



重力波検出実験

天文天体物理若手夏の学校

@三国観光ホテル

平成24年8月2日

川村静児（東大宇宙線研）

イラスト：
Sora

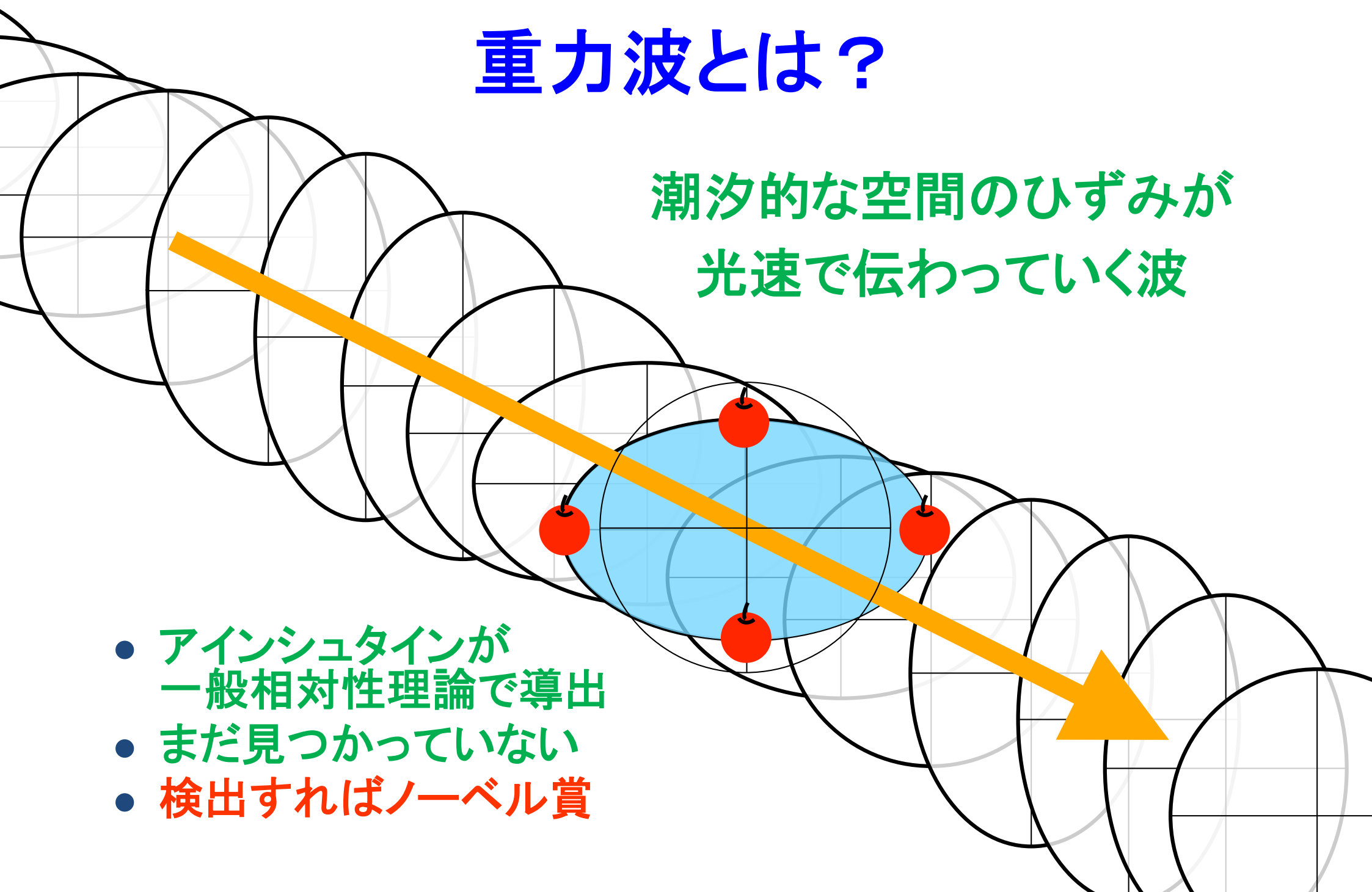
話の内容

1. 重力波とその検出方法
2. 第1世代検出器:LIGO
3. 第2世代検出器:KAGRA
4. スペース重力波アンテナ:DECIGO
5. まとめ

重力波とは？

潮汐的な空間のひずみが
光速で伝わっていく波

- アインシュタインが一般相対性理論で導出
- まだ見つかっていない
- 検出すればノーベル賞



重力波は存在する！

- 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

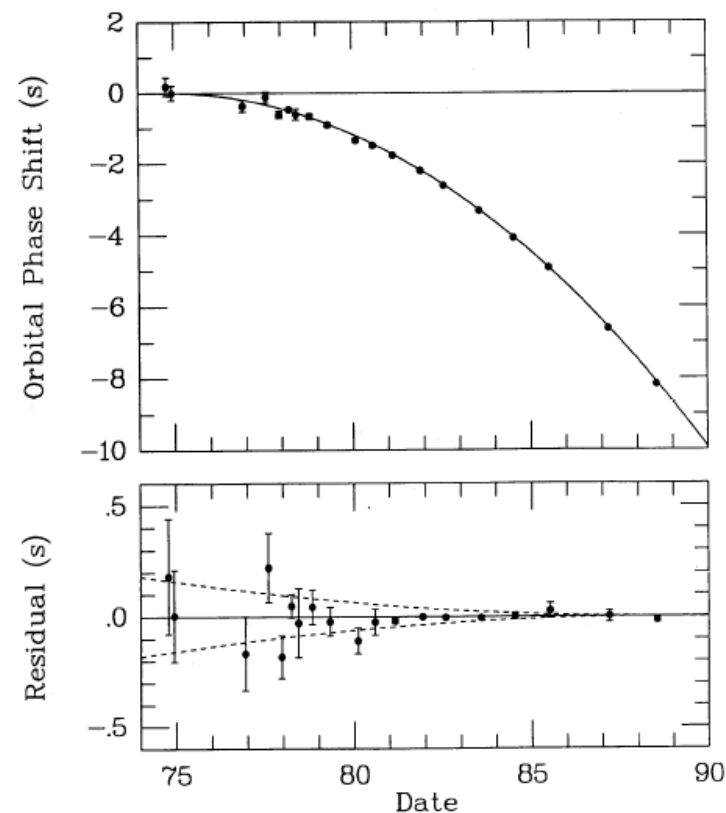


FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves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

