



重力波天文学の夜明け

東京大学 宇宙線研究所

苔山 圭以子

Keiko Kokeyama

@ スーパーサイエンス ハイスクール,
東京大学 宇宙線研究所 神岡施設

2014/4/24

神岡の研究施設

地下にある鉱山跡のトンネルを利用して、
物理学の最先端研究施設がたくさんある！

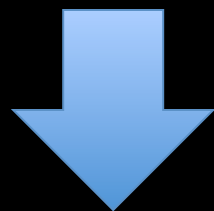


このレクチャーのテーマ

A visualization of gravitational waves, showing concentric, distorted wave patterns in shades of blue, green, and yellow, emanating from a central point. The waves are depicted as ripples in spacetime, with the central region being the most intense, shown in red and yellow.

重力波検出実験

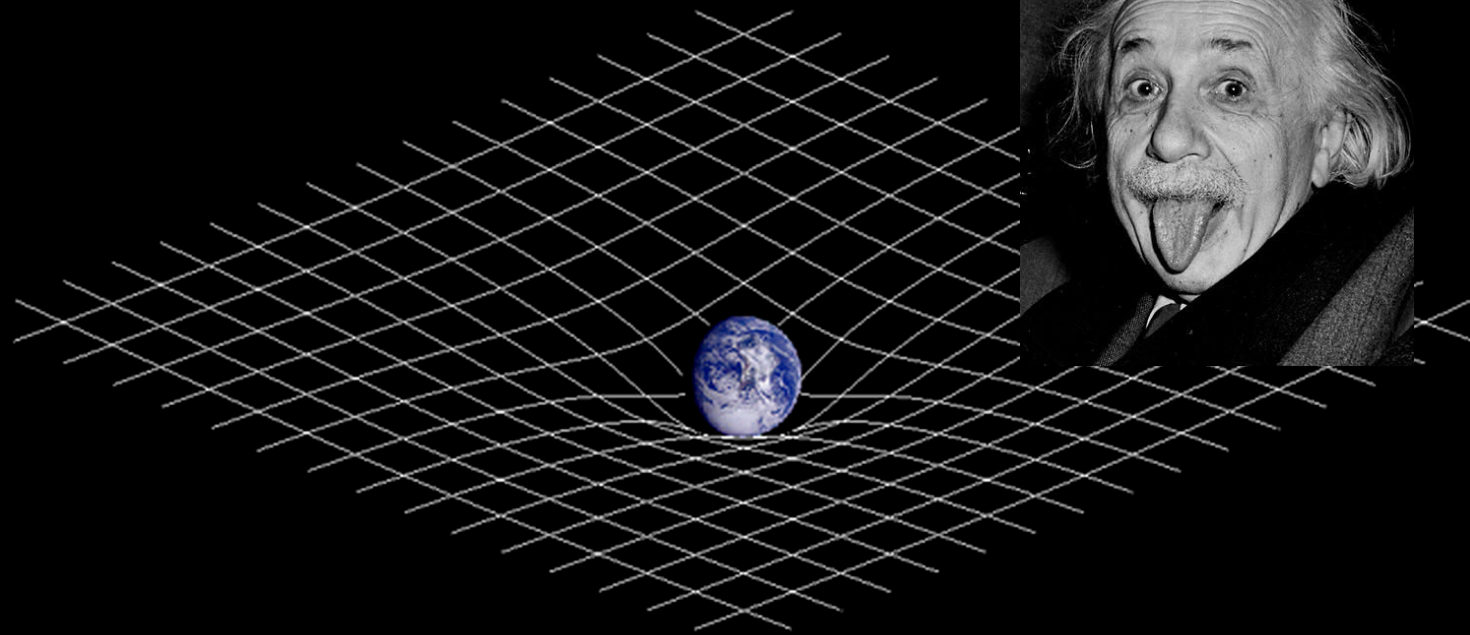
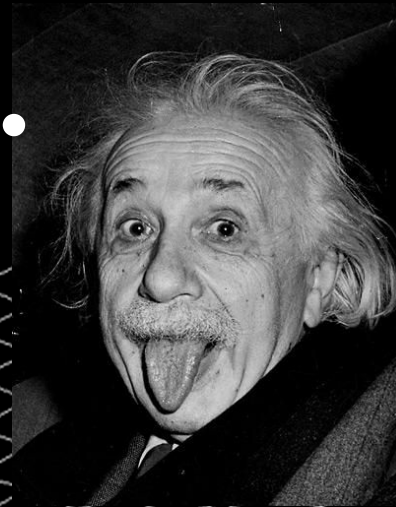
重力波とは？



