

重力波の検出器と物理

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻
長野晃士 (D2)

今日の流れ

- 15:30ー16:00 干渉計について(長野)
- 16:00ー16:30 中須賀研の研究と超小型衛星について(五十里さん)
- 16:30ー17:00 安東研の研究について(長野)
- 17:00ー17:45 安東研の設備見学
- 移動
- 18:00ー18:45 中須賀研の設備見学
- 19:00ー 懇親会

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

重力波とは

重力波とは何か？



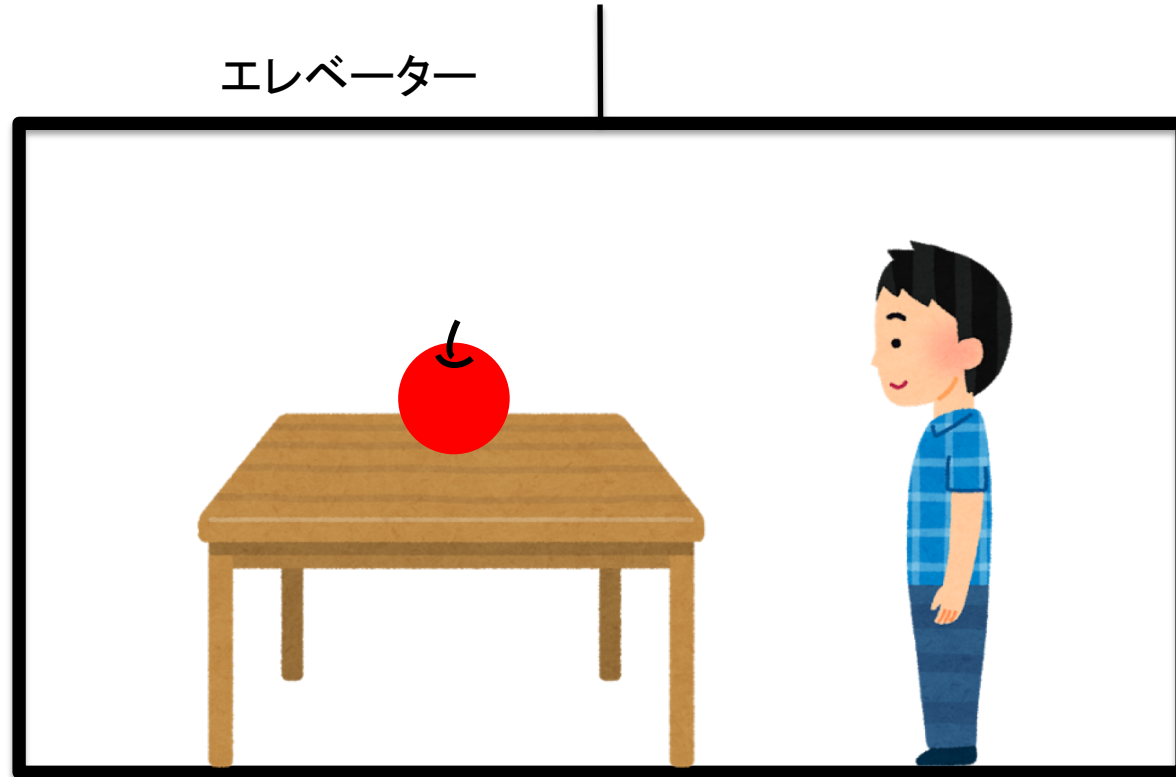
重力とは何か？



一般相対論

重力とは

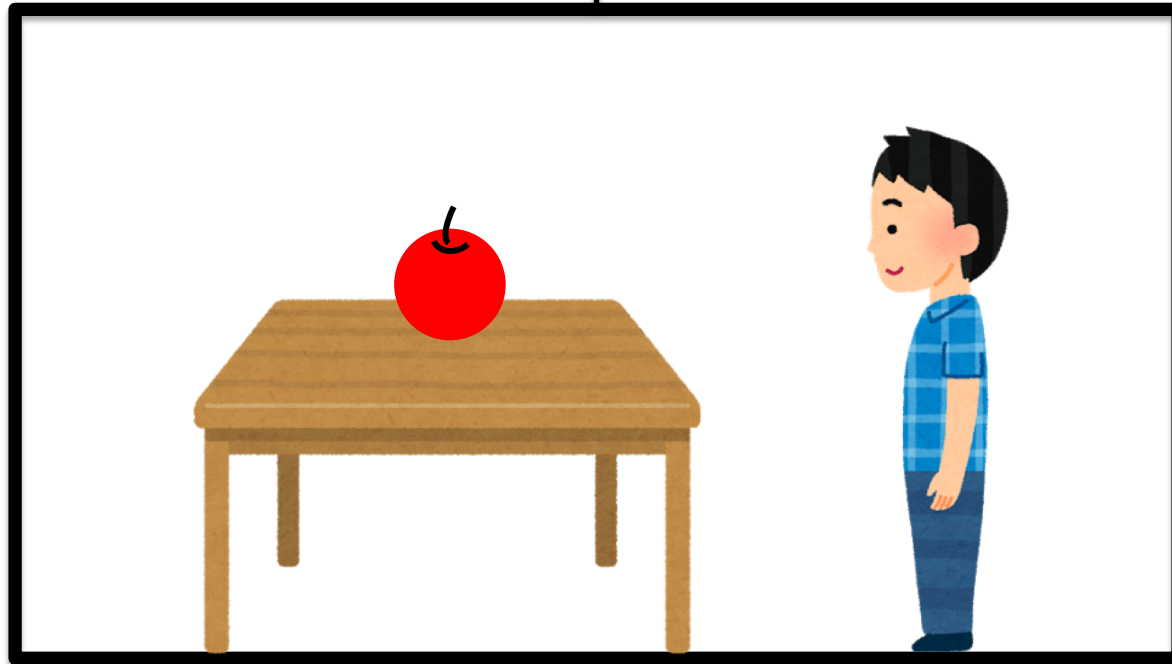
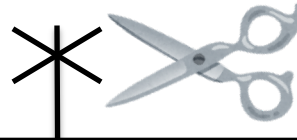
- 重力は消せる？



重力とは

- 重力は消せる？

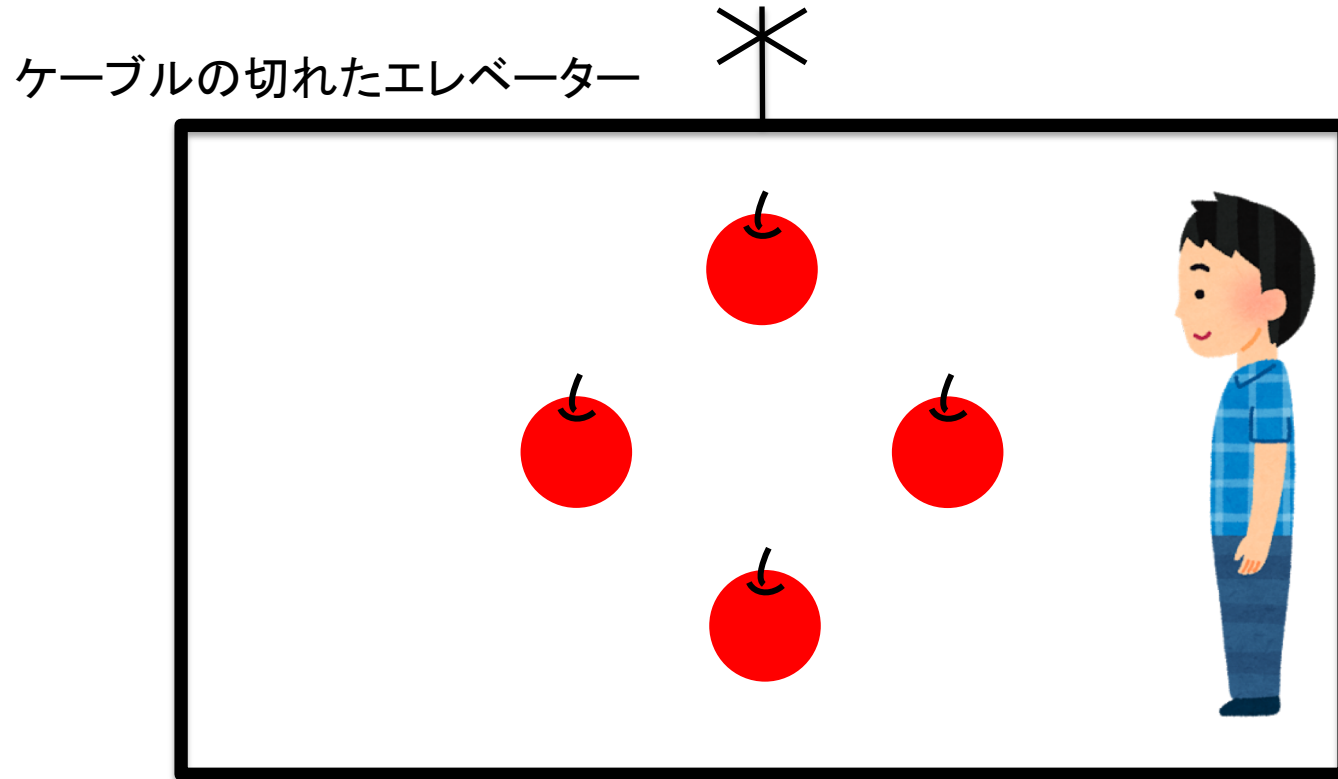
ケーブルの切れたエレベーター



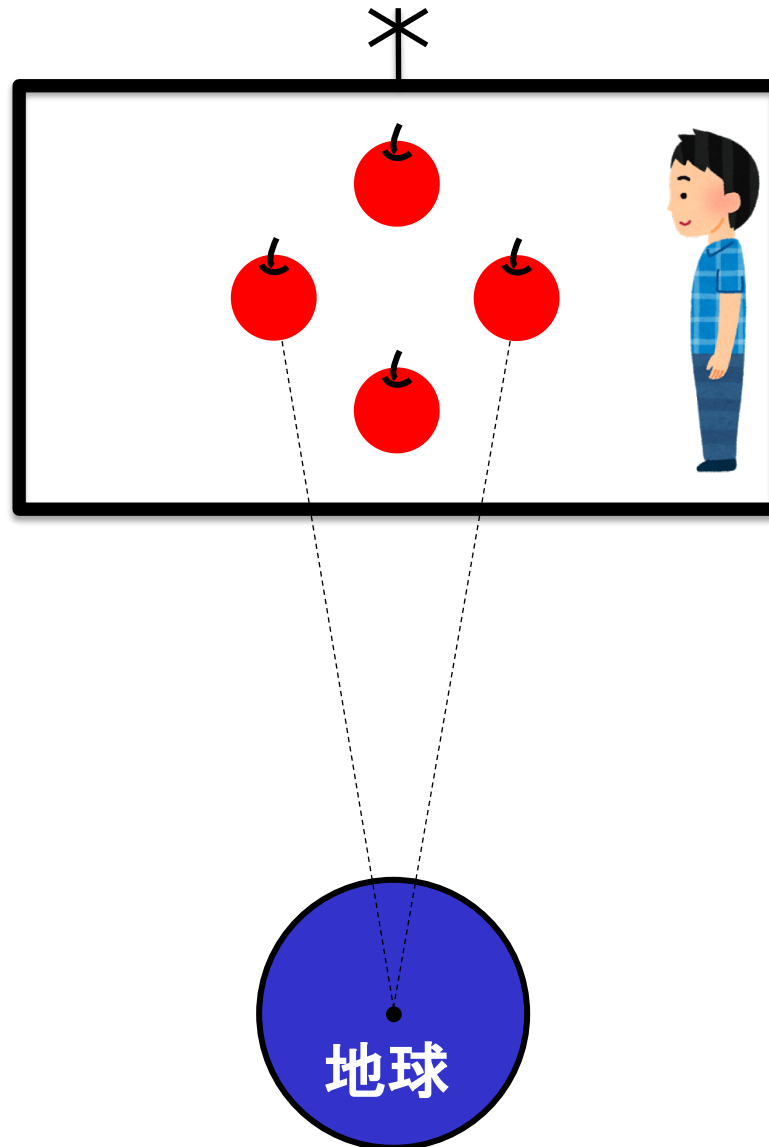
→ では重力の本質とは？

重力とは

- リンゴが上下左右に4個あると?

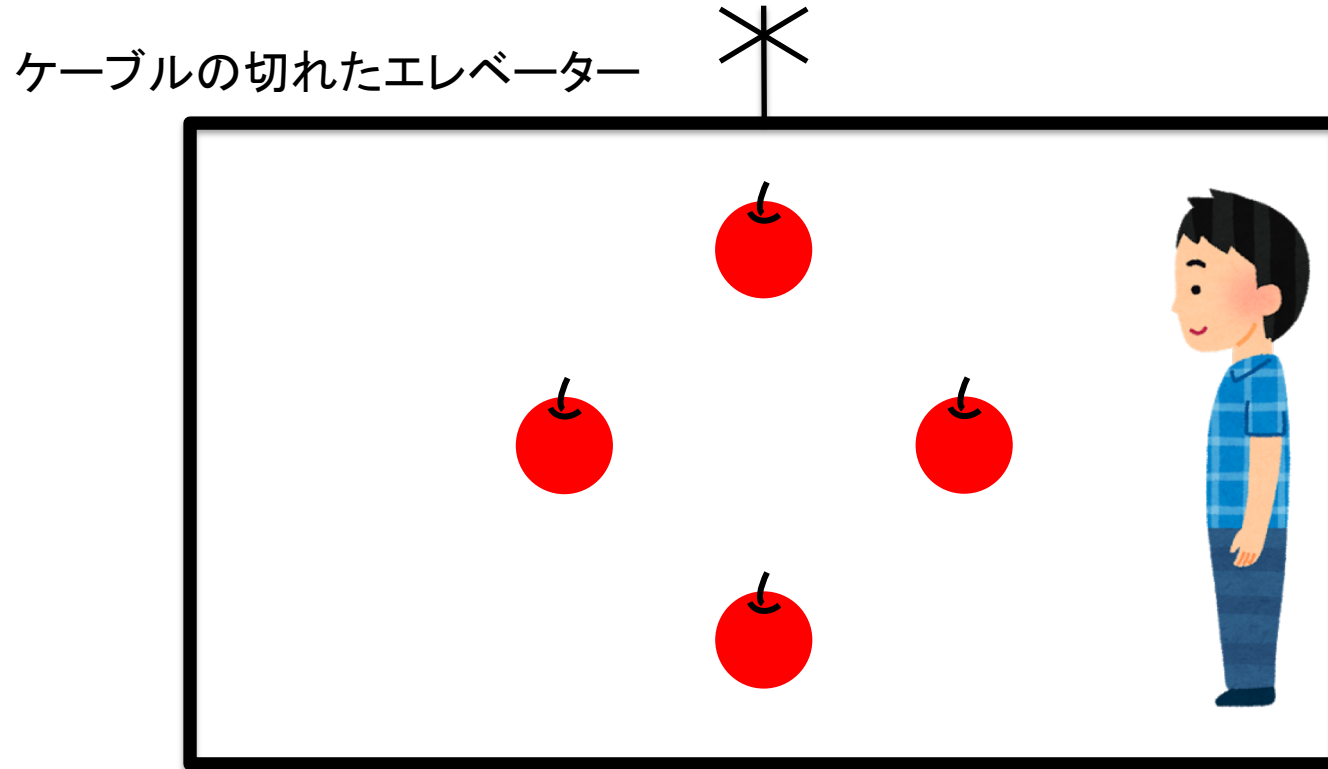


重力とは



重力とは

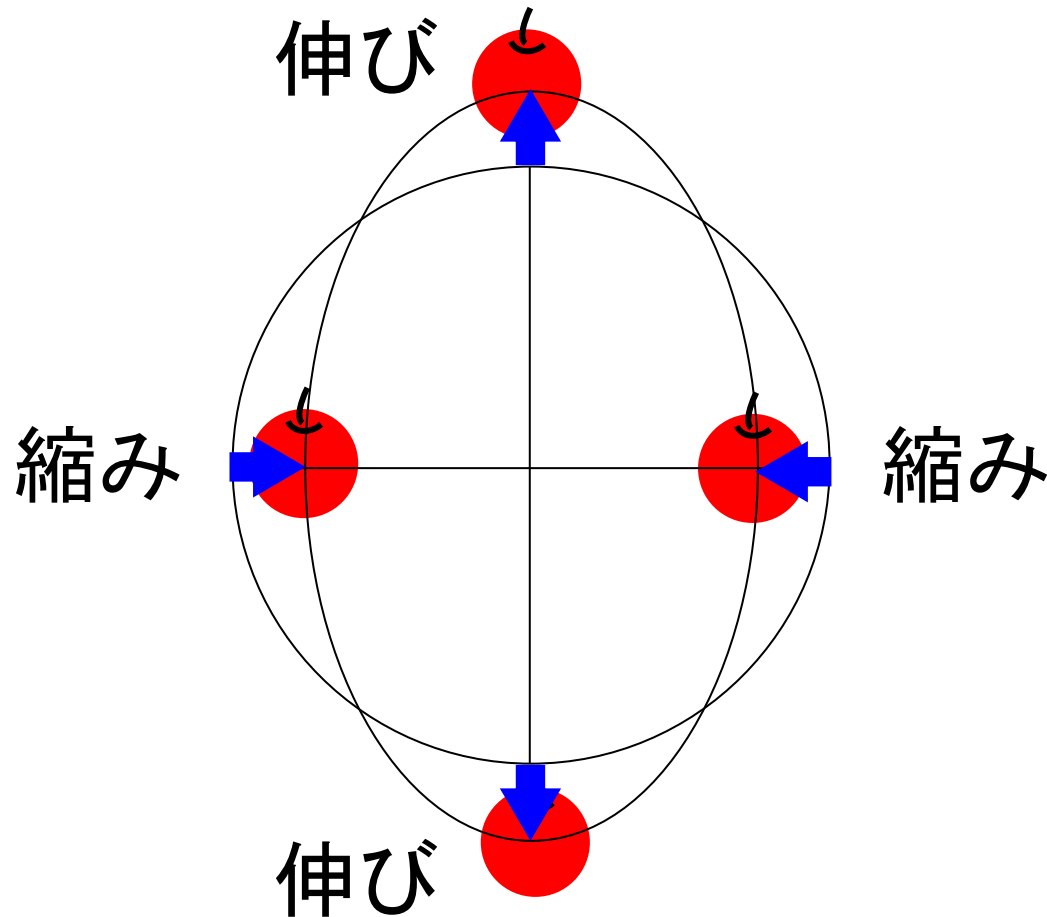
- 同じ慣性系にいる観測者から見ると、リンゴは潮汐的な力を受けている。



→ この潮汐力は消せない!

