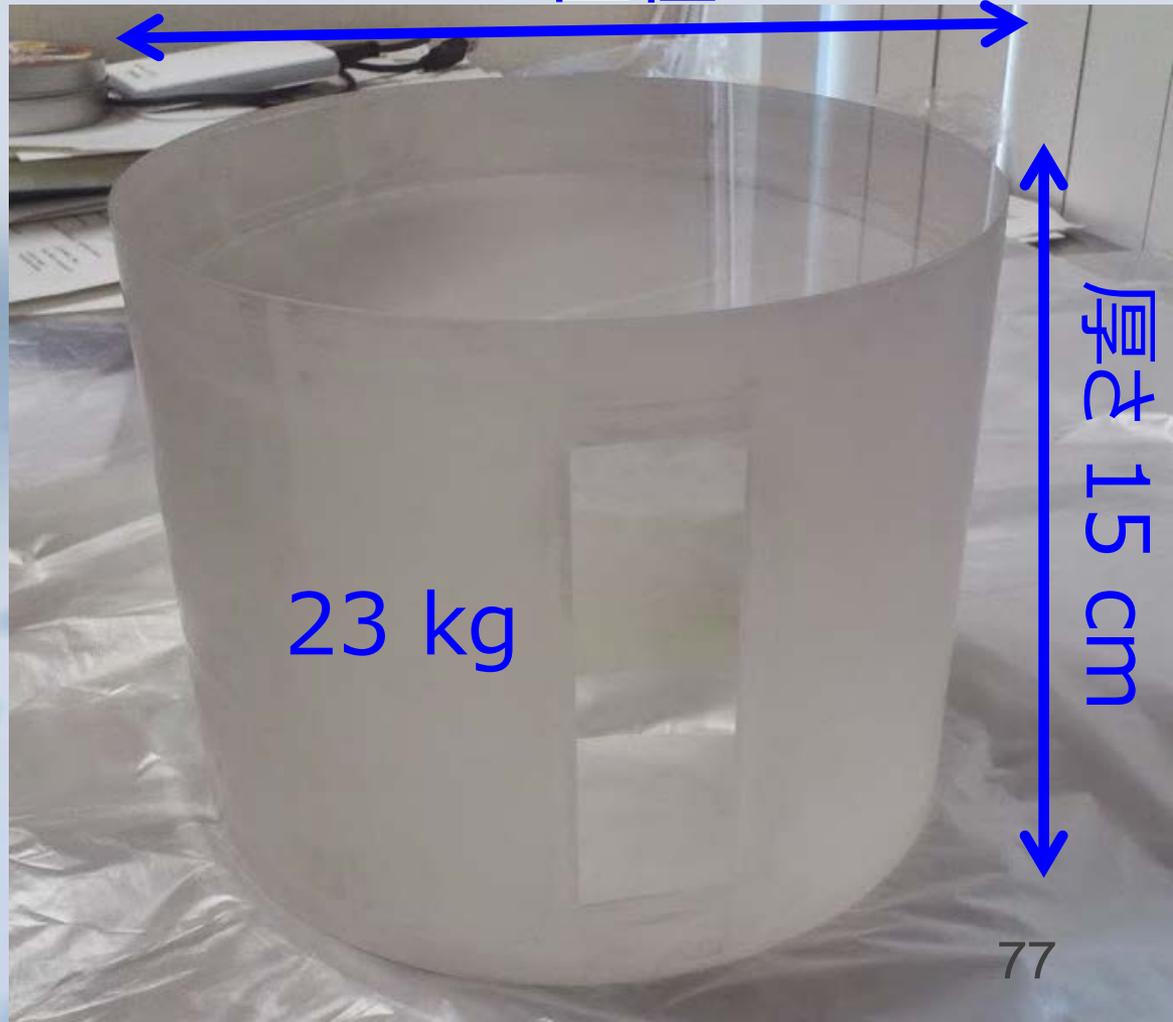


鏡の冷却装置 (クライオスタット)



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



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。実際に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で**KAGRA**を建設中。

