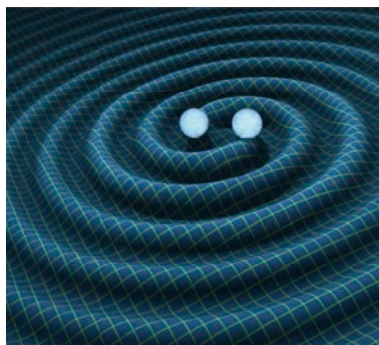
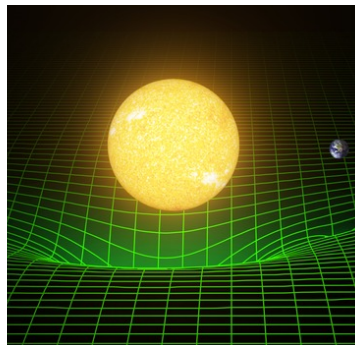
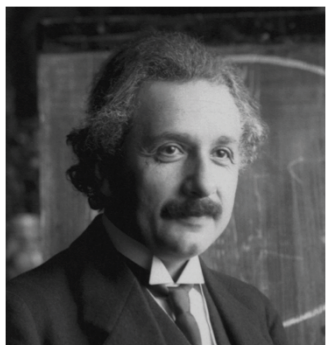


摂南大学 2016年6月2日

「重力波が紐解く宇宙の謎」 - ブラックホールは見つかったのか? -

一般相対性理論 と 重力波



京都大学 基礎物理学研究所

齊藤 遼

大阪大学理学研究科

棚橋典大

2016年2月11日

アメリカLIGOチームが「**重力波**」を検出したと発表！



We have detected **gravitational waves**.

We did it!

我々は**重力波**を検出しました。

やりました！



David Reitze

LIGO Laboratory Executive Director, Caltech

LIGOによる重力波検出のアナウンス YouTubeより

重力波

[関連ニュースはこちら](#) >

初観測 一般相対性理論裏付け 宇宙の謎に光 米チーム成功

毎日新聞 2016年2月12日 東京朝刊

2016.2.12 06:05 産経新聞

文字の大きさ **小** **中** **大** 印刷

宇宙の「重力波」を初検出 米チームが確認 アインシュタインが100年前に予言

朝日新聞デジタル > **記事**

サイエンス

宇宙・天文

重力波の初観測、宇宙探究の新境地に 世紀の宿題に答え

2016年2月12日09時10分

前半：「一般相対性理論と重力波」 （齊藤）

- ✓ 「重力波」とは何か？ “重力” の 波？
- ✓ アインシュタインの「一般相対性理論」
アインシュタインはどうやって「重力波」を予言した？
- ✓ 「重力波」をどうやって検出したのか？

後半：「重力波検出がもたらすもの」 （棚橋）

- ✓ 重力波はどこから来たのか？
- ✓ 今回の重力波検出から何が分かるか？
- ✓ 重力波を使って今後できること・分かること

重力波とは何か？

「重力波」とは何か？



水の波 = 水面の高さの変化が伝わる



音波 = 空気の密度の変化が伝わる

「重力波」とは何か？



水の波 = 水面の高さの変化が伝わる

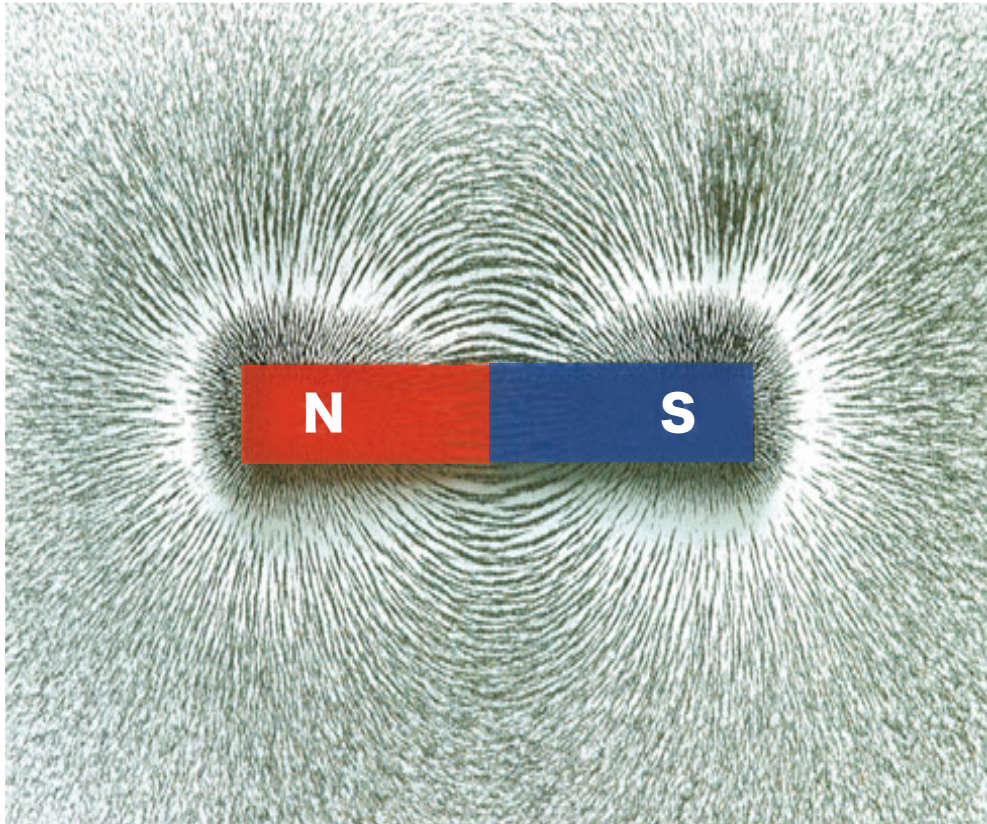


音波 = 空気の密度の変化が伝わる

重力波 = “重力”の波？

力と“場”