Taylor et al., ApJ.345(1989) p435

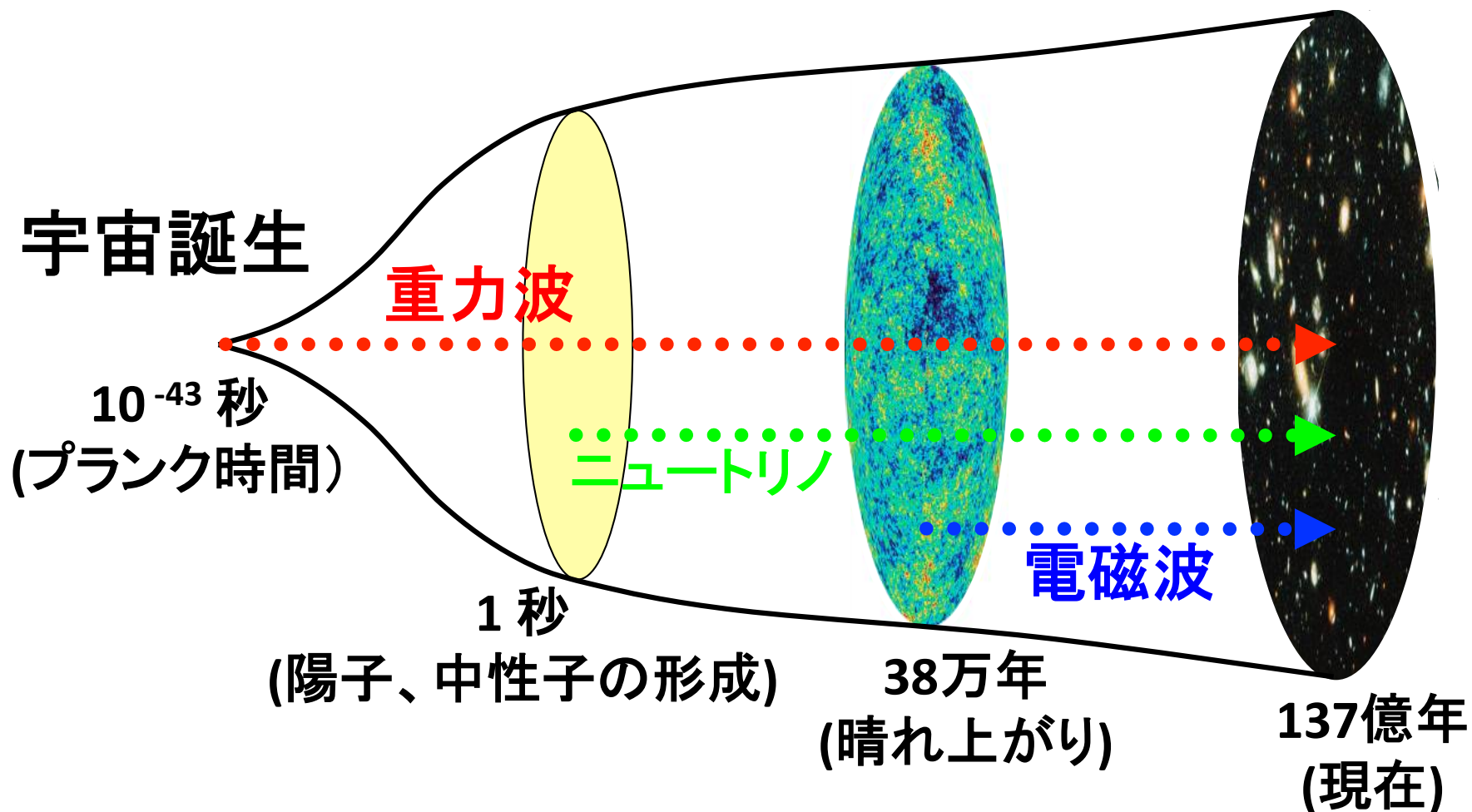
重力波を出す天体現象

- 中性子星やブラックホールの連星運動とその合体
- 超新星爆発
- パルサー
- 宇宙初期
- 未知なる天体

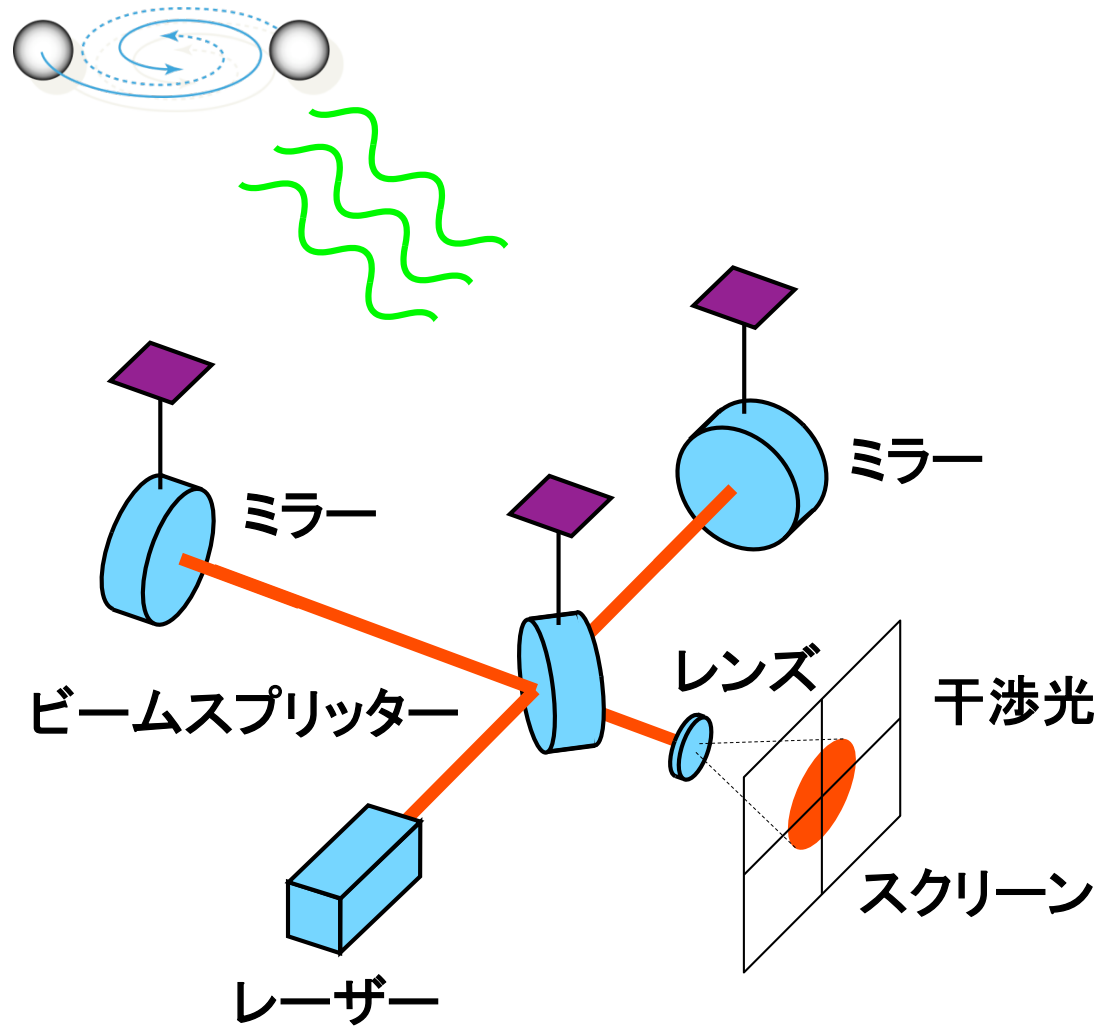


重力波天文学

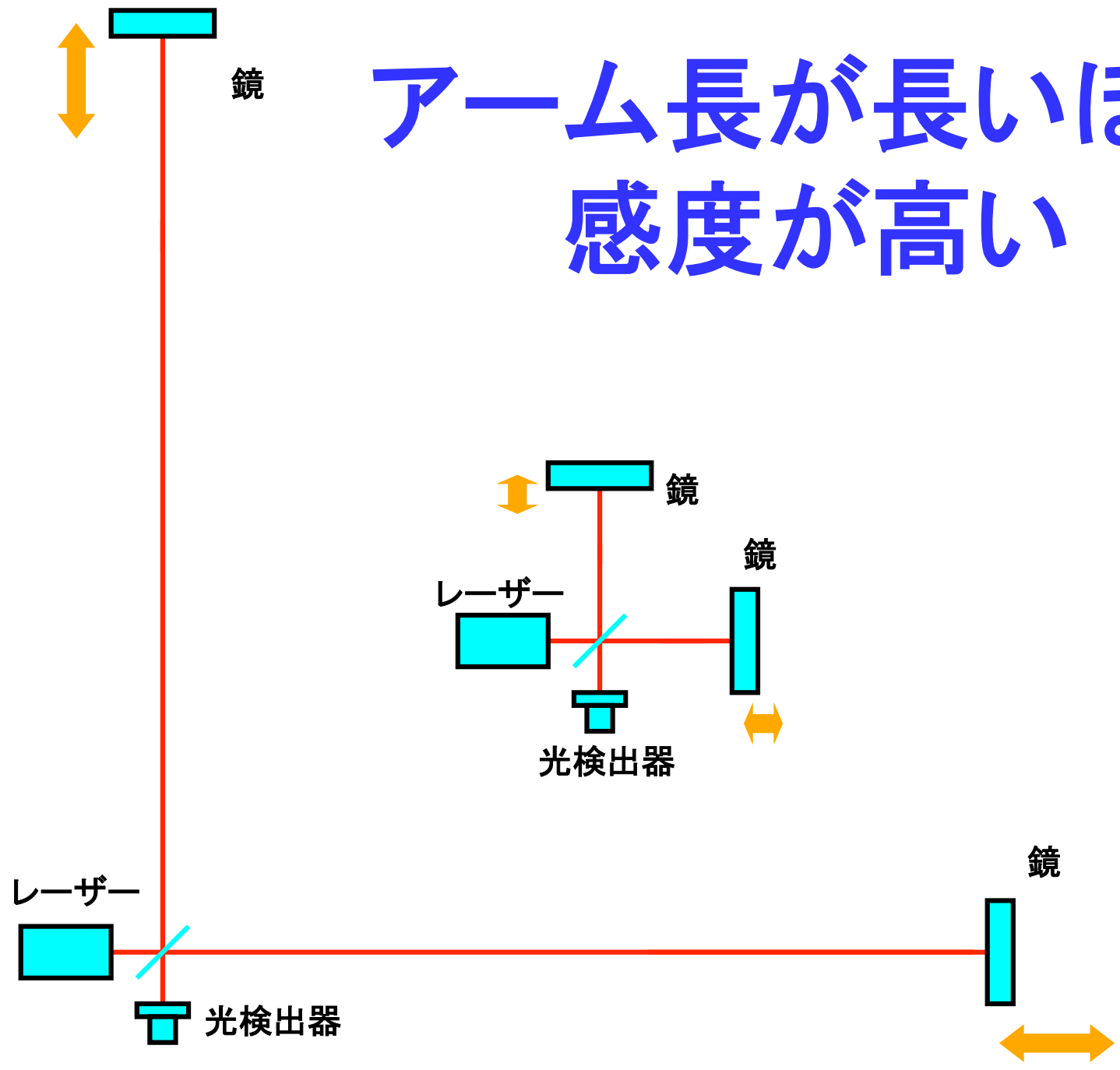
重力波で宇宙の始まりを観る



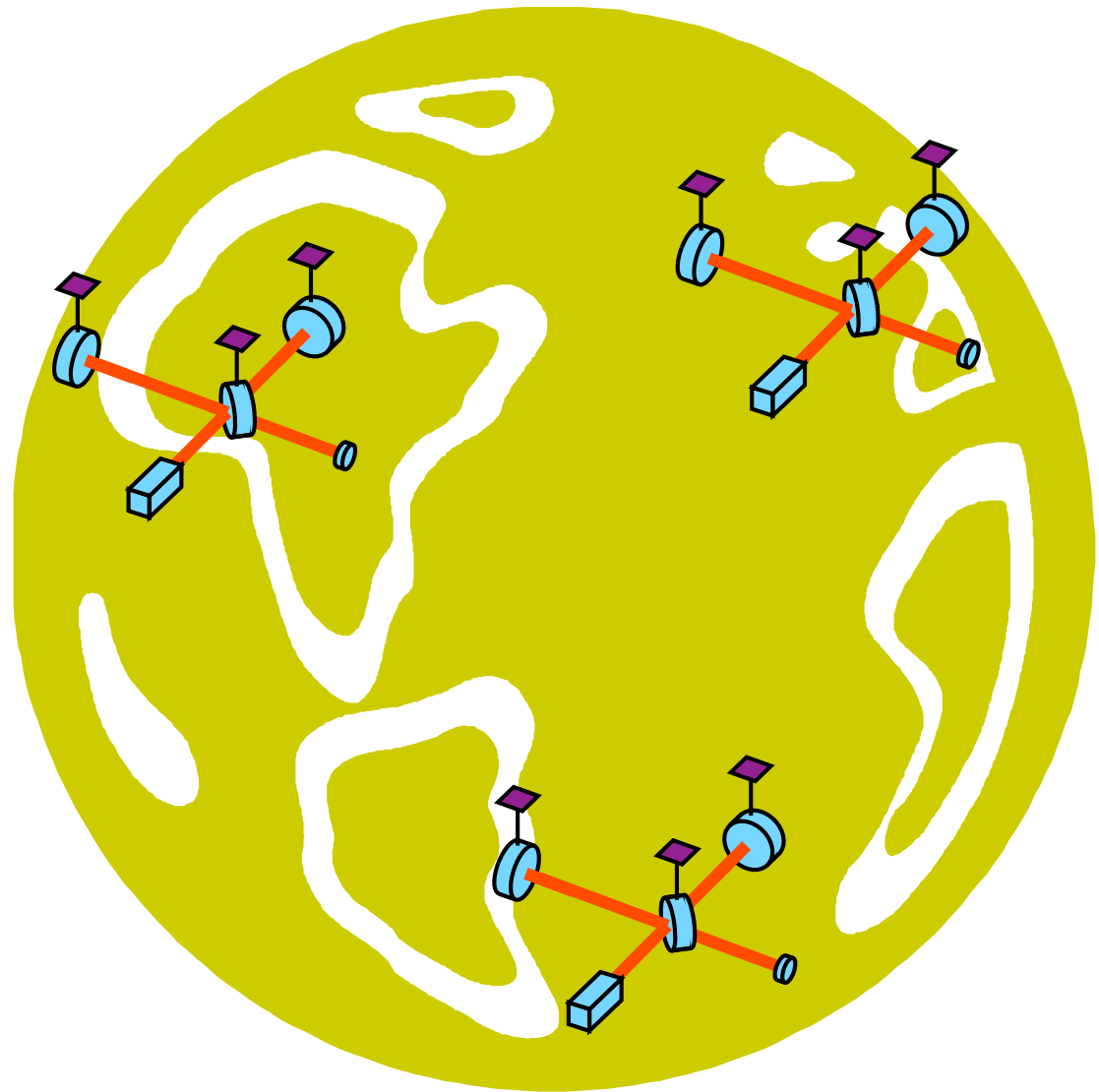
レーザー干渉計による 重力波検出



アーム長が長いほど
感度が高い



重力波源の方向は？



3台あれば
時間差から
方向が分かる！

世界の第1世代検出器



LIGO (4 km)



GEO (600 m)



TAMA (300 m)



LIGO (4 km)



VIRGO (3 km)



