

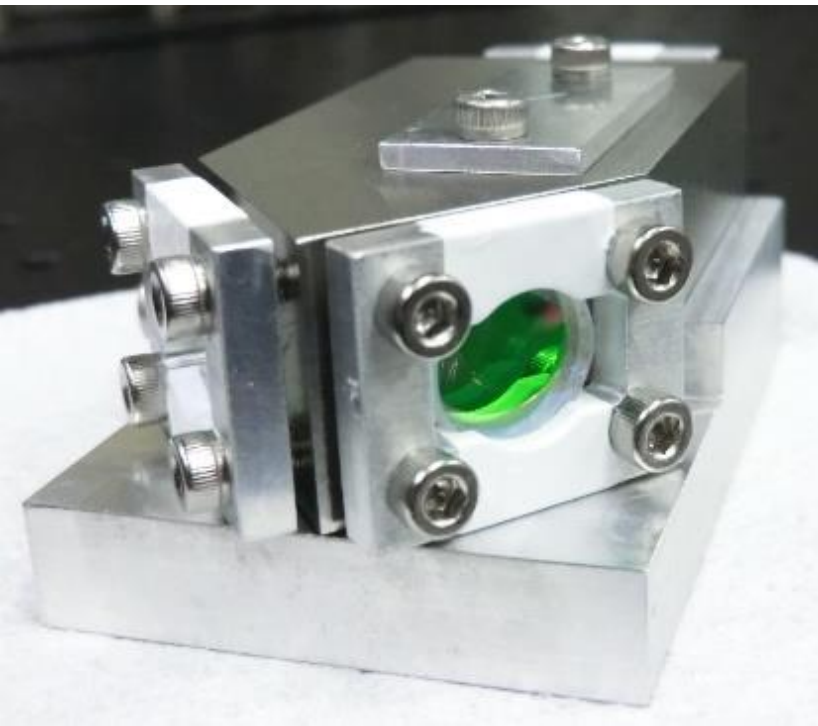
電気情報工学特別講義 第1回

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

自己紹介

- 道村唯太 (みちむら ゆうた)
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻 助教
- 1987年生まれ 神奈川県横浜市出身
- 新潟に来るのは2回目
- 重力波実験・相対論実験



講義の目的

- レーザー応用分野の1つである重力波望遠鏡について理解する
- 3日間、全8回
- 毎日最後にレポートを課す
その場で提出(翌日でもOK)
3日目分は3限後と4限後の2回、その場で
レポート内容は最初に明かします

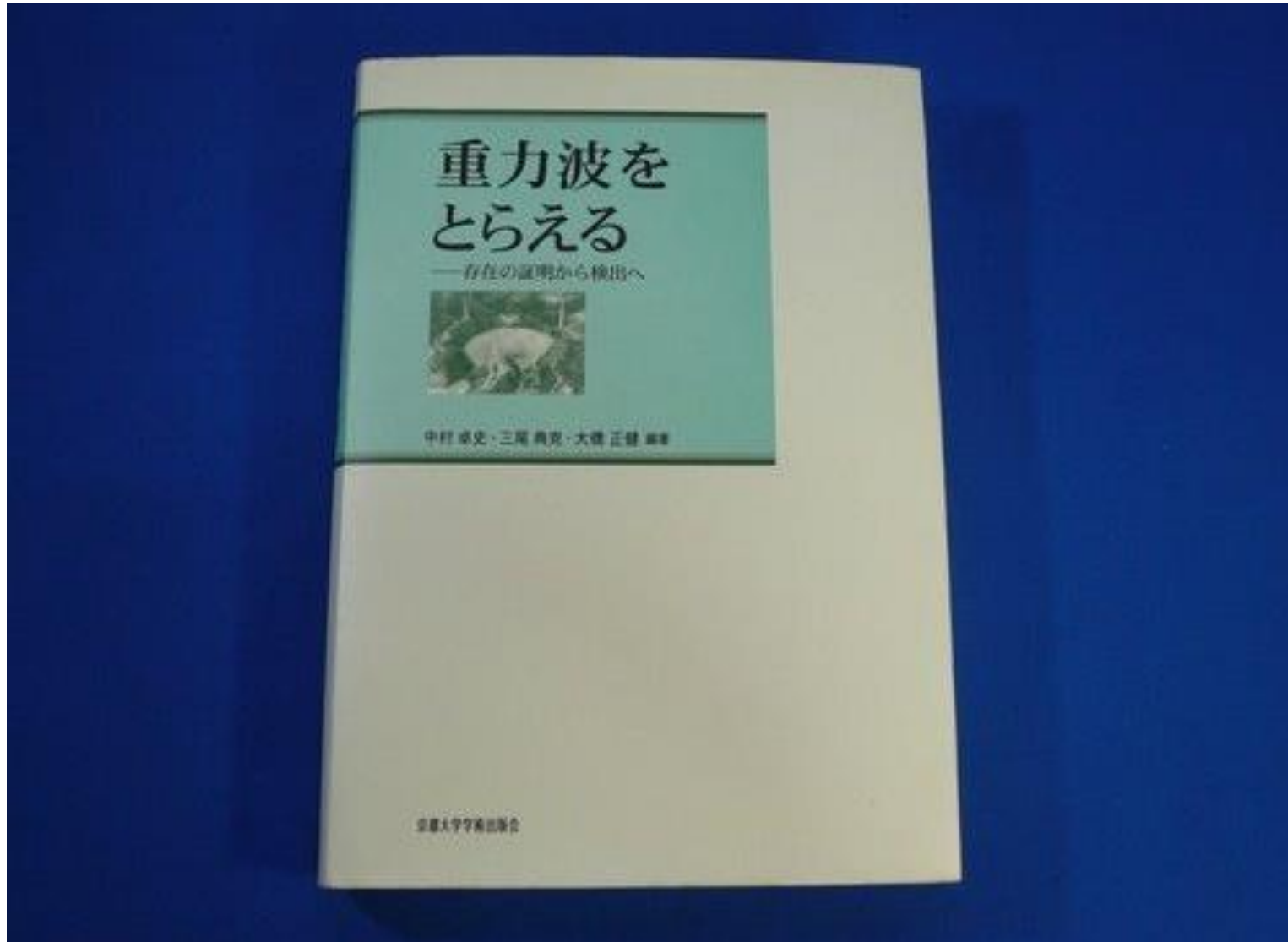
講義スケジュール

- 10月3日(月)
 - 3限 第1回 重力波の初検出について
 - 4限 第2回 重力波望遠鏡KAGRAの紹介
- 10月4日(火)
 - 2限 第3回 干渉計と共振器の原理
 - 3限 第4回 パワースペクトルと伝達関数
 - 4限 第5回 様々な雑音とその低減方法
- 10月5日(水)
 - 2限 第6回 重力波望遠鏡のこれから
 - 3限 第7回 精密測定技術の応用
 - 4限 第8回 「重力波天文学の夜明けとKAGRA」

参考文献



参考文献

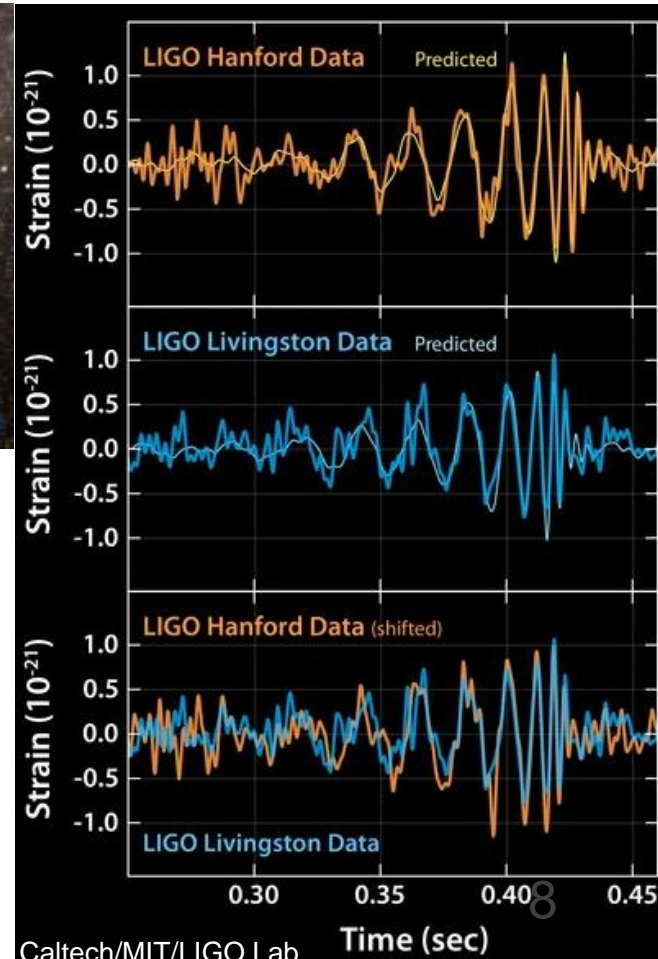


1日目のレポート

- 重力波初検出の意義と、初検出後のKAGRAの重要性について簡単にまとめてください
- 名前と学籍番号、実施日を必ず書くこと！

重力波、ついに初検出

- 2016年2月11日 アメリカのLIGOグループが発表
 - 2015年9月14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**



Hanford
Observatory



PRL 116, 061102 (2016)
<https://www.ligo.caltech.edu/>

Caltech/MIT/LIGO Lab

重力波、ついに初検出

重力波を初観測

朝日新聞
2月12日 金曜日

100年前にアインシュタインが「重力波」について、今日初めて観測したと確認された理論が実証。物理学の歴史的な成果とから、宇宙の姿を探る道が開ける。

米研究者「アイ」

重力波のイメージ
池に石を投げるイメージ
宇宙のかなたの重い星

朝日新聞 2016年2月13日 朝刊 2ページ 東京本社

重力波 未知の窓開く

重力波による宇宙のはじまりの観測
KAGRAのホームページなどをとどき作

13億光年離れた銀河で二つのブラックホールが合体
重力波が生まれる

「火の玉宇宙」超新星 超高温で光すら放出不能
光では観測できない範囲

13億光年
重力波 宇宙の空間がゆがんで起きる波

約6千万光年
改造前のLIGOで観測できた範囲

現在のLIGOで観測できる範囲

地球から約7億光年

138億年前

宇宙の晴れ上がり
誕生から38万年後

宇宙誕生

重力波による宇宙のはじまりの観測

世界の観測施設
GEO600 600m ハノーバー(地上)
LIGO 長さ4km 米国(地上) フォンテンブロー(カリフォルニア州)
VIRGO 3km イタリア
KAGRA 3km 岐阜県 神岡鉱山(地下)

手15分
象や初
測態製
米 装



重力波 未知の窓開く

時刻

も貢献

LIGOの勝利は1千以上の研究者が力を合わせた結果だが、日本人は数少ない成功の力となった。彼らの改造には、精度を上げるための機器の調整を担ったのが、LIGOハンブロード事務所副所長、高橋大輔だ。高橋は「初代の設計は、その感度

おかげさまで90周年
総合コンシリアリング
三機工業

1859年創業
スマホで学べる
英語学習
アプリ
1,000円

NOVAQ サブスクリプション

ドイツ語
ドイツ語
ドイツ語

英語で伝える
日本の文化 観て
聞いて

さらに続報

- 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



例えるなら

- 1609年 ガリレオが望遠鏡を作る
→ 光による天文学のはじまり

- 重力波の検出は
天文学の
ルネサンス



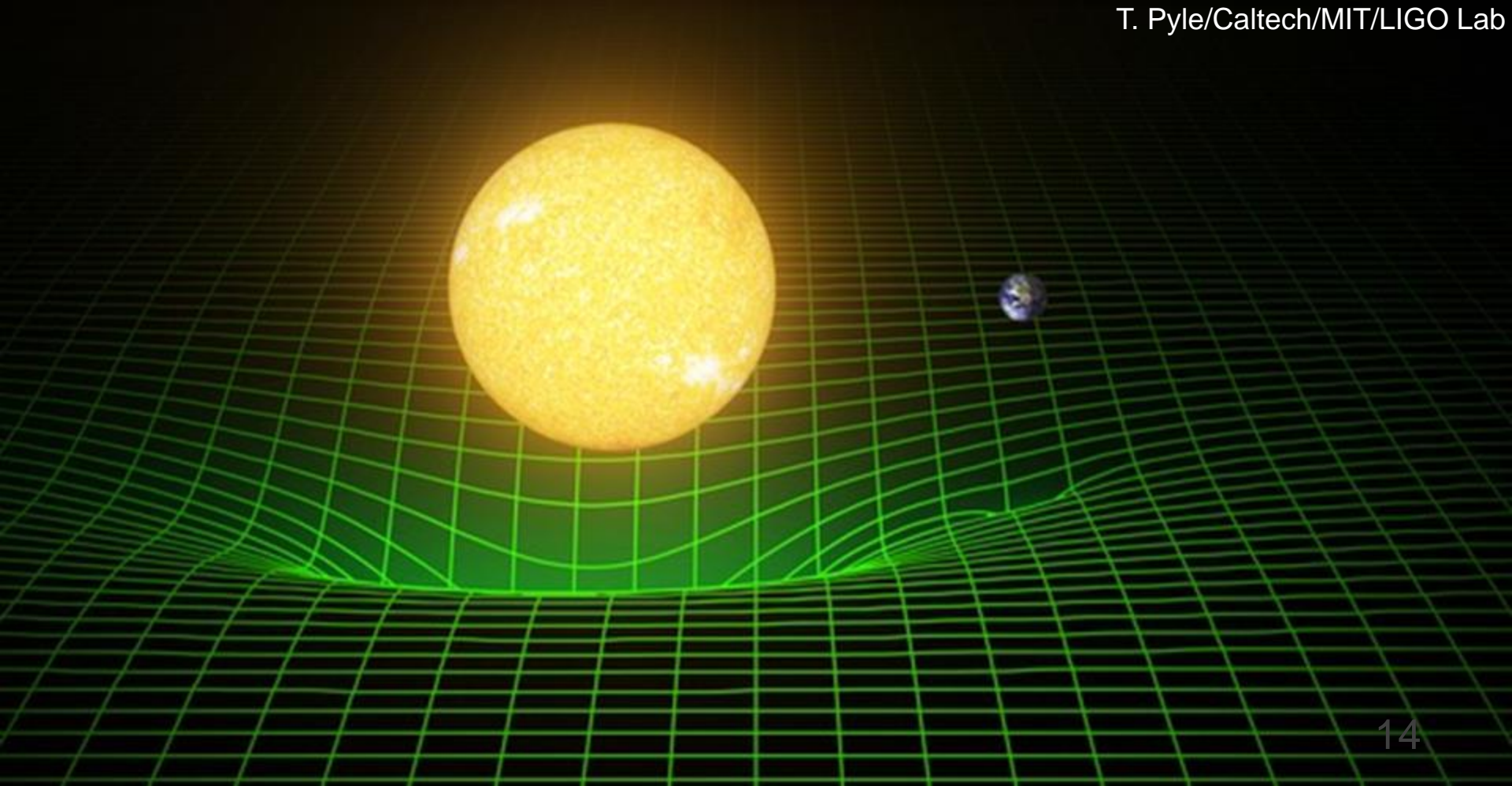
今日のお話

- **重力波とは？**
 - 一般相対性理論における重力
 - 重力波を出す天体現象
 - 重力波検出の原理
- LIGOによる重力波の**初検出**
 - ブラックホールについてわかったこと
 - わからなかったこと
- 岐阜県神岡で建設中の**KAGRA(かぐら)**の紹介
 - 重力波の国際観測ネットワーク
 - KAGRA独自の技術: 低温と地下建設

