

重力波検出の原理と世界各国の検出器



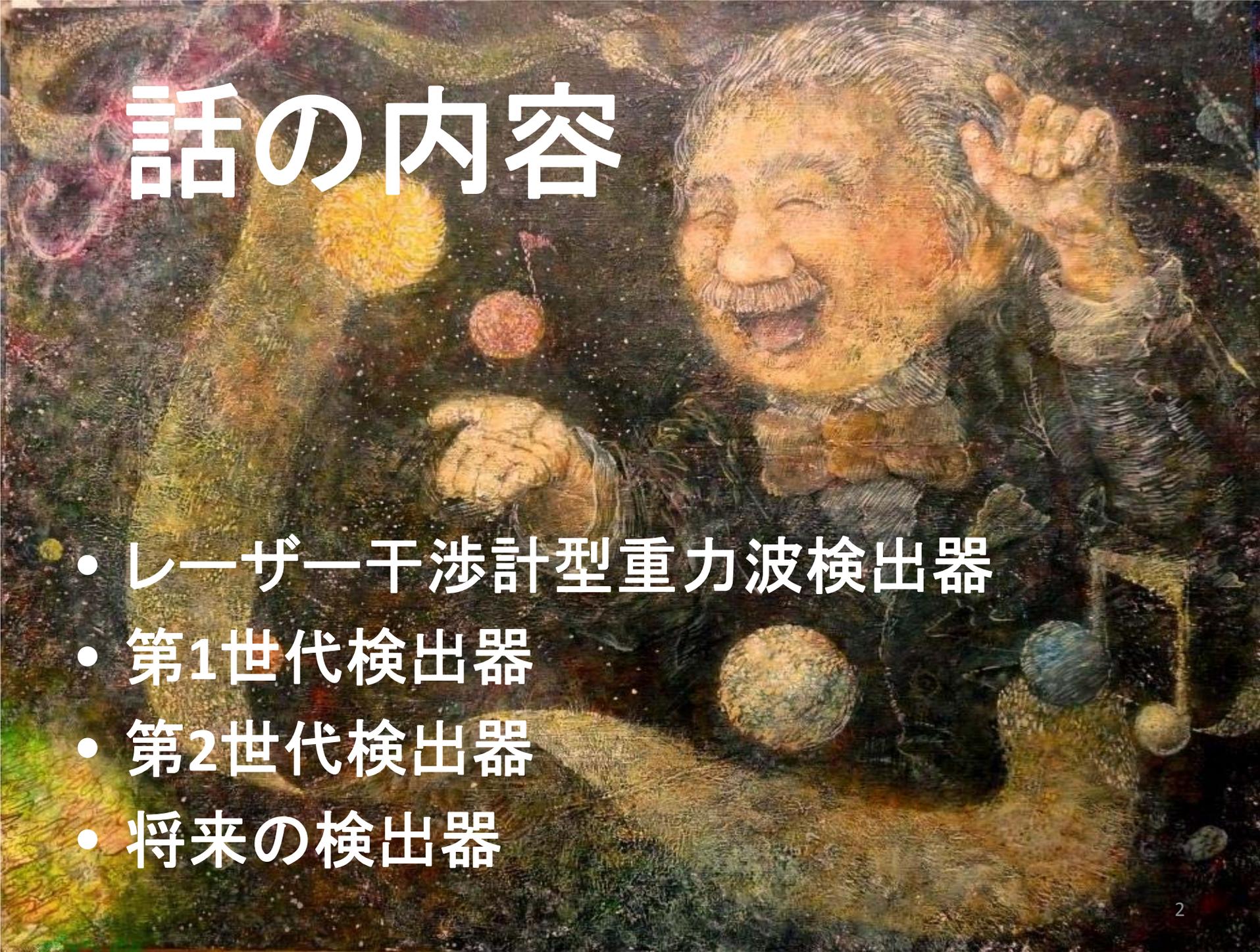
Illustration: Sora

データ解析スクール @東京大学

JGW-G1402350-v1

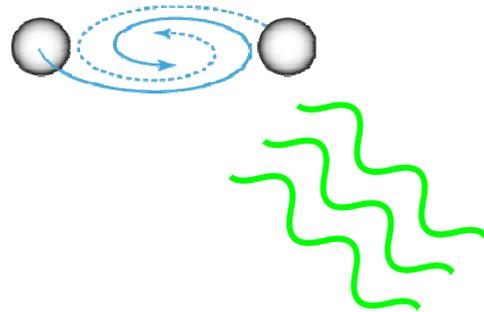
H26, 4, 19 東京大学宇宙線研究所 川村静児

話の内容



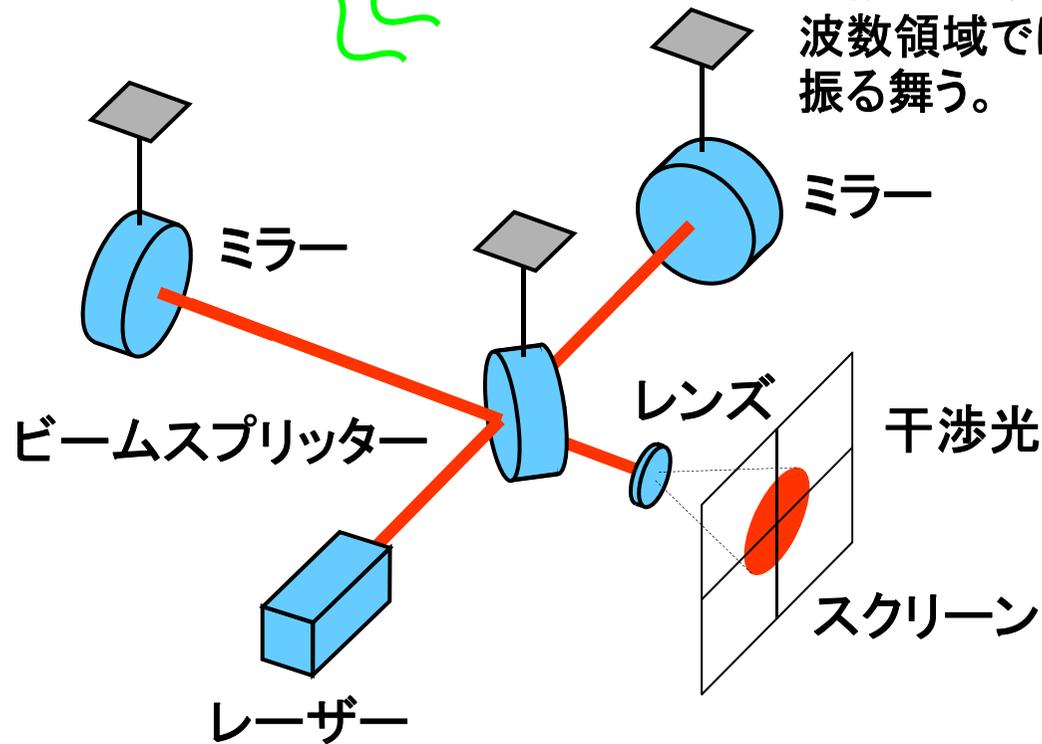
- レーザー干渉計型重力波検出器
- 第1世代検出器
- 第2世代検出器
- 将来の検出器

レーザー干渉計による 重力波検出の原理



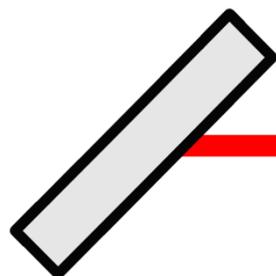
ミラーは吊り下げられている。

↓
共振周波数より十分に高い周波数領域では、自由質点として振る舞う。



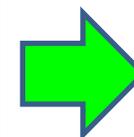
本当に測れるのか？

ビームスプリッター



光の速度が速くなる

ミラー



伸びる

キャンセルして測れないのでは？？？

測れます！

(1) 局所慣性系

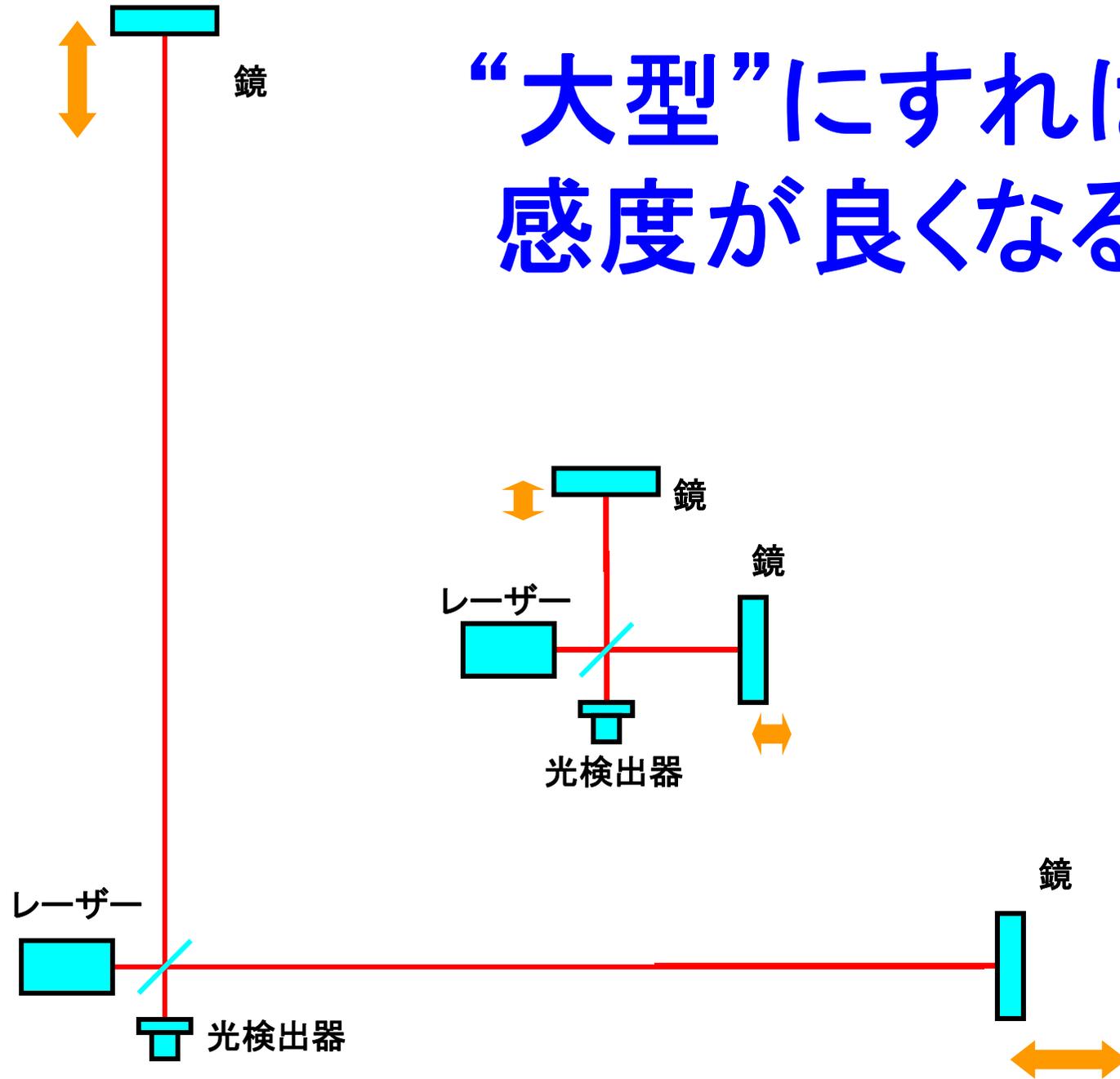


(2) Transverse Traceless座標系



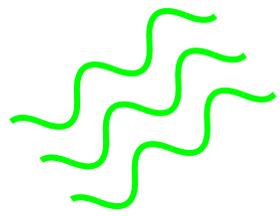
いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！

“大型”にすれば
感度が良くなる

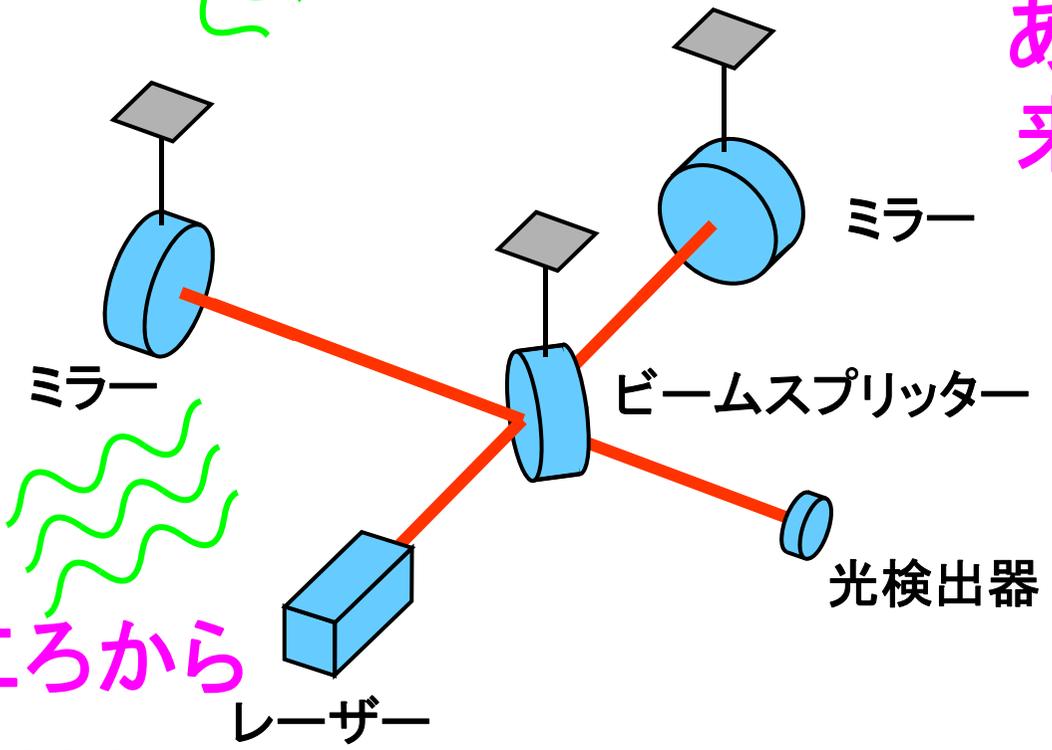
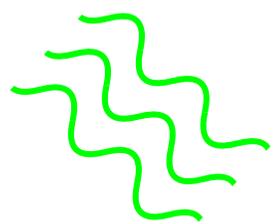


望遠鏡との違い

こっちから来ても...

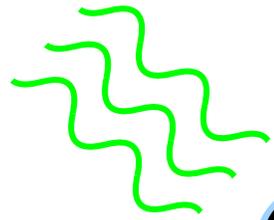


あっちから来ても...



こんなところから来ても...

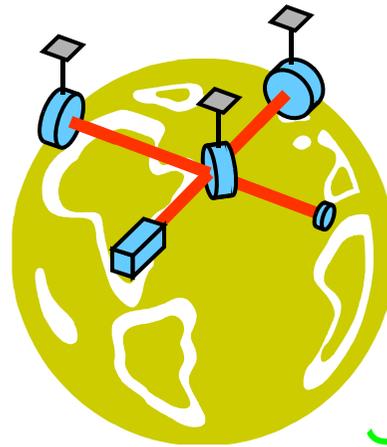
しかも・・・



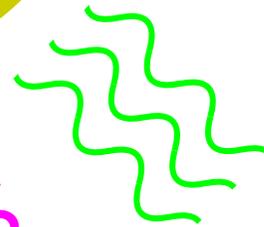
雨の日でも・・・



昼間でも・・・

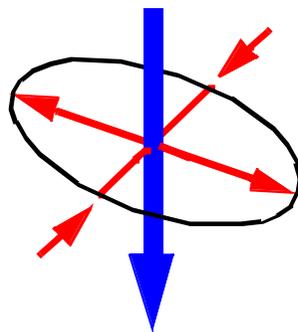


地球の裏側から
来ようとも・・・

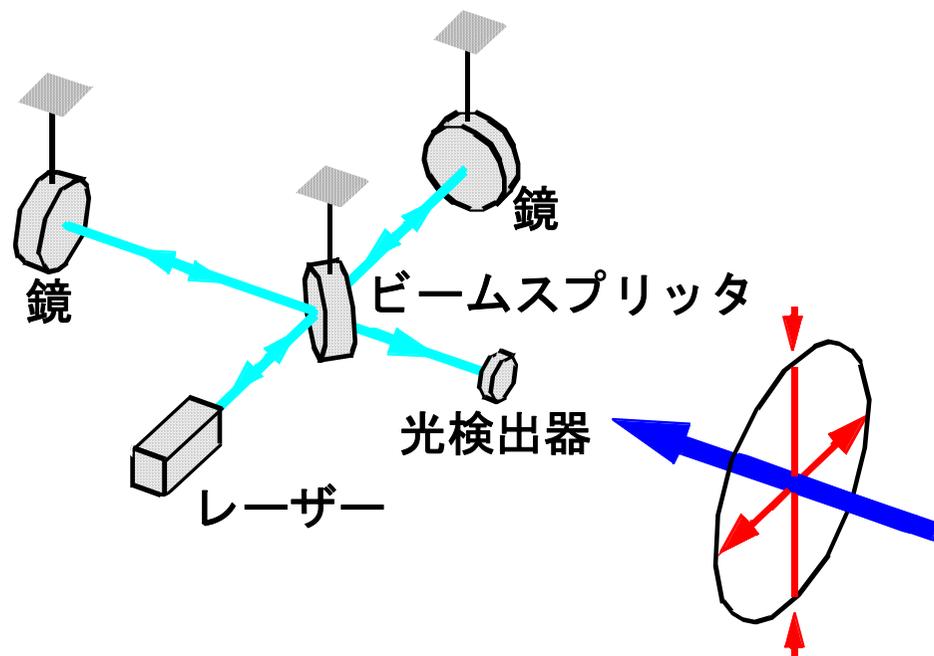
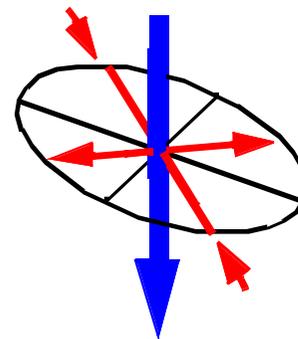