重力とは

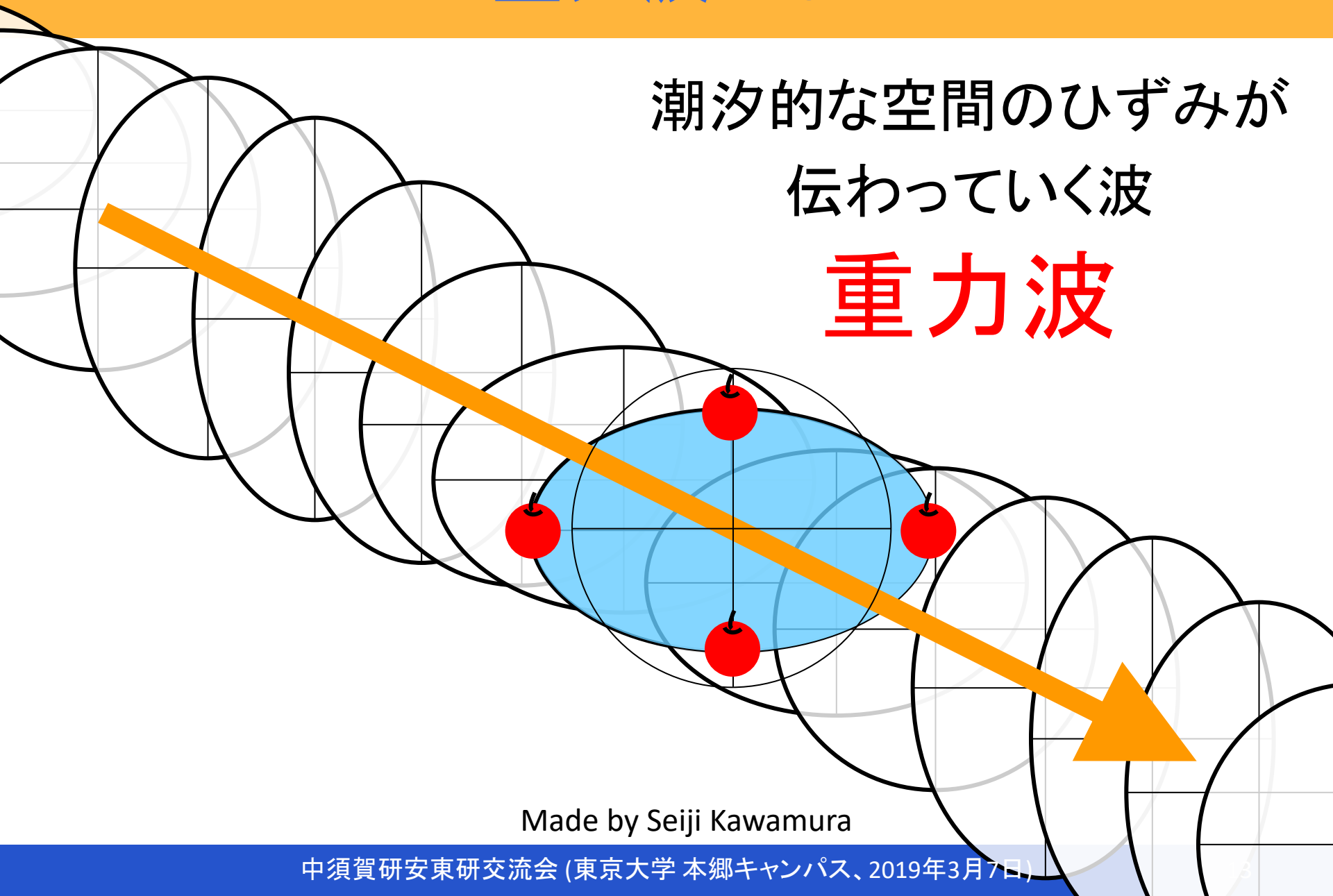
- 重力の本質 = 潮汐的な時空の歪み



重力波とは

潮汐的な空間のひずみが
伝わっていく波

重力波



Made by Seiji Kawamura

中須賀研安東研交流会 (東京大学 本郷キャンパス、2019年3月7日)

重力波とは

- 重力波とは何か？
 - 1916年にアインシュタインによって存在が预言された。
 - 真空中を伝わる潮汐的な時空の歪み。
 - (一般相対性理論が正しければ)光速で伝わり、2つのモードがある。
 - 全てのものをほぼ相互作用せずに通過する。
 - 2015年に初めて直接検出された。
 - 2017年に重力波初検出に関してノーベル物理学賞が授与された。



写真: 梶田先生のノーベル賞受賞記念パーティの際に展示されていた本物のノーベル賞メダル。
(撮影: 受付係だった長野)

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

重力波による物理

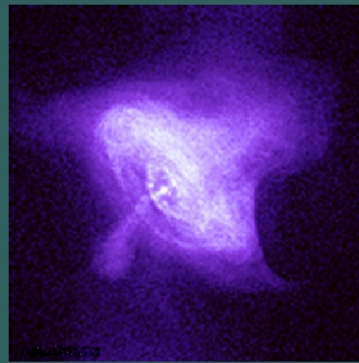
- 現在検出可能なレベル($\sim 10^{-22}$)の重力波を放出する可能性があるのは主に天体現象。
 - コンパクト天体の連星合体
 - ブラックホール連星
 - 中性子星連星
 - 超新星爆発
 - パルサー
 - 初期宇宙

※ 人工的に出せるのは 10^{-40} くらいまで

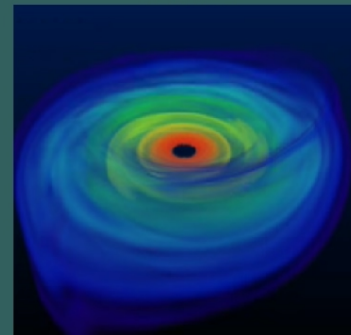
超新星爆発 (写真出典: NASA)



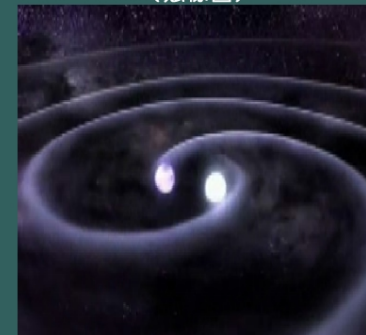
パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)



連星中性子星合体
(想像図)



<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>

重力波による物理

- 現在検出可能なレベル($\sim 10^{-22}$)の重力波を放出する可能性があるのは主に天体現象。

- コンパクト天体の連星合体

- ブラックホール連星 ← 米国のLIGOグループにより
 - 中性子星連星

2015年(BH)と2017年(NS)に
初検出された。

- 超新星爆発

- パルサー

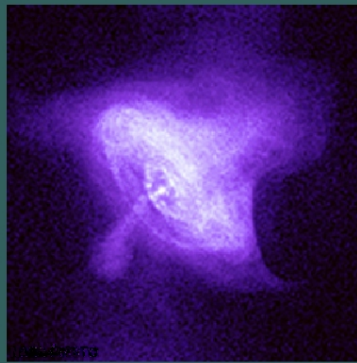
- 初期宇宙

※ 人工的に出せる
のは 10^{-40} くらいまで

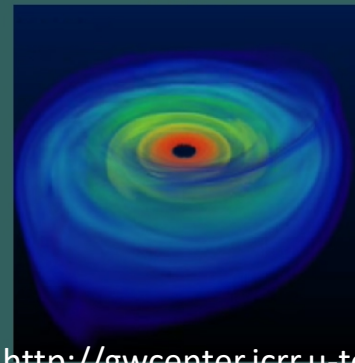
超新星爆発 (写真出典: NASA)



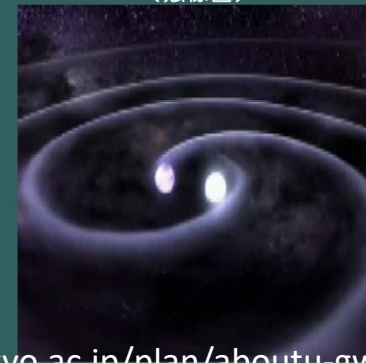
パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)

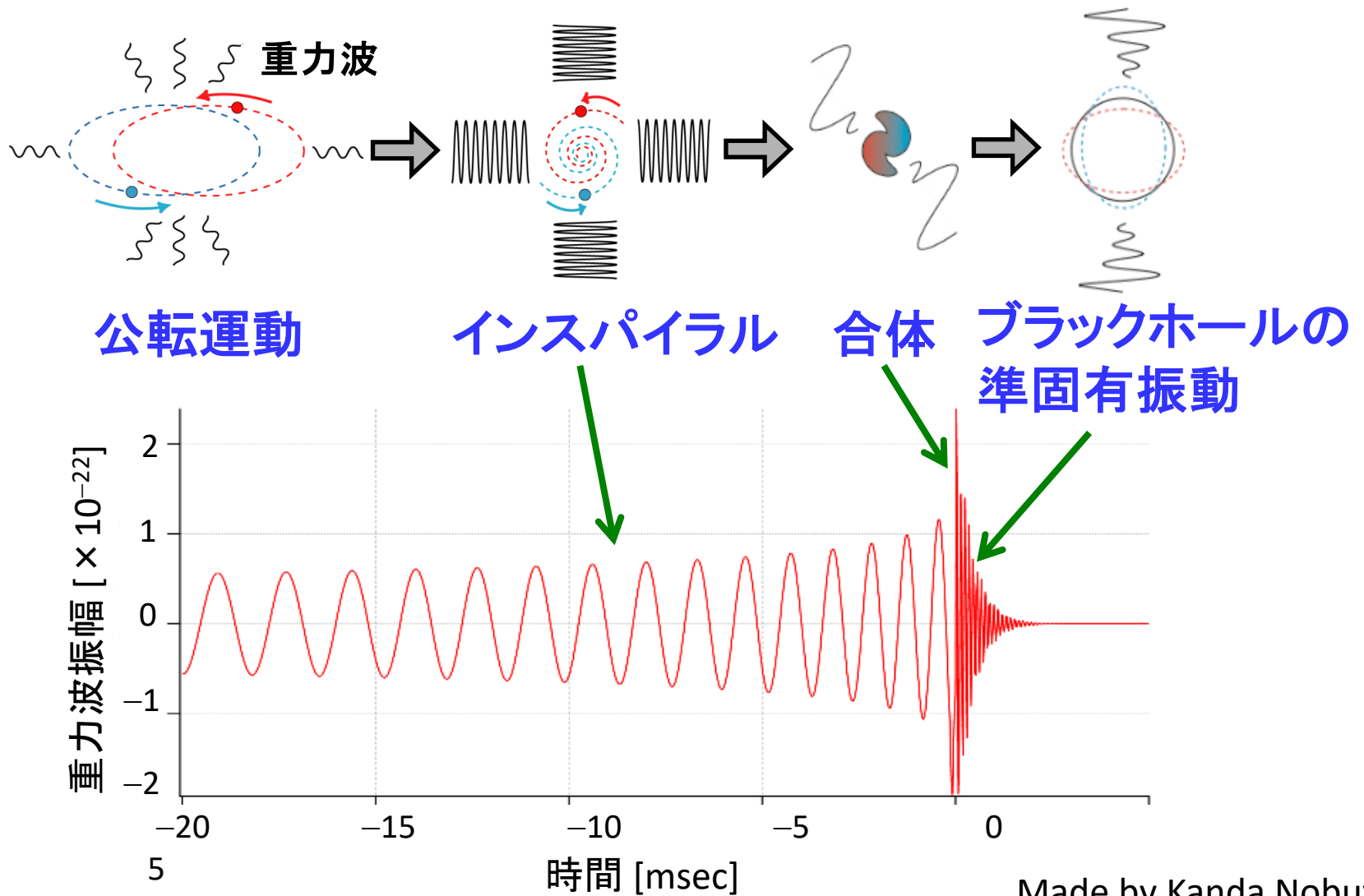


連星中性子星合体
(想像図)

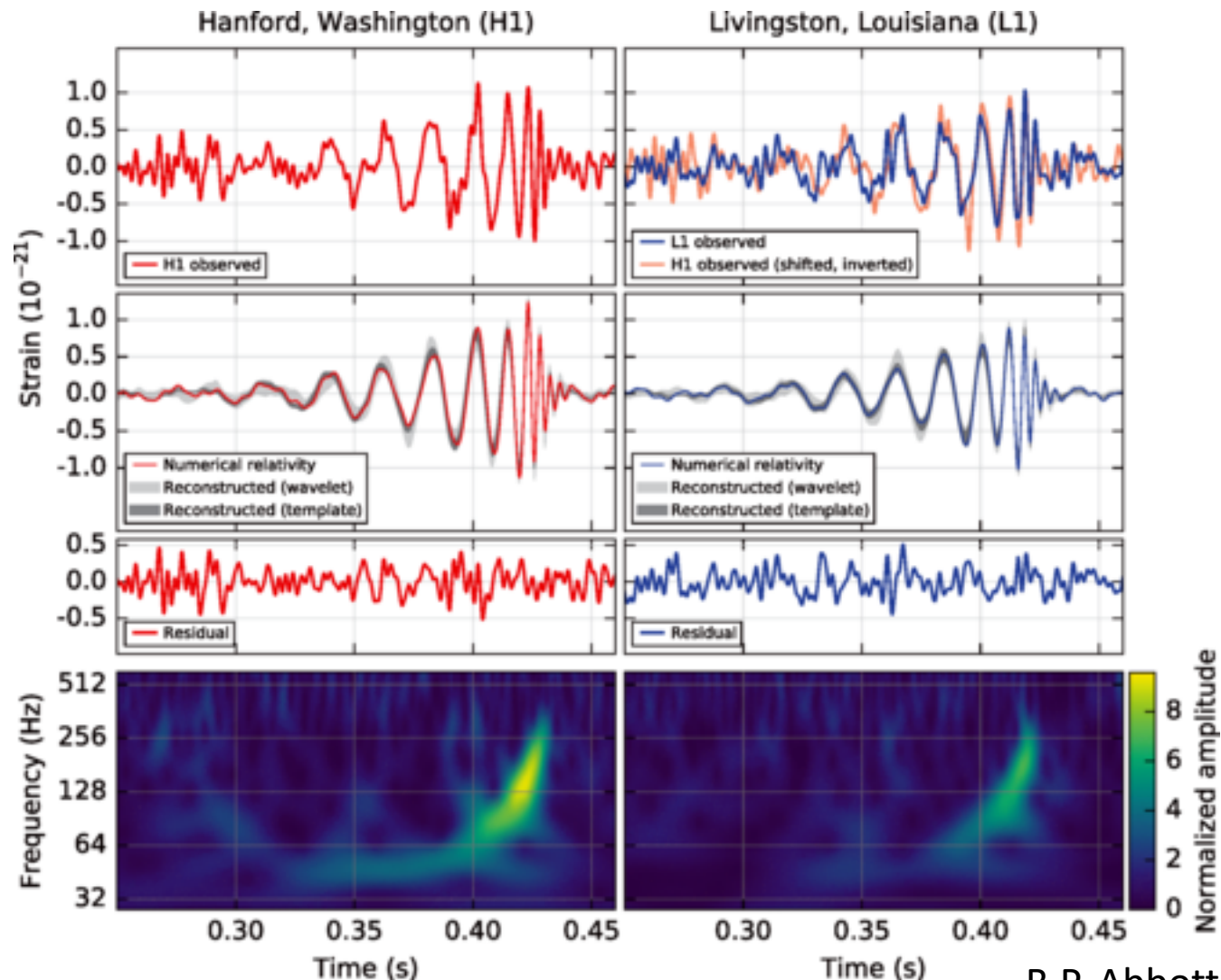


<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>

重力波による物理



重力波による物理



B.P. Abbott+, PRL (2016)

重力波による物理

これまでの重力波イベントから分かったこと

- 重力波は真空中を(ほぼ)光速で伝播する。
- 一般相対論に矛盾はない。
- (太陽質量の $10 \sim$ 数 10 倍の重さの)ブラックホールが存在する。
- 連星ブラックホールも存在する。
- 中性子星連星合体がショートガンマ線バーストを起こす(っぽい)。
- 中性子星連星合体の際に重元素が生成される。
- 電磁波観測と合わせた、宇宙加速膨張の独立な方法による測定。
- 中性子の状態方程式の制限。
- などなど。