一般相対性理論における重力

- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

T. Pyle/Caltech/MIT/LIGO Lab



一般相対性理論における重力

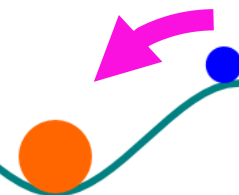
- 物体があると空間が歪む
- 空間の歪みで物体を引きつける →これが重力

なにもないトランポリンは平ら



ボールを置くと
トランポリンが歪む

近くのボールは
歪みに沿って引き寄せられる

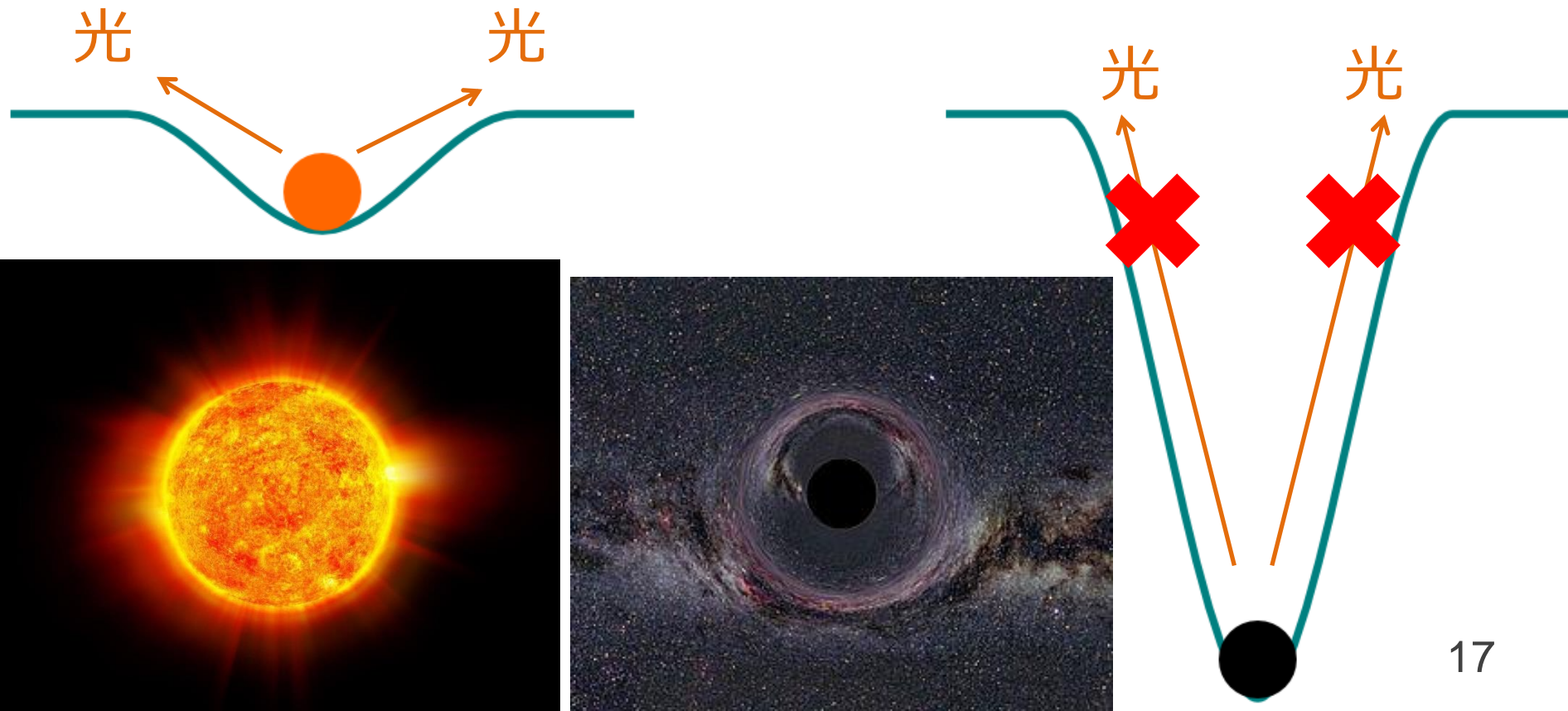


一般相対性理論における重力



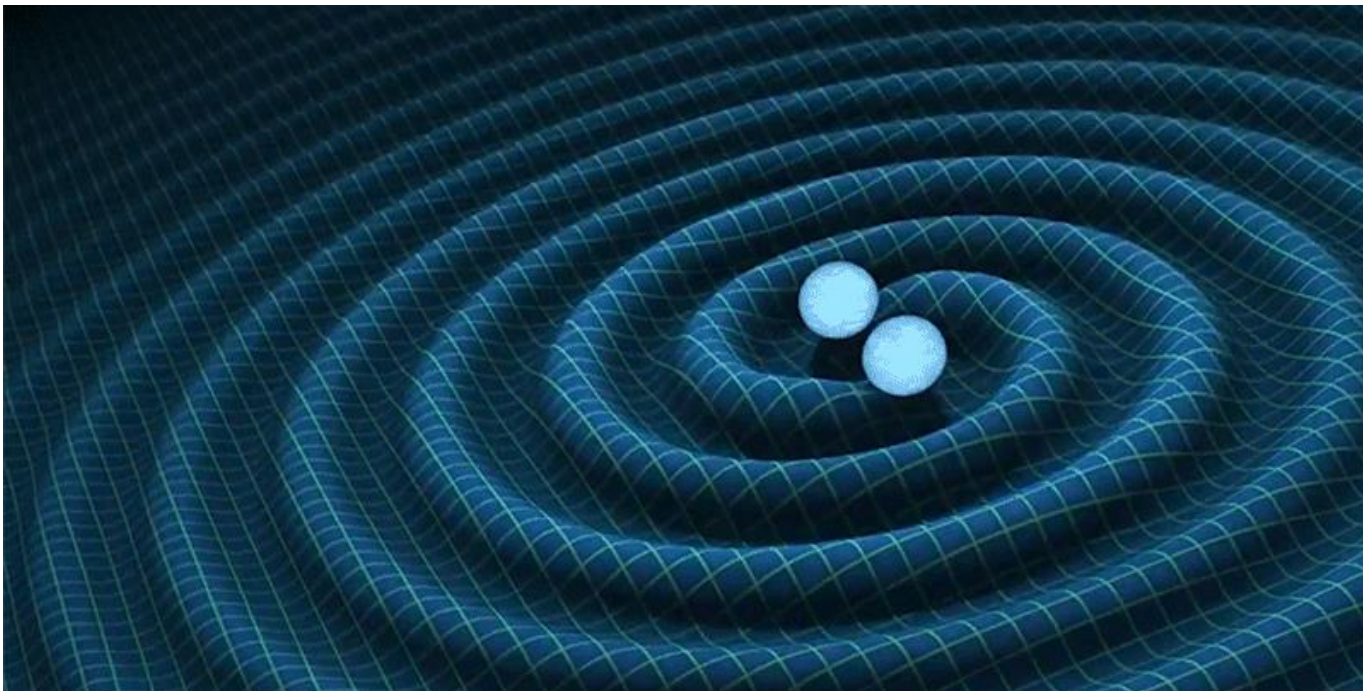
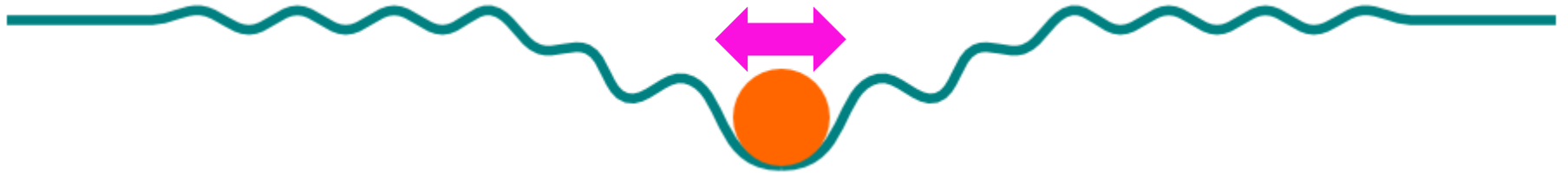
ブラックホール

- 極端に小さく重い天体
- 空間が歪みすぎて光も何も脱出できない
光で見ることができない天体



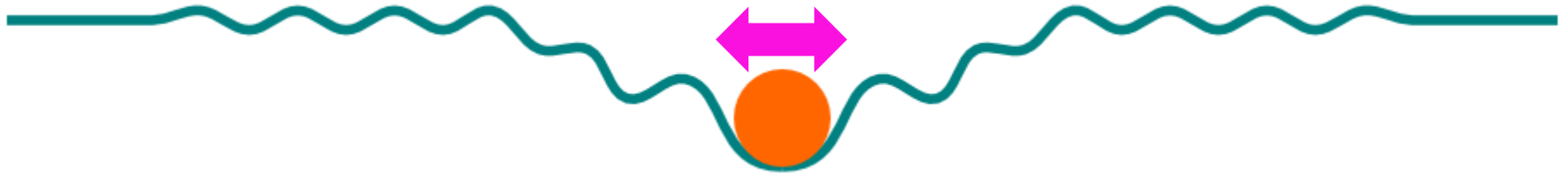
重力波は「時空のさざ波」

- 物体が動くと空間の歪みが変化し、光の速さで伝搬する → これが重力波



重力波は「時空のさざ波」

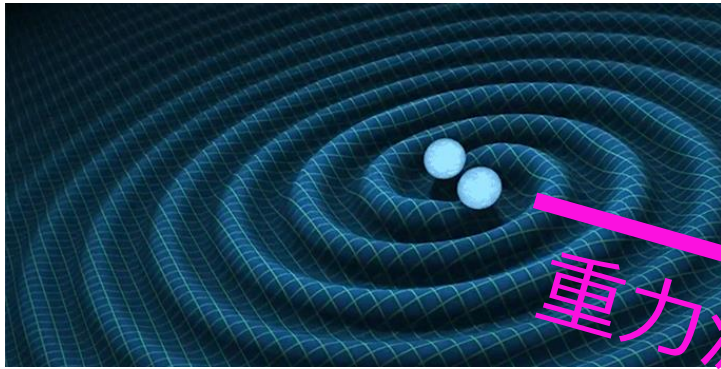
- 物体が動くと空間の歪みが増え、光の速さで伝搬する → これが重力波



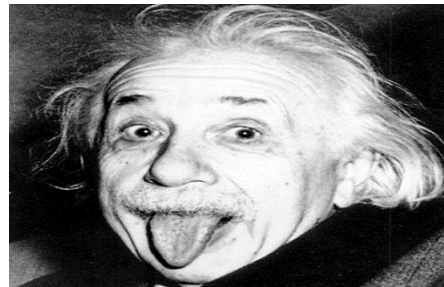
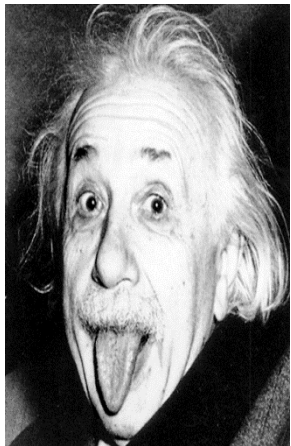
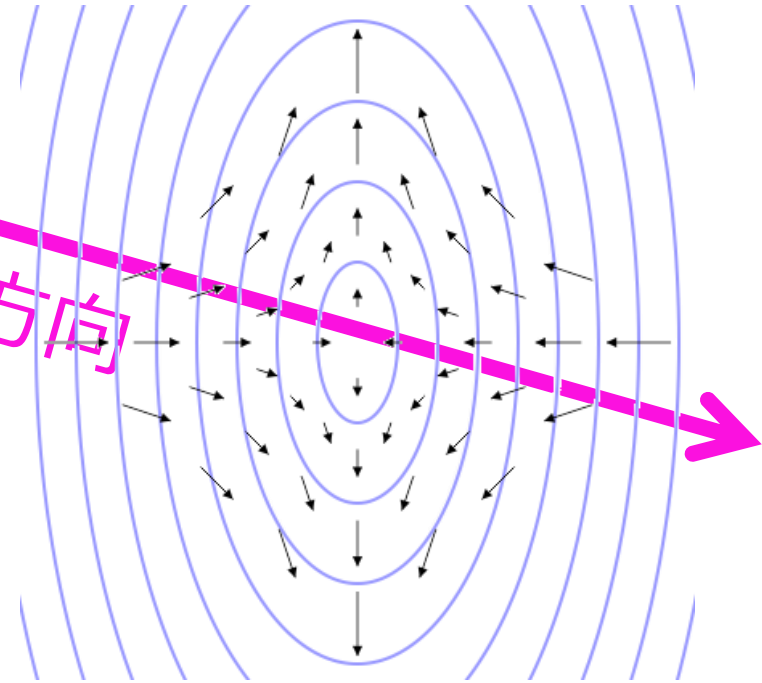
水の波紋
に似ている

重力波の特徴

- 縦方向が伸びると、横方向が縮む
- 何にも遮られない (透過性が高い)