干渉計の指向性

応答:最高



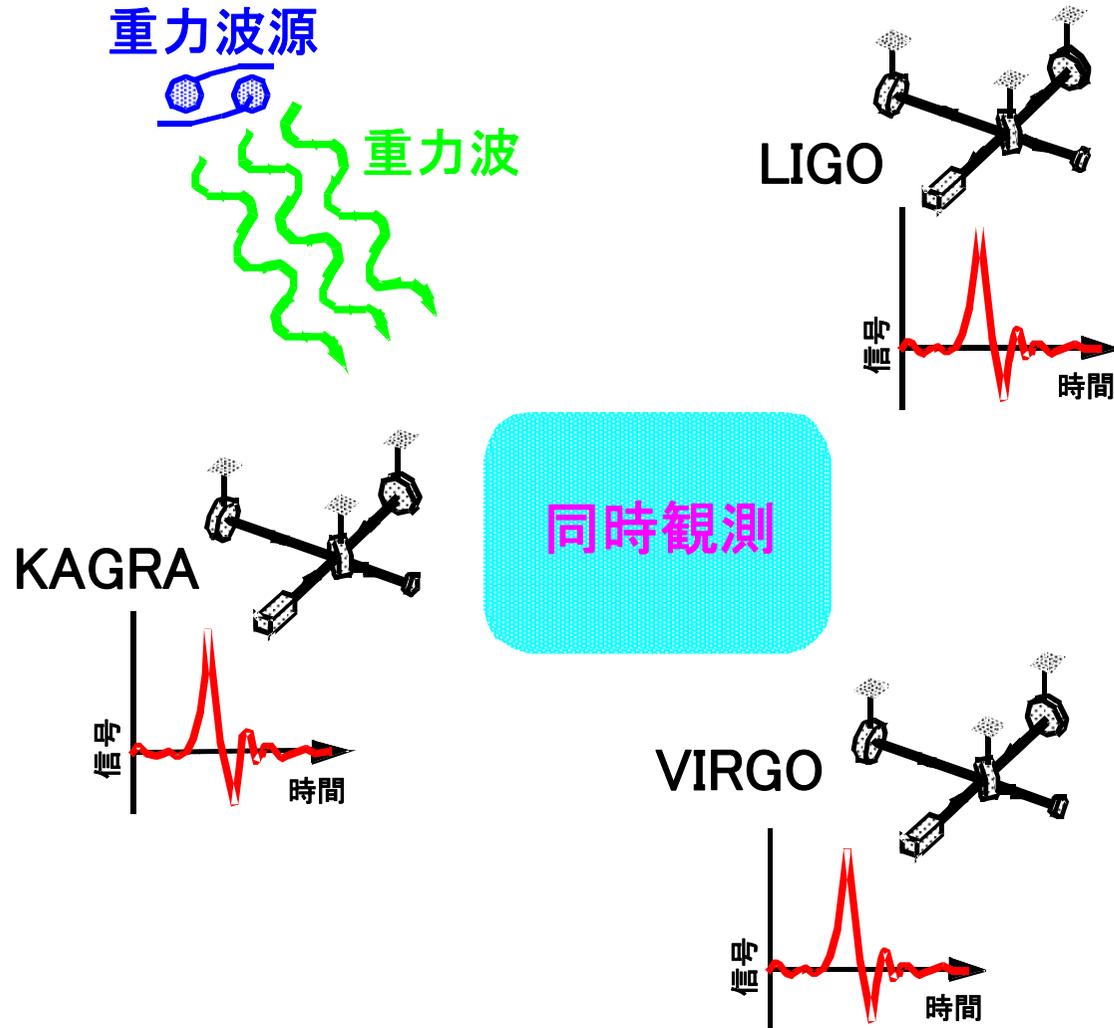
応答:ゼロ



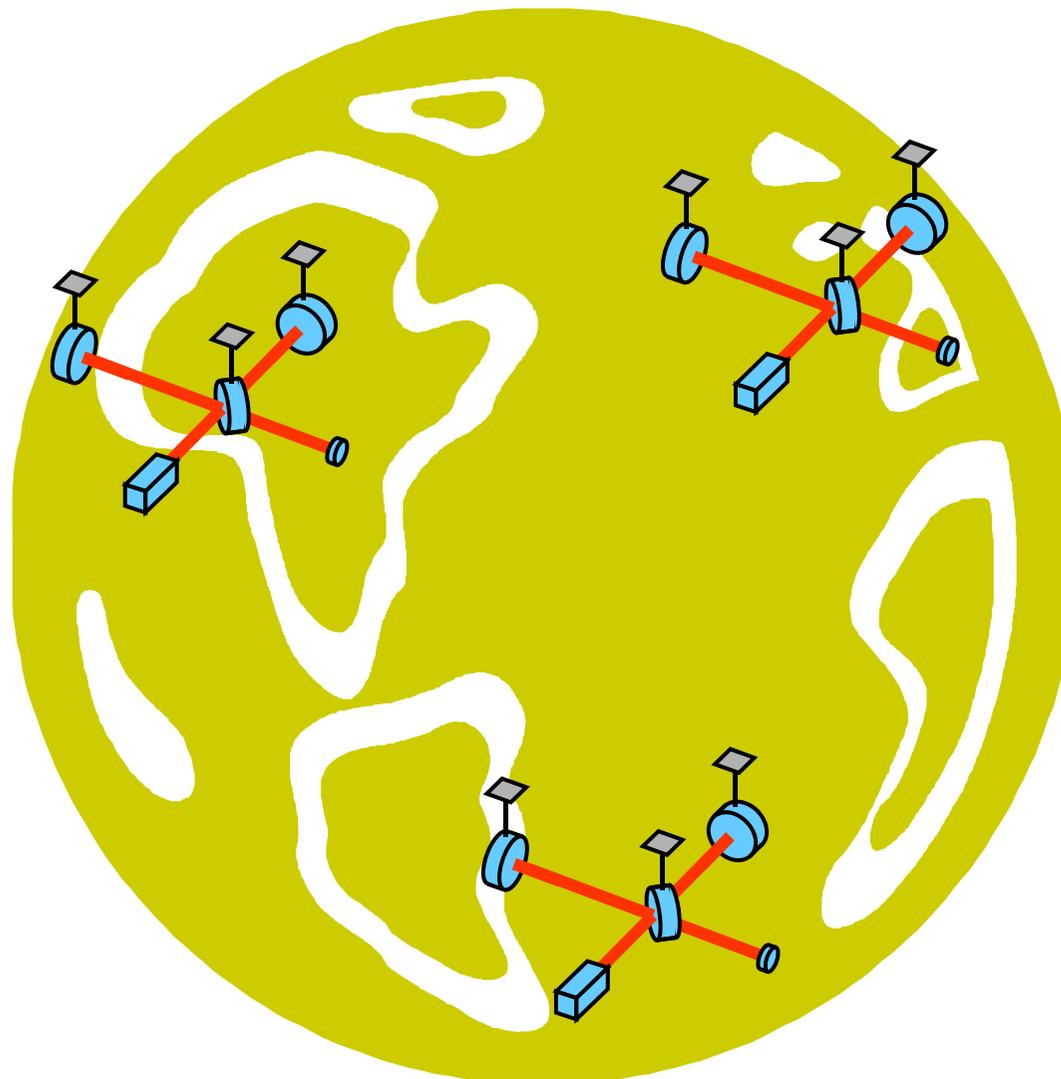
応答:最高の半分

重力波の方向や偏極によって応答が違う

複数台必要



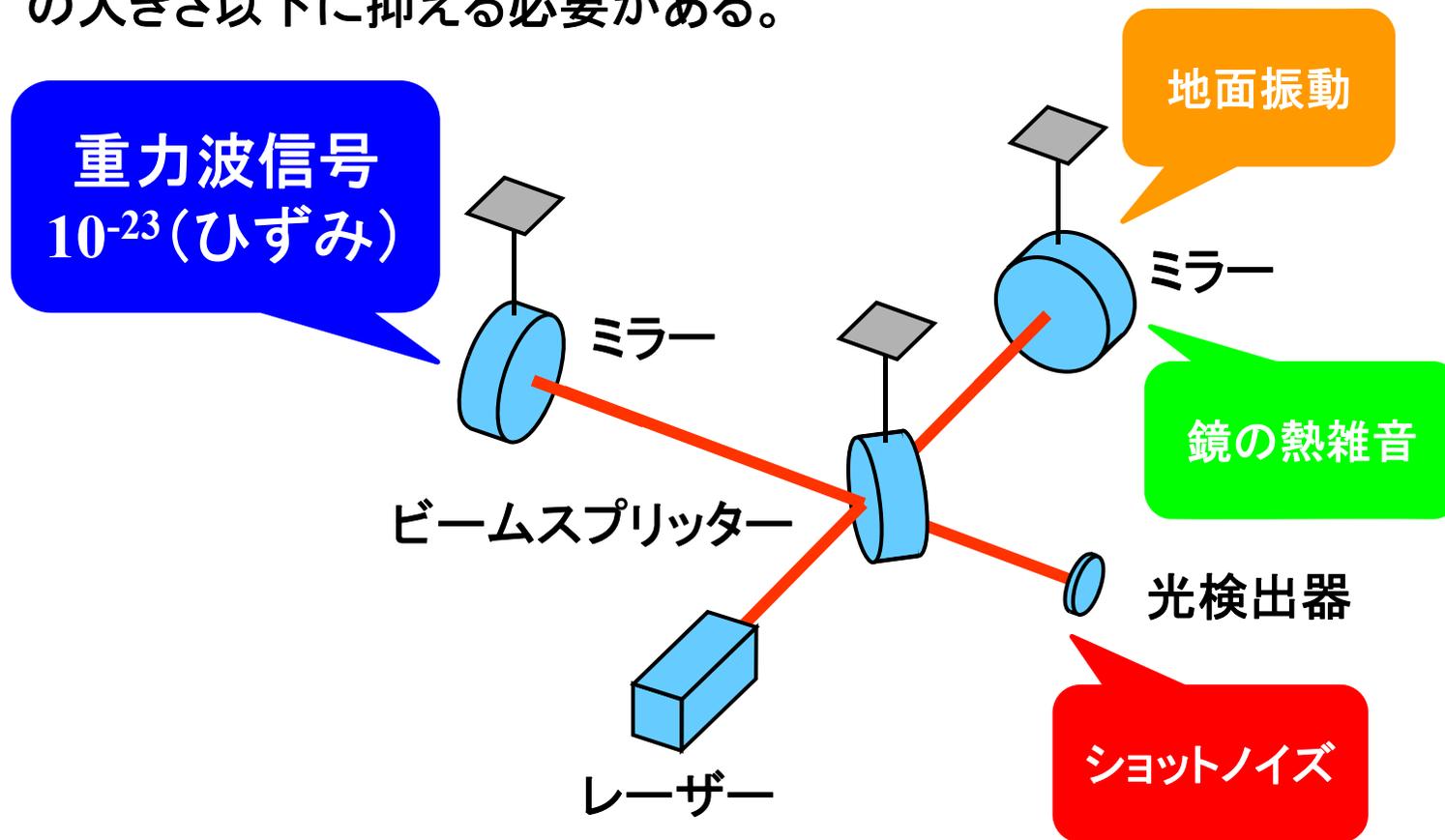
重力波源の方向は？



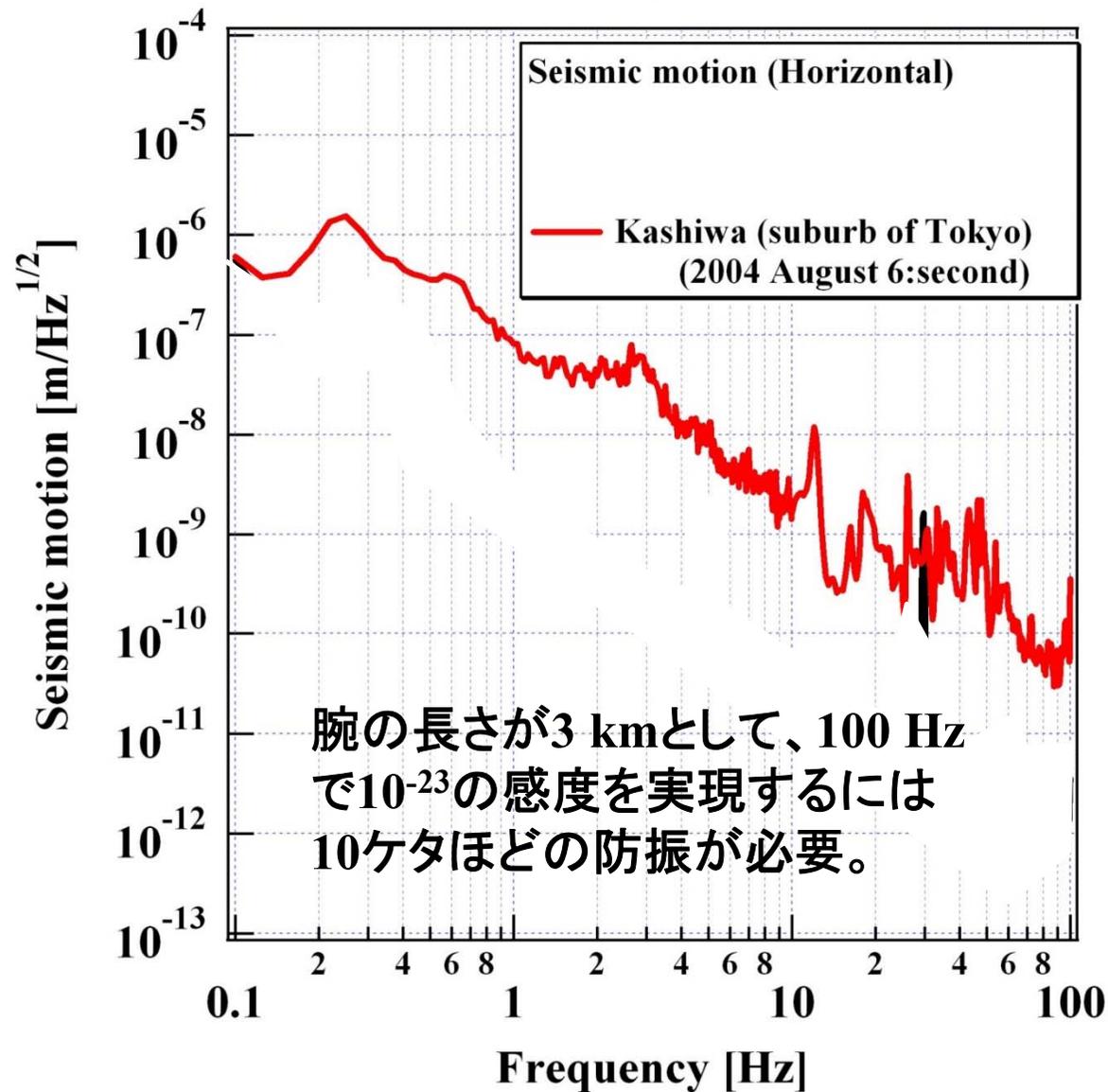
時間差から
方向が分かる！

レーザー干渉計の感度

全ての雑音を予想される重力波信号の大きさ以下に抑える必要がある。

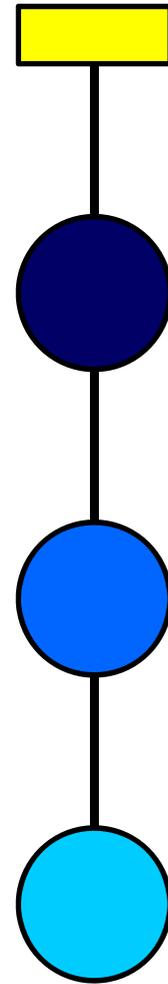
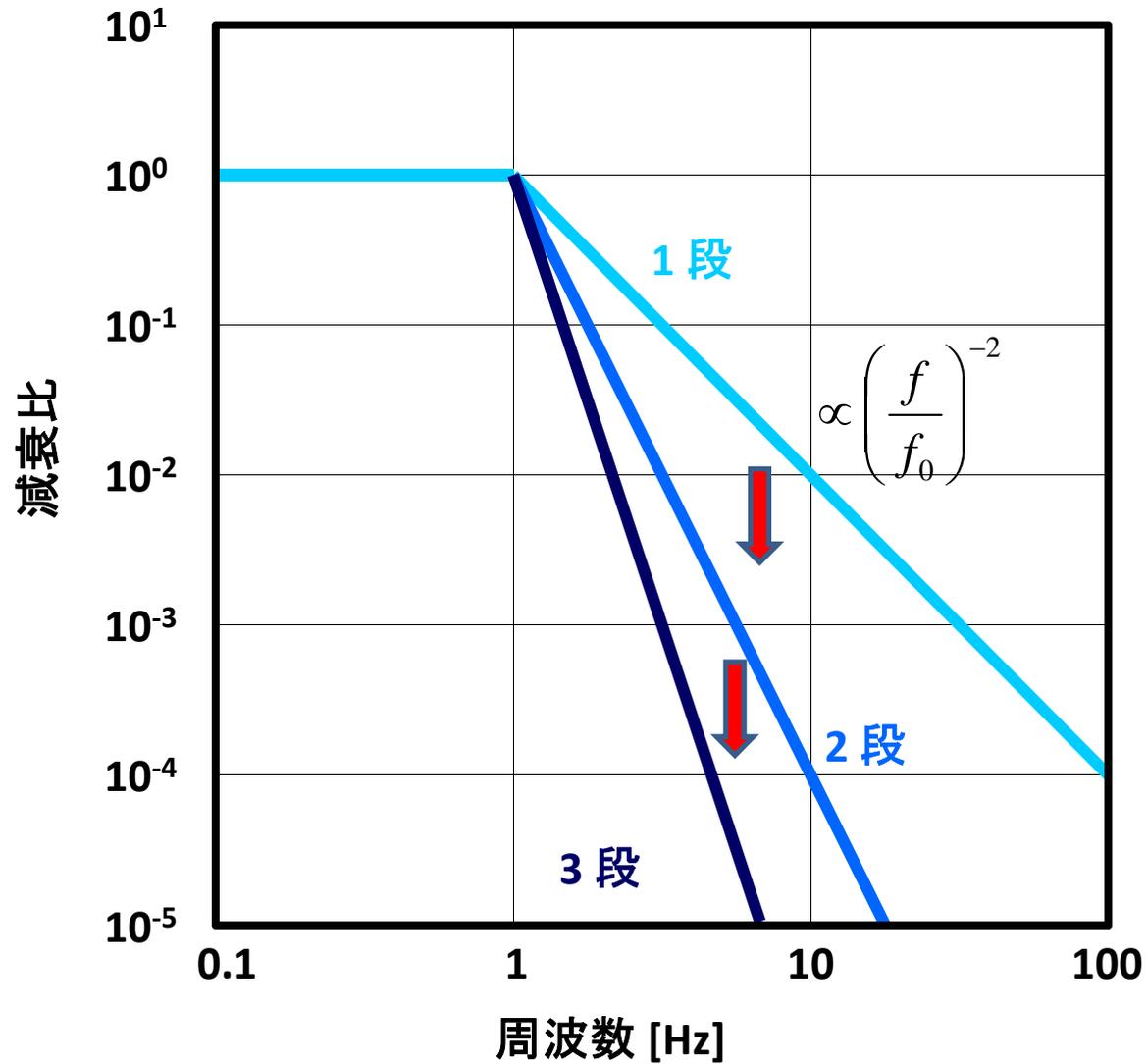


地面振動



防振の基本原理

地面振動 ×



熱雑音

- 鏡の内部モードや振り子モードが熱浴とエネルギーのやり取りをする過程に伴って起こる鏡の振動→ブラウン運動
- あるモードに対して、全周波数で積分して $kT/2$ の運動エネルギーを持つ (k : ボルツマン定数、 T : 温度)
- 機械的ロスが小さい方が共振周波数以外の周波数での熱雑音が小さくなる

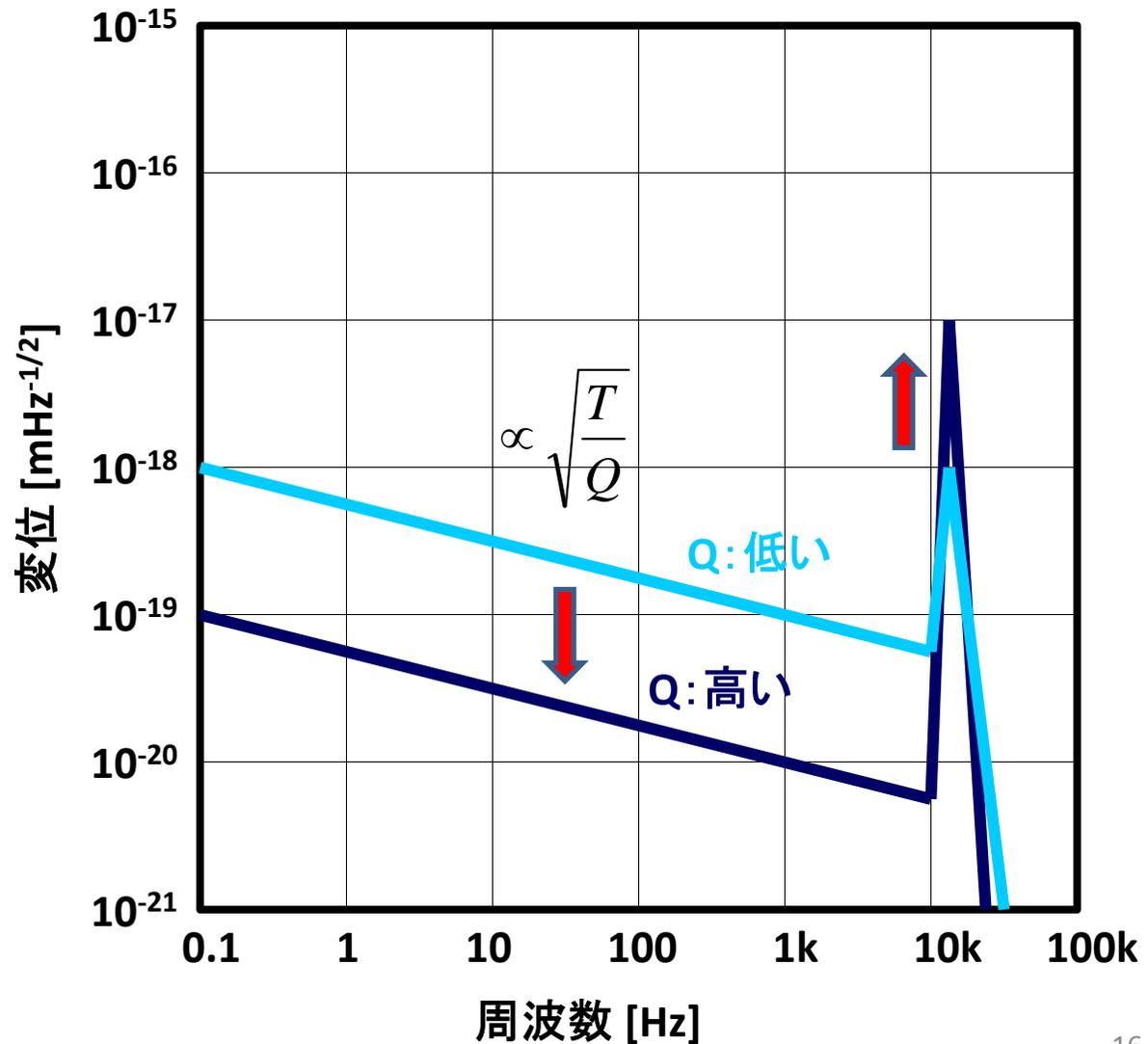
熱雑音の基本

Quality Factor:

機械的ロスの逆数



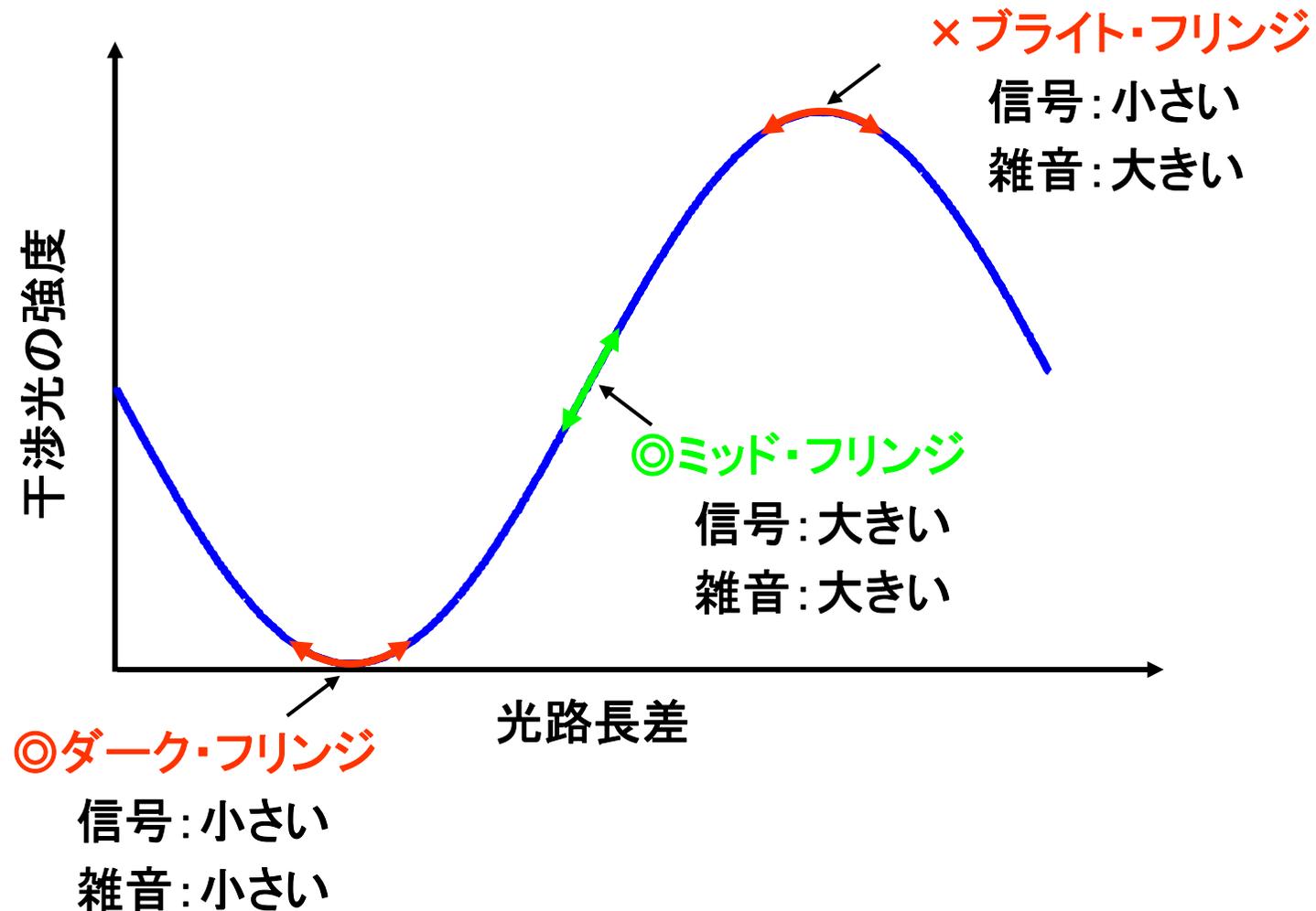
鏡の振り子モードや
内部モードの機械的
ロスをなるべく減ら
す必要がある。



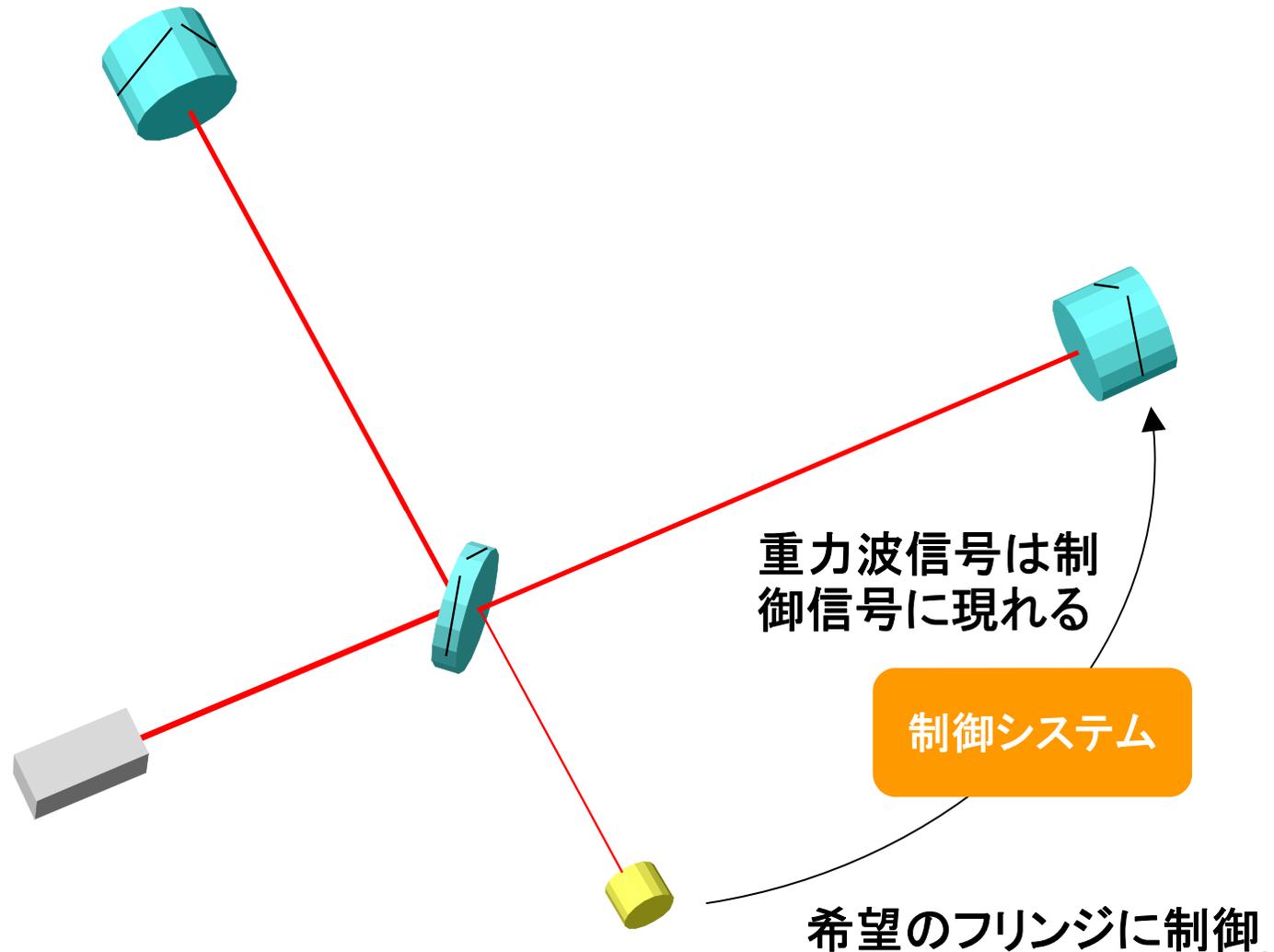
ショットノイズ

- 光がフォトンの集まりであることによって起こる検出過程における統計的揺らぎ(ナイーブな説明)
- 平均 N 個/秒のフォトンが光検出器にやって来ると \sqrt{N} 個程度揺らぐ
- 重力波信号の大きさは N に比例するのでレーザーパワーが大きいほど S/N 比はよくなる