力は“場”を媒介して、作用する



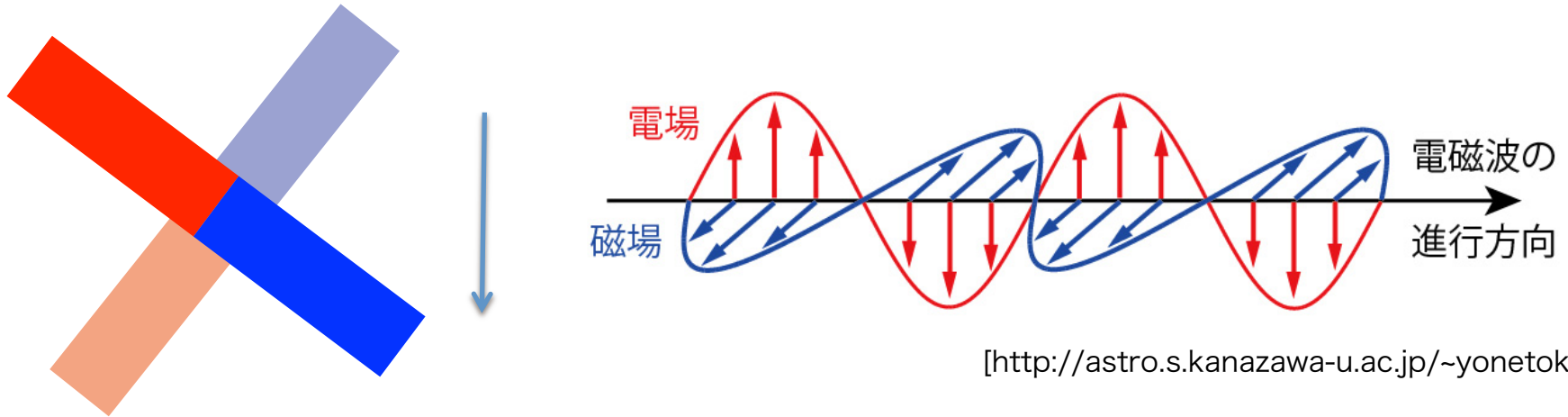
磁石が砂鉄に磁力を及ぼす



磁石の周りにまず「磁場」が
つくられ、

「磁場」が砂鉄に力を及ぼす

光 = 電磁波 = 電場と磁場の波



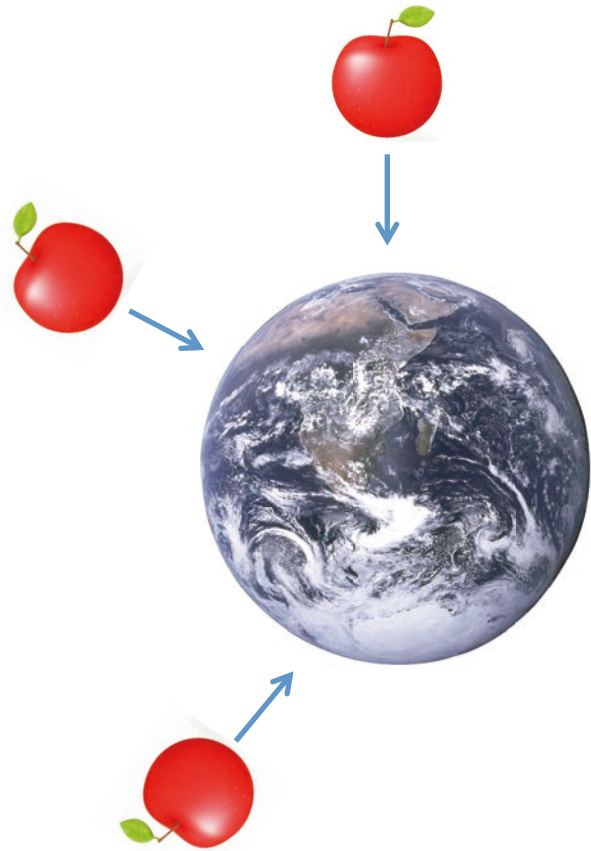
磁石や電荷を動かすと、
電場と磁場の波 = 電磁波 が生じる

メモ: 磁場の変化 → 電場の生成
電場の変化 → 磁場の生成



マックスウェル (1865)

重力波 = 重力場の波



モノの間にはその質量に比例して、重力が働く



モノの質量によって、「重力場」がつけられる

電磁波の時のように、質量を動かすと、

重力場の波 = 重力波

が生じる？

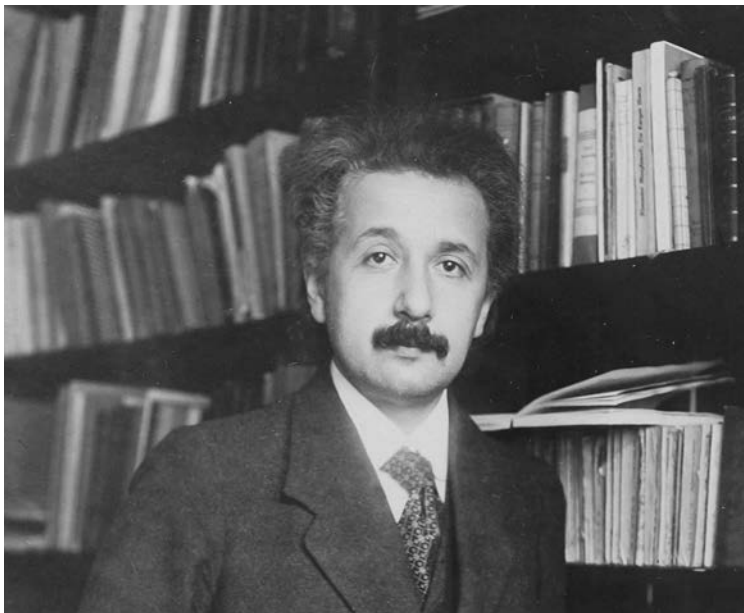


アインシュタインの予言

電磁波の時のように、質量を動かすと、

重力場の波 = 重力波

が生じる？



アインシュタイン (1916)

Yes!

私が1915年に提案した**一般相対性理論**によれば、重力場の変化は**光と同じ速さ**で波として伝わっていく！

アインシュタインの相対性理論

“特殊”相対性理論と“一般”相対性理論

“特殊”相対性理論と“電磁波”

電磁波（光）の不思議な性質

身近な波は、媒質に対して動くと伝わる速さが変化する

音波

空気



待て！

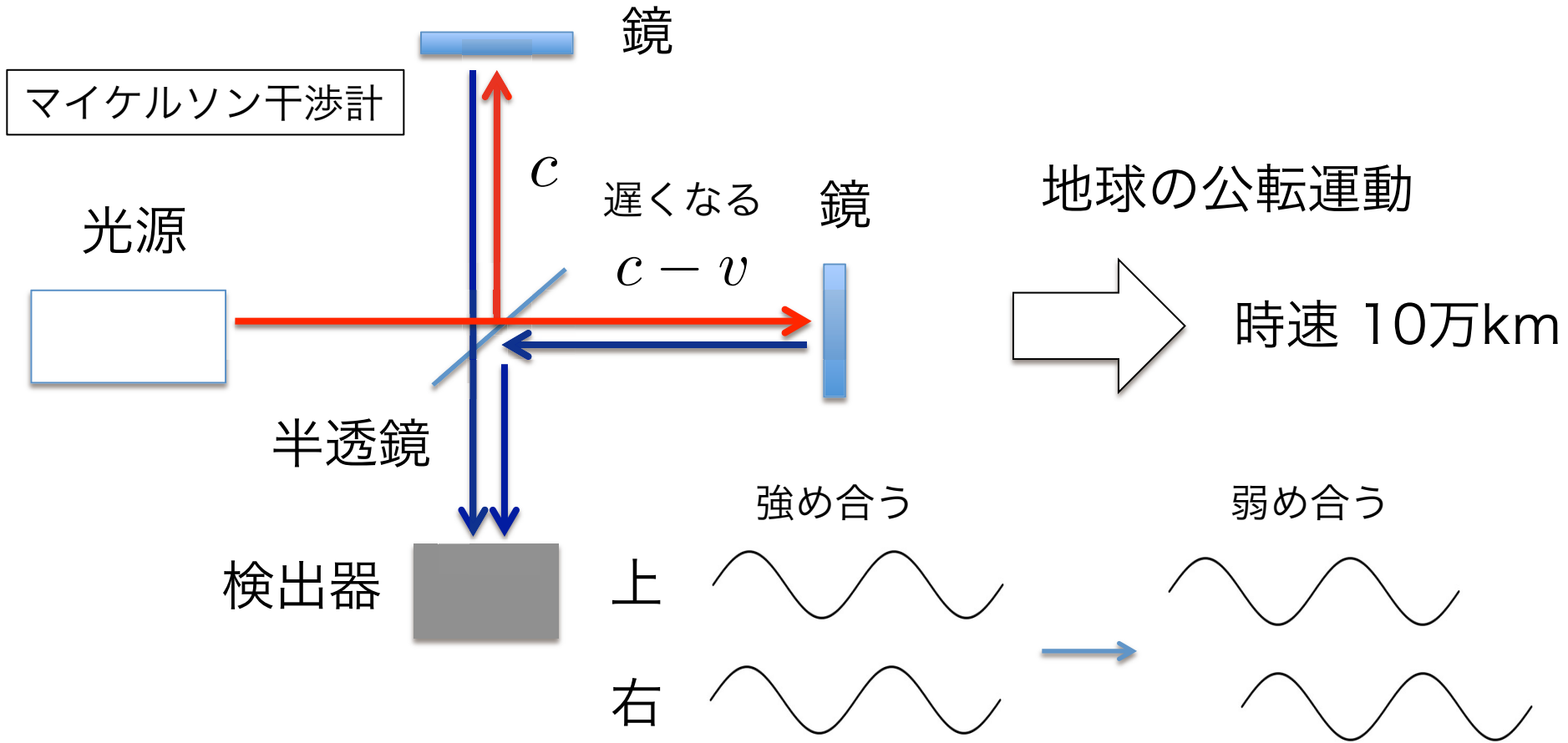


走っている分だけ、
音が届くのが遅くなる

光にも媒質（エーテル）があり、
エーテルに対して動いていると

光の速さは変わるはず？

マイケルソン・モーリーの実験 (1887)



