

ナビゲータートーク: 重力波 ~重力波の検出器と物理~

東京大学 大学院理学系研究科
宇宙線研究所 重力波観測研究施設
長野晃士 (D1)



目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. レーザー干渉計型重力波検出器
4. 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
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. レーザー干渉計型重力波検出器
4. 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
5. 重力波研究の今後

重力波とは

重力波とは何か？



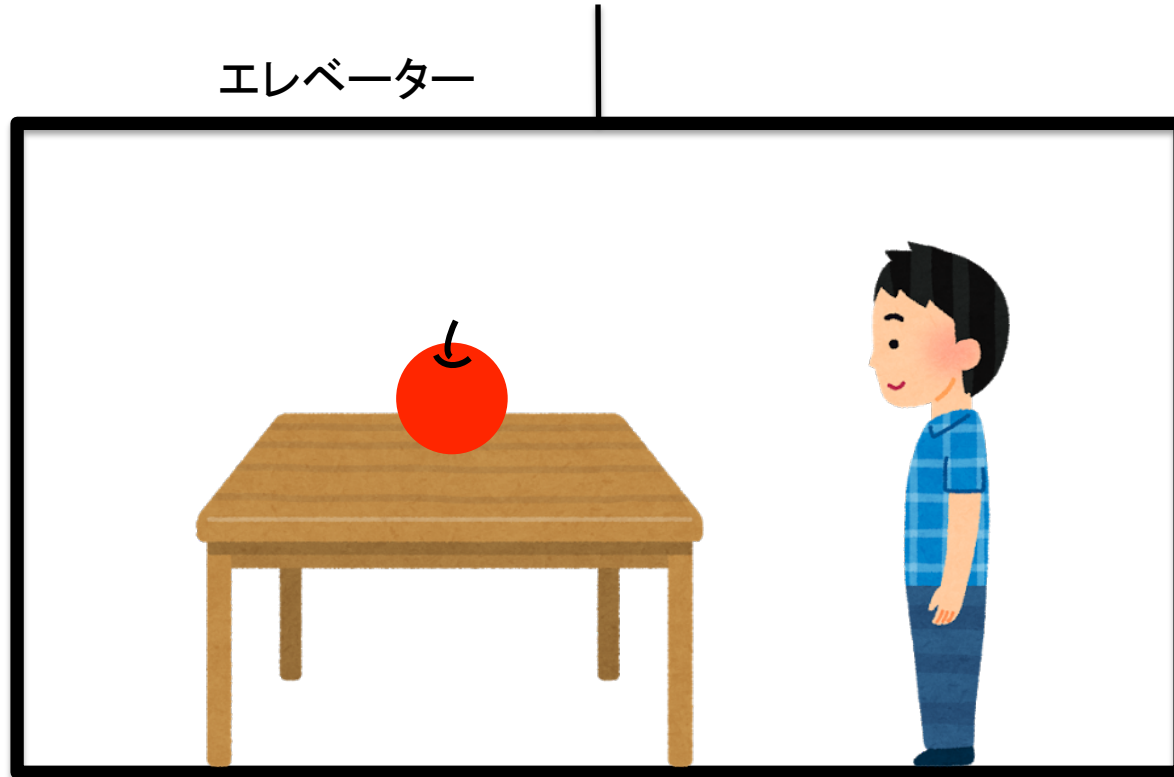
重力とは何か？



一般相対論

重力とは

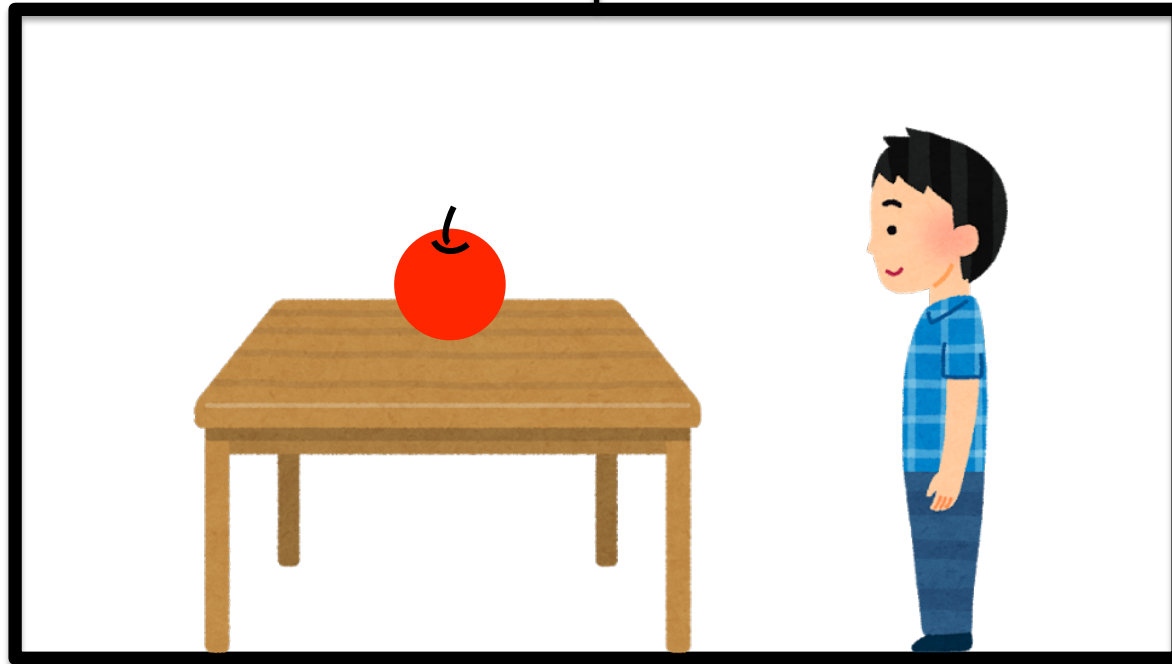
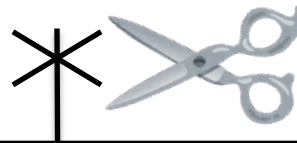
- 重力は消せる？



重力とは

- 重力は消せる？

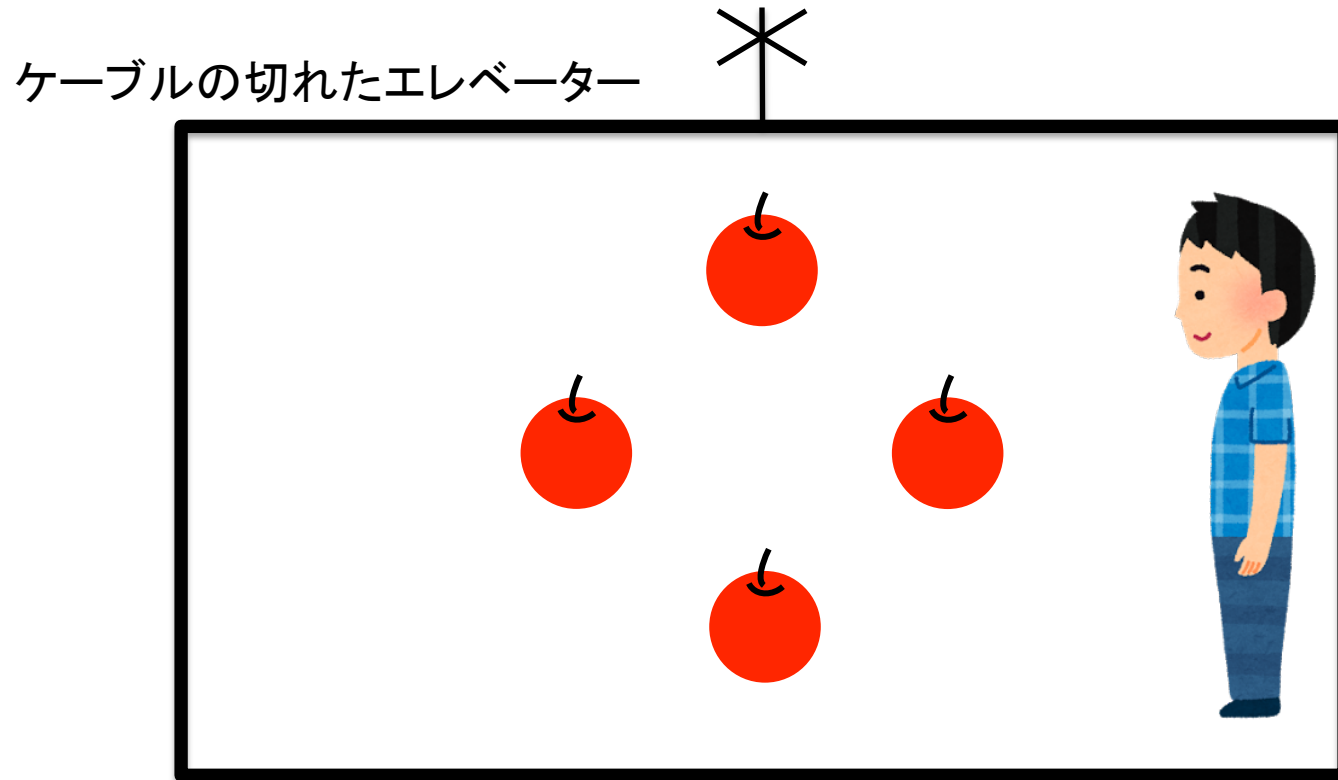
ケーブルの切れたエレベーター



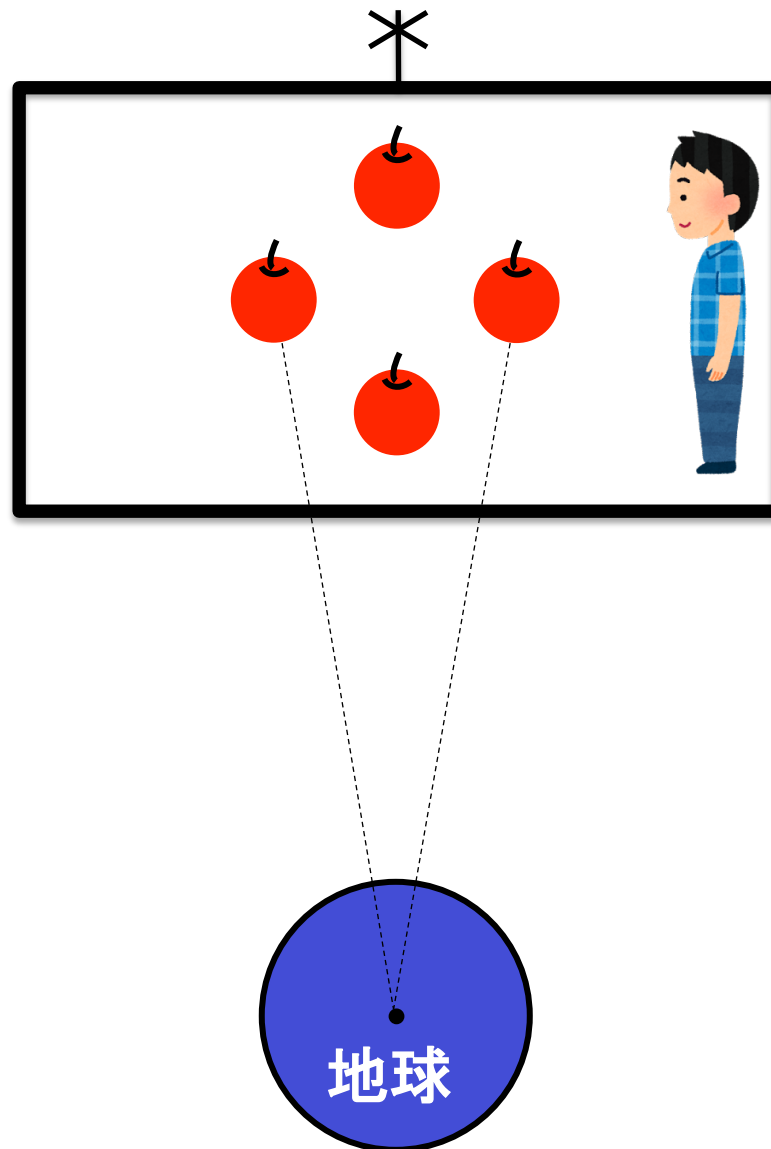
→ では重力の本質とは？

重力とは

- リンゴが上下左右に4個あると?