ショットノイズ的には どこのフリンジが得か？



干渉計のフリンジ制御(ロック)



光共振器による信号の増幅

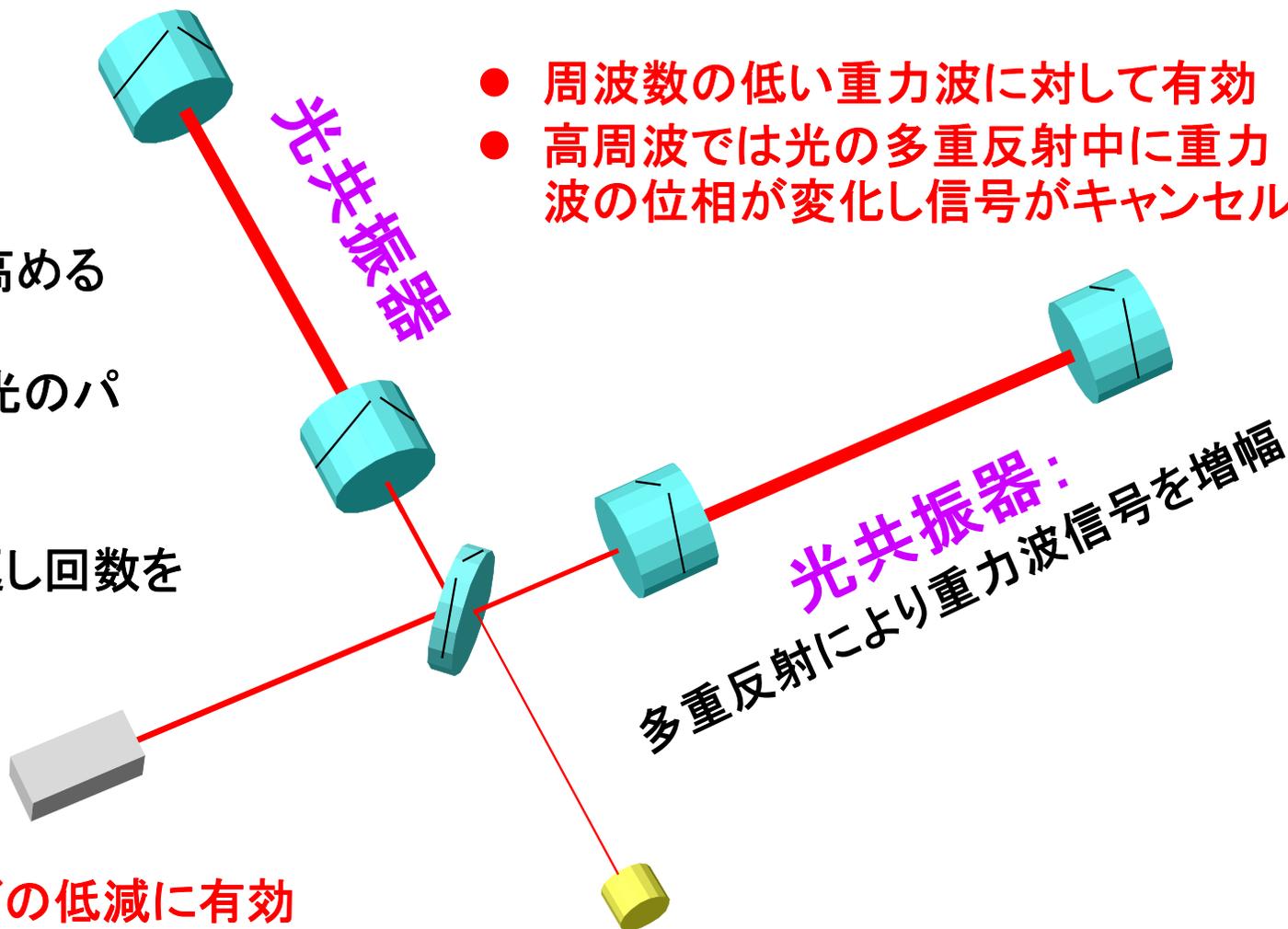
鏡の反射率を高める



光共振器内の光のパ
ワーを増幅



実効的な折り返し回数を
増やす



- ショットノイズの低減に有効
- 地面振動と熱雑音には効果なし

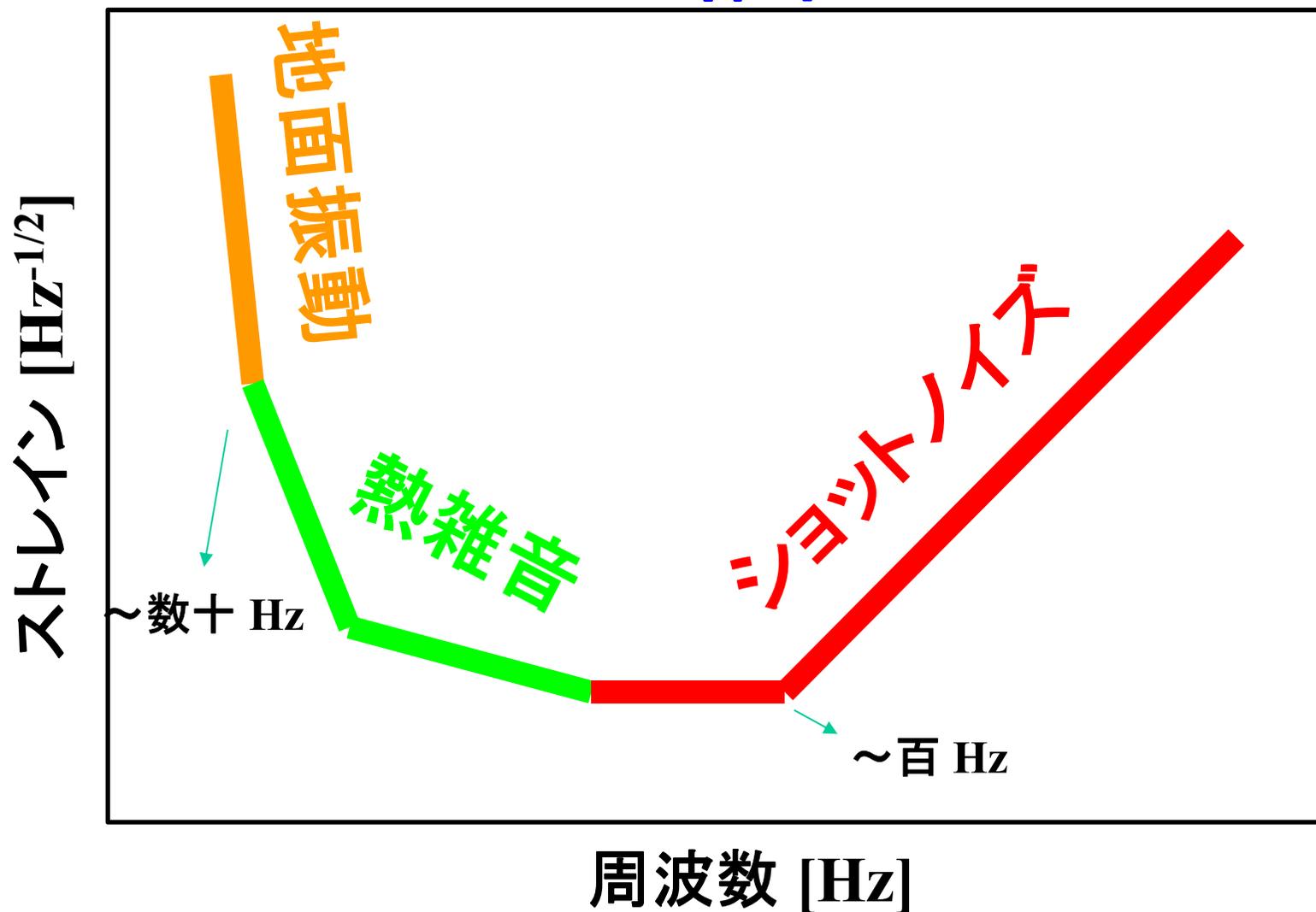
パワーリサイクリング

第一世代検出器の標準的干渉計

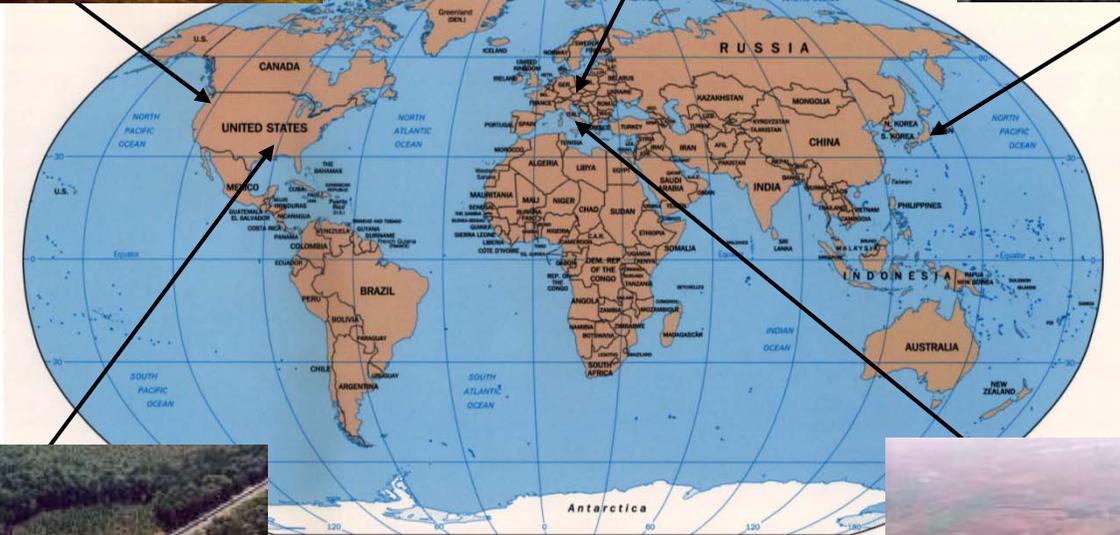
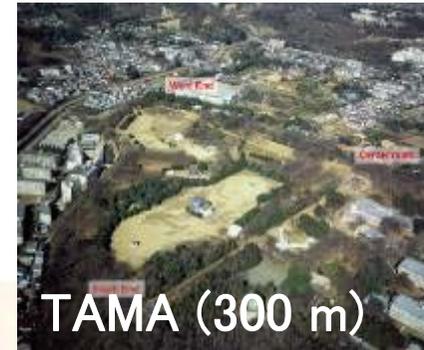
リサイクリングミラー:
光のリサイクルにより
実効的パワーを上げ
ショットノイズを低減

ダークフリンジで動作させる必要あり

干渉計の感度スペクトルと 3つの雑音



世界の第1世代検出器





西エンド

目的:

1. KAGRAのためのプロトタイプ
2. 可能なら重力波検出

南エンド

アーム長: 300 m

中央実験室

TAMA300



TAMA300フォトツアー

桜並木を歩いて...



地面の下には・・・



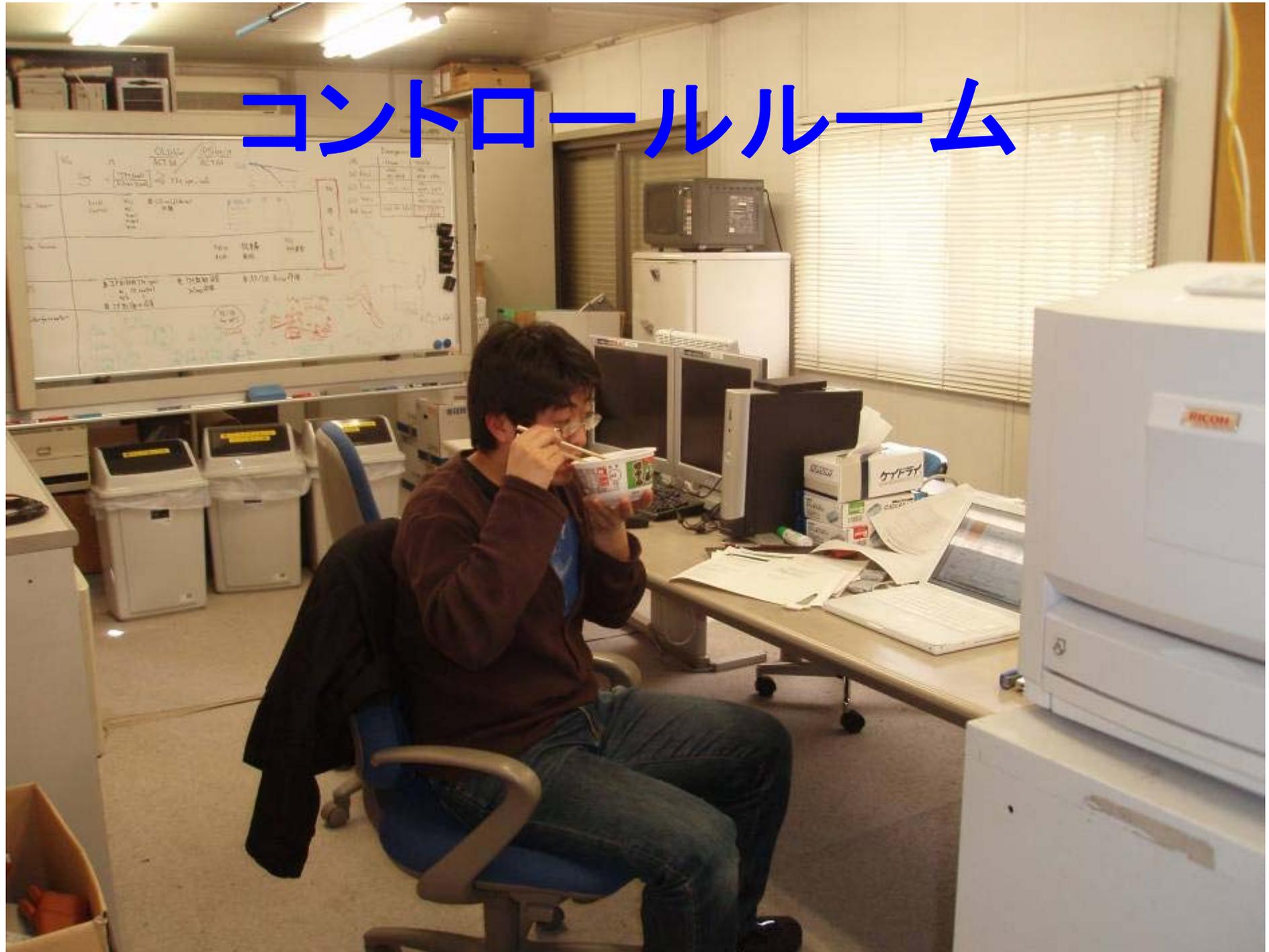
遠くに見えるは・・・



中央棟入り口



コントロールルーム



実験室入り口



TAMA300



300m真空パイプ



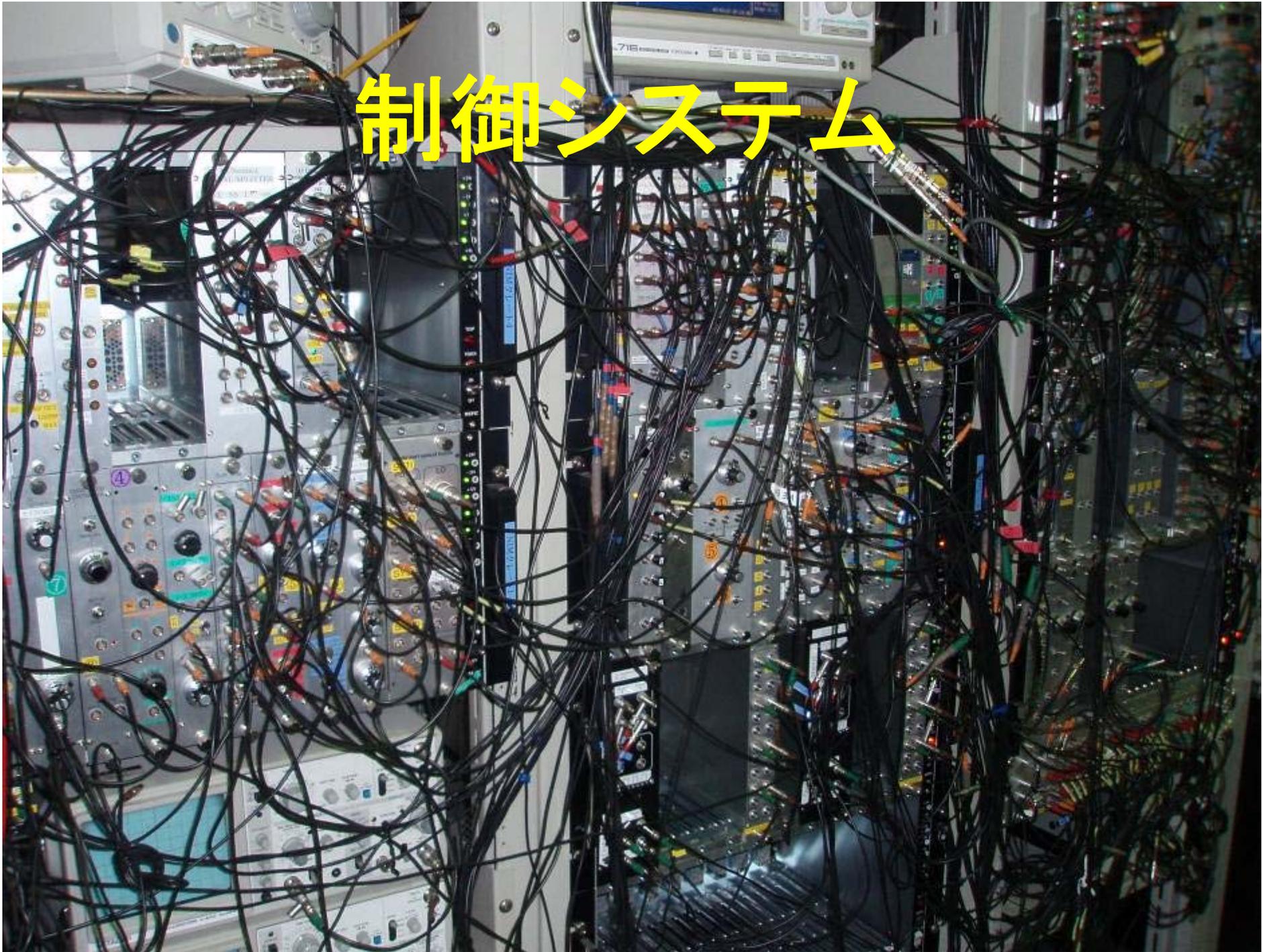
真空タンク



防振システム



制御システム



TAMA300

2000年**世界最高感度**達成！
2年間トップ
世界最長観測(1,000時間)

感度： 10^{-20}

23万光年かなたの中性子星連星の合体
からの重力波が検出可能

現在はKAGRAのためのテストベッド



LIGO

アーム長: 4 km & 2 km

Hanford, Washington



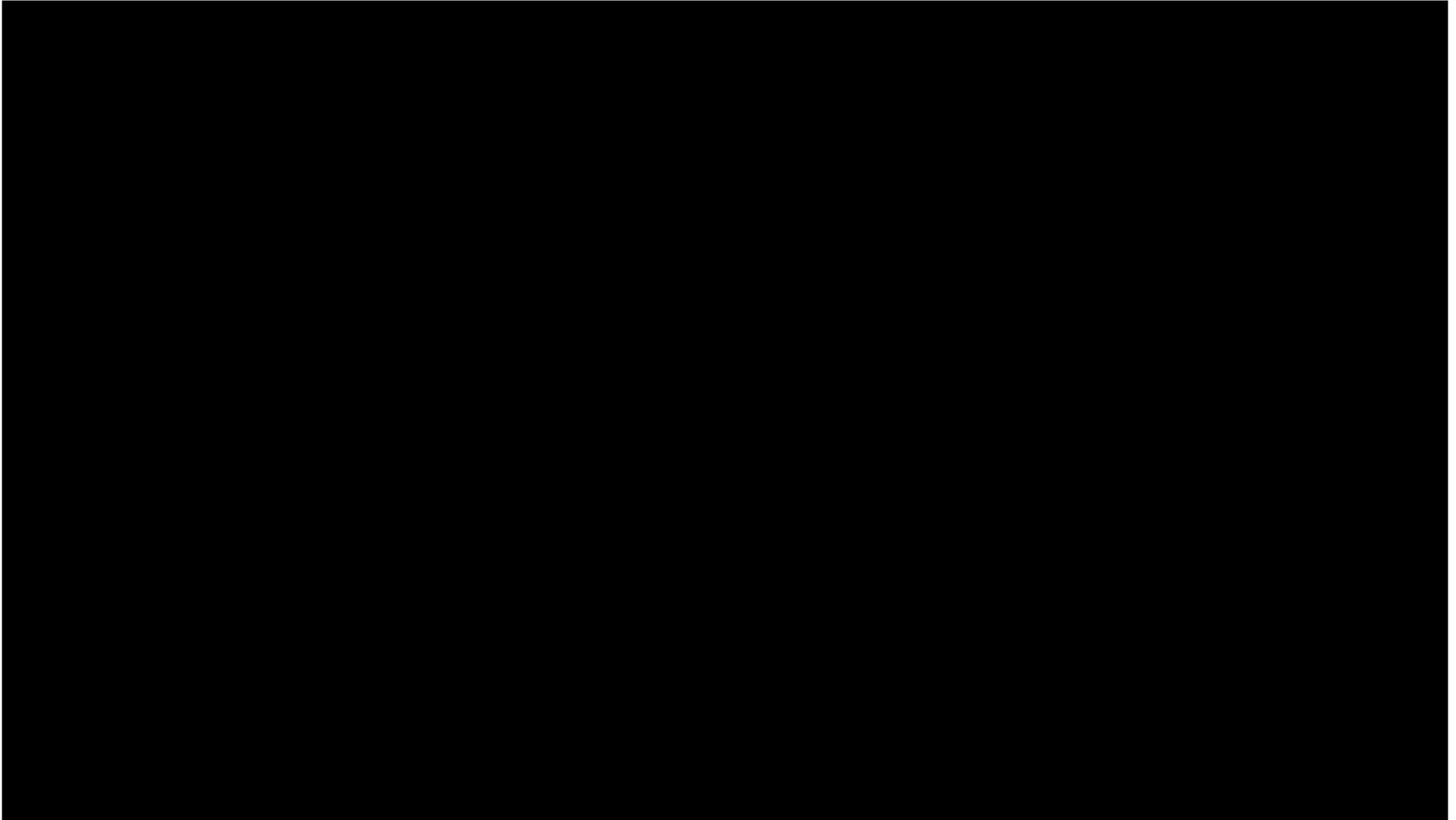
アーム長: 4 km



LIGO

- **目的**
 - Initial LIGO: 基本技術の実証、可能なら重力波検出
 - Advanced LIGO: 重力波の初検出
- **現状: Initial LIGOからAdvanced LIGOへの改造中**
- **総予算: 約1,000億円 (Advanced LIGOを含む)**
- **LIGO Scientific Collaboration**
 - 研究機関: 約100
 - 研究者: 約1,000名
- **NSFの強力なサポート**