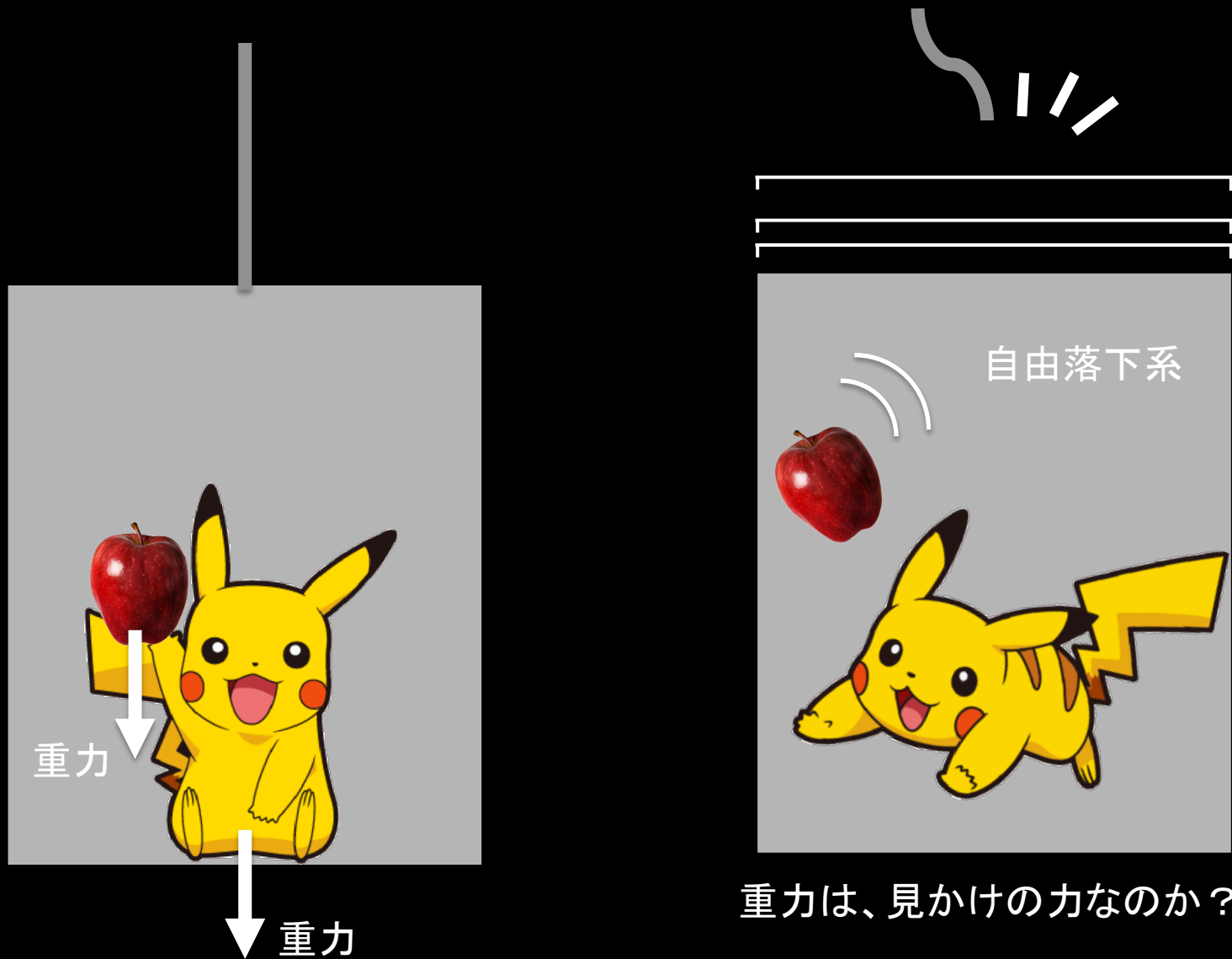
重力とは？

アインシュタインの相対性理論

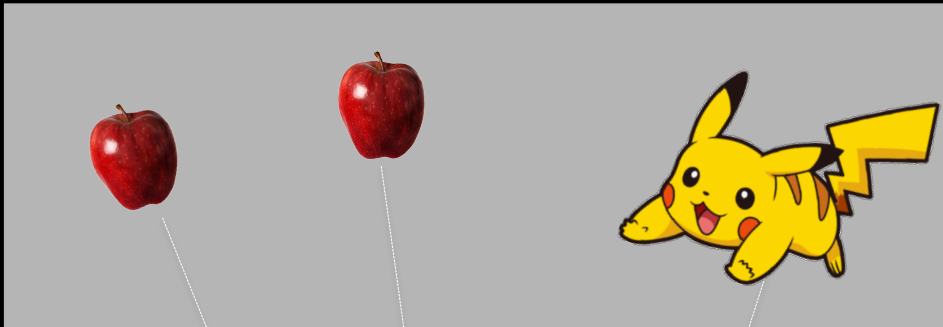
重力の本質とは？



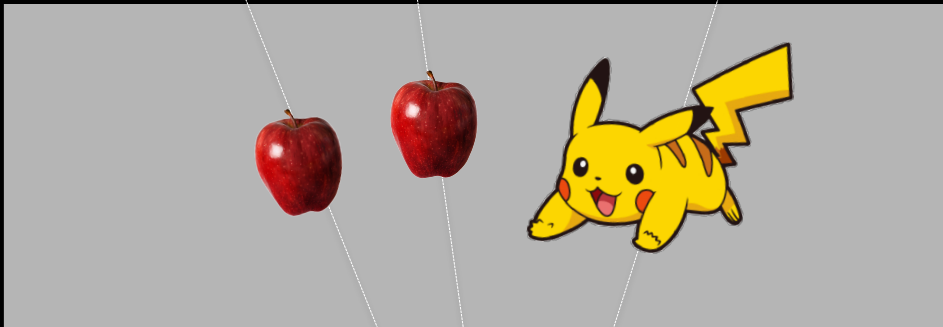
アインシュタインの思考実験



重力は、見かけの力なのか？

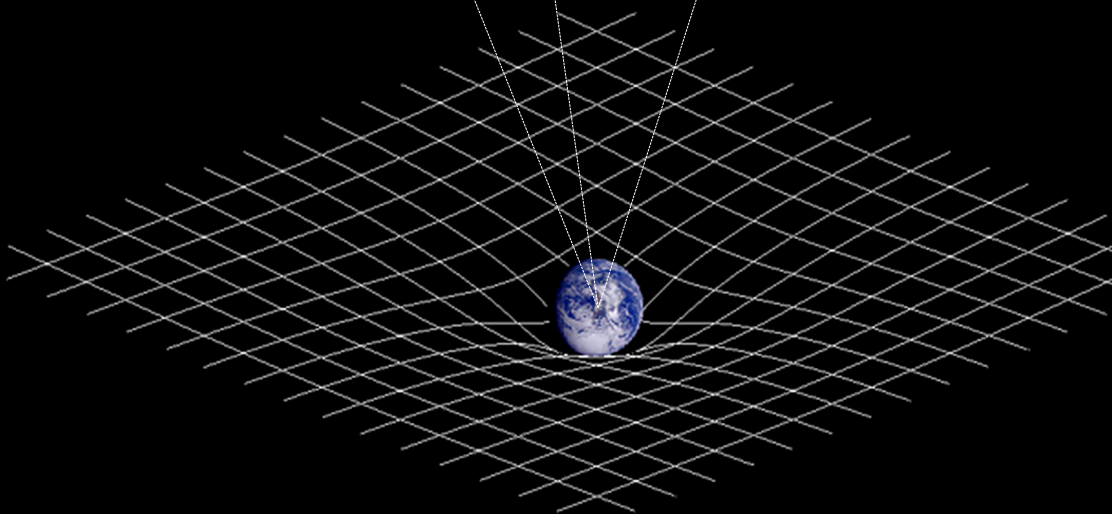


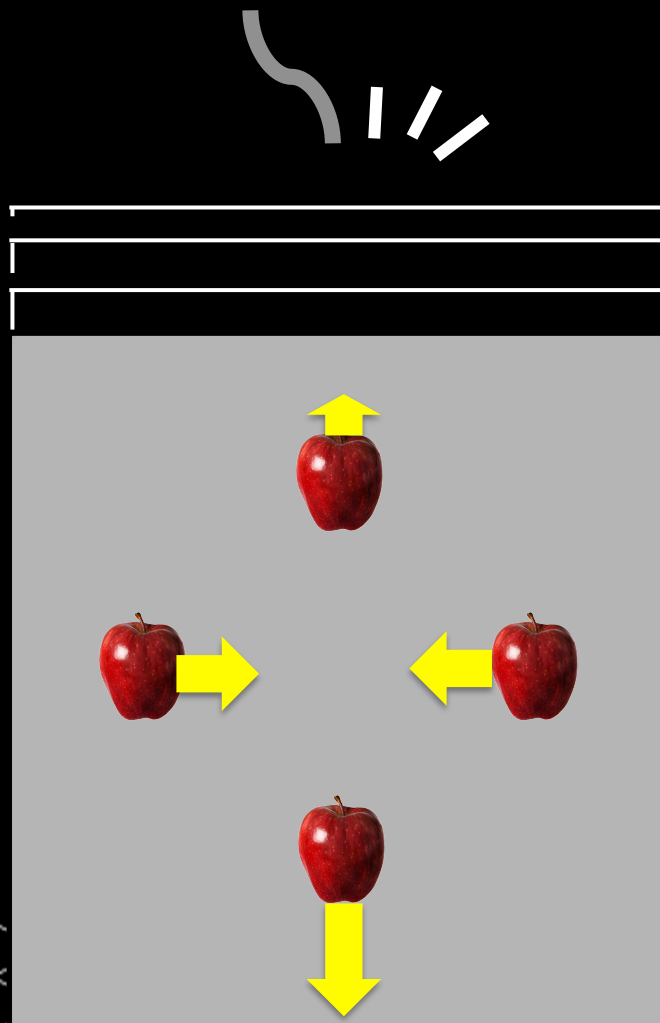
自由落下系のなかでは
重力を消すことができる
…ように見える。



地上に落ちるにしたがって、
ピカチュウやリンゴ同士の
位置が近づいてきた。

地球の重力の影響が、
場所によって力の大きさや
向きが一定ではないので、
完全にキャンセルできない。

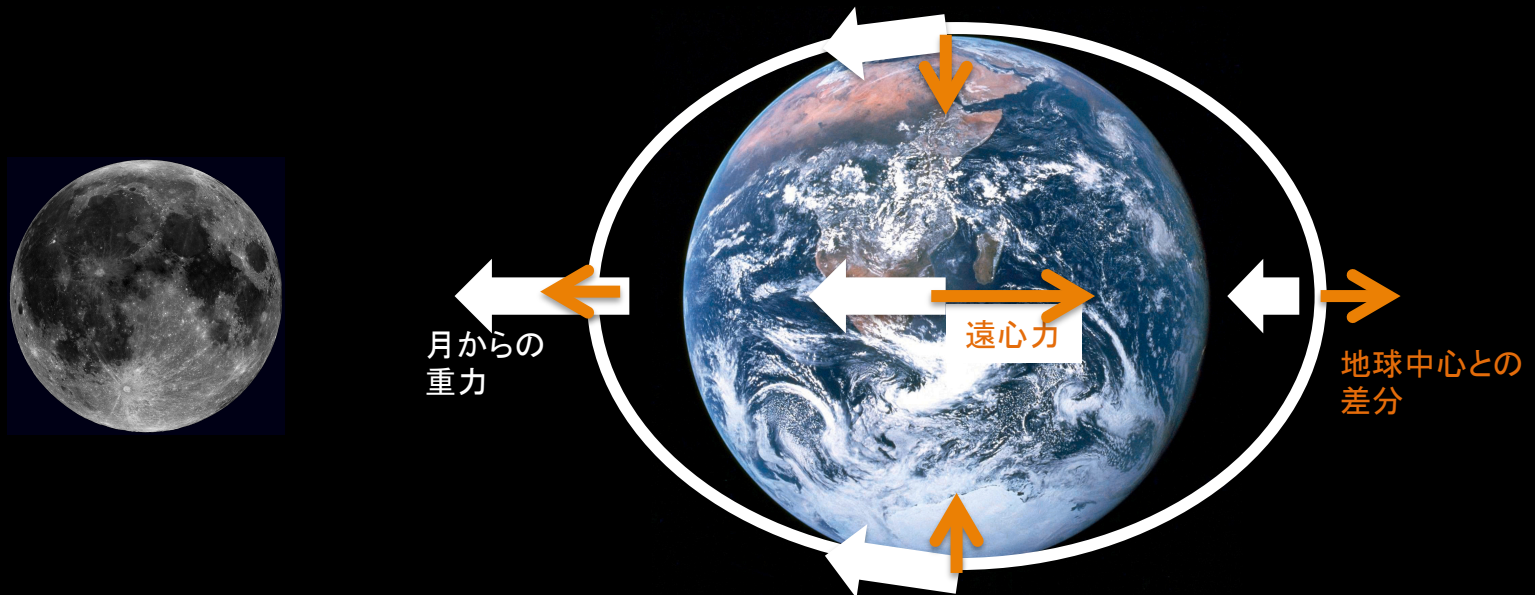




自由落下するエレベーター内では
リンゴは縦方向に引き伸ばされ、
横方向は押しつぶされる



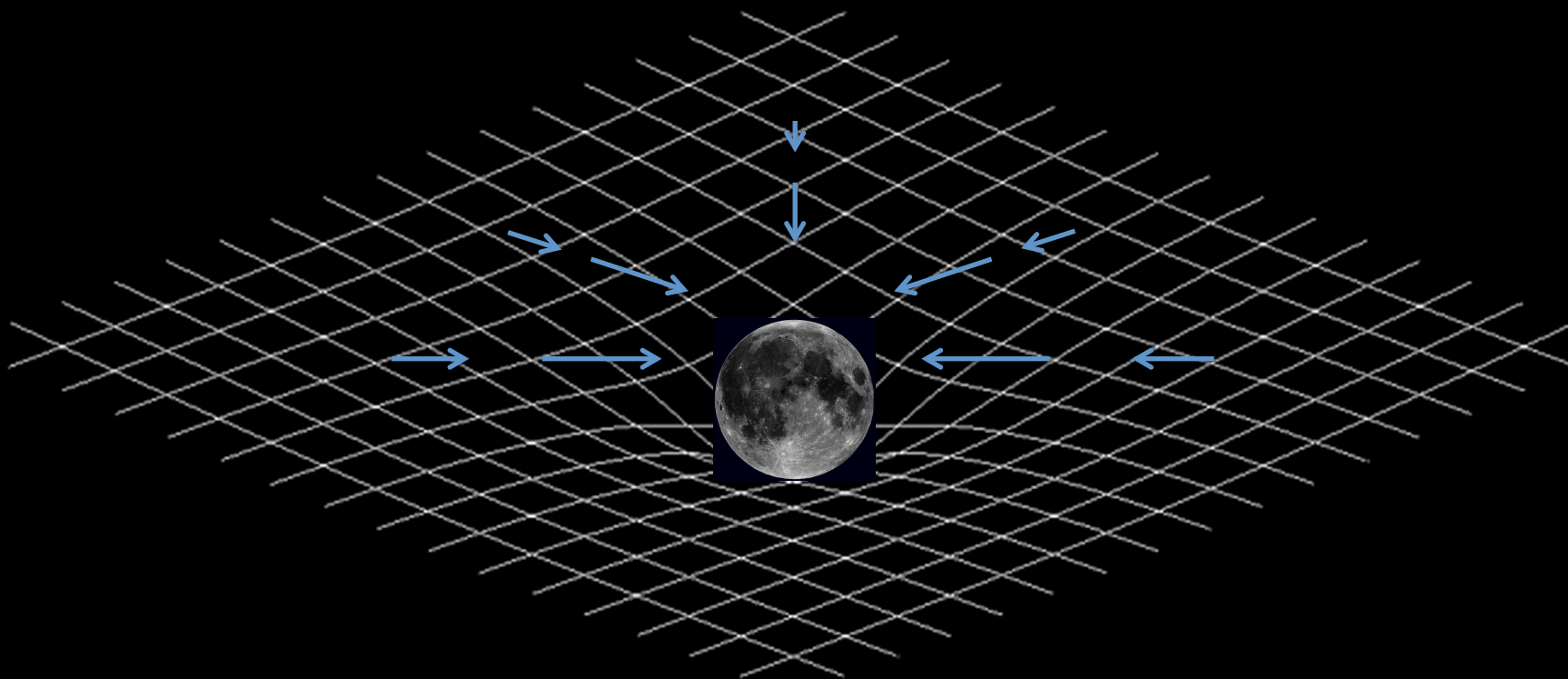
同じことが、月の重力でも起きて、
潮の満ち引き(潮汐)を引き起こす。



一様でない重力による効果
消せない重力 = **潮汐力**

では、消せない重力の正体は？

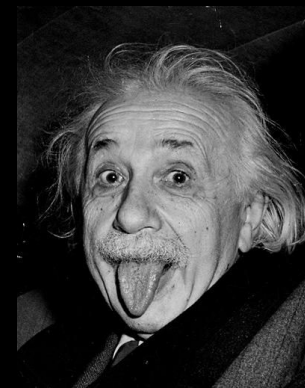
質量があると、そのまわりの空間が歪む



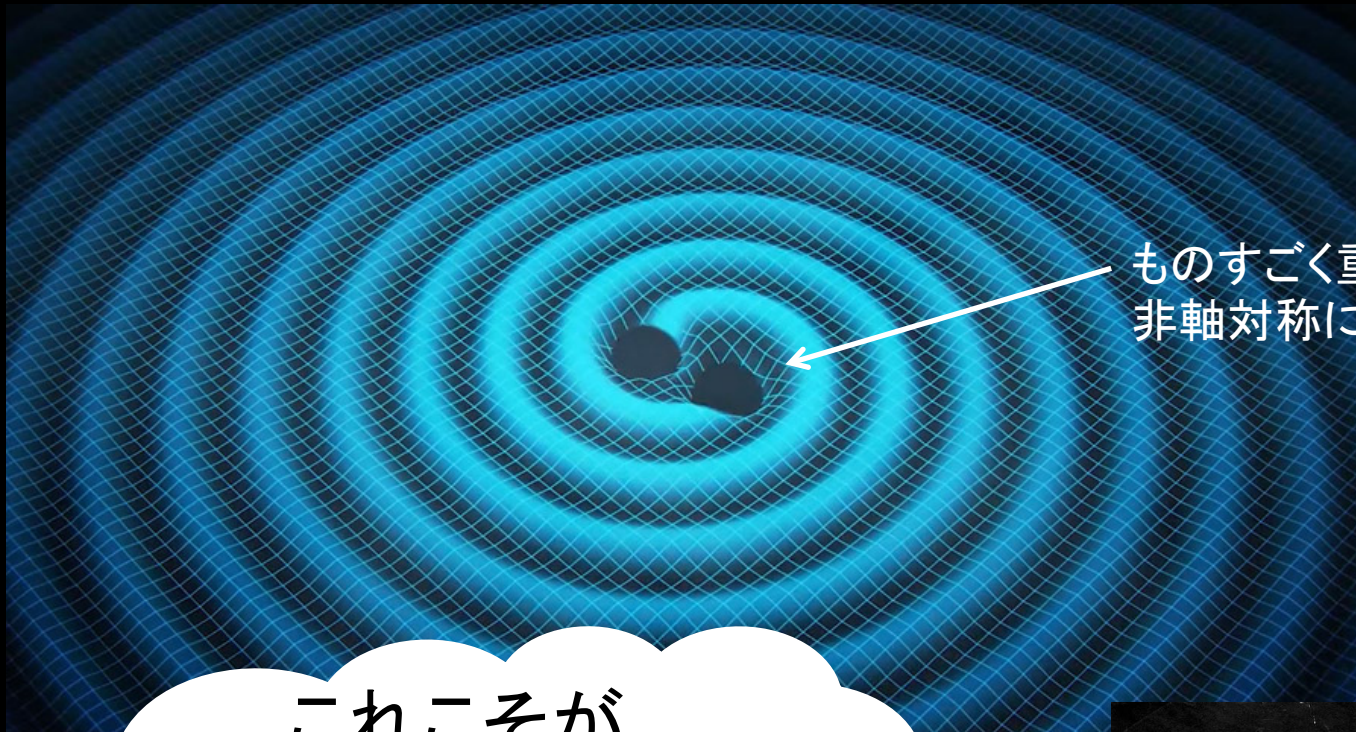
質量があると、そのまわりの空間が歪む



重力の本質とは、
空間と時間、
つまり時空の
歪みなんだ。

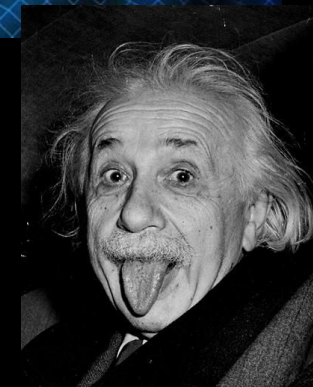


時空の歪みは、波として光速で伝わっていく

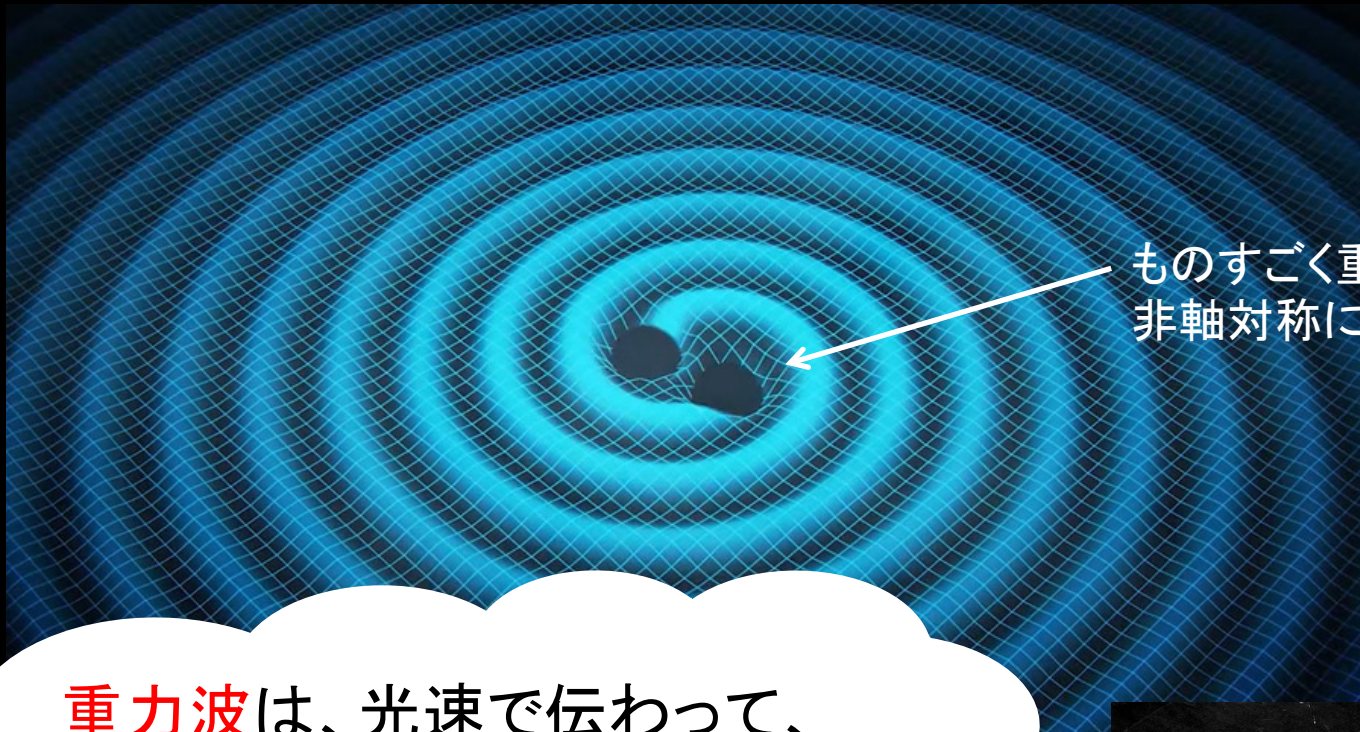


ものすごく重い質量が
非軸対称に動いている

これこそが、
相対性理論が
予言する
重力波だ。

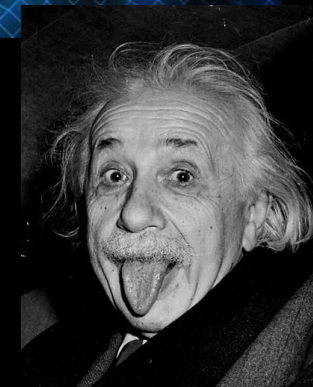