重力波による物理

今後の重力波観測によって分かる(と考えられる)こと

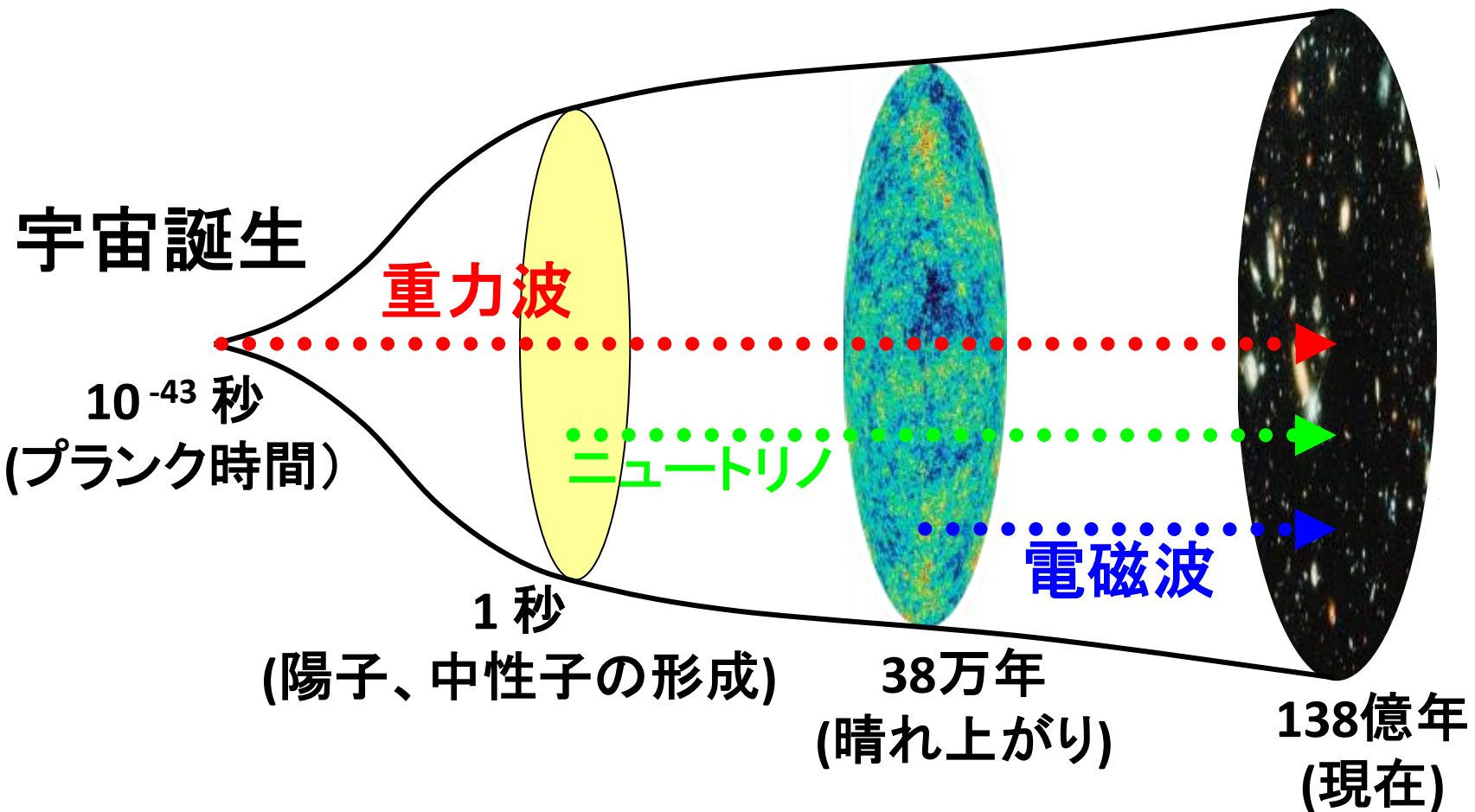
- 連星合体
 - 中間質量ブラックホールの存在
 - ブラックホールの生成シナリオ
 - 中性子星の状態方程式
 - 一般相対論/修正重力理論の検証
 - ショートガンマ線バーストの起源
 - 重力波だけでの宇宙膨張の加速度の独立測定
 - ダークマターの正体 (原始ブラックホール)
- 超新星爆発
 - 超新星爆発のメカニズム
- 初期宇宙
 - インフレーションの検証 (モデル、いつ起こったか)
 - インフレーションから晴れ上がりまでの宇宙の発展、特にビッグバンのタイミングや熱進化の歴史

重力波による物理

今後の重力波観測によって分かる(と考えられる)こと

- 連星合体
 - 中間質量ブラックホールの存在
 - ブラックホールの生成シナリオ
 - 中性子星の状態方程式
 - 一般相対論/修正重力理論の検証
 - ショートガンマ線バーストの起源
 - 重力波だけでの宇宙膨張の加速度の独立測定
 - ダークマターの正体 (原始ブラックホール)
- 超新星爆発
 - 超新星爆発のメカニズム
- 初期宇宙
 - インフレーションの検証 (モデル、いつ起こったか)
 - インフレーションから晴れ上がりまでの宇宙の発展、特にビッグバンのタイミングや熱進化の歴史

重力波で宇宙の始まりを観る！

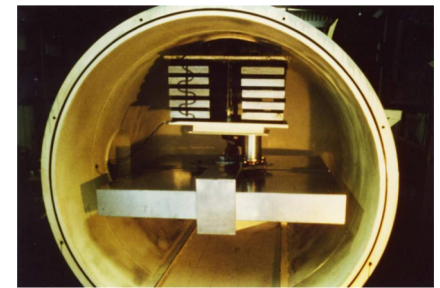


目次

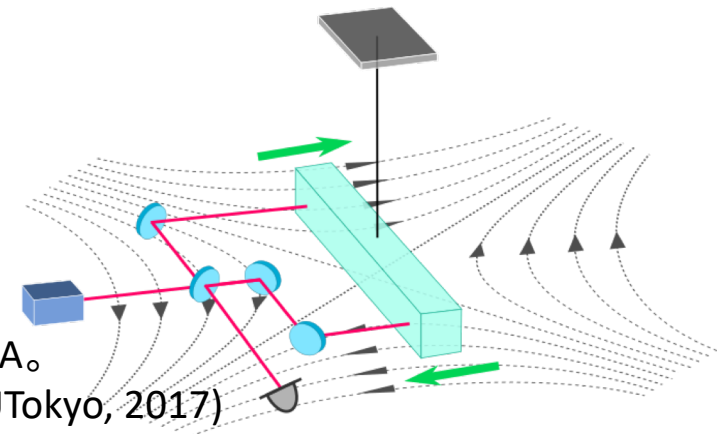
1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

重力波検出器

- 重力波検出器 = 潮汐的な時空の歪み(あるいは潮汐力)を検出できれば良い。
 - 共振型 (Weberなど)
 - レーザー干渉計型
 - 地上 (10^{-10} - 10^4 Hz): KAGRA, LIGO, Virgo, ...
 - 宇宙 (10^{-4} - 10 Hz): DECIGO, LISA, ...
 - ねじれ型 (TOBA)
 - 原子干渉計型
 - etc...



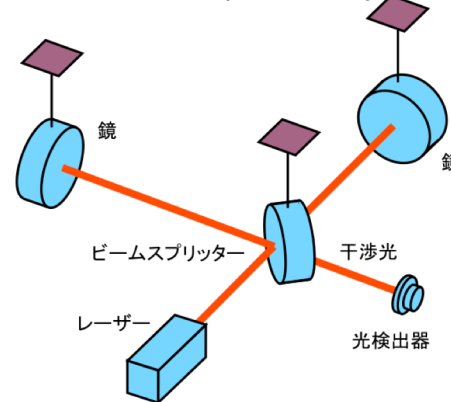
共振型重力波検出器。
(坪野先生最終講義スライドより)



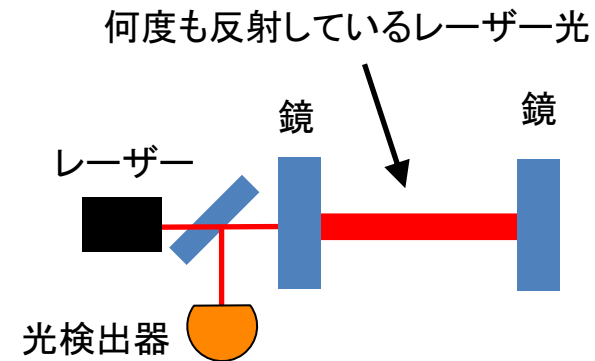
ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA。
(T. Shimoda, Master thesis, UTokyo, 2017)

重力波検出器

- 重力波検出器 = 潮汐的な時空の歪み(あるいは潮汐力)を検出できれば良い。
 - 共振型 (Weberなど) これが現在の主流。だが、、、
 - レーザー干渉計型
 - 地上 (10^{-10} - 10^4 Hz): KAGRA, LIGO, Virgo, ...
 - 宇宙 (10^{-4} - 10 Hz): DECIGO, LISA, ...
 - ねじれ型 (TOBA)
 - 原子干渉計型
 - etc...



Michelson干渉計。
(Made by S. Kawamura)

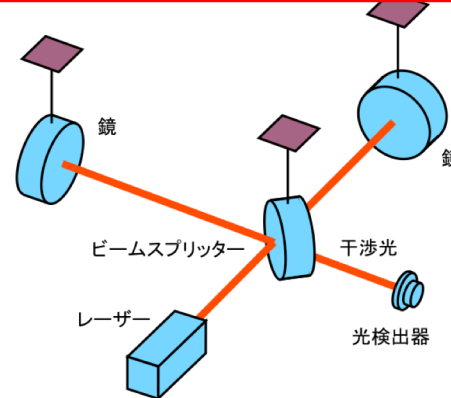


光共振器。

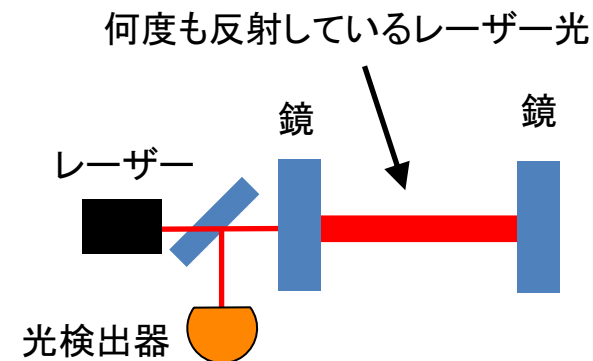
重力波検出器

- 重力波検出器 = 潮汐的な時空の歪み(あるいは潮汐力)を検出できれば良い。
 - 共振型 (Weberなど)
 - レーザー干渉計型
 - 地上 (10^1 - 10^4 Hz): KAGRA, LIGO, Virgo, ...
 - 宇宙 (10^{-4} - 10 Hz): DECIGO, LISA, ...
 - ねじれ型 (TOBA)
 - 原子干渉計型
 - etc...

これが将来の主流！

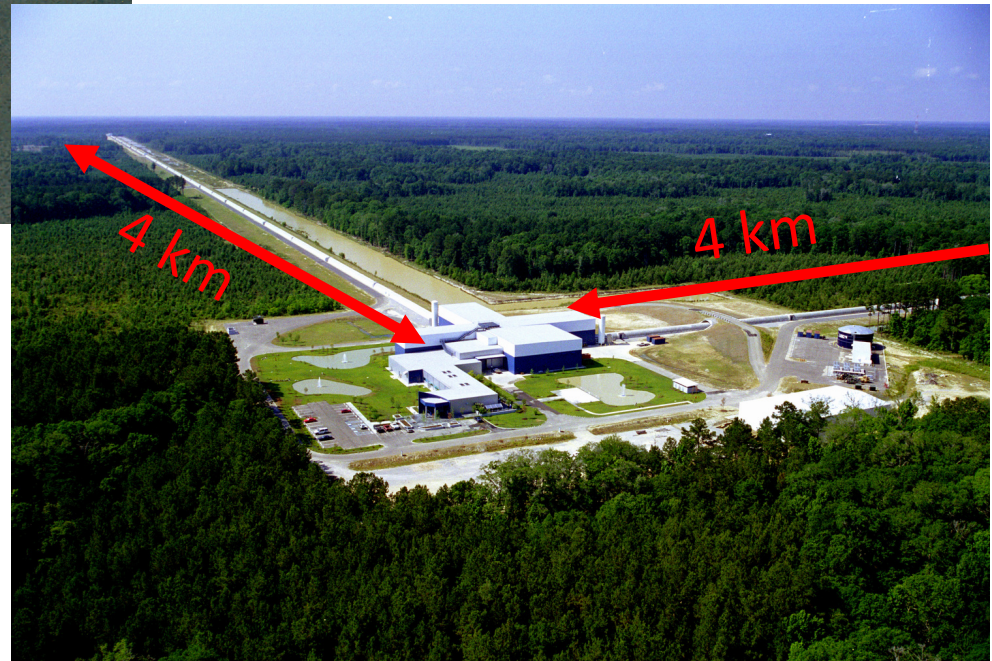
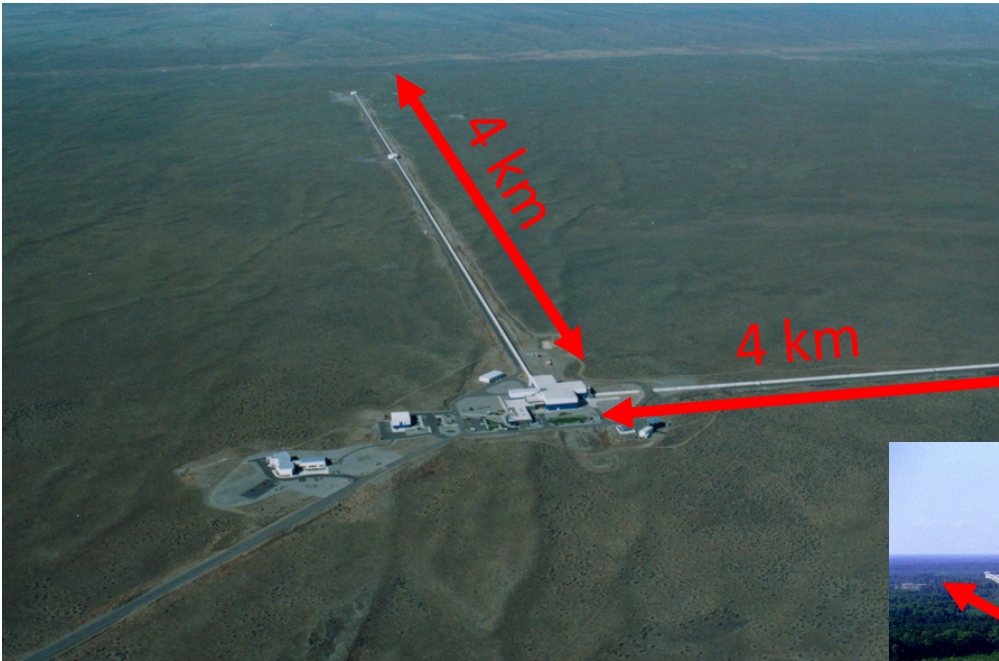


Michelson干渉計。
(Made by S. Kawamura)



光共振器。

Advanced LIGO



(左上) LIGOハンフォード観測所。
(右下) LIGOリビングストン観測所。
(Credit: Caltech/MIT/LIGO Lab)

大型低温重力波望遠鏡KAGRA

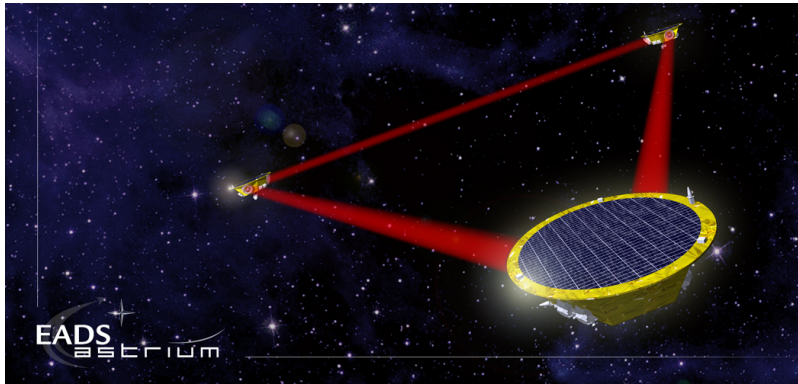
現在建設中。2019年度内に観測開始予定！



KAGRAのイメージ図。(Credit: 宇宙線研究所 重力波観測研究施設)

宇宙重力波望遠鏡

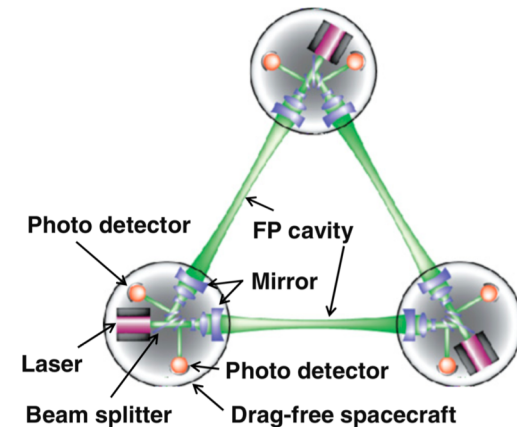
LISA (10^{-4} - 10^{-2} Hz)



LISAのイメージ図。(Credit: EADS Astrium)

- ESA, NASAが主体。
- 基線長: 250万km
- (ある種の)Michelson干渉計。
- 2034年に打ち上げ予定。
- 中国でも似た構成の計画が進行中 (TianQin/Taiji)。

DECIGO (0.1-10 Hz)