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

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

とくになに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

講義も実験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
いうことは多い。

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。

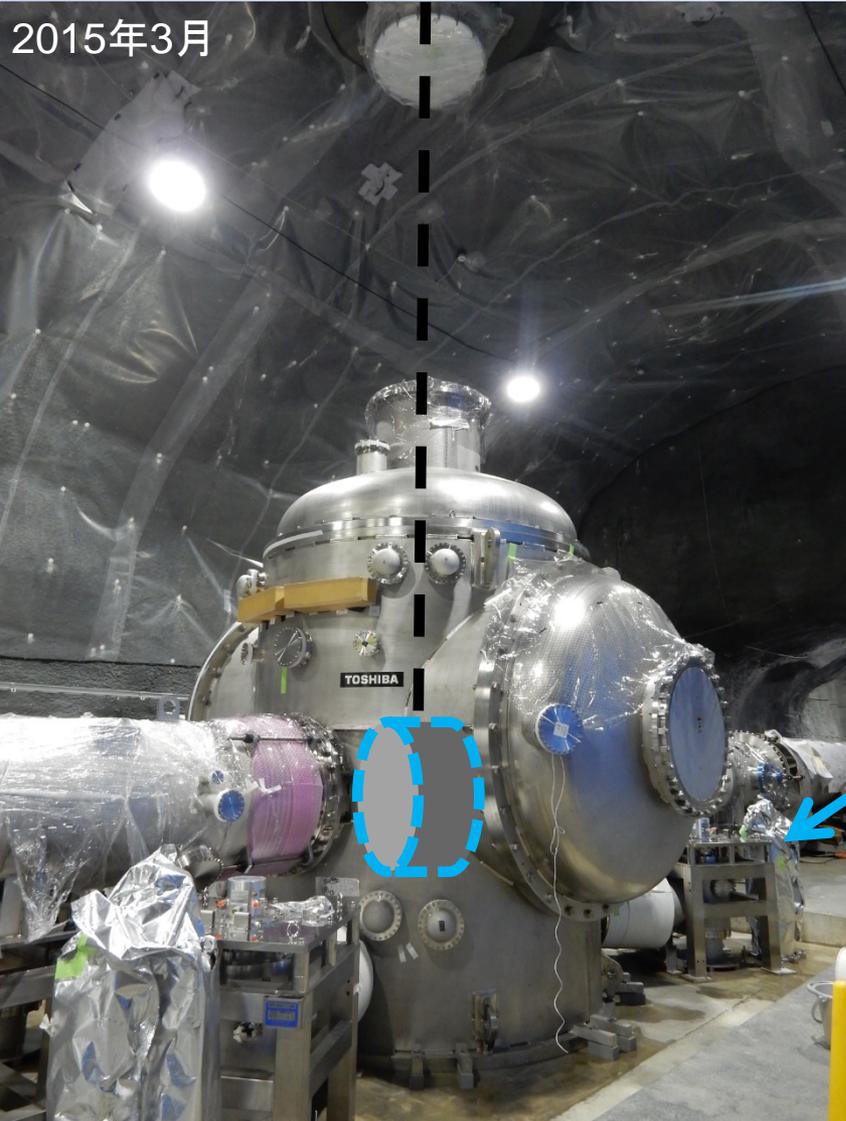