LIGO

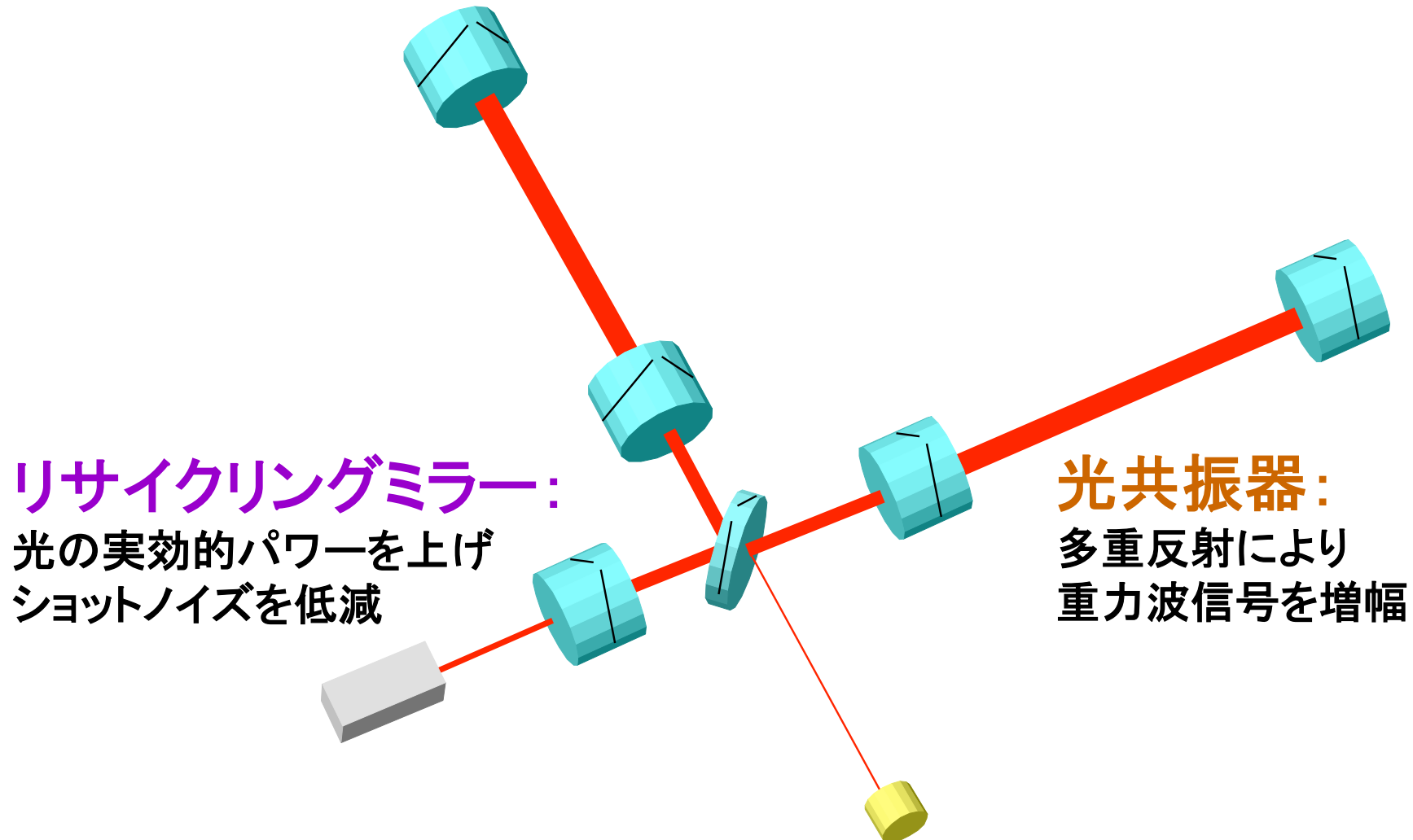
アーム長: 4 km & 2 km

Hanford, Washington

アーム長: 4 km

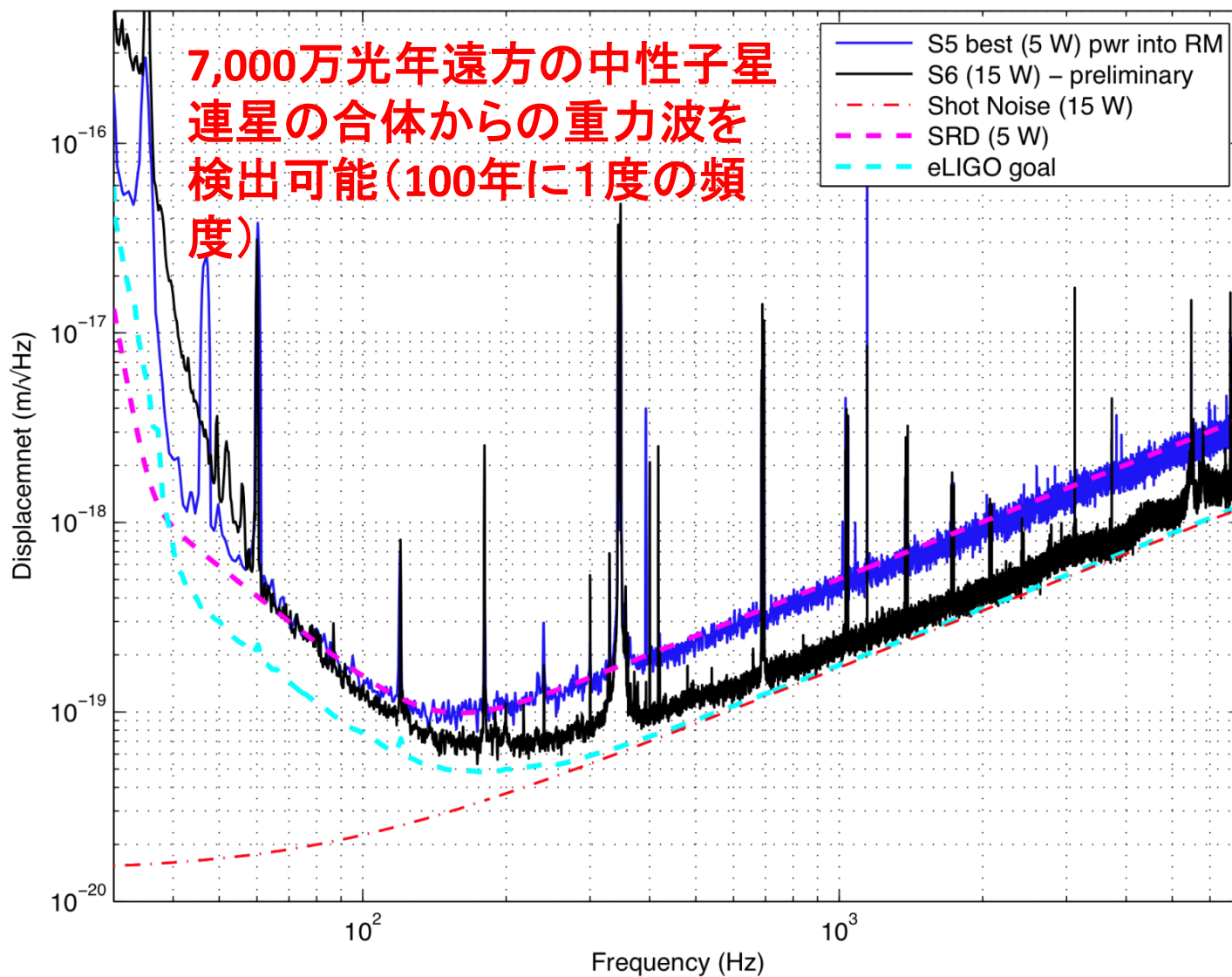


LIGO干渉計の基本構成



LIGOの感度

H1 DARM Noise. SensMon 21.5 Mpc. GPS 957935880.



重力波検出に関する現状

“Ground-based Interferometers and their Science Reach”

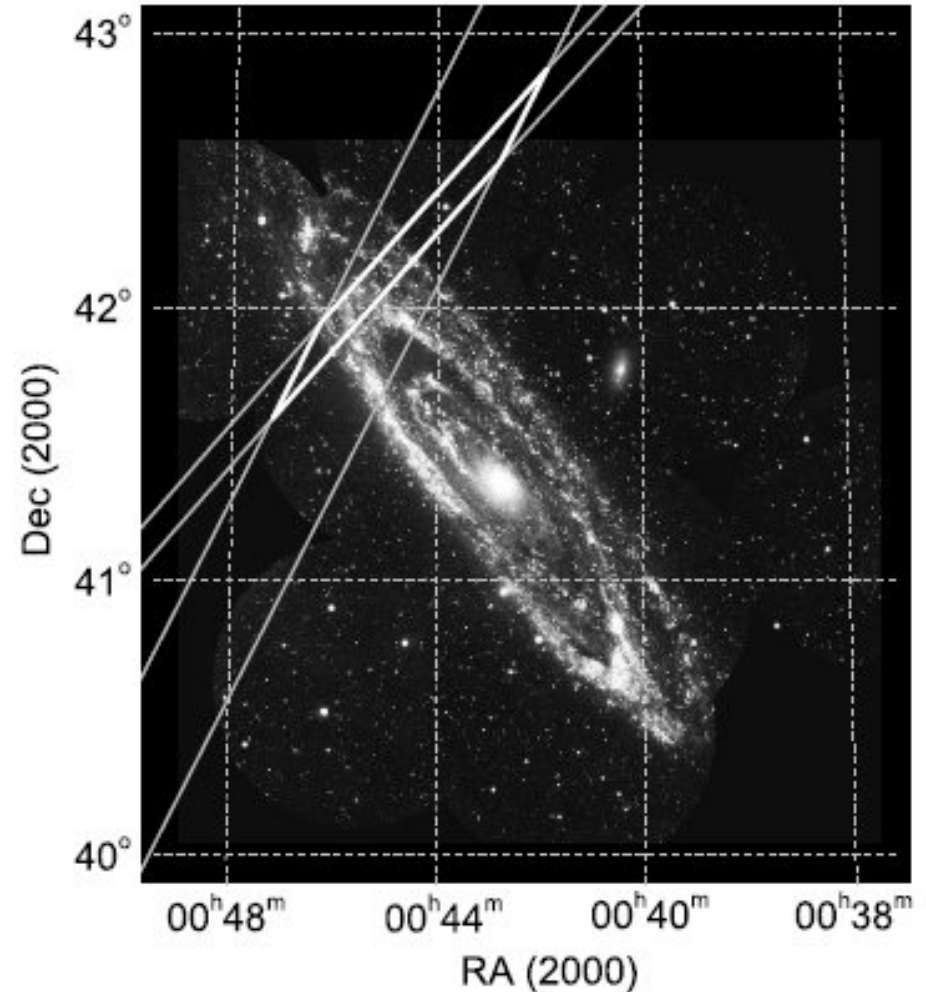
Seiji Kawamura

Amaldi 8 @Columbia University, June 22, 2009

**It is surprising that
we have not yet
got any surprise!**

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
 - $m_1:1Ms-3Ms$, $m_2:1Ms-40Ms$
 - 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

スピンド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ド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

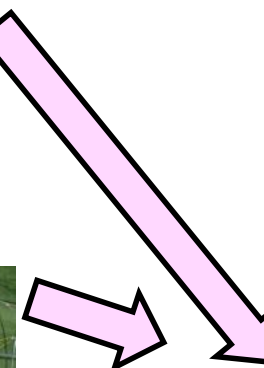
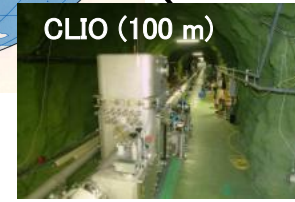
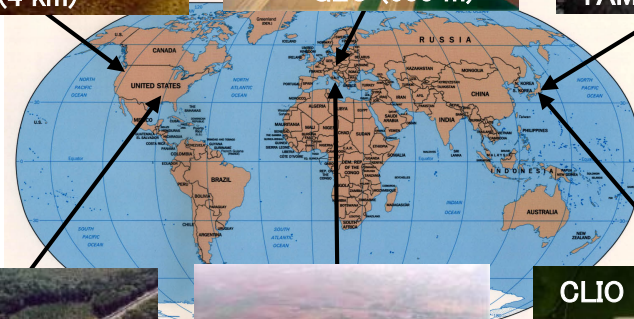
(超)弦理論モデルや初期宇宙進化モデルに新たな制限を付けた

将来の地上干渉計の計画

第2世代検出器により重力波の初検出が期待される

Advanced LIGO

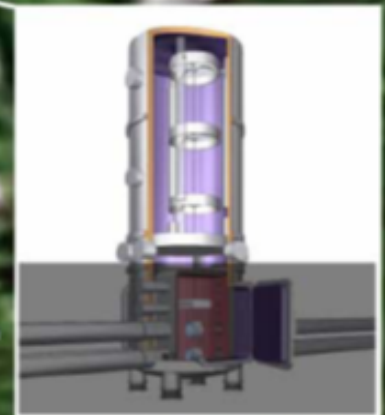
GEO-HF



Advanced Virgo



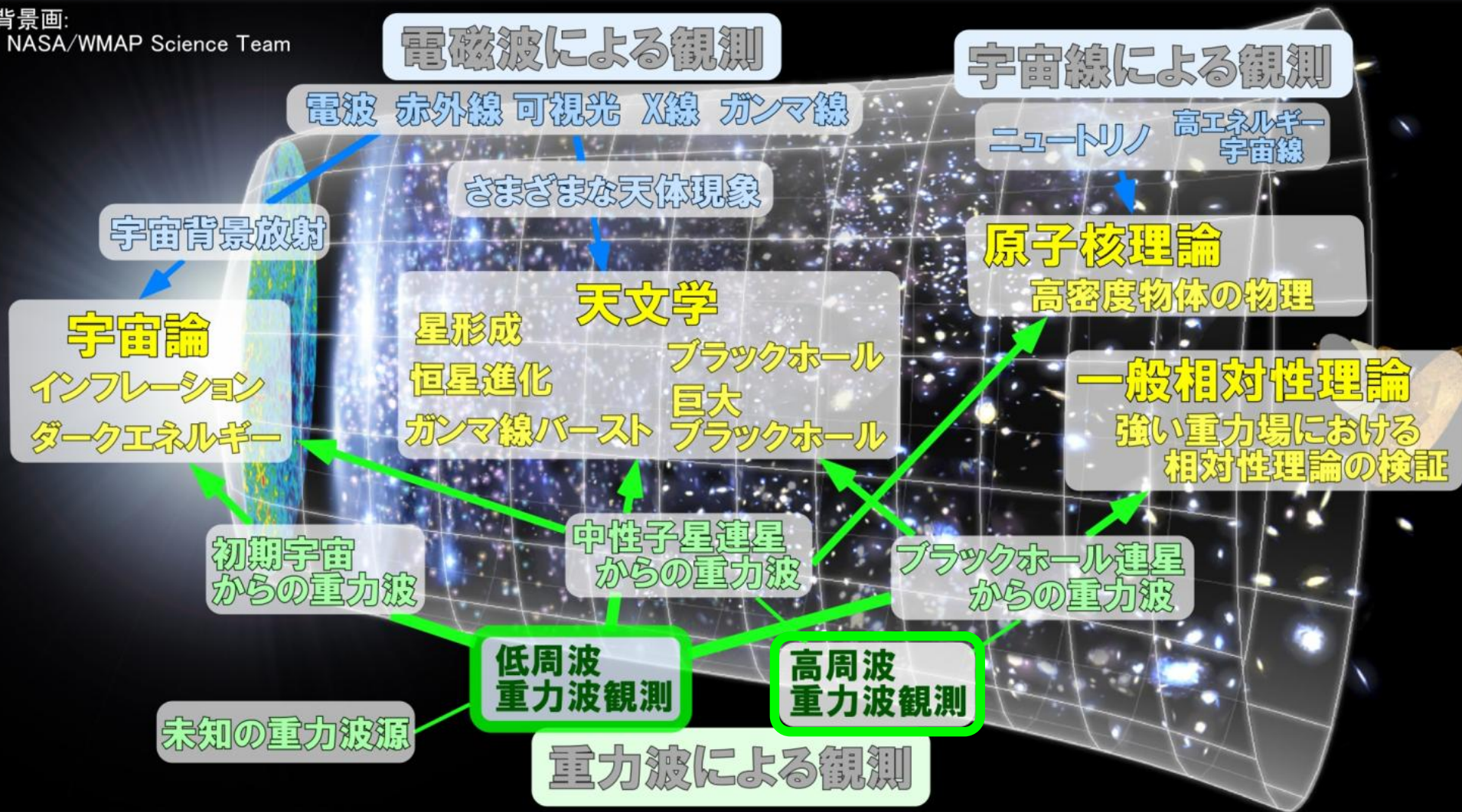
KAGRA: 重力波を検出し 重力波天文学を創成する



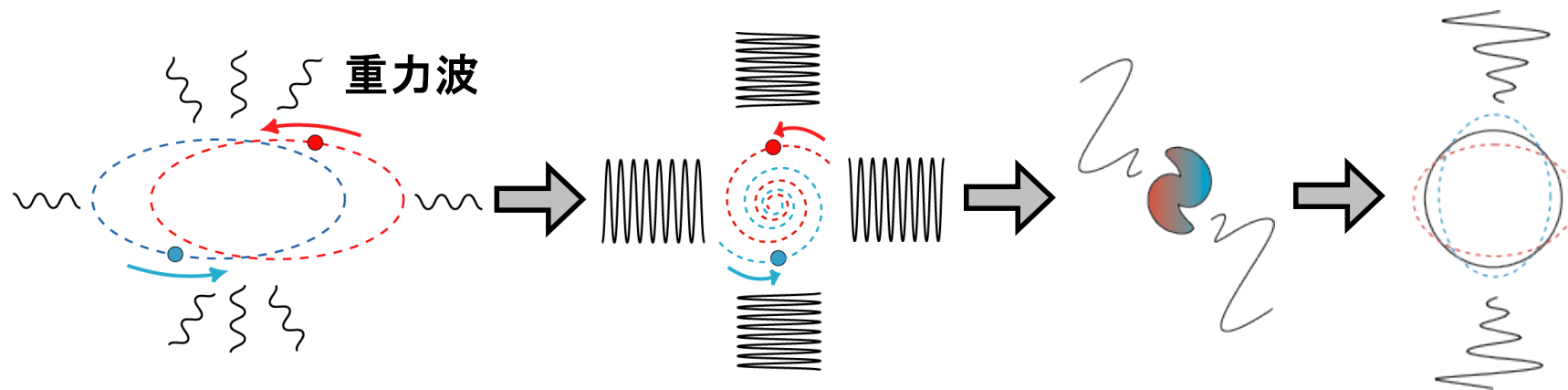
重力波天文学

(電磁波・宇宙線による観測との相補・融合)