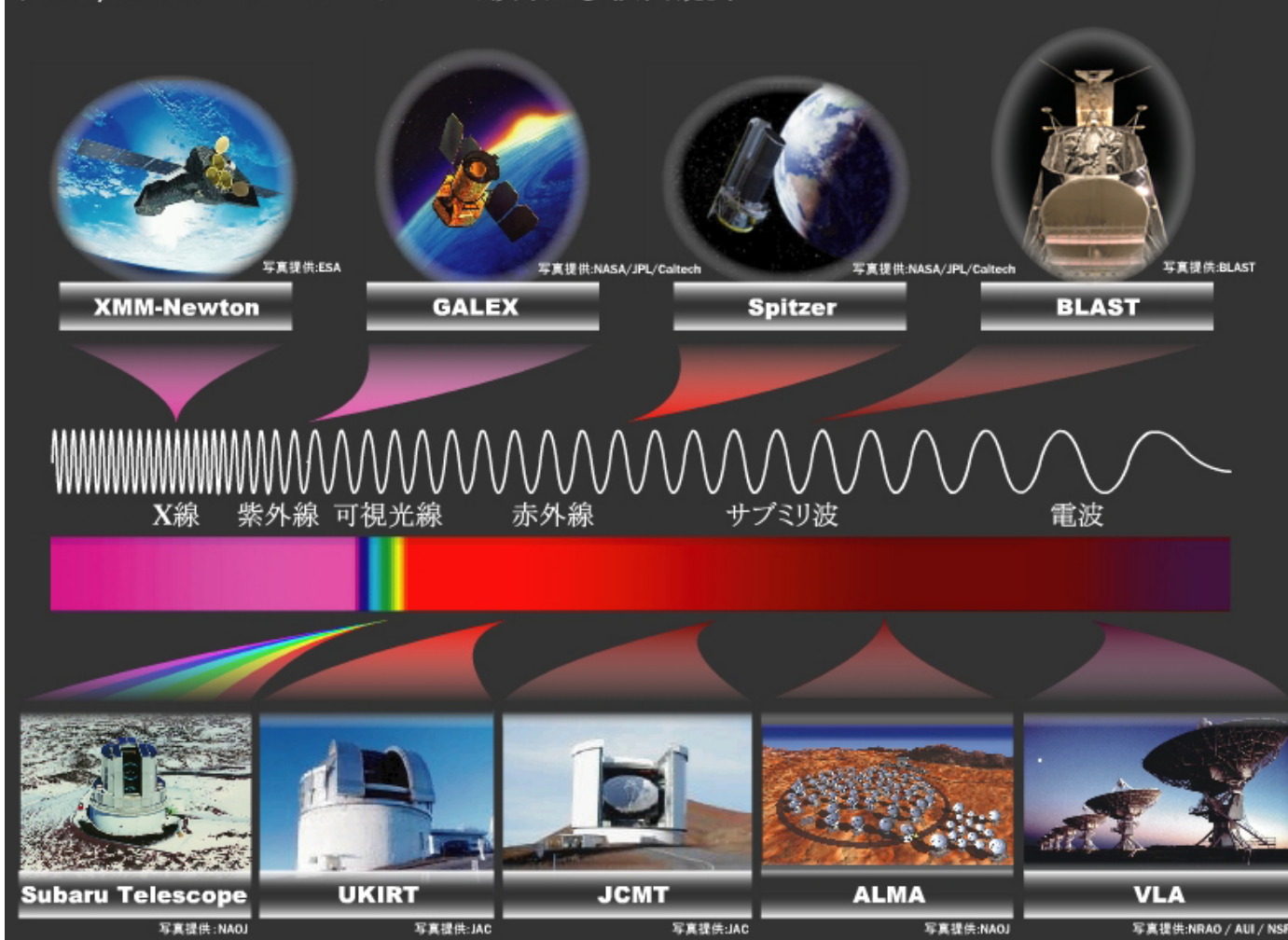
DECIGOのイメージ図。

(S. Kawamura+, CQG, 2011)

- 日本が主体。
- 基線長: 1000 km
- 光共振器を用いて最高感度を向上させる。
- 宇宙誕生の瞬間の直接観測が最大の目標。

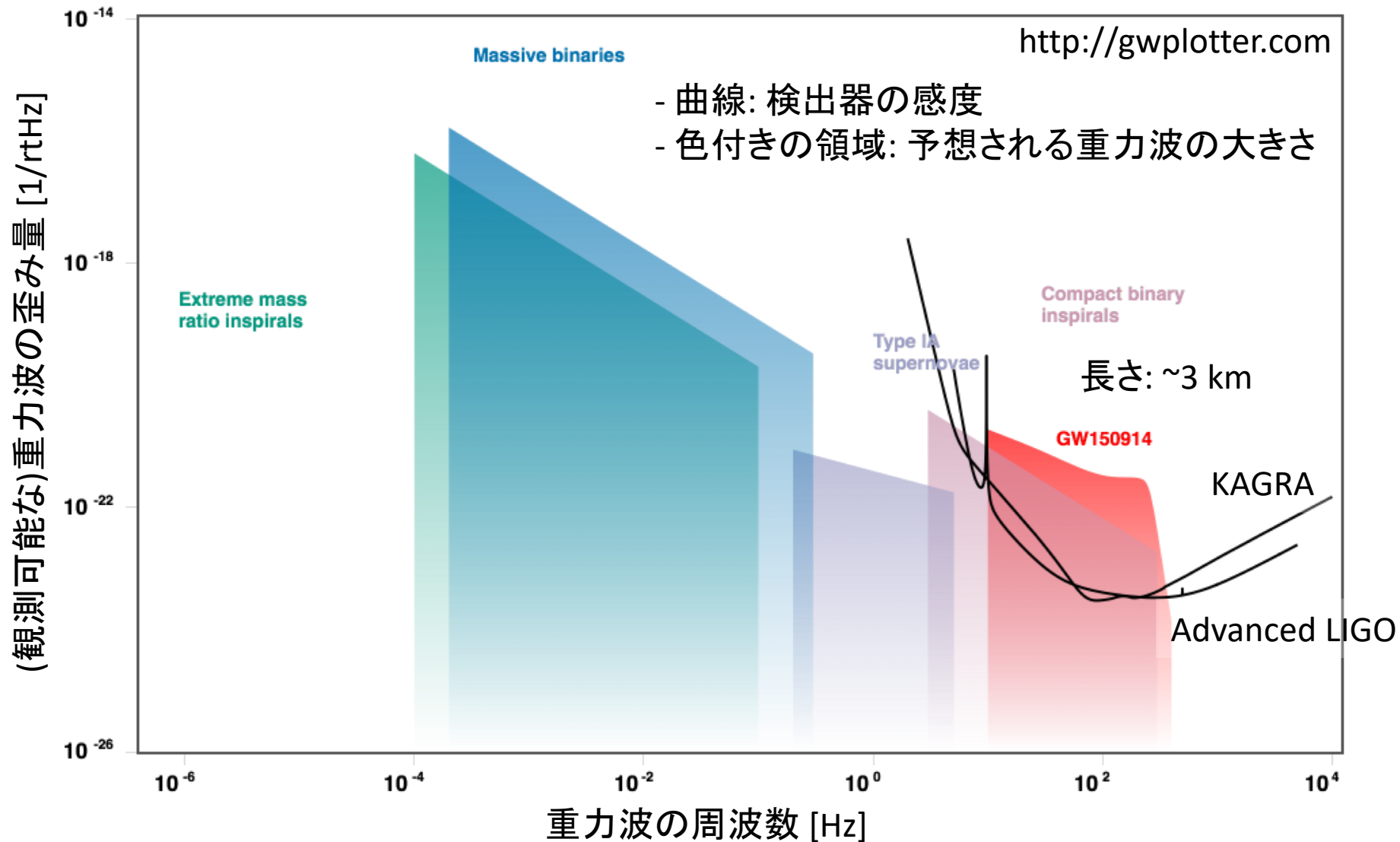
(参考) 電磁場望遠鏡

すばる/XMM - ニュートン サーベイ領域の多波長観測

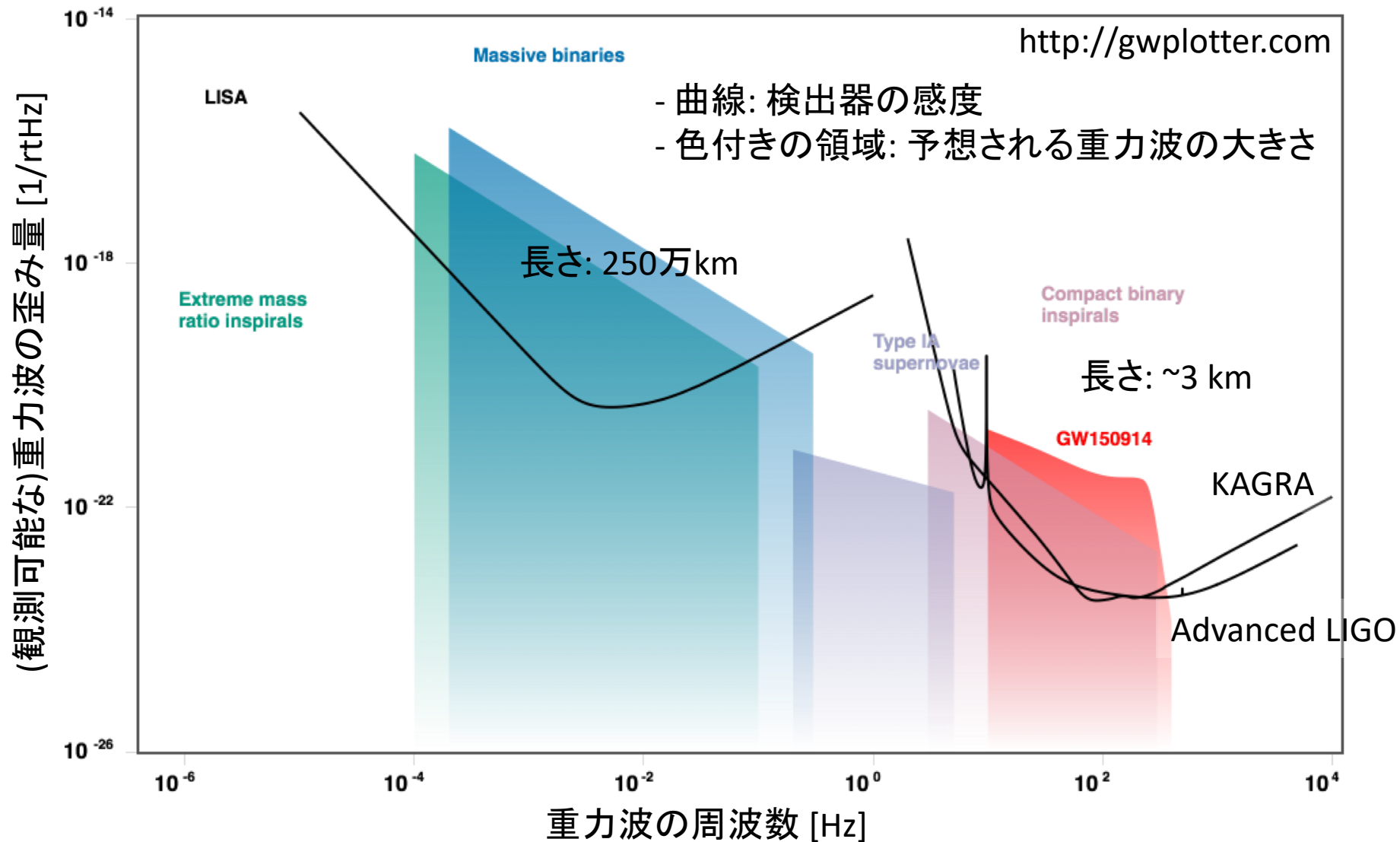


https://subarutelescope.org/Pressrelease/2004/06/01/j_index.html

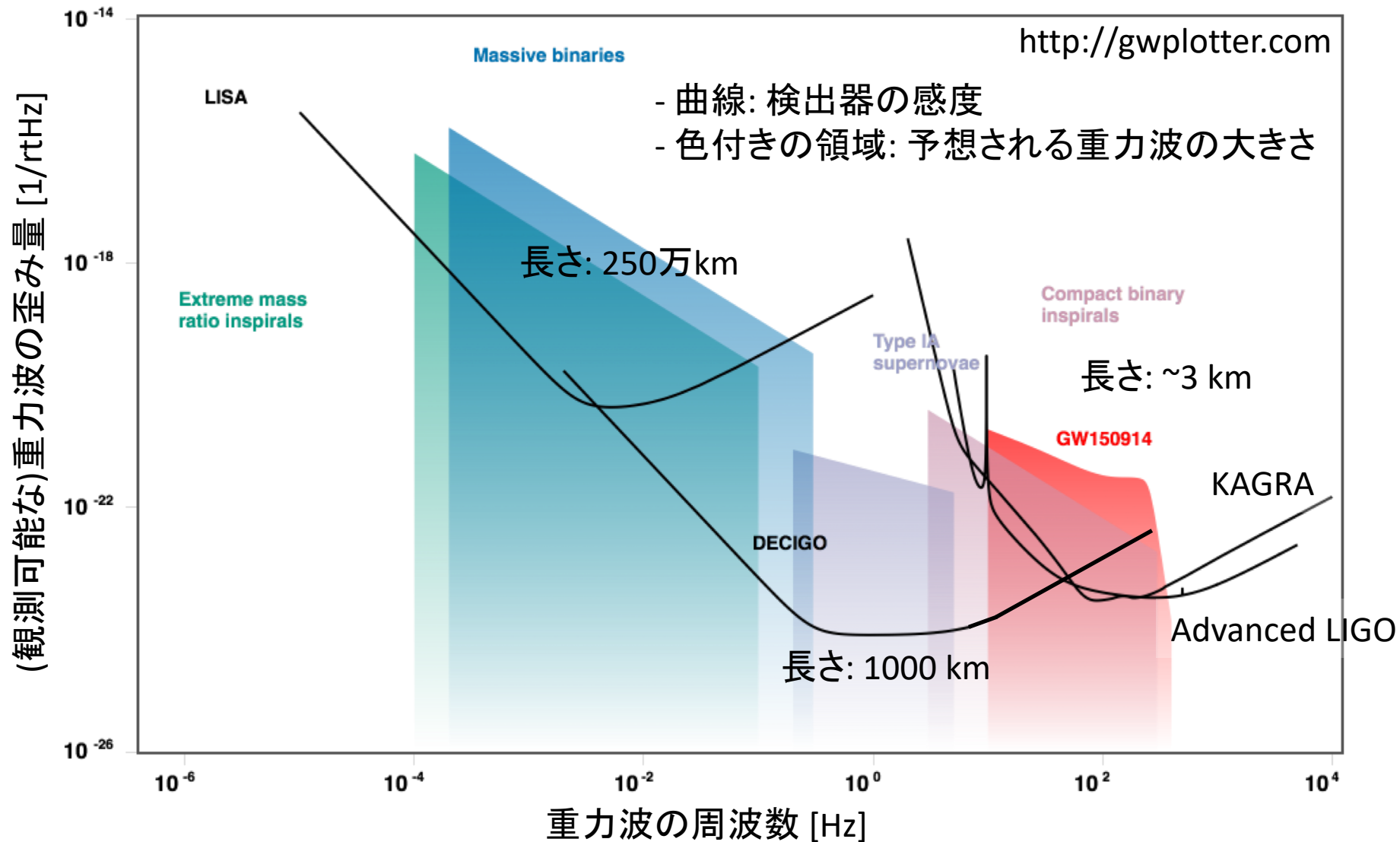
重力波検出器の感度



重力波検出器の感度



重力波検出器の感度

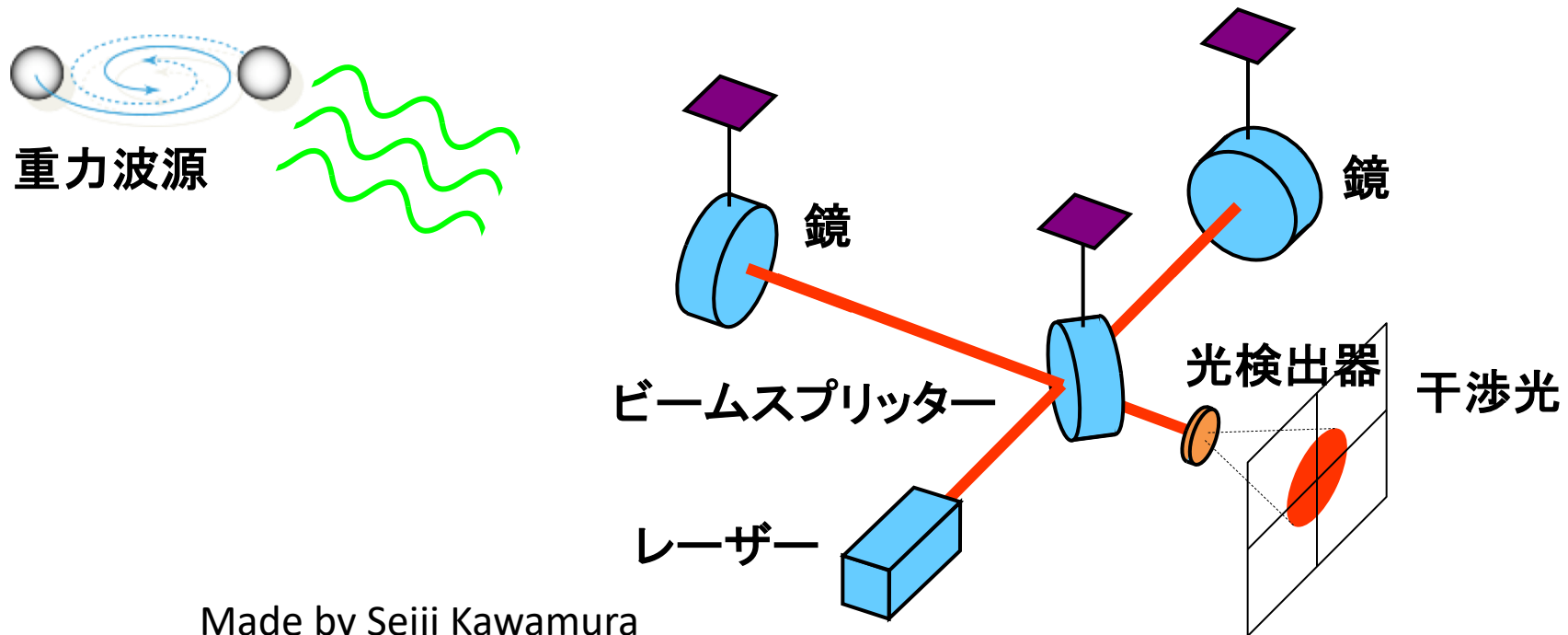


目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

レーザー干渉計型重力波検出器

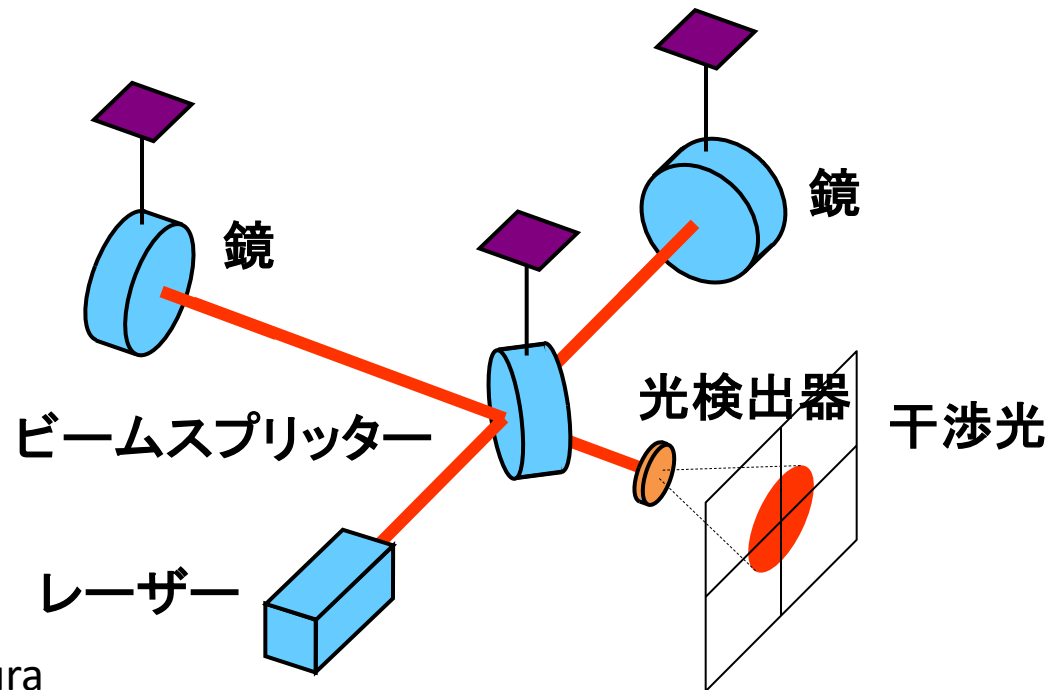
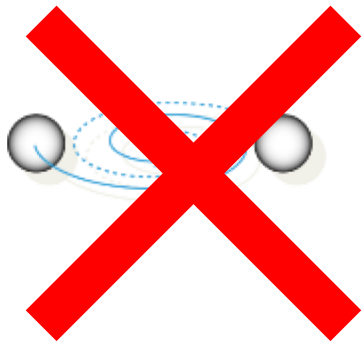
- 干渉計の本質: 両腕の位相差の変化を強度変化として読み出す装置
 - 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる。
 - 強度変化を読み出す際の雑音(検出雑音)も問題になる。