光の速さが変わった分、遅れて入ってくるはず

光速度不変の原理

光の速さが変わっている証拠は見つからなかった、、、

1907年 ノーベル物理学賞

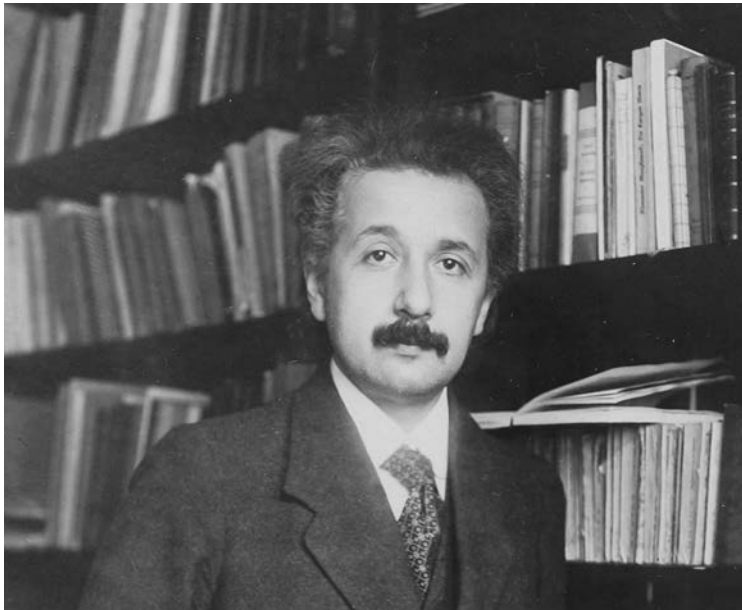


マイケルソン



モーリー

アインシュタインの提案 (1905)



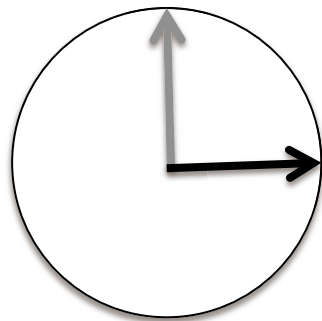
光の速さが変わらないことを**自然の原理**として認めよう

すると、**時空 (=時間+空間)** に対する考え方を**変更**しなければならない

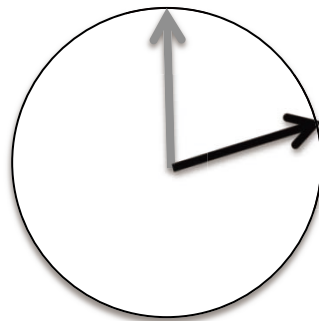
特殊相対性理論


時間の遅れとローレンツ収縮

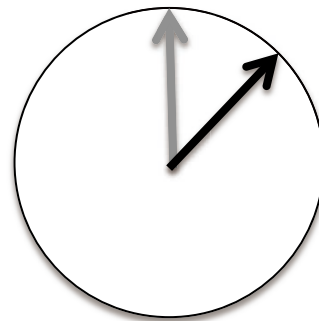
動いていると時間の進みは遅くなり、モノの長さは短くなる（ローレンツ収縮）




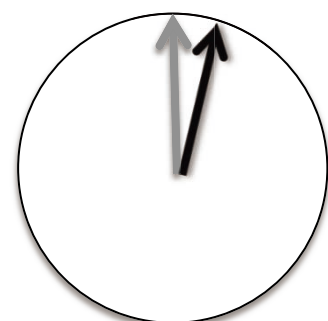
速度ゼロ





 $v = 0.3c$

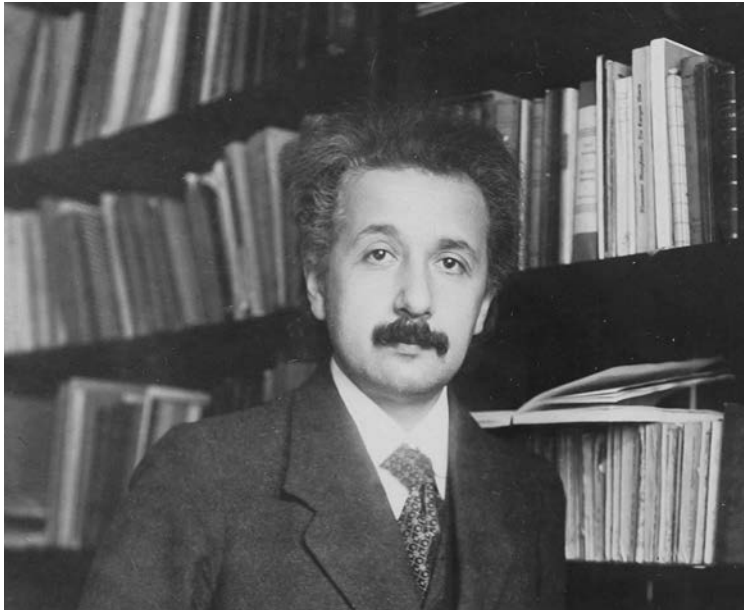



 $v = 0.6c$




 $v = 0.9c$

加速運動している人からは
時空（時間 + 空間）は
どのように見えるだろうか？

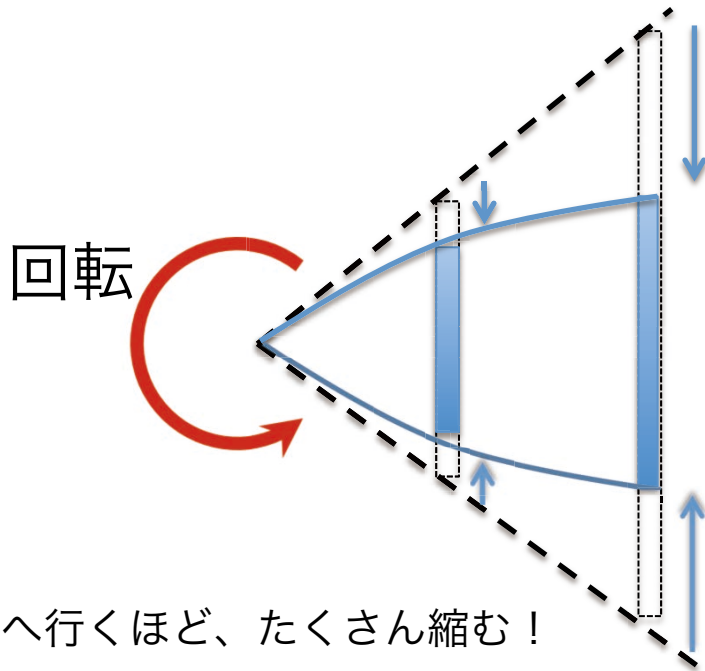


“一般”相対性理論と“重力”

加速度系と「時空」の“歪み”

加速度系では、時刻や位置によって、時間の遅れ方やモノの縮み方が異なる

時空 (= 時間 + 空間) が“歪”んでいるように見える



外側に行くほど、速度は大きい



外側に行くほど、長さが縮む

遠くへ行くほど、たくさん縮む！

アインシュタインのアイデア

重力による加速度はモノの種類や質量によらない (等価原理)