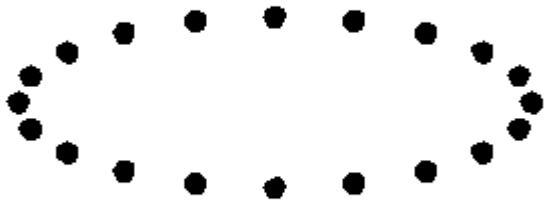
重力波の伝わる方向



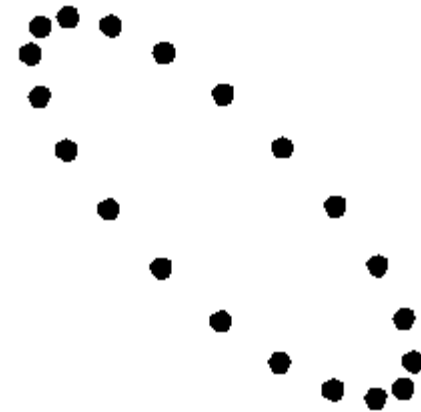
重力波の特徴まとめ

- 質量を持つ物体の運動で生じる
- 光速で伝播する
- 透過性が高い
- 2つの偏波が存在する

+モード

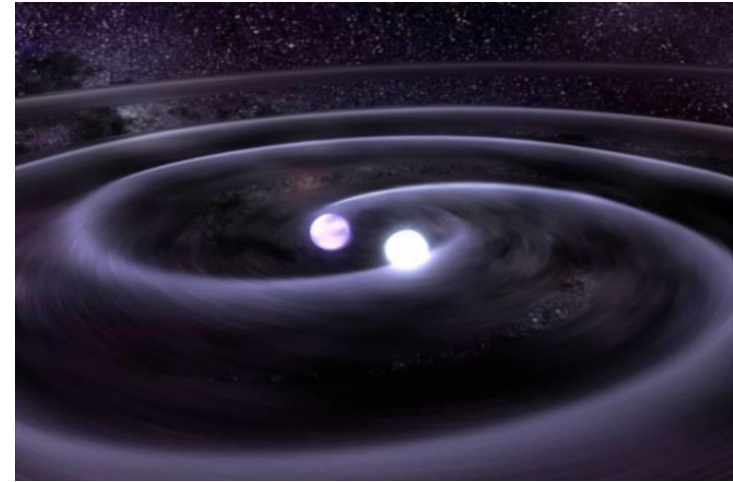


×モード



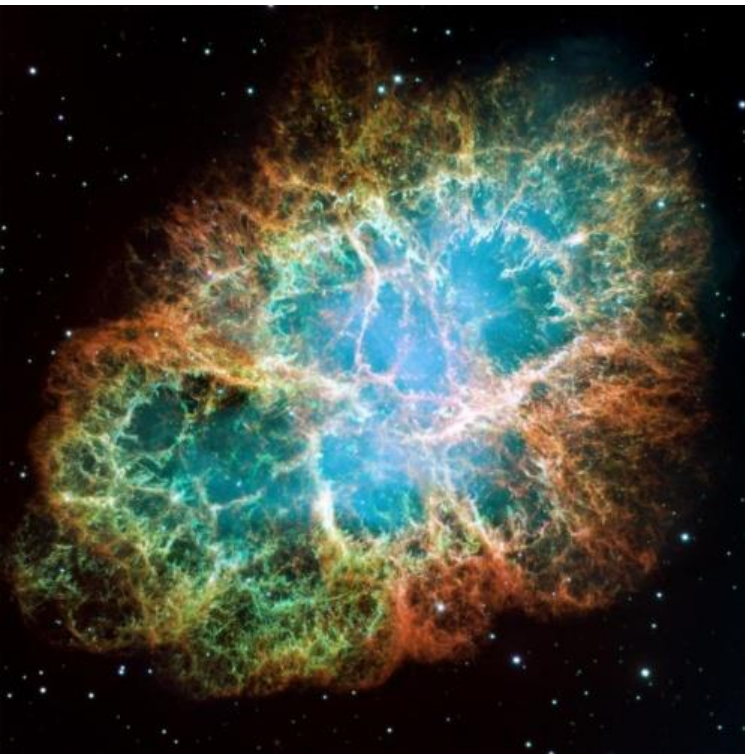
重力波源となり得る天体現象

- とても重く、
とても速く動く天体

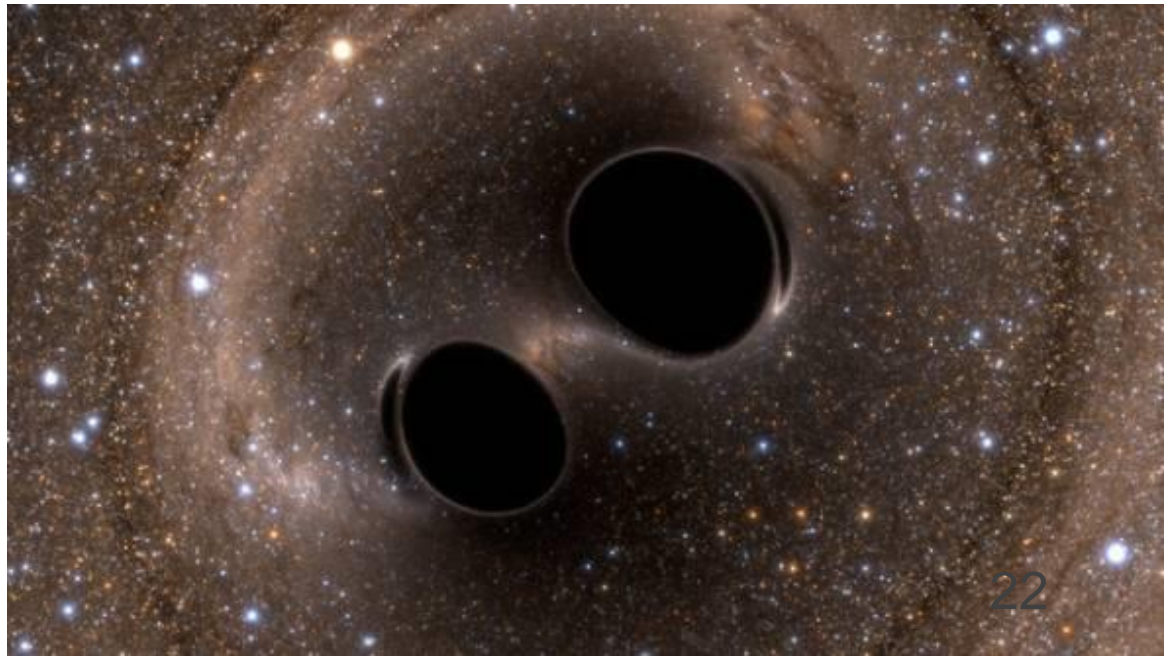


中性子星連星

超新星爆発



ブラックホール連星



重力波で何がわかる？

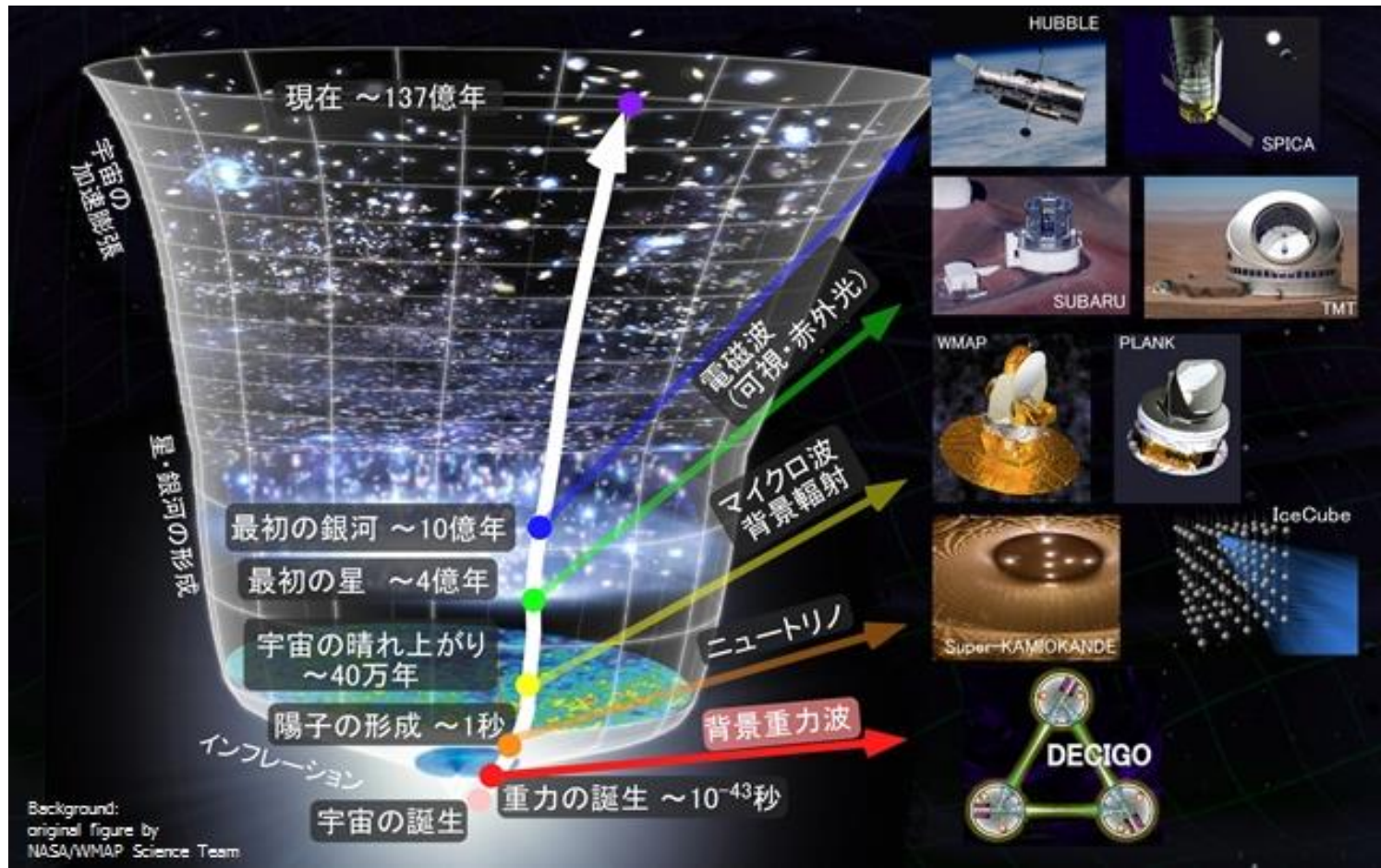
- **星の中**を探ることができる
重力波は何にも遮られない
- **光で見ることができない天体**を見ることができる
ブラックホール、暗黒物質、未知の天体？

エコー写真(音波)でお腹
の中が見えるように



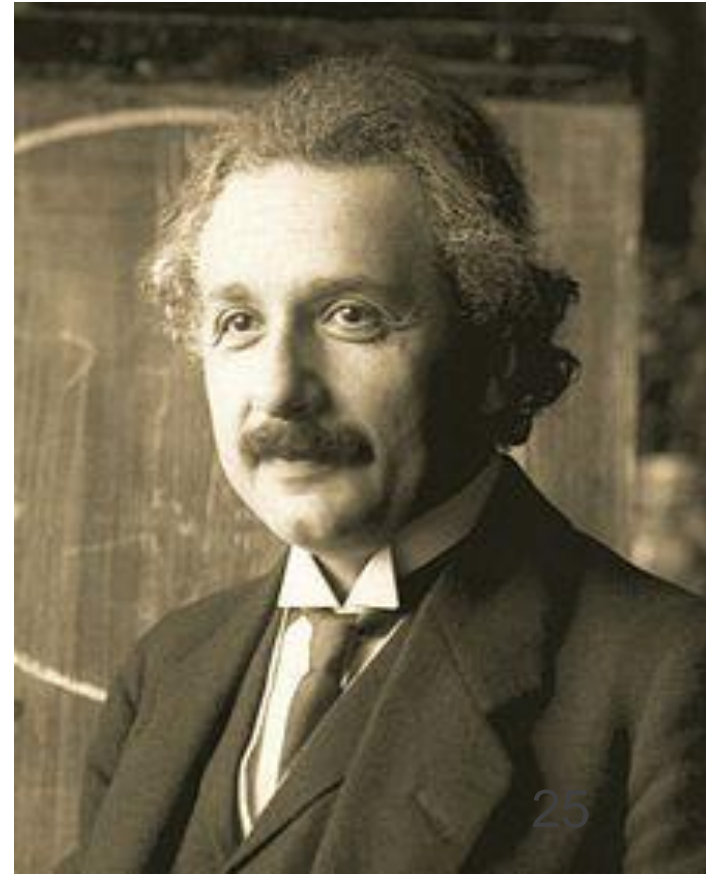
背景重力波

- たくさんの天体の集まり
- 宇宙論的起源の重力波(インフレーション、相転移)
宇宙誕生直後に迫る



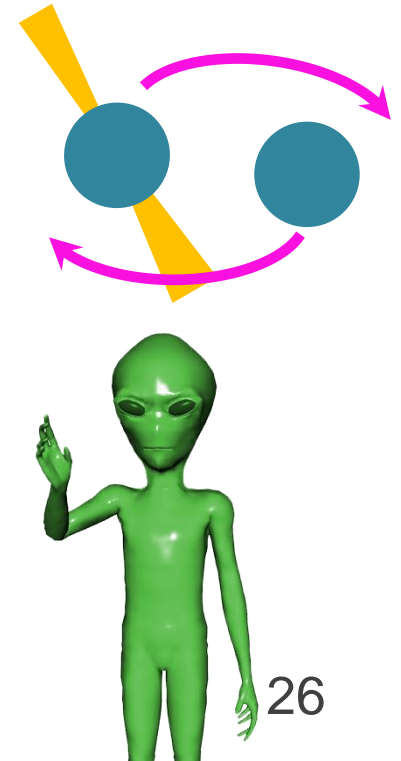
最初は受け入れられなかった重力波

- 1915年 アインシュタインが一般相対性理論を発表
- 1916年 アインシュタインが重力波の存在を予言
- 1936年 アインシュタイン「間違いだった」
→ 反論され、激怒
- 1957年 チャペルヒル国際会議
重力波の存在が理論的に
認められるように
- 重力波の計算は**ものすごく**
難しい ファインマン ホイラー