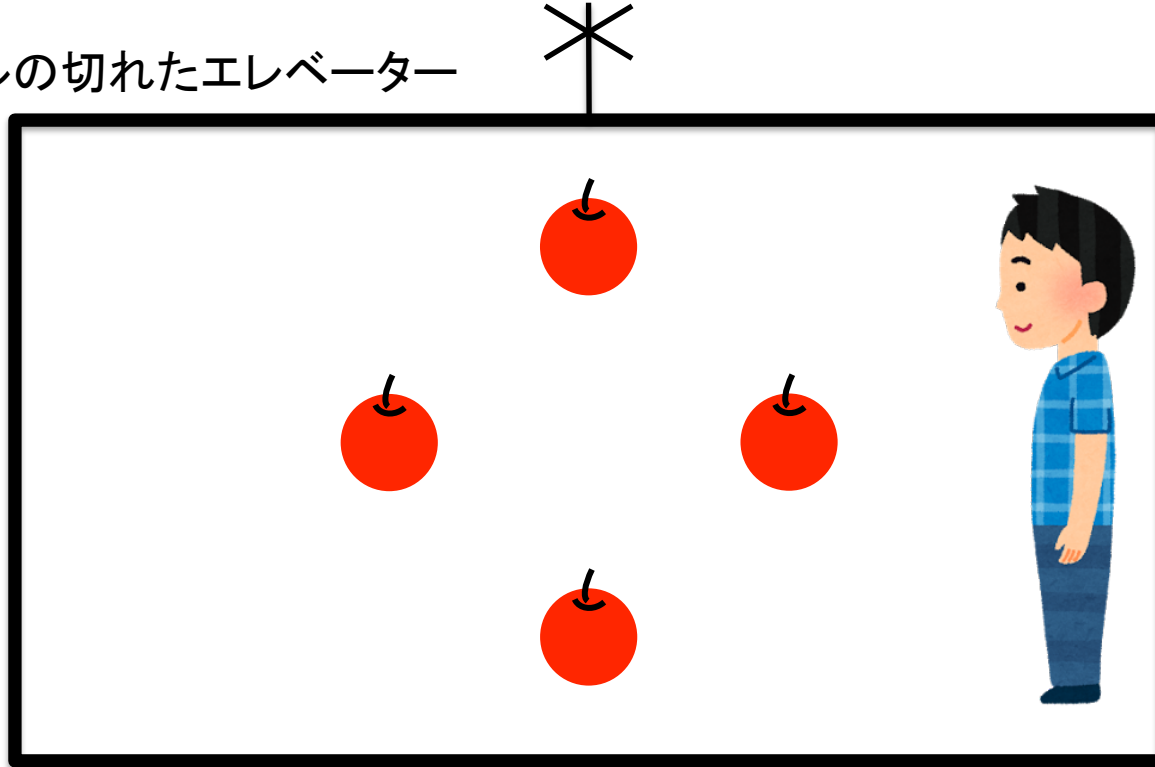
重力とは



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。

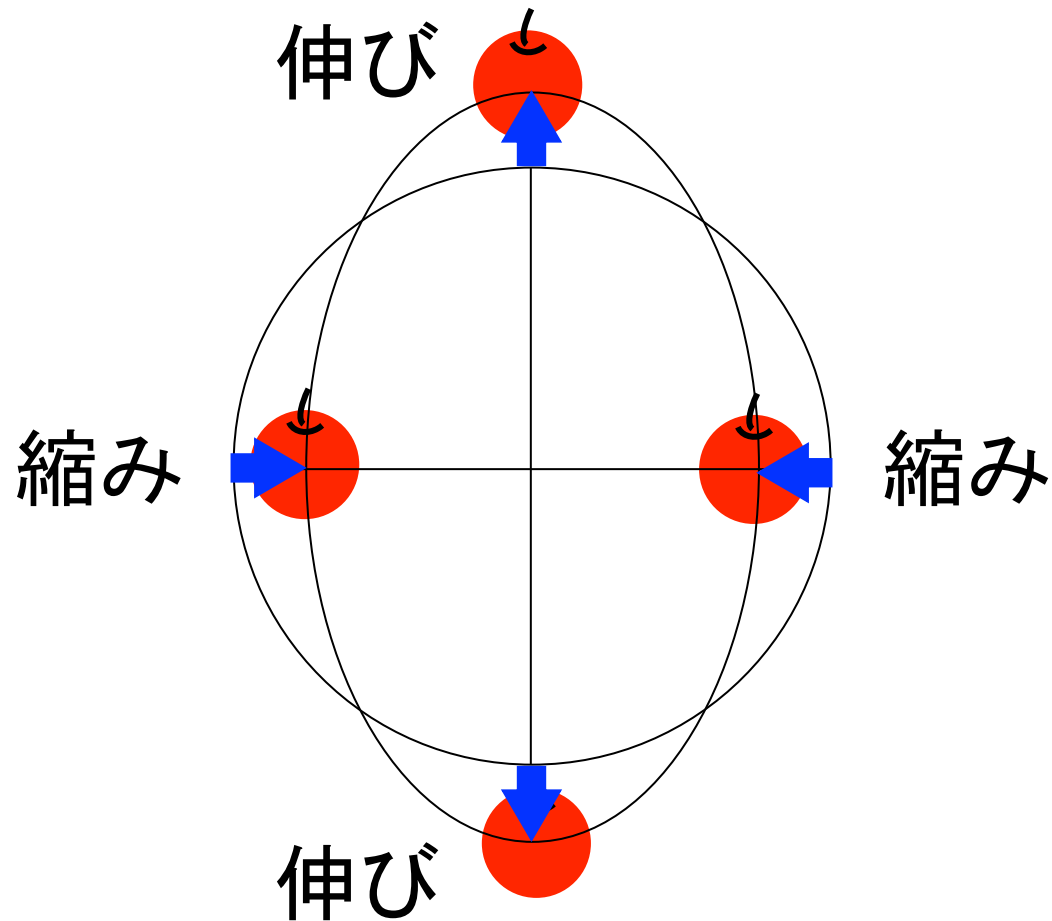
ケーブルの切れたエレベーター



→ 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

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一般相対性理論の中で存在が予言された。
 - 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。



目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. レーザー干渉計型重力波検出器
4. 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
5. 重力波研究の今後

重力波による物理

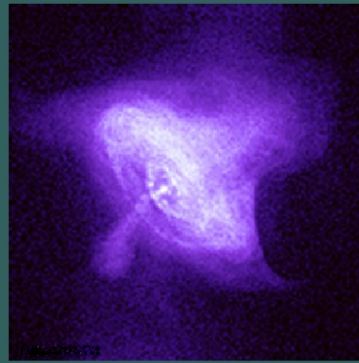
- 現在検出可能なレベル($\sim 10^{-22}$)の重力波を放出する可能性があるのは主に天体現象。
 - コンパクト天体の連星合体
 - ブラックホール連星
 - 中性子星連星
 - 超新星爆発
 - パルサー
 - 初期宇宙

※ 人工的に出せるのは 10^{-40} くらいまで

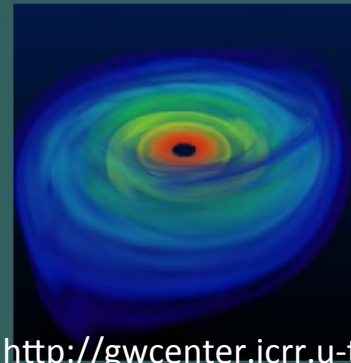
超新星爆発 (写真出典: NASA)



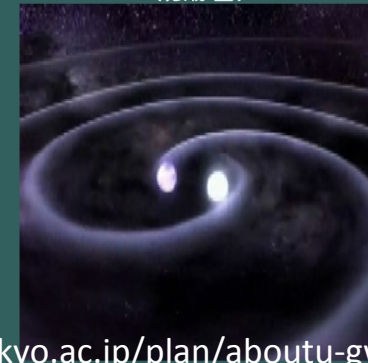
パルサー (写真出典: NASA)



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

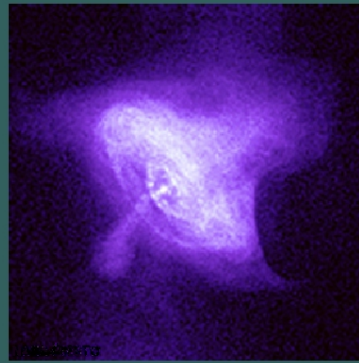
- 現在検出可能なレベル($\sim 10^{-22}$)の重力波を放出する可能性があるのは主に天体現象。
 - コンパクト天体の連星合体
 - **ブラックホール連星** ← 米国のLIGO(2台の検出器)により
 - 中性子星連星
 - 超新星爆発
 - パルサー
 - 初期宇宙

※ 人工的に出せるのは 10^{-40} くらいまで

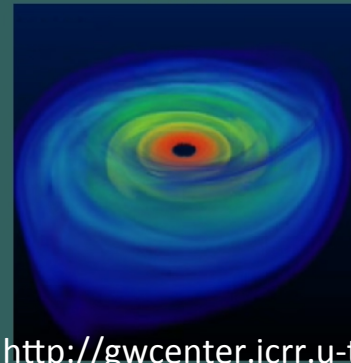
超新星爆発 (写真出典: NASA)



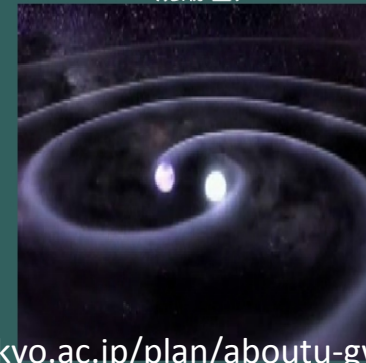
パルサー (写真出典: NASA)



ブラックホール
(想像図)

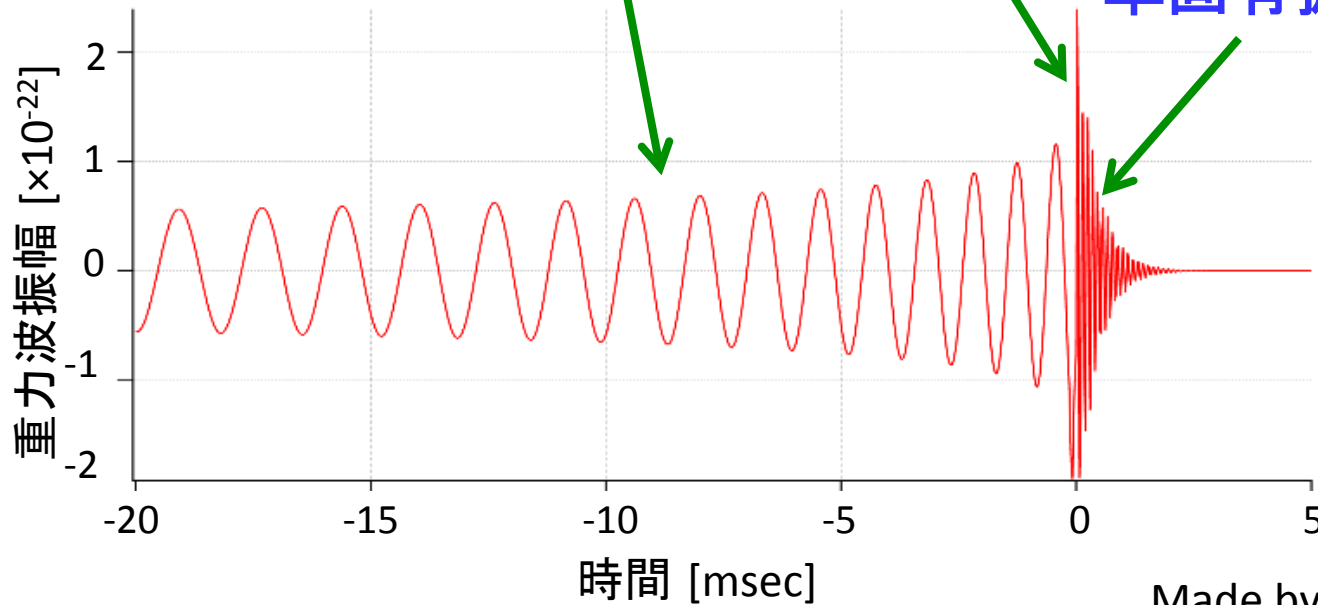
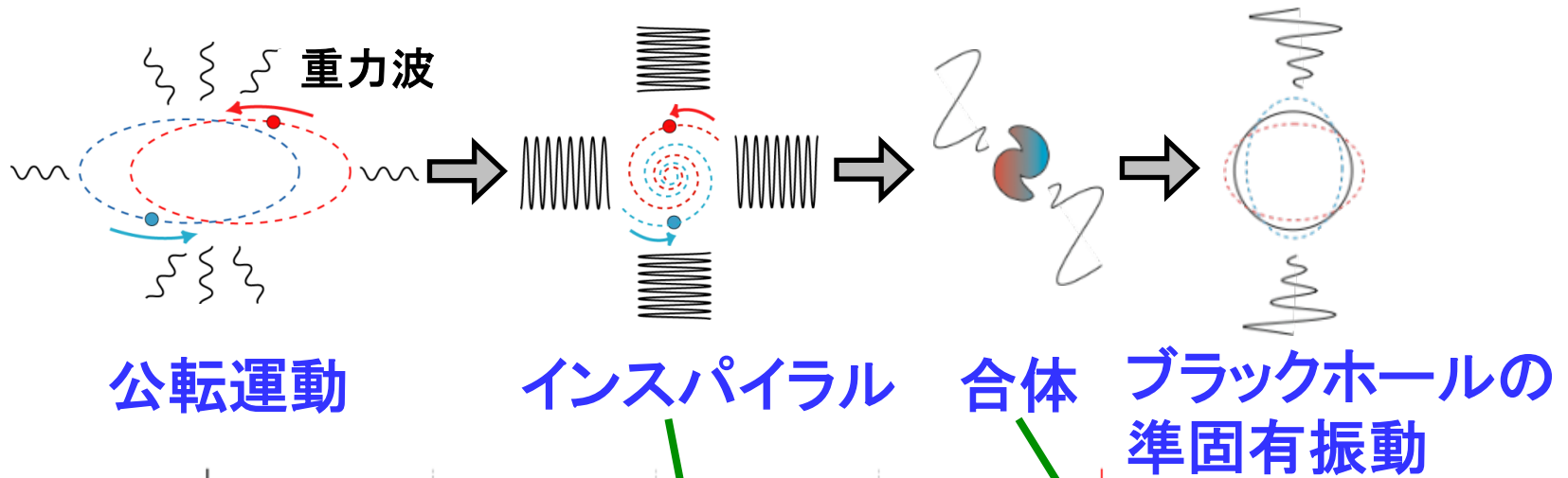


連星中性子星合体
(想像図)



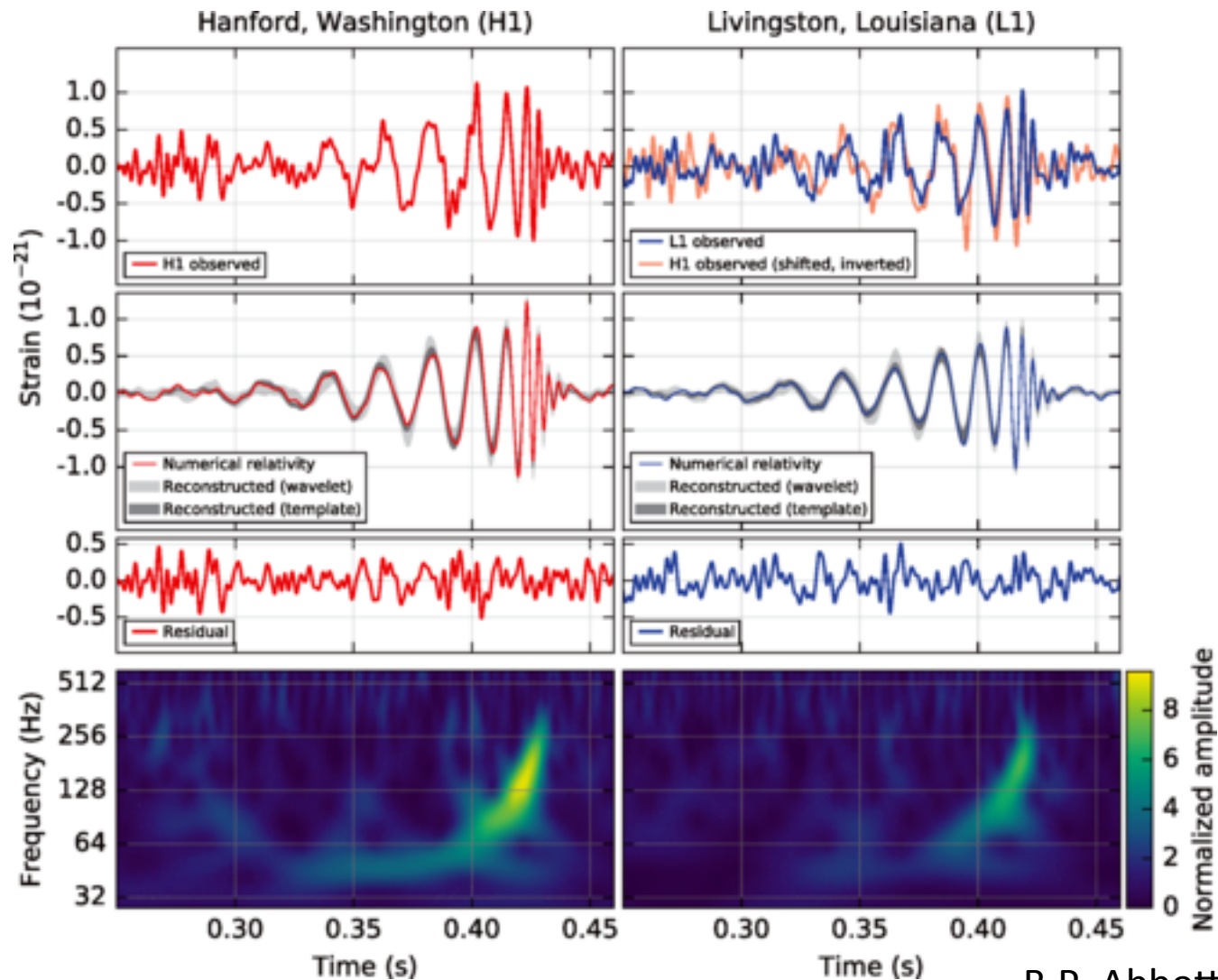
<http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/plan/aboutu-gw>