時空の歪みは、波として光速で伝わっていく



ものすごく重い質量が
非軸対称に動いている

重力波は、光速で伝わって、
なんでもすりぬけるよ。
まだ、**直接観測**は
されていないんだ。



重力波は存在する！

連星パルサーPSR B1913+16 の公転周期

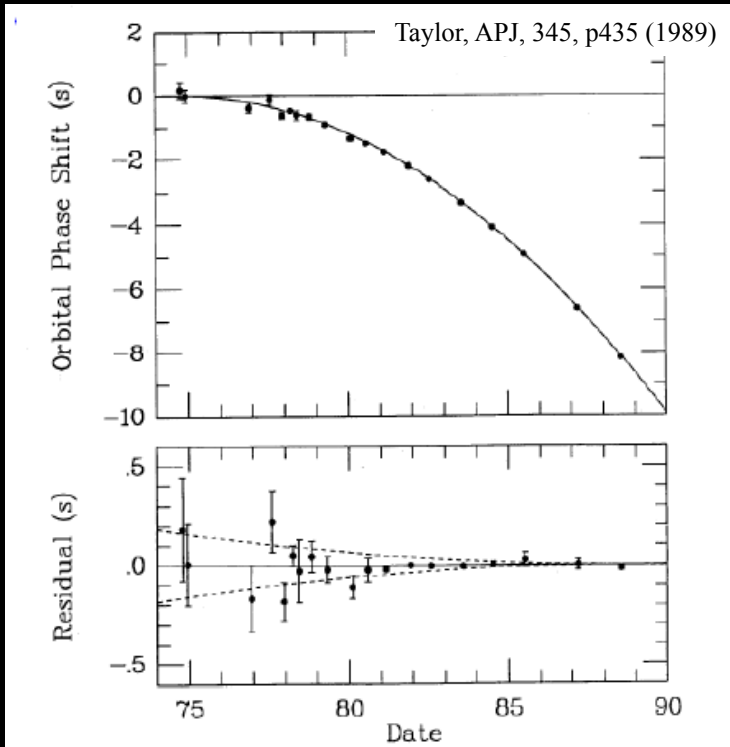


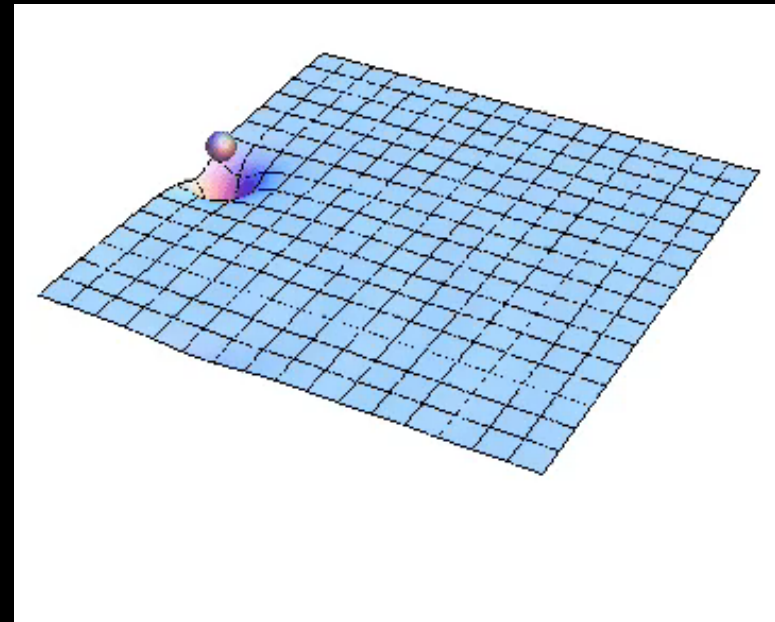
FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves illustrate differential trends that would be expected (relative to epoch 1988.54) if the rate of orbital decay \dot{P}_b were 2% larger or 2% smaller.

ノーベル賞

「新しいタイプのパルサーの発見と、それが打ち開く新しい重力の研究について」1993)

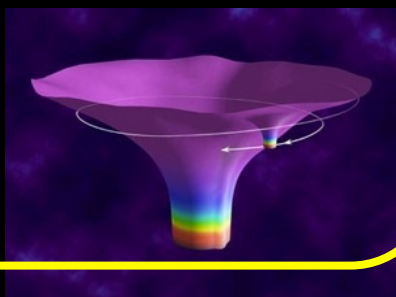
アレンボ天文台

映画「コンタクト」にも登場



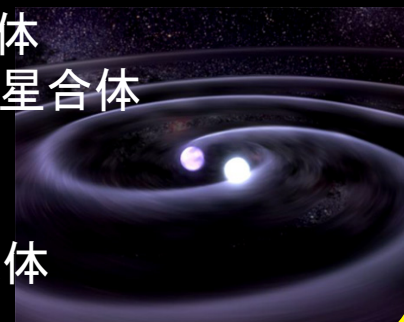
相対性理論の検証

強い重力場でもなりたっているか



重力波天文学

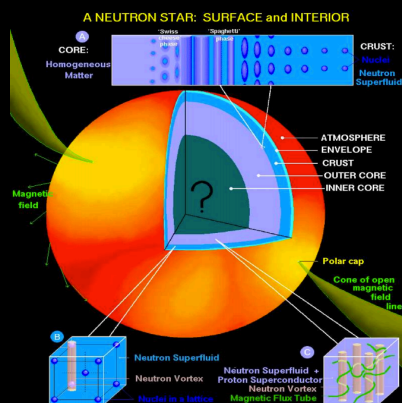
中性子星連星合体
ブラックホール連星合体
超新星爆発
ガンマ線バースト
まったく未知の天体



直接的に検出する意義

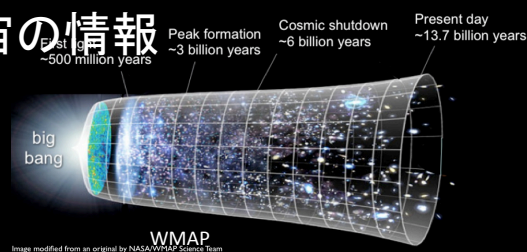
核物理学

中性子星の
状態方程式



宇宙論

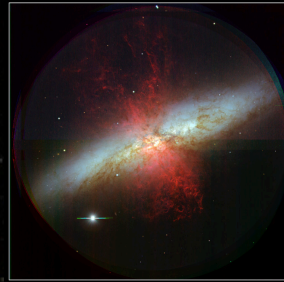
初期宇宙の情報



※KAGRAなどの重力波検出機のメインターゲットではない

通常の電磁波による観測

hubblesite.org



Small text and icons below the circular galaxy image.