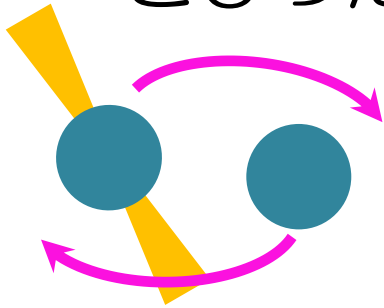
重力波の間接的証拠

- 1974年 ラッセル・ハルスとジョゼフ・テイラーが連星パルサーを発見

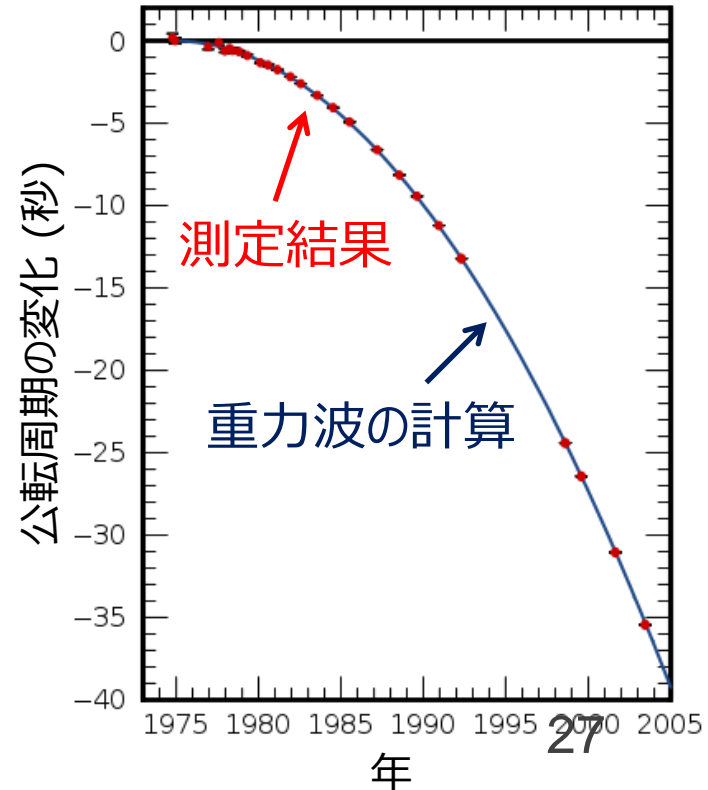


重力波の間接的証拠

- 軌道半径の減少が重力波によるエネルギー損失計算とぴったり一致

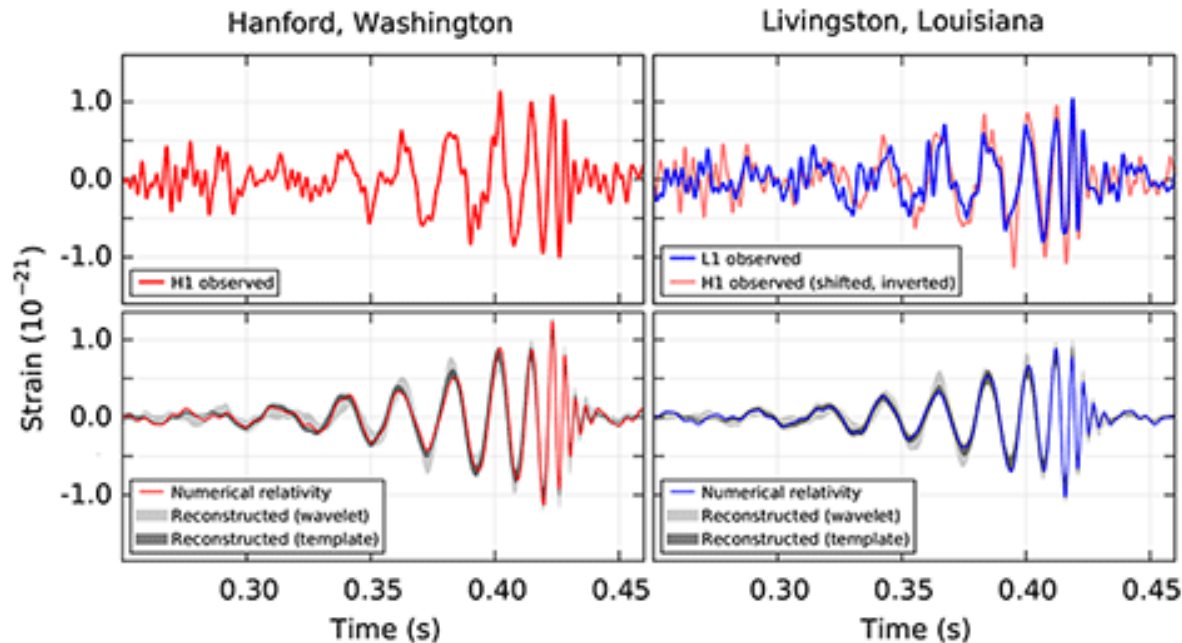


1993年ノーベル賞



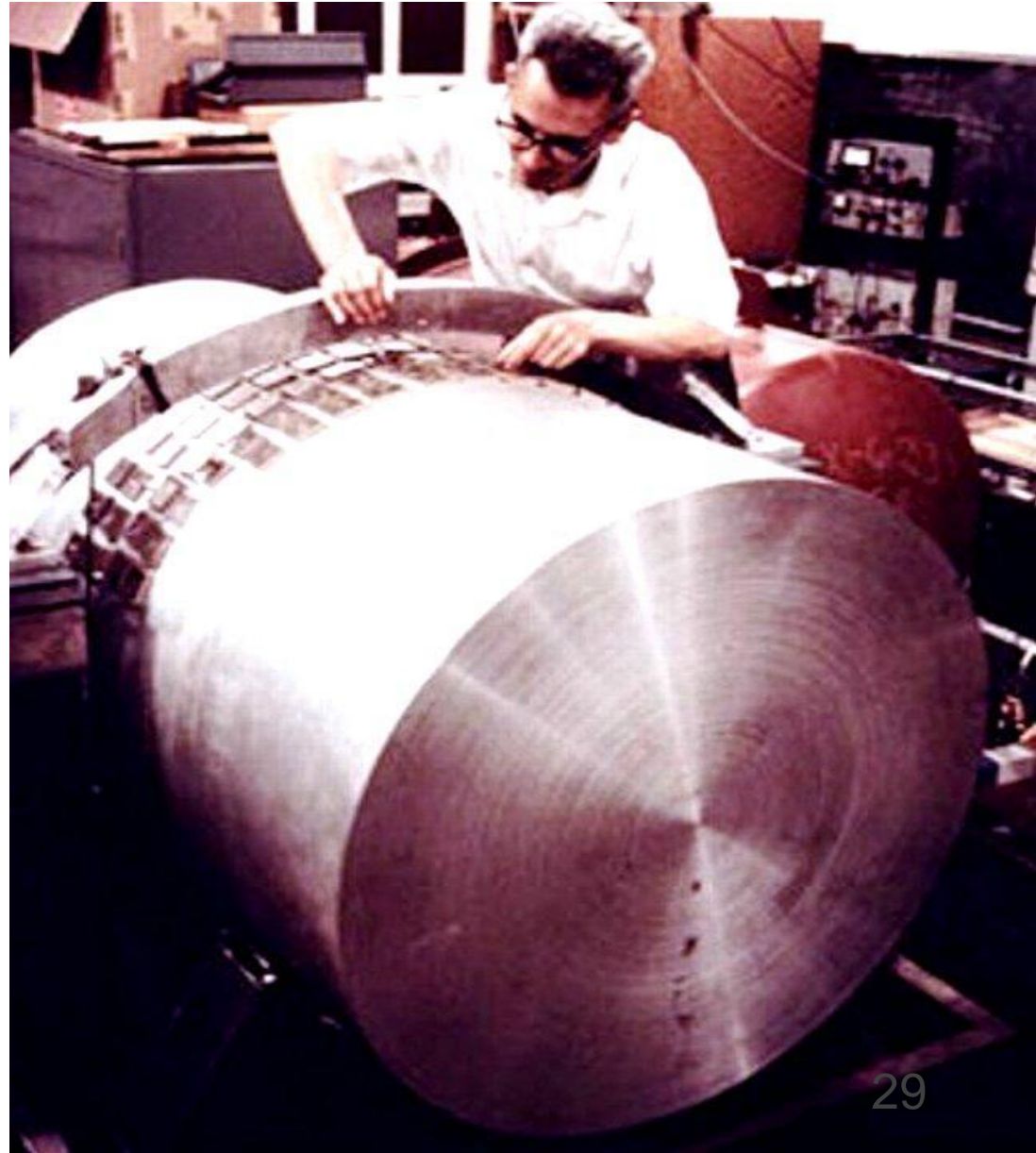
間接的証拠と直接検出

- 間接的証拠では.....
 - 重力波の伝播についての情報を得られない
 - 本当に光速で伝わるのか？
 - 偏波はどうなっているのか？
 - 重力波の波形についての情報を得られない
 - 合体の様子はわからない



重力波直接検出の機運の高まり

- 1968年 ジョセフ・ウェーバーが重力波の検出を発表
- 検証により、間違いとわかった
- が、これにより重力波検出の機運が高まった



重力波の直接検出の方法

- レーザー干渉計を使う
- 1960年代、レイ・ヴァイスがマサチューセッツ工科大学の一般相対性理論の授業の中で思いつく



ノーベル賞確実

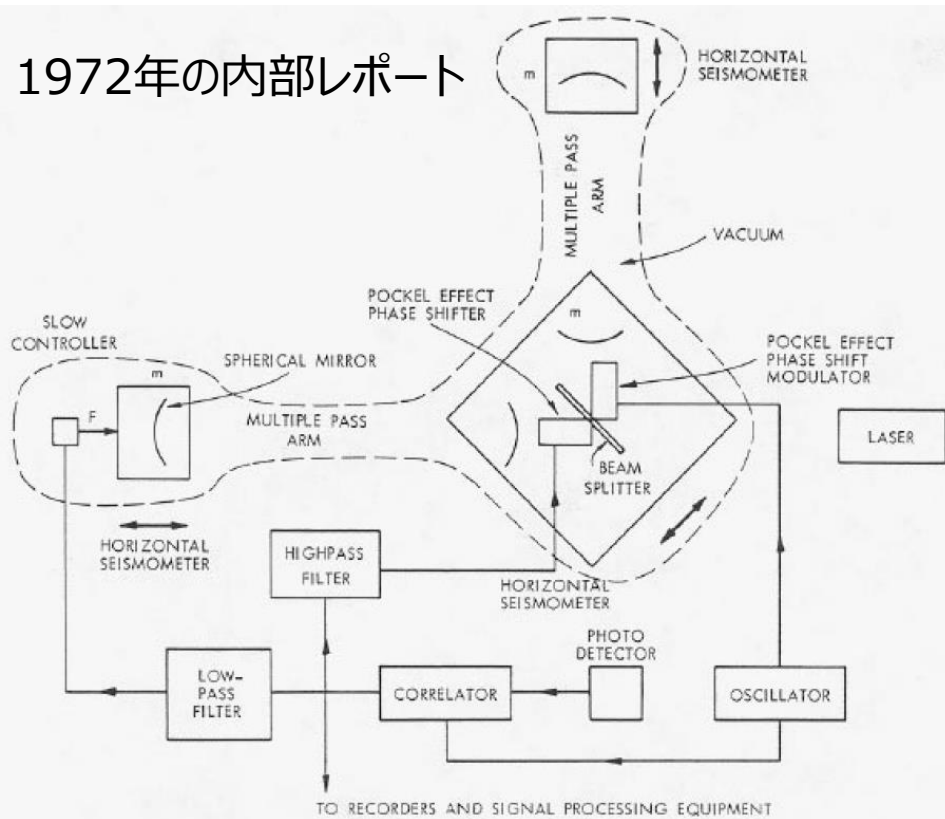
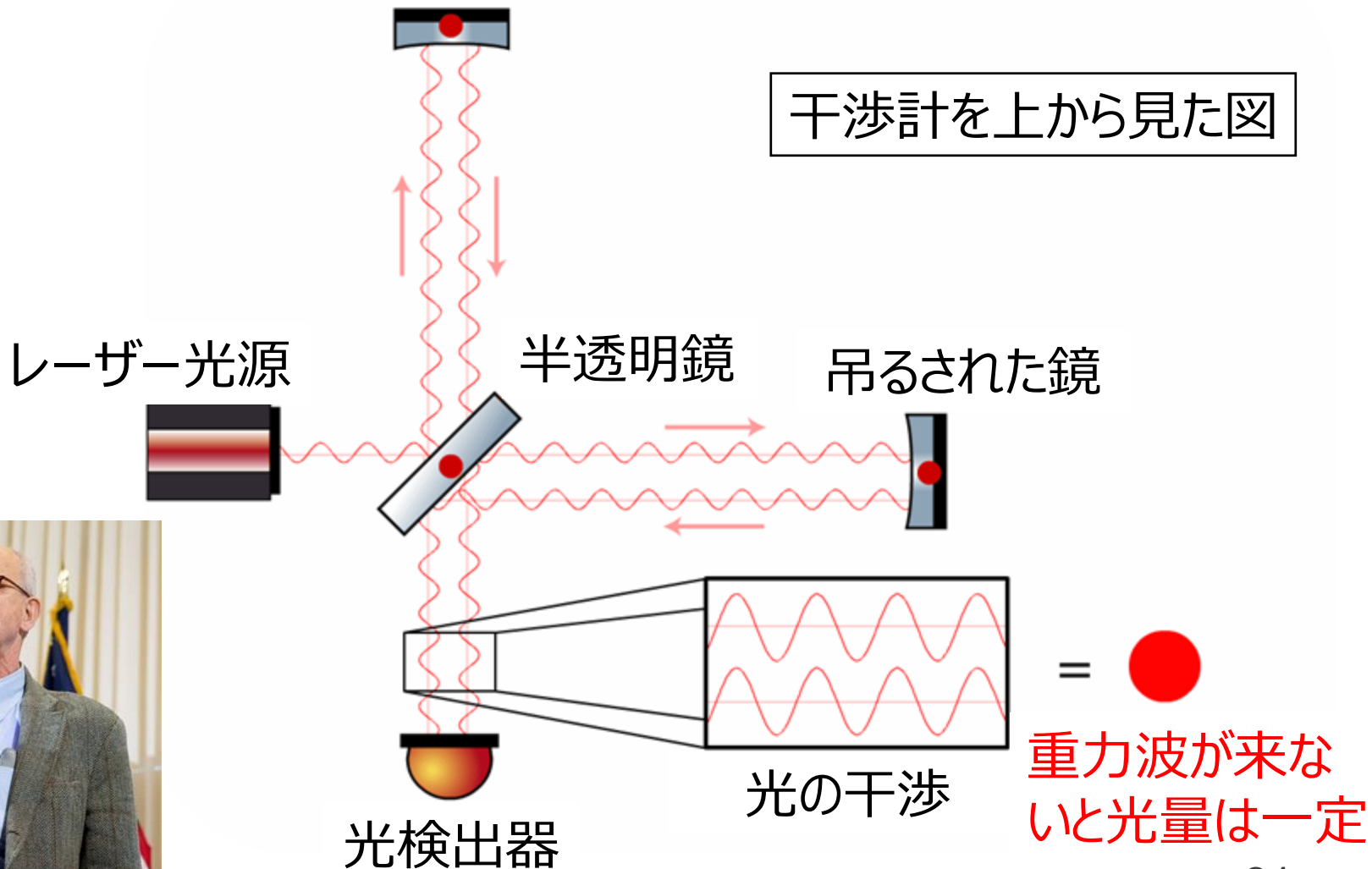


Fig. V-20. Proposed antenna. LIGO-P720002



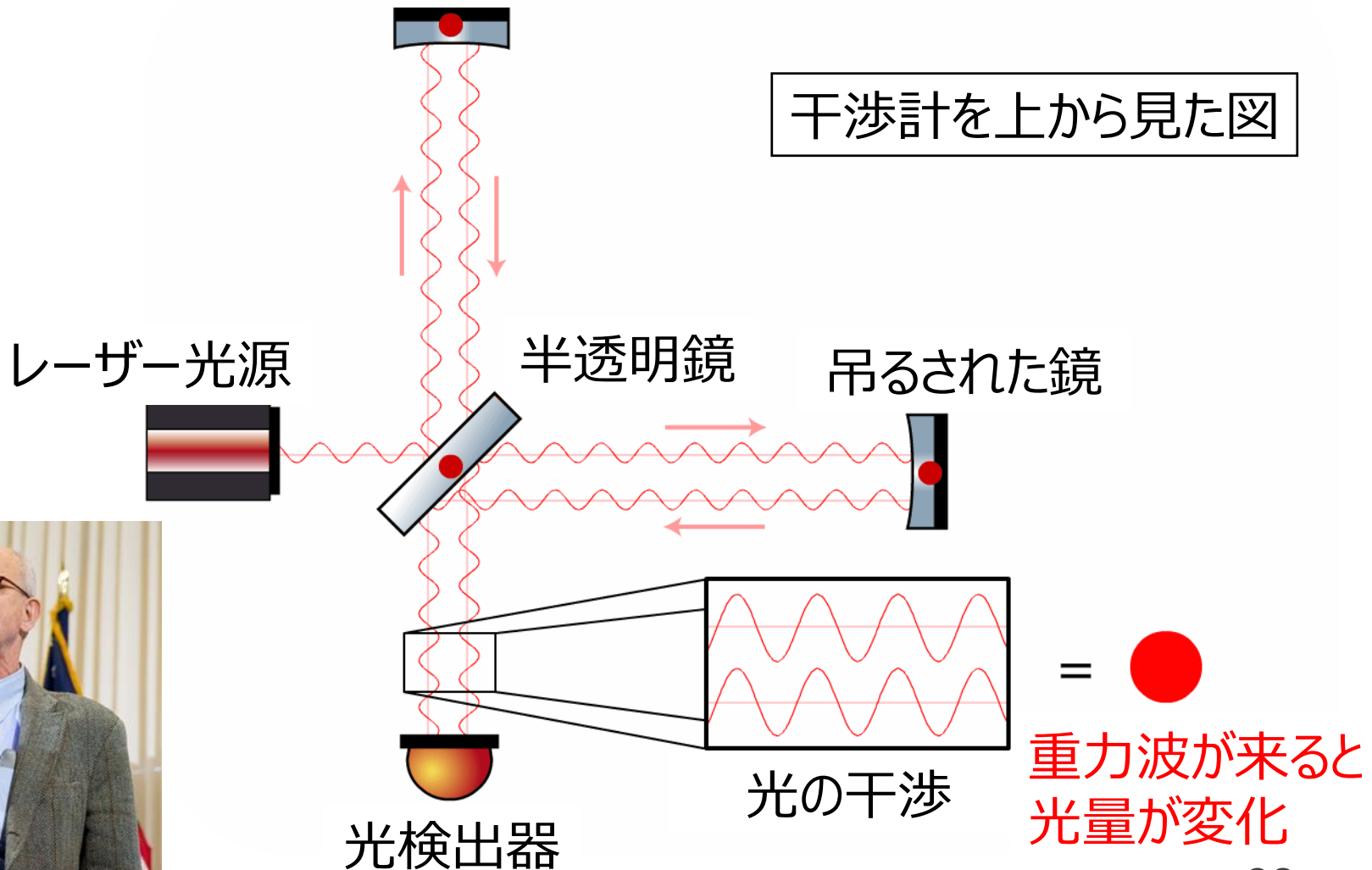
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