重力波による物理



Made by Kanda Nobuyuki

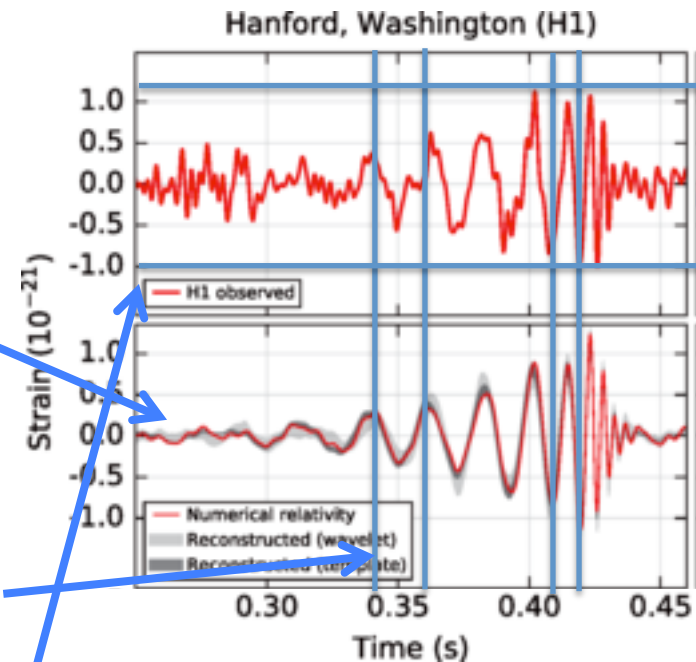
重力波による物理



B.P. Abbott+, PRL (2016)

重力波による物理

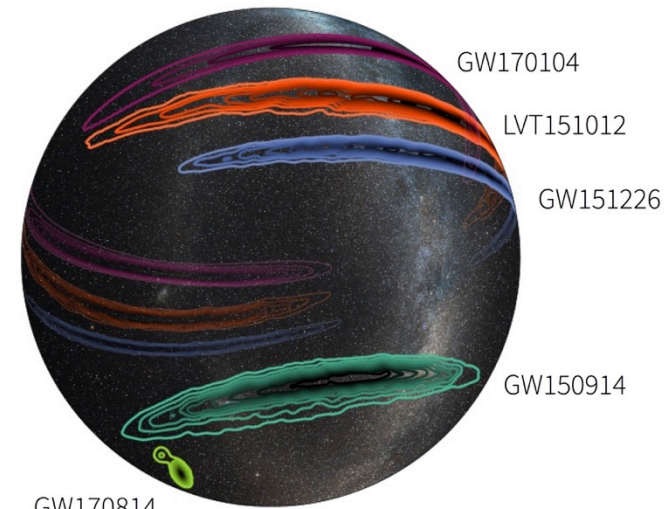
- この波形から何が分かったか。
 - 重力波は真空中を光速で伝播する。
 - 波形が一般相対論と無矛盾。
 - ブラックホールが存在する。
 - 連星ブラックホールも存在する。
 - $36 M_{\odot}$ と $29 M_{\odot}$ のブラックホールが合体して、 $62 M_{\odot}$ のブラックホールになった。
 - 合体は約410 Mpc遠方で起こった。
 - 空間のローレンツ不変性の上限値。
 - など



B.P. Abbott+, PRL (2016)

重力波による物理

- この波形から何が分からなかったか。
 - 方向はあまり分からなかった。(600平方度)
 - 一般相対論が本当に正しいか。
 - ブラックホールのスピン。
 - どのように約 $30 M_{\odot}$ のブラックホールが出来たか
 - 種族IIIの初代星の進化?
 - 原始ブラックホール?
 - 多体散乱による連星形成?
- これらの情報は、検出器ネットワークを構築し、統計をためていけば解明できると期待される。



これまでの重力波イベントの位置精度。
(credit: LIGO/Virgo/Caltech/MIT/Leo Singer (Milky Way image: Axel Mellinger))

重力波による物理

他の重力波源によって分かると考えられること

- 中性子星連星合体
 - 中性子星の状態方程式
 - 物質中での一般相対論の検証
 - ショートガンマ線バーストの起源
 - 宇宙膨張の加速度の独立測定
- 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

目次

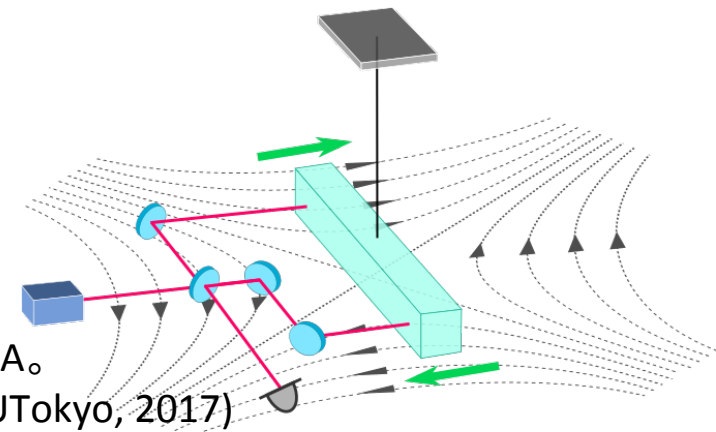
1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. **レーザー干渉計型重力波検出器**
4. 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
5. 重力波研究の今後

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: KAGRA, LIGO, Virgo, ...
 - 宇宙: DECIGO
 - ねじれ型 (TOBA)
 - 光トランスポンダ型 (LISA)
 - 原子干渉計型
 - etc...



共振型重力波検出器。

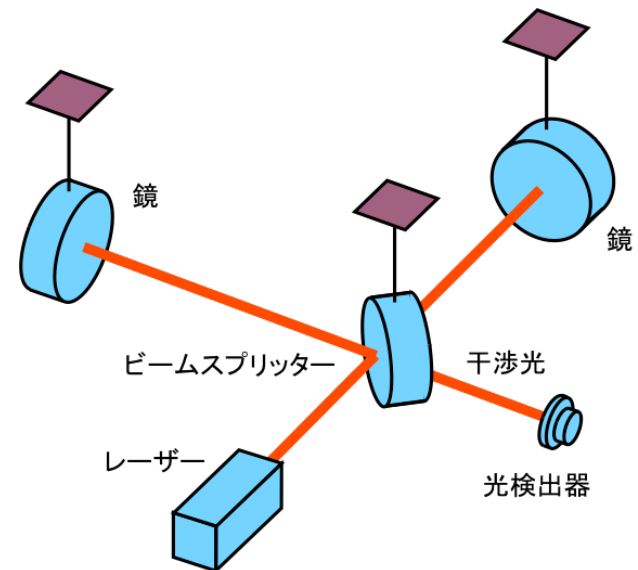


ねじれ型重力波望遠鏡 TOBA。
(T. Shimoda, Master thesis, UTokyo, 2017)

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)
 - レーザー干渉計型
 - 地上: KAGRA, LIGO, Virgo, ...
 - 宇宙: DECIGO
 - ねじれ型 (TOBA)
 - 光トランスポンダ型 (LISA)
 - 原子干渉計型
 - etc...

これが現在の主流



Michelson干渉計。
(Made by S. Kawamura)

レーザー干渉計型重力波検出器

次世代重力波観測ネットワーク

Advanced-LIGO
(アメリカ)

4km

ワシントン州

ルイジアナ州

4km

GEO600-HF
(ドイツ・イギリス)

ドイツ・ハノーバー

600m

Advanced-VIRGO
(フランス・イタリア)

イタリア・ピサ

大型低温重力波望遠鏡

KAGRA
(日本)

岐阜県・飛騨市

LIGO-India
(India)
計画中

3km

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

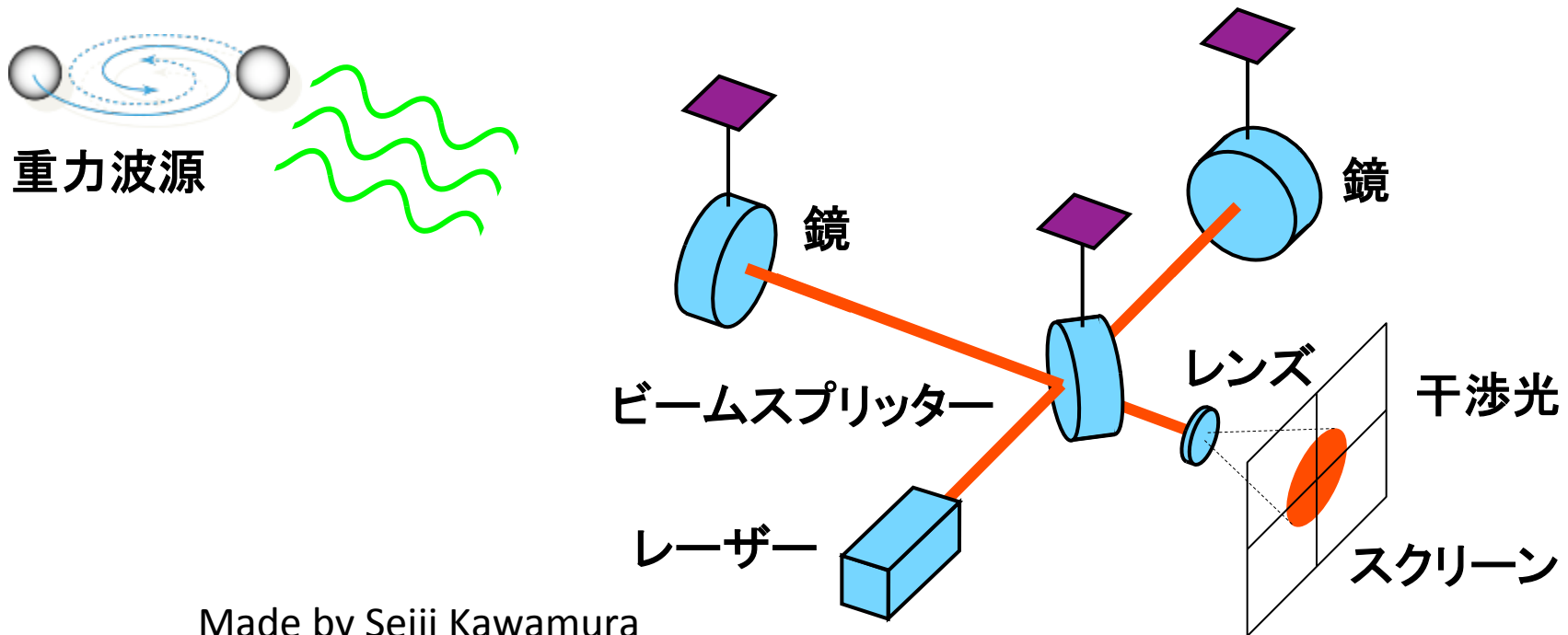
LIGO



(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)

レーザー干渉計型重力波検出器

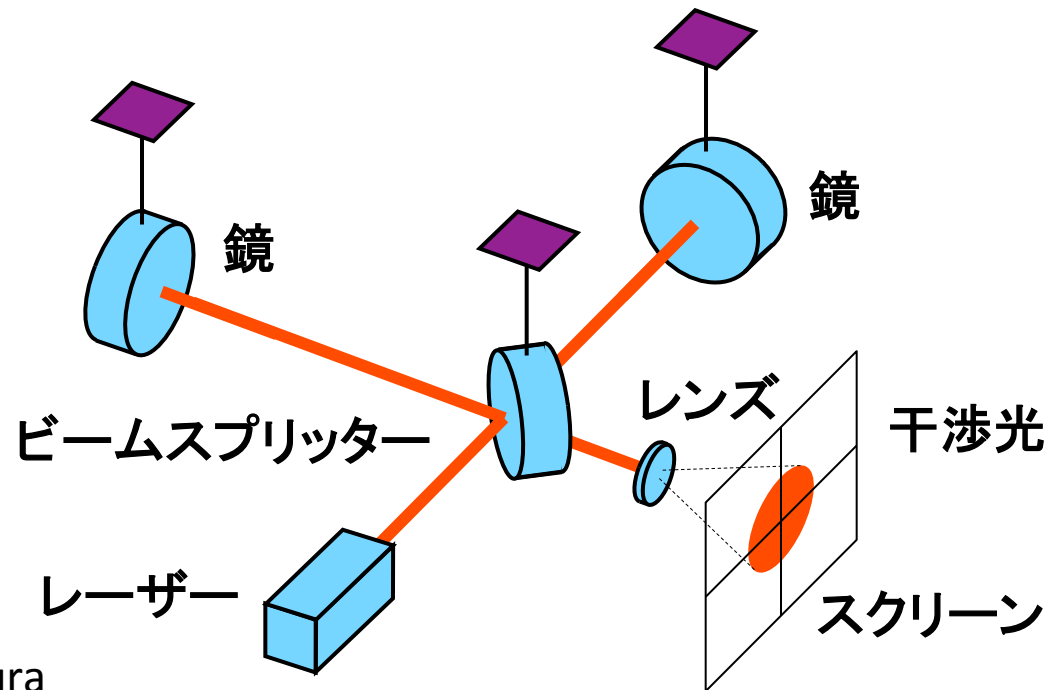
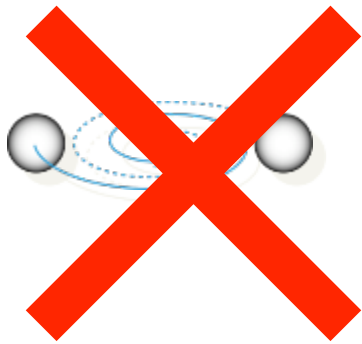
- Michelson干渉計の本質：両腕の位相変化を強度変化として読み出す装置
 - 腕内の位相揺らぎが干渉計信号(もしくは雑音)になる。