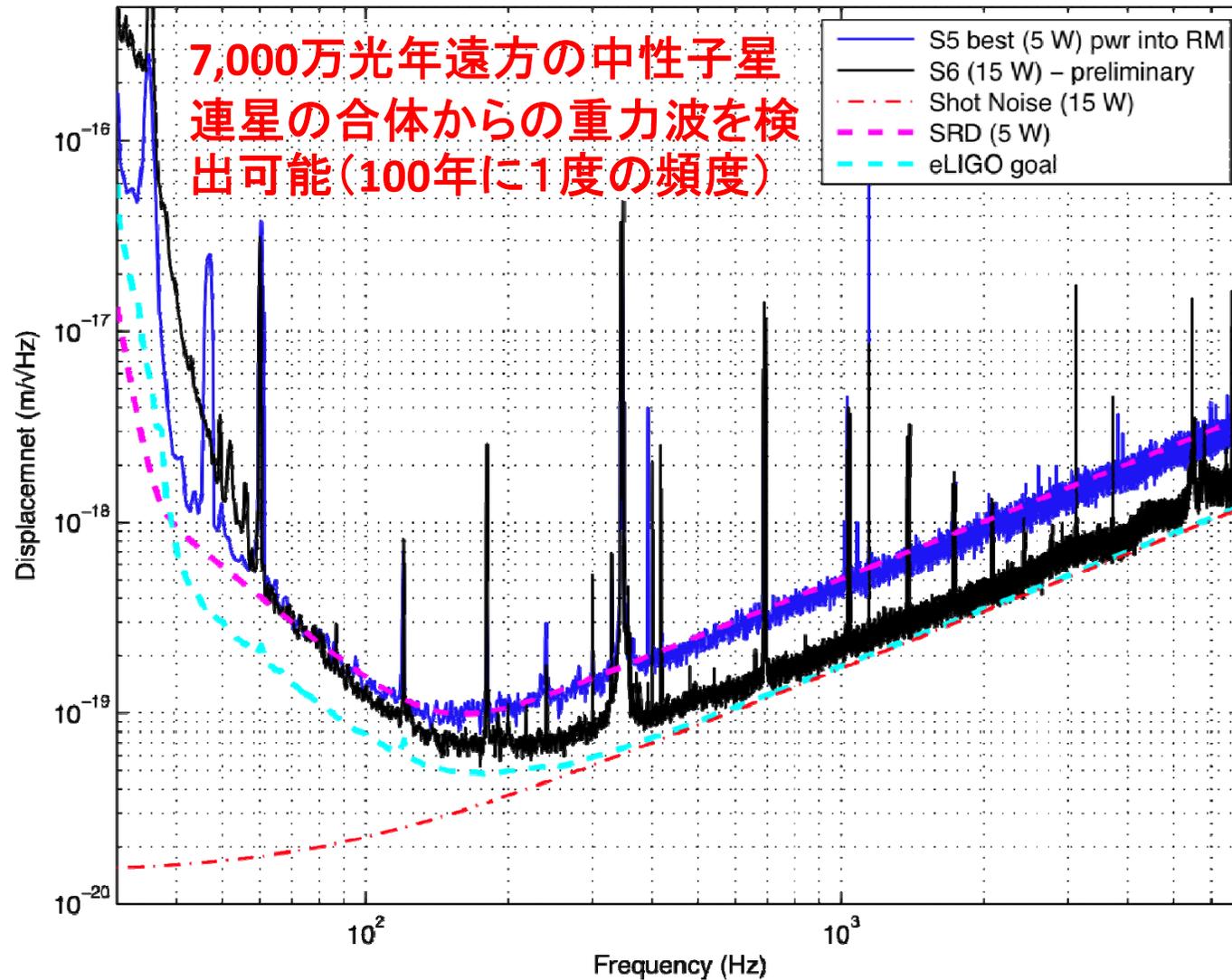
LIGO (動画)





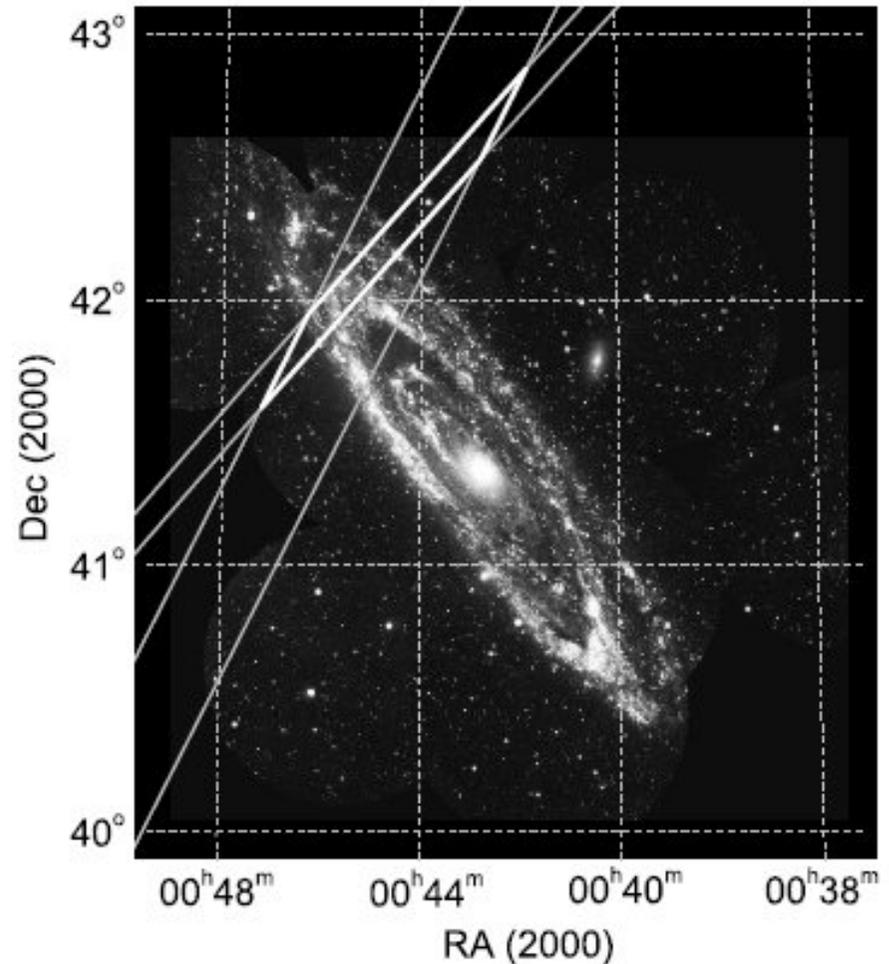
LIGOの感度

H1 DARM Noise. SensMon 21.5 Mpc. GPS 957935880.



GRB 070201

- GRB 070201
 - Short GRB
 - M31の腕を含む方向から到来
- 重力波検出されず
 - LIGO H1のデータ解析(180 s)
- M31におけるNS-NS、NS-BHの合体ではない
 - $m_1:1M_s-3M_s$, $m_2:1M_s-40M_s$
 - 99% CL
- 重力波エネルギー: 7.9×10^{50} erg以下 (if M31)
 - SGR (in M31)の可能性は排除しない



Crabパルサー

スピンダウンレートから放出される重力波の上限値が決まる

LIGOにより重力波は検出されなかった



重力波によるエネルギーの上限値はスピンダウンレートから決まる値の4%以下



背景重力波

初期宇宙からの重力波に対する新しい上限をつけた

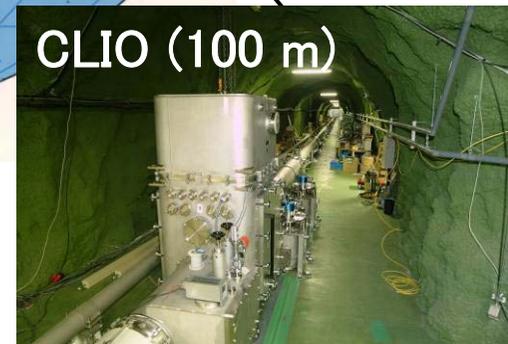
$$\Omega_{\text{GW}} < 6.9 \times 10^{-6}$$