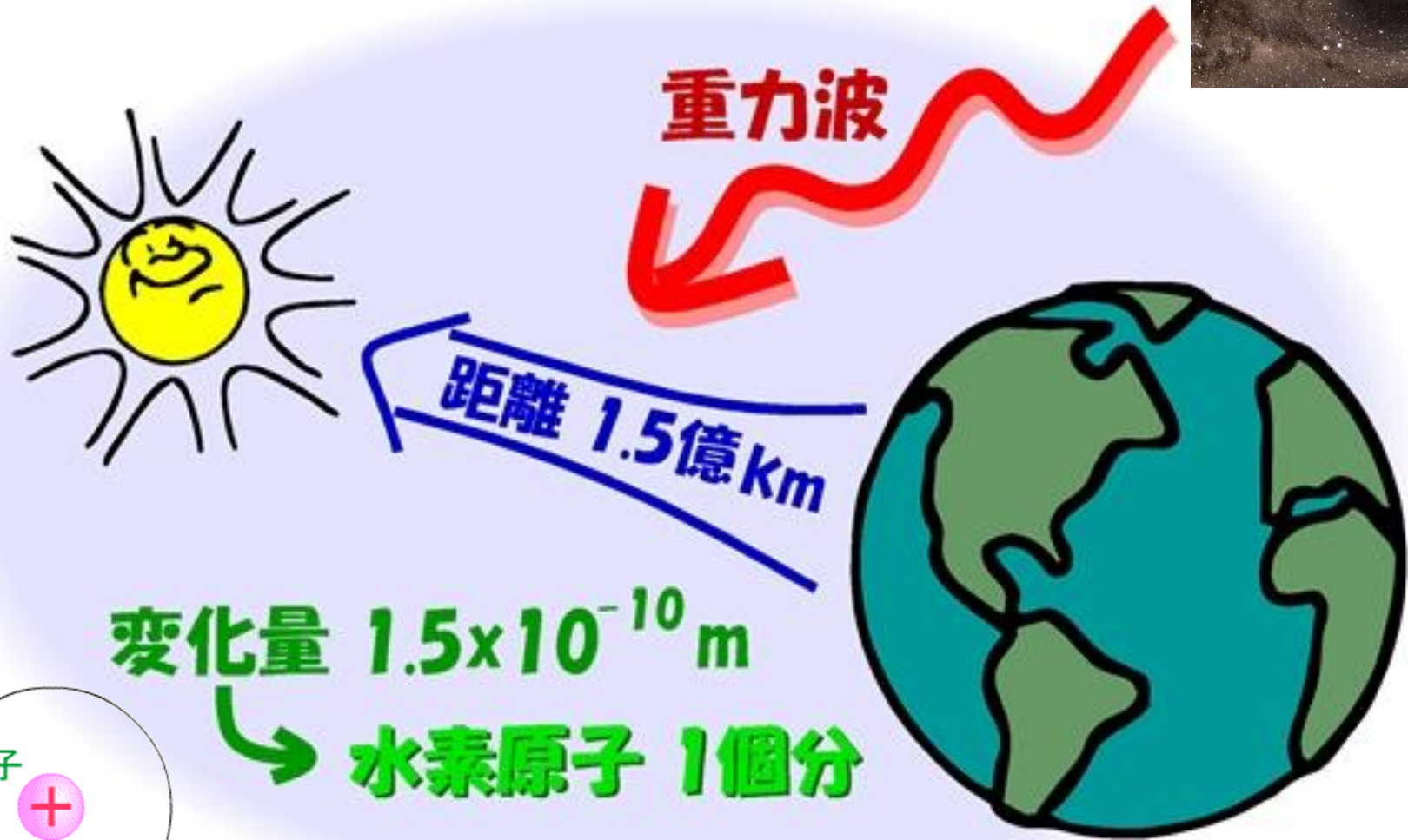
レーザー干渉計型重力波望遠鏡

- 両腕の長さの差をレーザーで測定



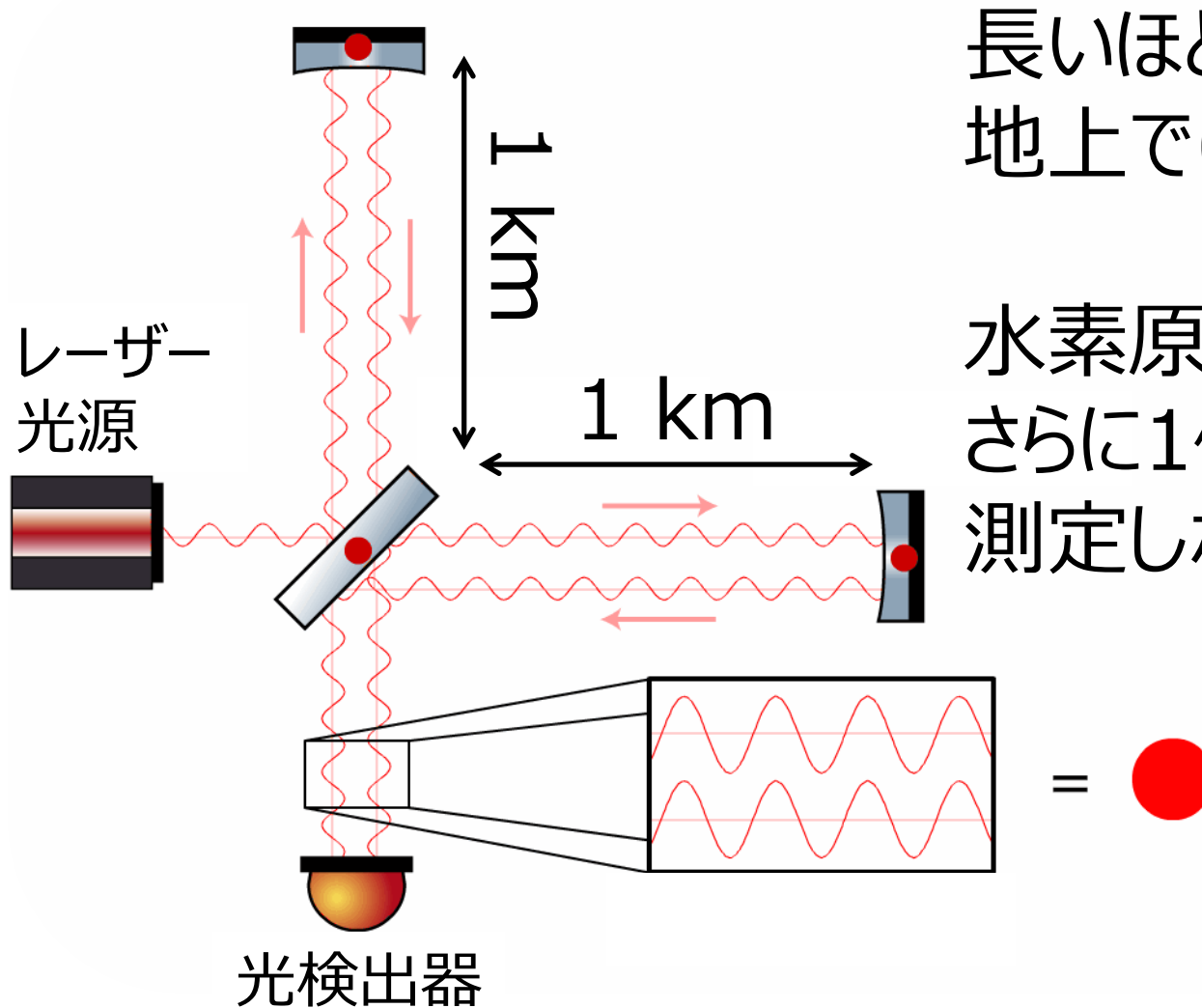
重力波の振幅はどれくらい？

- 空間のひずみ量: 10^{-21} (典型的に)



重力波の振幅はどれくらい？

- 空間のひずみ量: 10^{-21} (典型的に)



長いほど変化量は大きい
地上ではkm程度が限界

水素原子1個の
さらに1億分の1の変化を
測定しないといけない

重力波直接検出までの歴史

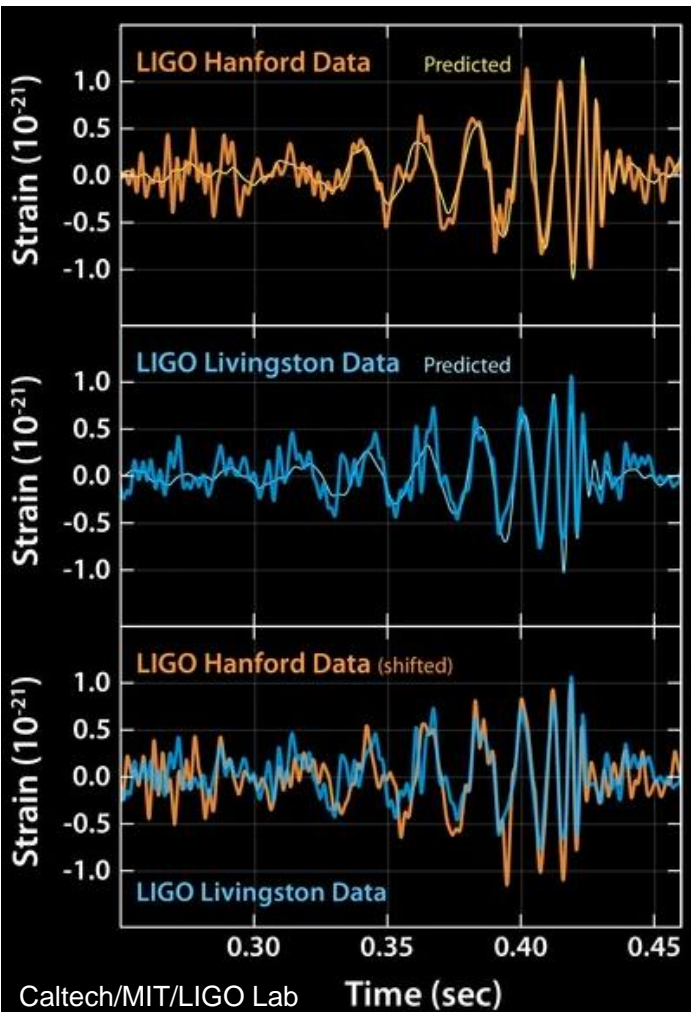
- 1916年 アインシュタインが重力波を**予言**
- 1960年代 ヴァイスが重力波の**検出方法を提案**
- 2000年代 各国が最初の重力波探査を開始
LIGO (アメリカ 4km)、TAMA300 (日本 300m)、
GEO600 (ドイツ 600m)、Virgo (イタリア 3km)
→ 重力波は**見つからず**
- 2011年 LIGOが改良を開始
- 2015年 Advanced LIGOが
初稼働
- 2016年 LIGOが**初検出**を発表
**予言から100年、
提案から50年！**