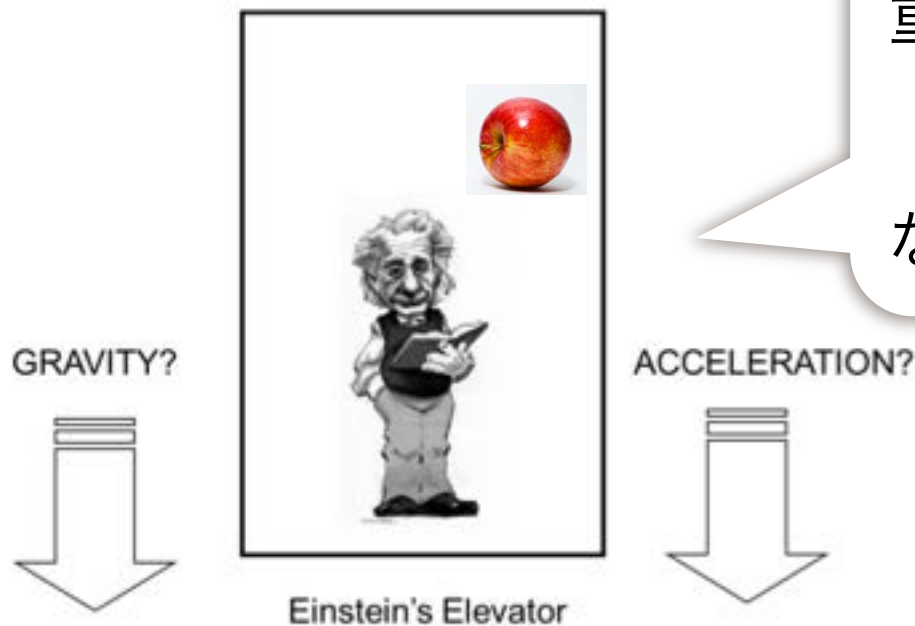


OK GO “Upside Down & Inside Out (No Gravity)” MVより

アインシュタインのアイデア

重力による加速度はモノの種類や質量によらない (等価原理)

加速運動と重力は区別できない！



重力とは、

時空の歪み

なのではないだろうか？

重力？

加速運動？

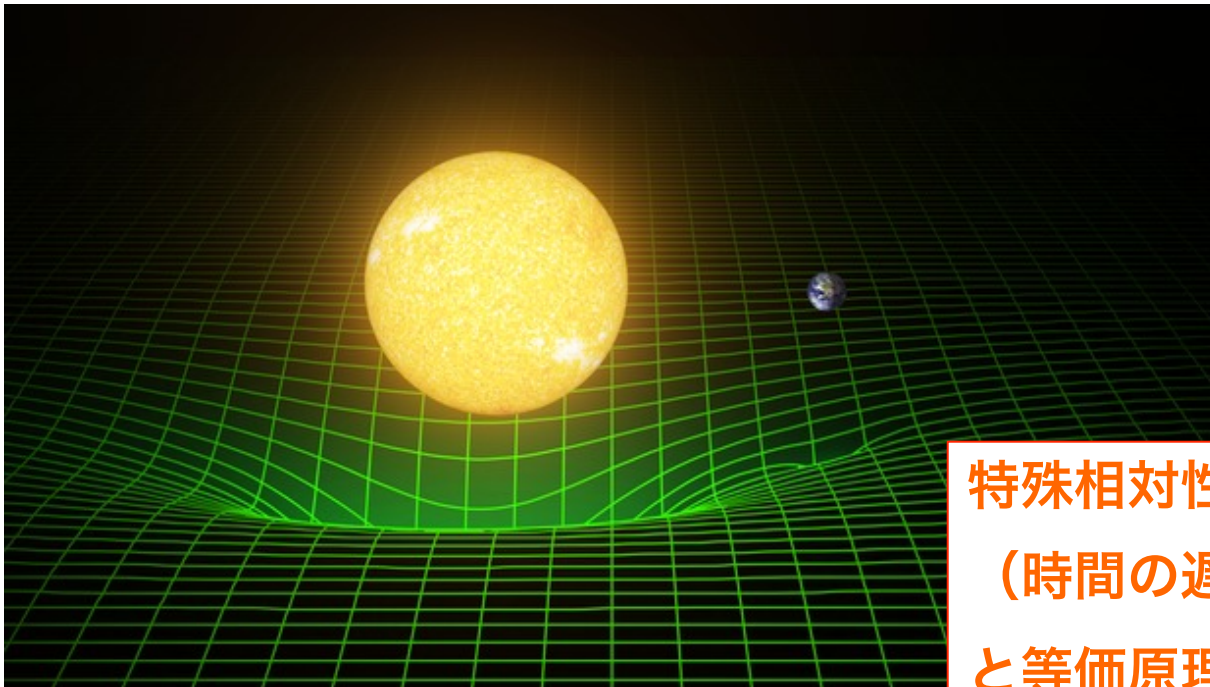
アインシュタインのエレベーターの思考実験

[<https://deardreinstein.com>]

アインシュタインの一般相対性理論

重力とは時空の歪み（曲がり）であり、モノの質量によって、時空の歪みが生み出される

重いモノの周りでは、時間が遅れたり、モノが縮んだりする！



特殊相対性理論

（時間の遅れとローレンツ収縮）

と等価原理からの帰結！

一般相対性理論の成功

一般相対性理論のさまざまな予言が確かめられてきた：

重力レンズ効果

水星の近日点移動

宇宙の膨張

時間の遅れ



[NASA]

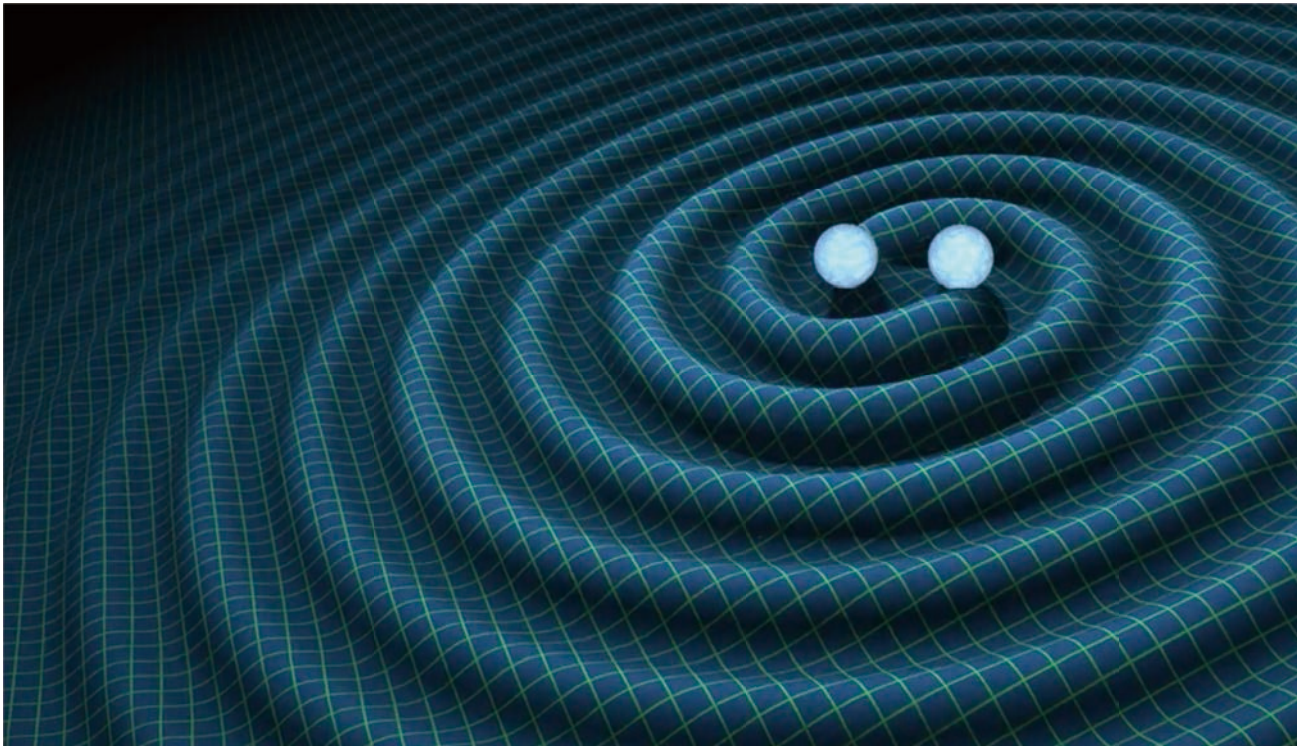
手前の星の重力によって、背後の銀河の像が歪む

GPSでは、地球の重力場による時間遅れを補正

重力波は一般相対性理論発表の翌年（1916年）に予言されていたものの、長く未発見であった

一般相対性理論の予言：重力波

重いモノを動かすと、時空の歪みは光の速さで空間を伝わっていく = 重力波！



重力波の生み出す時空の“歪み”