ビッグバン元素合成や宇宙マイクロ波背景輻射から得られる間接的な限界を100 Hzにおいて上回る

(超)弦理論モデルや初期宇宙進化モデルに新たな制限を付けた

Abbott B P, et al., Nature, **460** (2009) 990

第1世代から第2世代へ

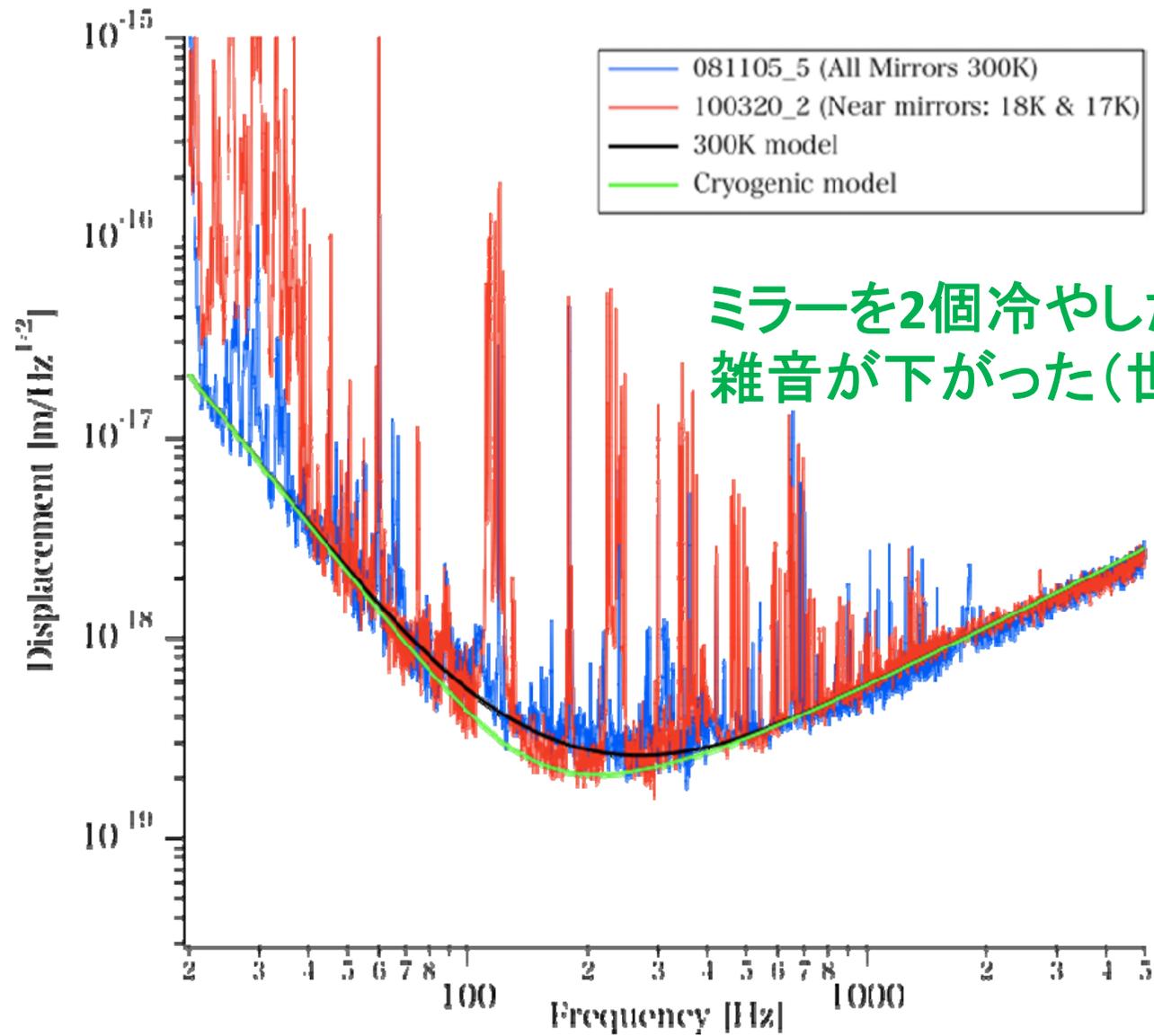


CLIO

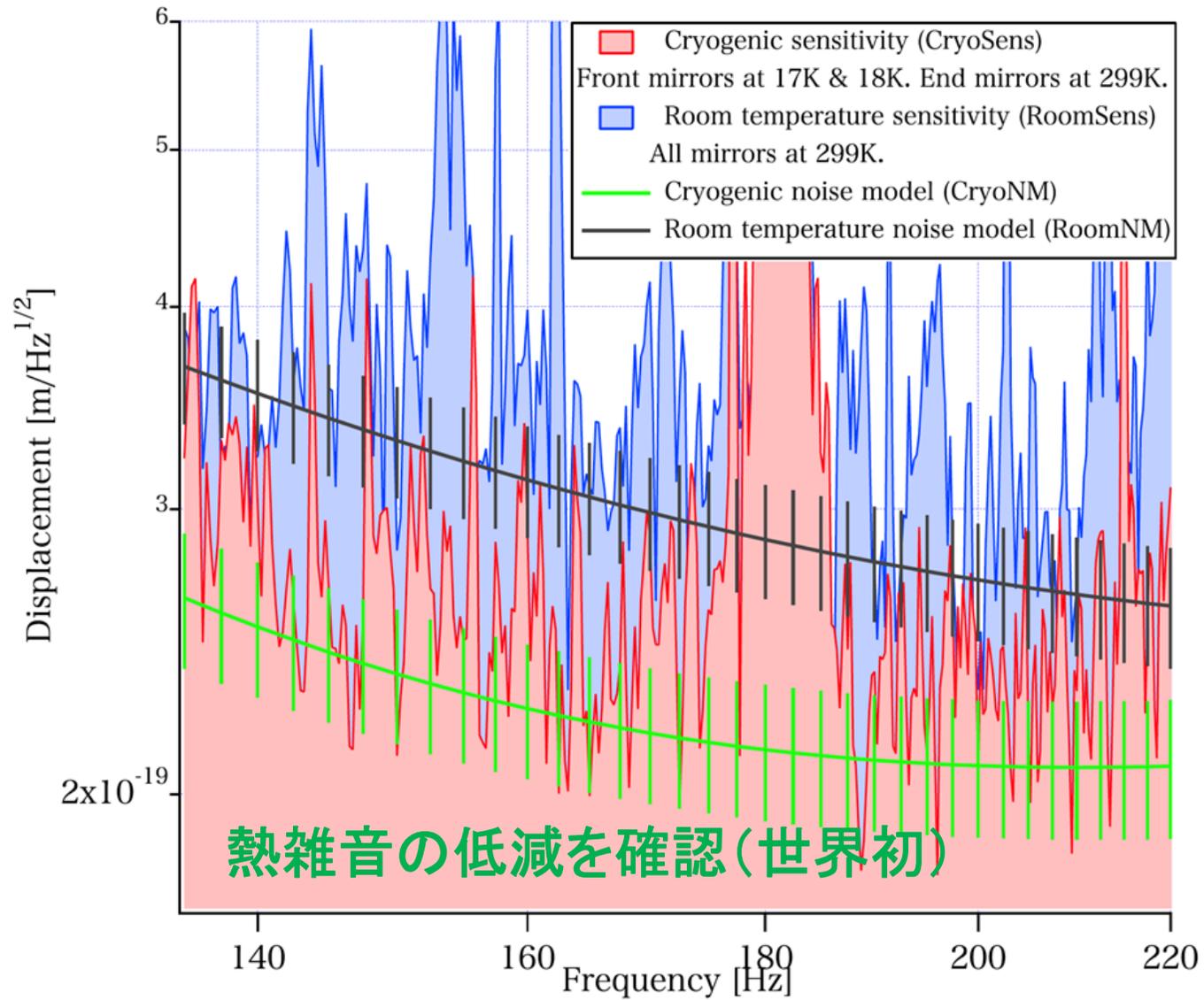
KAGRAの100 m低温プロトタイプ

- 低温化による熱雑音の低減実証(世界初)
- 地下の静かさの有利性を実

CLIOの感度



CLIOの感度



KAGRA

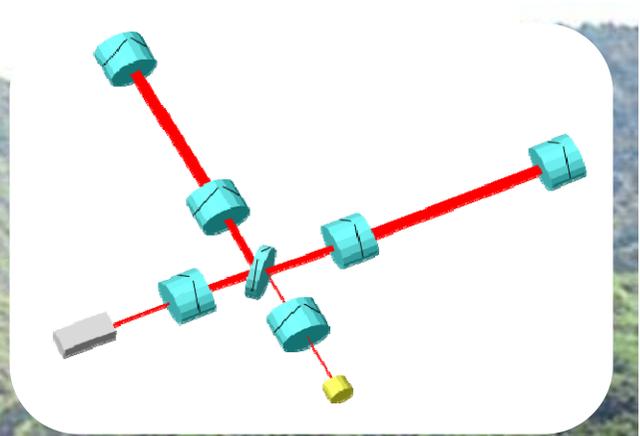
重力波を検出し
重力波天文学を創成する

神岡





低温ミラー



帯域可変型
干渉計

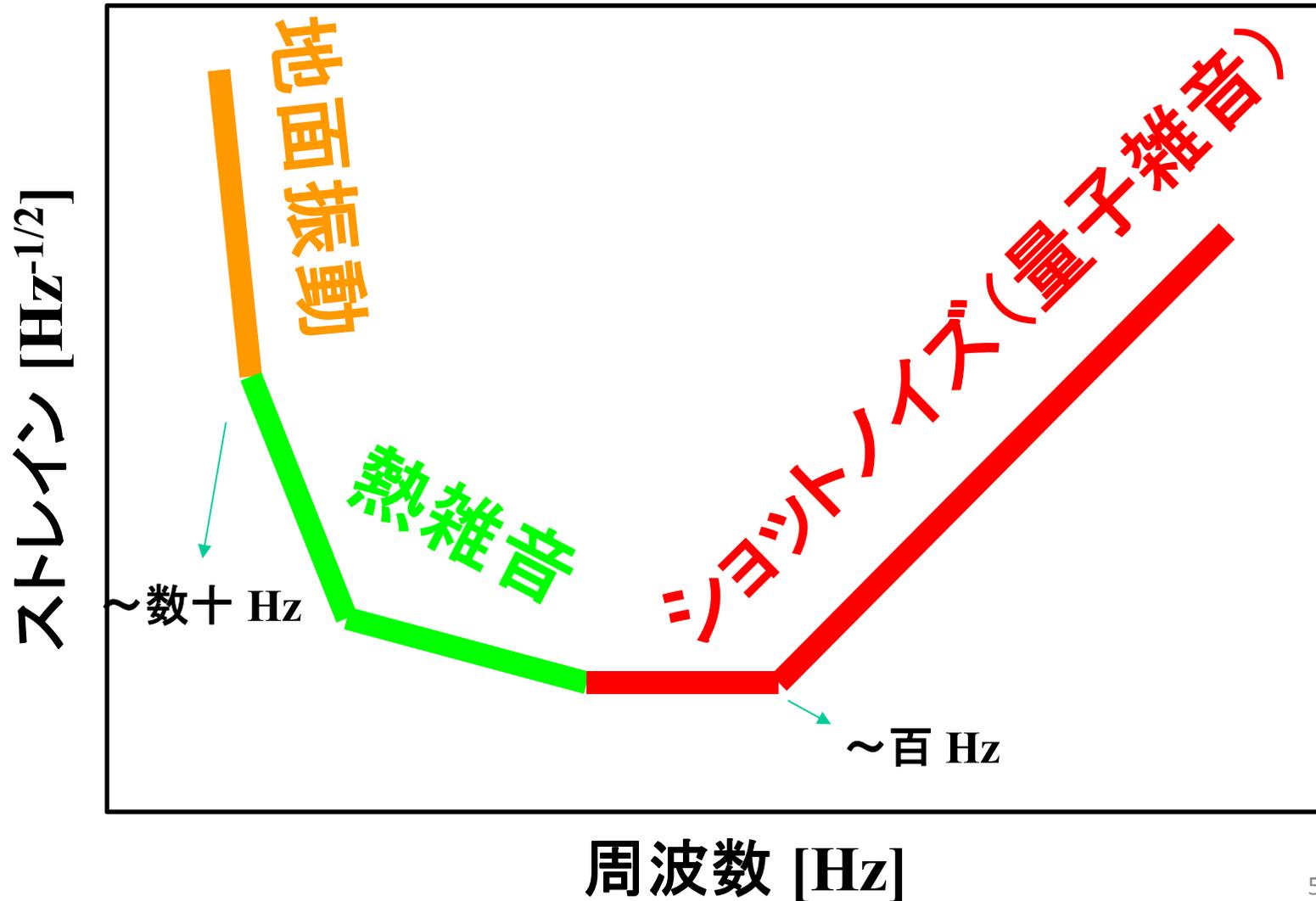
KAGRAの特徴



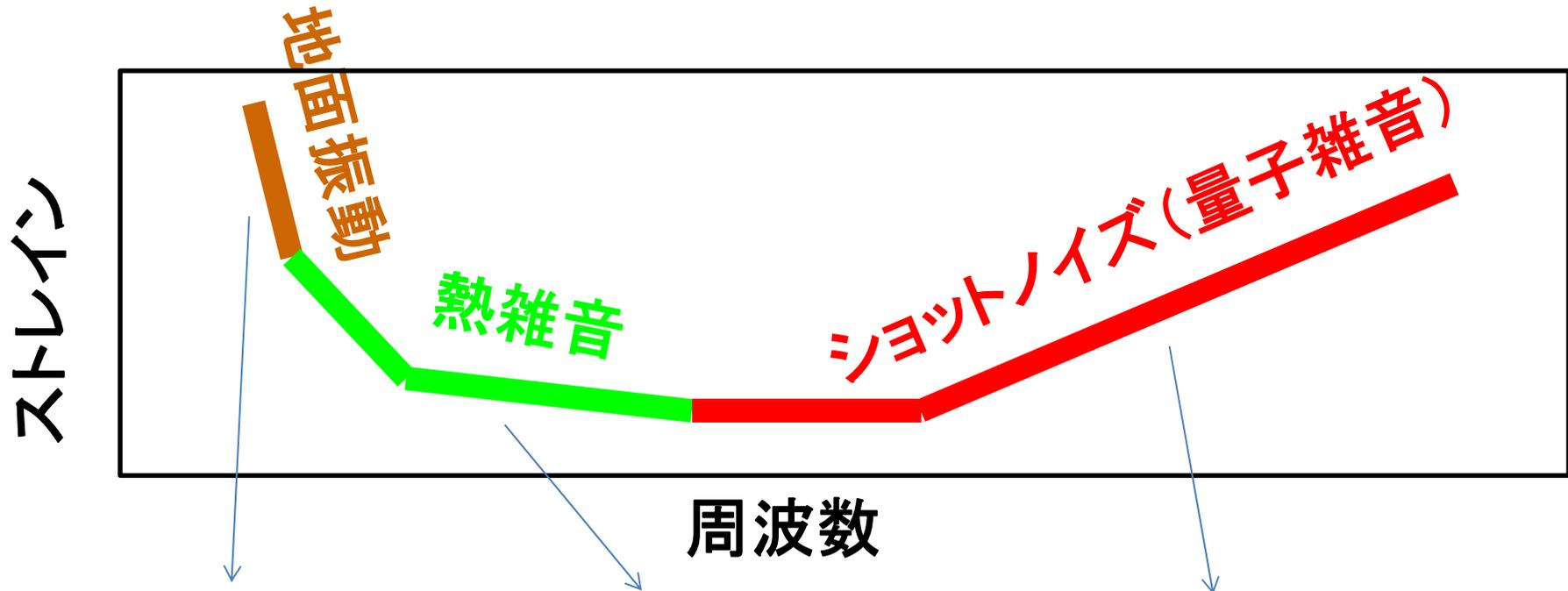
地下



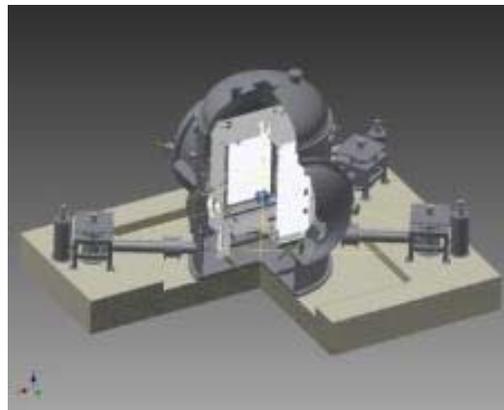
干渉計の感度を決める3つの雑音



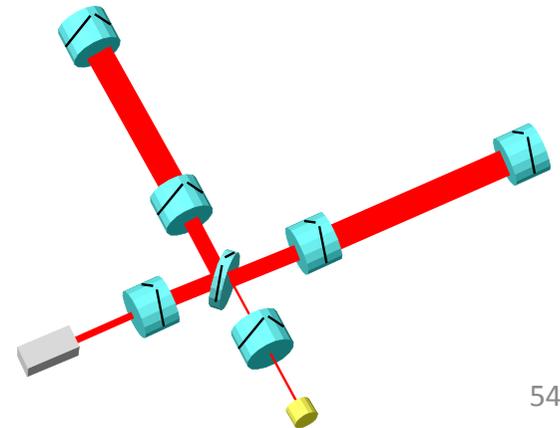
雑音対策



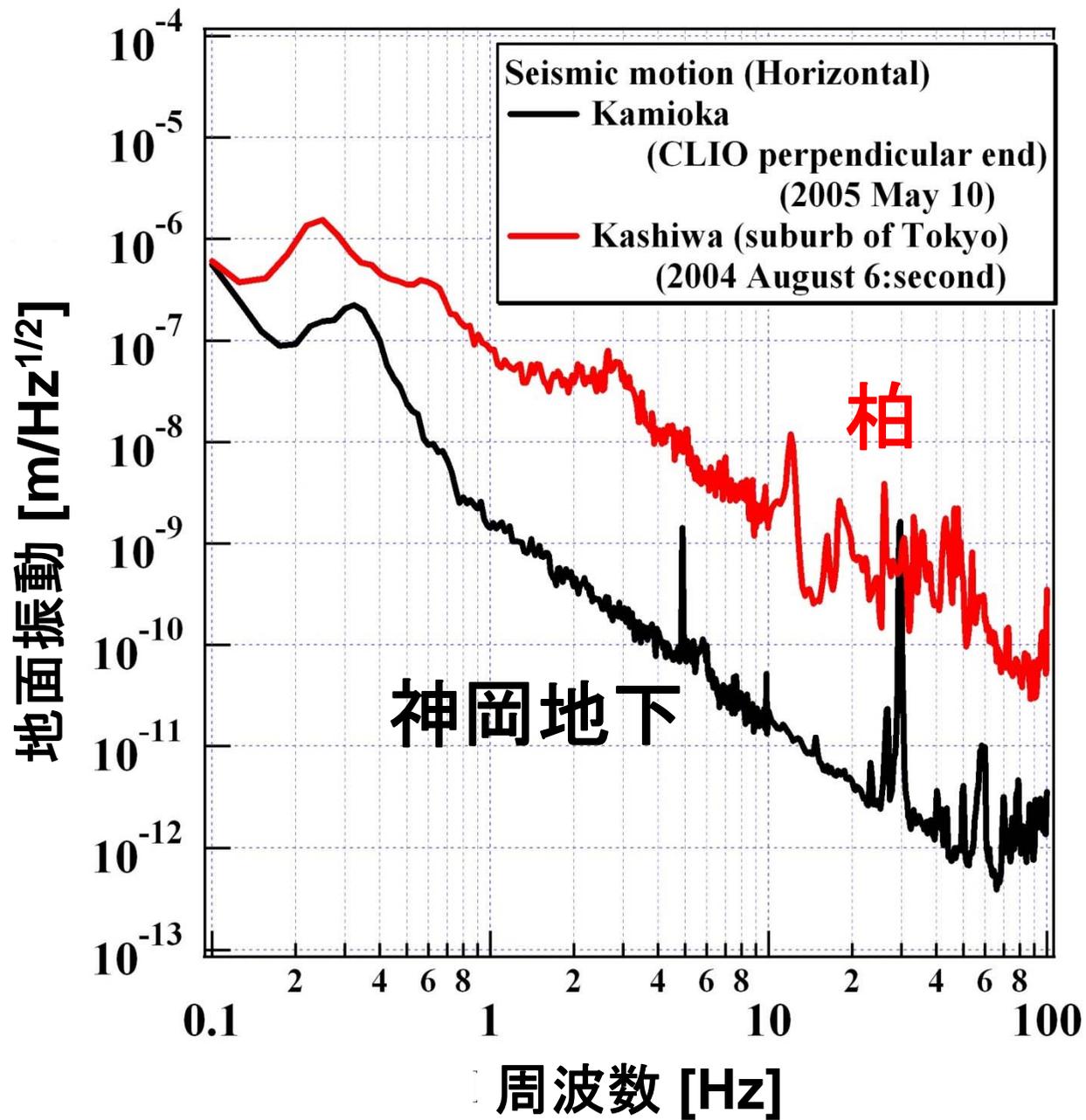
神岡地下



低温ミラー



レゾナント・サイドバンド・
エクストラクション



トンネル (2階)

チェンバー

倒立振り子

GAS フィルター

チェンバー

鏡

トンネル (1階)

超高防振システム

鏡の振動

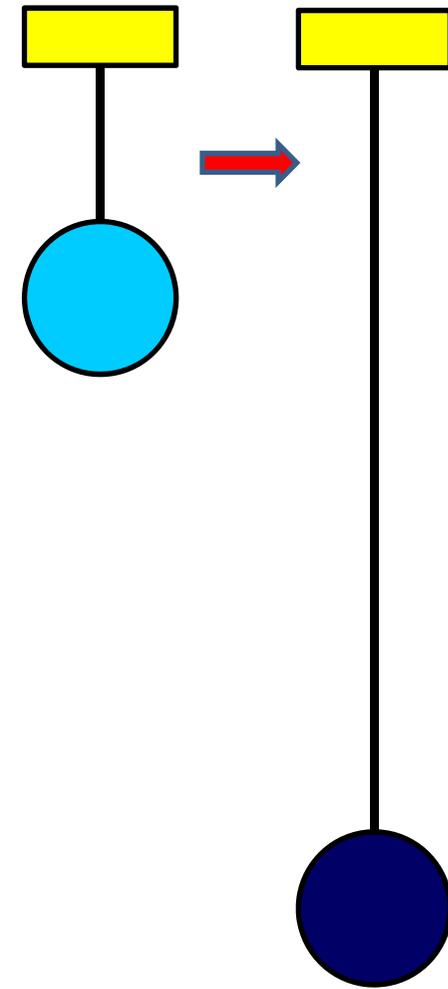
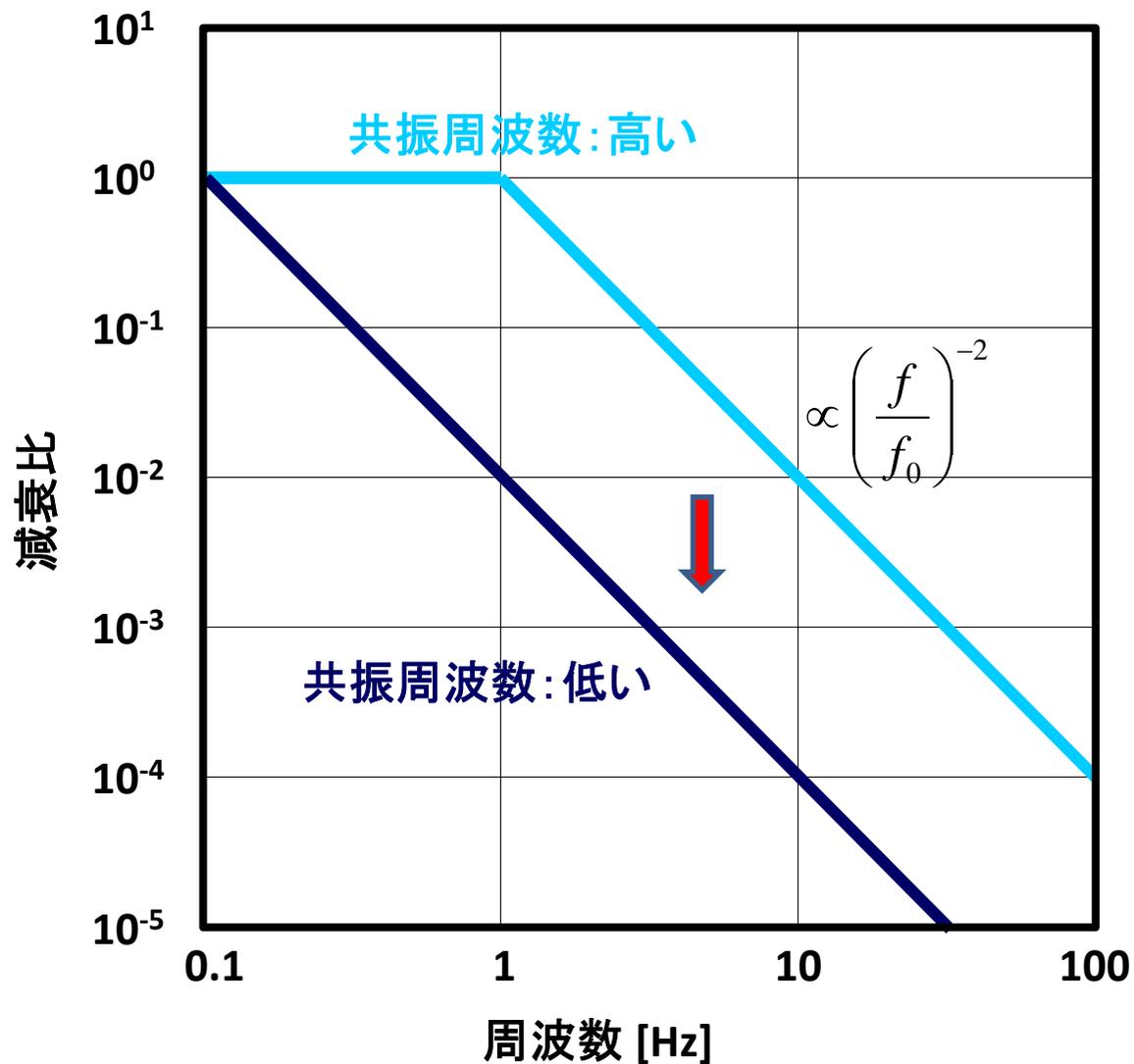
$10^{-10} \text{ mHz}^{-1/2}$



$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

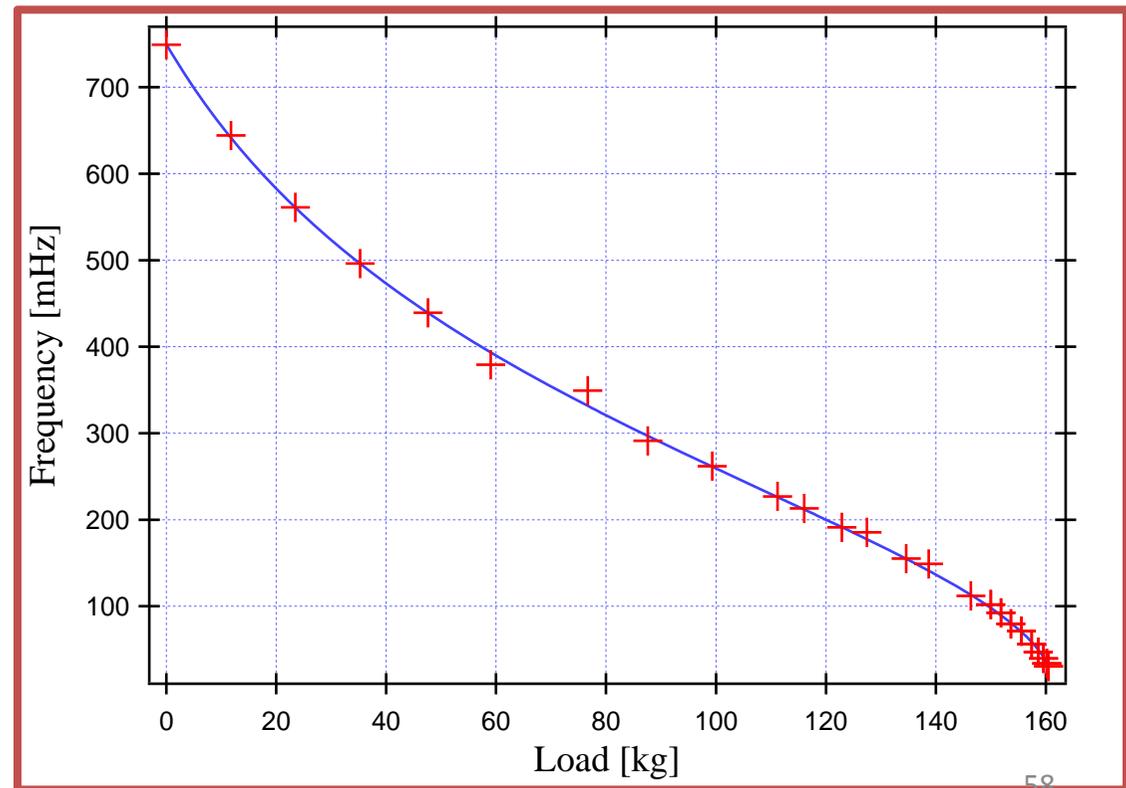
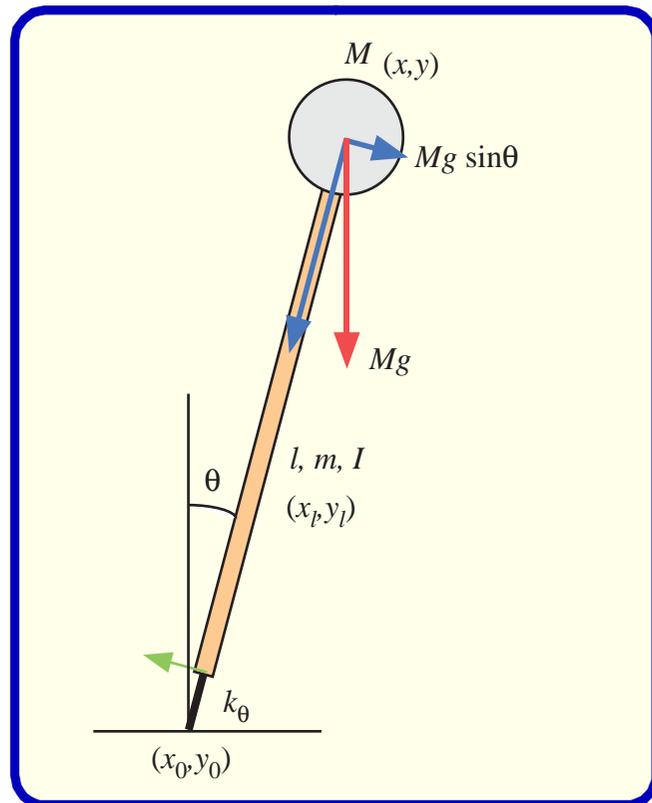
@10 Hz

共振周波数を下げる



倒立振り子

復元力= 金属のバネ力+ 重力の反バネ力
⇒ 共振周波数の低減



垂直方向の防振

垂直方向の揺れがビーム方向の揺れにカップル

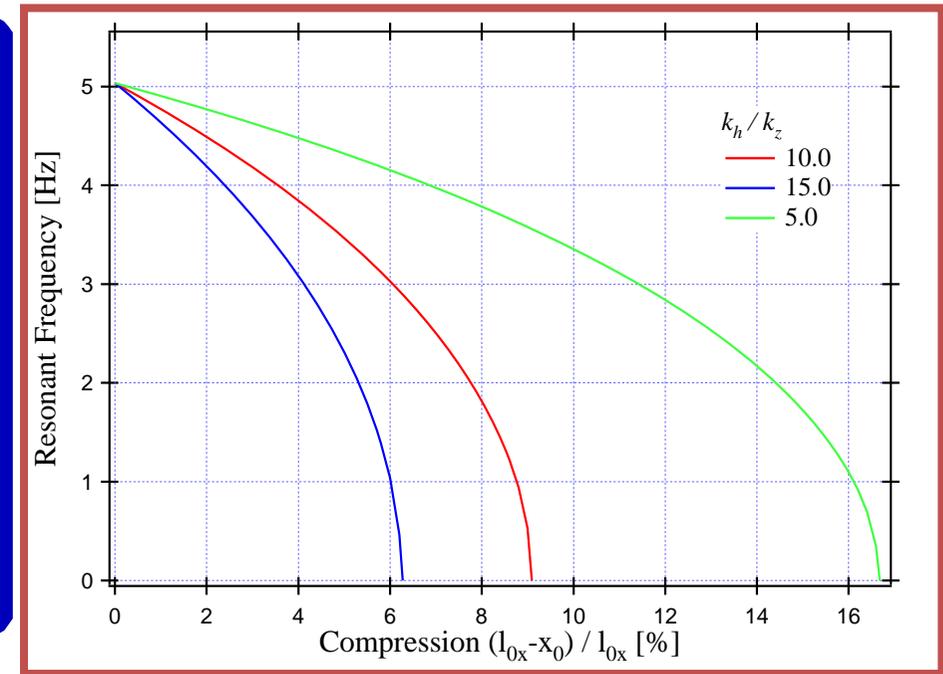
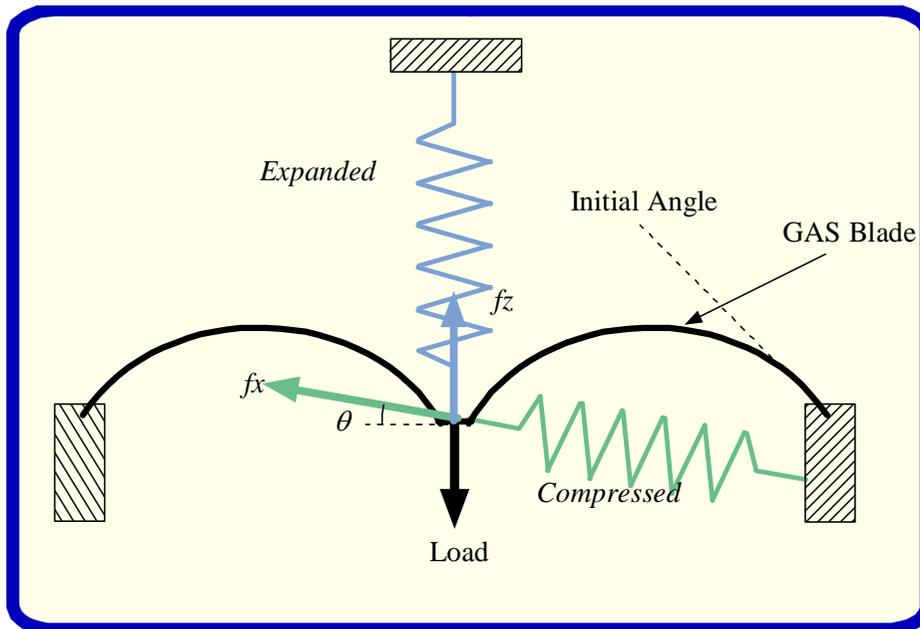
- 地球の曲率
- 機械系の非対称性
- トンネルの傾き(排水のため)