背景画:
NASA/WMAP Science Team



中性子星連星の合体

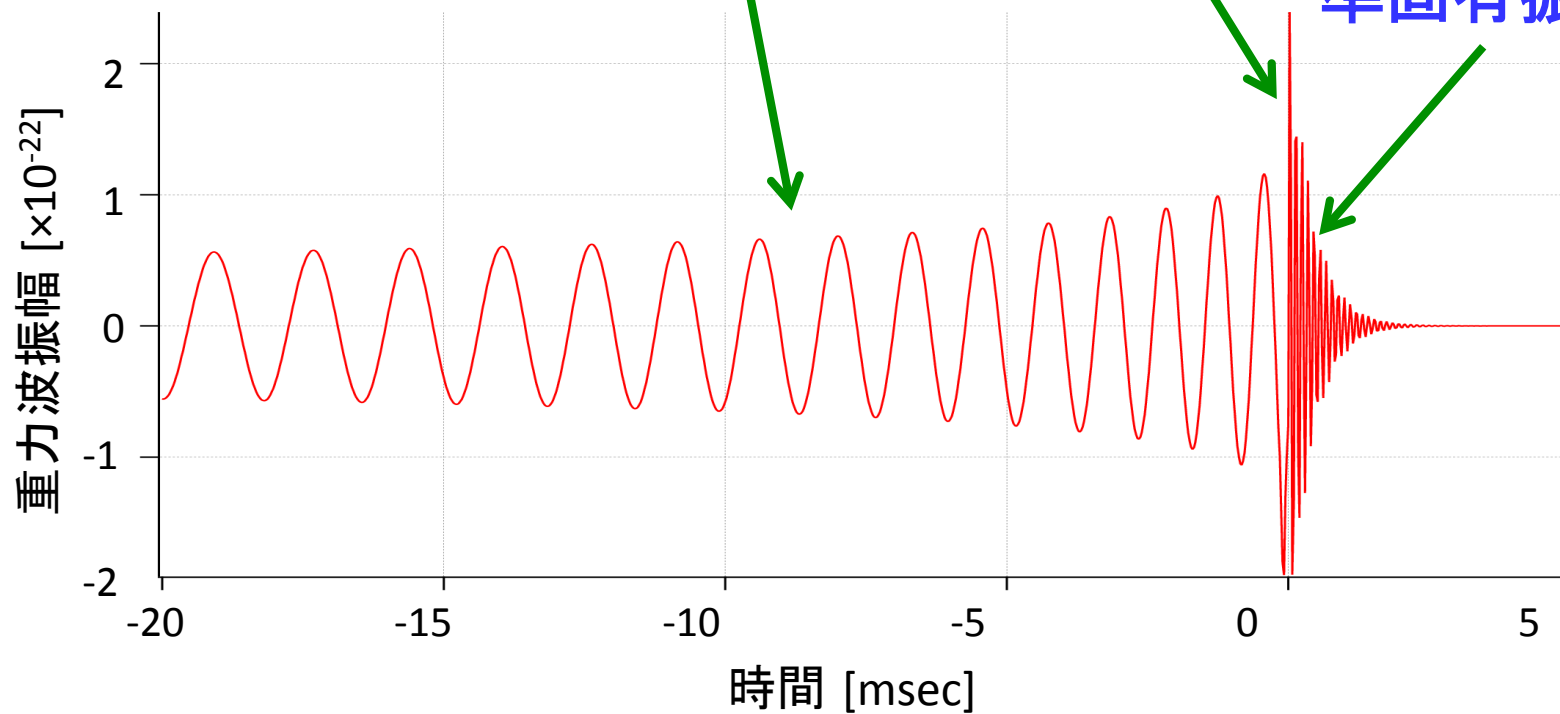


公転運動

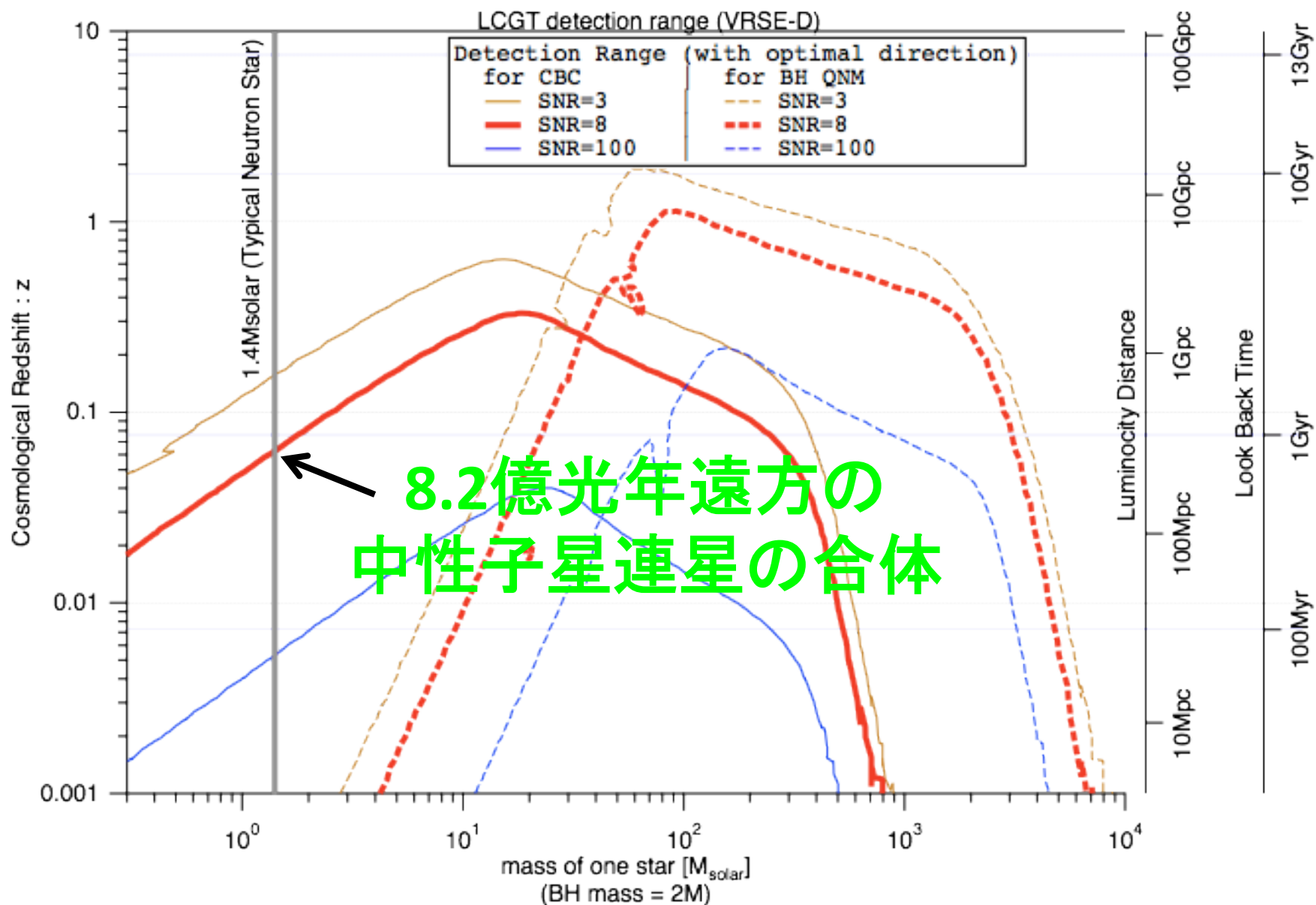
インスパイラル

合体

ブラックホールの
準固有振動



連星合体に対する感度



中性子星連星の合体の頻度

- これまでに見つかった中性子星連星とその予測寿命より推測

銀河系合体率: $118_{-79}^{+174} \text{ Myr}^{-1}$

(Kim ('08), Lorimer ('08))

名前	パルス周期(ms)	公転周期(hr)	離心率	寿命(Gyr)
B1913+16 ^a	59.03	7.75	0.617	0.37
B1534+12 ^a	37.90	10.10	0.274	2.93
J0737-3039A ^a	22.70	2.45	0.088	0.23
J1756-2251 ^a	28.46	7.67	0.181	2.03
J1906+0746 ^b	144.14	3.98	0.085	0.082
J2127+11C ^{bcd}	32.76	8.047	0.681	0.32

両方パルサーとして観測

2006年に見つかったもの

(Lorimer, LRR, 11, (2008), 8)

中性子星連星からの 重力波検出の可能性

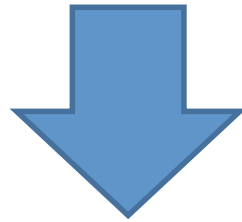
KAGRAのイベントレート:

$$9.8^{+14}_{-6.6} \text{ yr}^{-1}$$

系統誤差は大きいですが、1年に1イベント以上はあると期待できる

ショートGRBの正体？

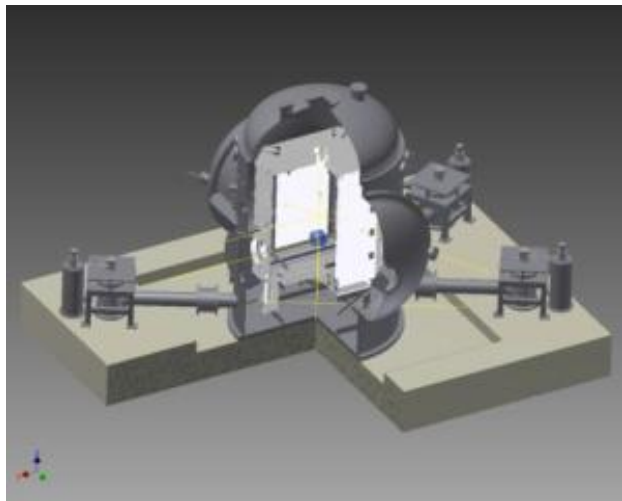
ショートGRBと重力波の同方向・同時観測



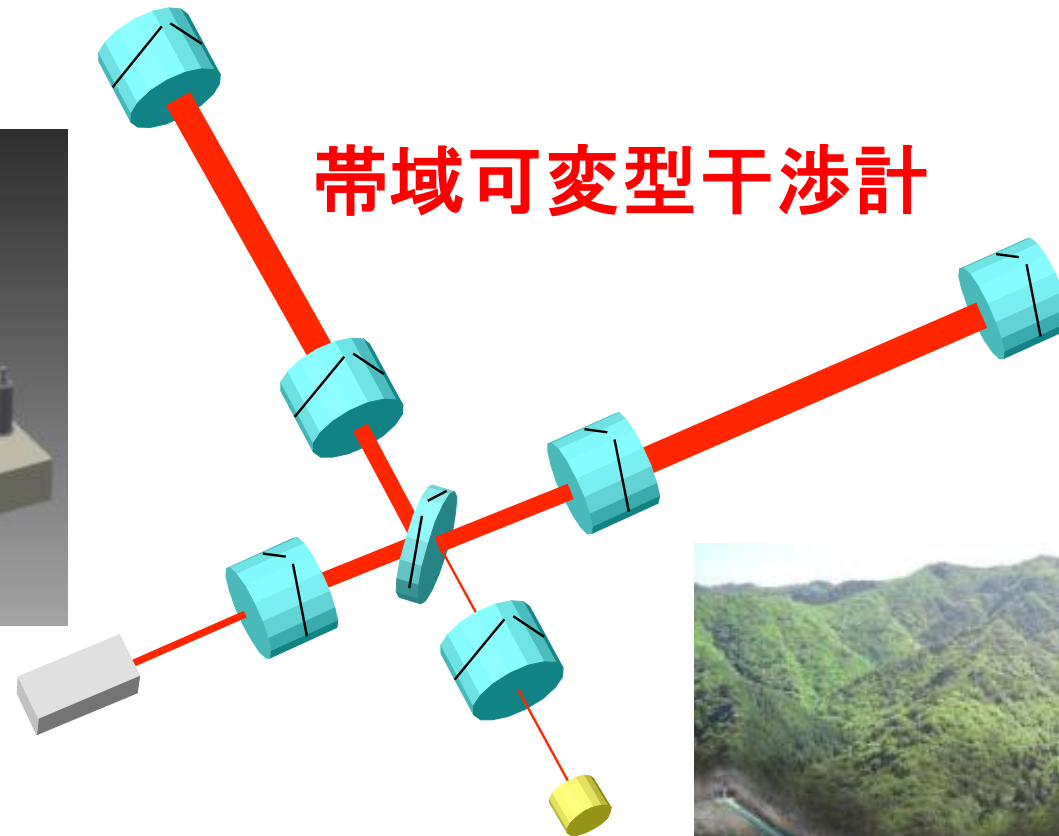
ショートGRB = 中性子星連星の合体

KAGRAの3つの特徴

低温ミラー



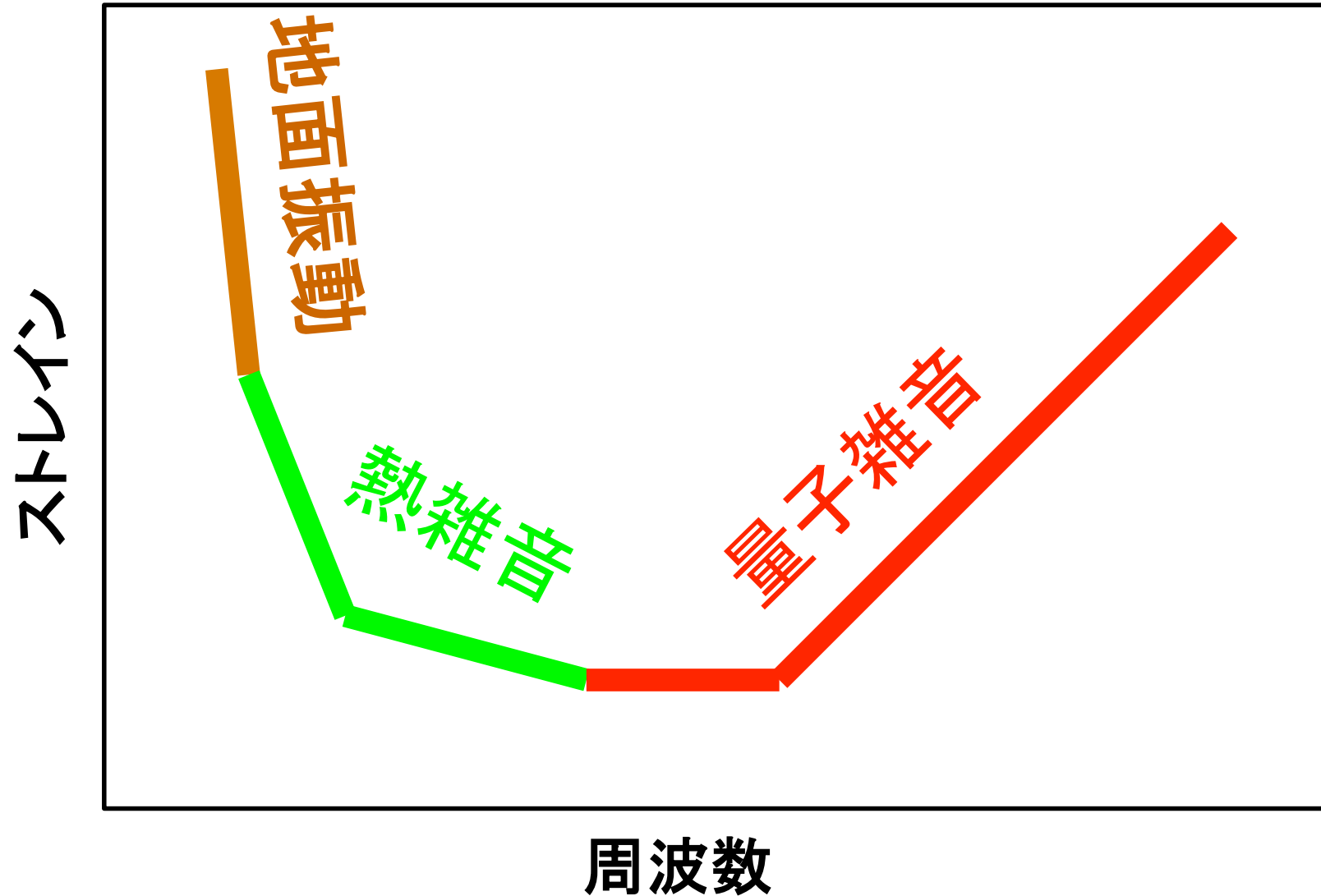
帯域可変型干渉計



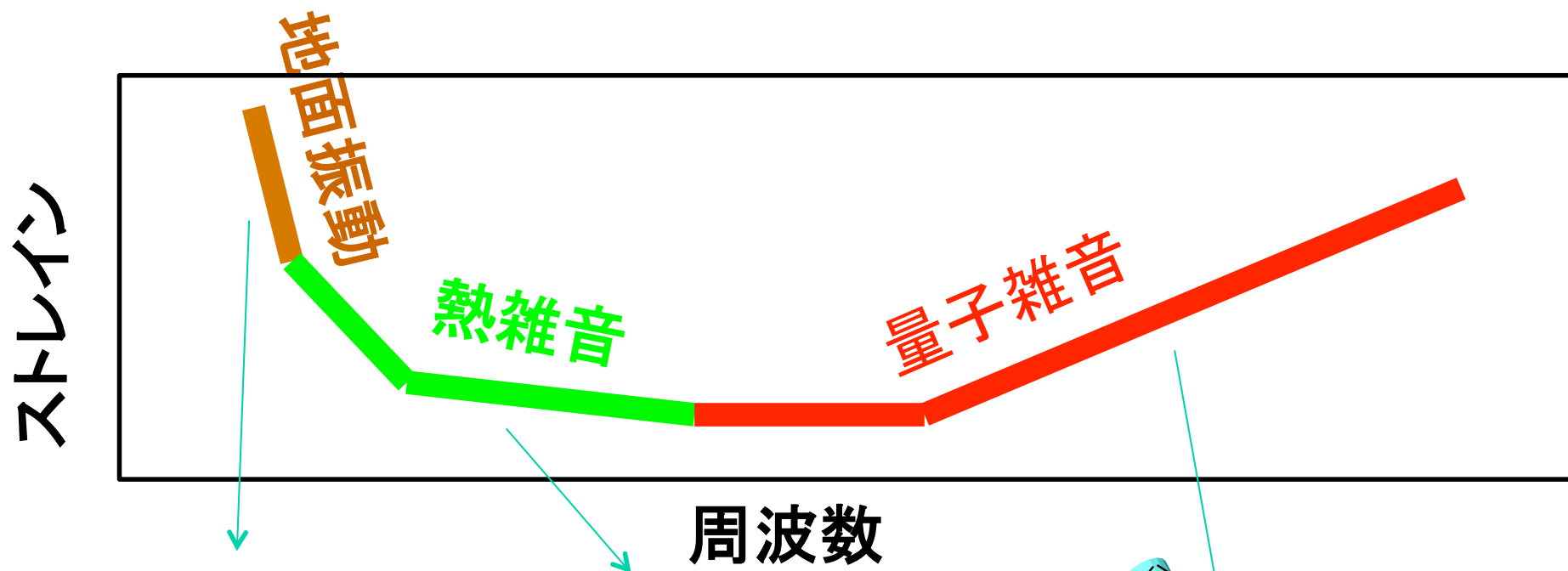
神岡地下のサイト



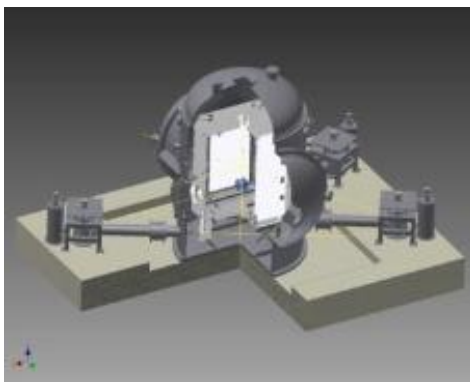
干渉計の感度を決める3つの雑音



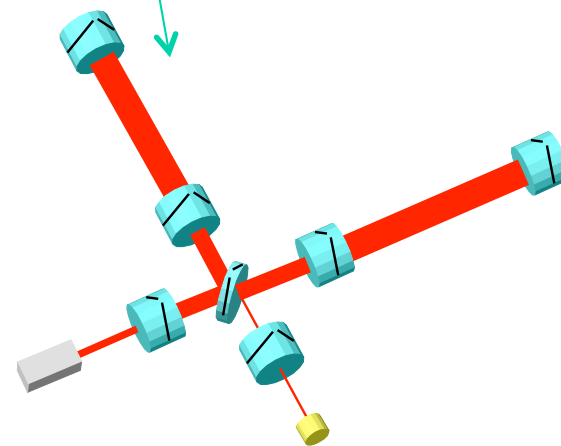
雑音対策



神岡地下

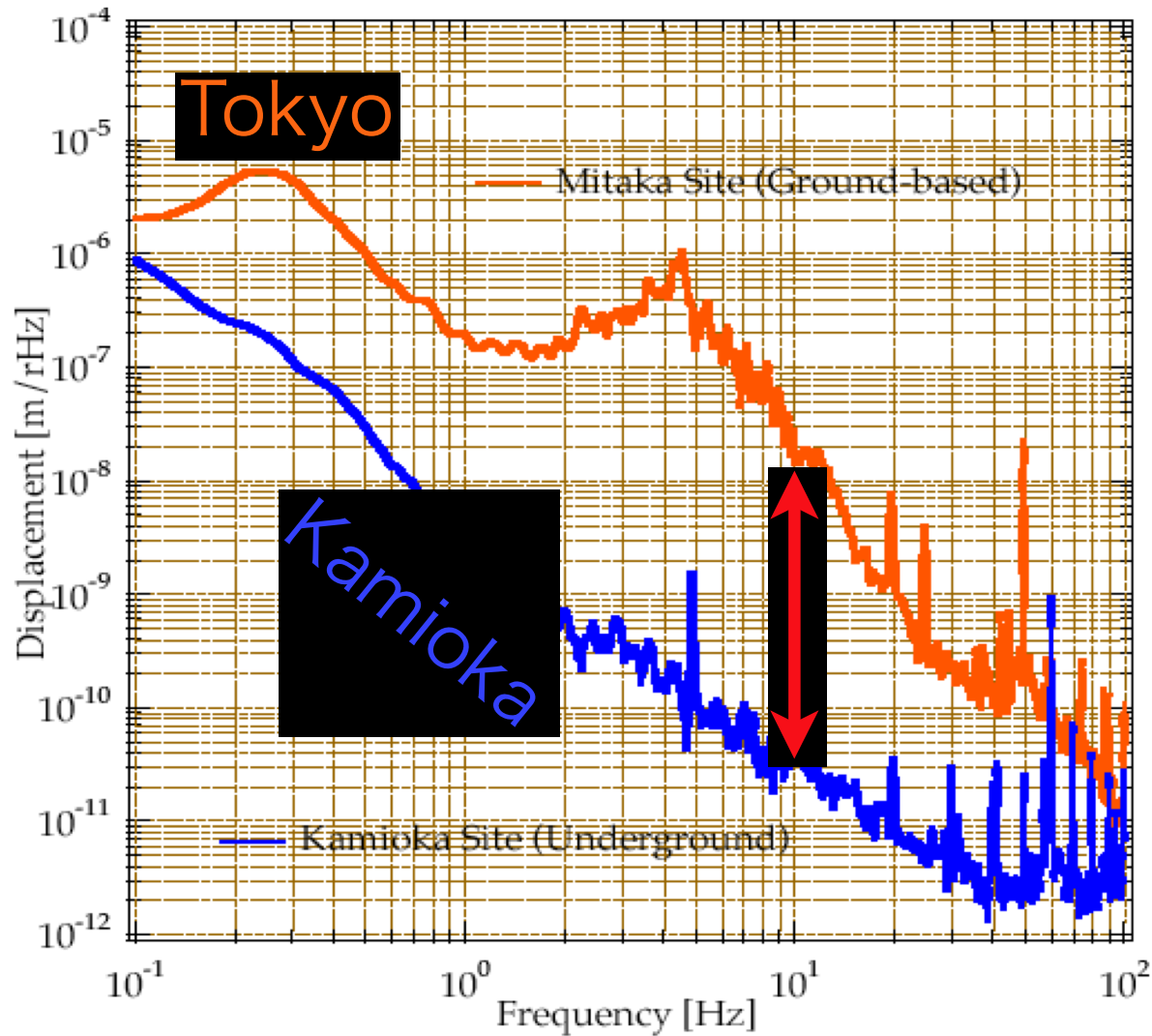


低温ミラー



帯域可変型干渉計

神岡地下と三鷹の地面振動



Amplitude of seismic motion

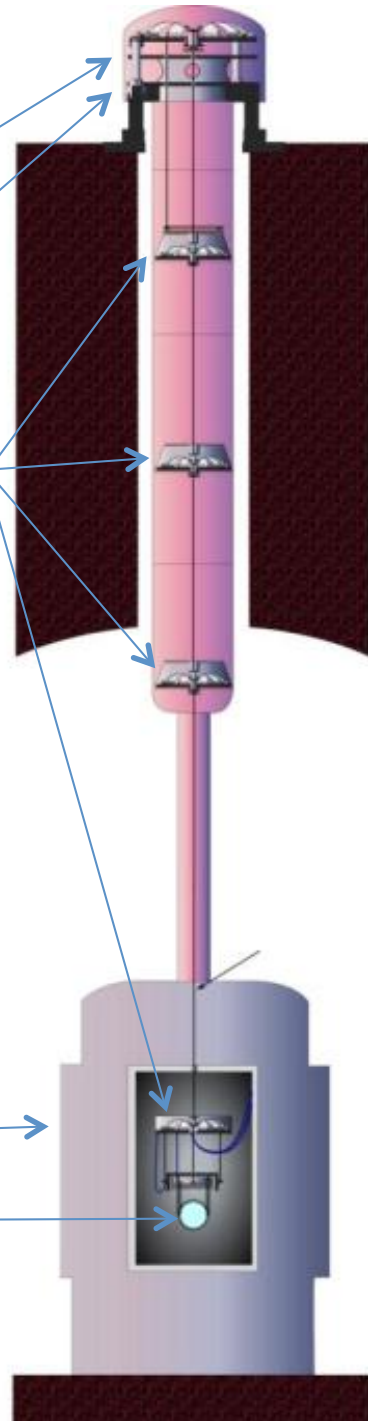
トンネル (2階)