Subaru Telescope



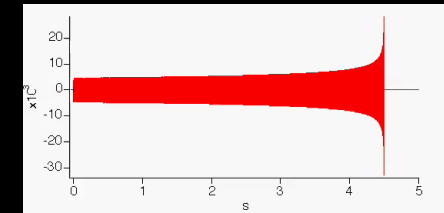
宇宙137億年悠久のアルバム

重力波による観測



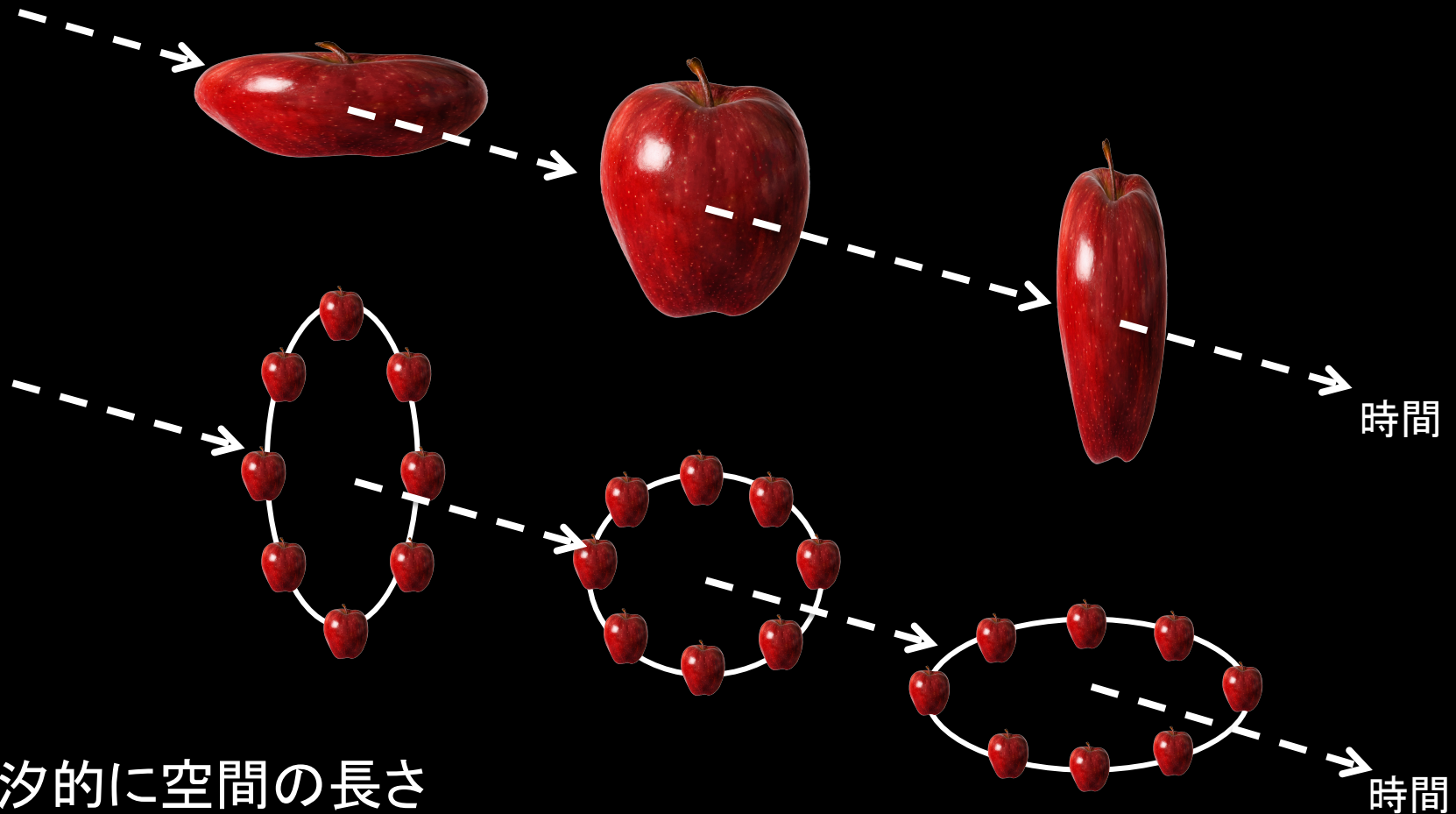
Illustration by Sora Kawamura

中性子星連星合体の
予想信号



宇宙のサウンドトラック

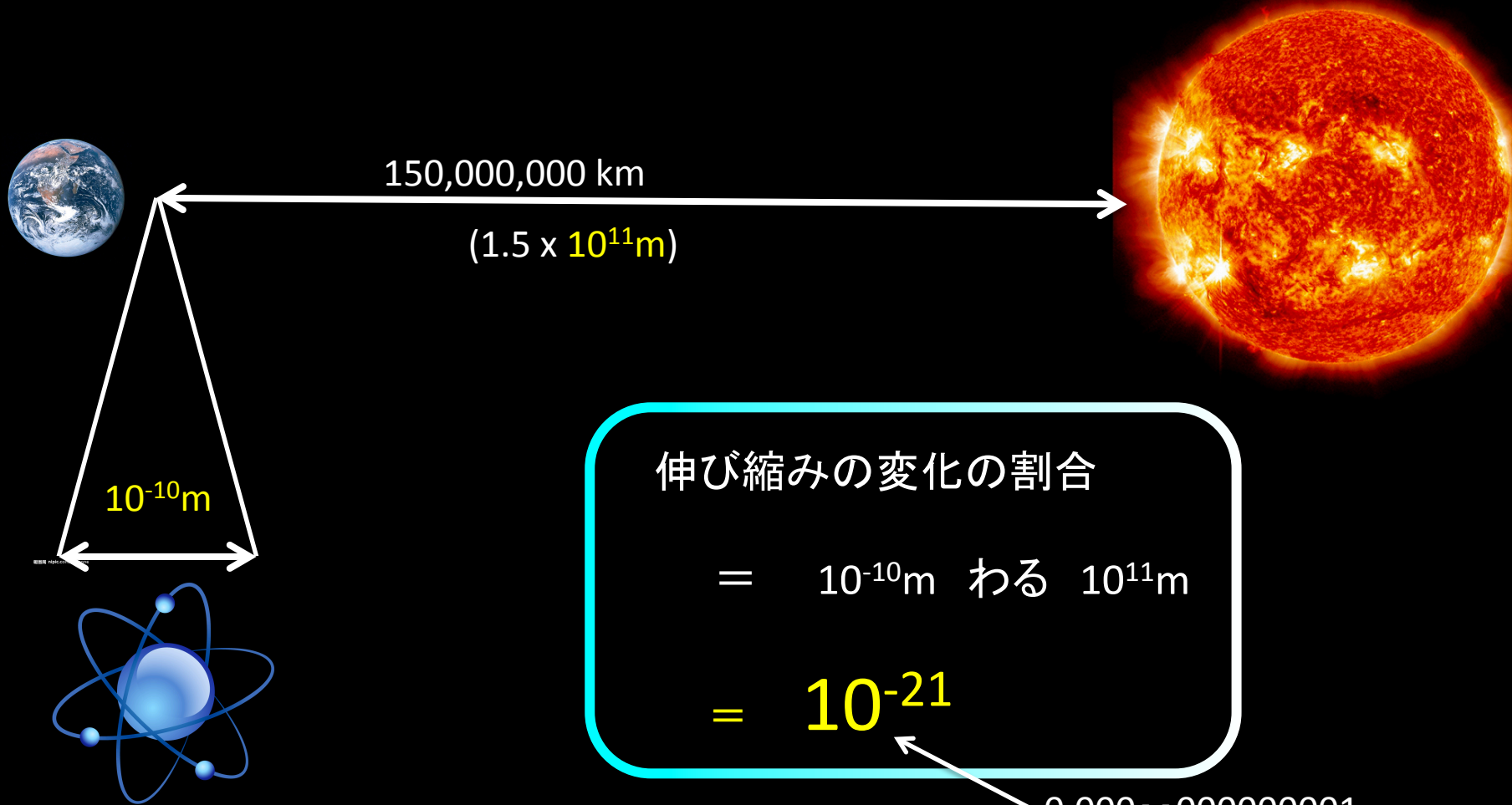
重力波が地球にくると



潮汐的に空間の長さ
(物体間の長さ)が伸び縮みする

どれぐらい伸び縮みする？

地球—太陽間の距離が、水素原子1個分変化する割合!!

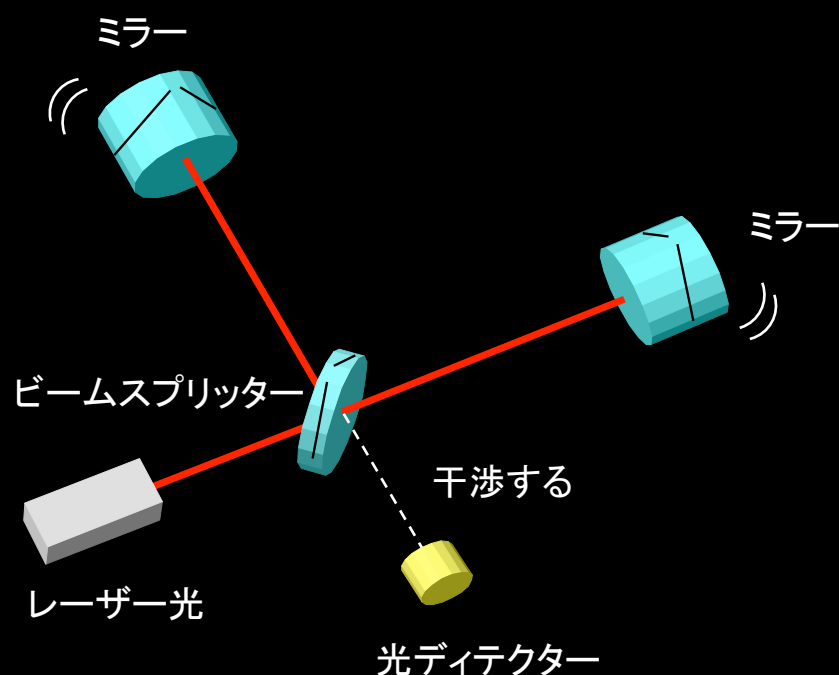


0.000...000000001

0が21個

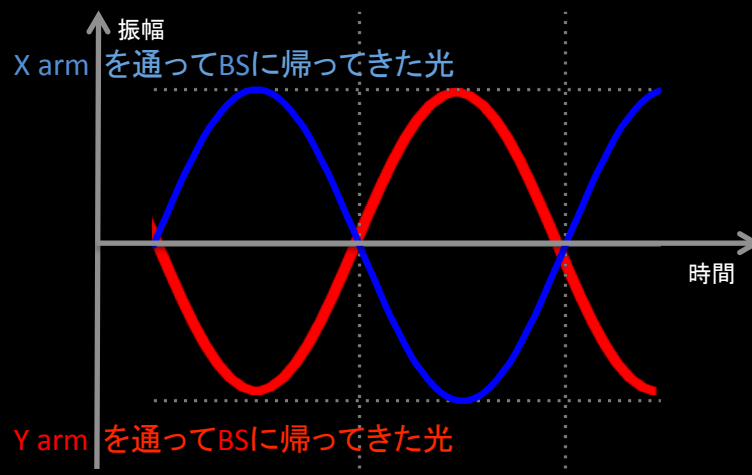
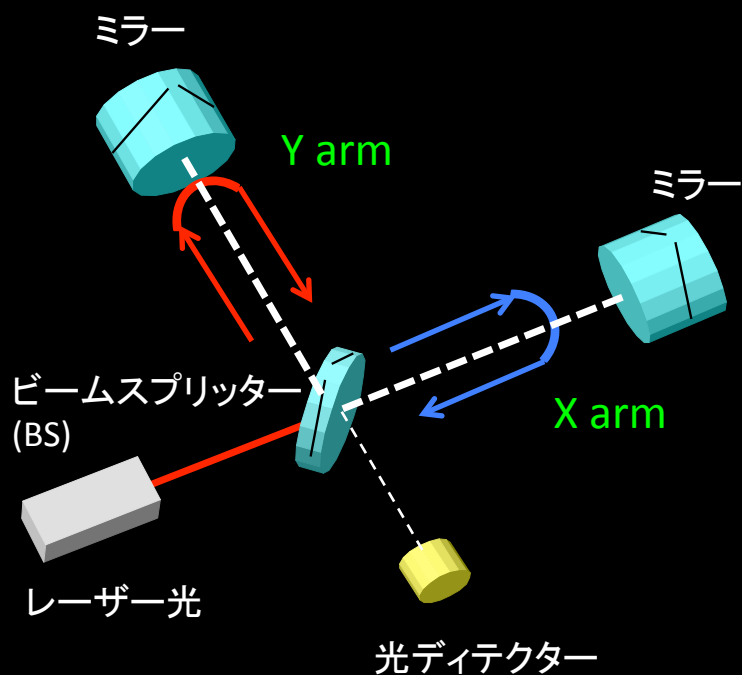
そんな小さな歪みを、どうやって検出する？