Made by Seiji Kawamura

レーザー干渉計型重力波検出器

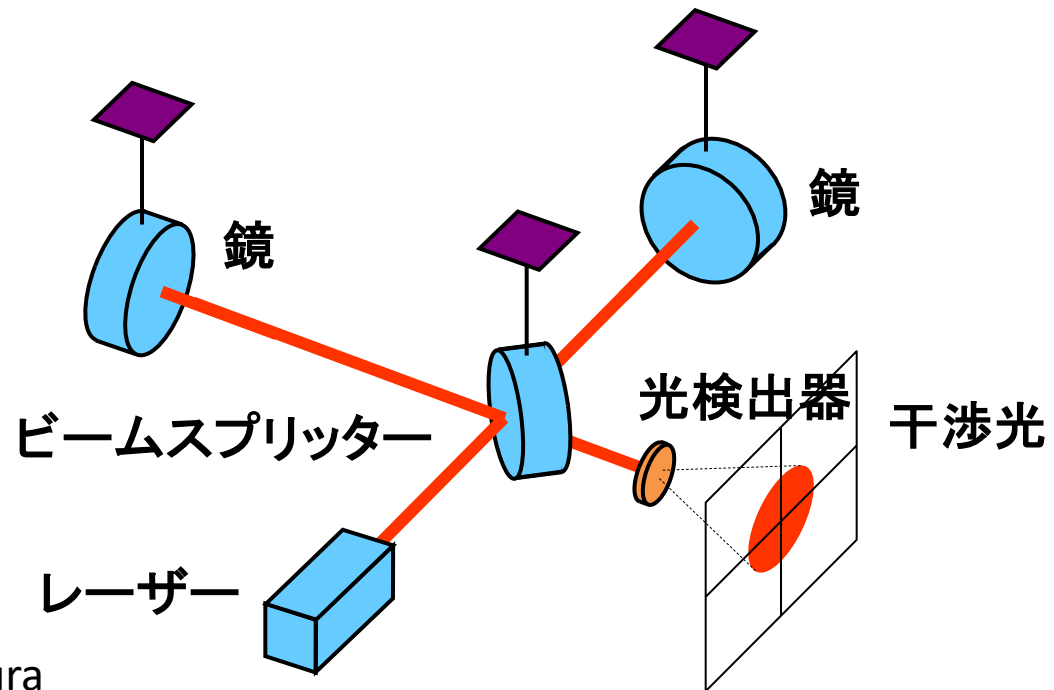
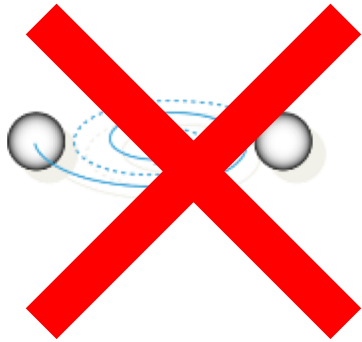
- 干渉計の本質：両腕の位相差の変化を強度変化として読み出す装置
 - 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる。
 - 強度変化を読み出す際の雑音(検出雑音)も問題になる。



Made by Seiji Kawamura

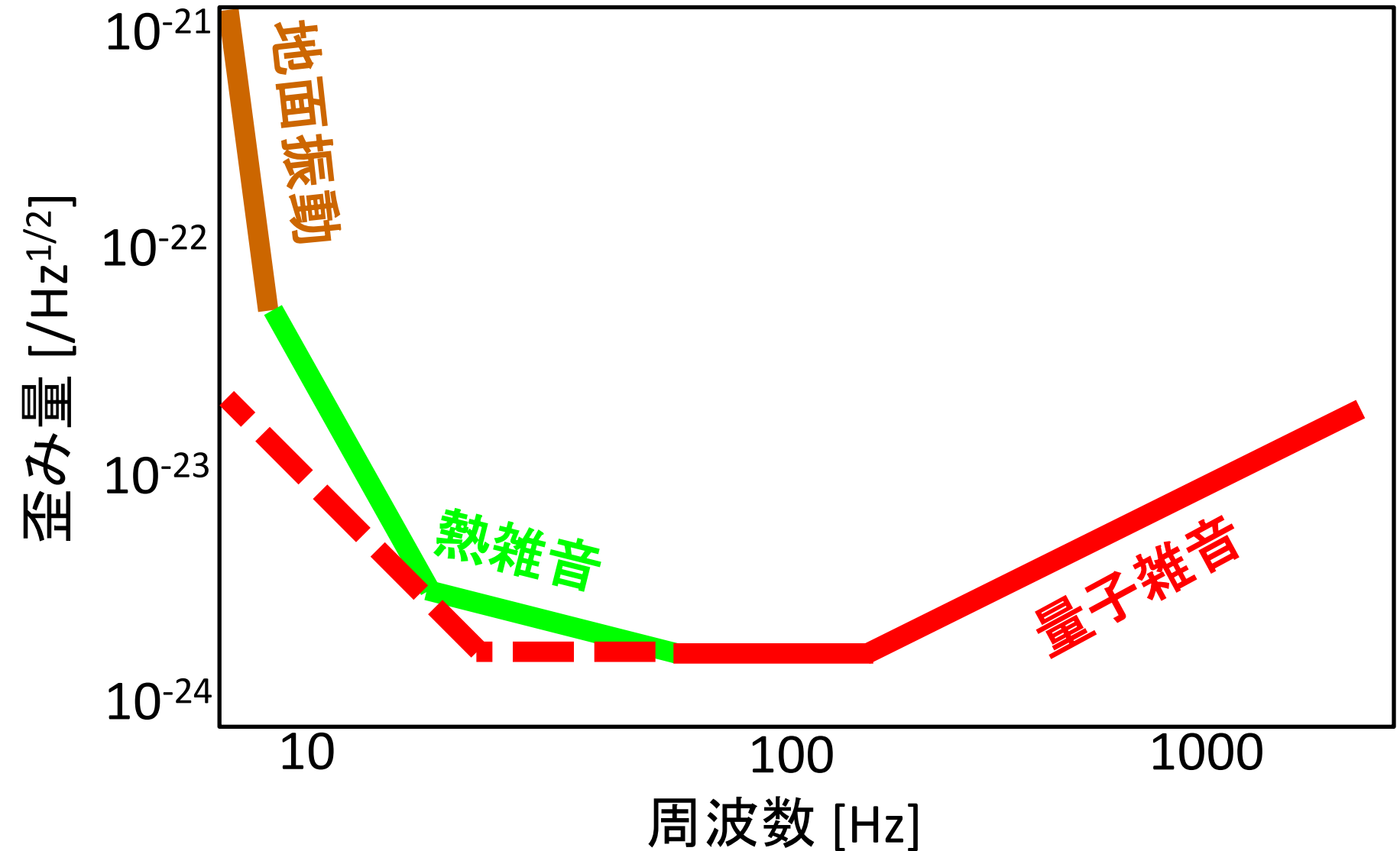
レーザー干渉計型重力波検出器

- 干渉計の本質：両腕の位相差の変化を強度変化として読み出す装置
 - 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる。
 - 強度変化を読み出す際の雑音(検出雑音)も問題になる。