国語

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。

KAGRAの低温装置

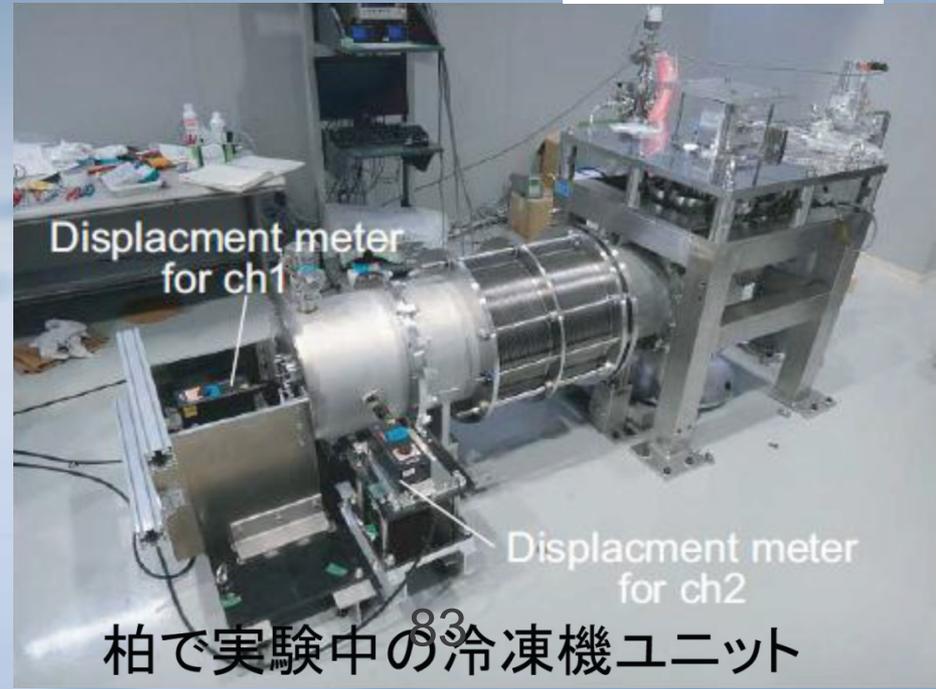
- 低振動の冷凍機を開発



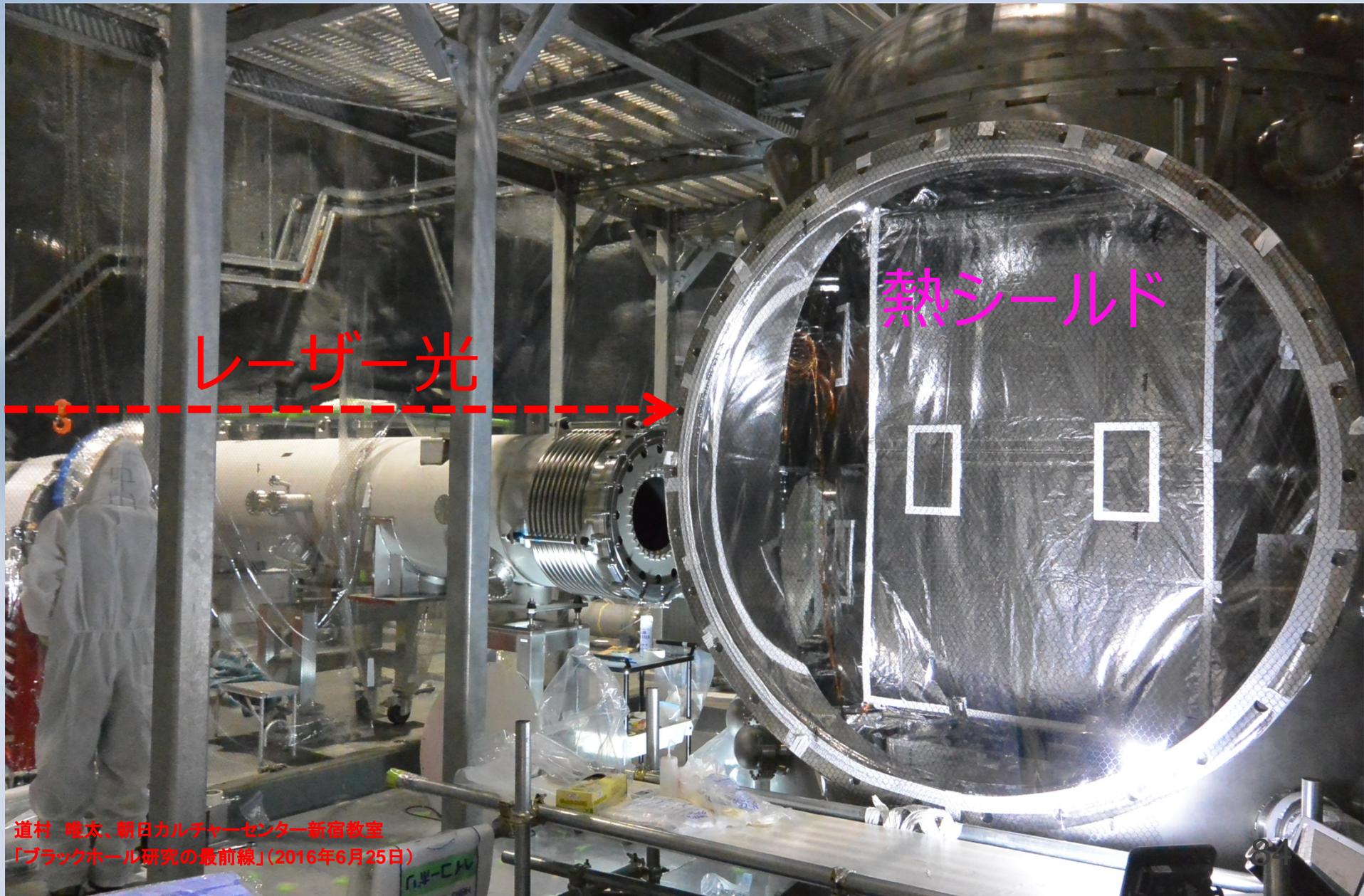
道村 唯太、朝日カルチャーセンター新宿教室
「ブラックホール研究の最前線」(2016年6月25日)



冷凍機



KAGRAの低温真空槽



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.)