光が波である「干渉」の性質を使って、
マイケルソン干渉計で検出する

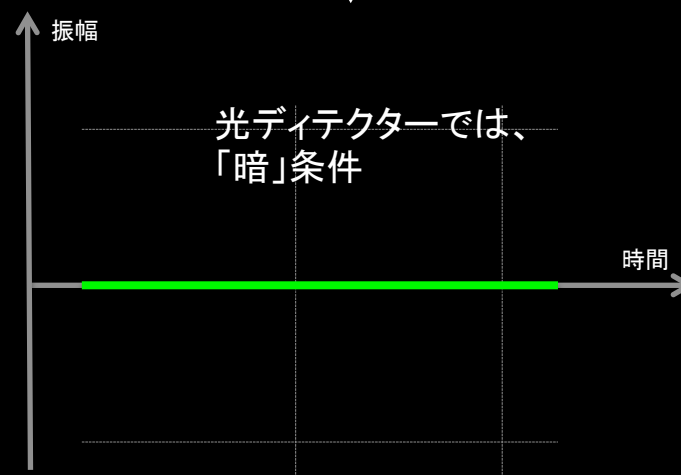


そんな小さな歪みを、どうやって検出する？

光の「干渉」の性質



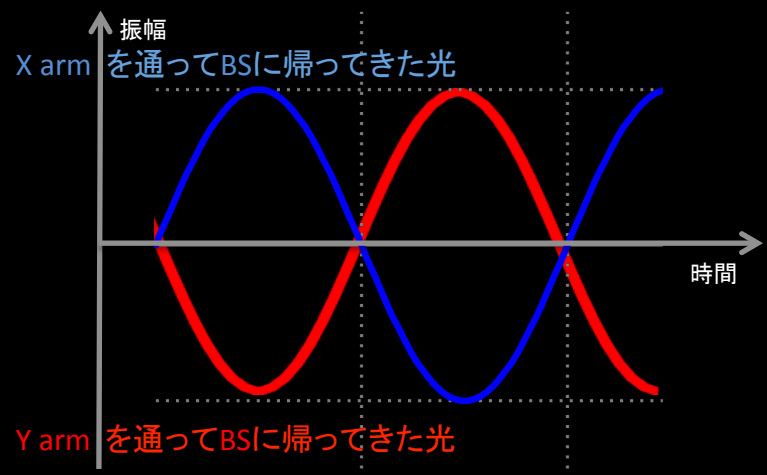
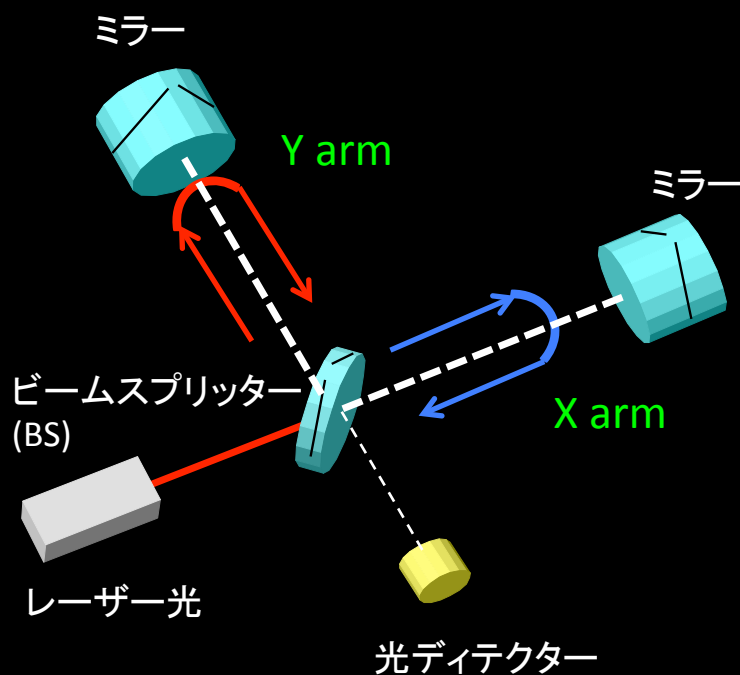
↓ 波が打ち消しあう



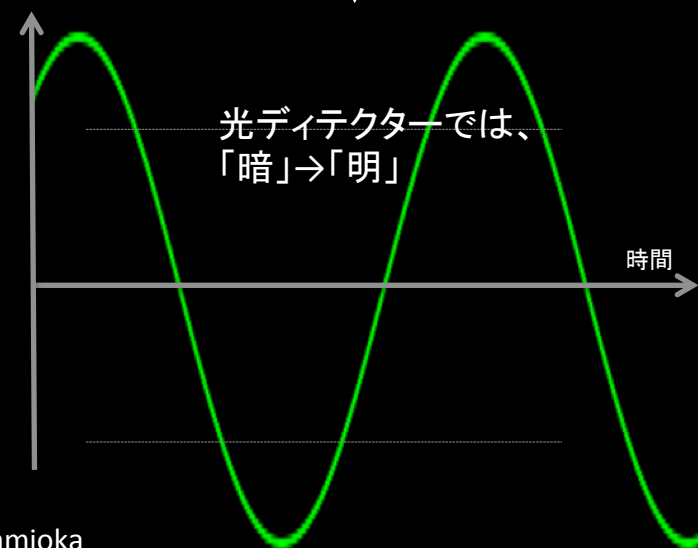
そんな小さな歪みを、どうやって検出する？

光の「干渉」の性質

重力波が来ると...