Made by Seiji Kawamura

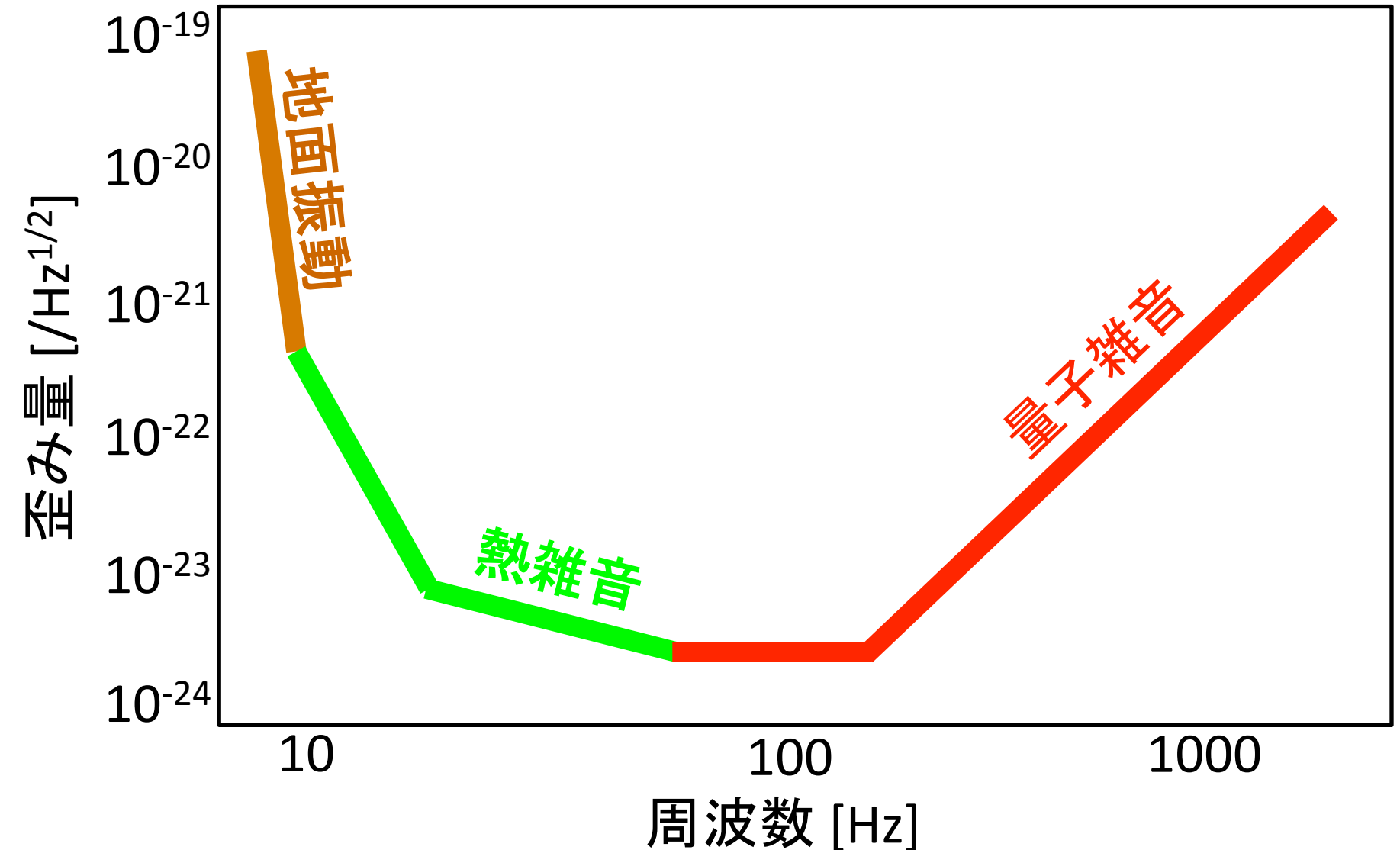
レーザー干渉計型重力波検出器

- Michelson干渉計の本質：両腕の位相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。

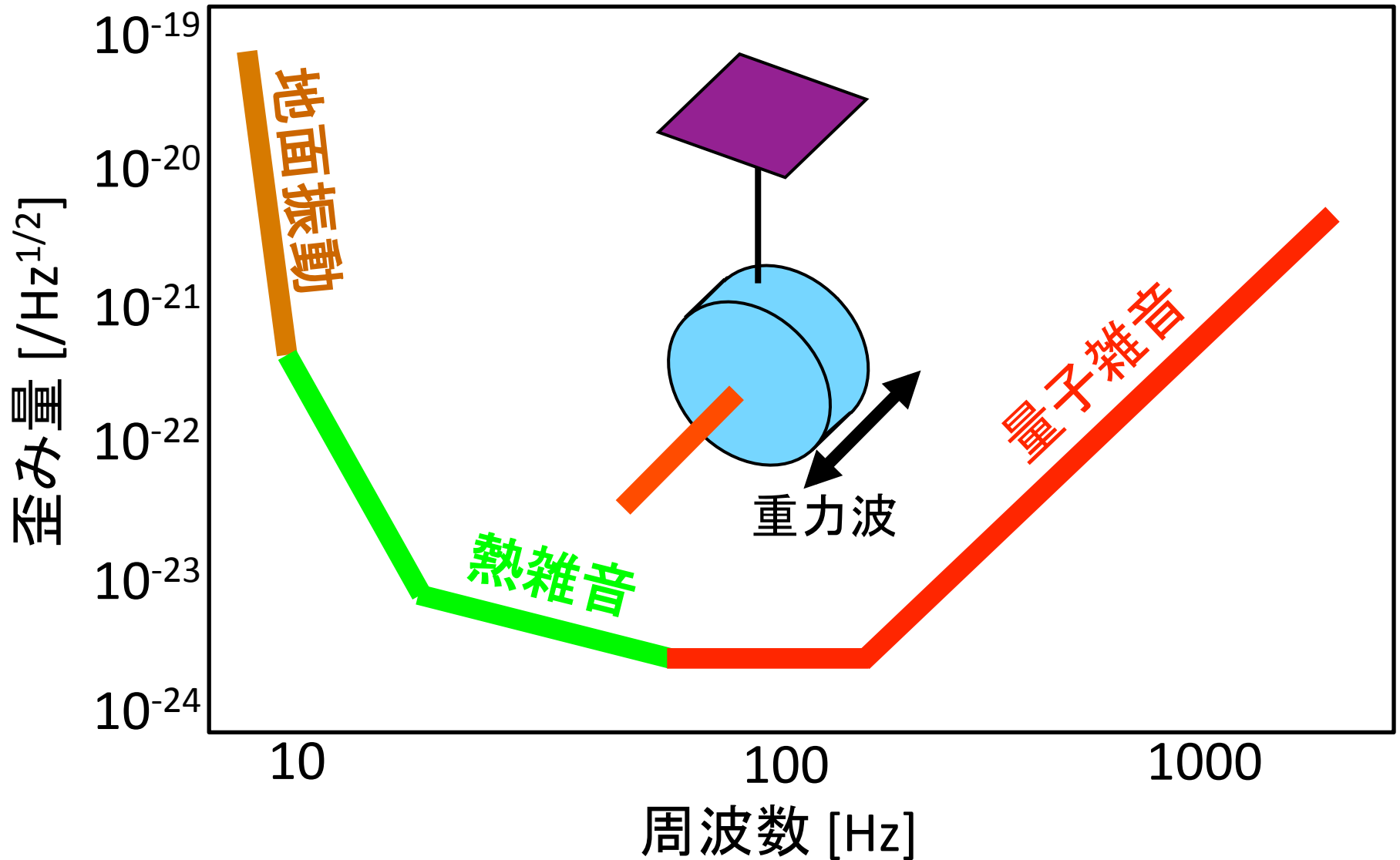


Made by Seiji Kawamura

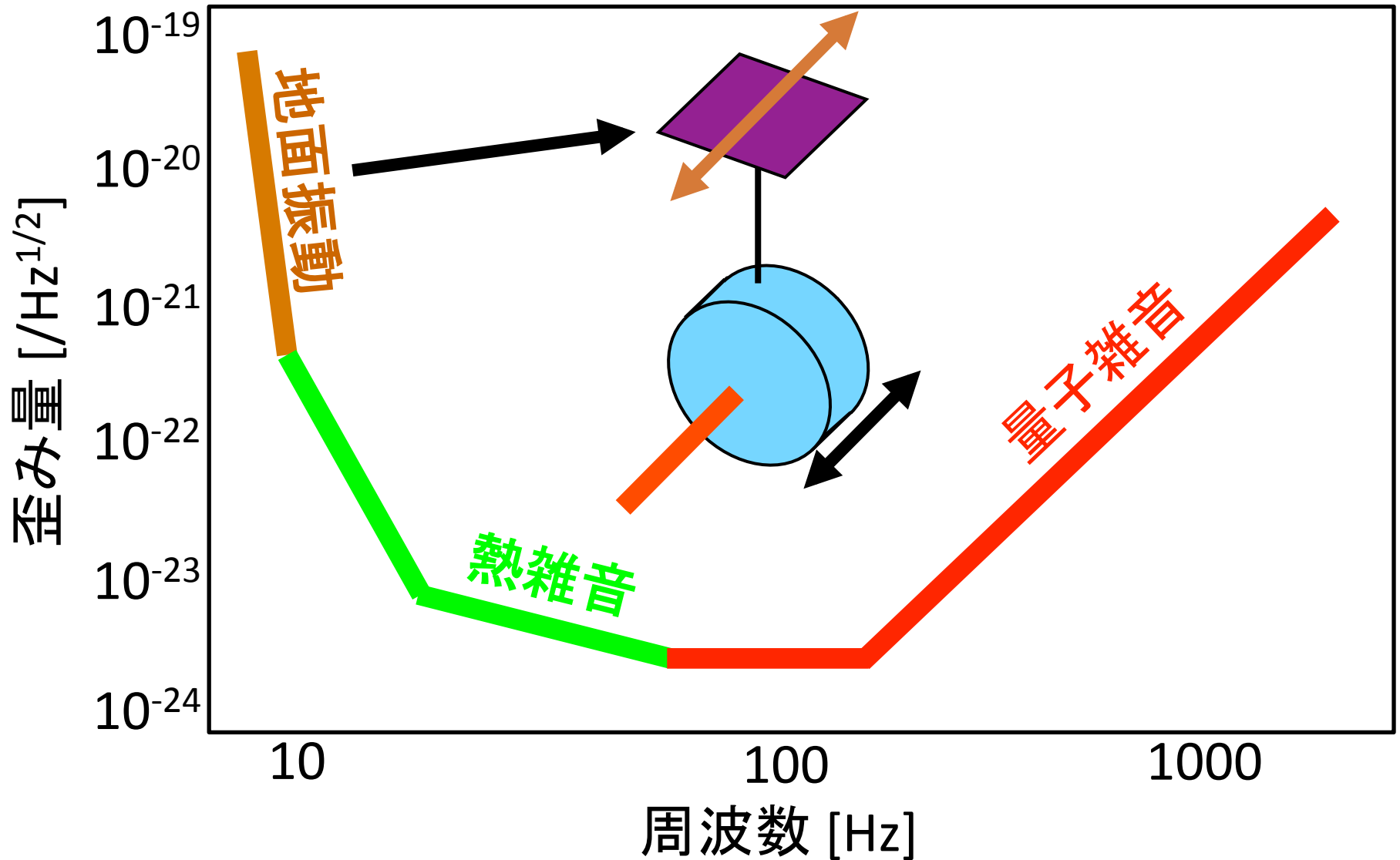
レーザー干渉計の感度



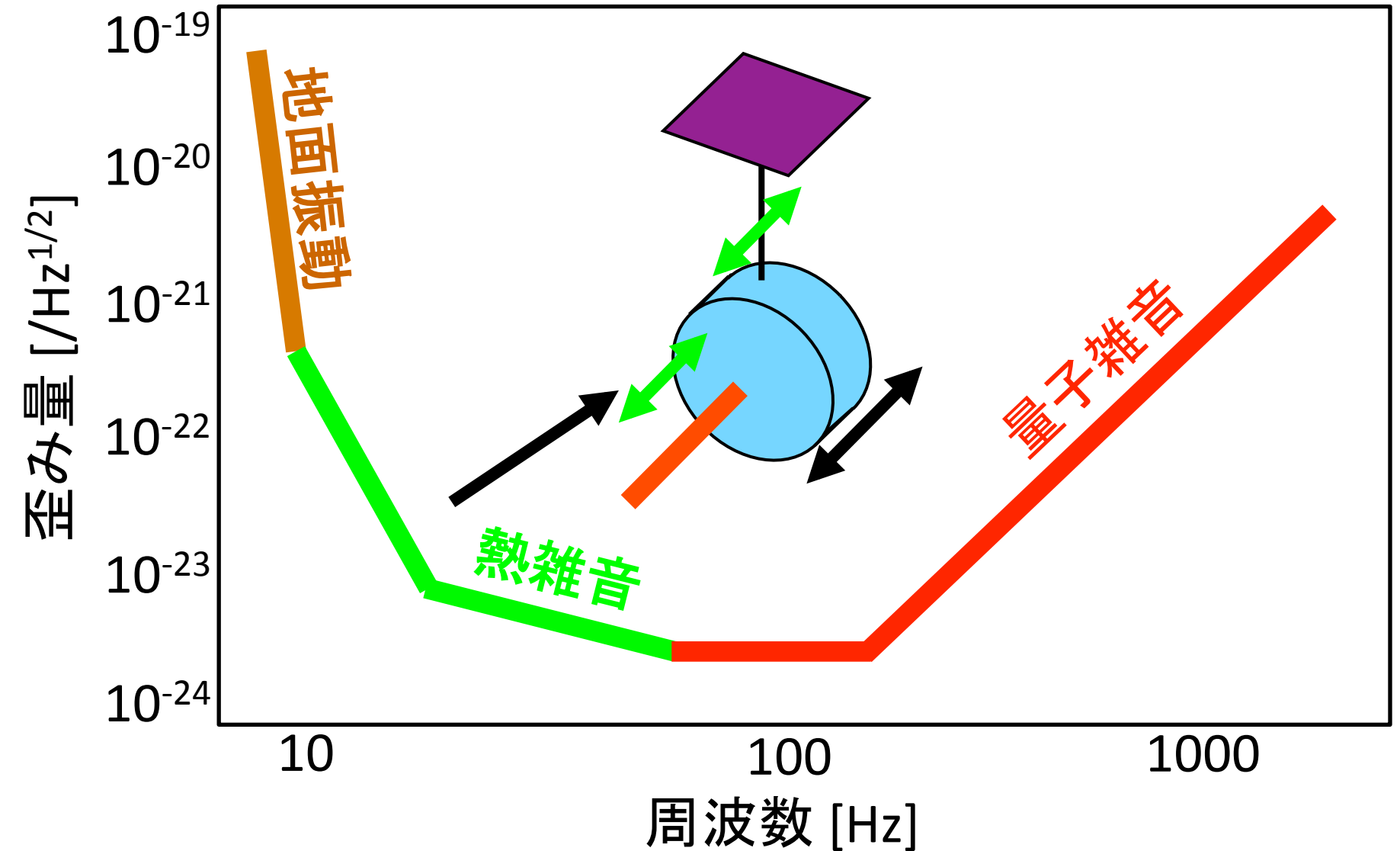
レーザー干渉計の感度



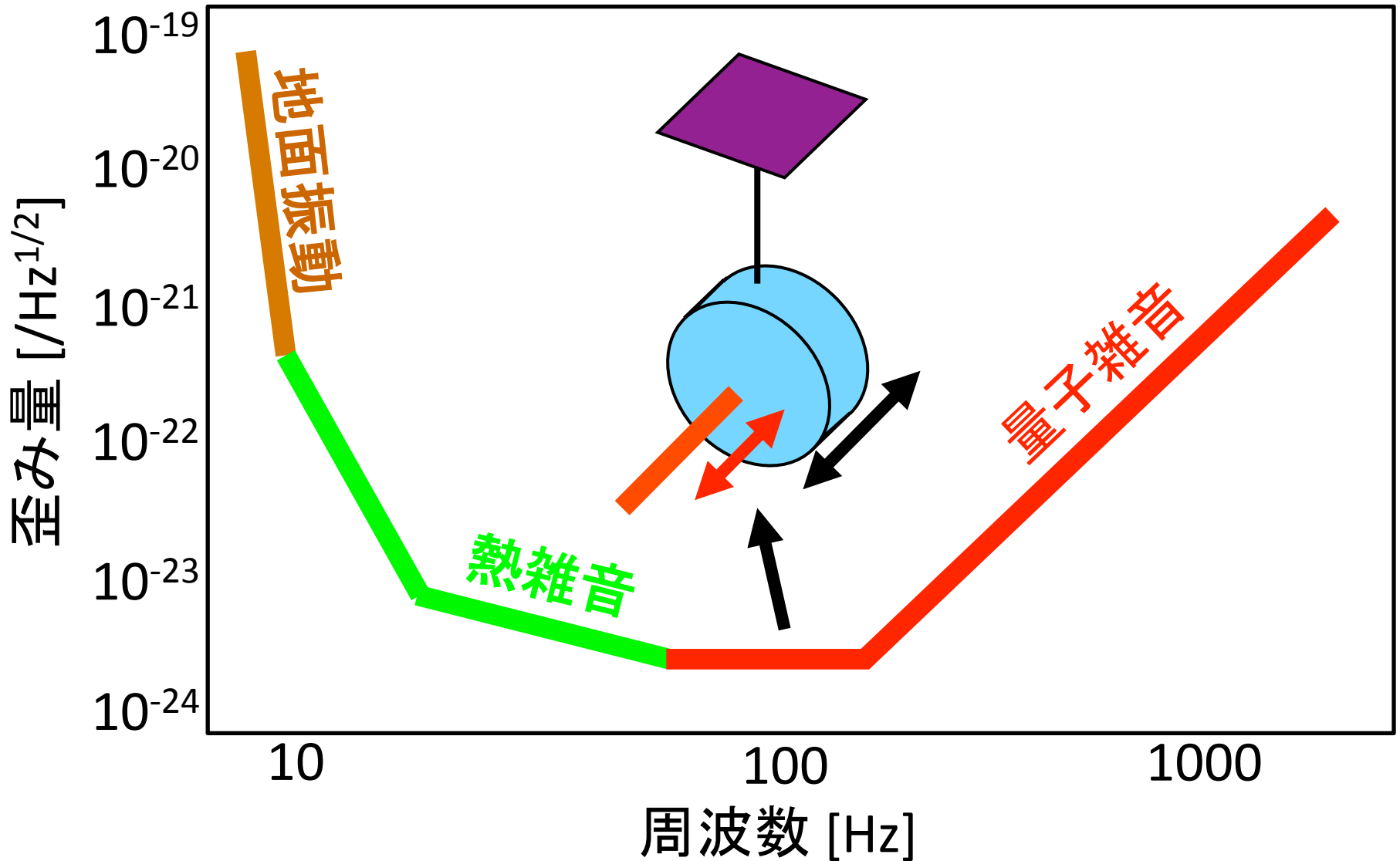
レーザー干渉計の感度



レーザー干渉計の感度



レーザー干渉計の感度



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
 - ニュートン的な重力の変化
 - 大気の密度揺らぎ
 - 地面の密度揺らぎ
 - 水流のゆらぎ
 - 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!!