重力波が通過すると、通過面の空間が下図のように歪む



[<https://ja.wikipedia.org>]

歪みの大きさはとっっっっても小さい！

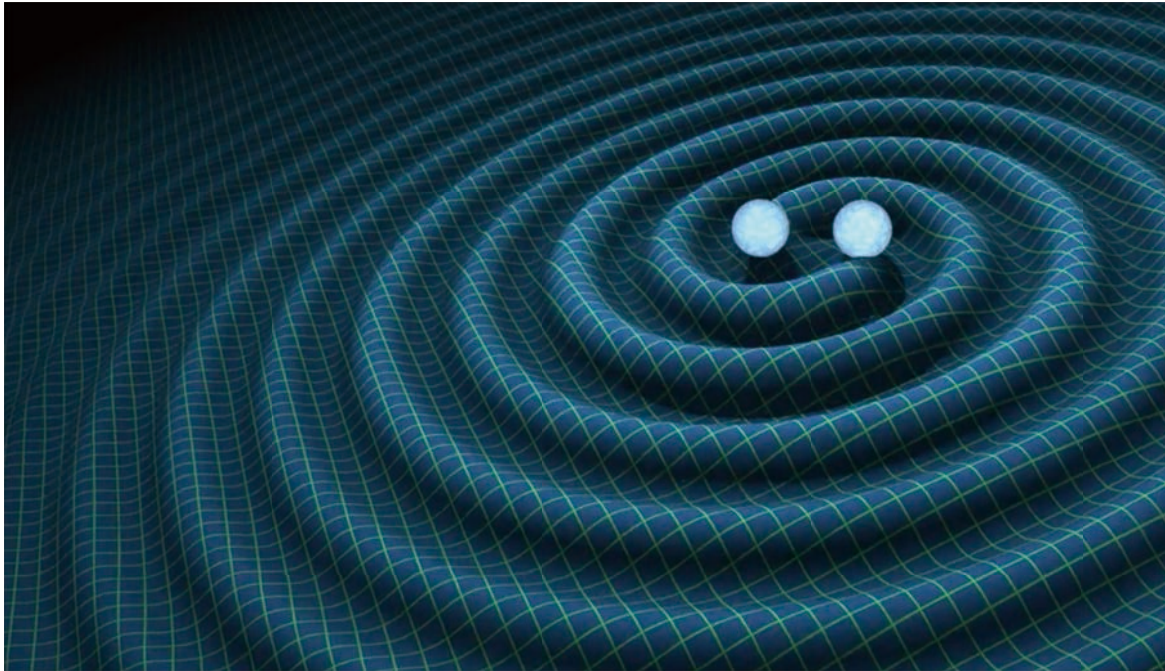
今回見つけた重力波の生み出す空間の歪み

$10^{-19} \% = 0.00000000000000000000000001 \%$

太陽と地球の距離を原子ぐらいの大きさだけ変える

重力波の間接的証拠

お互いの周りを回る中性子星



重力波を放出してエネルギーを失い、お互いに落ちていく

時間とともに公転周期が小さくなっていくはず！

重力波の間接的証拠

公転周期の変化 (赤点)

は

一般相対性理論の予言 (線)

と非常によく一致する

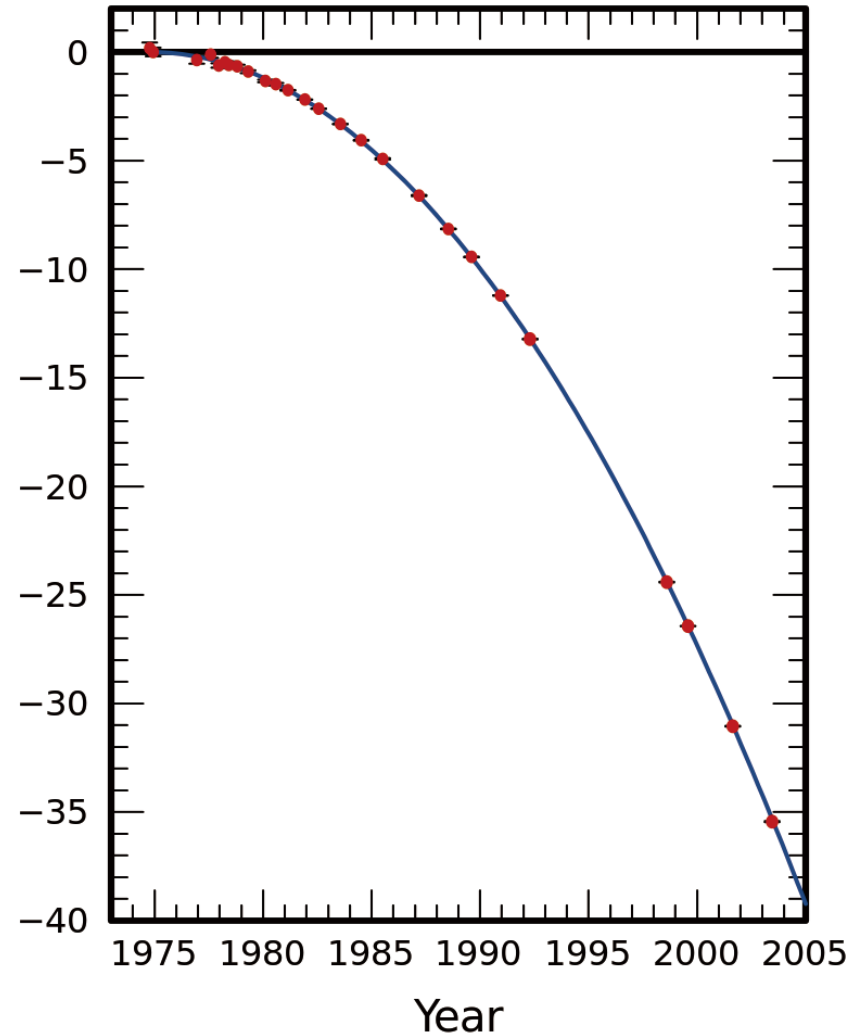
ハルス & テイラー (1974)



1993年
ノーベル物理学賞

[<https://astr109.wordpress.com>]

[Weisberg & Taylor 2004]