→ **垂直方向の防振も必要**

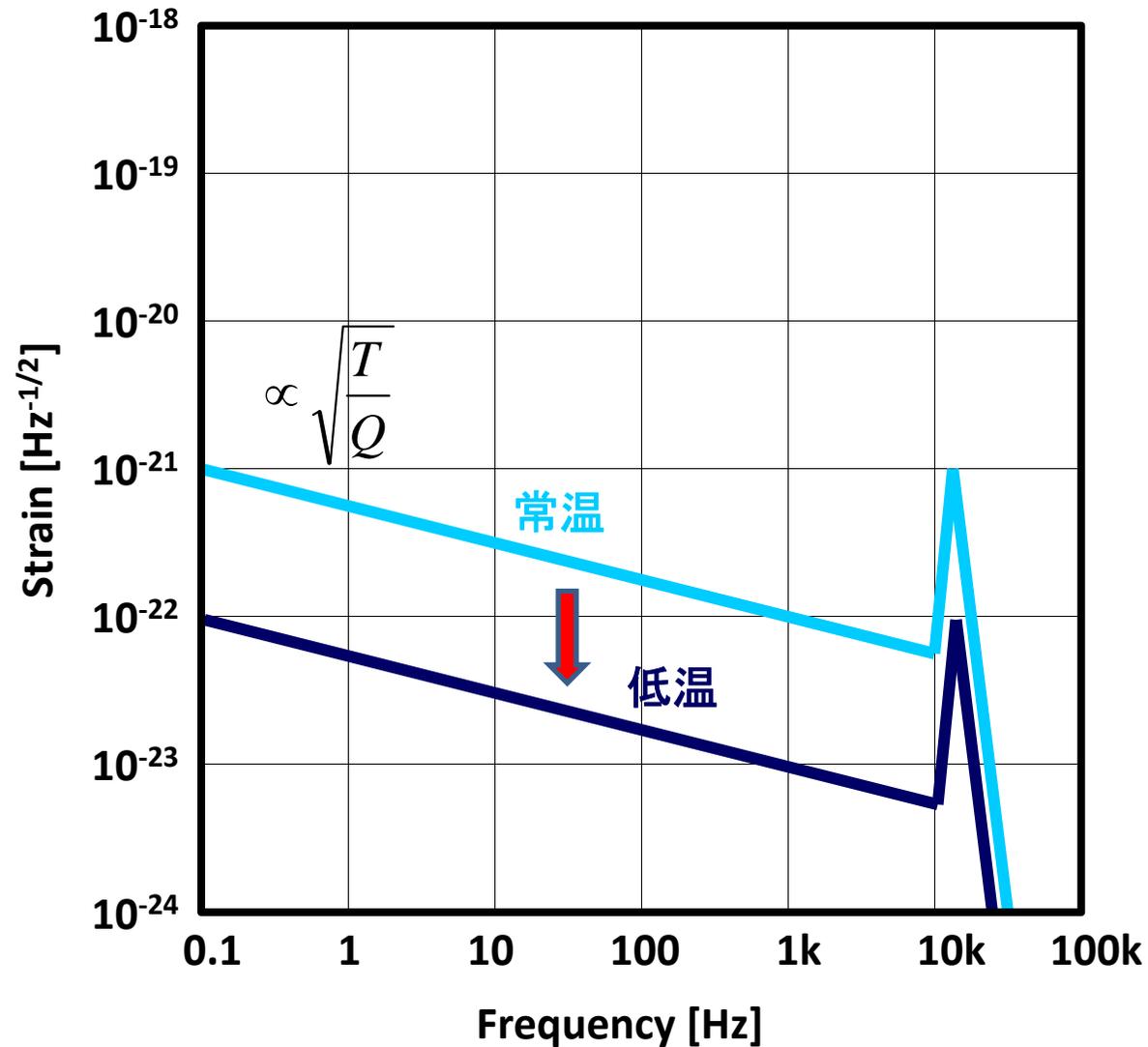
Geometric Anti-Spring (GAS) Filter

復元力= ブレードのバネ力+ 押し付けることにより生じる反バネ力

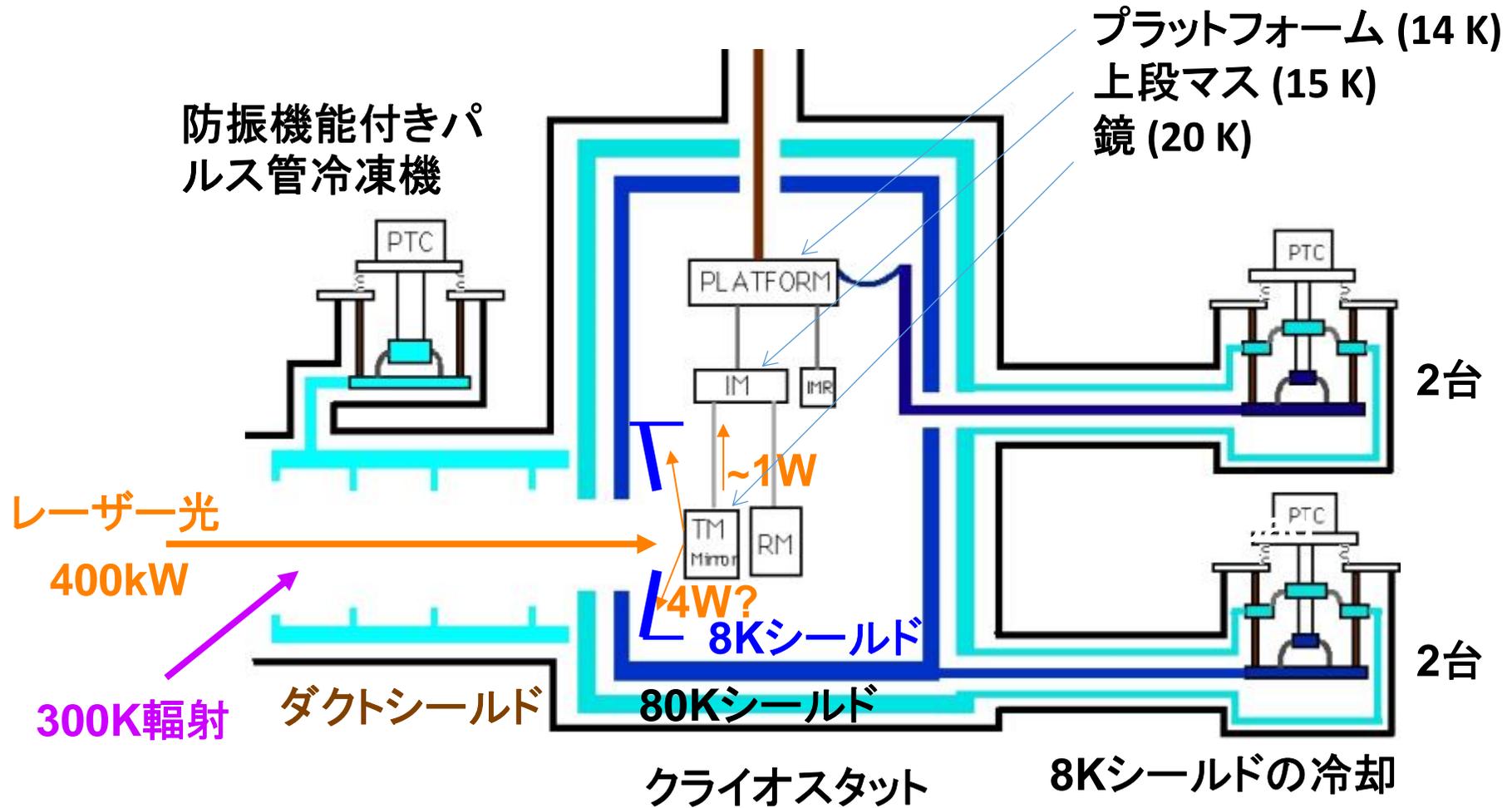
→ **共振周波数の低減**



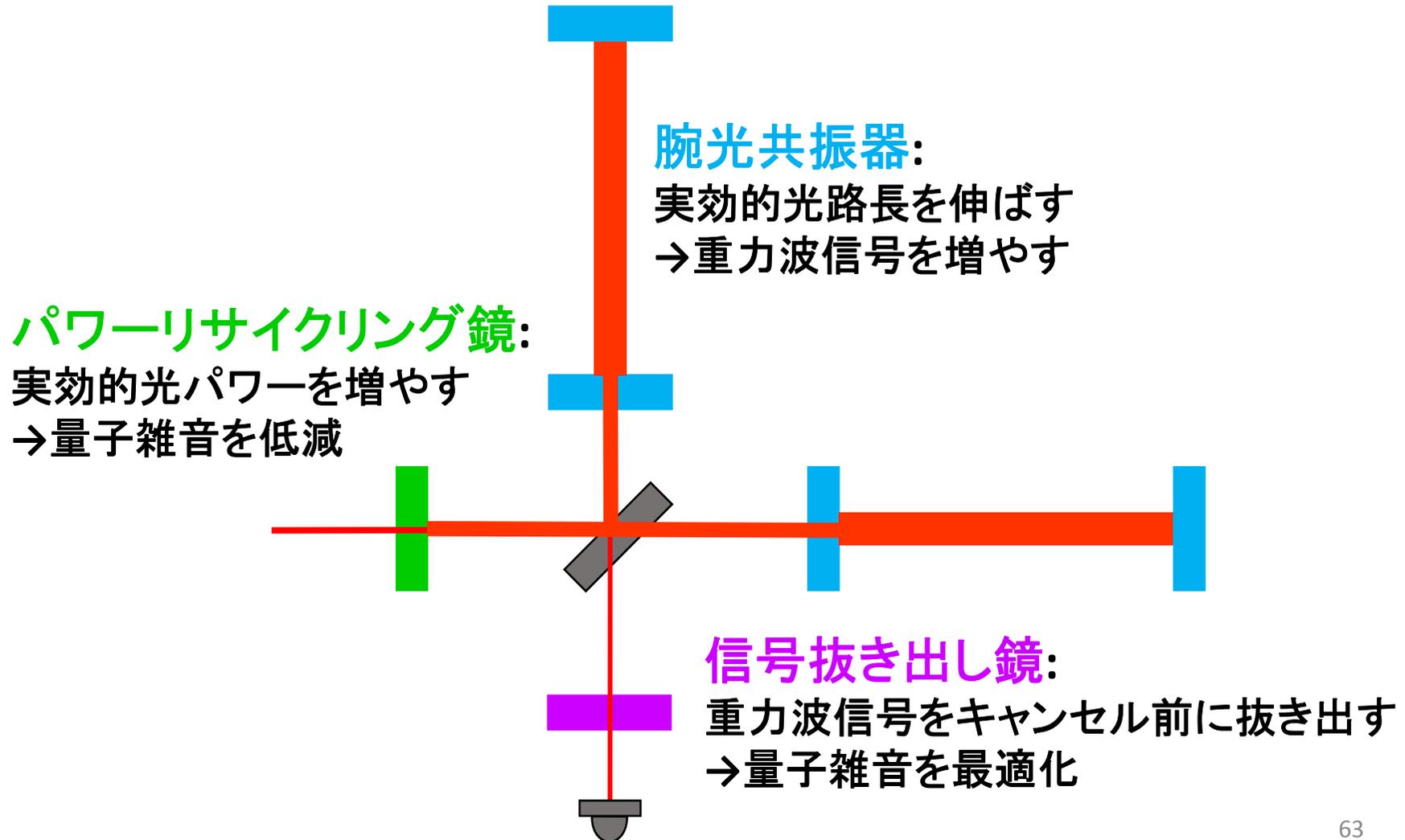
低温にして熱雑音を下げる



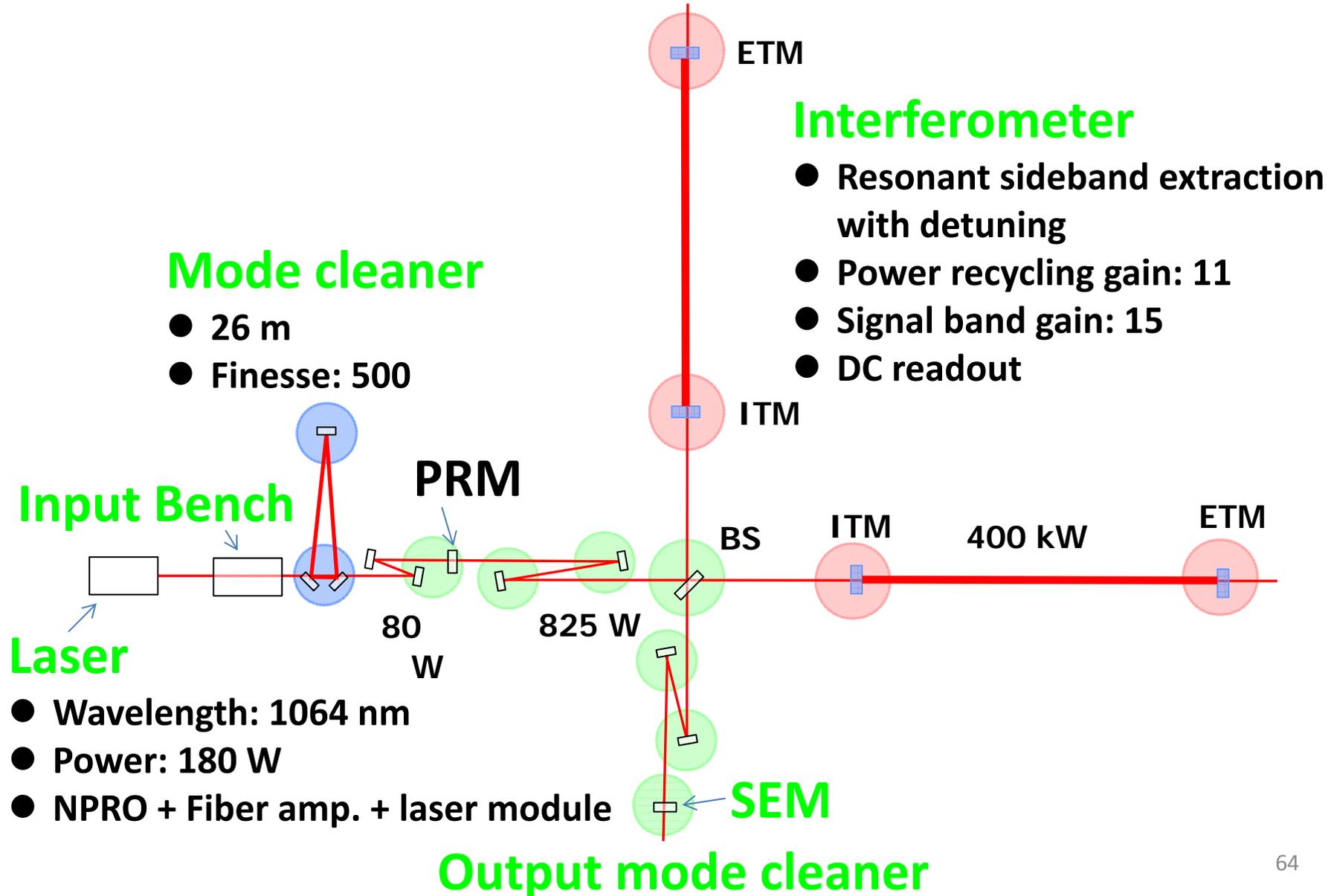
低温システム



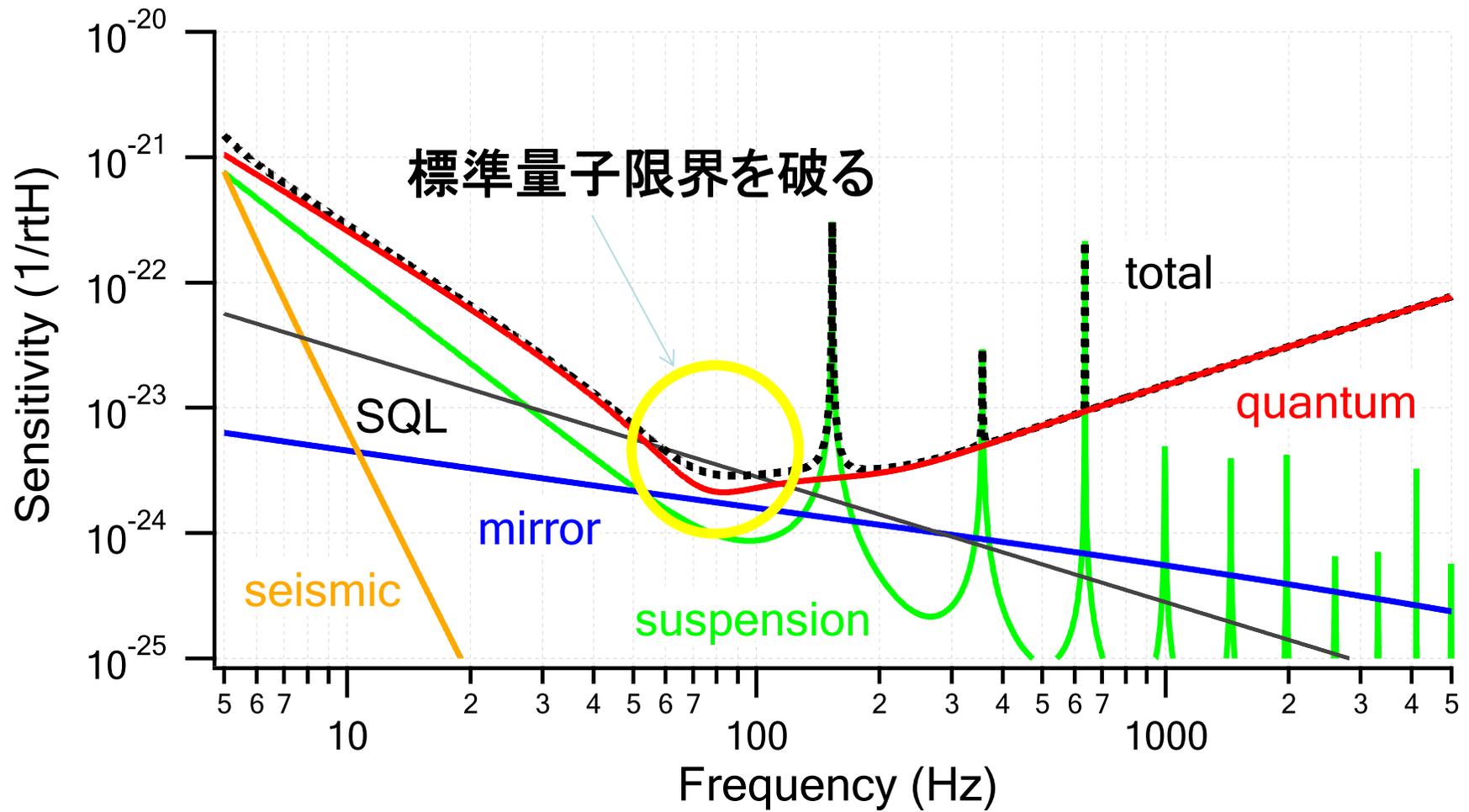
レゾナント・サイドバンド・エクストラクション



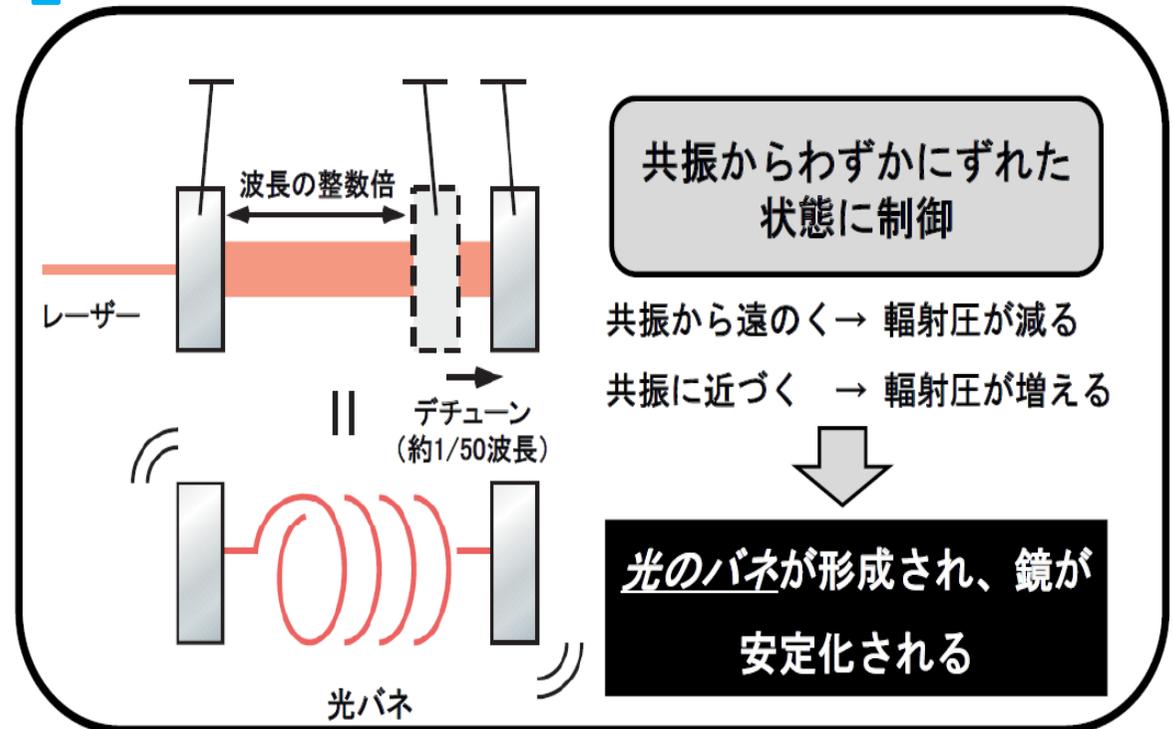
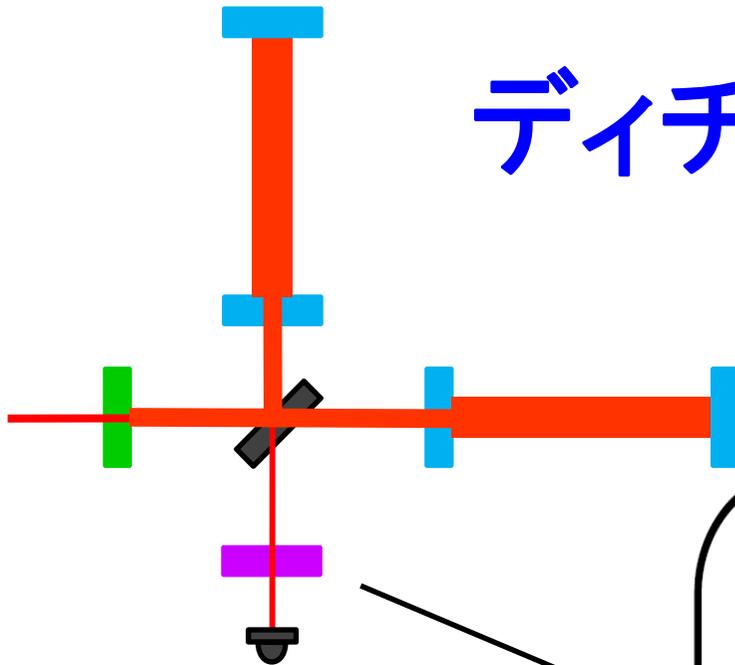
KAGRAの光学系



KAGRAの目標感度



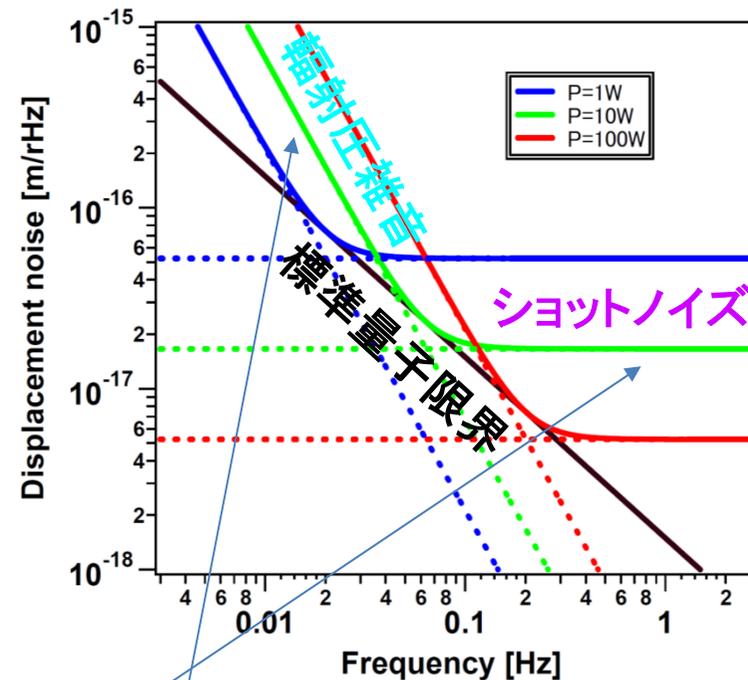
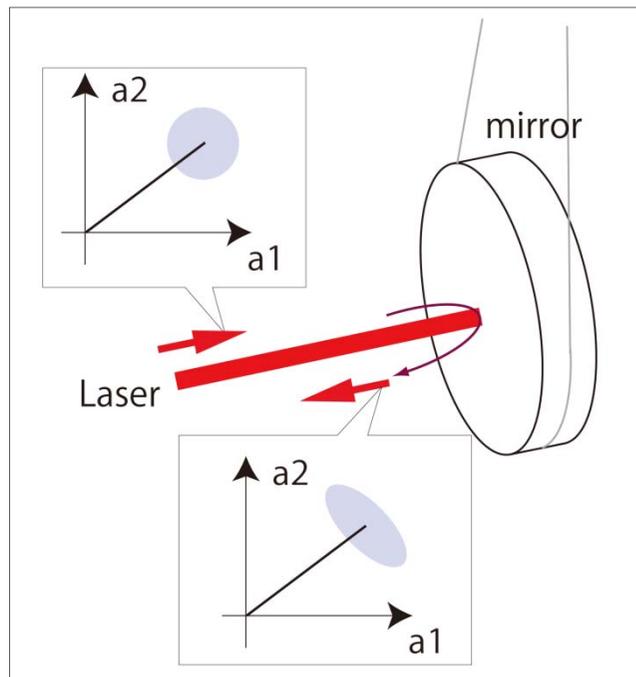
ディチューニングと光バネ



標準量子限界を超える感度を得る原理

ポンディロモーティブスキージング

入射光: (強度揺らぎ) + (位相揺らぎ)



反射光: (元の強度揺らぎ)

+ (元の強度揺らぎによって引き起こされる位相揺らぎ)

+ (元の位相揺らぎ)

ポンディロモーティブスキューミング

入射光: (強度揺らぎ) + (位相揺らぎ)