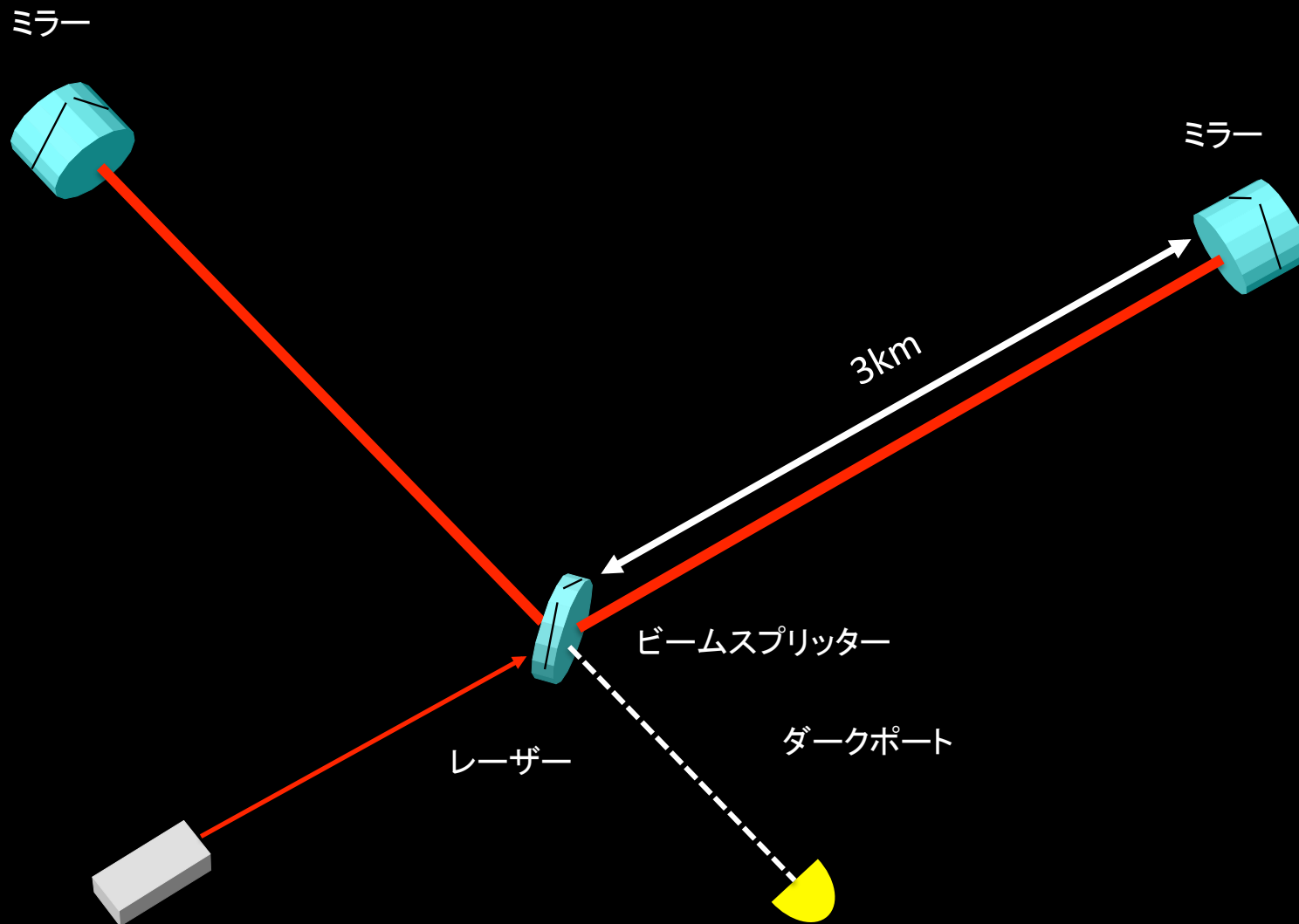


↓ 波が足し合わされる

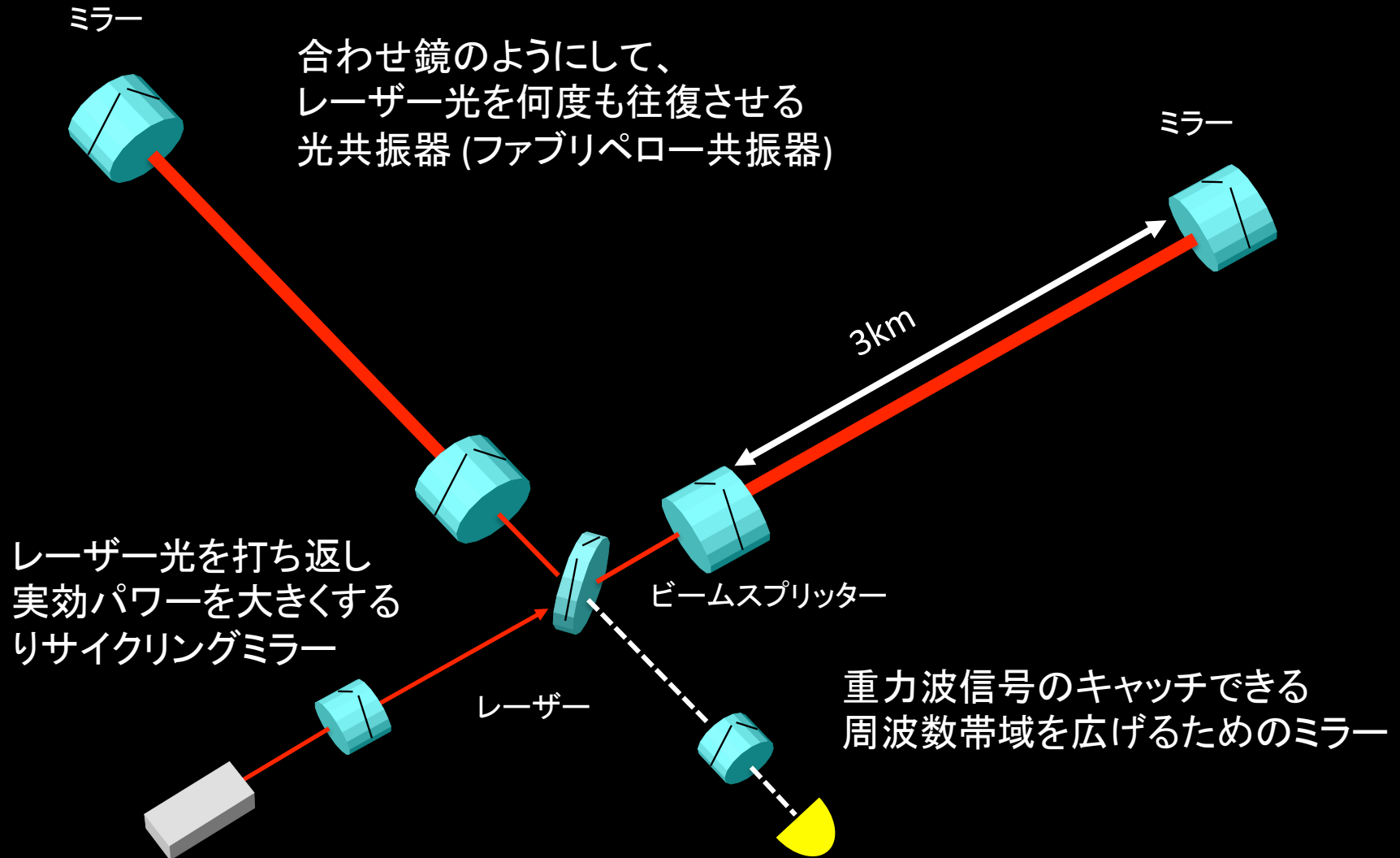


マイケルソン干渉計デモムービー

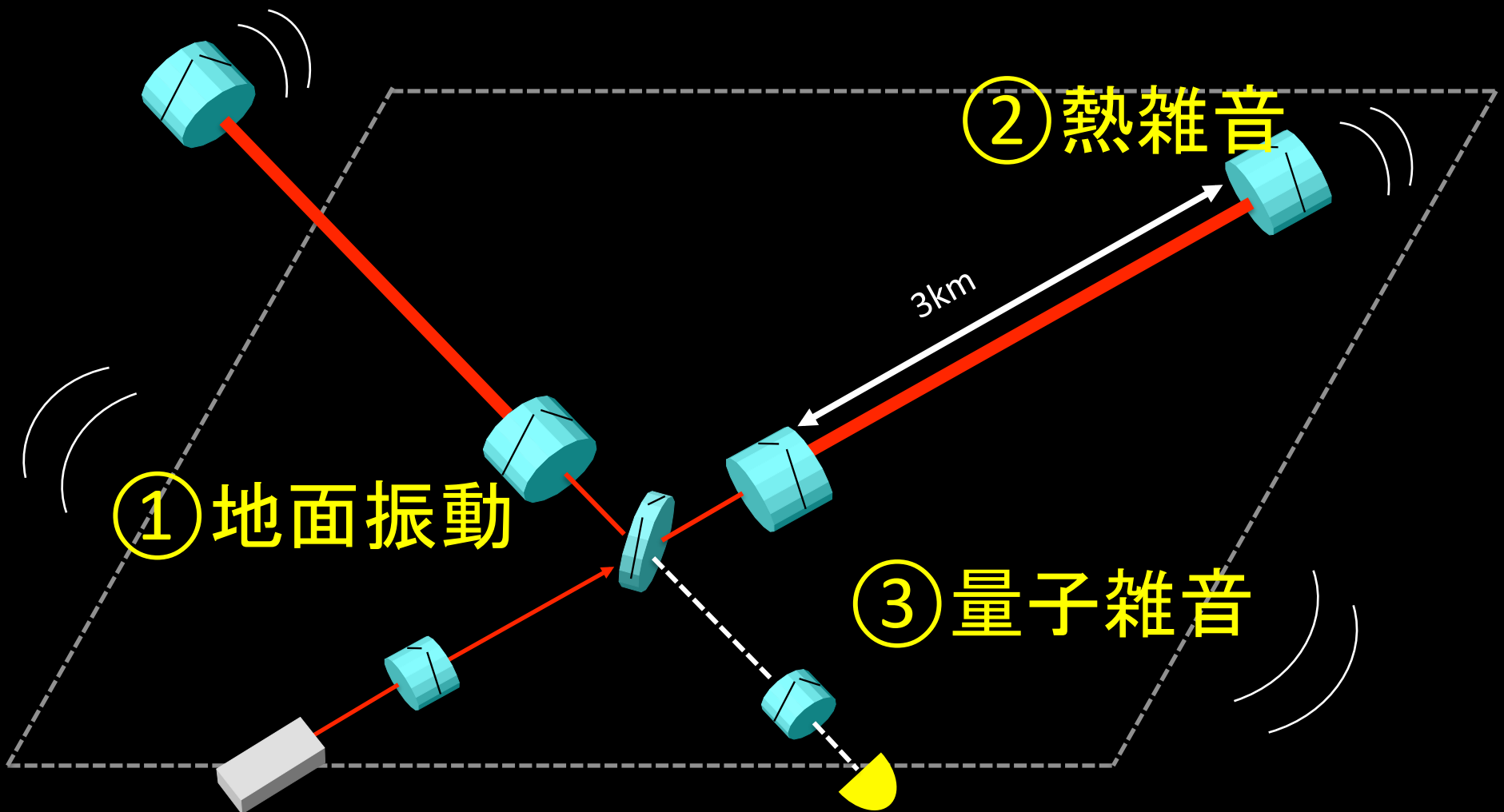
検出機は大きければ大きいほどいい！



さらに信号を増幅する工夫



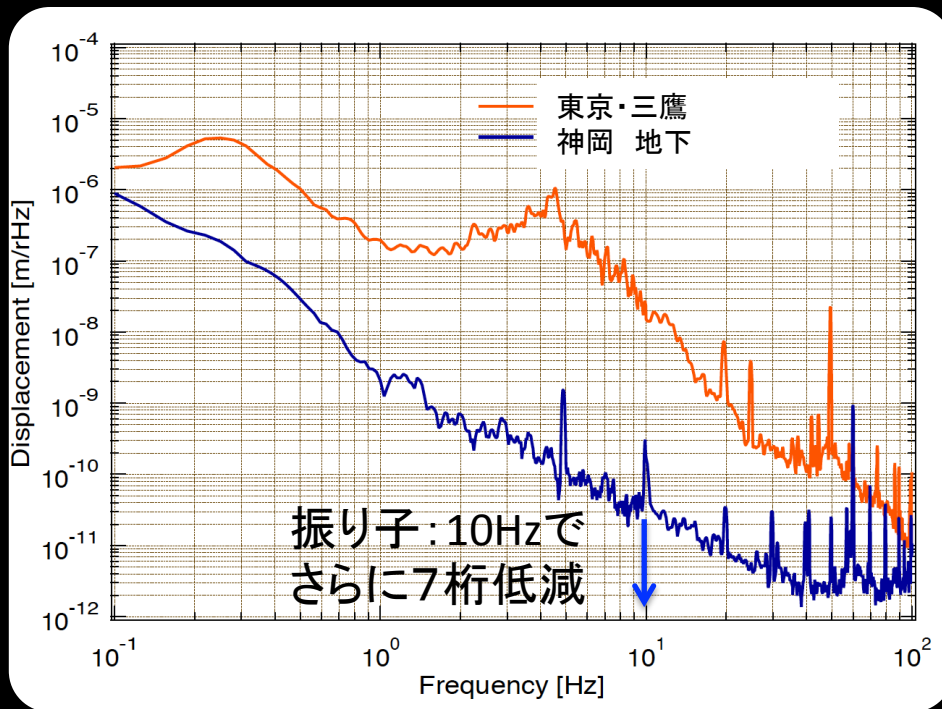
さらにさらに、雑音をやっつける



KAGRAでの雑音対策

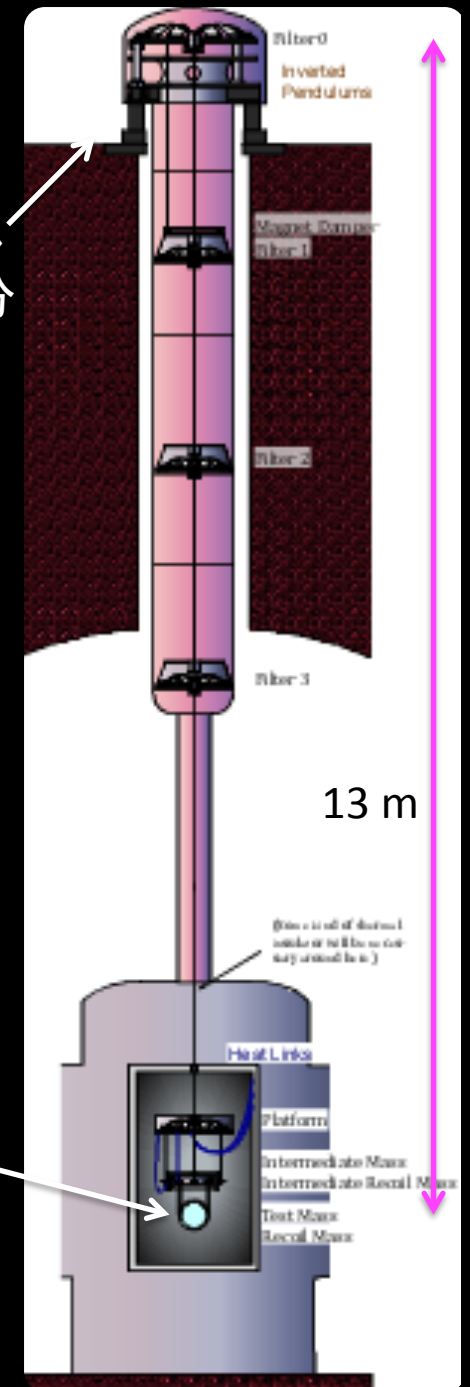
① 地面振動

- 地下に検出器を設置する
- ミラーを大きな振り子に吊るす



トンネル
2階部分

ミラー



KAGRAでの雑音対策

② 熱雑音

鏡の表面の分子や振りが熱運動して揺れ、空間の揺らぎと区別がつかずに雑音となる

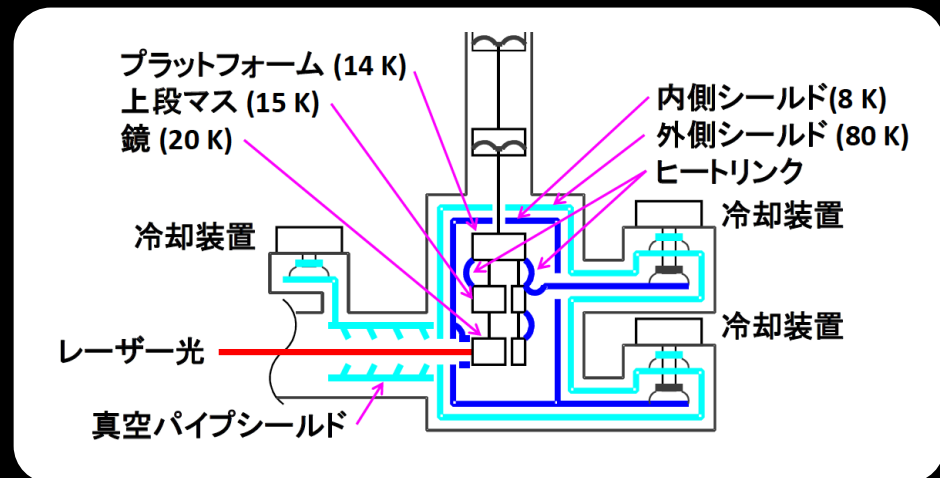
$$\text{熱雑音} \propto \sqrt{\frac{T}{Q}}$$