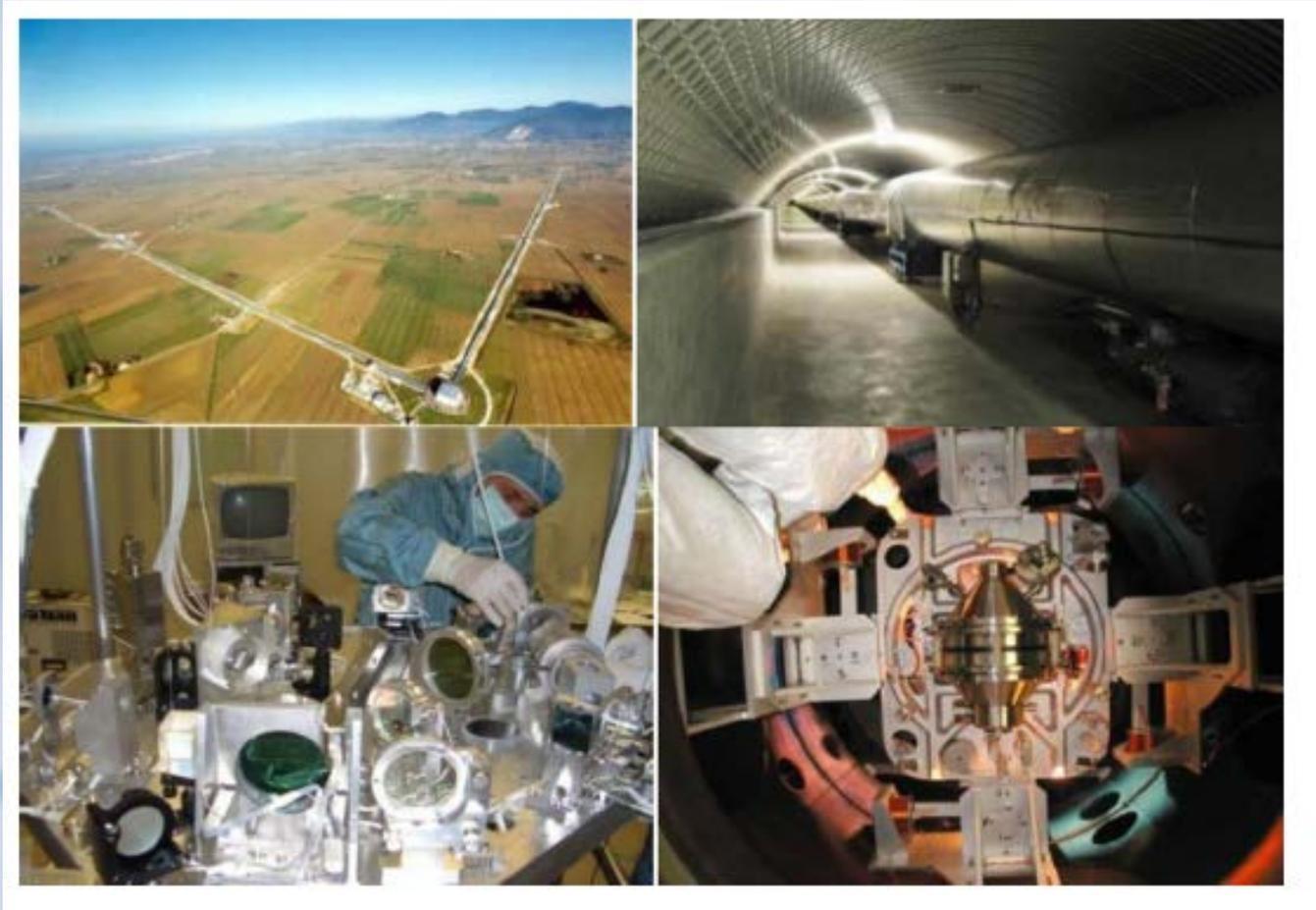


4 km, Hanford and Livingston (**3000 km distance**) (U.S.A.)

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

世界の重力波検出器ネットワーク

VIRGO (Italy and France)



3 km, Pisa (Italy)

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

世界の重力波検出器ネットワーク

GEO (Germany and U.K.)