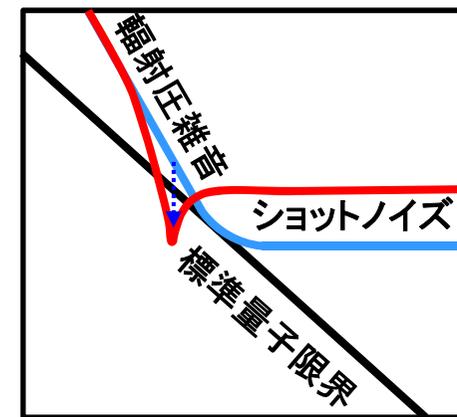
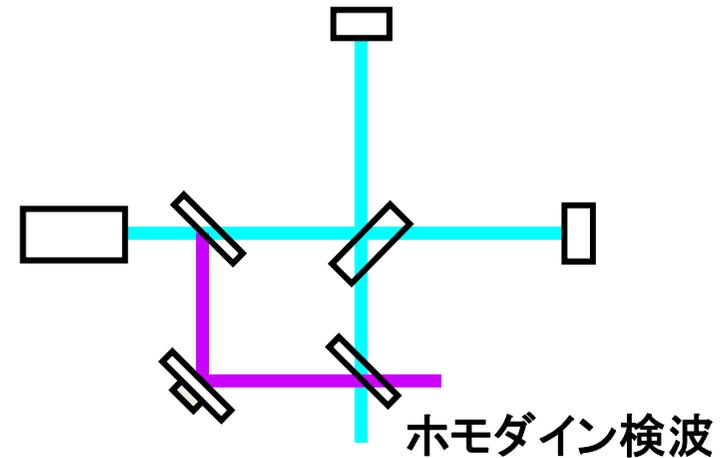
ホモダイン検波により
キャンセルできる

→ 輻射圧雑音を消せる
→ 標準量子限界を破る

反射光: (元の強度揺らぎ)

+ (元の強度揺らぎによって引き起こされる位相揺らぎ)

+ (元の位相揺らぎ)



中性子星連星の合体からの重力波

検出レンジ: ~7億光年

1銀河あたりの合体頻度: ~1万年に1回



検出頻度: ~1年に10回

⇒ ショートガンマ線バーストの正体解明

検出が期待される他の重力波源

- **ブラックホール連星の合体**：太陽質量の20倍程度で60億光年遠方、年回0.4～1000回？
- **超新星爆発**：330万光年遠方？、数十年に1回
- **パルサー**：クラブ、ベラ、銀河系内の見えていないパルサー
- **初期宇宙**（標準モデルでないもの）
- **謎の天体**（自然は我々を驚かすのが好き！）

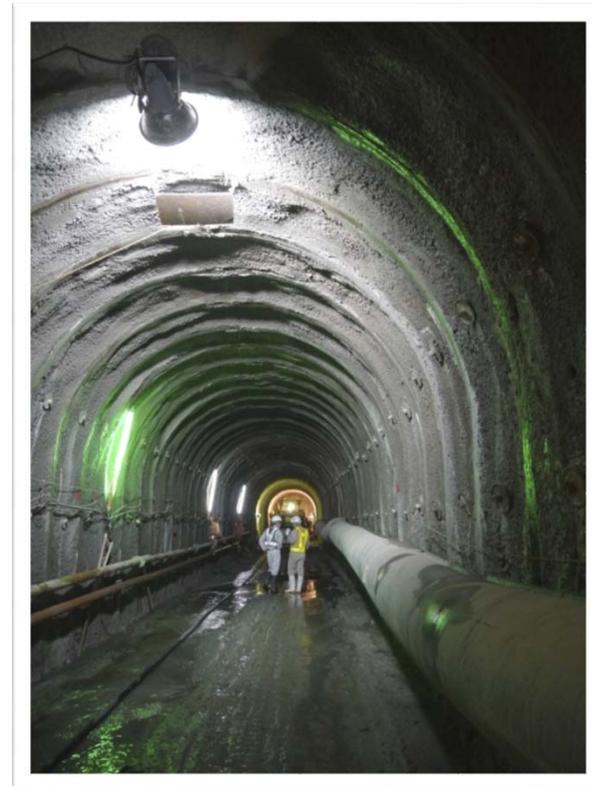
トンネル3Dモデル(動画)



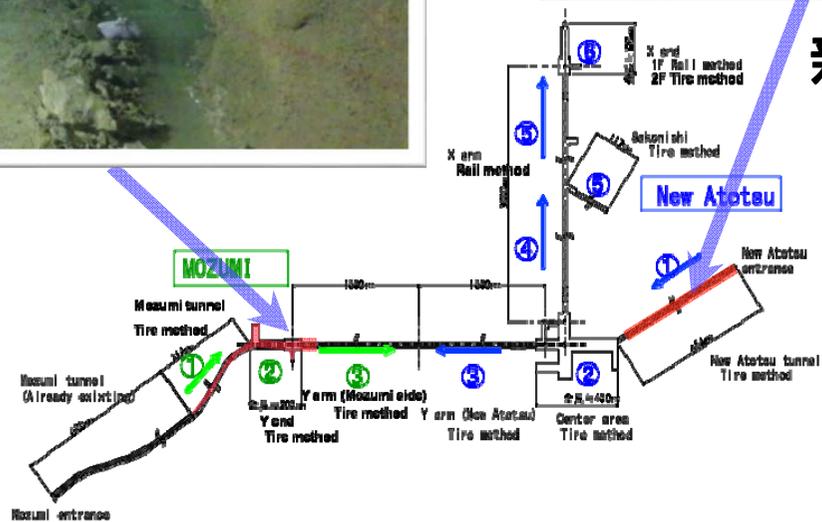
トンネル掘削



Y-エンド



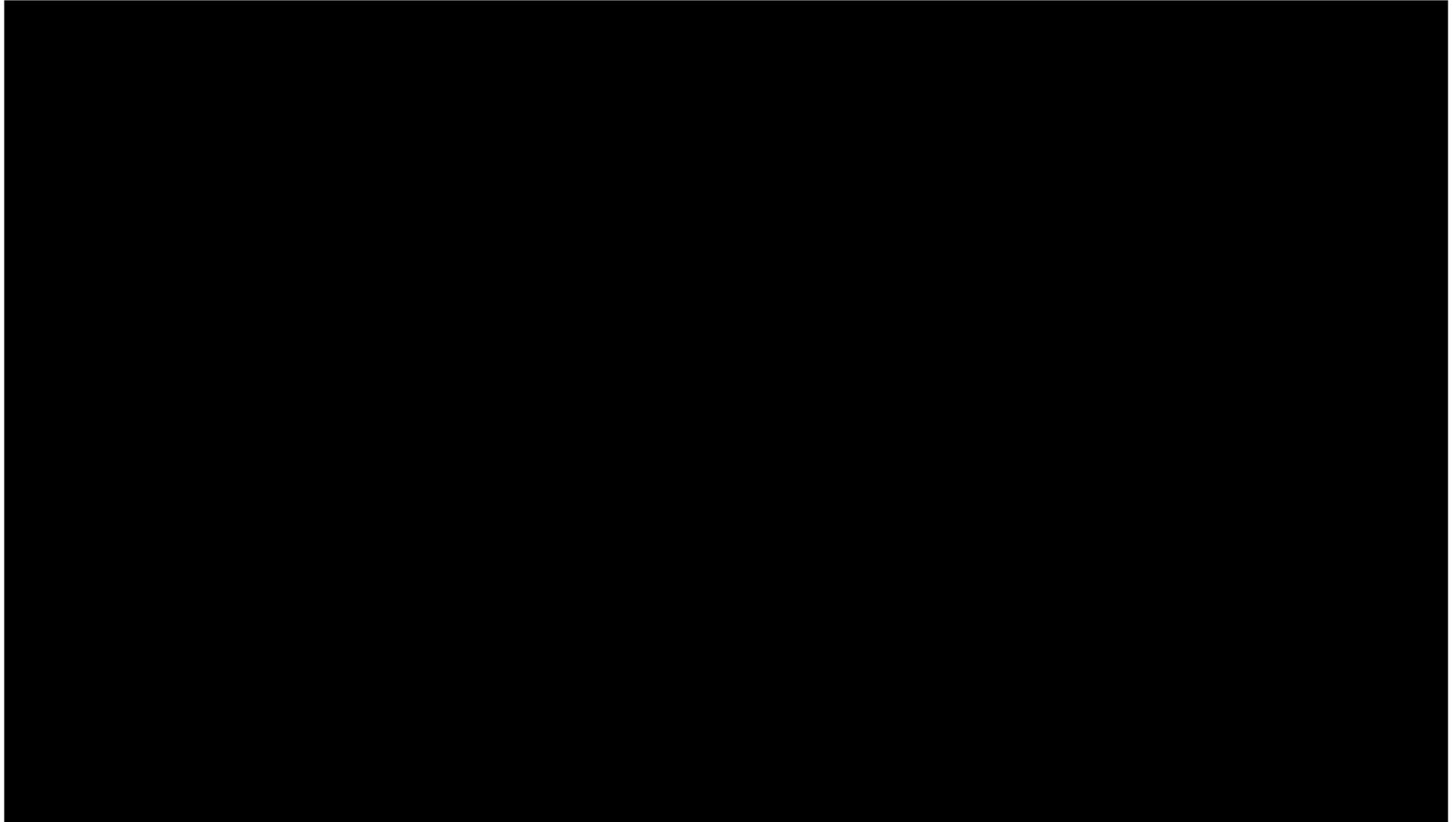
新跡津



Yアームの貫通(動画)



Yアームの貫通(動画)



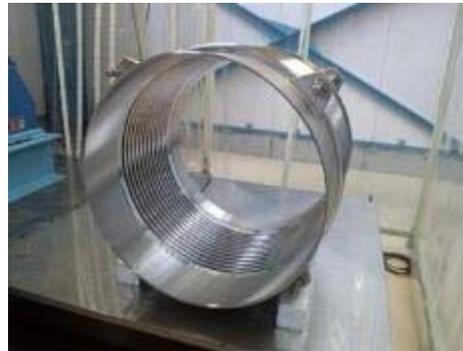
真空パイプ

12m, Φ 800mm

2012 受領



プレス



ベローズ



バイキング



試験



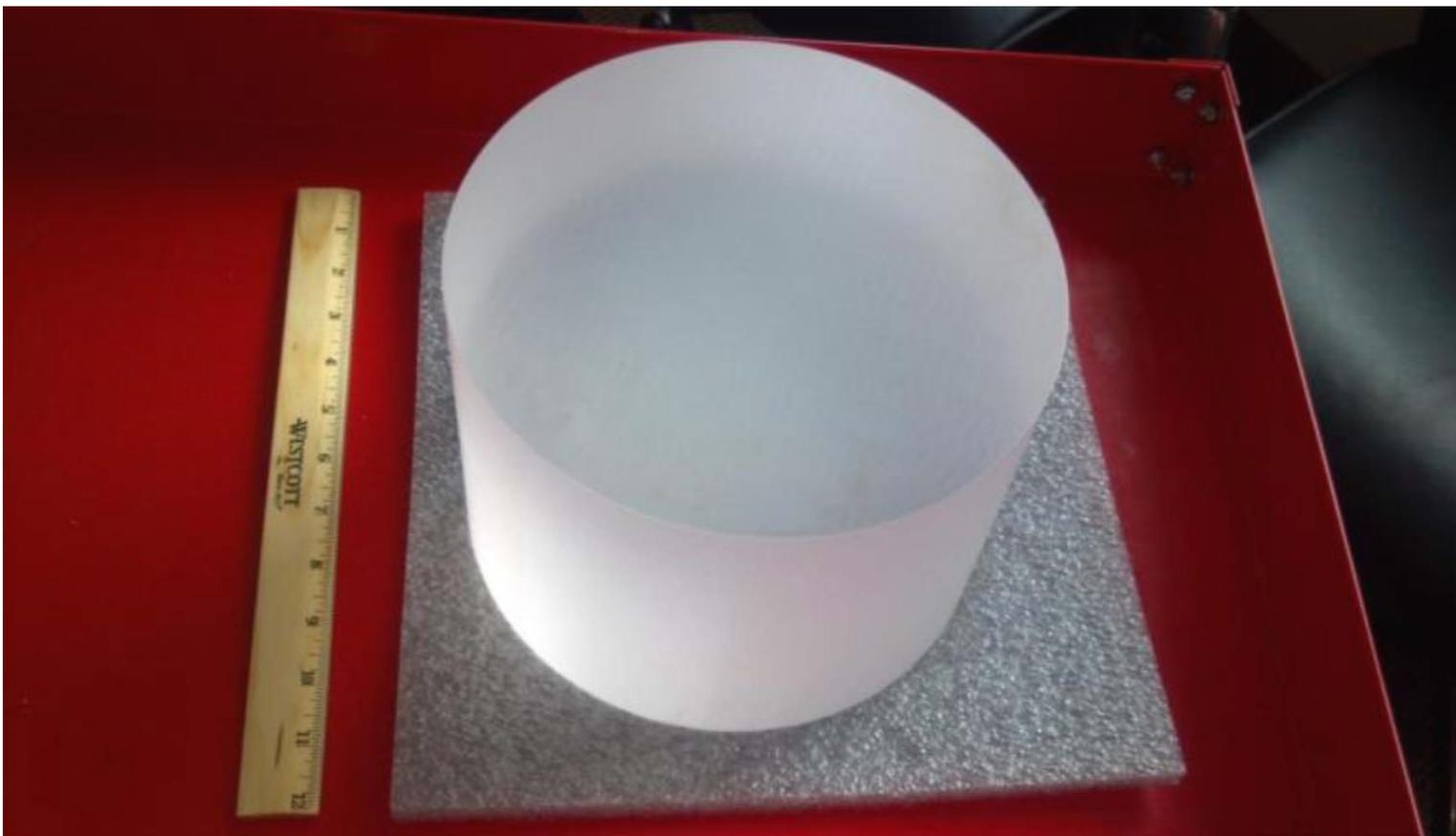
神岡への輸送

クライオスタット

製造とテスト完了



サファイア鏡

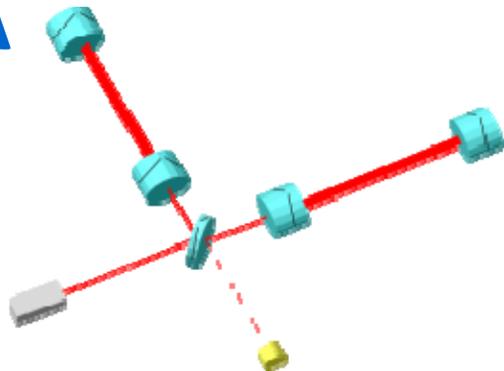


Φ220mm, t 150mm

スケジュール

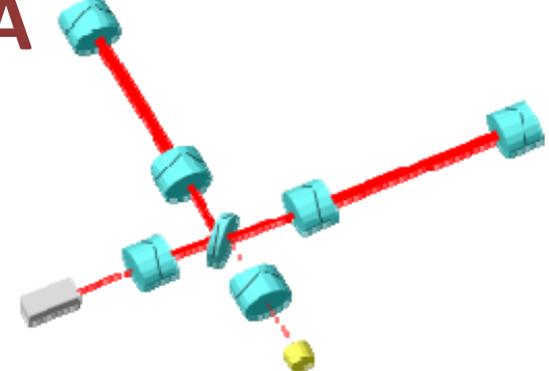
暦年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
プロジェクト開始	→								
トンネル掘削			■ (震災のため1年遅れ)						
initial-KAGRA	■								
						観測 ■			
baseline-KAGRA							■ 先進的干渉計、超防振システム		
								■ 低温システム	
観測 & 調整									→

iKAGRA



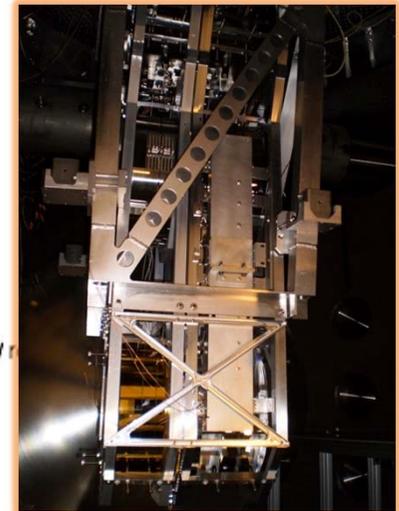
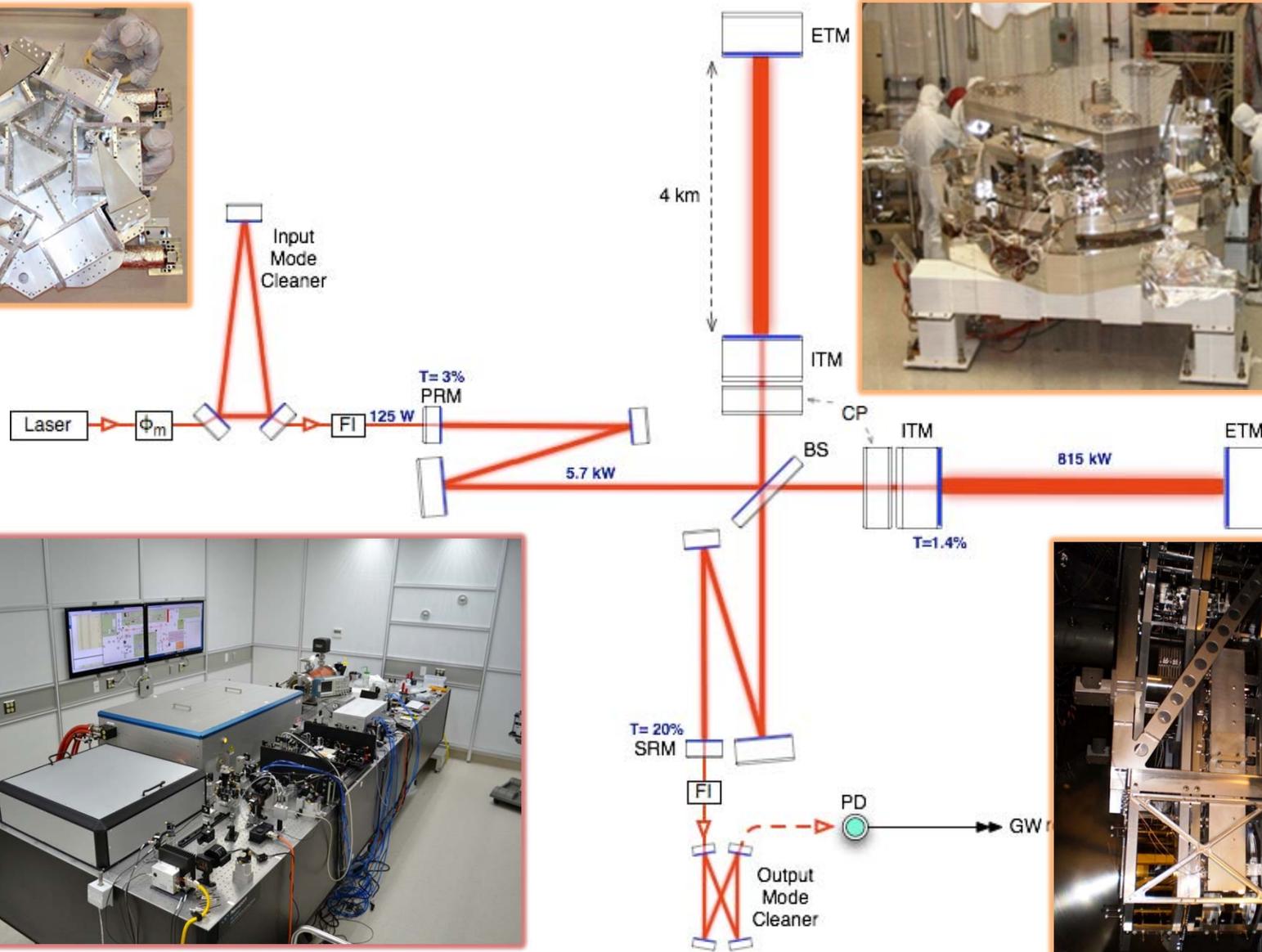
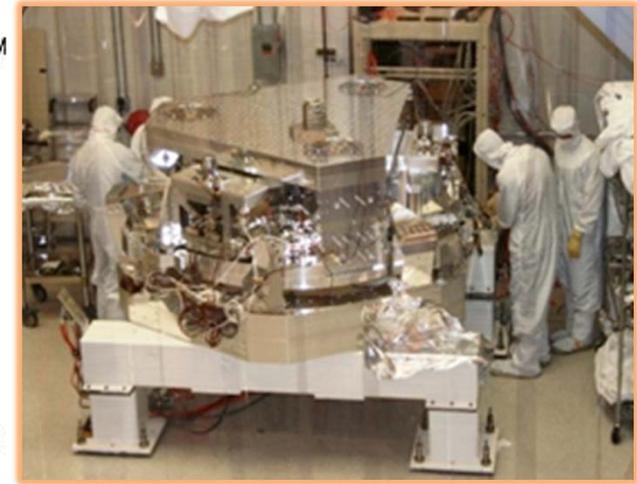
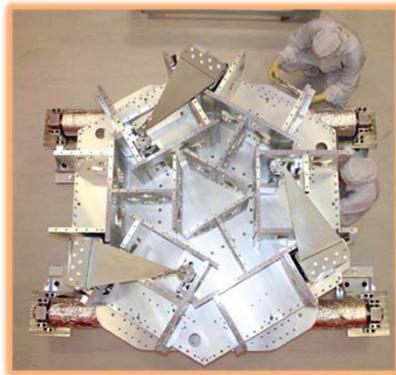
- 光共振器型干渉計
- 常温
- 簡易防振システム

bKAGRA



- 先進的防振系
- 低温
- 超高防振システム

ADVANCED LIGO



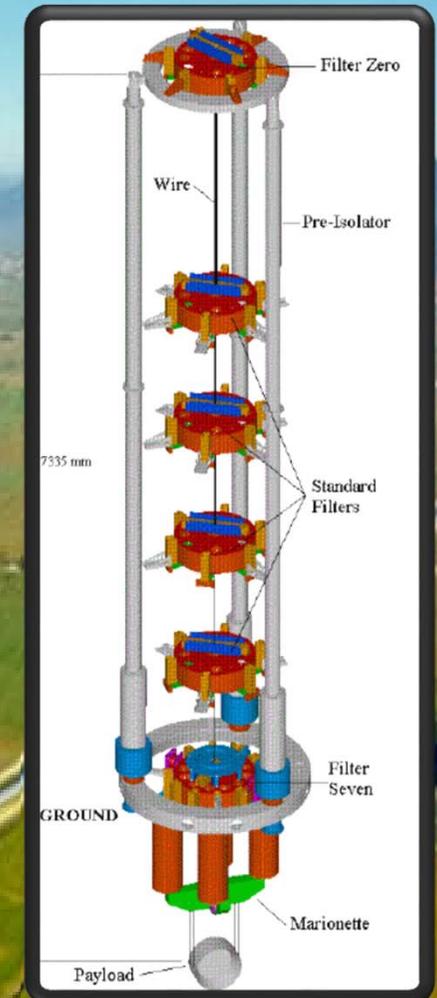
現状

(LIGO Livingston Observatory)