- ミラーをマイナス253°Cに冷やす
- サファイアミラーを使う

サファイアミラー



冷却システム

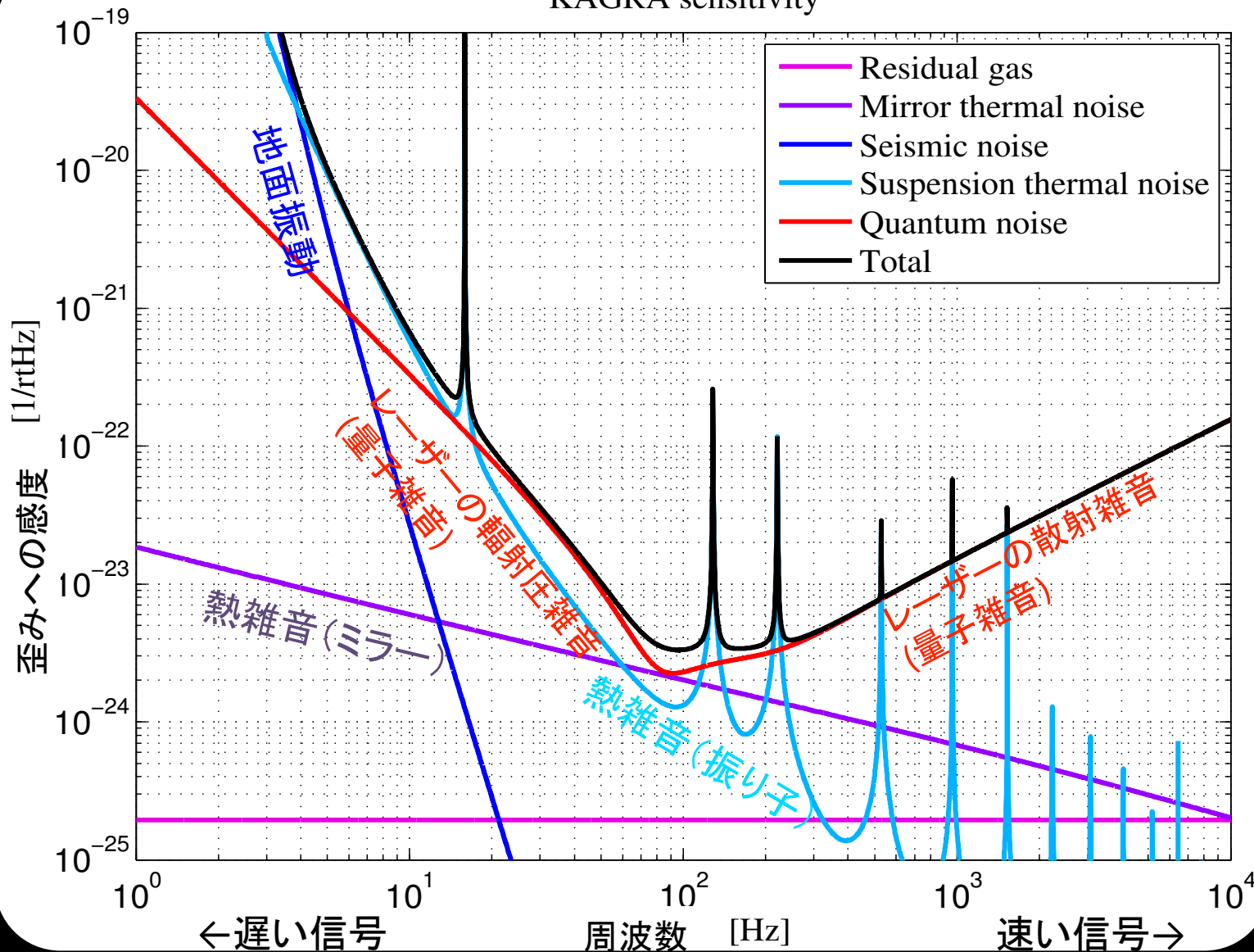


③ 量子雑音

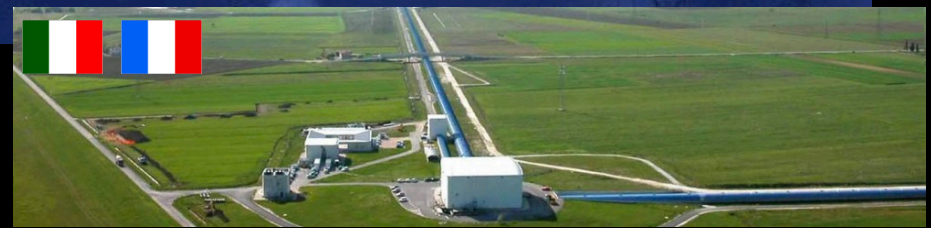
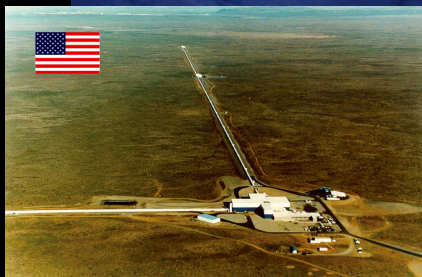
光子が量子的なふるまいをするせいで起きる雑音

- 180Wのハイパワーレーザーを使う

KAGRA sensitivity



世界の重力波検出器ネットワーク



LIGO-G1401277

国際的な検出器ネットワーク

重力波が検出器に到達する時間差を利用して、**重力波源の位置を特定**する



超新星爆発、
連星中性子星合体
...

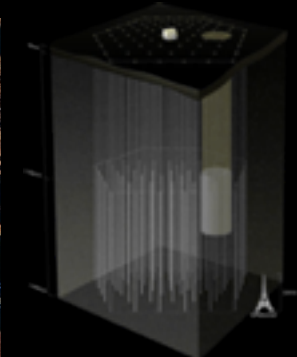
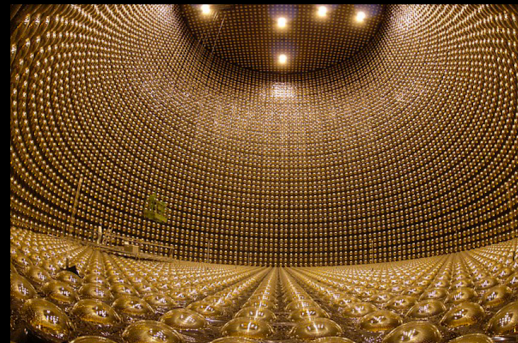
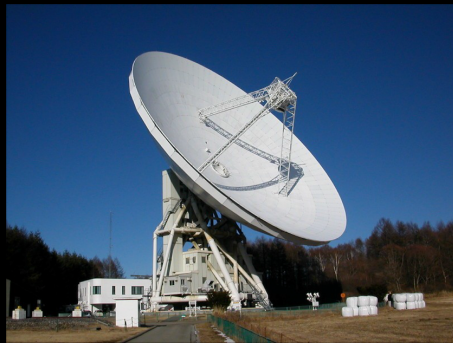


三台の同じぐらいの感度をもつ
検出器が必要

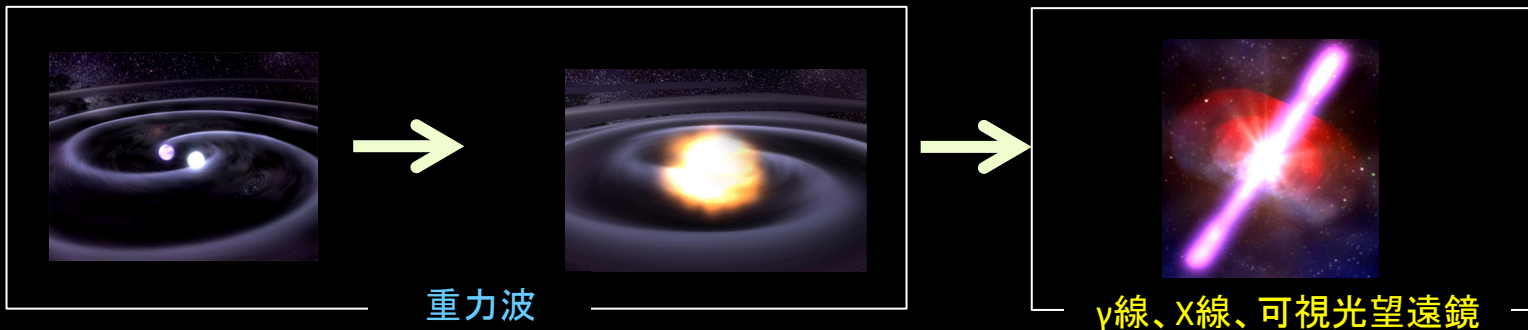
全周をくまなく覆うには、
数が多いほどよい

マルチメッセンジャー

- 可視光、電波、X線、ガンマ線望遠鏡、ニュートリノ検出機の観測データと合わせ、多角的な観測をする計画
- トリガーサーチ \leftrightarrow フォローアップ