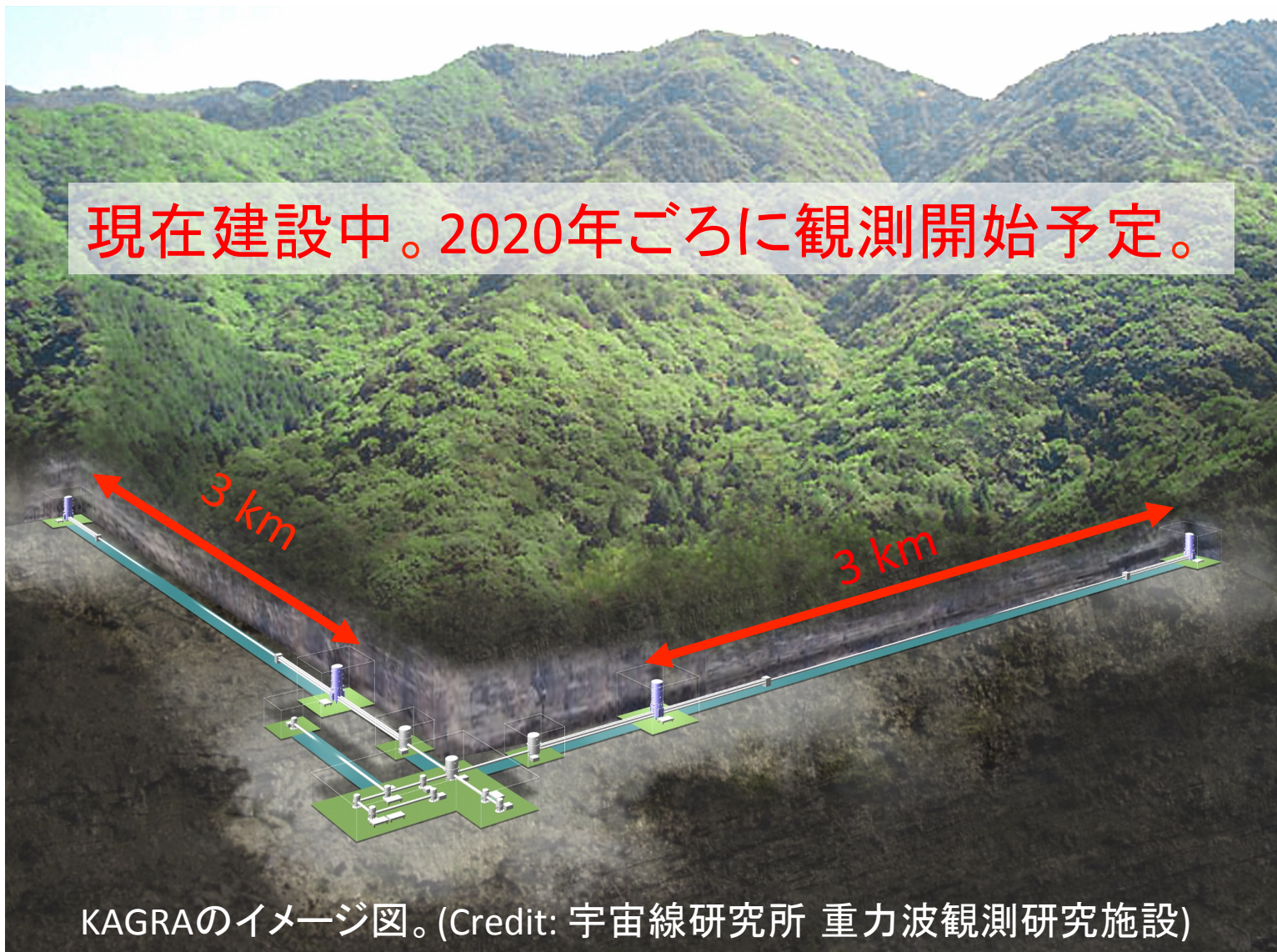
- バロバ電気抵抗の熱雑音
- ~~他なんでも~~

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. レーザー干渉計型重力波検出器
4. **大型低温重力波望遠鏡KAGRA**
5. 重力波研究の今後

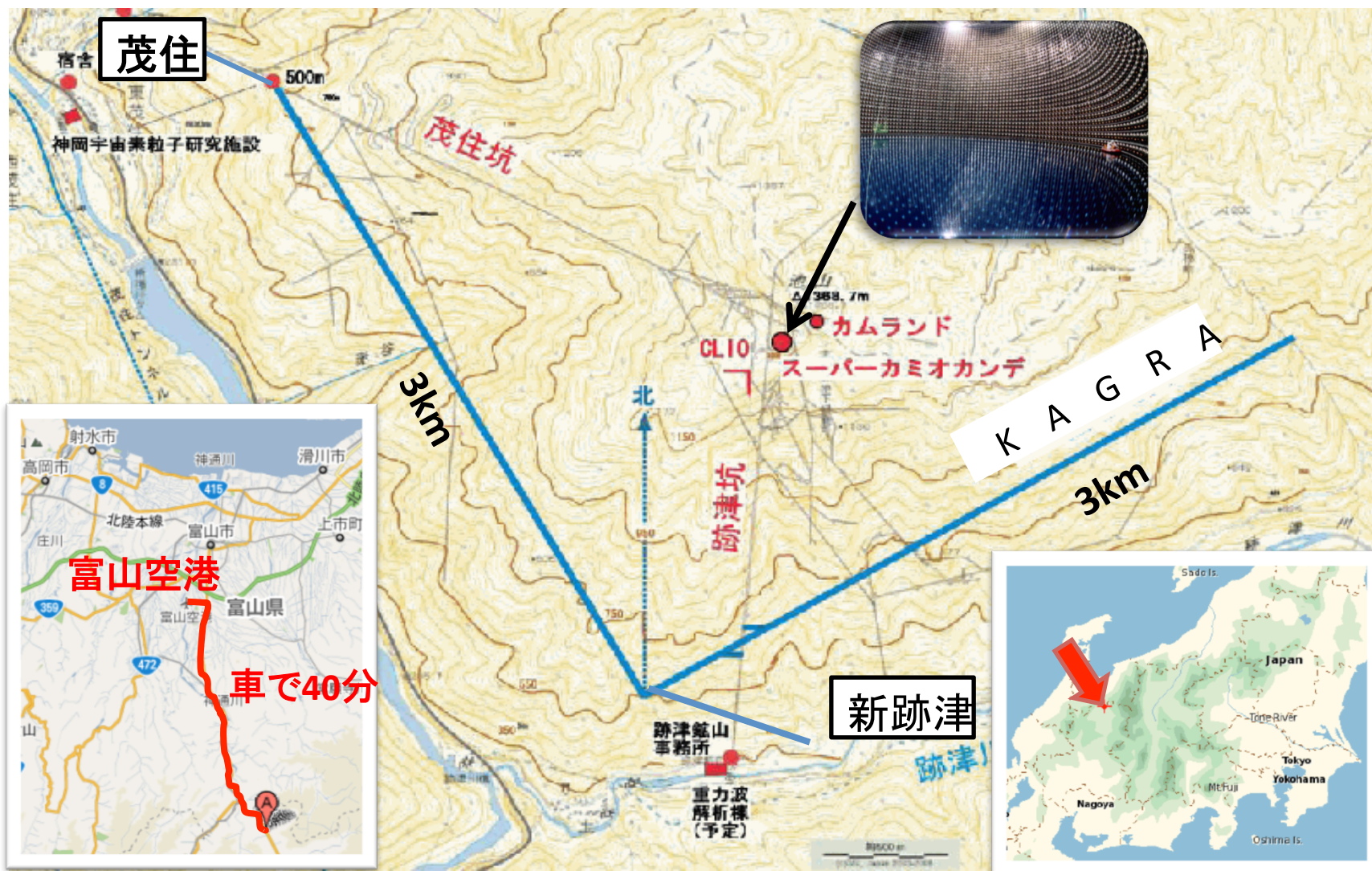
大型低温重力波望遠鏡KAGRA

現在建設中。2020年ごろに観測開始予定。



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

大型低温重力波望遠鏡KAGRA



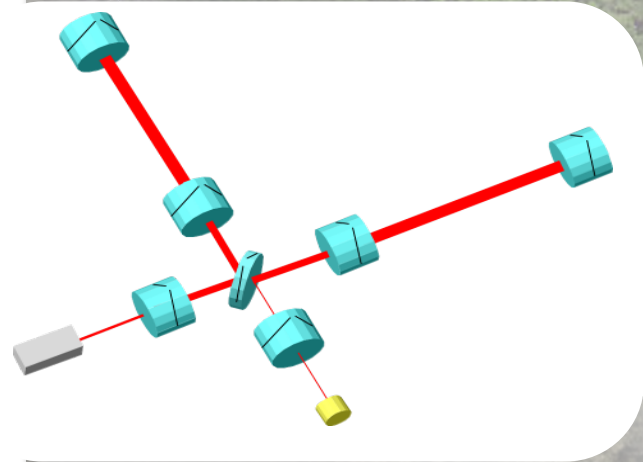
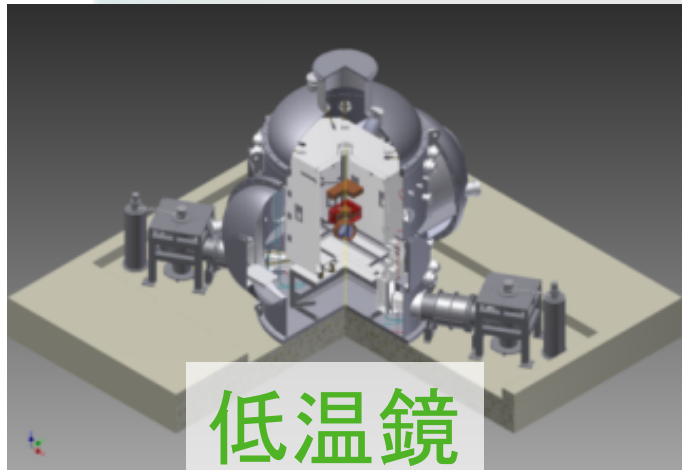
大型低温重力波望遠鏡KAGRA



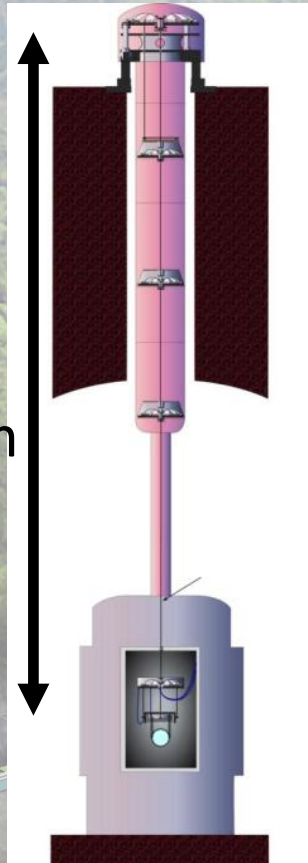
KAGRAの中央実験室。



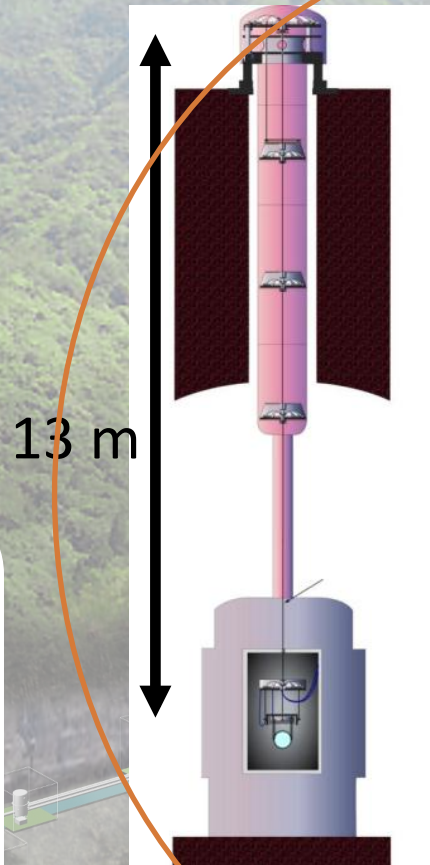
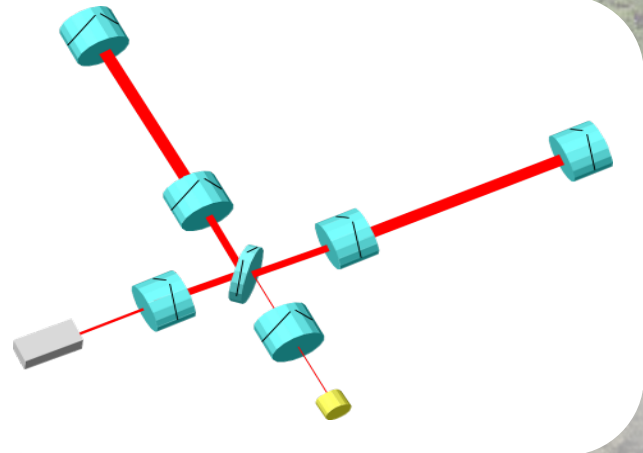
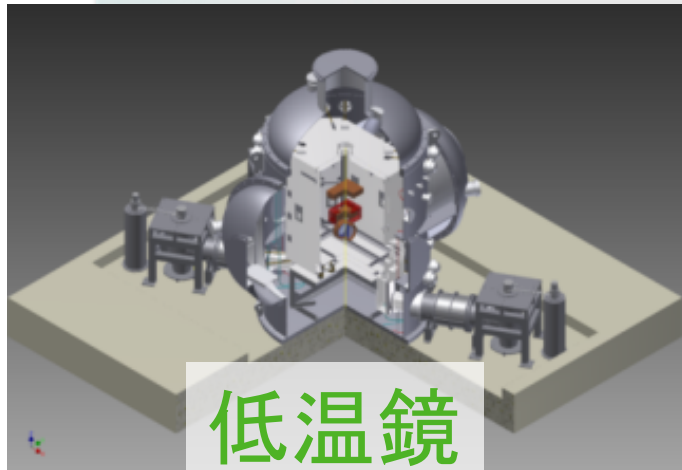
KAGRAの特長