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

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

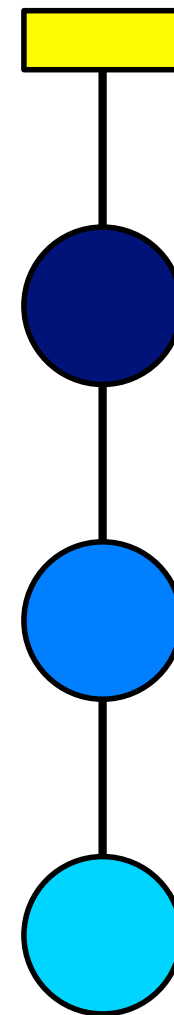
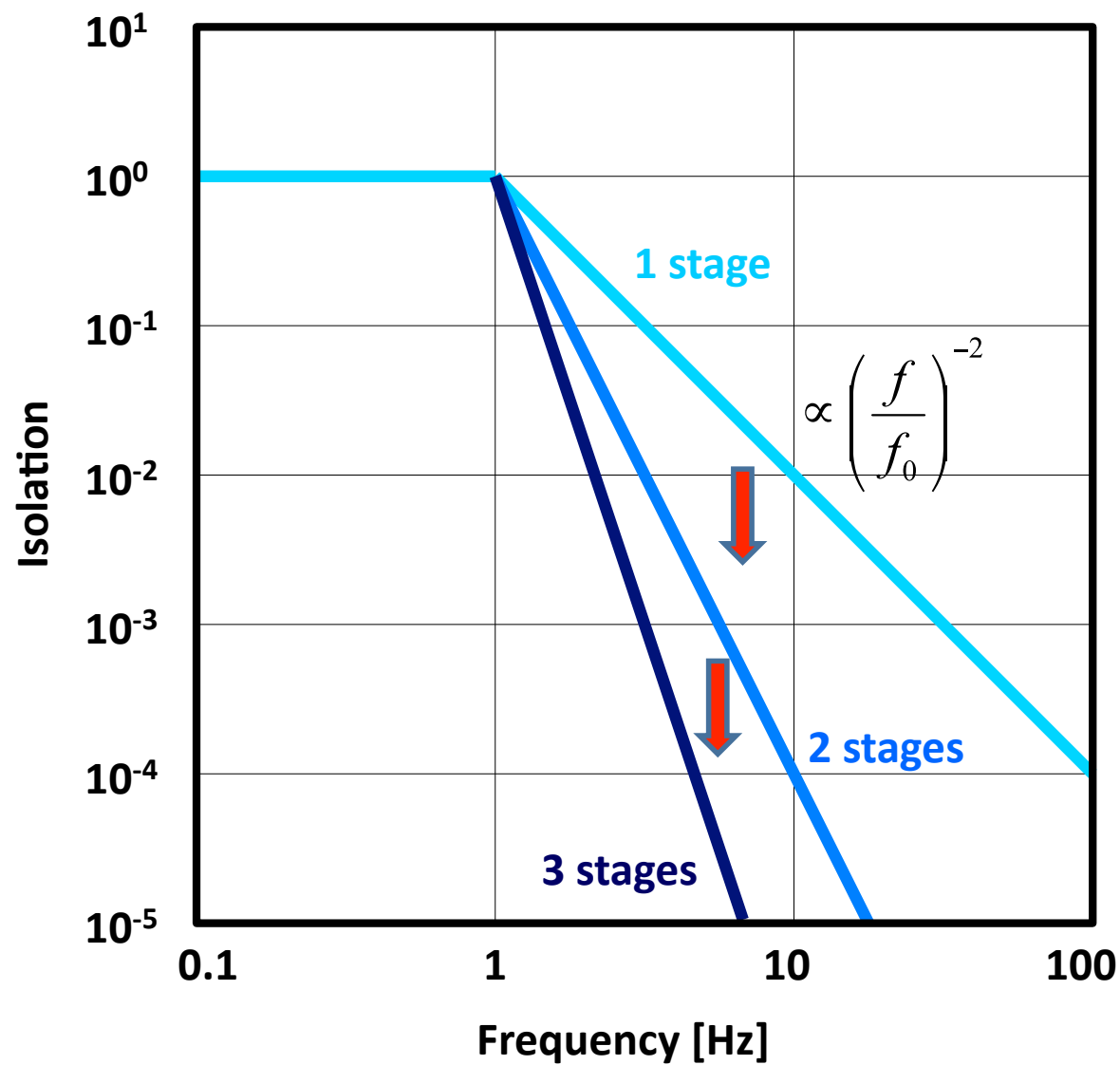


$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

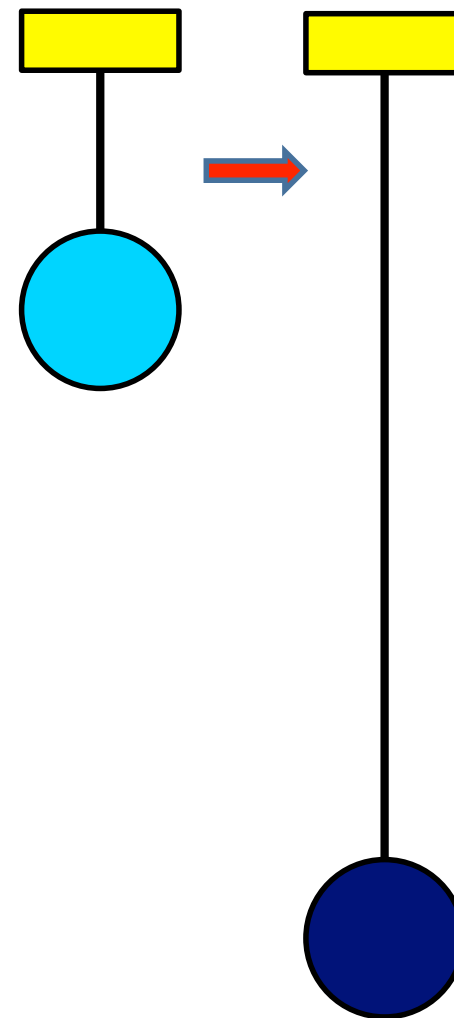
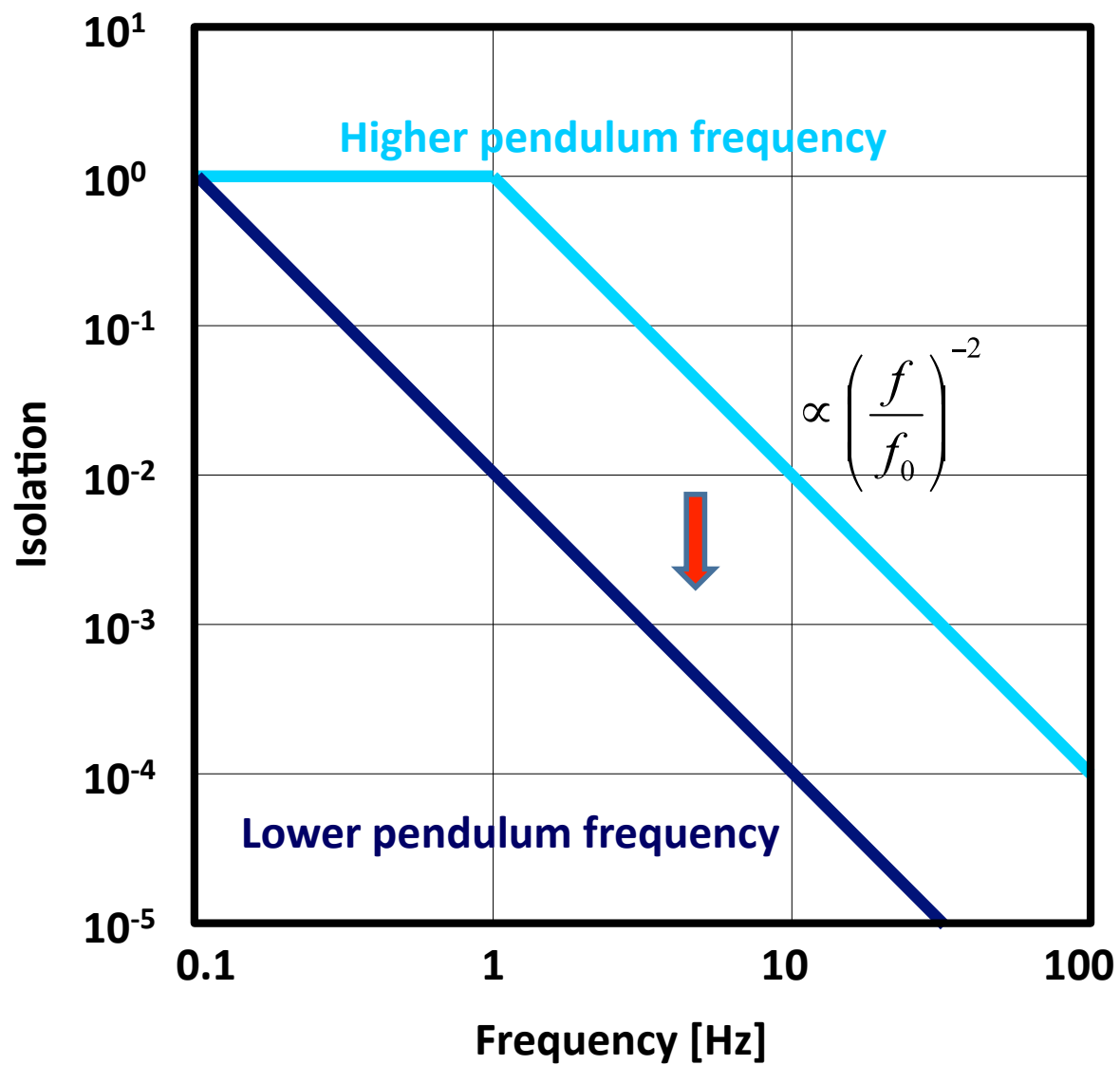
@10 Hz

防振(1)