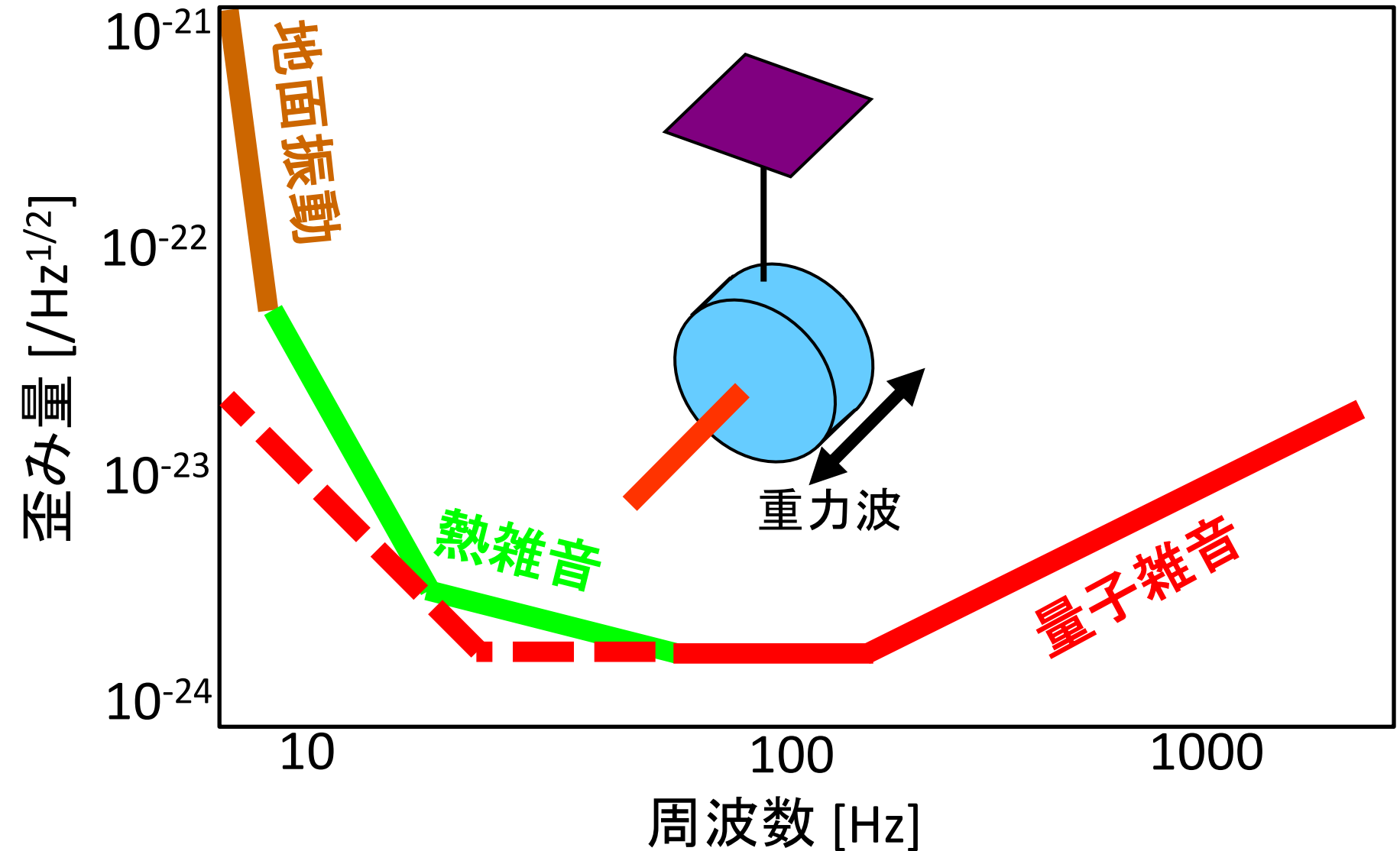


Made by Seiji Kawamura

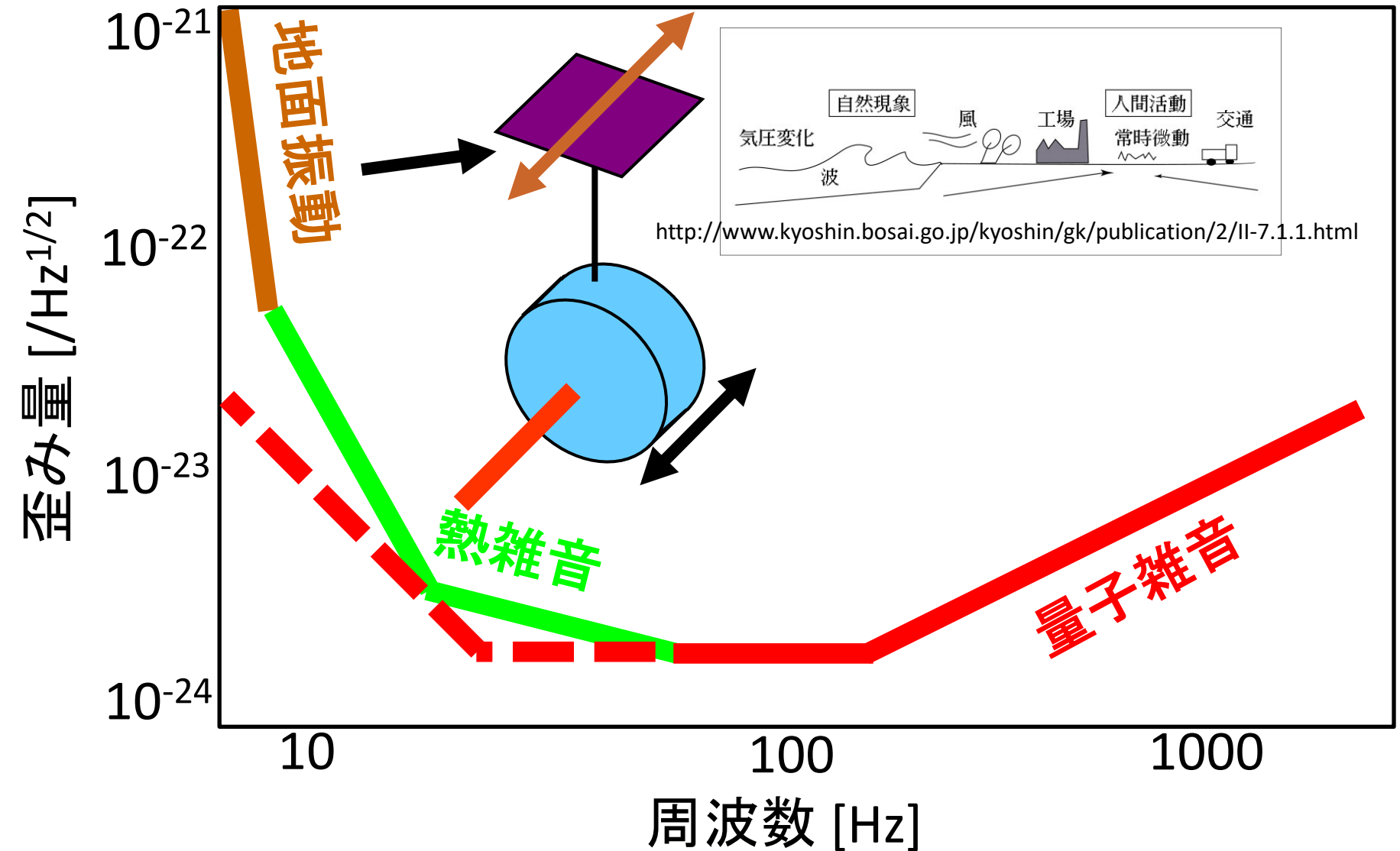
地上のレーザー干渉計の感度



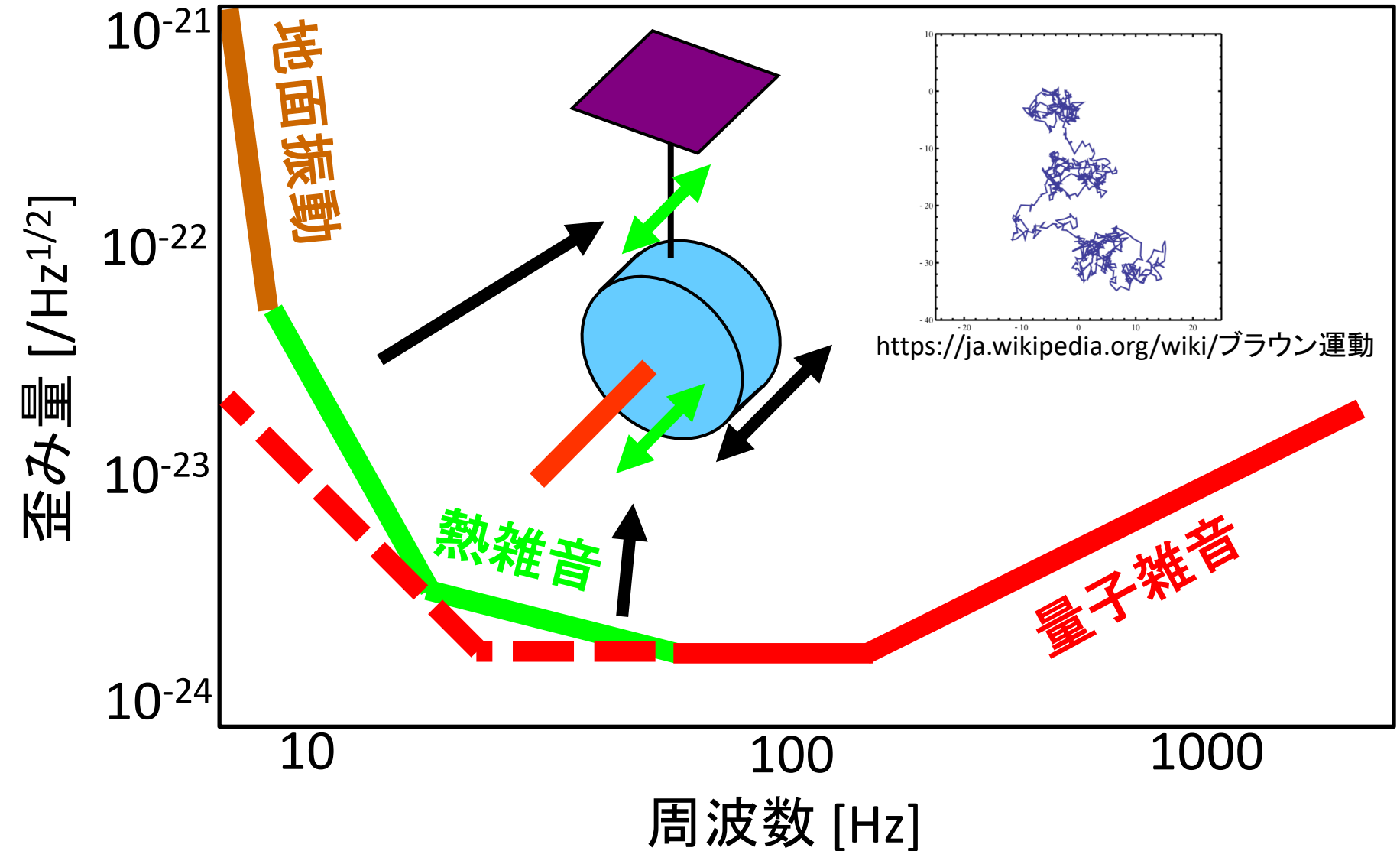
地上のレーザー干渉計の感度



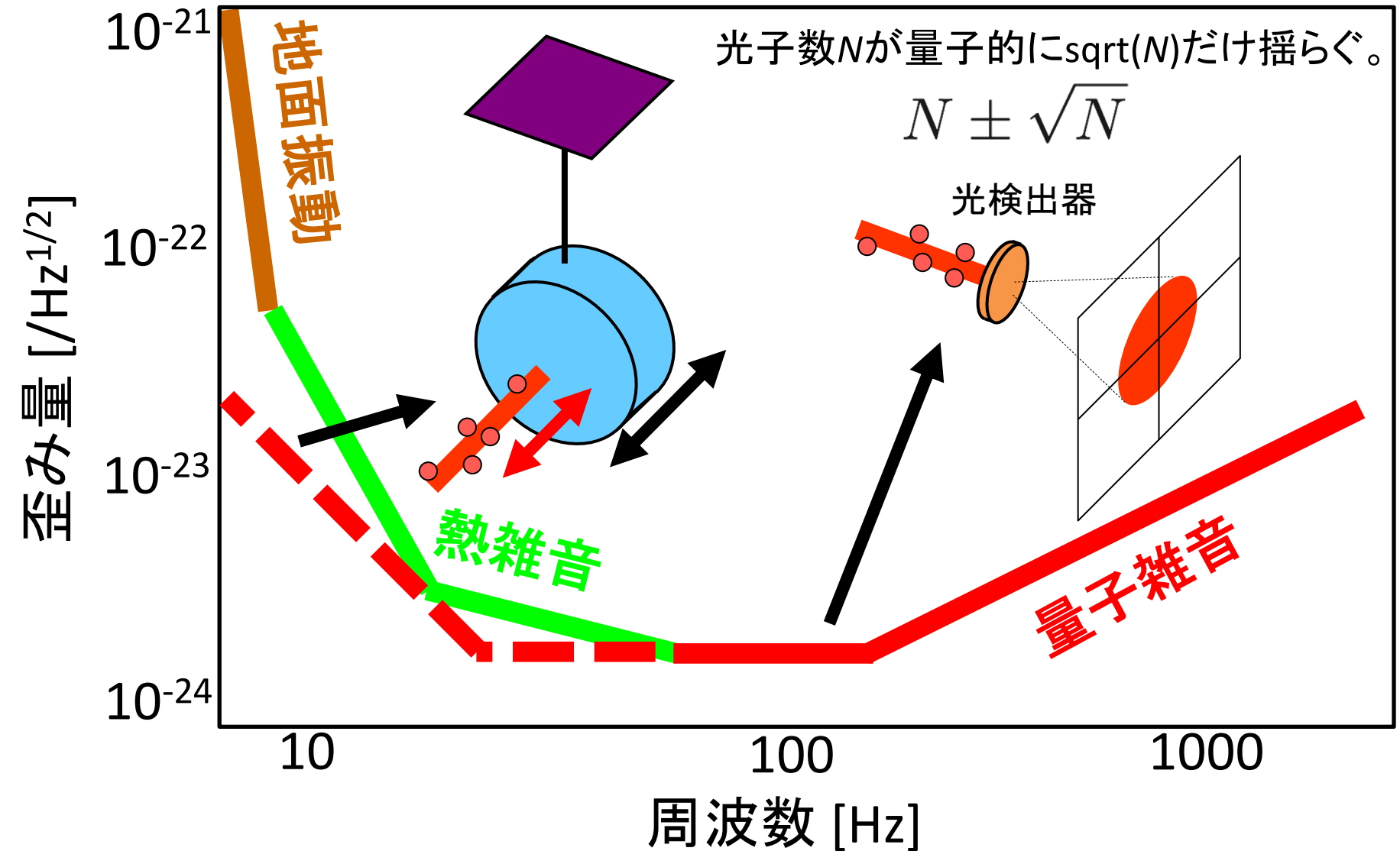
地上のレーザー干渉計の感度



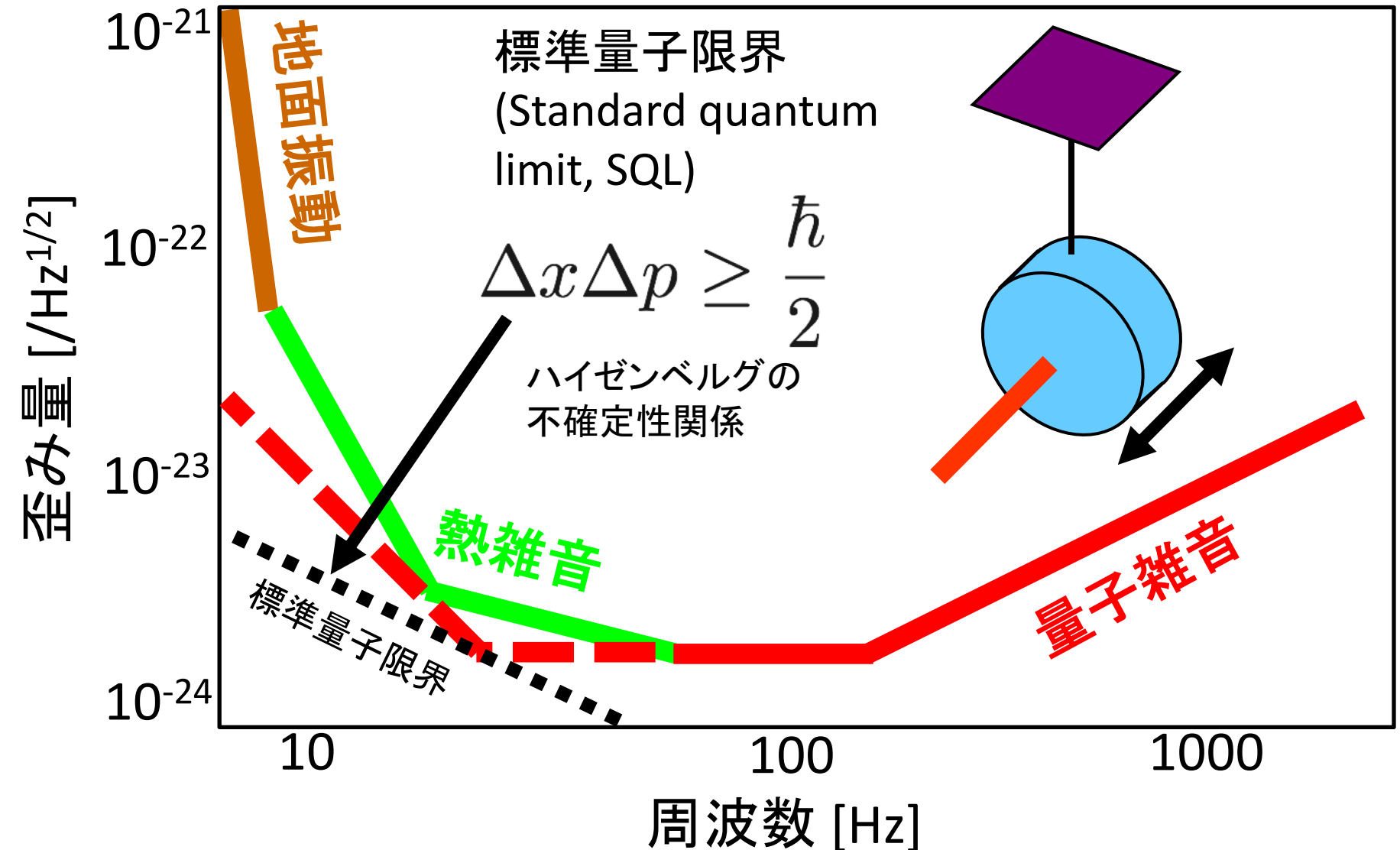
地上のレーザー干渉計の感度



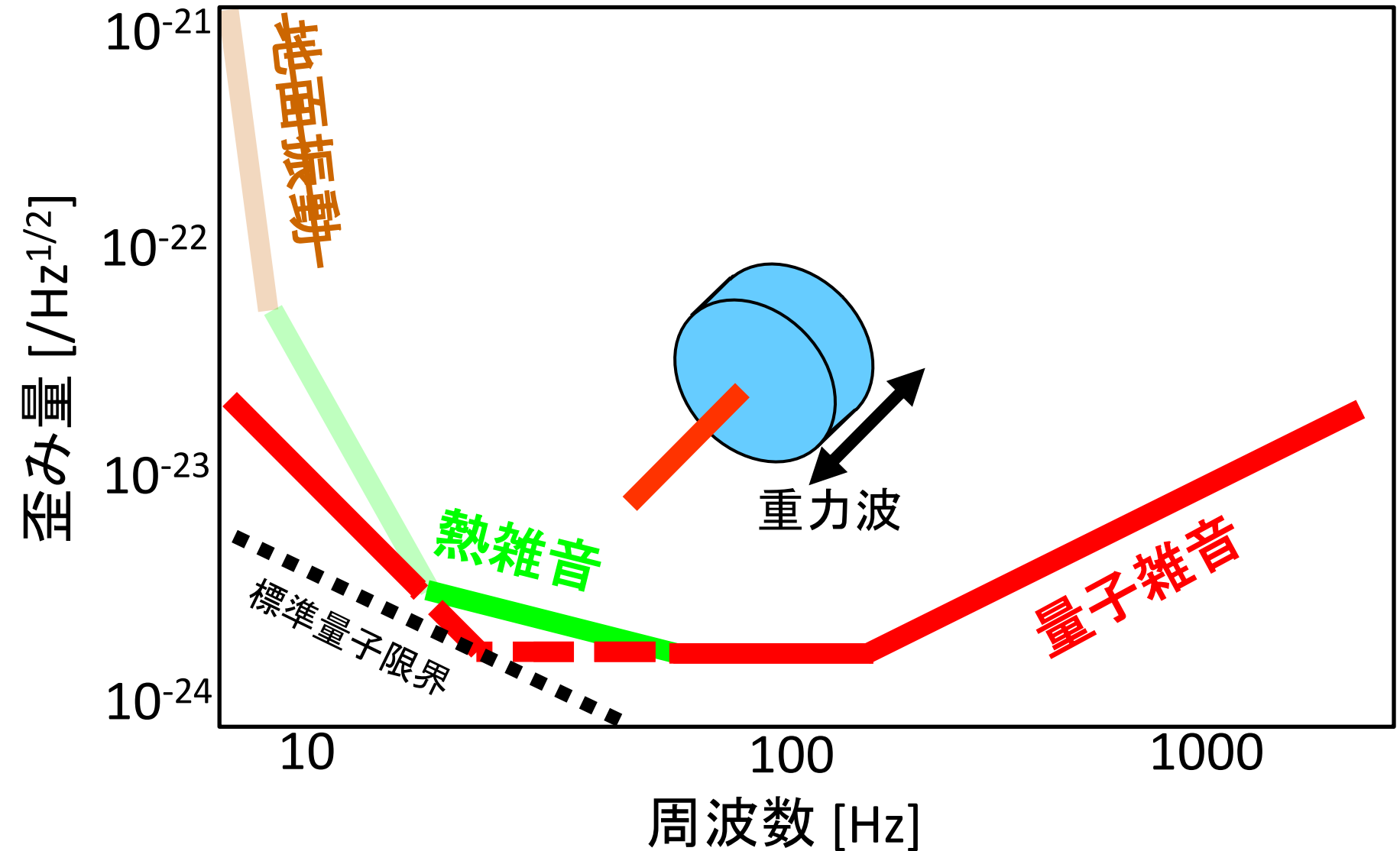
地上のレーザー干渉計の感度



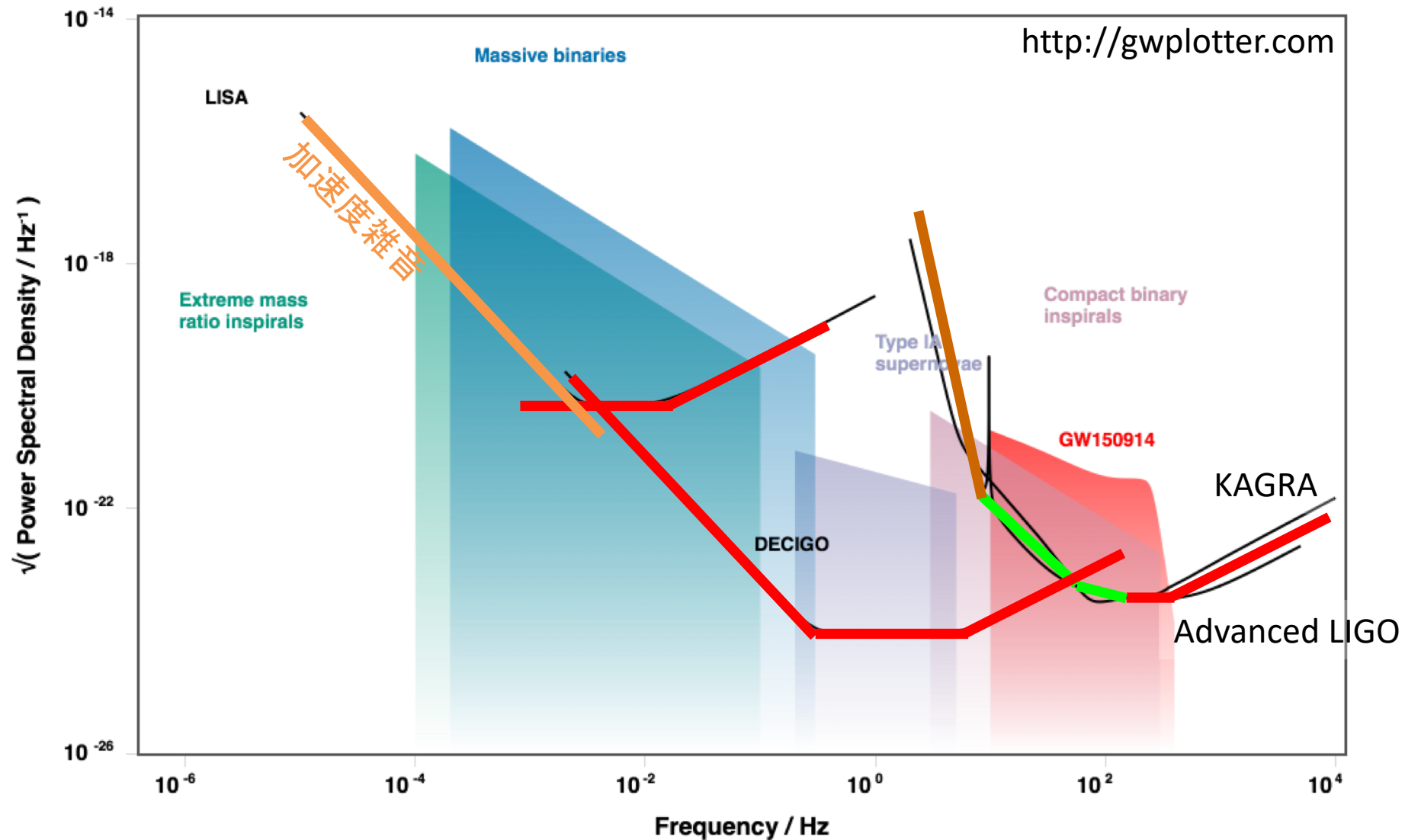
地上のレーザー干渉計の感度



宇宙のレーザー干渉計の感度



重力波検出器の感度



レーザー干渉計の感度

- その他の雑音源
 - レーザーの強度・周波数雑音
 - レーザーの横揺れ
 - レーザーの迷光、散乱光
 - ニュートンの的な重力の変化
 - 大気や地面、水流の密度揺らぎ
 - 鏡の周りの装置の重力場勾配
 - 天体の重力場の勾配
 - 磁場
 - 太陽輻射圧
 - 宇宙線
 - 残留ガス
 - 電気抵抗の熱雑音
 - 他なんでも

レーザー干渉計の感度

- その他の雑音源
 - レーザーの強度・周波数雑音

重力波検出器の研究は、
これらの雑音をいかに
低減していくかの戦い!!