観測年

小まとめ

特殊相対性理論：時空の概念の変更

- ✓ 光速度不変の原理
- ✓ 運動による時間の遅れやモノの長さの収縮

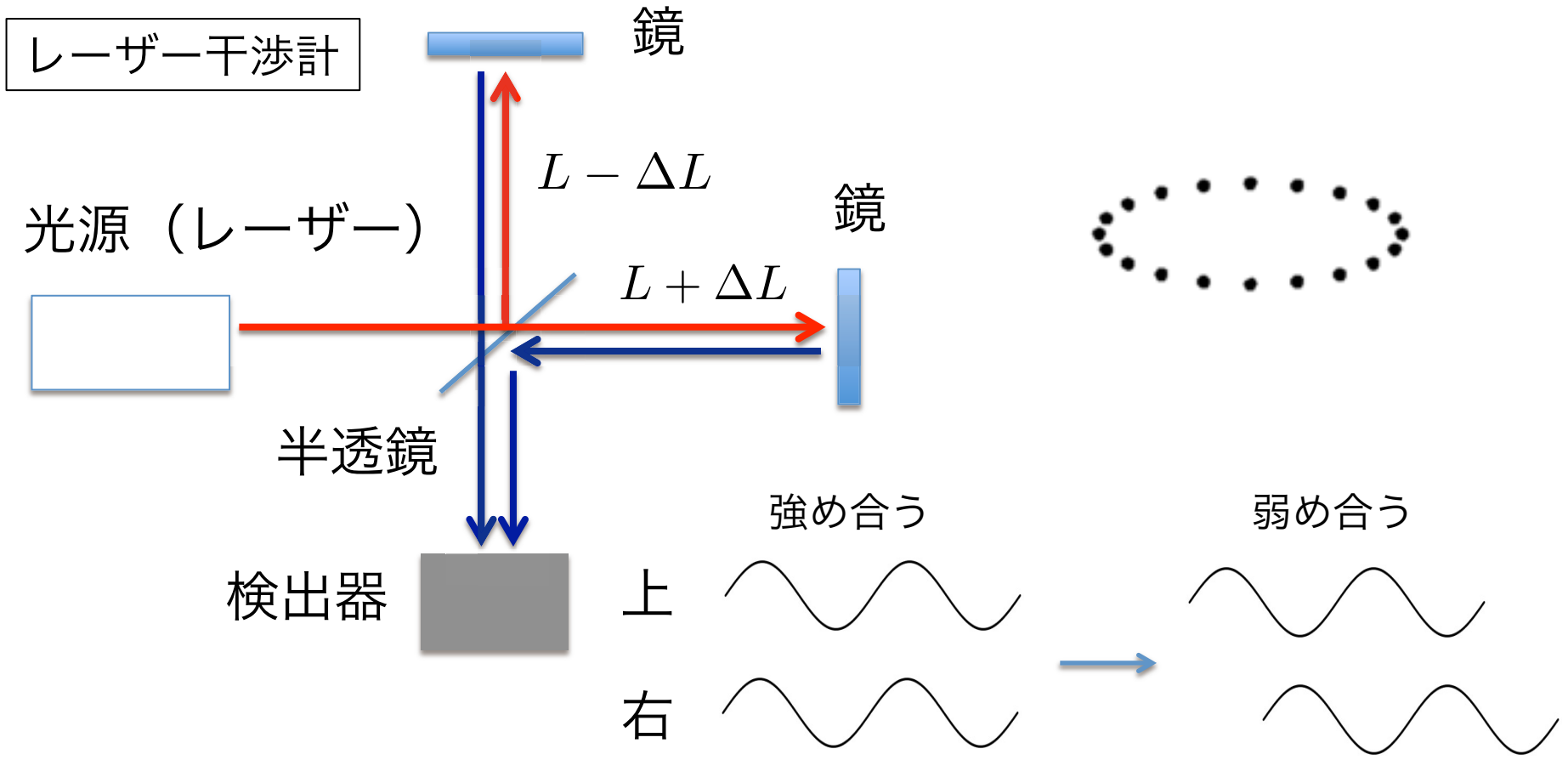
一般相対性理論：重力とは時空の“歪み”

- ✓ ほとんど実験事実によらずに、特殊相対性理論と等価原理から純理論的に導かれた
- ✓ その不可思議な予言はことごとく実験で確かめられてきた
- ✓ **重力波**はすぐに予言されたものの、間接的な証拠以外は見つかっていなかった