地面振動 ✕

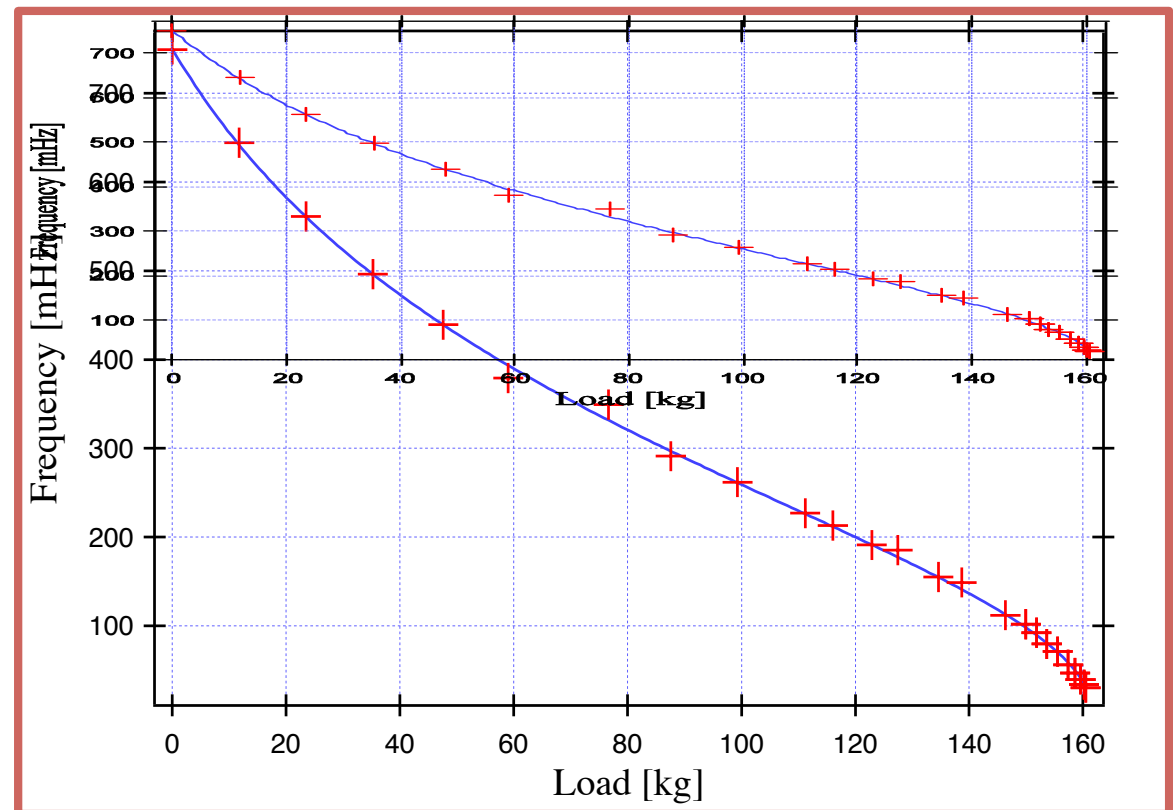
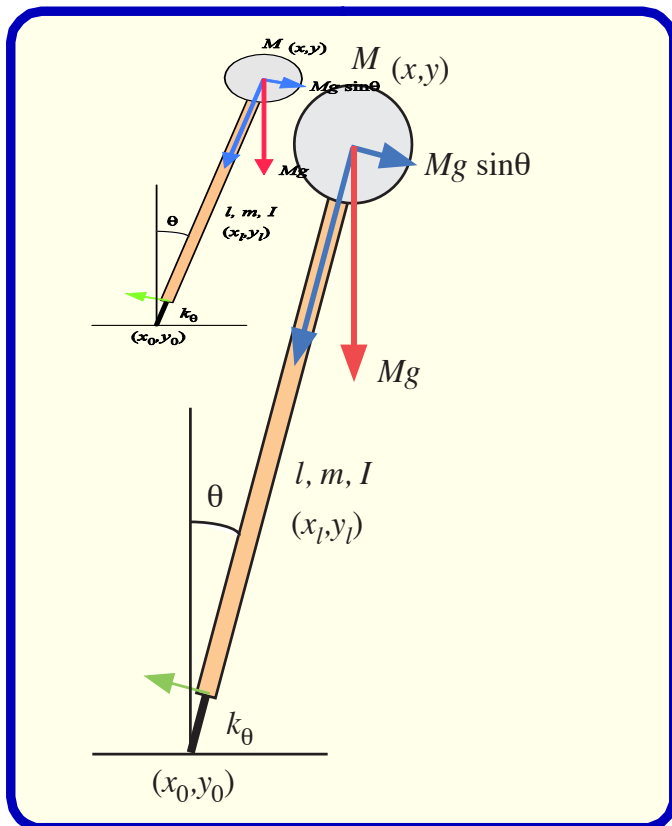


防振(2)



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

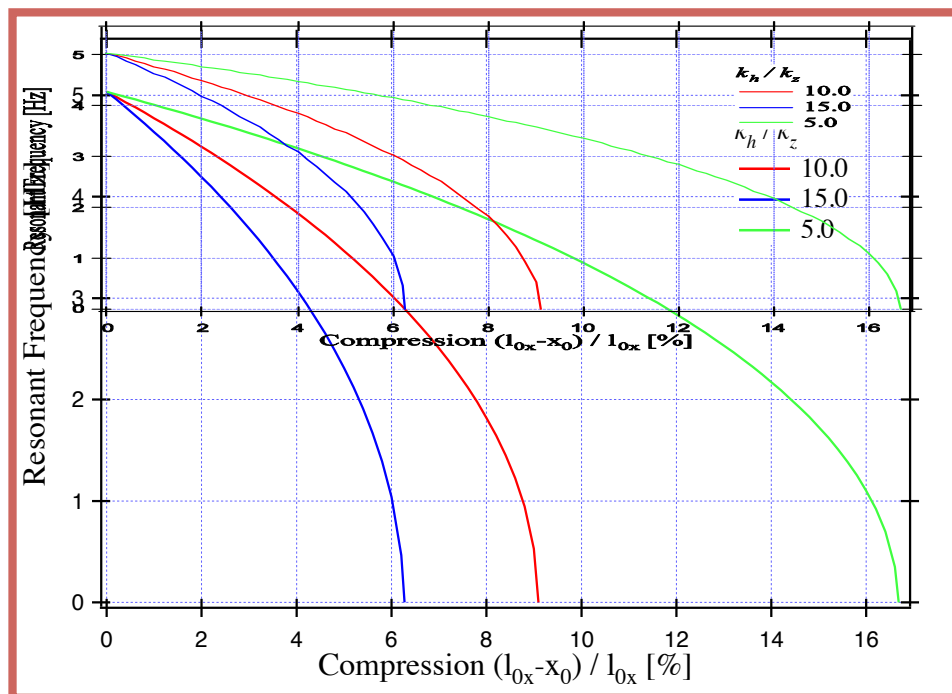
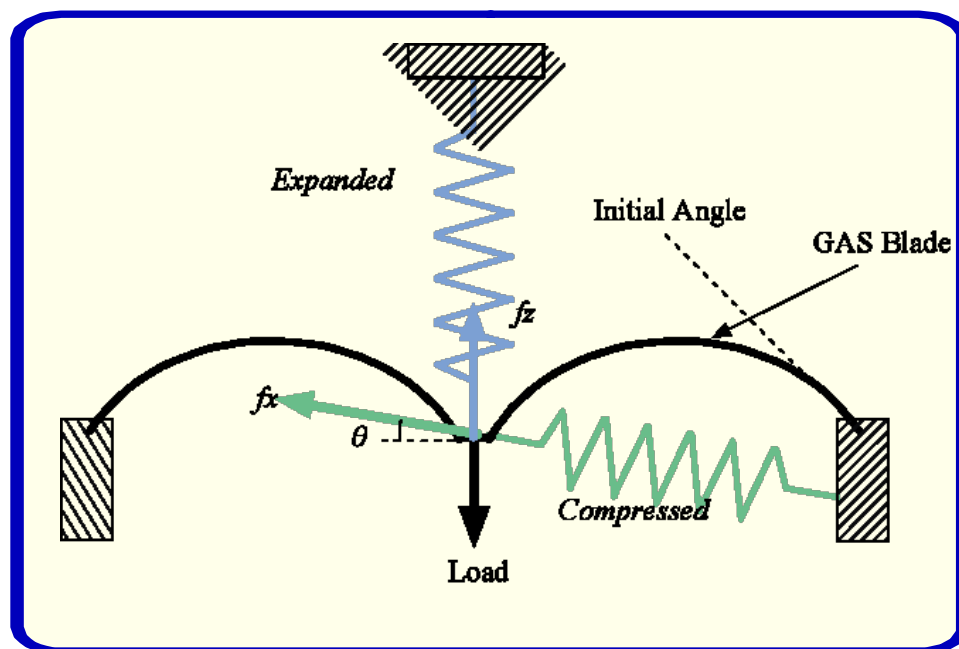
- 地球の曲率
- 機械系の非対称性
- トンネルの傾き(排水のため)