- 宇宙線
- 残留ガス
- 電気抵抗の熱雑音
- 他なんでも

干渉計の感度曲線の書き方

- ところで、干渉計、例えばDECIGOの感度曲線 (=要求値)はパラメータを変えるとどうなるか。
- 必要な情報 ([]内はDECIGOでの値)

- 鏡の質量: m [100 kg]

- 長さ: L [10^6 m]

- レーザー光源パワー: P_0 [10 W]

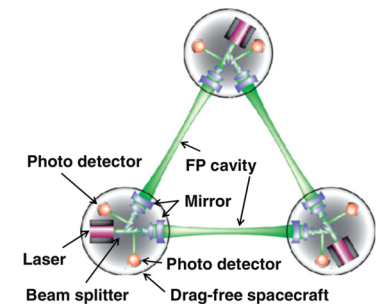
- フィネス (共振器内の平均折返し回数): F [10]

- 必要な知識

- 標準量子限界の表式
$$h_{\text{SQL}} = \sqrt{\frac{8\hbar}{m\omega^2 L^2}} \text{ [1/rtHz]}$$

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2} \leftarrow x = hL, p = mv = m\omega x = mhL\omega$$

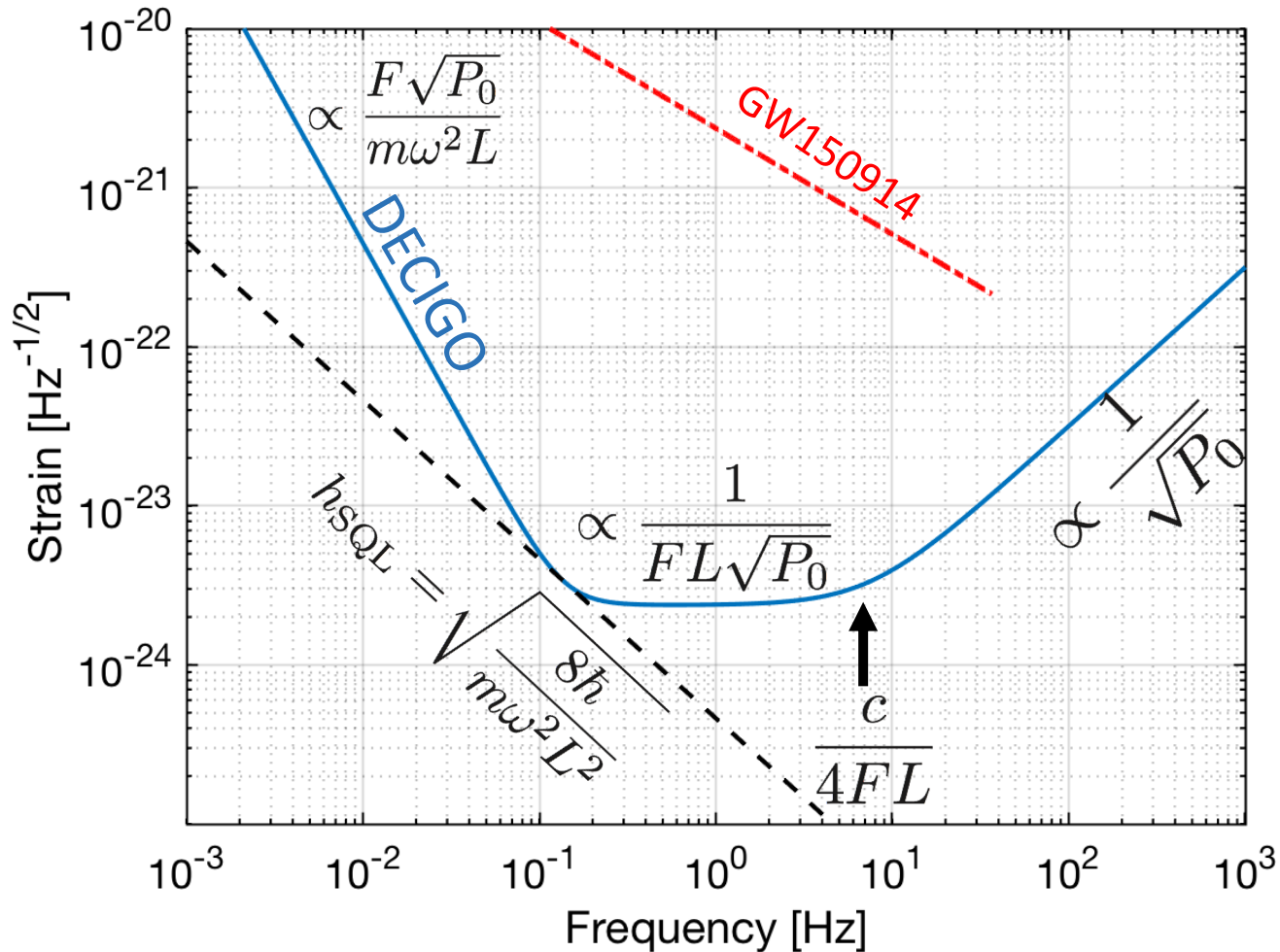
(ただし、これが出てくるのは無次元量の歪み量なので、 $\sqrt{\omega}$ で割る必要がある。)