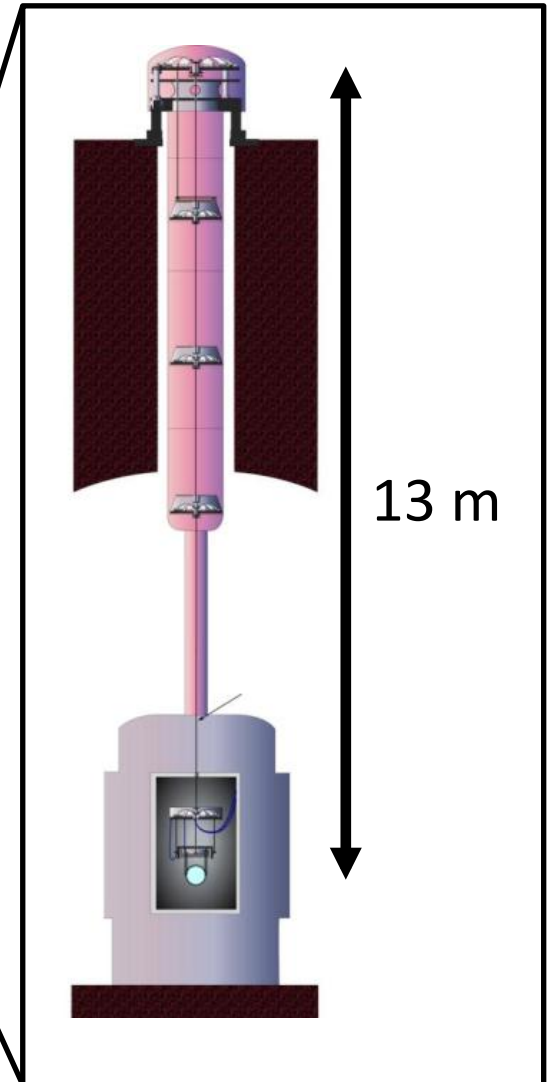
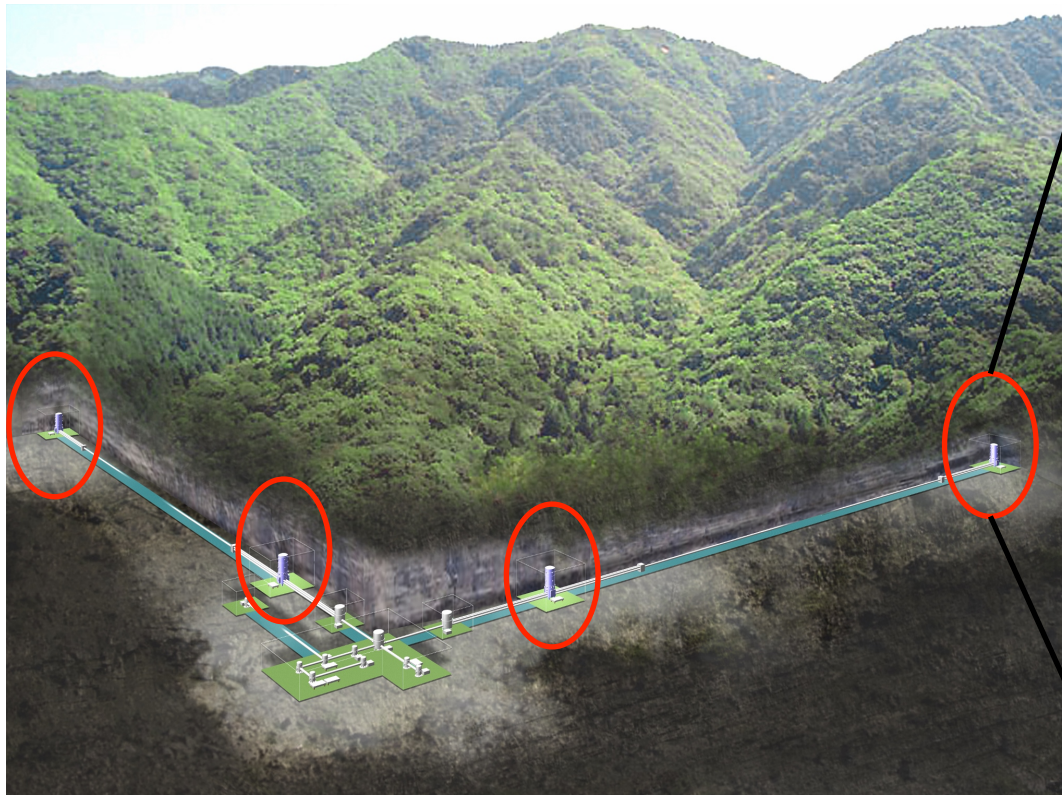
13 m



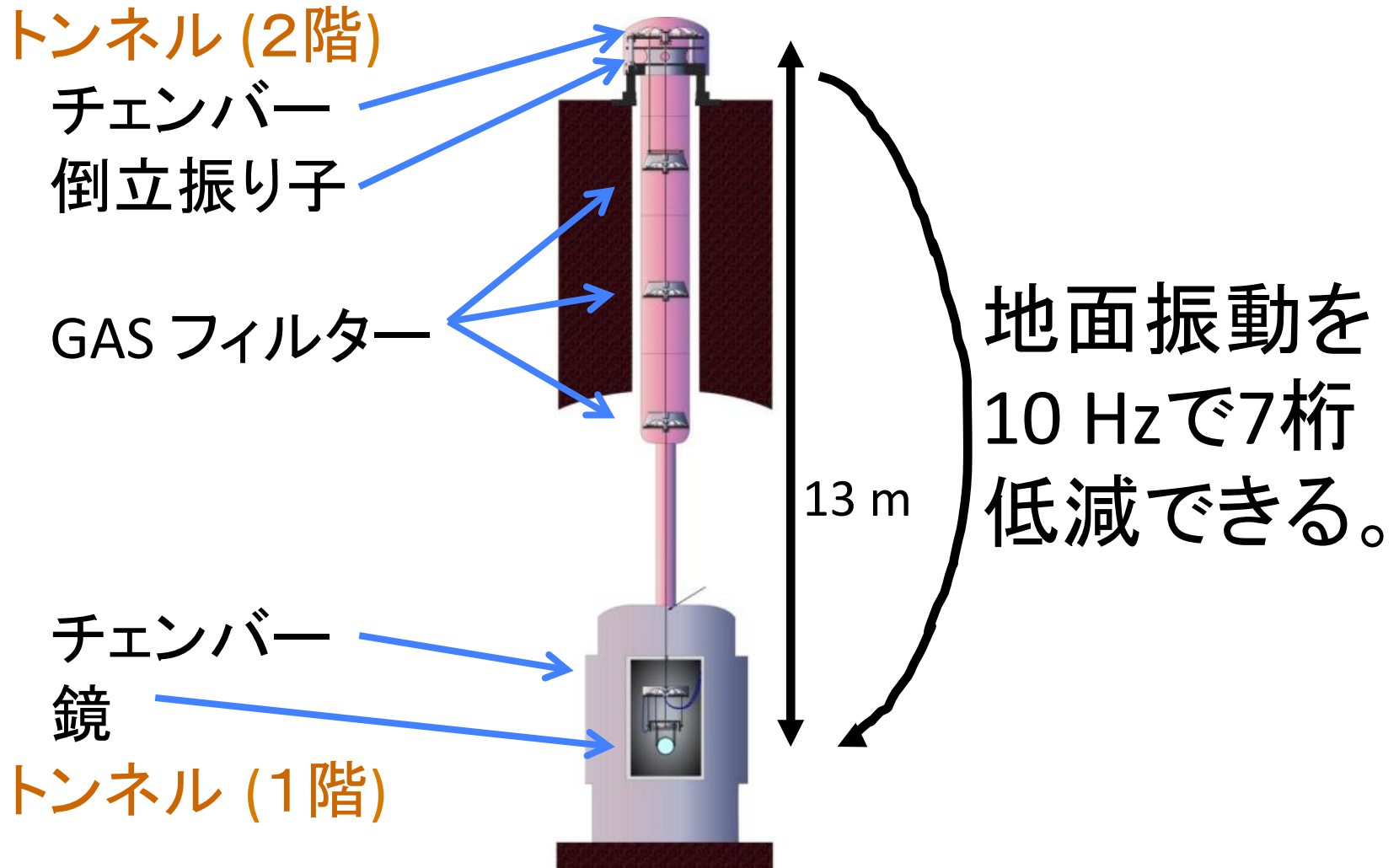
KAGRAの特長



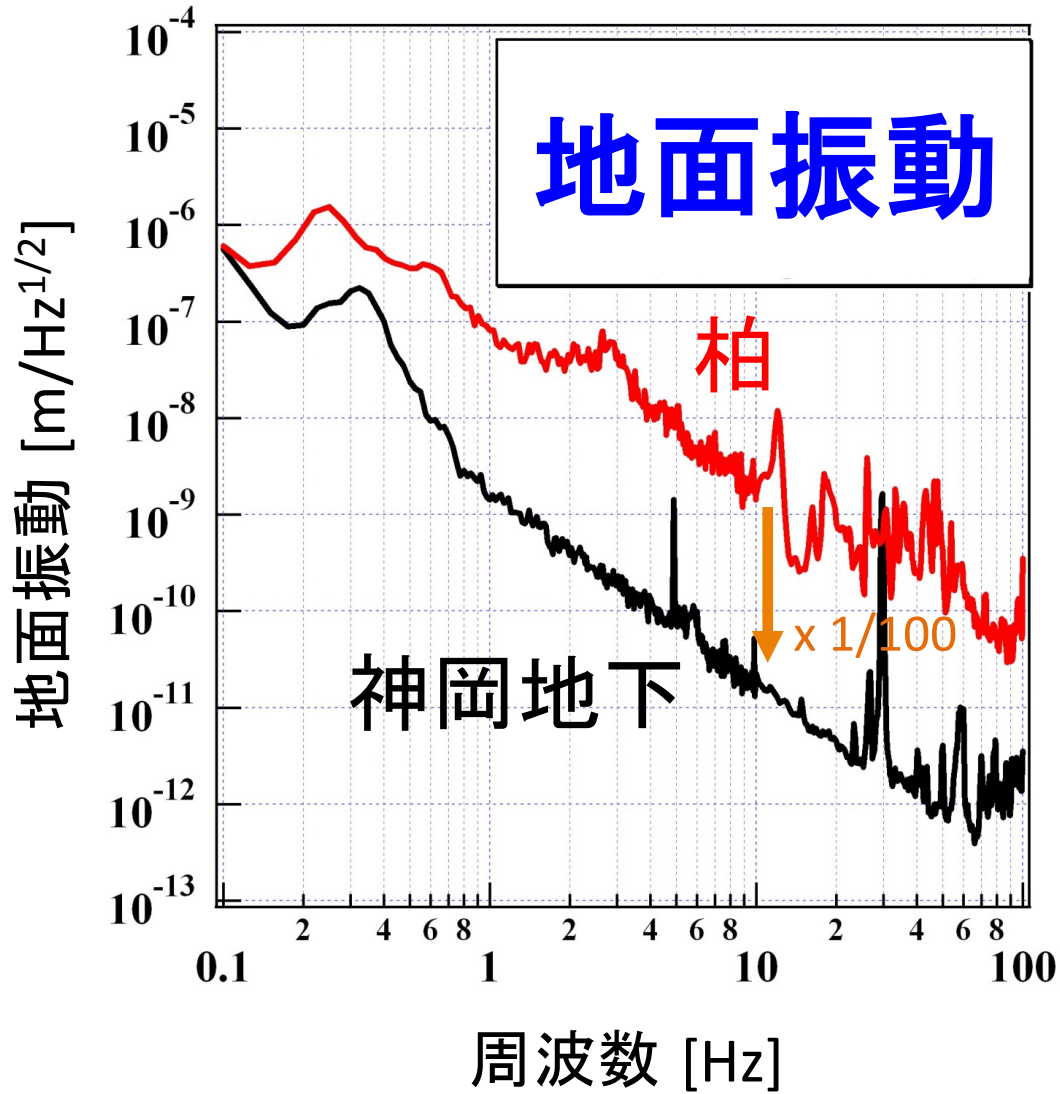
大型防振装置



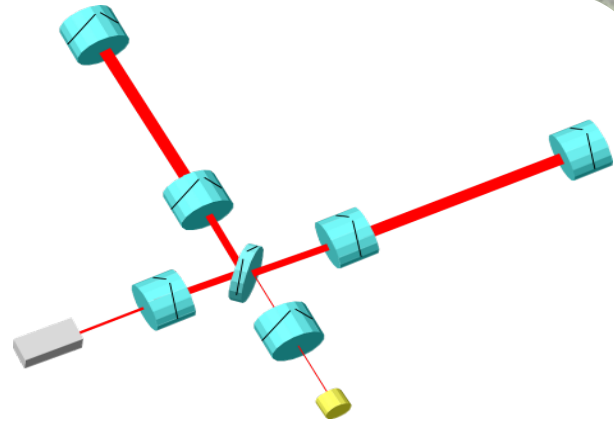
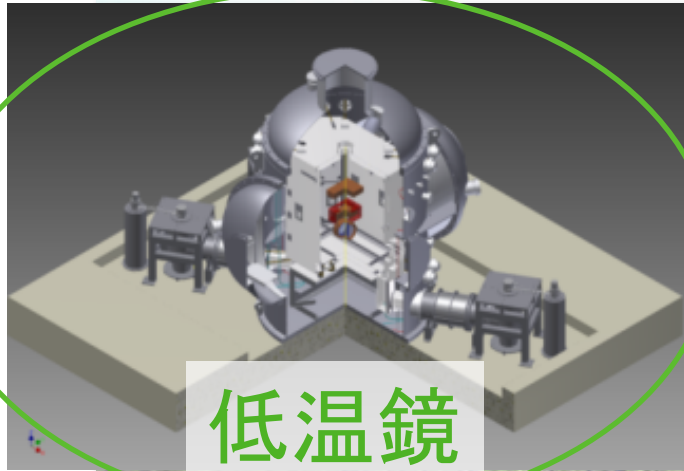
大型防振装置