2015年9月、重力波を初めて直接検出！

重力波はどうやって検出されたか？

マイケルソン・モーリーの実験 再び



重力波が入射すると、“腕”の長さが変わって、検出器に入る時間がずれる

大きな干渉計が必要

重力波の生み出す歪みの大きさ

$$10^{-19} \% = 0.00000000000000000000000001 \%$$

1m の長さのモノが 10^{-21} m だけ伸びたり縮んだりする

髪の毛 (10^{-4} m)、ウイルス (10^{-7} m)、原子の大きさ (10^{-10} m)、

マイケルソン・モーリーの実験: 腕の長さ 11m

LIGOチームは重力波検出のため、

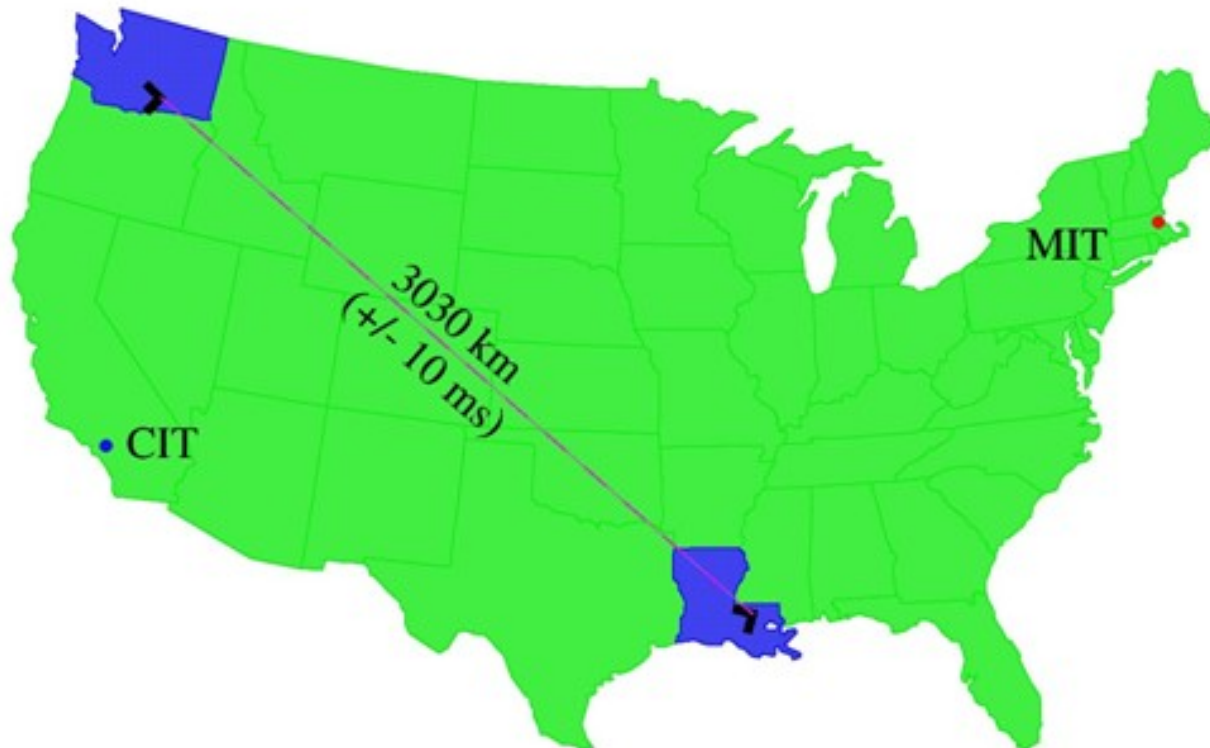
腕の長さが **4km** のレーザー干渉計を建設した

光は腕を100往復程度して検出器に入るため、実際上の長さはもっと長い

LIGO実験

LIGO = Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

3000km 離れた場所に 2 基の干渉計を建設



LIGO実験

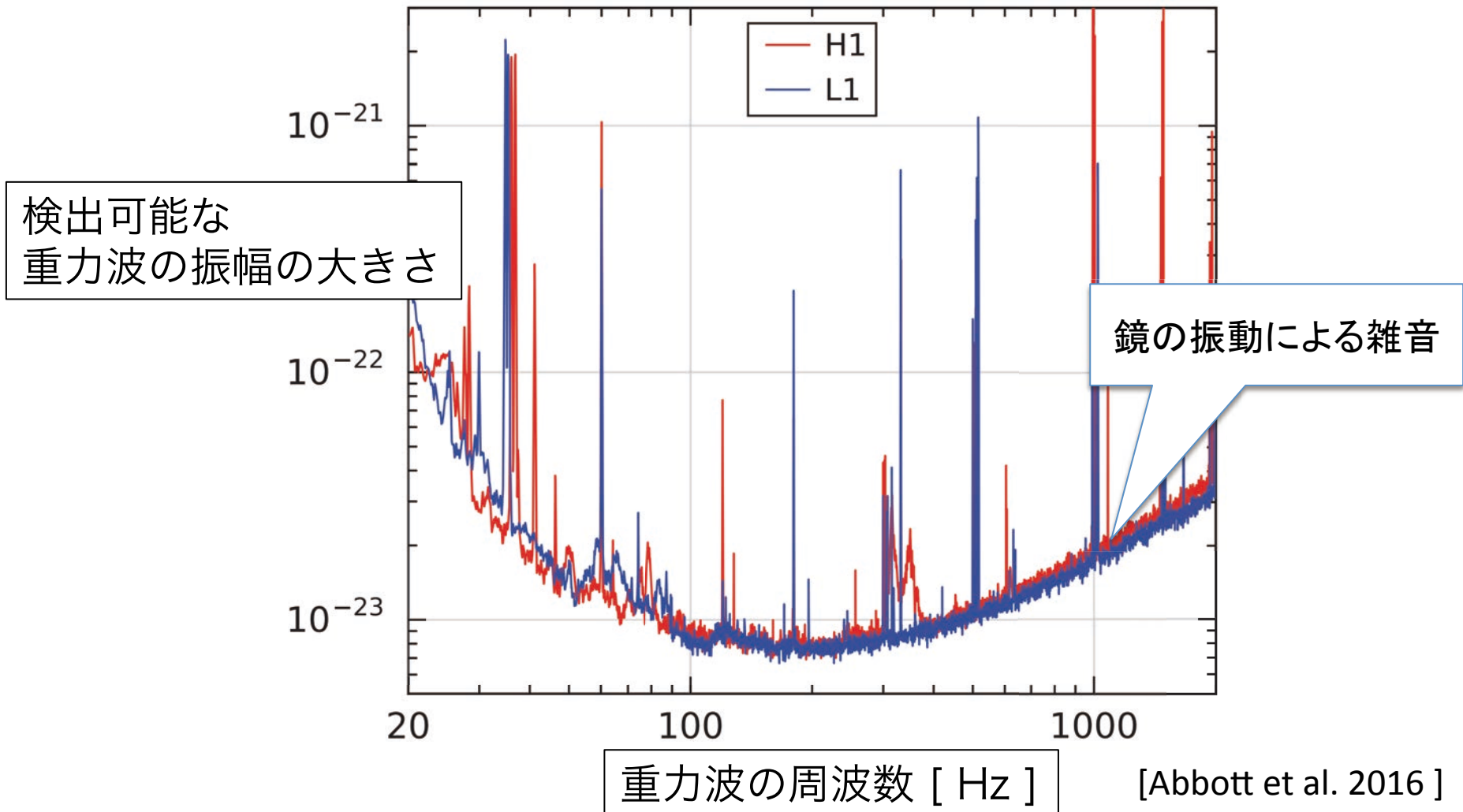
LIGO = Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory

3000km 離れた場所に 2 基の干渉計を建設



重力波検出はさまざまな雑音（振動）との闘い

地面振動や熱などで鏡は振動してしまう



長いテストの後、2015年運転開始！

2002年：テスト運転開始

2010年：テスト運転停止。感度を高めた**advanced LIGO**へ
(感度を4倍に)

2015年9月：本運転開始

運転開始直後に、2基の干渉計がほぼ同時に反応！

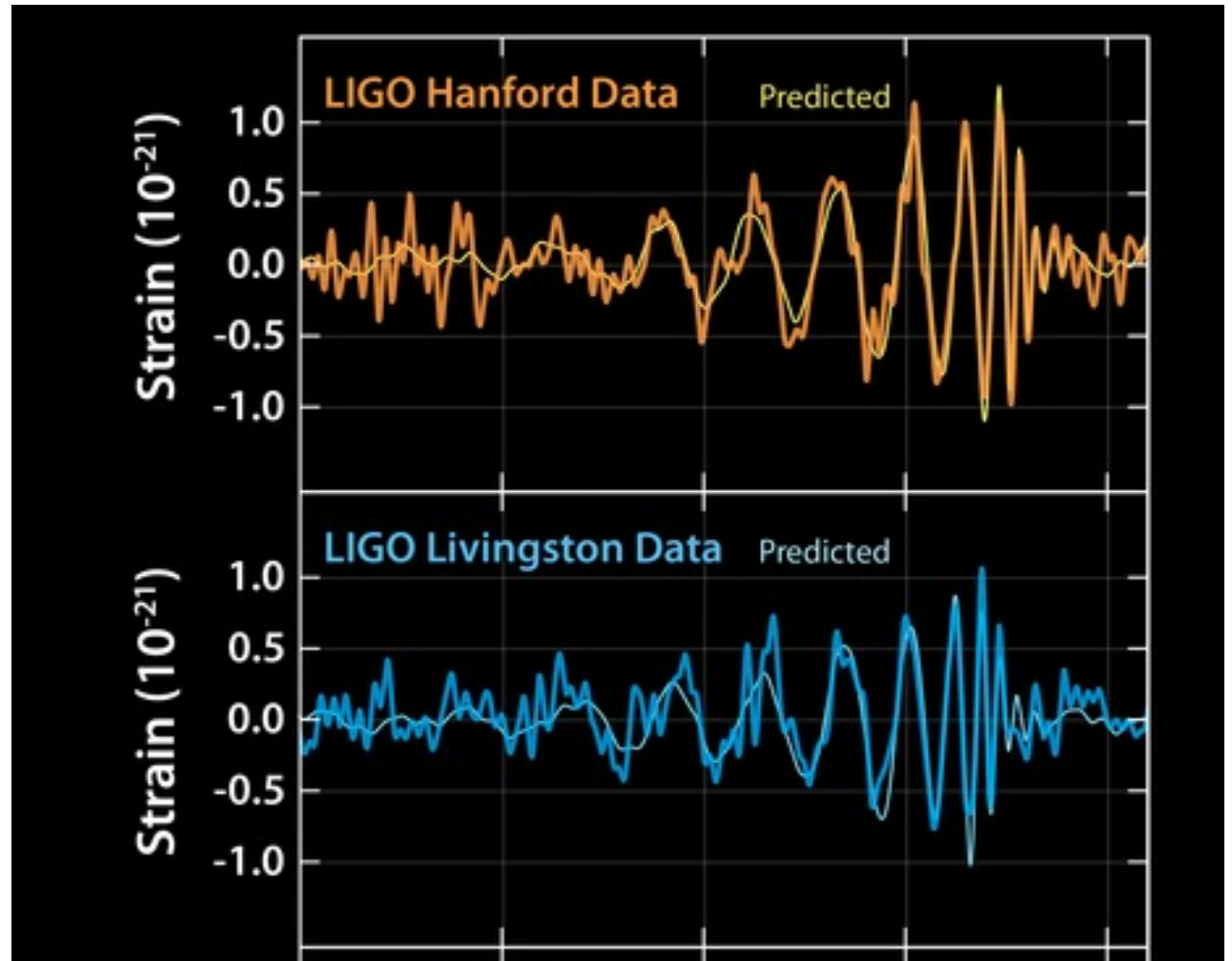
2台の干渉計で同様のシグナル

[<https://www.ligo.org>]