DECIGO

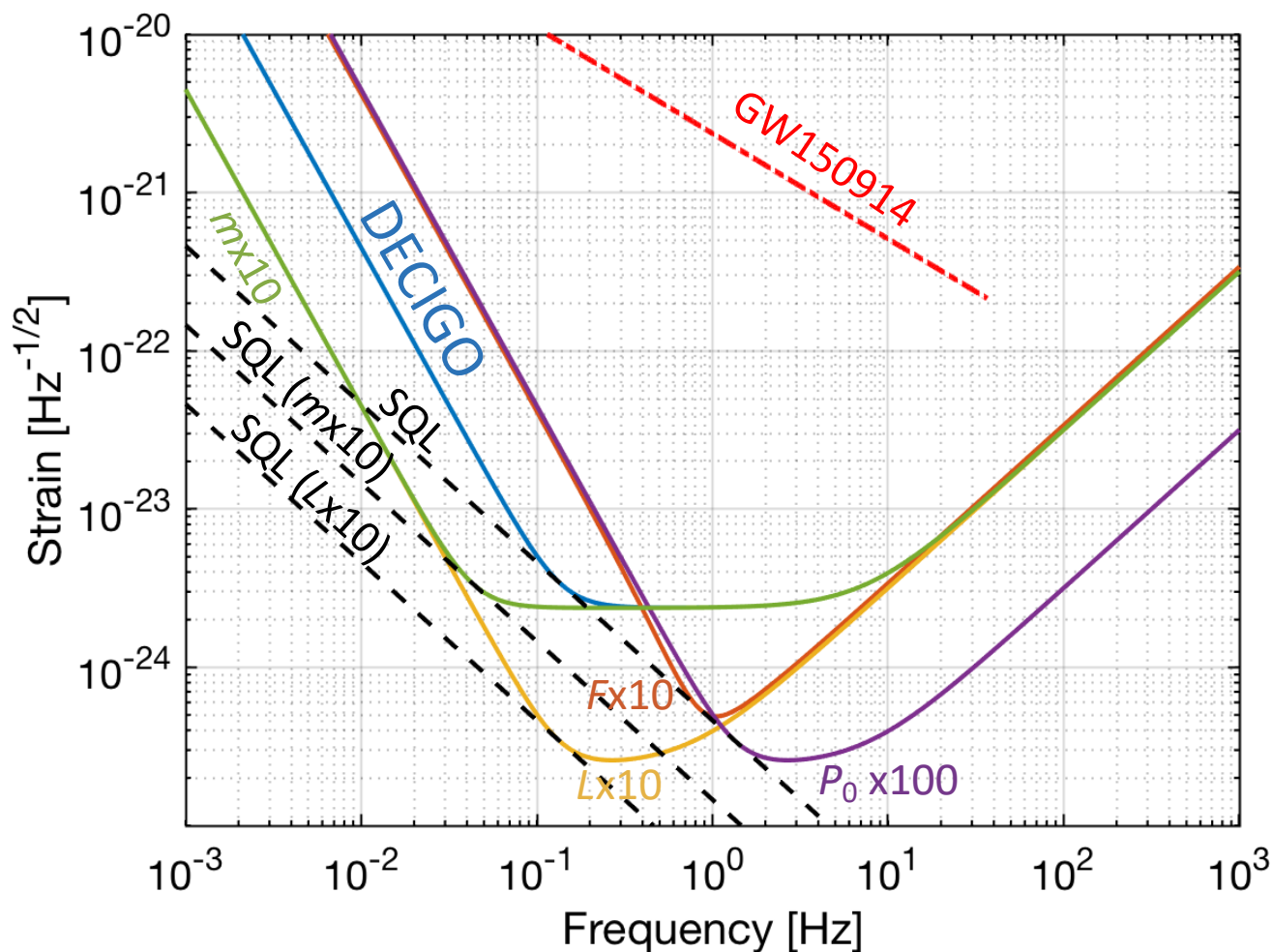
DECIGOの感度曲線の変化

- 歪み量



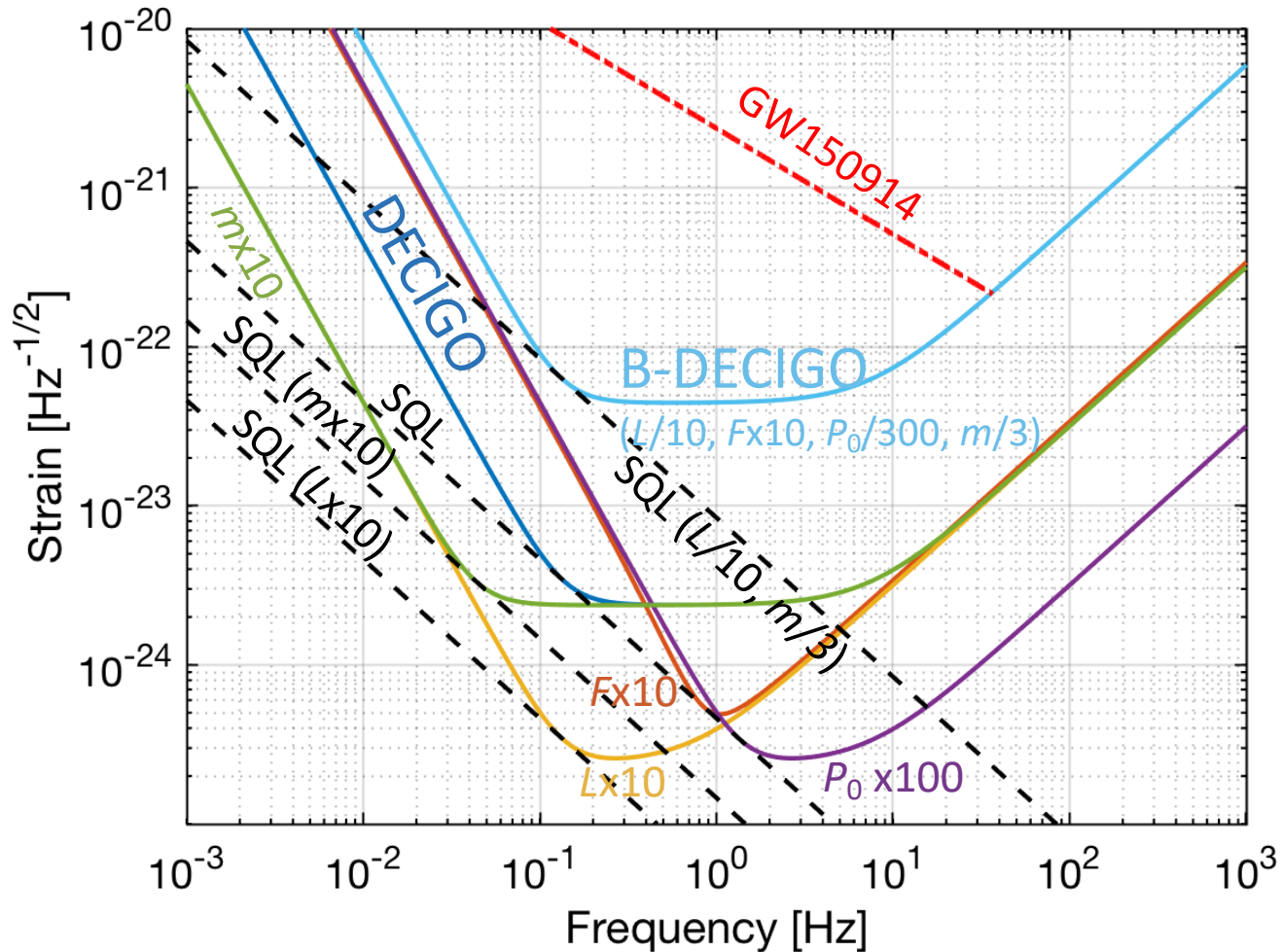
DECIGOの感度曲線の変化

- 歪み量



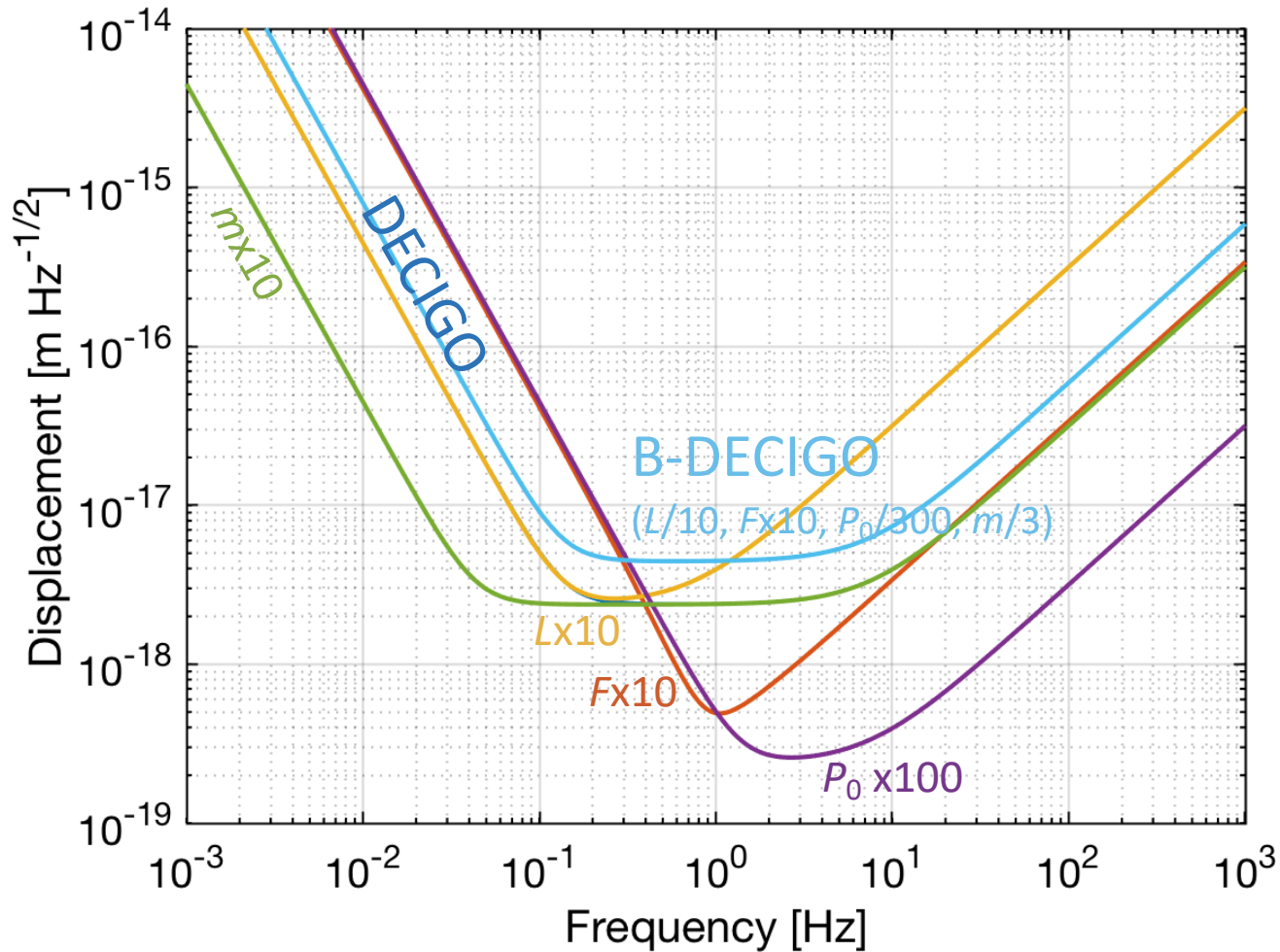
DECIGOの感度曲線の変化

- 歪み量



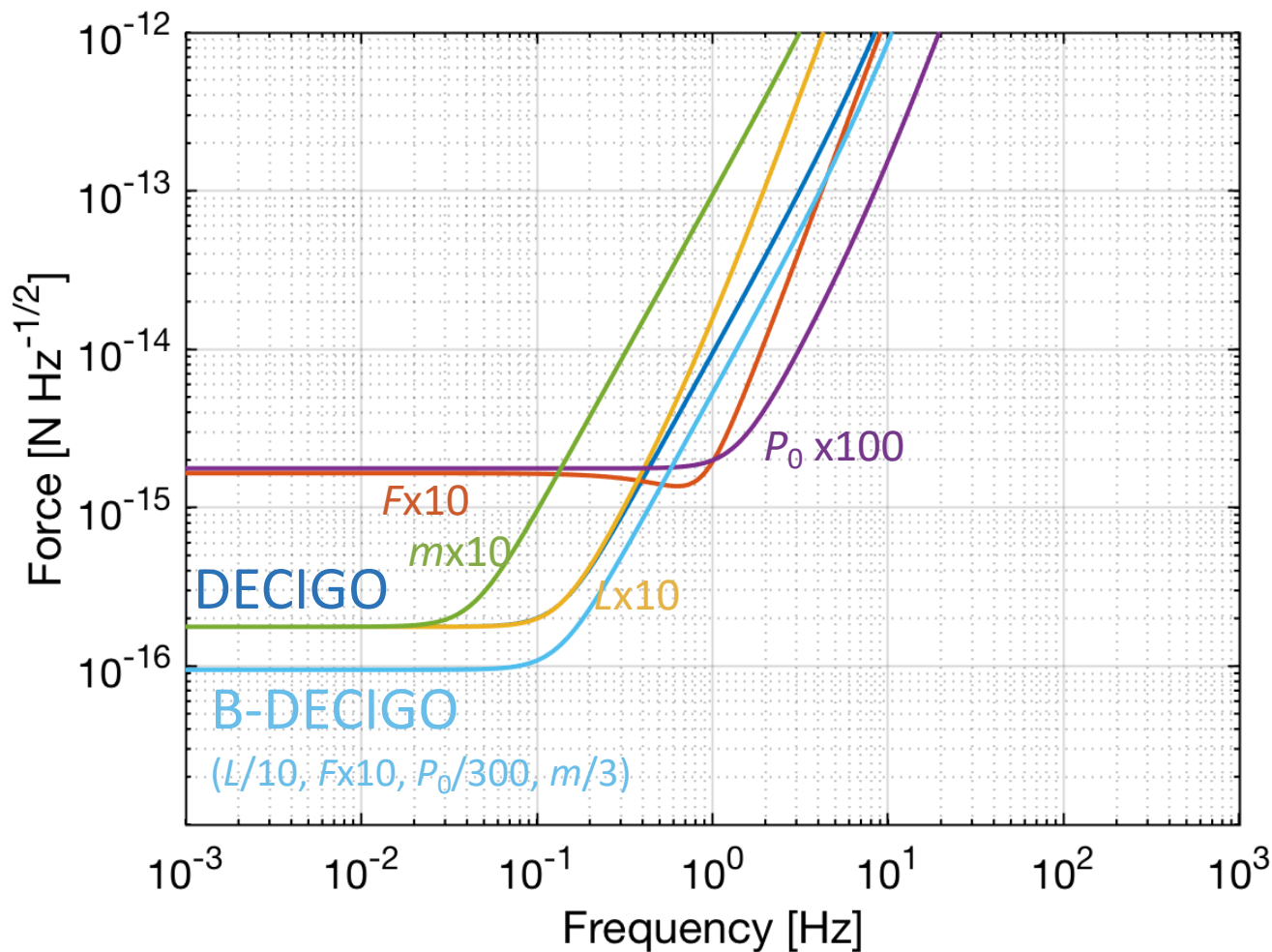
DECIGOの感度曲線の変化

- 変位量 (=歪み量 $\times L$)



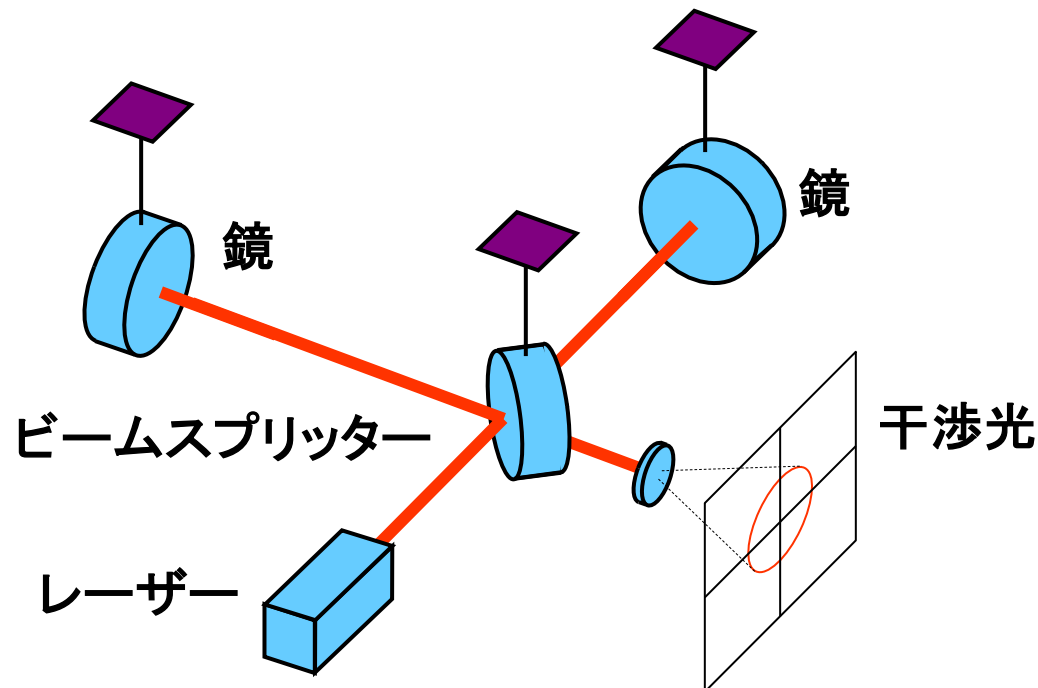
DECIGOの感度曲線の変化

- 鏡にはたらく力換算 (=変位置量 $\times m\omega^2$)



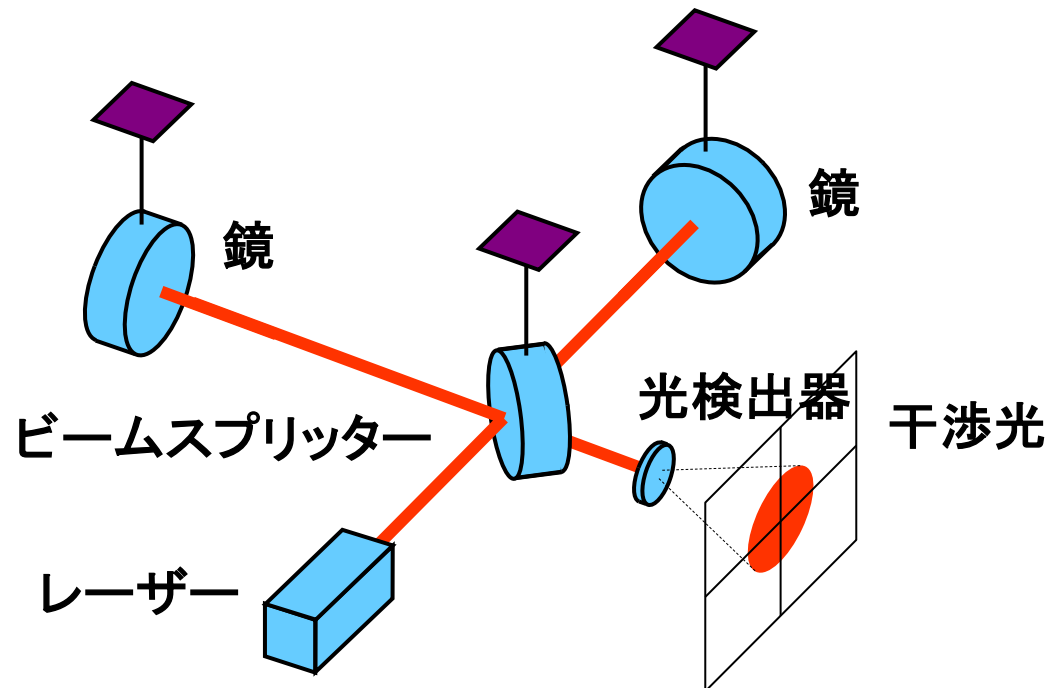
干渉計の制御

- 干渉計を運用するには、干渉計の長さをある長さに保つ必要がある。
 - 例えば、出力が暗くなる場所など。



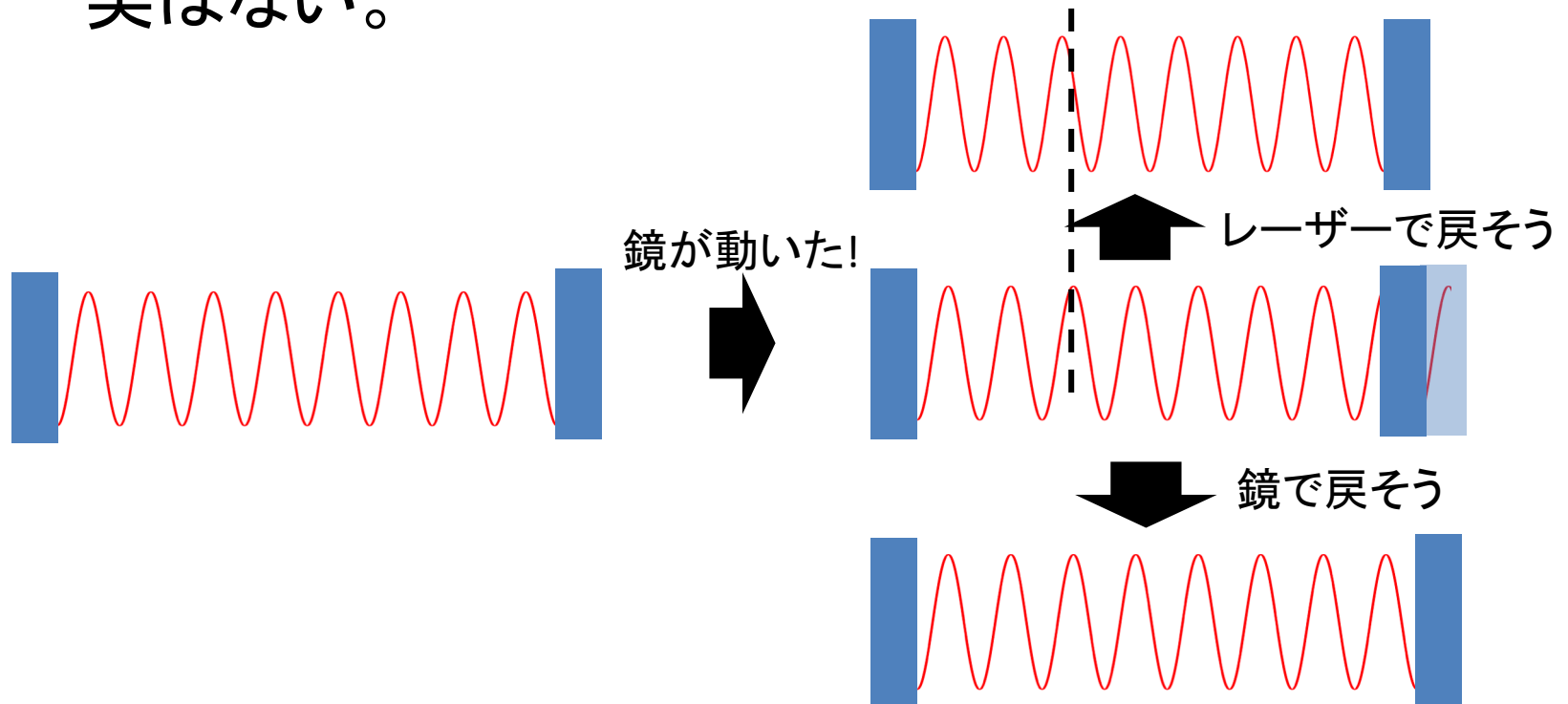
干渉計の制御

- しかし、何もしないと鏡が動いてしまう。



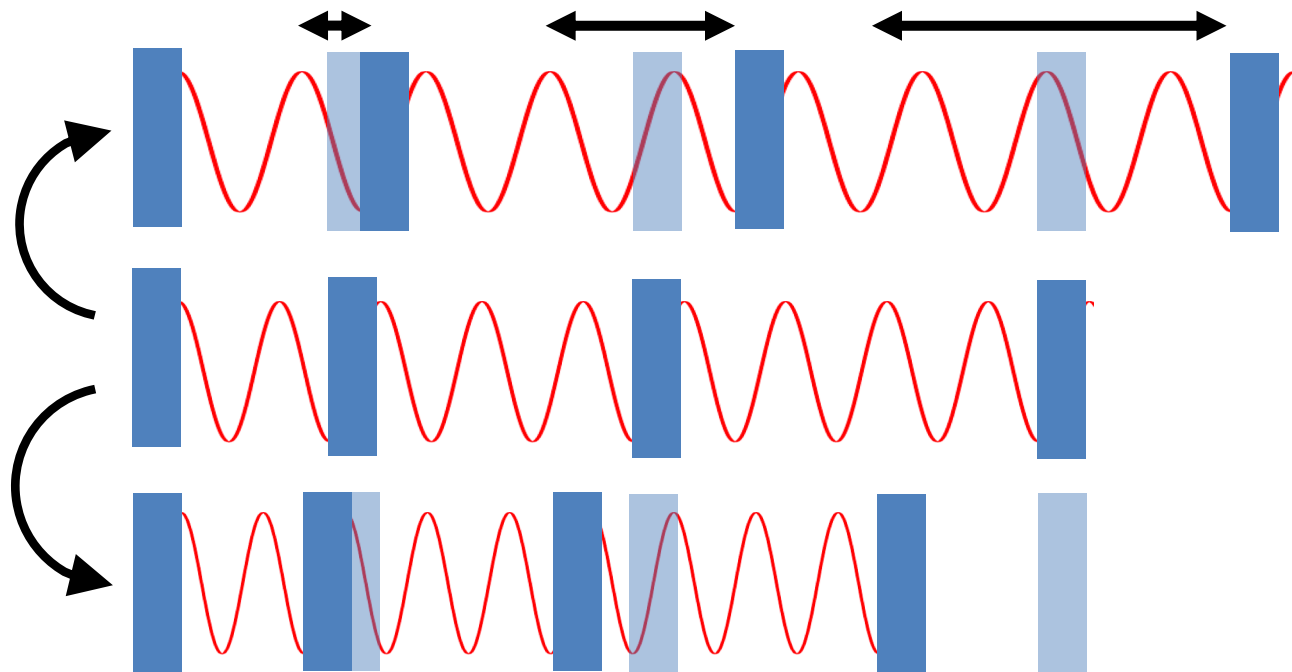
干渉計の制御

- それを防ぐために、鏡の動きか、レーザーの周波数(=波長)を制御する必要がある。
 - 鏡が動いているのに、それ自体を抑える必要は実はない。



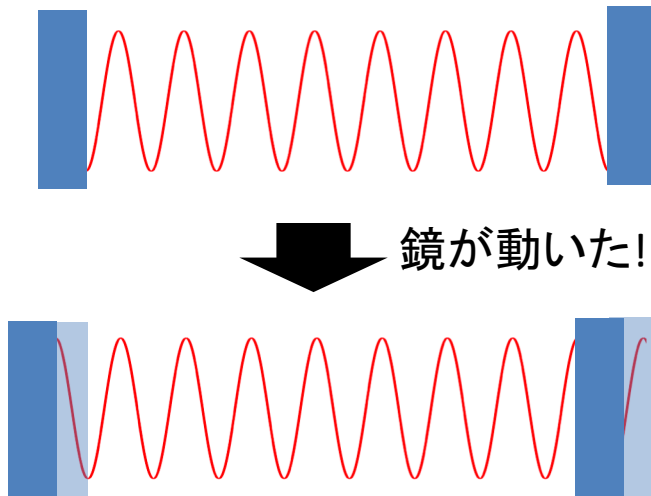
干渉計の制御

- レーザーで戻す場合、補償できる量は相対量で決まる。
 - つまり、干渉計が長い方が補償できる絶対変位量は大きくなる。



干渉計の制御

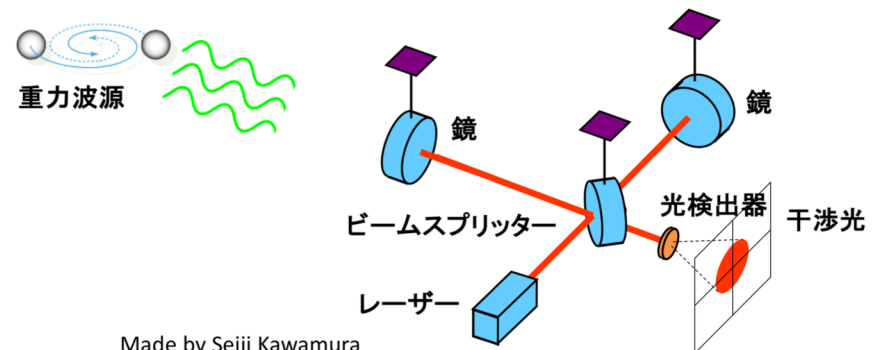
- また、鏡が動いたとしても両方同時に動く場合は問題ない。
 - 位相差が変化しないから。



けど干渉計の動作は問題ない。

レーザー干渉計型重力波検出器

- 干渉計の本質: 両腕の位相差の変化を強度変化として読み出す装置
 - 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる。
 - 強度変化を読み出す際の雑音(検出雑音)も問題になる。



Made by Seiji Kawamura

中須賀研安東研交流会 (東京大学 本郷キャンパス、2019年3月7日)

35

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. 重力波検出器
4. レーザー干渉計とは
5. 重力波研究の今後

重力波研究の今後

- 重力波検出器の発展
 - まだまだ検出器開発でやることは多い。
 - 重力波観測ネットワークの構築
 - 地上検出器の高感度化 (10 Hz – 1 kHz)
 - 観測帯域の拡幅 (0.1 mHz – 0.1 Hz):
宇宙望遠鏡 (DECIGO, LISA)
-> 全く新しい検出装置の獲得。
初期宇宙からの原始重力波観測!!!
- DECIGOの実現にむけて
 - まず、必要最低限の宇宙検出器をつくる?

重力波研究の今後

- 今後重力波検出器によって明らかになる物理
 - 中性子星の状態方程式
 - 宇宙膨張の加速度の独立測定
 - 余剰次元探査
 - 修正重力理論の検証
 - ダークマター探査
 - インフレーション後の宇宙の熱史
 - 巨大ブラックホールの生成過程の解明
 - 宇宙初期のパリティ対称性の検証
 - ヒッグスセクターの検証
 - 巨視的量子力学の検証
 - ...余白が足りない

まとめ

いま重力波研究が熱い!!