初検出を発表するライツィー

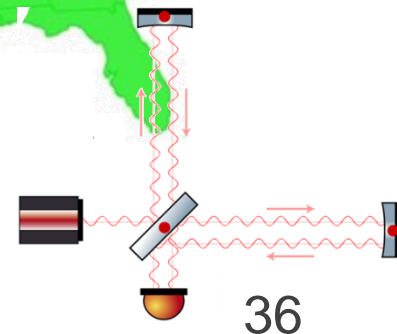


アメリカのLIGOによる初検出

- 3000 km離れた2台の望遠鏡でほぼ同時に同じ波形を検出

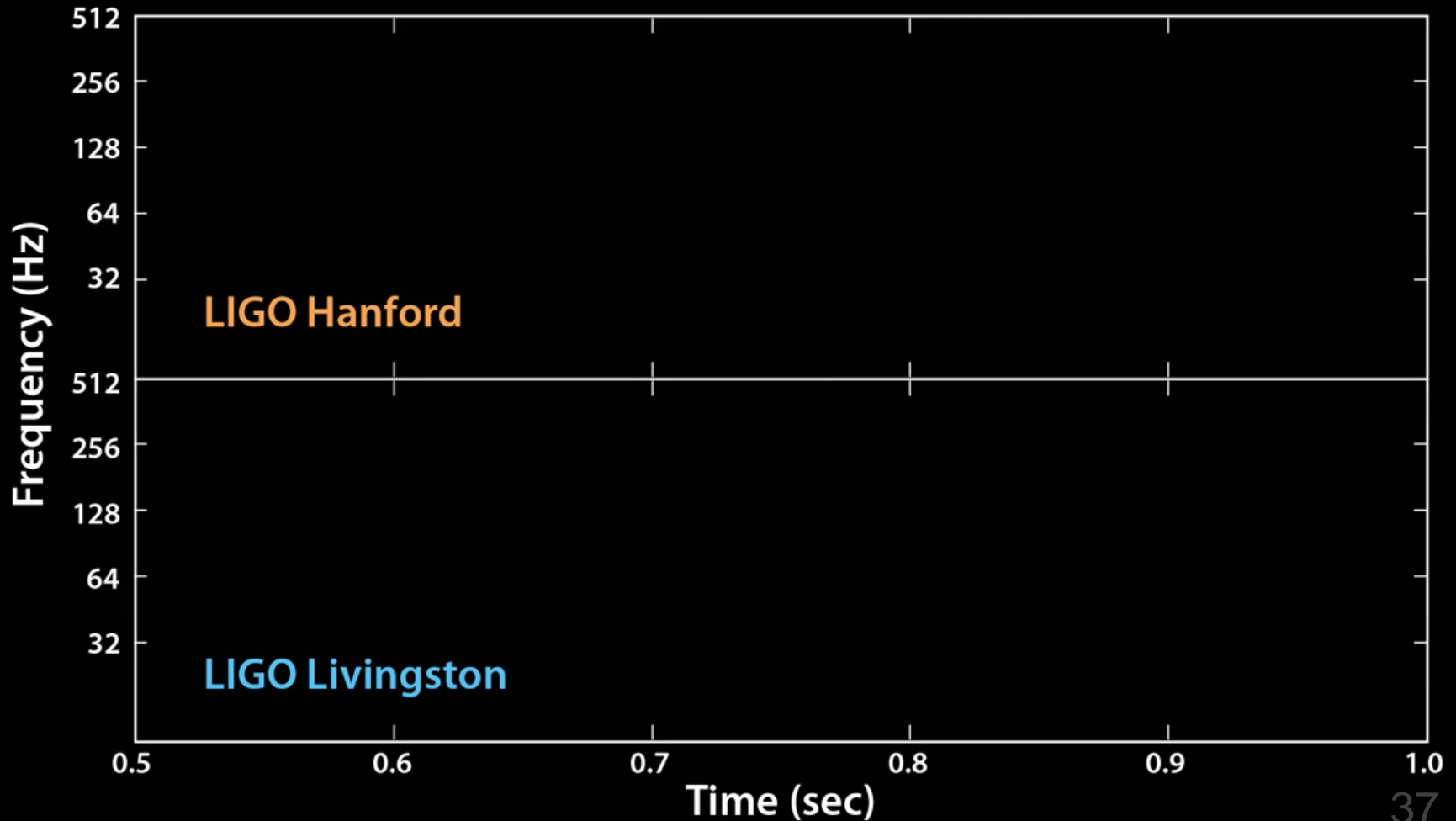


ハンフォード
観測所



検出した信号を音にすると？

- 低い元々の音、聴きやすいように処理した高い音



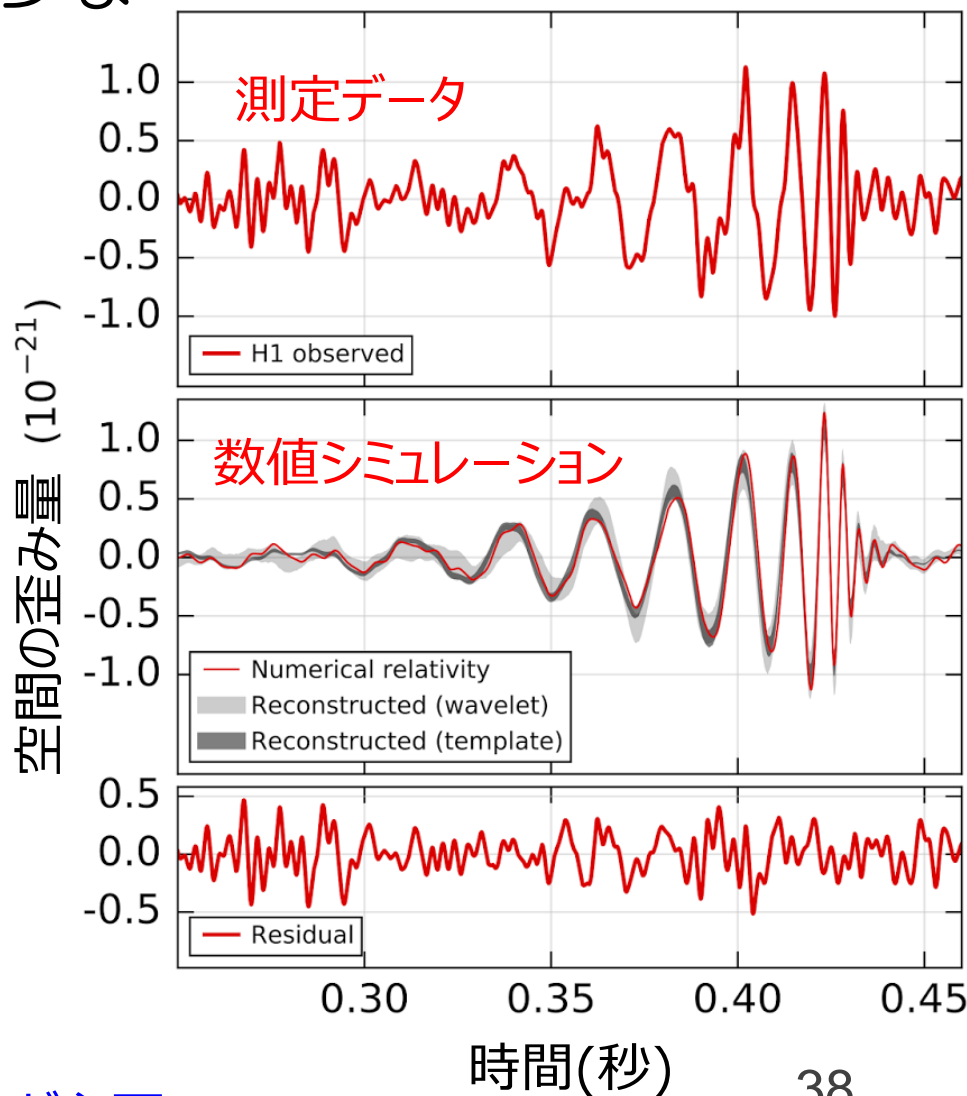
波形が相対論の計算とぴったり

- 見てわかる教科書のような波形 (驚き その1)
- 理論物理学、
数値シミュレーション
の大勝利



重力波の波形の計算にはスーパーコンピュータが必要

Hanford, Washington (H1)



重力波形から何がわかるか？

- 音の高低から**質量**、音の大きさから**距離**がわかる

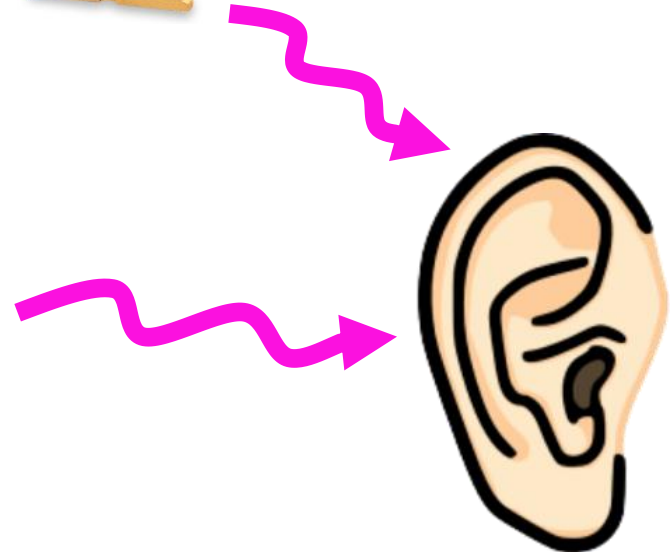
遠いと音が小さい



大太鼓は低音



小太鼓は高音

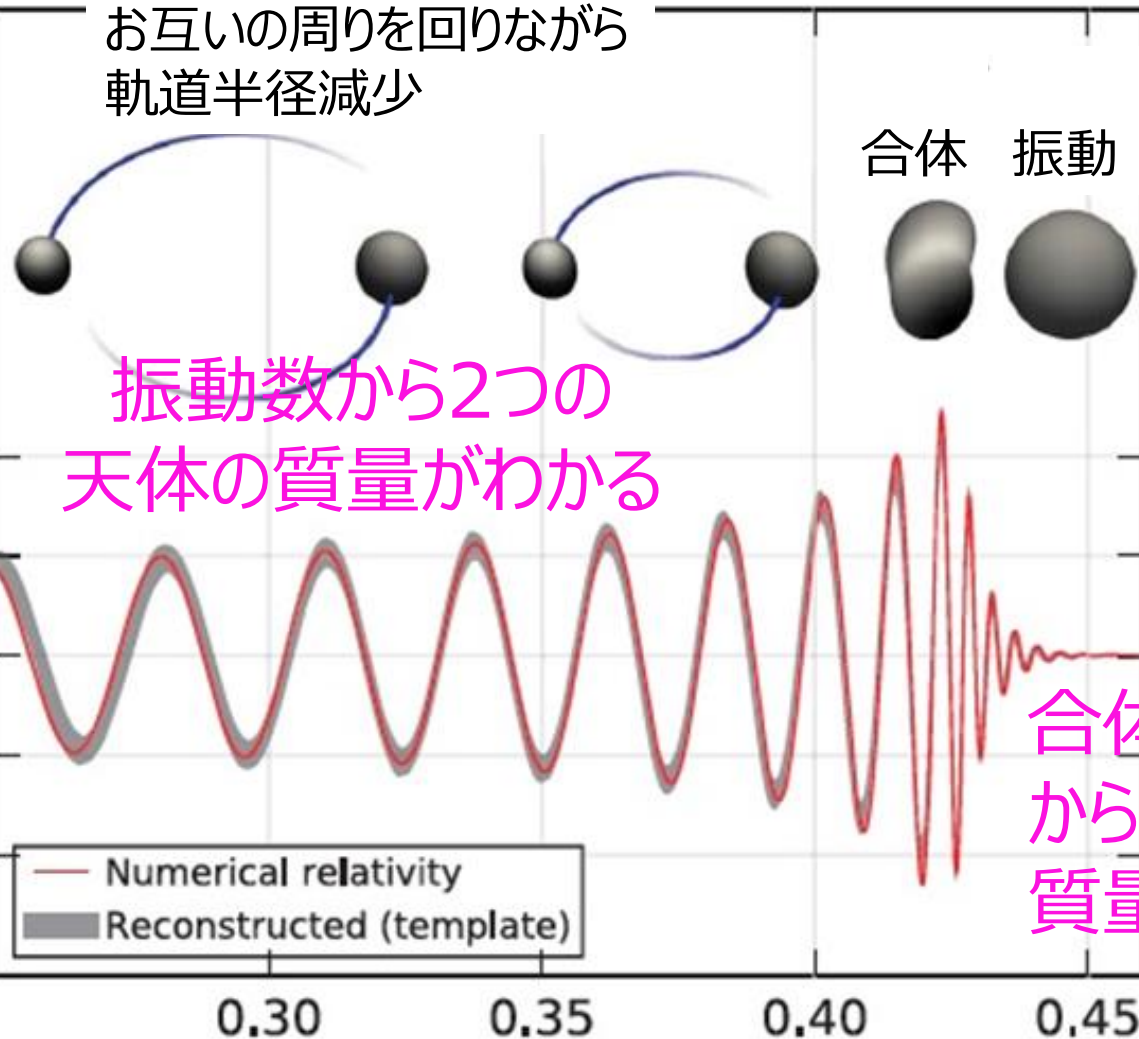


重力波形から何がわかるか？

- 天体の**質量**と**距離**がわかる

お互いの周りを回りながら
軌道半径減少

合体 振動



振幅から距離
がわかる

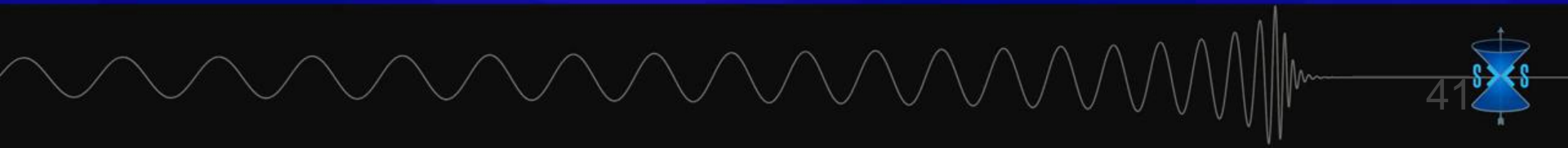
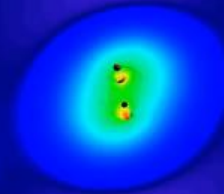
振動数から2つの
天体の質量がわかる

合体後の波形
から合体後の
質量がわかる

重力波形から何がわかるか？

- 天体の質量と距離がわかる

-0.76s

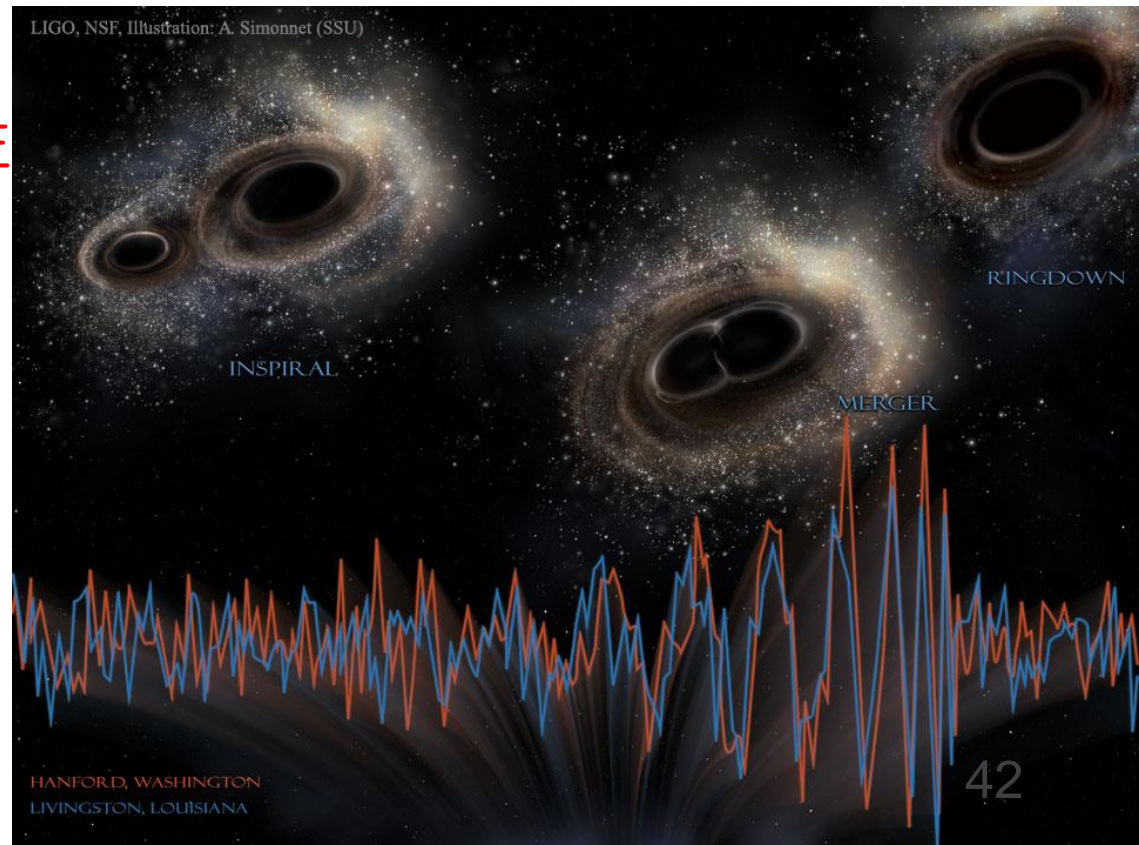
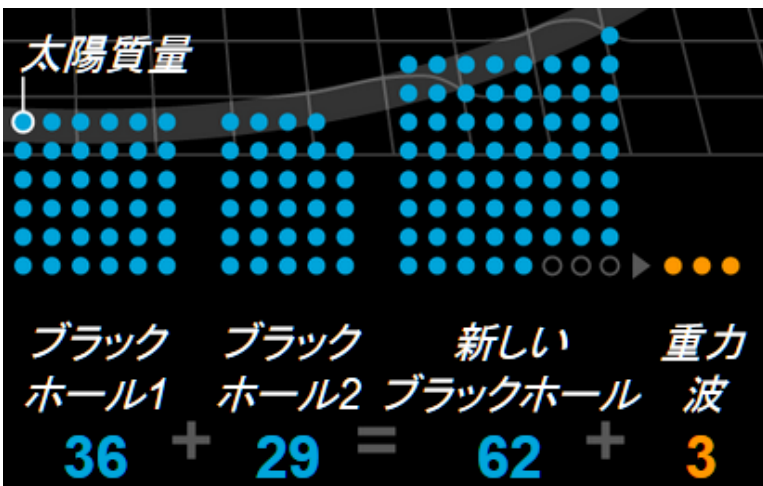