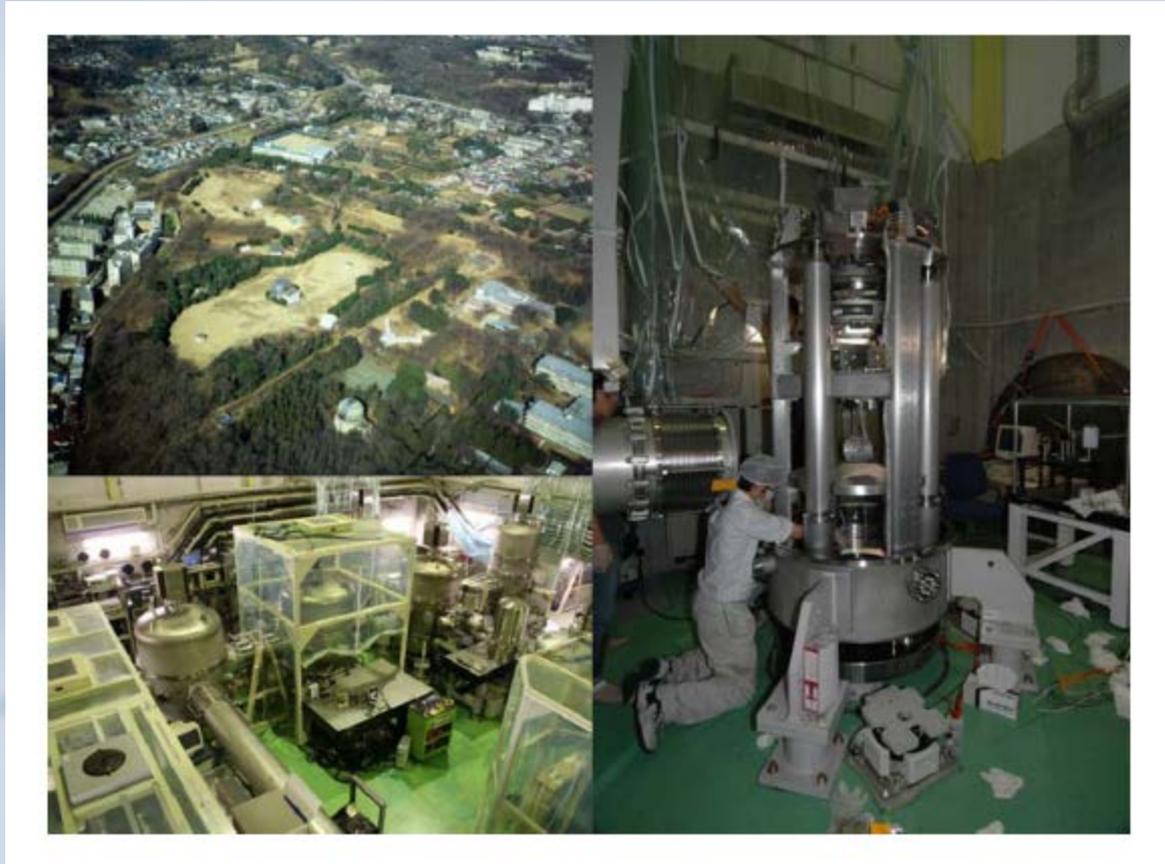
Figure 8. Aerial view of GEO600 (left) and the instrument inside the central building (right, a 2Pi view) (courtesy of GEO).

600 m, Hannover (Germany)

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

世界の重力波検出器ネットワーク

TAMA (Japan)