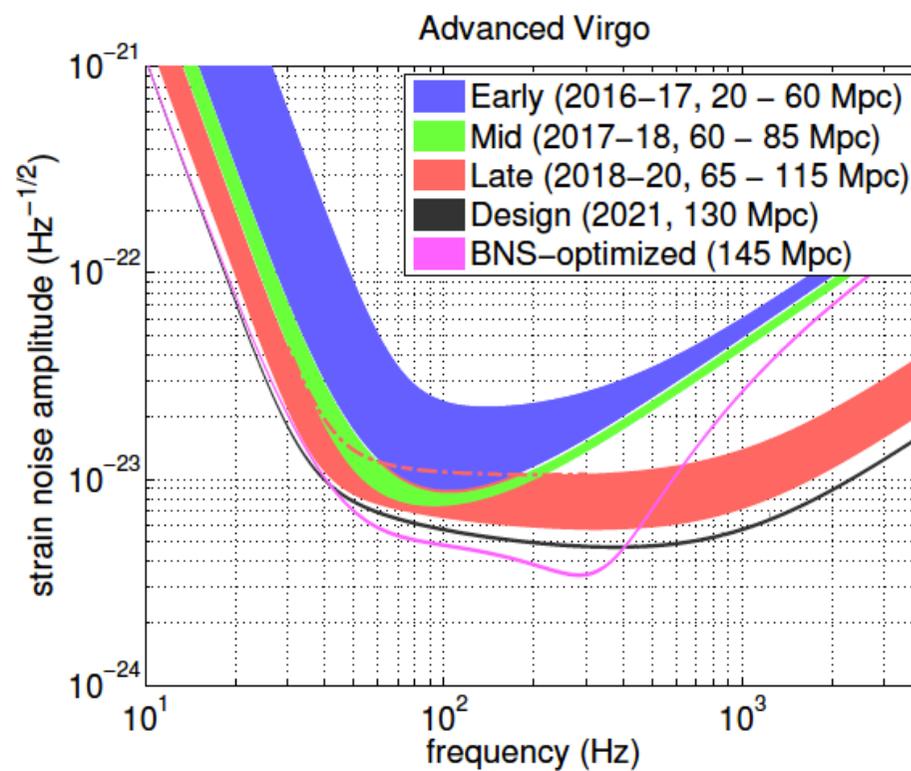
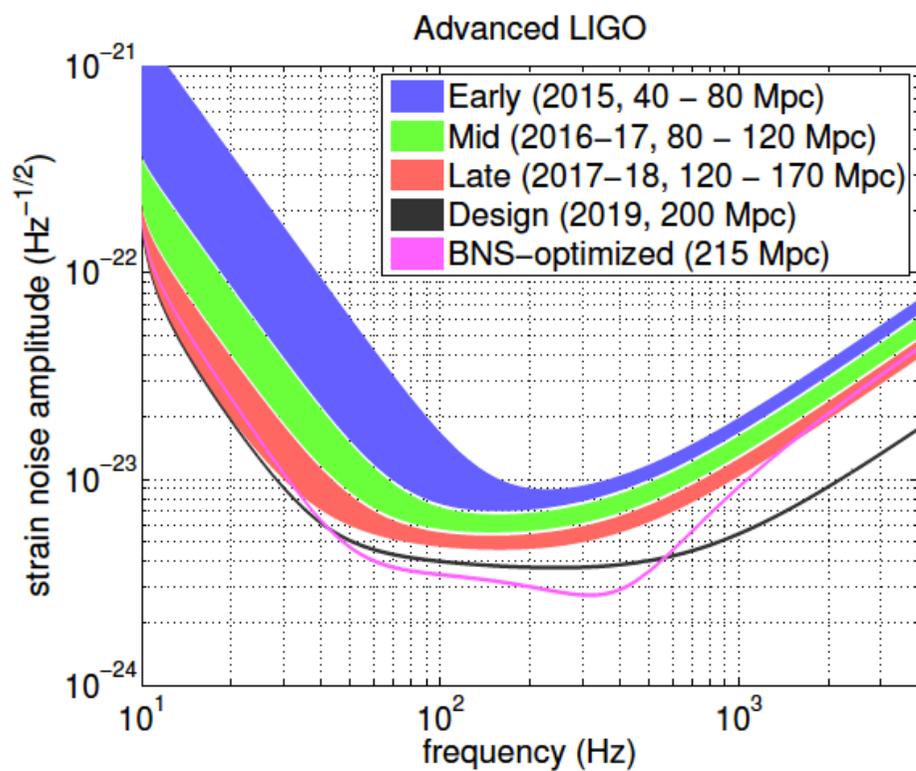
- インストレーションが全て完了
- 中心部分の干渉計の調整完了
- 両アームともに単独でのロックに成功
- グリーンロックのためのコーティングが失敗



Advanced Virgo



感度予想



Einstein Telescope (ET)

ヨーロッパの共同計画

- アーム長 : 10 km
- 鏡 : 低温シリコン (?)
- 帯域 : 3 Hz – 10 kHz
- 目的 : 重力波の頻繁な検出による宇宙の探査

イラスト : NIKHEF

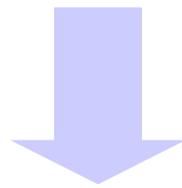
干渉計を宇宙に持っていくと もっと長くできる

- 信号が増える

- 重力波と光の相互作用の時間が長くなるため
- ただし高周波では信号のキャンセルが起こる

- ノイズが減る

- 地面振動や重力場の揺らぎノイズが小さい

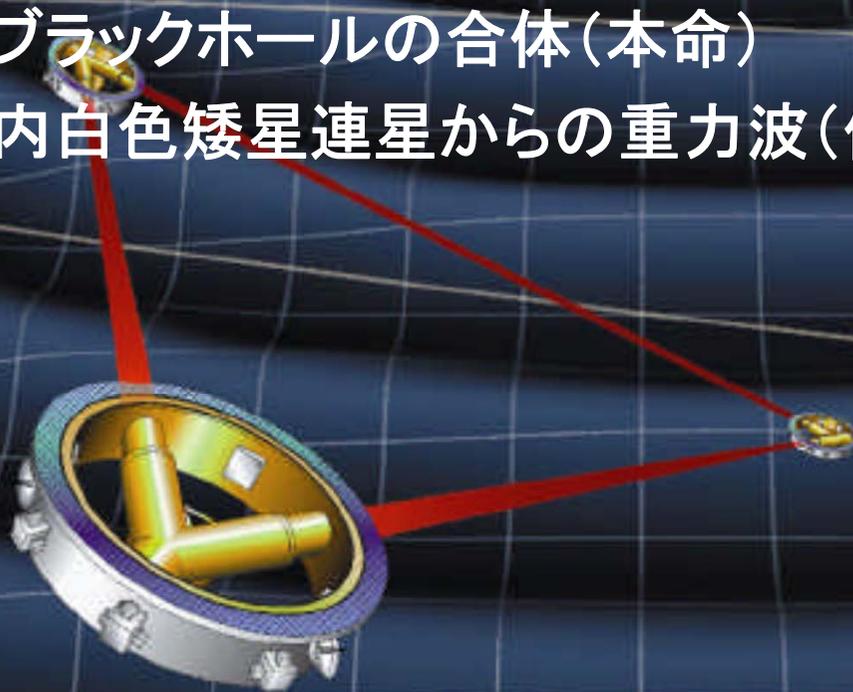


低周波で感度がよくなる

しかも、期待できる重力波信号が大きい

eLISA

- ESAとNASAの共同計画
- アーム長: 100万km
- 帯域: 1 mHz – 100 mHz
- 目的:
 - 巨大ブラックホールの合体(本命)
 - 銀河内白色矮星連星からの重力波(保険)



スペース重力波アンテナ
DECIGO計画



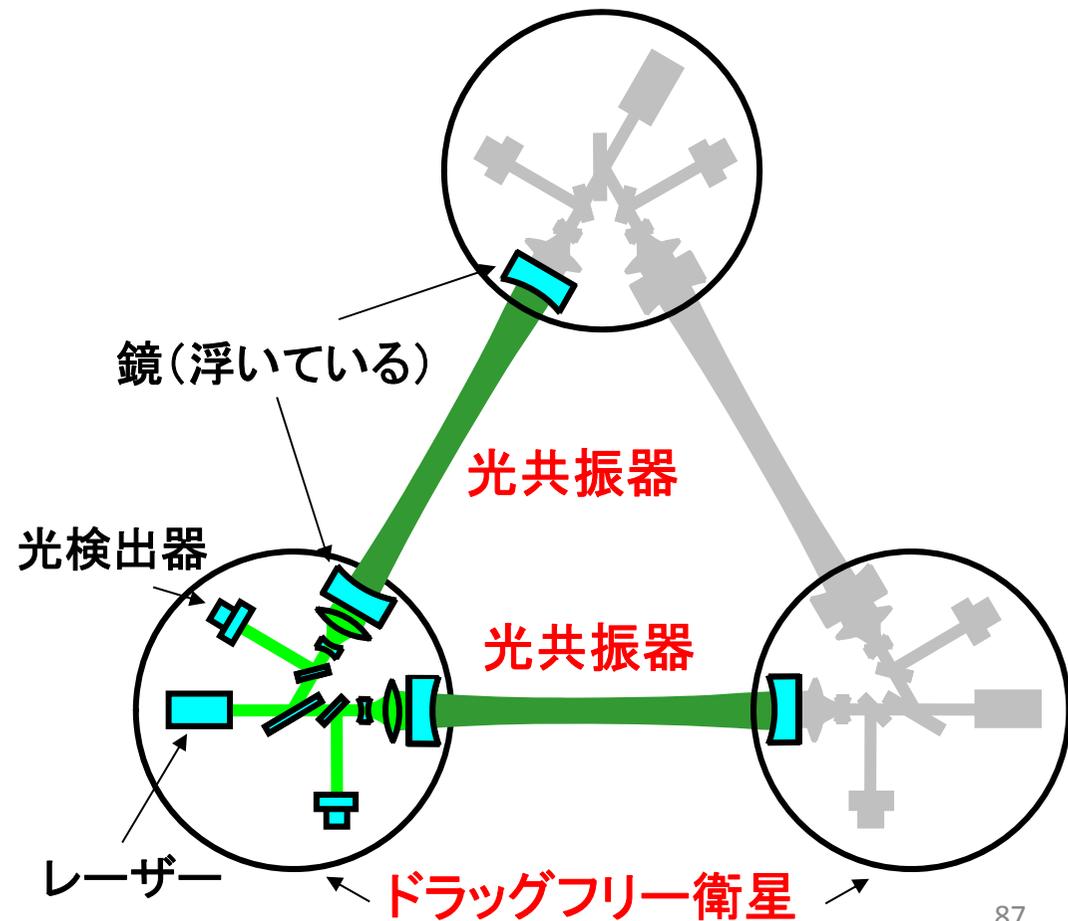
スペース重力波アンテナDECIGO

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory

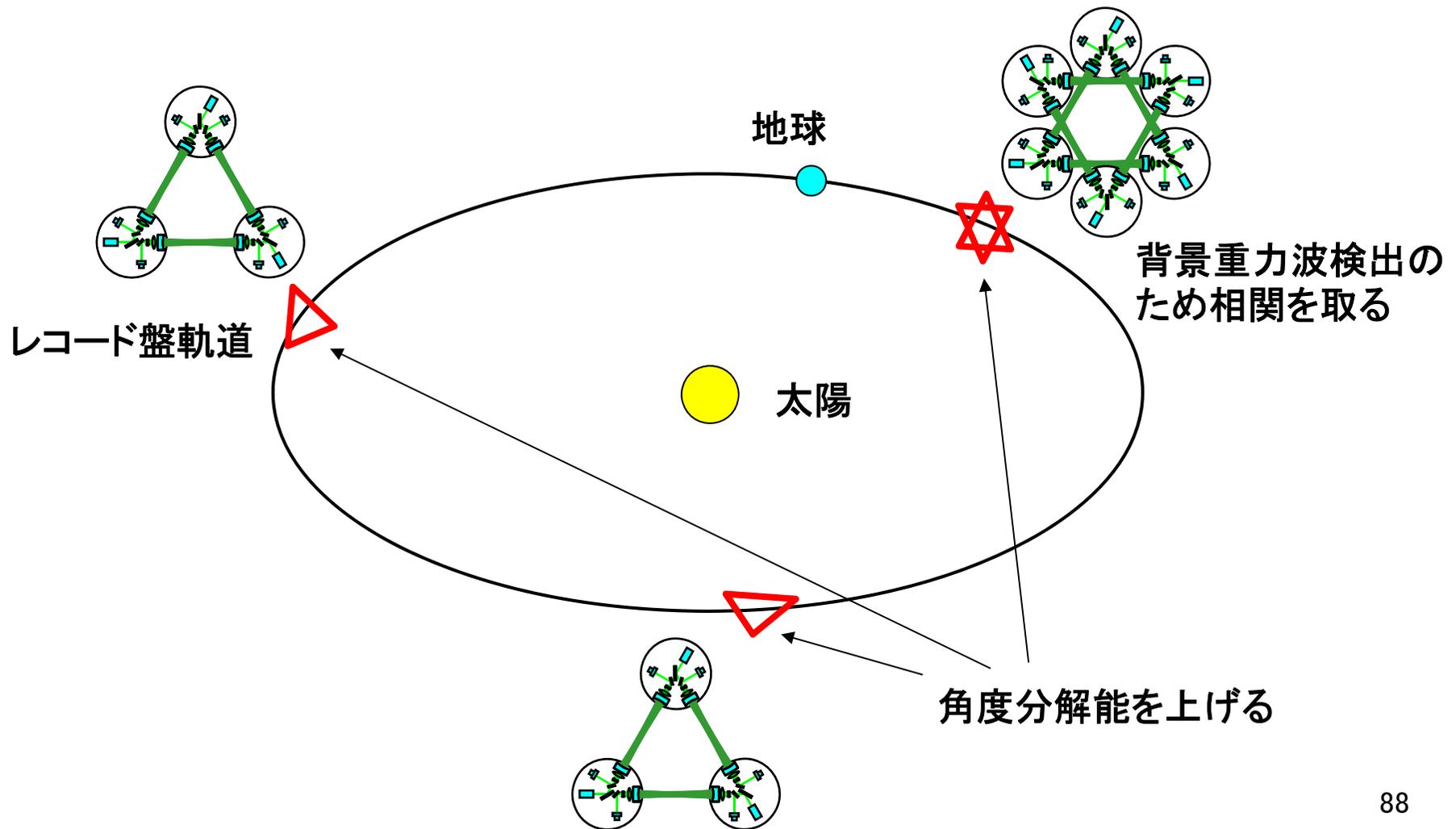
アーム長: 1000 km
ミラー直径: 1 m
レーザー波長: 532 nm

レーザーパワー: 10 W
ミラー質量: 100 kg

干渉計3台で1クラスター



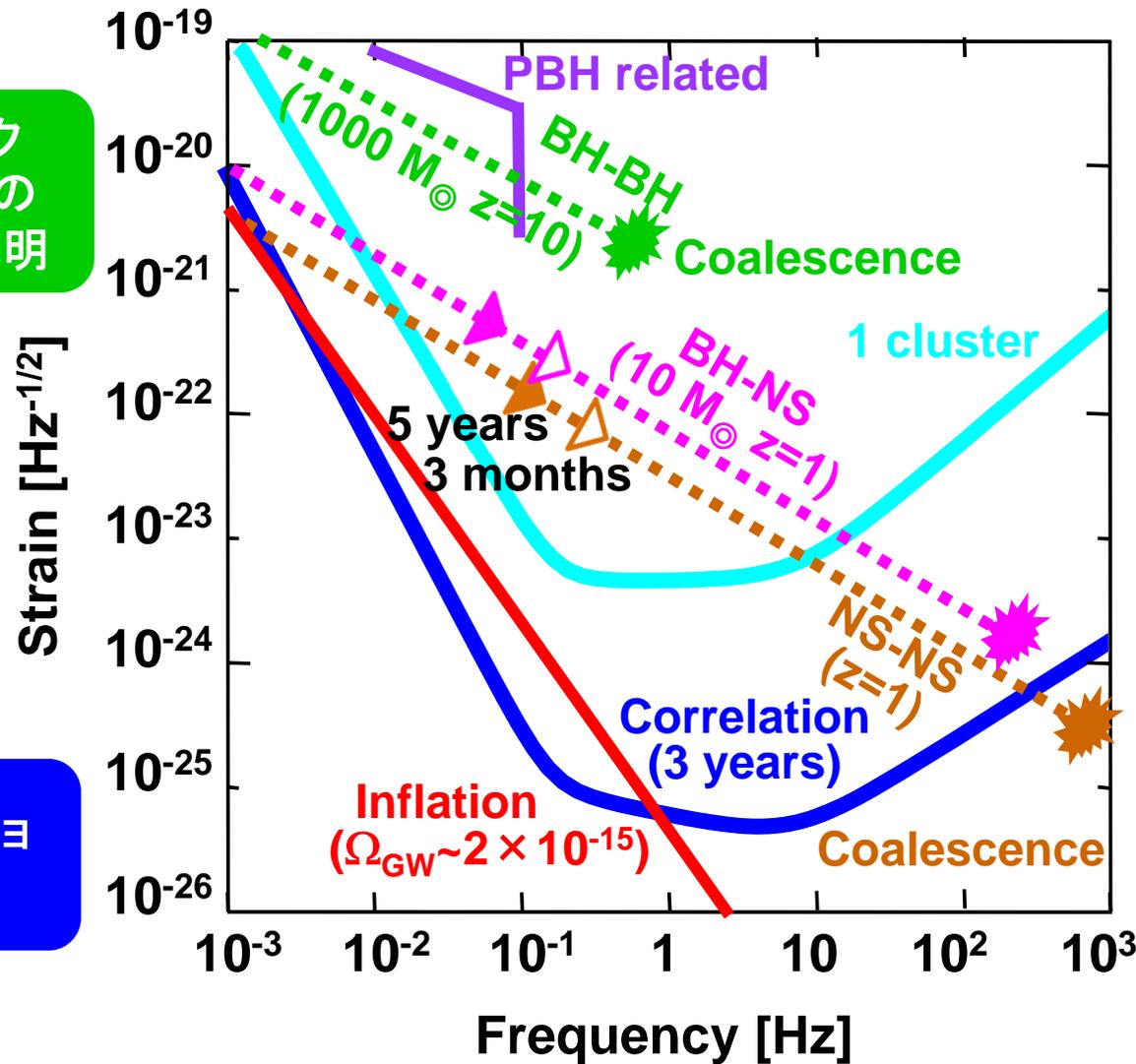
軌道とコンステレーション(案)



DECIGOの目標感度と得られるサイエンス

巨大ブラックホール形成のメカニズム解明

インフレーションの検証



ダークマターの探索

Saito, Yokoyama 2009

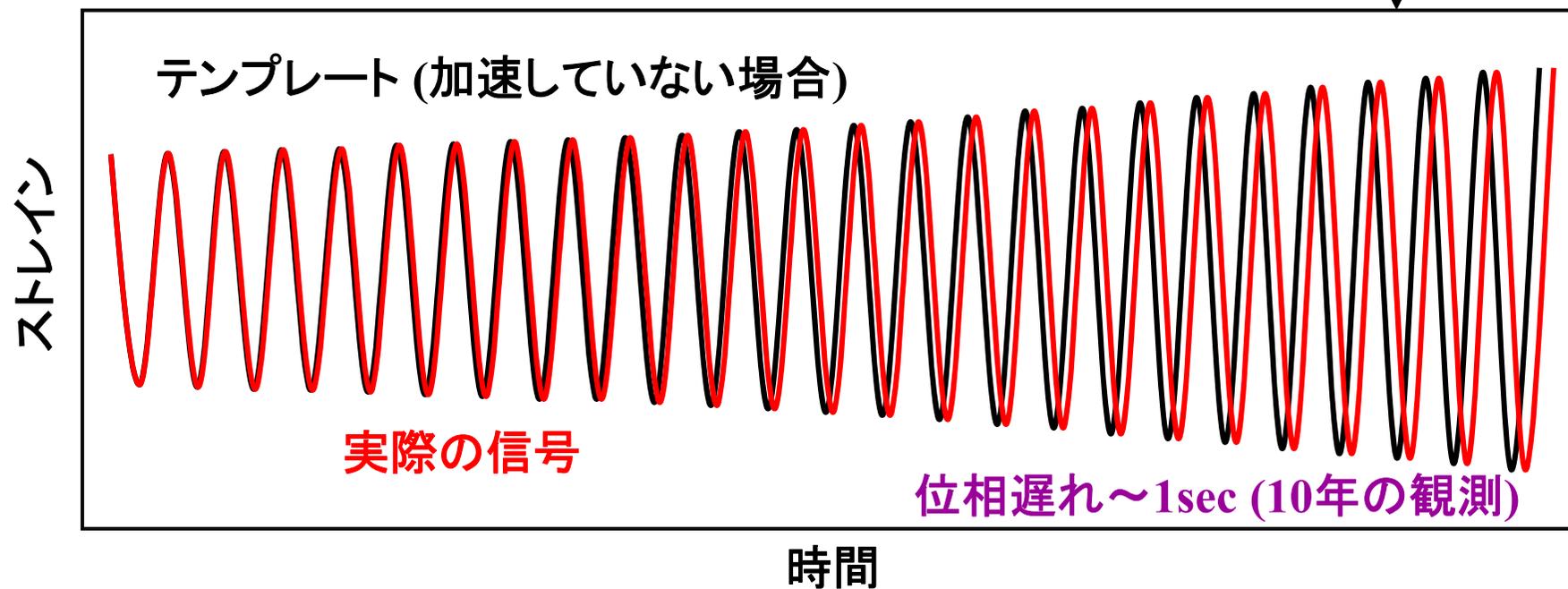
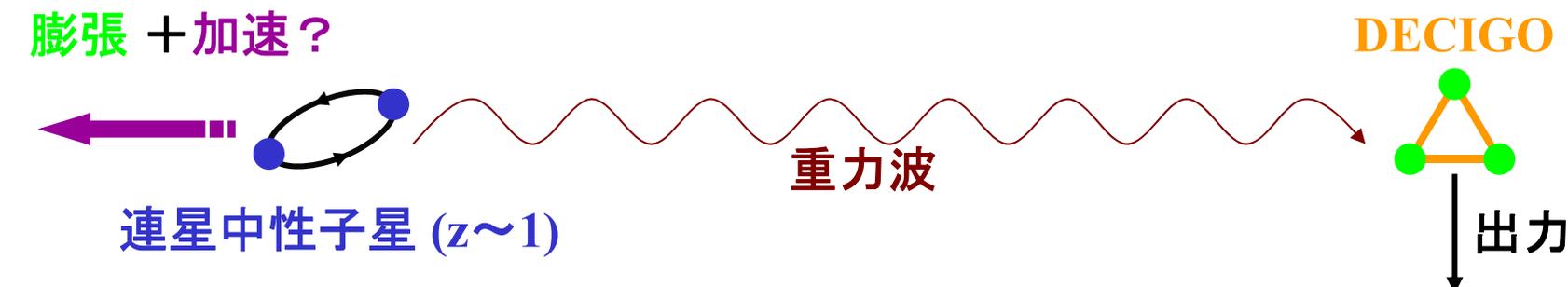
一般相対性理論の検証

Yagi, Tanaka 2009

宇宙膨張加速度の計測
⇒ダークエネルギーの解明

Seto, Kawamura, Nakamura 2004

宇宙の膨張加速度の直接計測



ロードマップ(要更新)

	2009	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29
ミッション	<p>R&D 製作 → DFIGO パスファインダー (DPF) → R&D 製作 → Pre-DECIGO → R&D 製作 → DECIGO</p>																				
目的	要素技術の実証試験						最小限のスペックで 重力波検出 衛星間共振器の実現						重力波天文学の発展								
スコープ	衛星1台 アーム1本						衛星3台 干渉計1台						衛星3台 干渉計3台 ×4クラスター								

重力波天文学の
夜明けは近いぜよ！



イラスト：
Sora

研究室紹介



宇宙線研究所重力波推進室

- 研究: 主としてKAGRAの開発実験
- 場所: 柏および神岡
- 大学院生: 東京大学大学院理学系研究科物理学専攻(A8)
- 指導教官:
 - 教授4名(黒田、川村、大橋、(梶田所長))
 - 准教授1名(三代木)

大学院生の研究

名前	学年	指導教官	研究テーマ
関口	D3	黒田	防振システムの開発
榊原	D3	黒田	冷却システムの開発
陳タン	天文D3	川村	低温懸架システムの開発
中野	D1	川村	入出射光学系の開発
小仁所	M2	川村	量子雑音低減法の開発
西村	M2	川村	量子雑音低減法の開発
小野	M2	大橋	防振システムの開発
渡辺	M2	黒田	防振システムの開発
山中	M1	川村	クラックリング雑音の研究
田中	M1	梶田	未定
宮本	M1	梶田	未定



宇宙線研究所でお待ちしています！