重力波形からわかったこと

- 太陽質量の**36倍**と**29倍**が合体して **62倍**に(驚き その2)
→ **ブラックホール**と判明 (驚き その3)
- 太陽質量の3倍相当のエネルギーが重力波として放出
- 地球から**13億光年**

エネルギー 質量

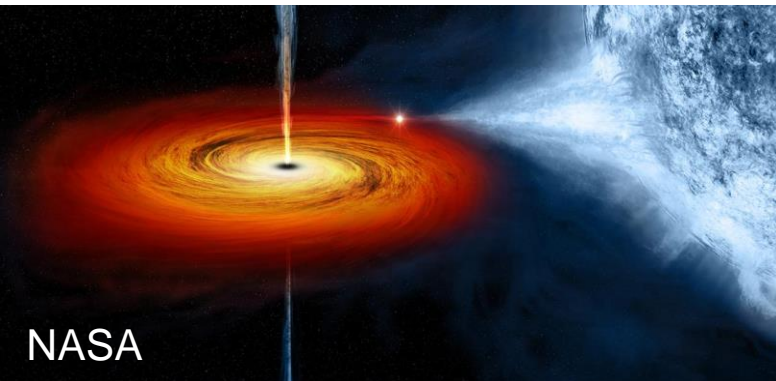
$$E = mc^2$$



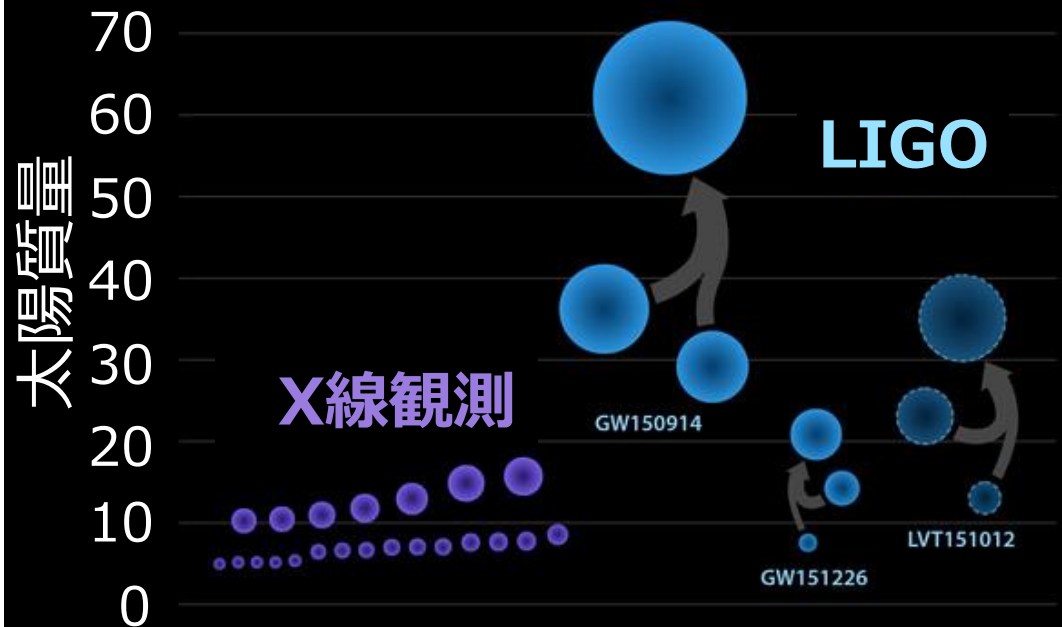
ブラックホール質量の謎

- 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？

近くに星があるとX線でも
ブラックホールの存在が
間接的にわかる

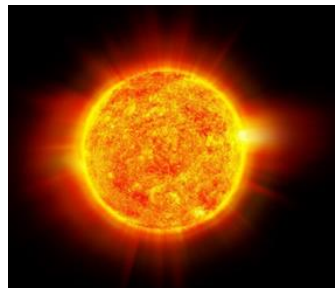


質量がわかっているブラックホール



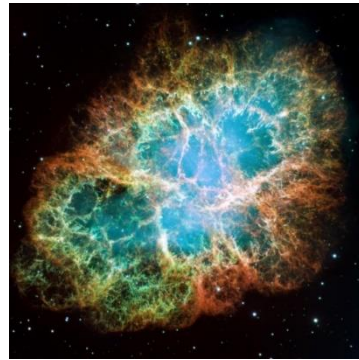
ブラックホールはどうできる？

- 普通は10太陽質量程度以下の小さなブラックホールしかできない

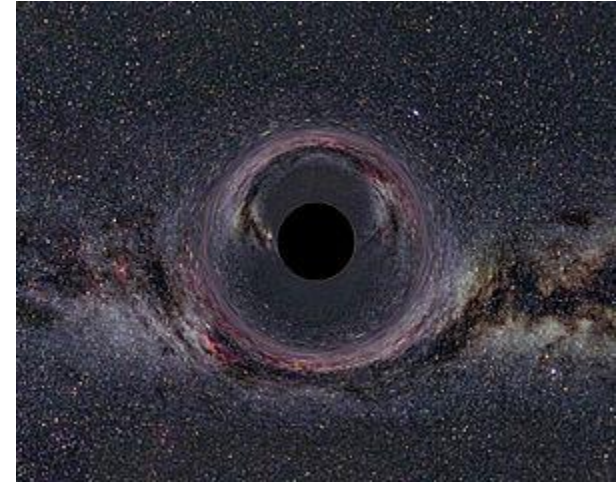


普通の星

歳を取ると



重い
場合



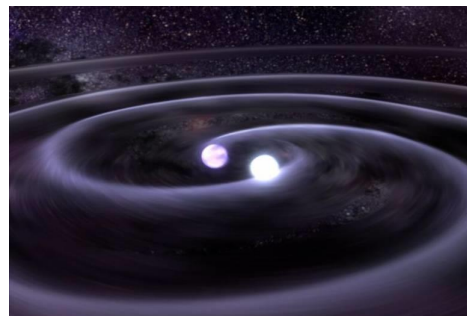
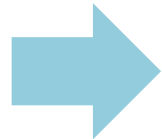
軽い場合



超新星爆発



中性子星



連星合体



10太陽質量
程度以下の
ブラックホール

ブラックホールはどうできる？

- では30太陽質量程度のブラックホールは？
- 結構な頻度で生成されているはず
- いろいろな説が唱えられている

宇宙初期にできた
大きな初代星から？

宇宙初期の
密度ゆらぎから？

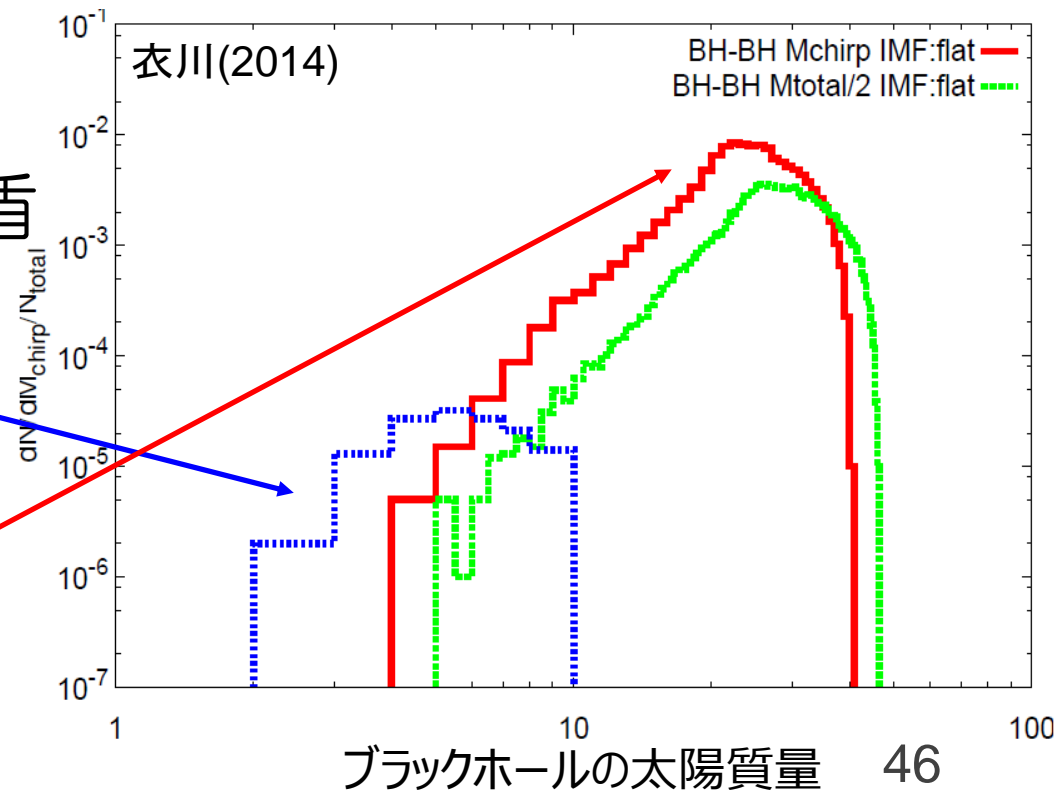
球状星団の中でできた？

衣川ら(2014)の理論モデル

- 最近できた星(POP I)だと大質量ブラックホールはできない
- 宇宙初期にできた初代星(POP III)に着目
 - 30太陽質量程度のブラックホール連星がたくさんできる
 - 形成率がLIGOの推定結果と無矛盾