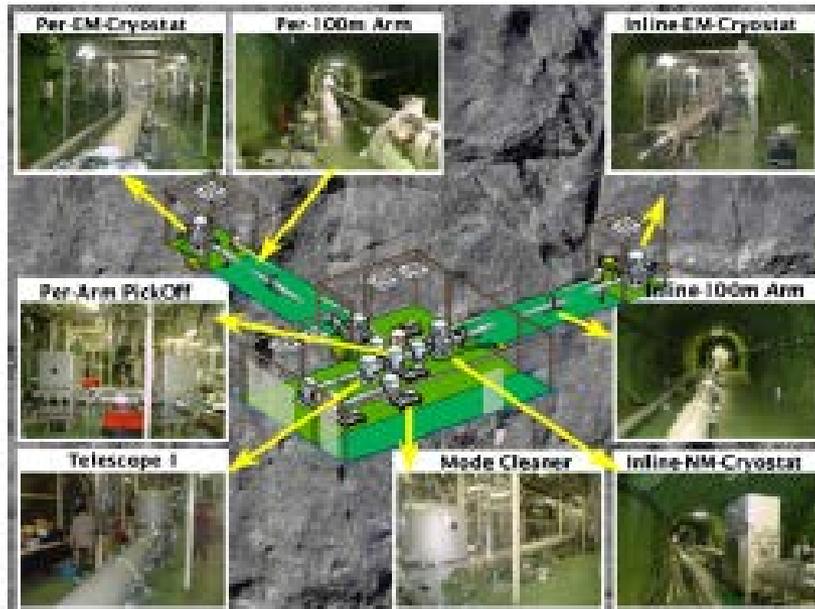


300 m, Tokyo (Japan)

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

世界の重力波検出器ネットワーク

CLIO (Japan)



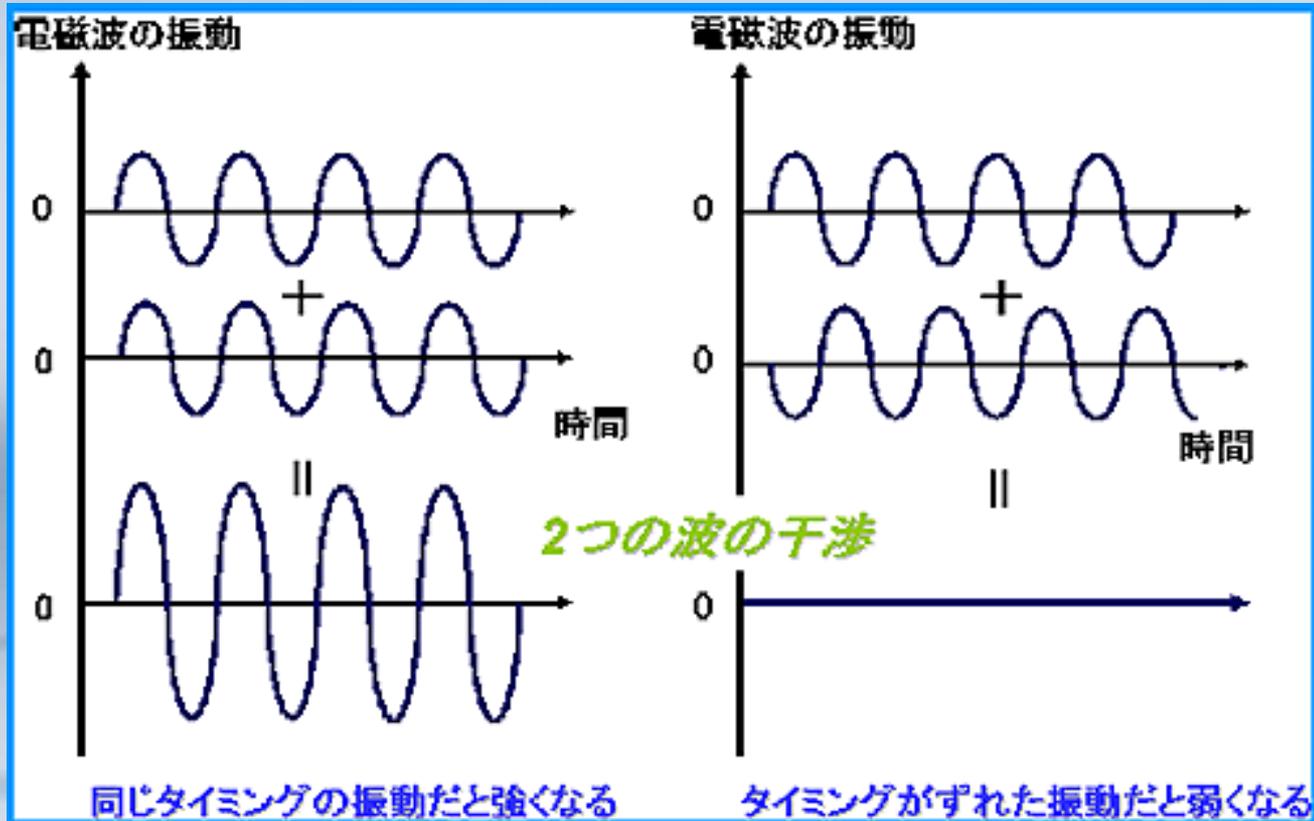
100 m, Kamioka (Japan)

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

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。



<http://www.miyazaki-gijutsu.com/series4/densi0713.html>

3つの観測例について

- 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？