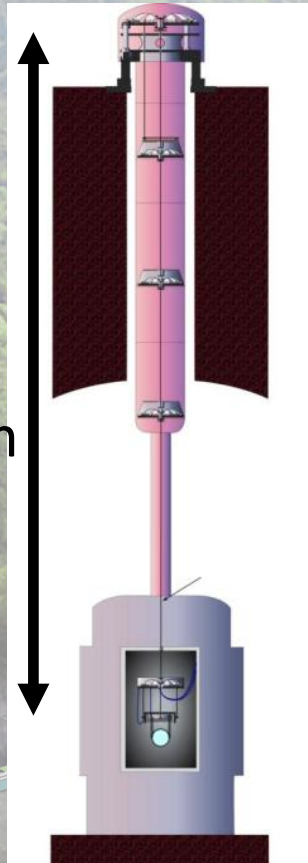
地下環境



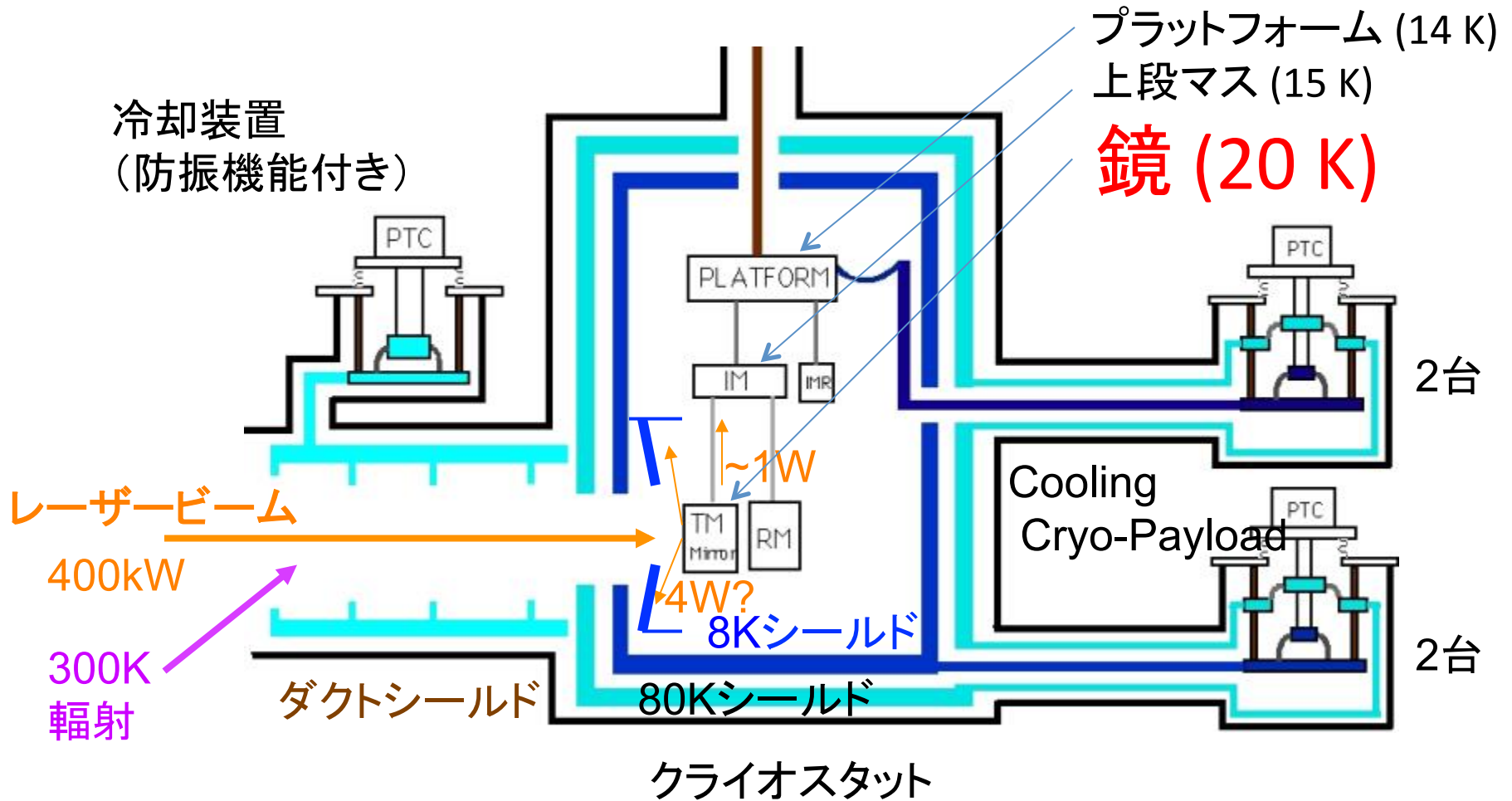
KAGRAの特長



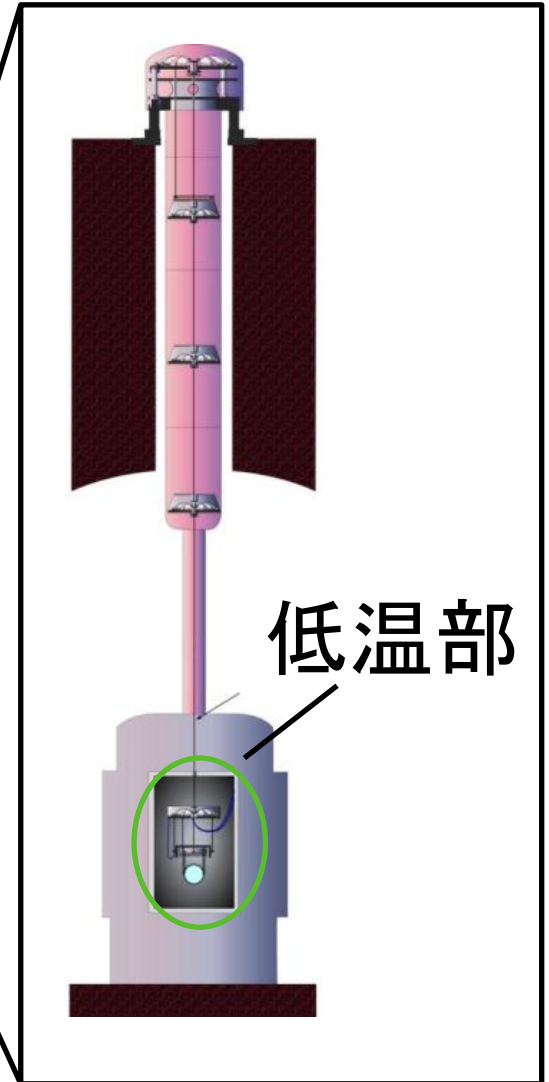
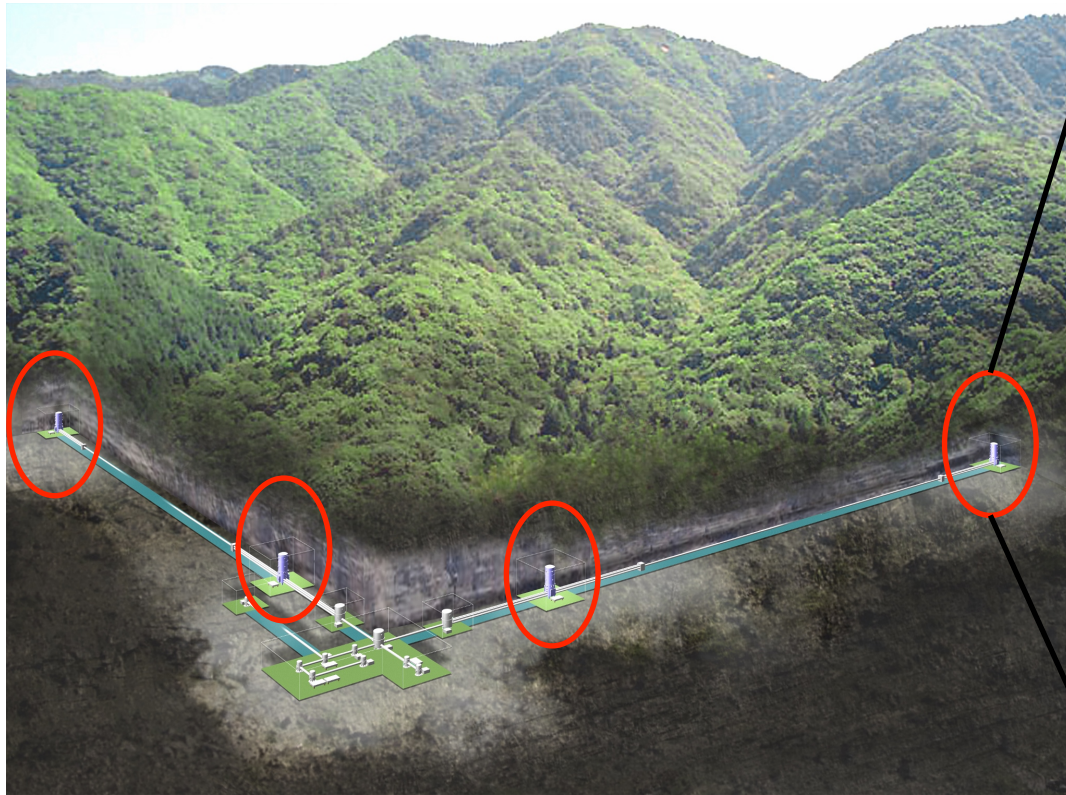
13 m