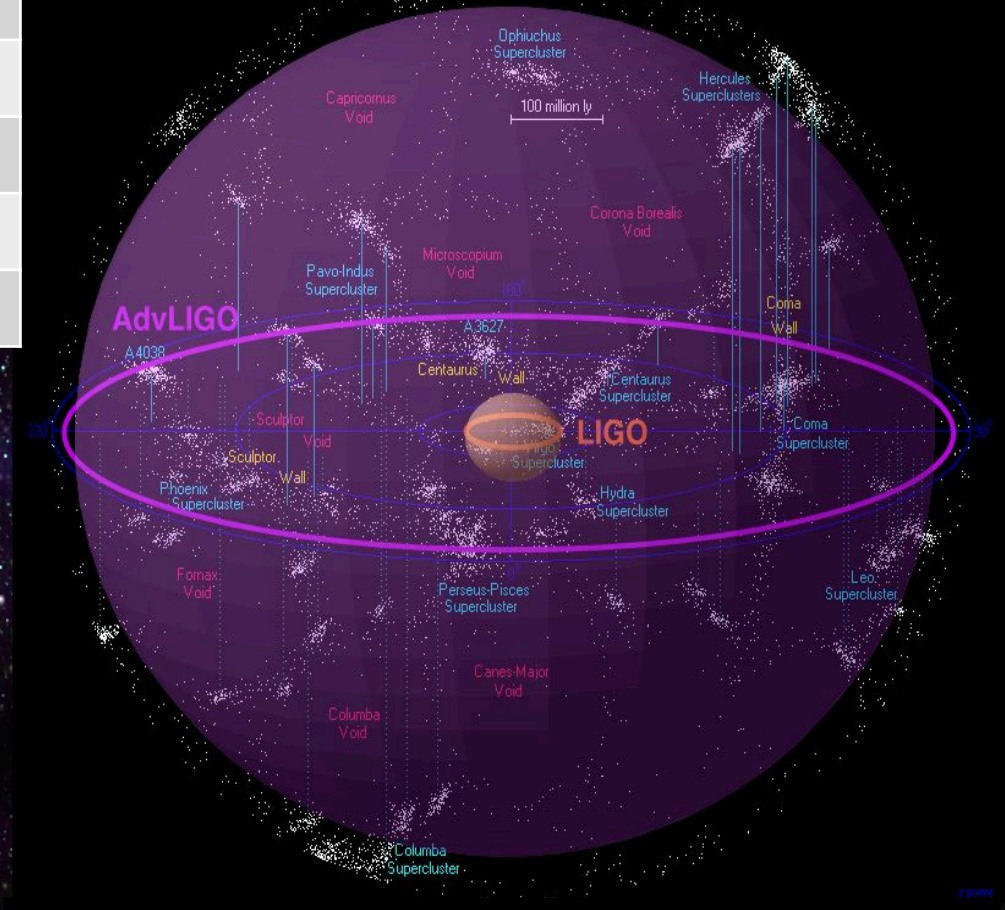


(例)ガンマ線バーストのメカニズムを解明する

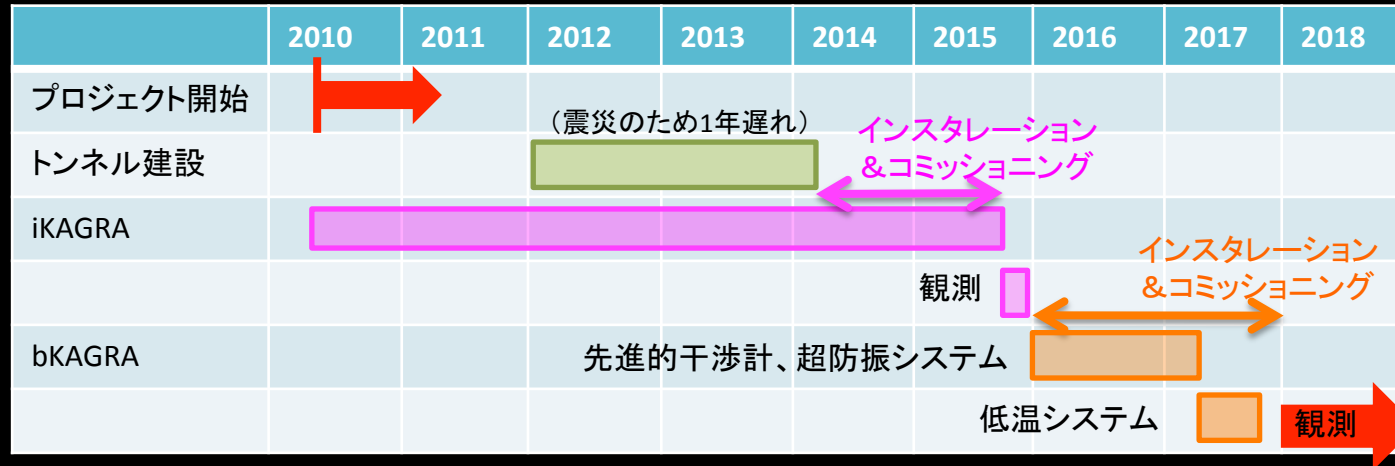


KAGRAの期待する検出頻度

	KAGRA
中性子星連星	60億光年, 10/年
中性子星-BH	10/年
BH-BH	0.4-1000?/年
超新星爆発	330万光年? 数十年に1回
未知の天体???	



KAGRAのスケジュール



“iKAGRA” (2015)

- L字型シンプルマイケルソン干渉計 (石英ミラー、ローパワー)
- 干渉計のテスト、データ取得のテスト、データ解析のテストを行う
- 大型干渉計運用の経験を取得する

“bKAGRA” (2017後半)

フル干渉計で、国際ネットワーク参入、重力波検出を目指す

ツアーの見どころ

モードクリーナー
(三角形の光共振器)

ビームスプリッター

レーザー室

-  クリーンルーム
-  防音室、プレハブ
-  低温チェンバー
-  真空チェンバー

入り口

500m

Yアーム

Yフロント

Xフロント

Xアーム

3km 先に
エンドステーション

天井の穴
(振り子を2Fから通す)

Xフロント
2Fへ

コンピューター室

Xバイパス

Enjoy the Tour !!



イラスト:川村そら

参考文献

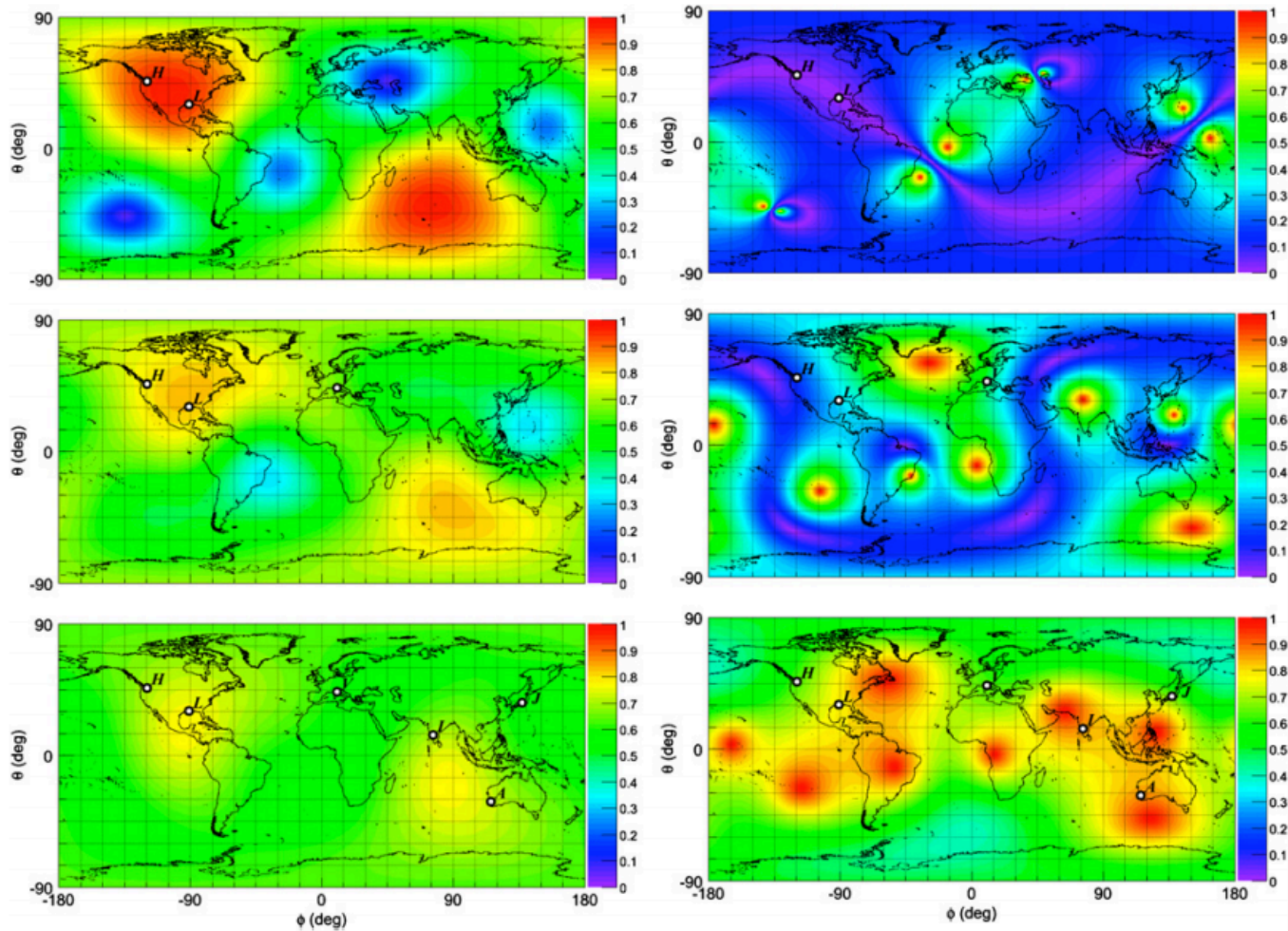
- 『図解雑学 重力と一般相対性理論』 二間瀬敏史 ナツメ社
- 『重力とは何か』 大栗博史 幻冬社新書
- 『趣味で相対論』 広江克彦 理工図書

Backup

アンテナパターン

Class. Quantum Grav. **30** (2013) 193002

Topical Review



LIGO
(LHO&LLO)

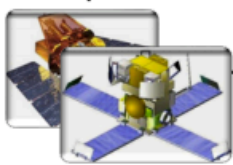
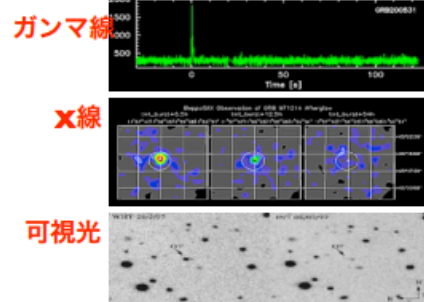
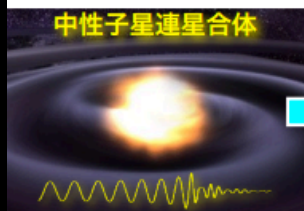
LHO+LLO+VIRGO

6 detectors

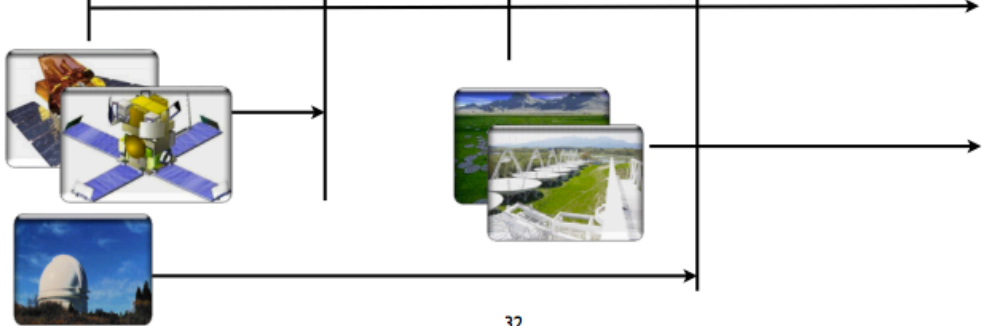
Network Antenna Factor

Network Alignment Factor

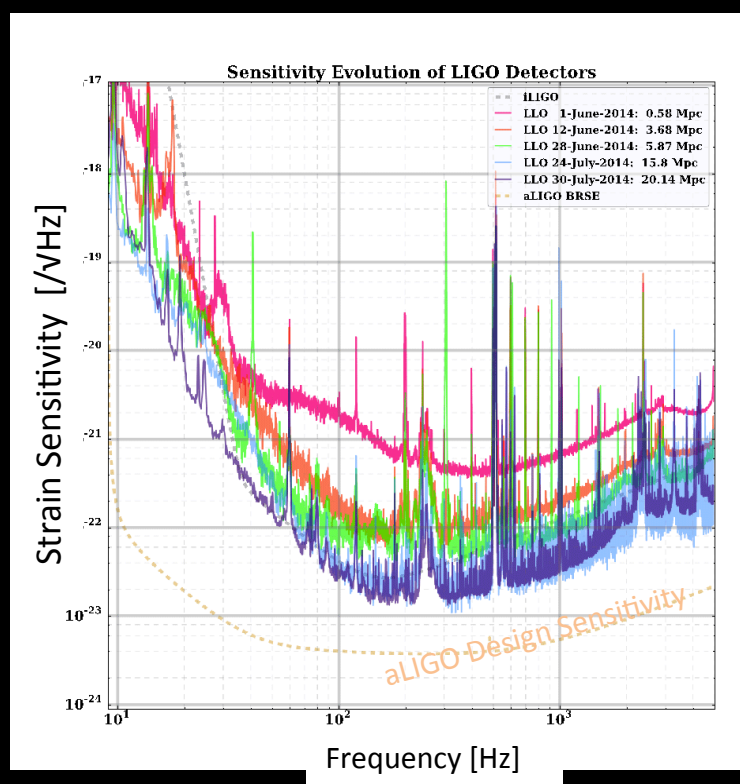
マルチメッセンジャー観測



秒 日 週



32



※1pcは約3光年

Our Prospects of First Detections

Epoch	Estimated Run Duration	$E_{GW} = 10^{-2} M_{\odot} c^2$ Burst Range (Mpc)		BNS Range (Mpc)		Number of BNS Detections	% BNS Localized within	
		LIGO	Virgo	LIGO	Virgo		5 deg ²	20 deg ²
2015	3 months	40 – 60	–	40 – 80	–	0.0004 – 3	–	–
2016–17	6 months	60 – 75	20 – 40	80 – 120	20 – 60	0.006 – 20	2	5 – 12
2017–18	9 months	75 – 90	40 – 50	120 – 170	60 – 85	0.04 – 100	1 – 2	10 – 12
2019+	(per year)	105	40 – 80	200	65 – 130	0.2 – 200	3 – 8	8 – 28
2022+ (India)	(per year)	105	80	200	130	0.4 – 400	17	48

submitted to publication, arXiv:1304.0670