重力波の振幅

||

光の到達時間差

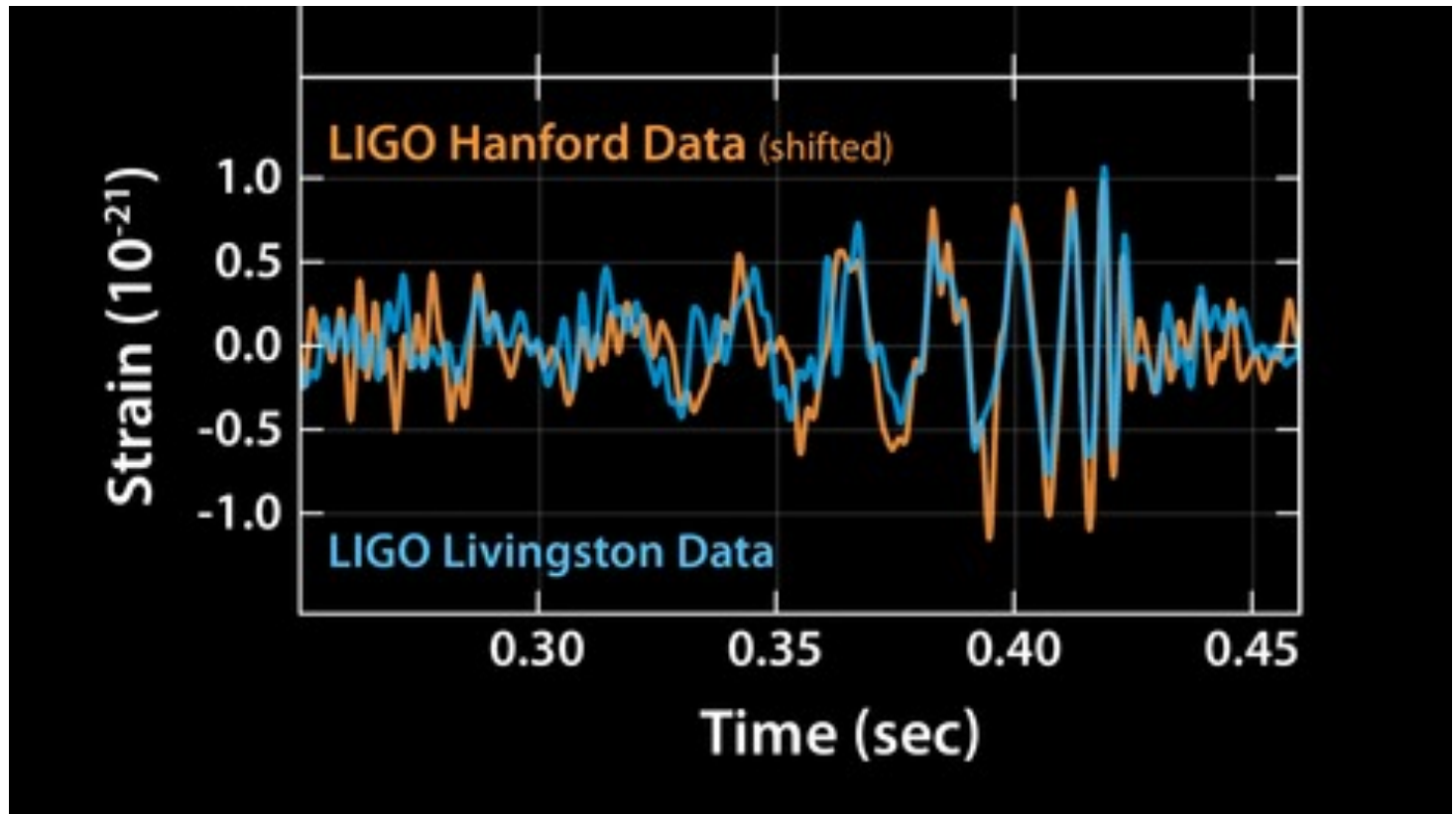


時間 [秒]

2台の干渉計で同様のシグナル

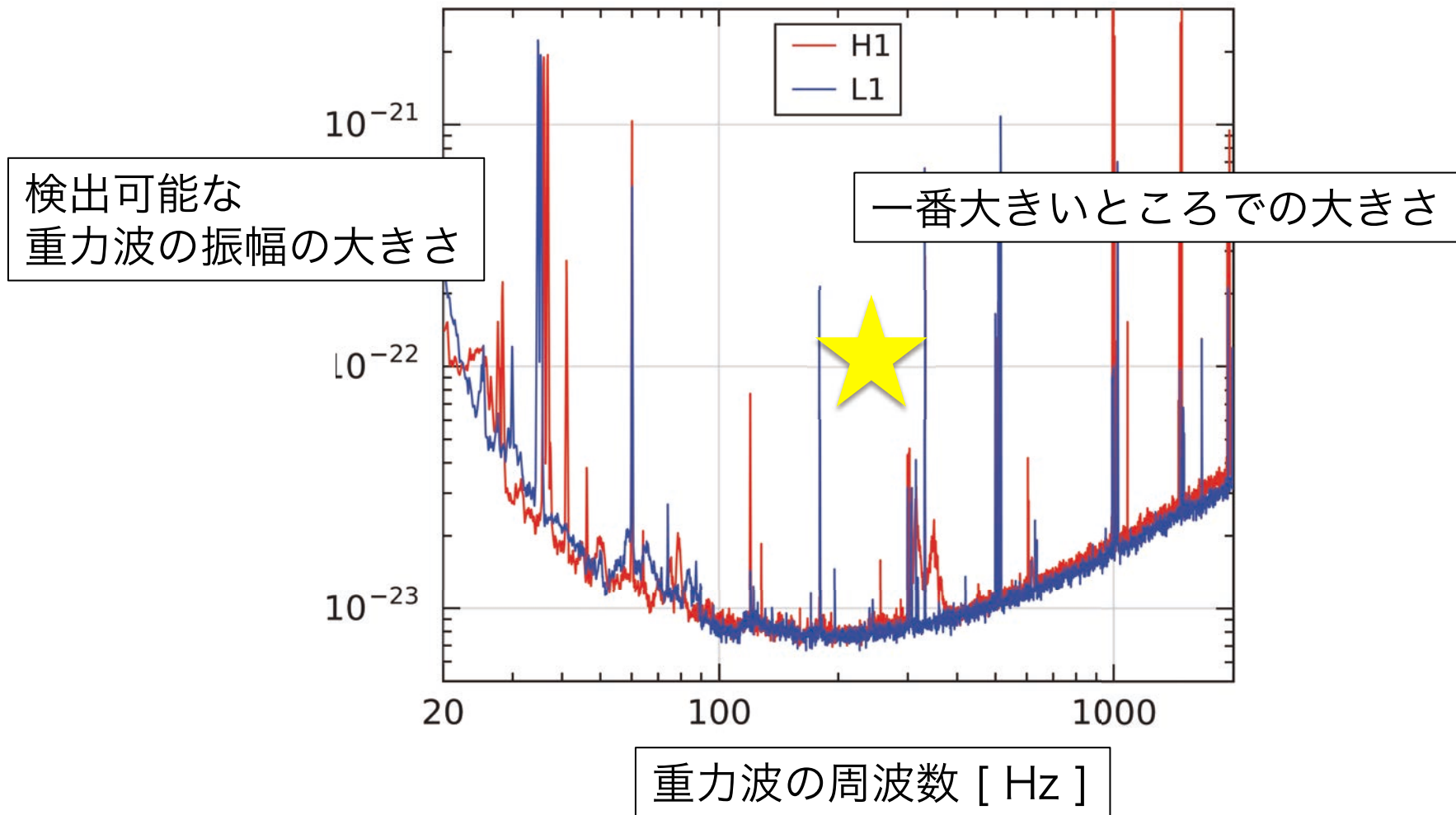
重ねてみると、、、

[<https://www.ligo.org>]



ほとんど一致した！

シグナルの大きさ



重力波と考えると、間違いない

2016年2月11日

アメリカLIGOチームが「**重力波**」を検出したと発表！



We have detected **gravitational waves**.

We did it!

我々は**重力波**を検出しました。

やりました！



David Reitze

LIGO Laboratory Executive Director, Caltech

LIGOによる重力波検出のアナウンス YouTubeより

アインシュタインの予言を100年越しで実証！



LIGOによる重力波検出のアナウンス YouTubeより

※ 会見の様子はYouTubeで見ることができる

前半：「一般相対性理論と重力波」 （齊藤）

- ✓ 「重力波」とは何か？ “重力” の 波？
- ✓ アインシュタインの「一般相対性理論」
アインシュタインはどうやって「重力波」を予言した？
- ✓ どうやって検出したのか？

後半：「重力波検出がもたらすもの」 （棚橋）

- ✓ この重力波はどこから来たのか？
- ✓ 今回の重力波検出から何が分かるか？
- ✓ 重力波を使って今後できること・分かること