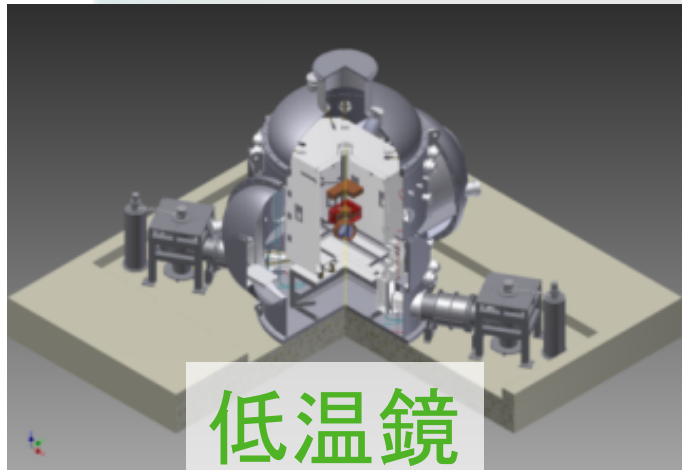
低温鏡



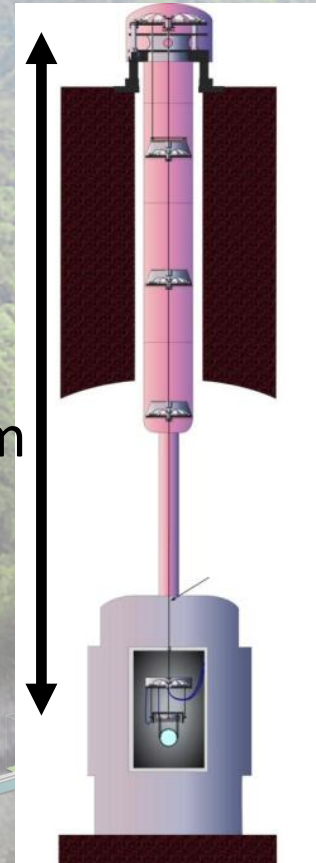
低温鏡



KAGRAの特長

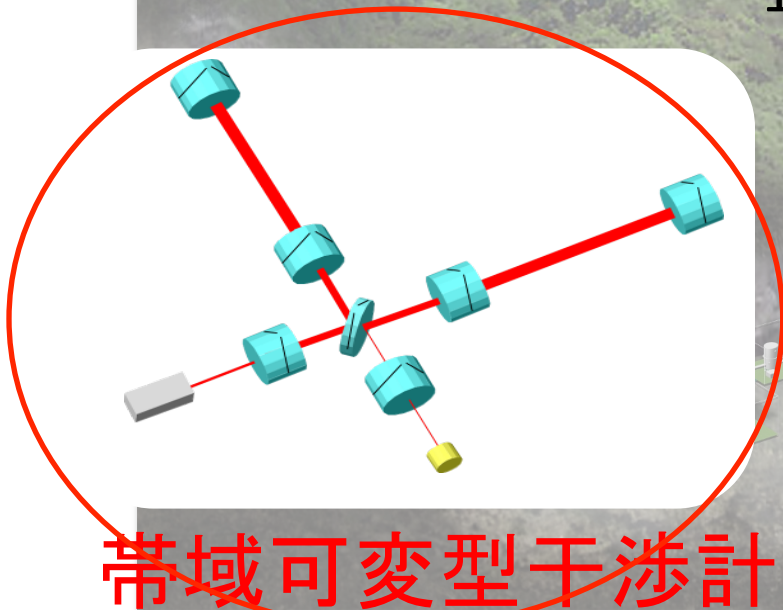


13 m



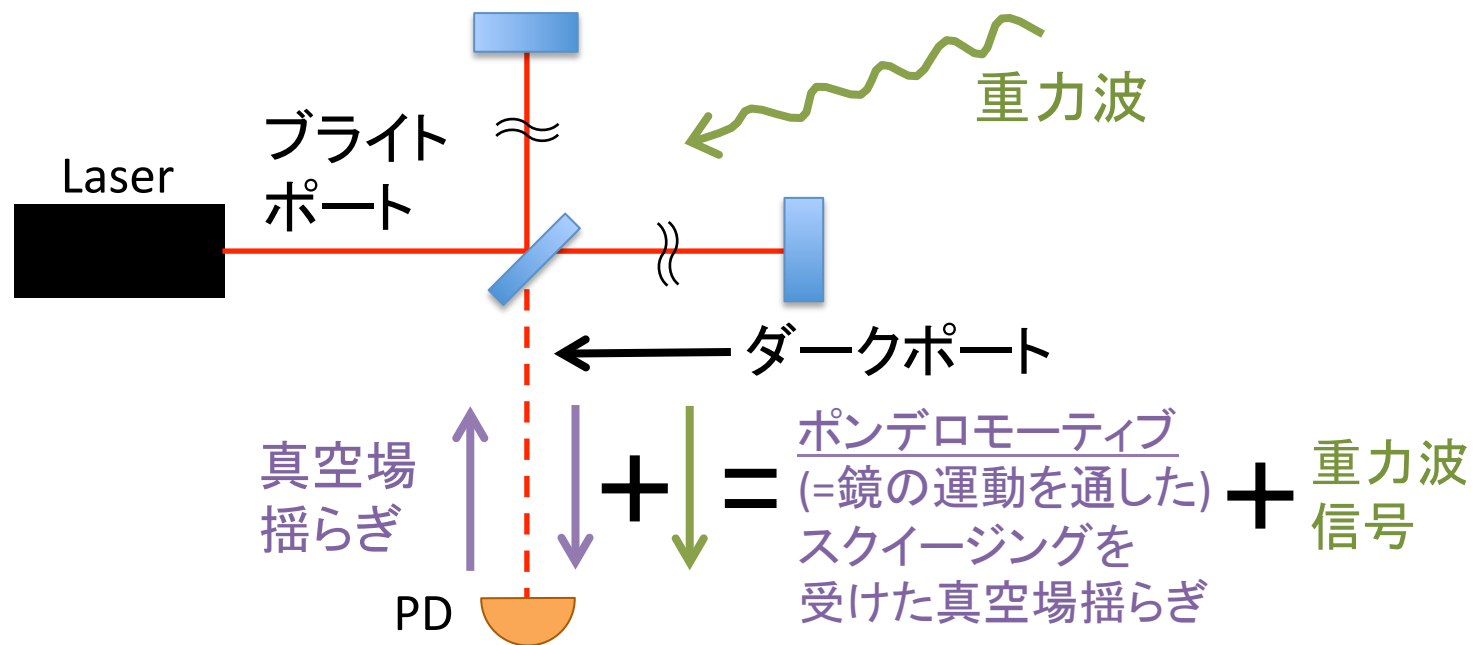
地下

大型防振装置



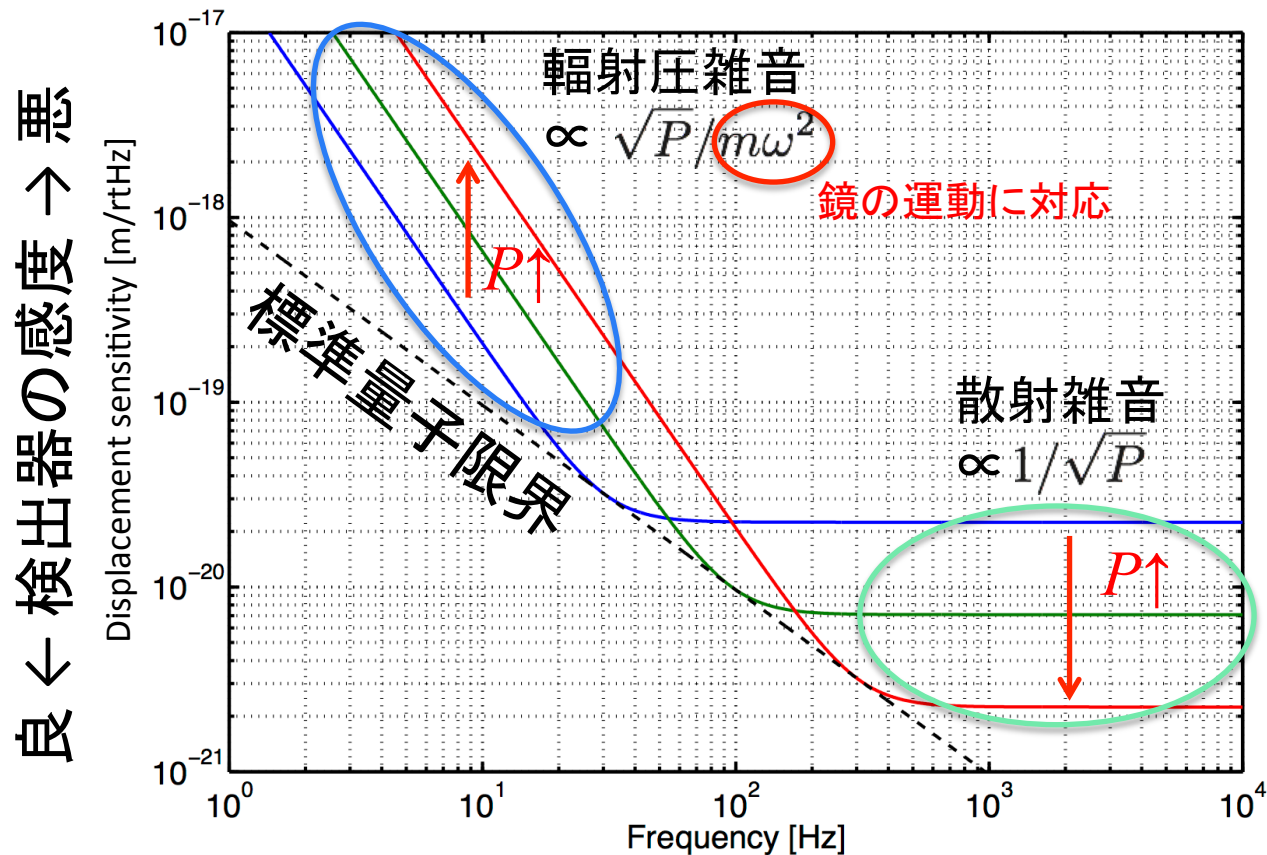
レーザー干渉計の量子雑音

- レーザー干渉計の量子雑音
= 干渉計の信号取得ポート (=ダークポート) から入射する真空場揺らぎが原因となっている。

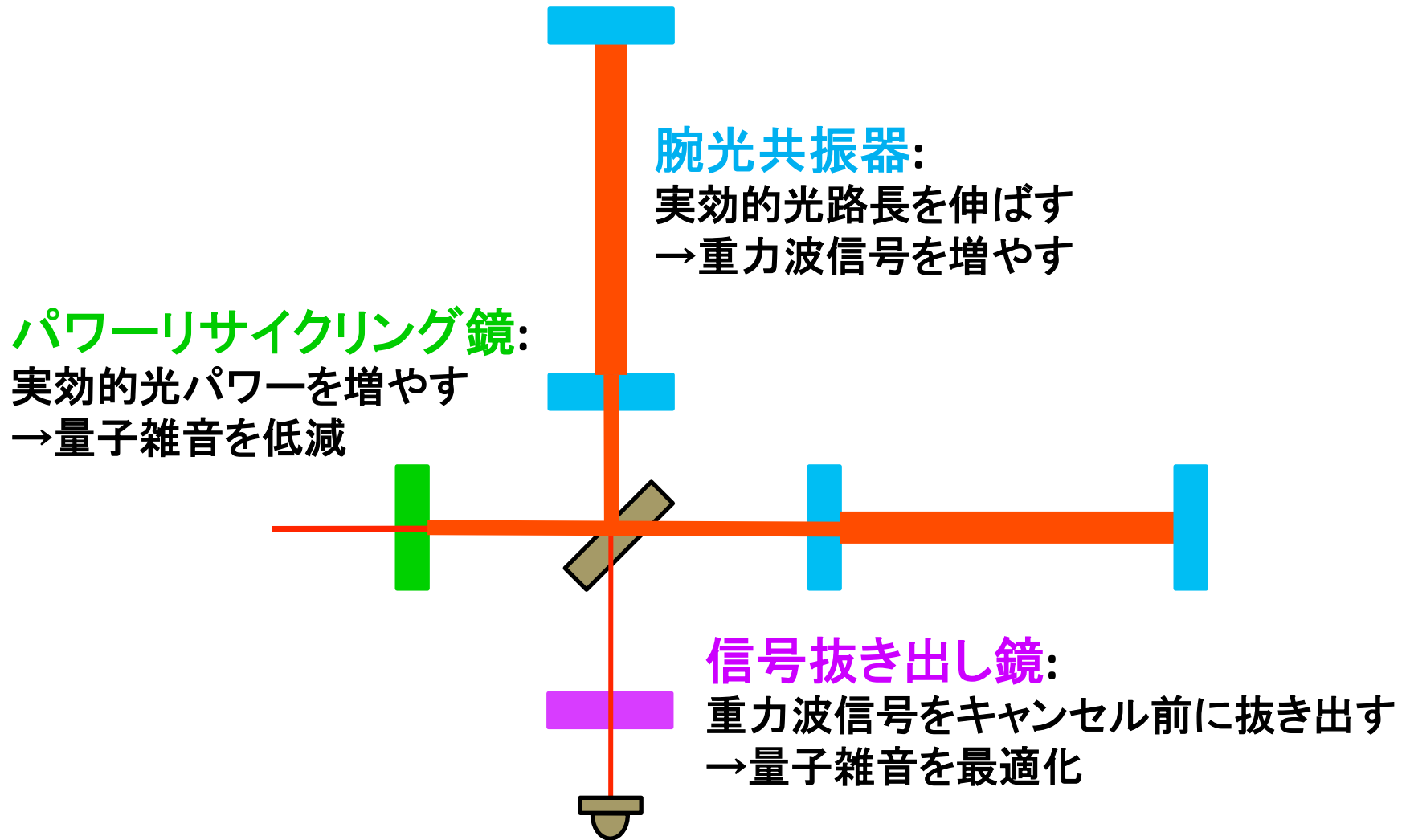


レーザー干渉計の量子雑音

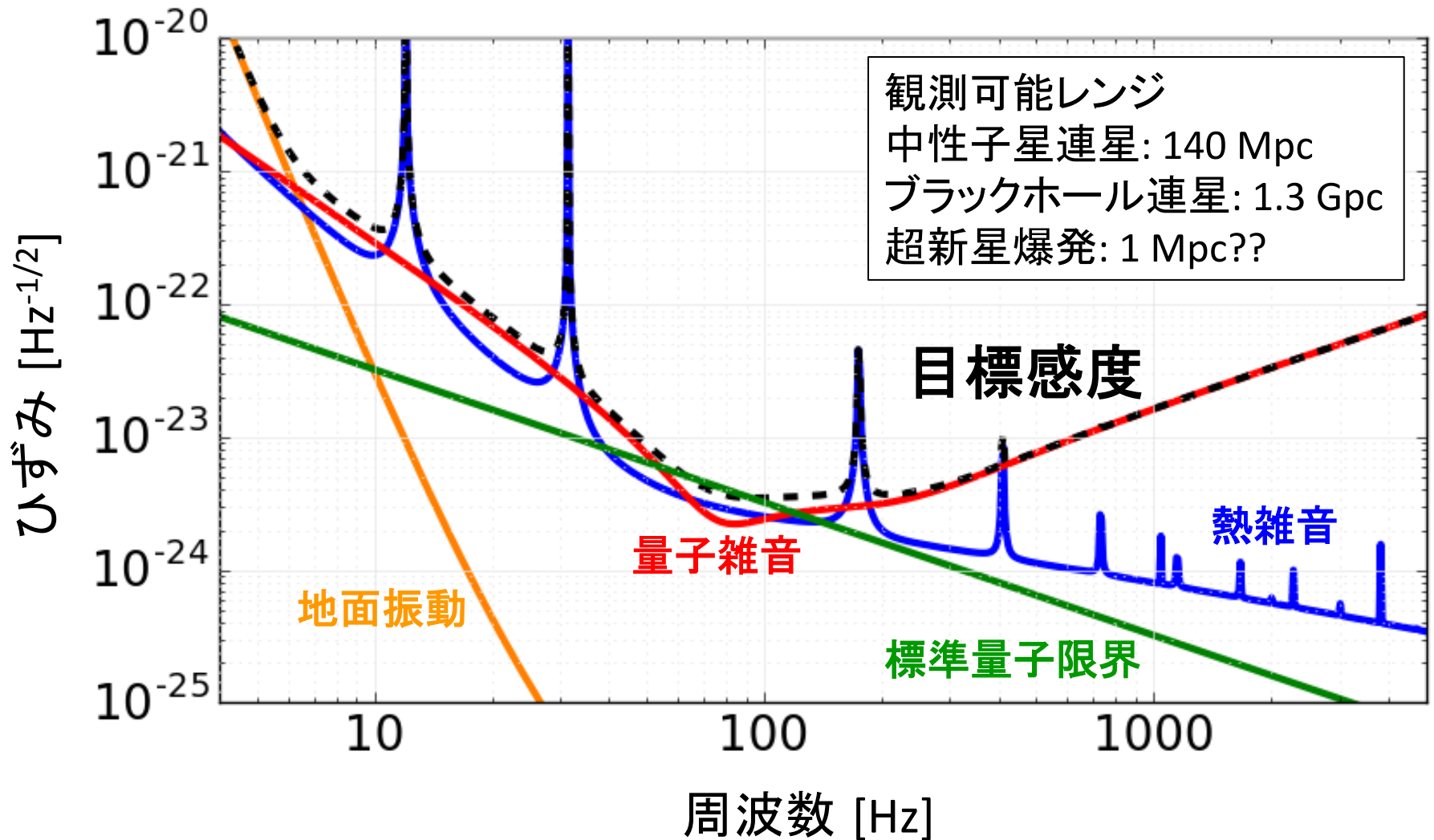
- 量子雑音のパワー依存性



帯域可変型干渉計



KAGRAの感度



KAGRAの最新予想感度 (2017年9月25日現在)。

目次

1. 重力波とは
2. 重力波による物理
3. レーザー干渉計型重力波検出器
4. 大型低温重力波望遠鏡KAGRA
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
 - 重力波観測ネットワークの構築: KAGRA等の参加
 - > 例: 重力波の偏光が決定できるようになり、真の意味で一般相対論の検証が可能になる!
 - 高感度化 (10 Hz – 1 kHz): 第3世代検出器 (Einstein Telescope, Cosmic Explorer)
 - > イベント数1000倍!!
 - 観測帯域の拡幅 (1 mHz – 0.1 Hz): 宇宙望遠鏡 (DECIGO, LISA)
 - > 初期宇宙からの原始重力波観測!!!
- マルチメッセンジャー観測
 - 重力波検出の電磁波・ニュートリノによるフォローアップ観測 (もしくはその逆)

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!!

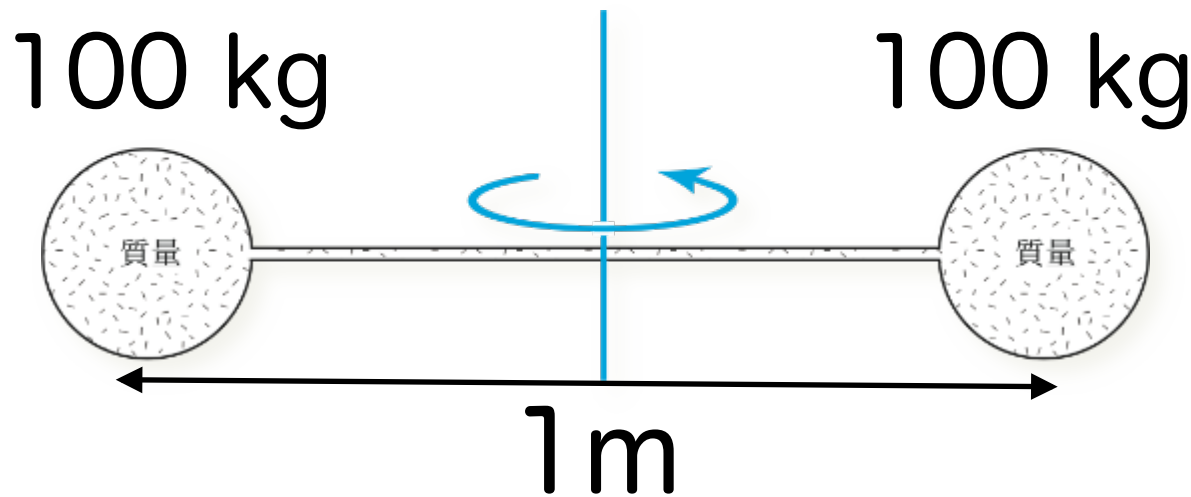


補遺

重力波研究の今後

- マルチメッセンジャー観測
 - 重力波検出の電磁波・ニュートリノによるフォローアップ観測 (もしくはその逆)
 - 例えば、重力波天体は単独で距離が決定できるため、電磁波観測で重力波天体のホスト銀河が特定されれば、距離はしごが不要な標準音源となる。
 - そのため、これまでの、超新星爆発(標準光源)や、バリオン音響振動(標準定規)を用いた測定とは独立に、ハッブル定数を測定することができる。

人工的に重力波を生成



1000回転/sec
(重力波: 2kHz)

$h \sim 10^{-40}$ @ 100 km

重力波の存在の間接的証明

- テイラー、ハルスの連星パルサー (PSR1913+16) の観測
- 重力波を放出してエネルギーを失い、軌道周期が変化
- 1993年ノーベル賞

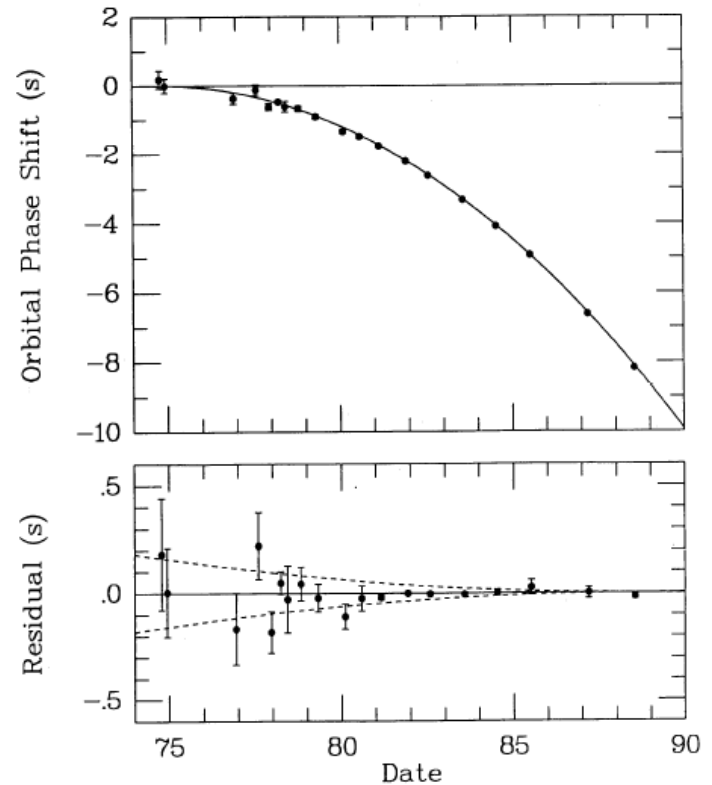


FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves 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.

重力波で宇宙の始まりを観る！