最近できた星だと10太陽質量程度にしかない

初代星だと30太陽質量程度にピーク



ブラックホールの準固有振動

- 合体後のブラックホールの質量とスピンのわかる

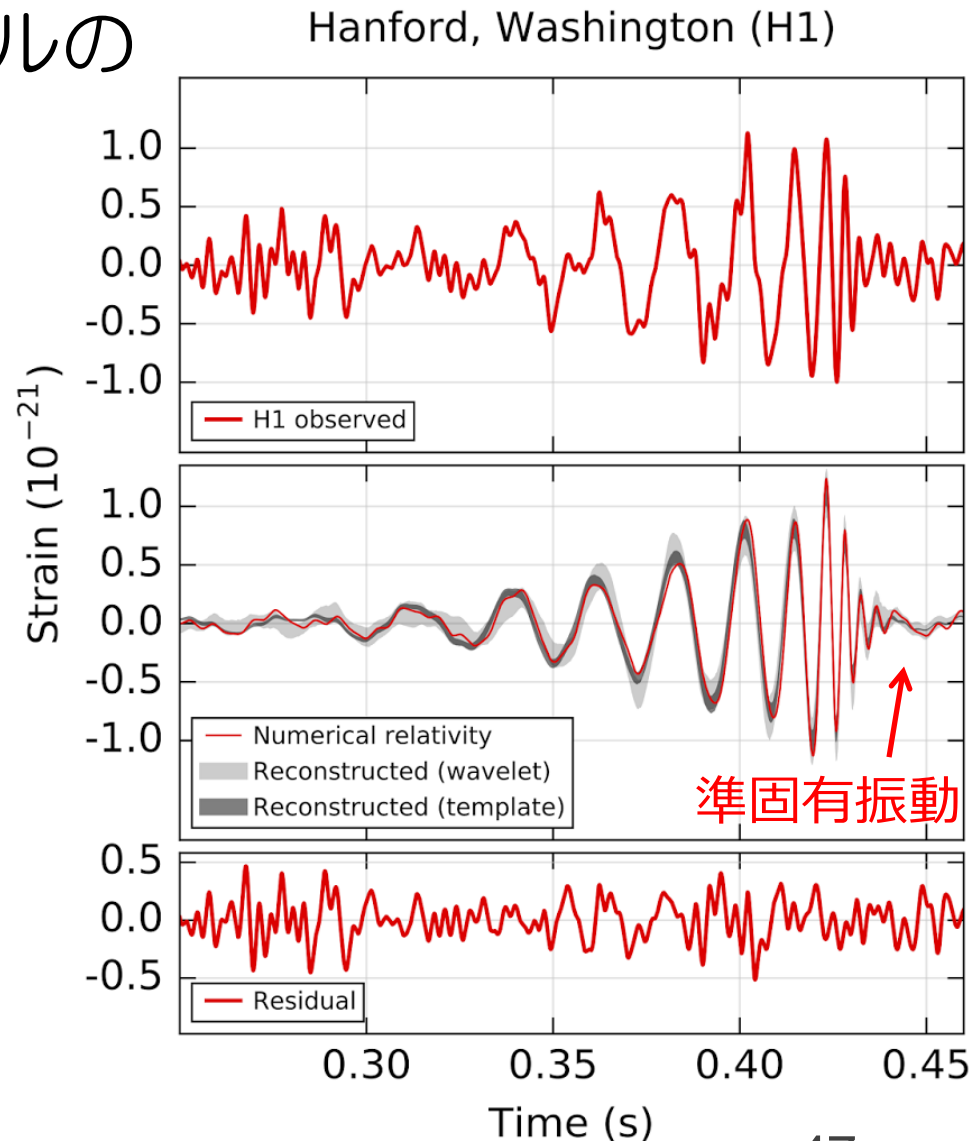
primary $0.32^{+0.49}_{-0.29}$

secondary $0.44^{+0.50}_{-0.40}$

remnant $0.67^{+0.05}_{-0.07}$

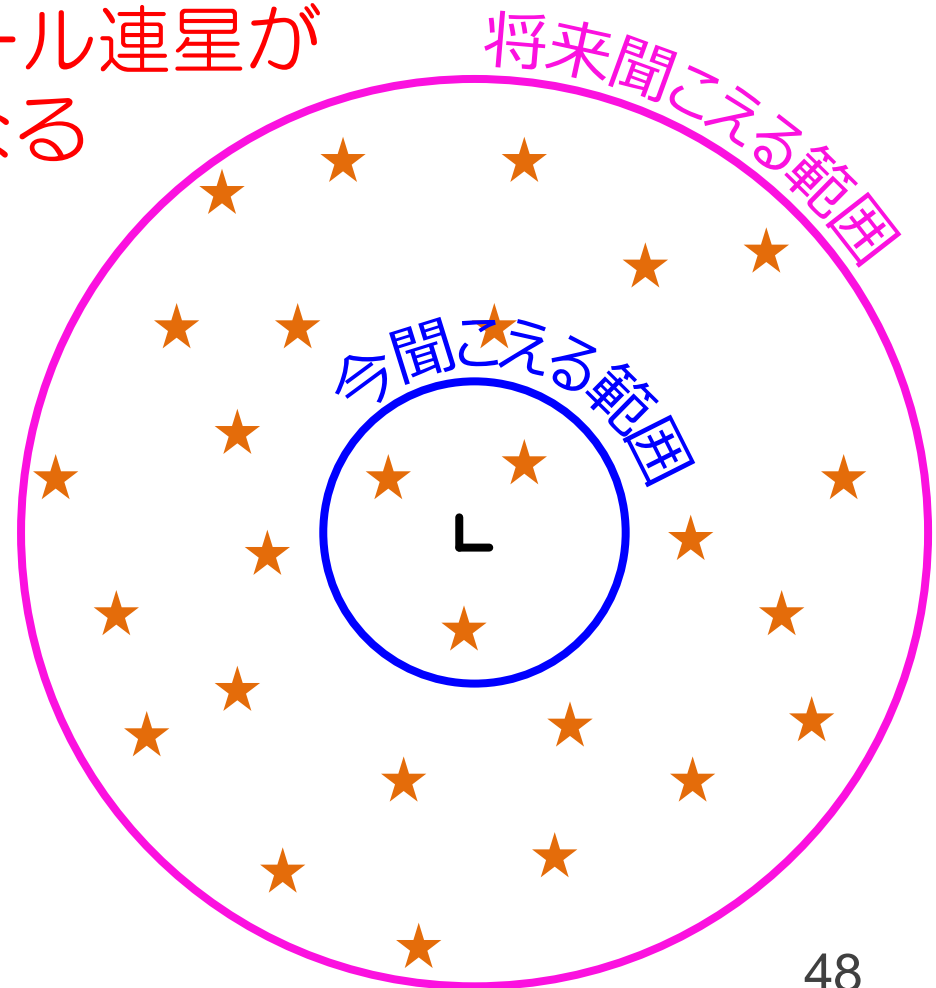
- スピンから連星の起源を示唆できる

- よりたくさん、よりSNRの高い検出が必要



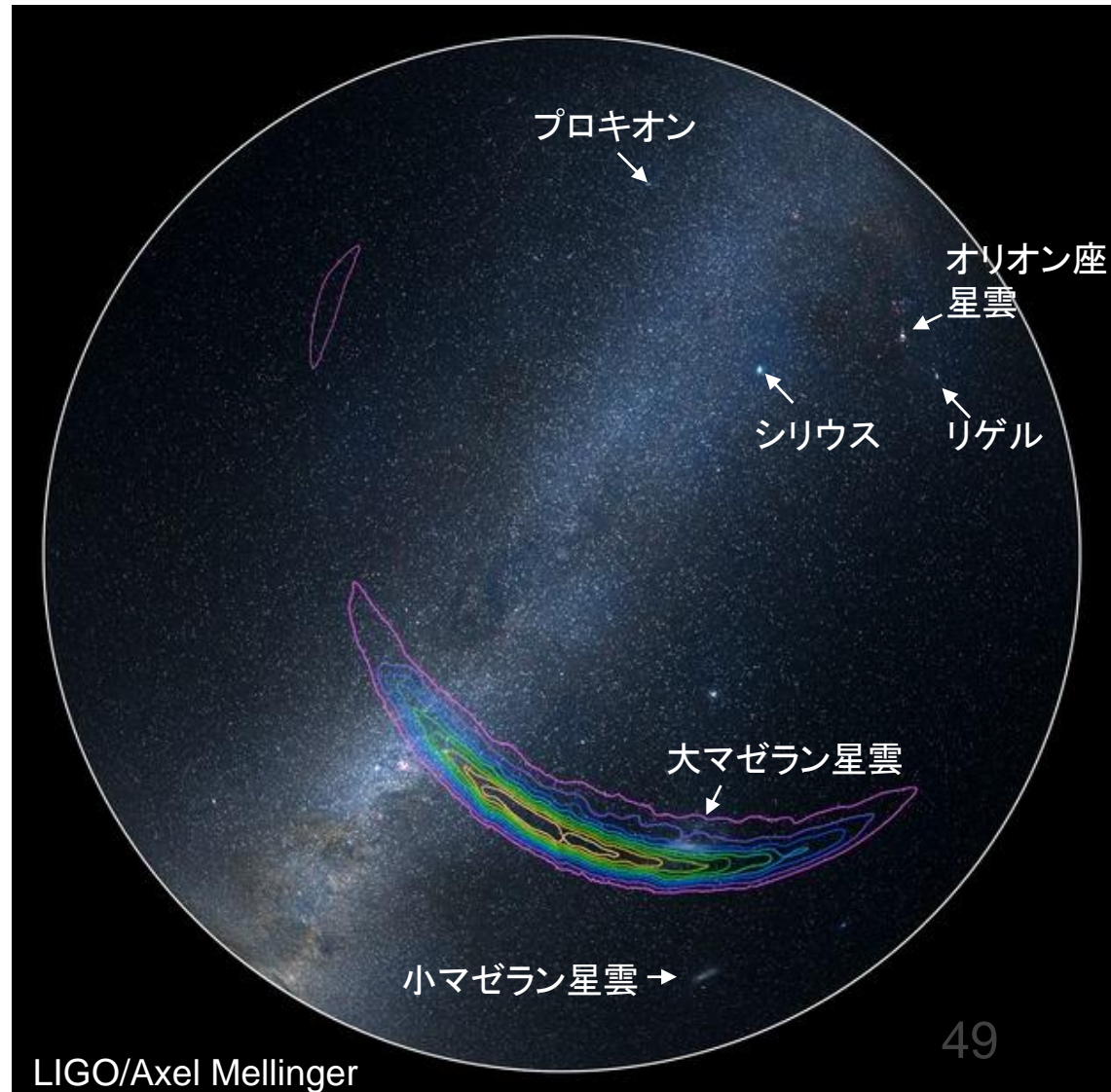
今後の展望

- LIGOは今後2-3年で感度を3倍にする予定
 - 3倍遠くまで観測できる
 - 27倍ブラックホール連星が見つかりやすくなる
- ブラックホール連星がたくさん見つかりると、質量分布や年に何個できるかが精度よくわかる
 - ブラックホールがどう生まれるのかがわかる



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



波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

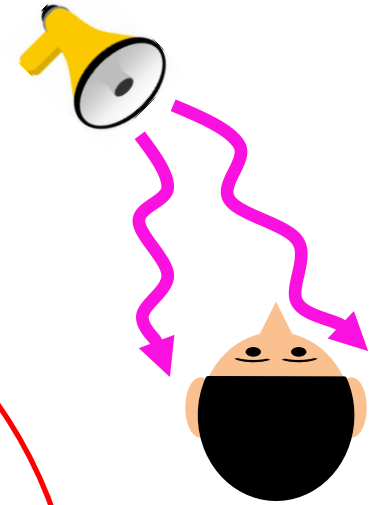
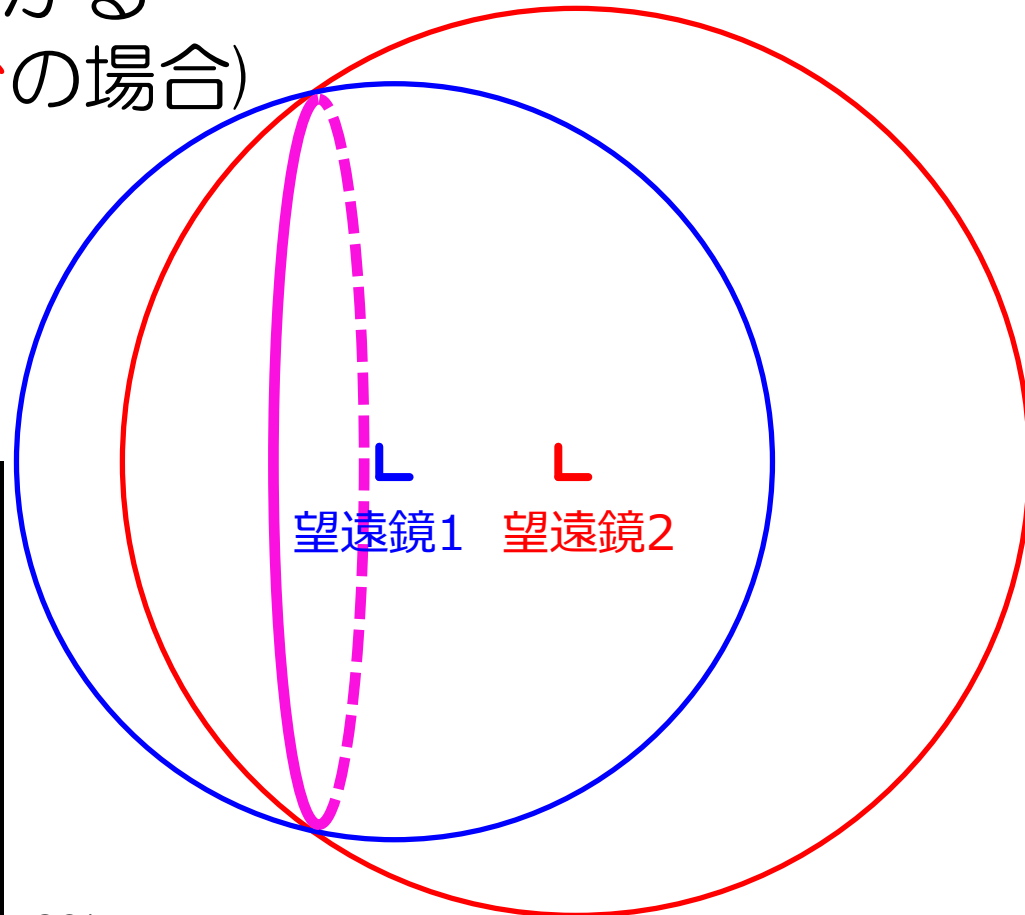


到達時刻にわずかな差が生じる

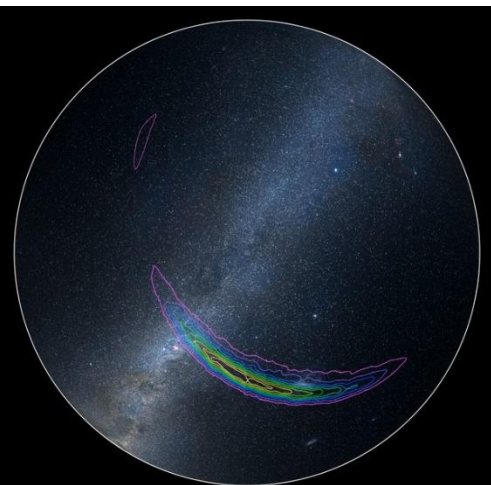
波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

円周上のどこからか
あることはわかる
(望遠鏡が**2台**の場合)



人間の耳
と同じ

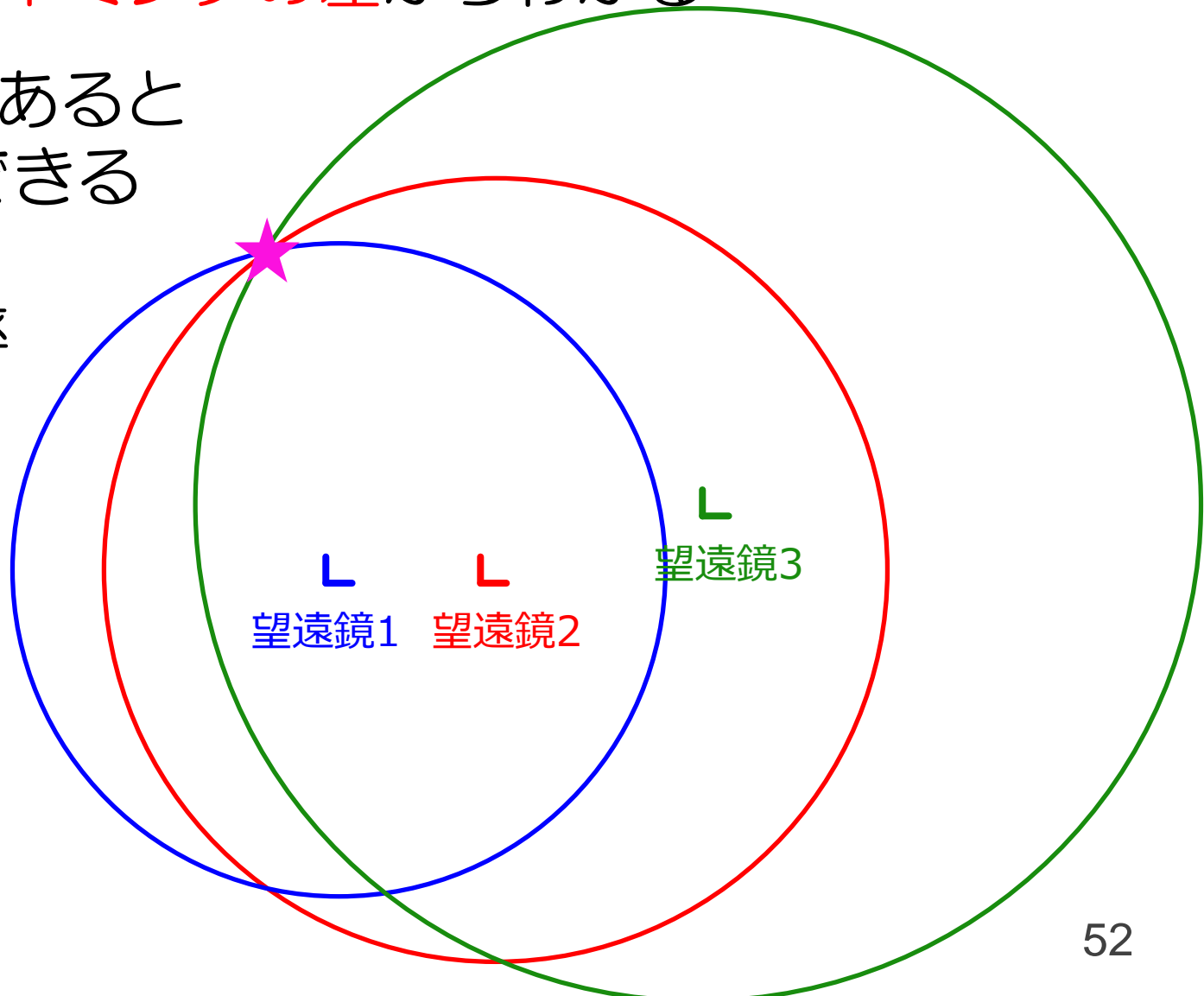


波源の特定方法

- 検出の**タイミングの差**からわかる

望遠鏡が**3台**あると
完全に特定できる

精度や稼働率
を考えると
さらに4台、
5台、と
複数台必要



世界の重力波観測ネットワーク

- 各国で建設・改良が進行中

GEO-HF
(稼働中)



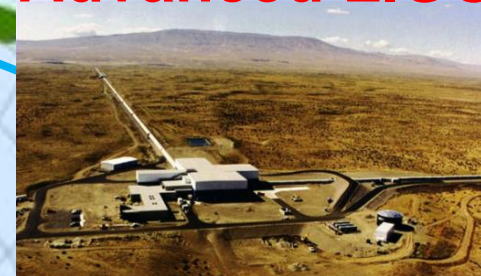
Advanced LIGO
(O2へ準備中)



Advanced Virgo
(建設中)



Advanced LIGO



KAGRA
(建設中)



LIGO-India (原則承認)



KAGRA建設中

- 大型**低温**重力波望遠鏡 (愛称: かぐら)
- 岐阜県の神岡鉱山**地下**に建設中
- 日本を中心に国内外60以上の大学・研究機関、200人以上の研究者
- **地下建設と低温が大きな特徴**



プロジェクト代表:
梶田隆章



などなど

第1回まとめ

- 予言から100年経ち、2015年に**重力波初検出**
- 重力波とは時空の歪みが光速で伝わる波
- **レーザー干渉計**で検出できる
- **ブラックホール連星合体**からの重力波を初検出
- **30太陽質量**ものブラックホールの存在が明らかに
ブラックホールはどのようにできるのか？
- 到来方向はまだあまり特定できていない
3台以上の同時観測、**国際観測ネットワーク**必要
- 大型低温重力波望遠鏡**KAGRA**
岐阜県神岡鉱山地下に建設中