→ **垂直方向の防振も必要**

Geometric Anti-Spring (GAS) Filter

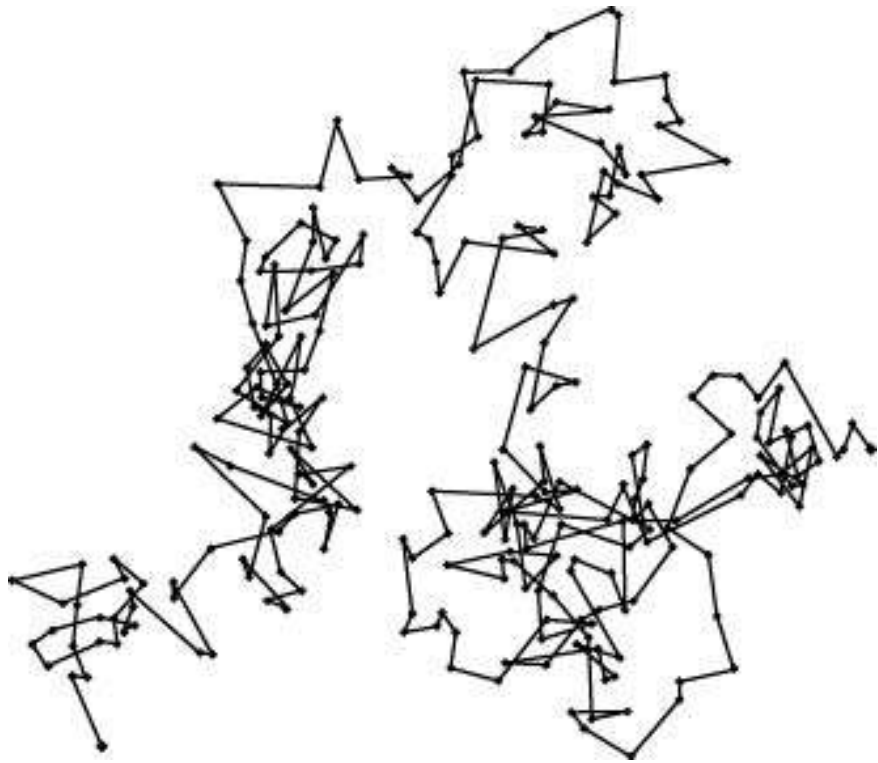
復元力= ブレードのバネ力+ 押し付けることにより生じる反バネ力

→ **共振周波数の低減**



なぜ低温か？

鏡のブラウン運動(熱雑音)を抑えるため

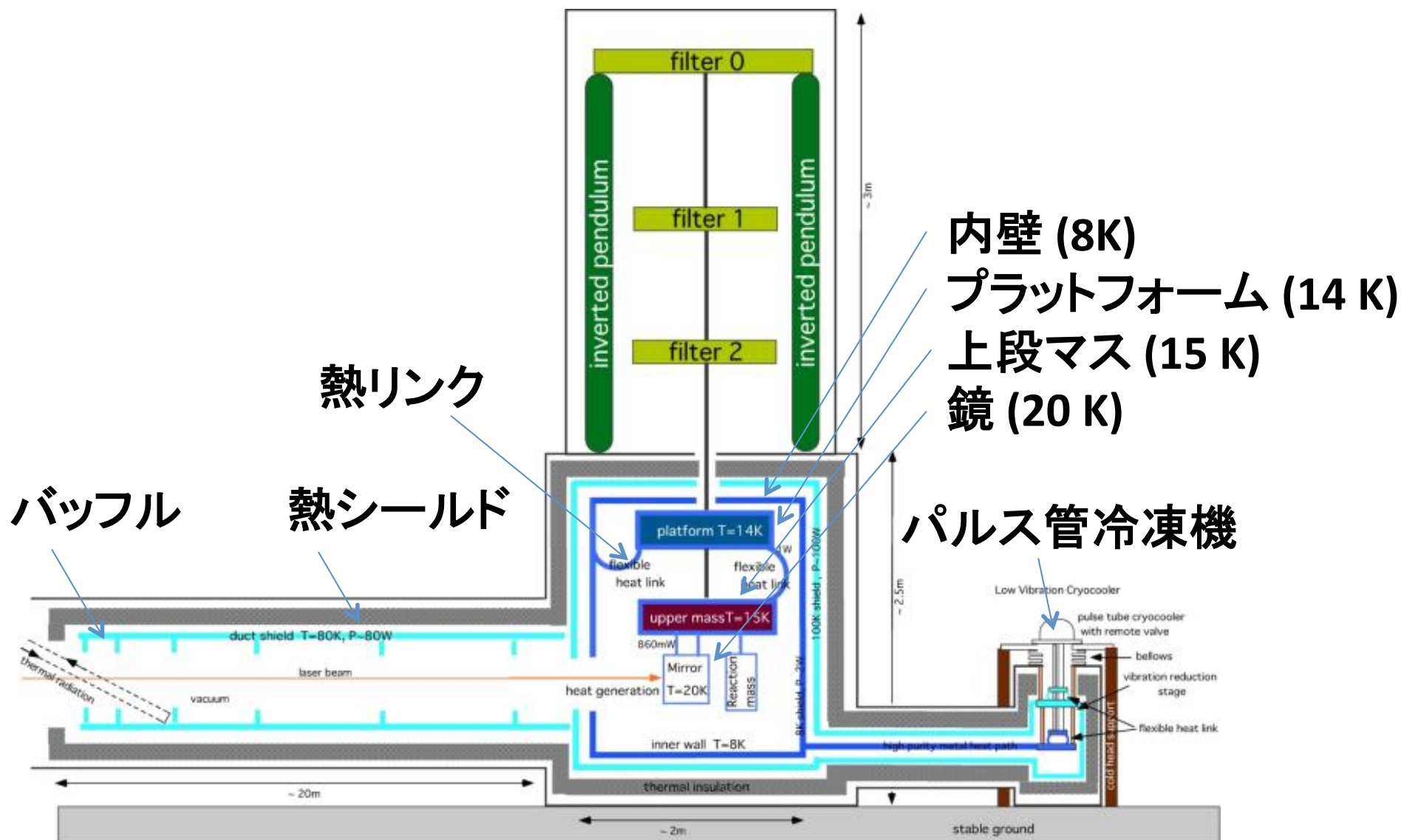


運動エネルギー：
 $(1/2)mv^2 \sim kT/2$

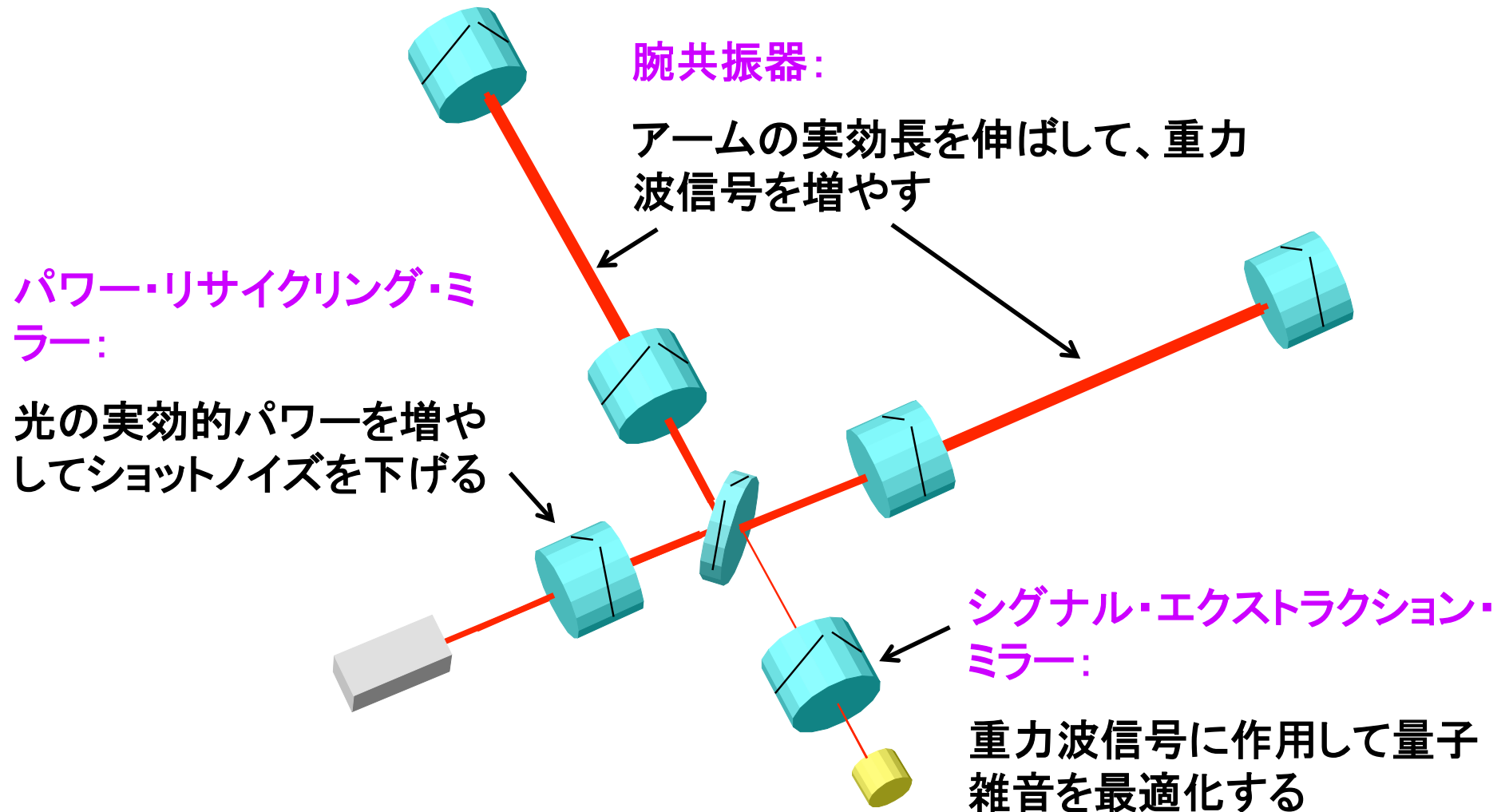
⇒

鏡の変位雑音：
 $\delta x \propto T^{1/2}$

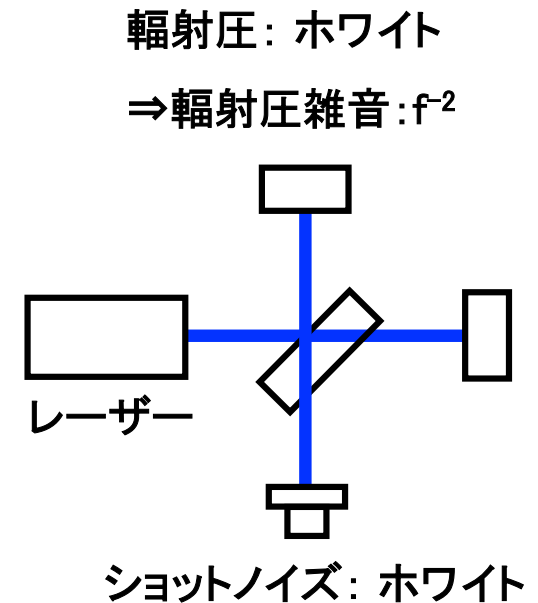
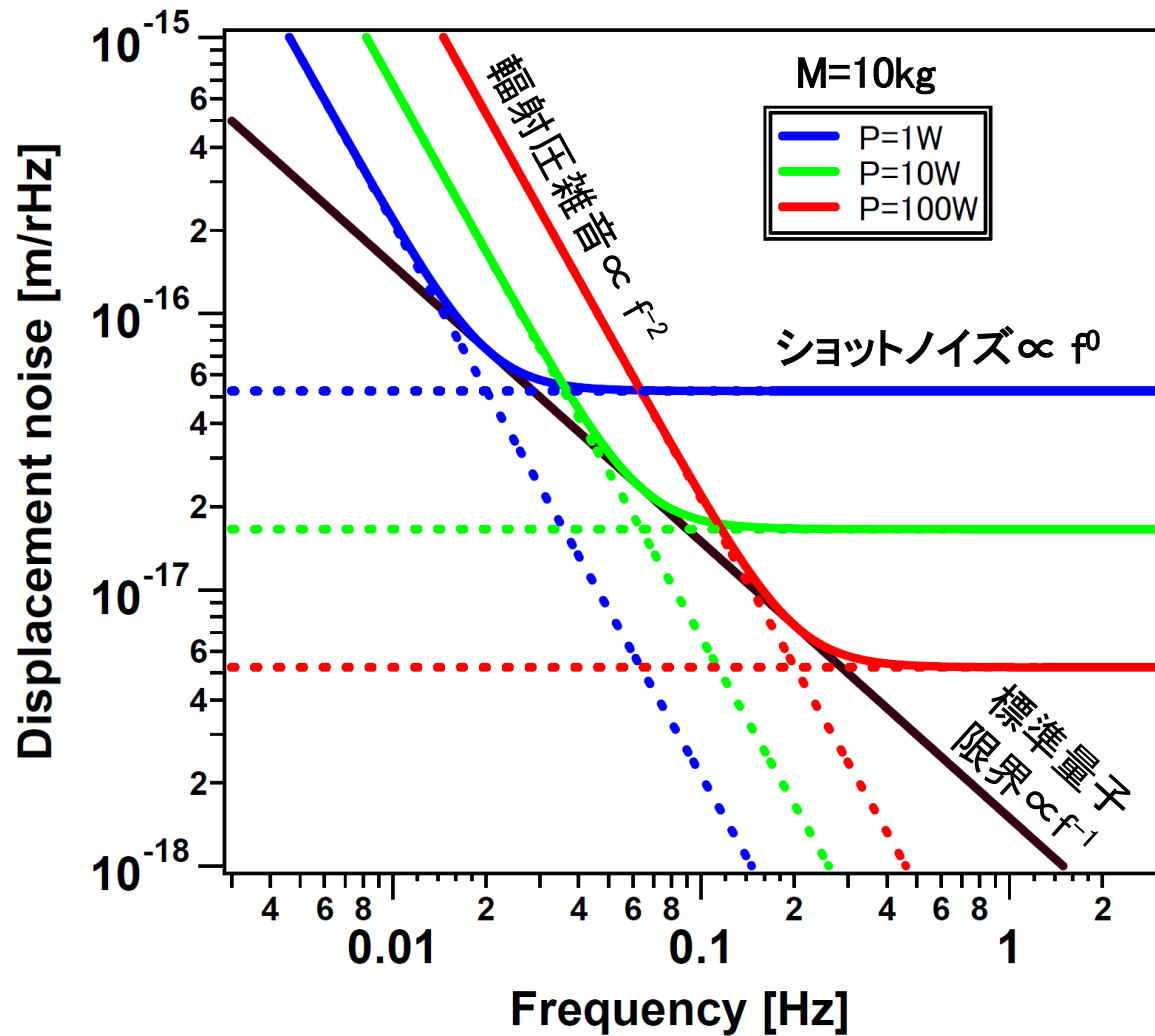
冷却システム



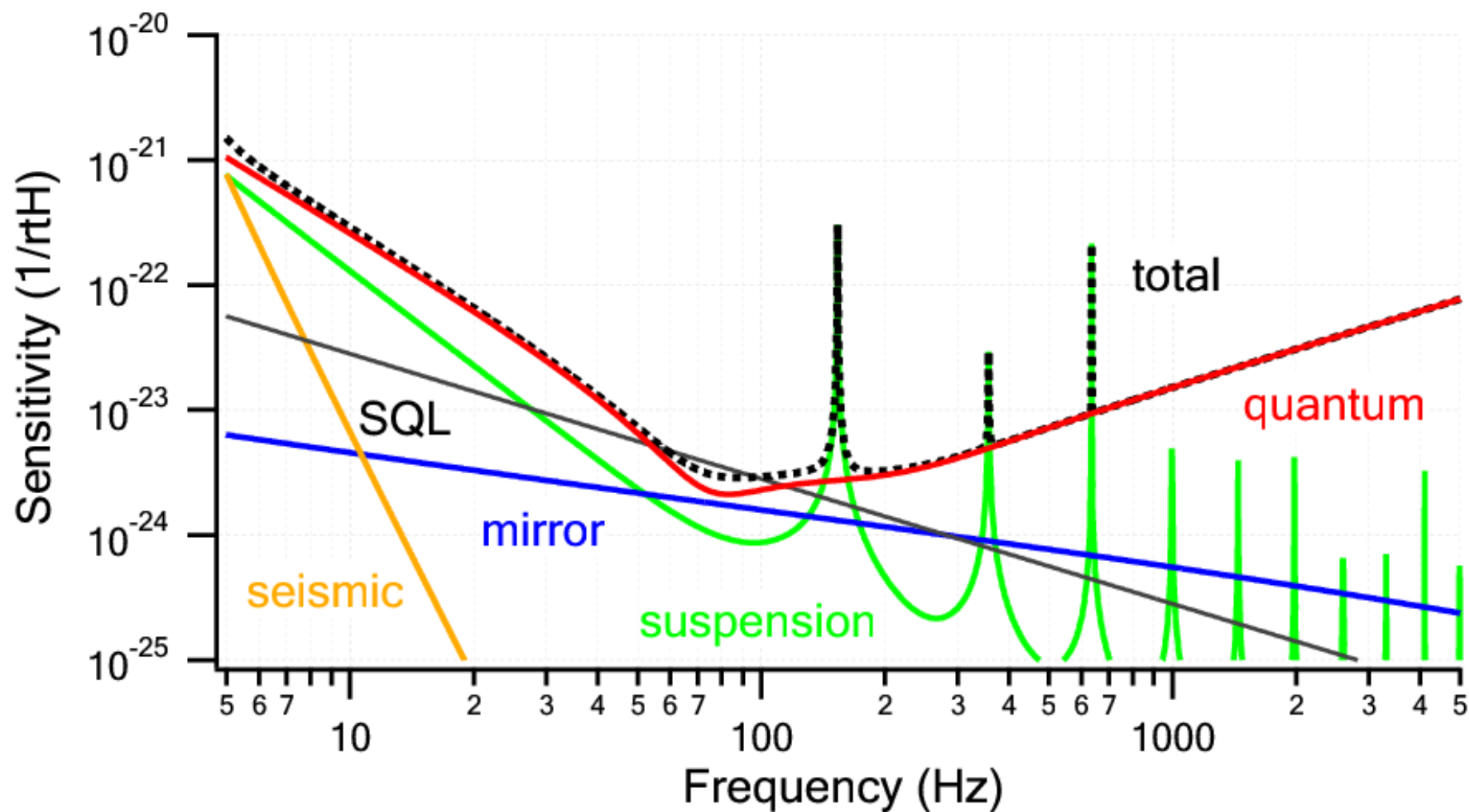
帯域可変型干渉計



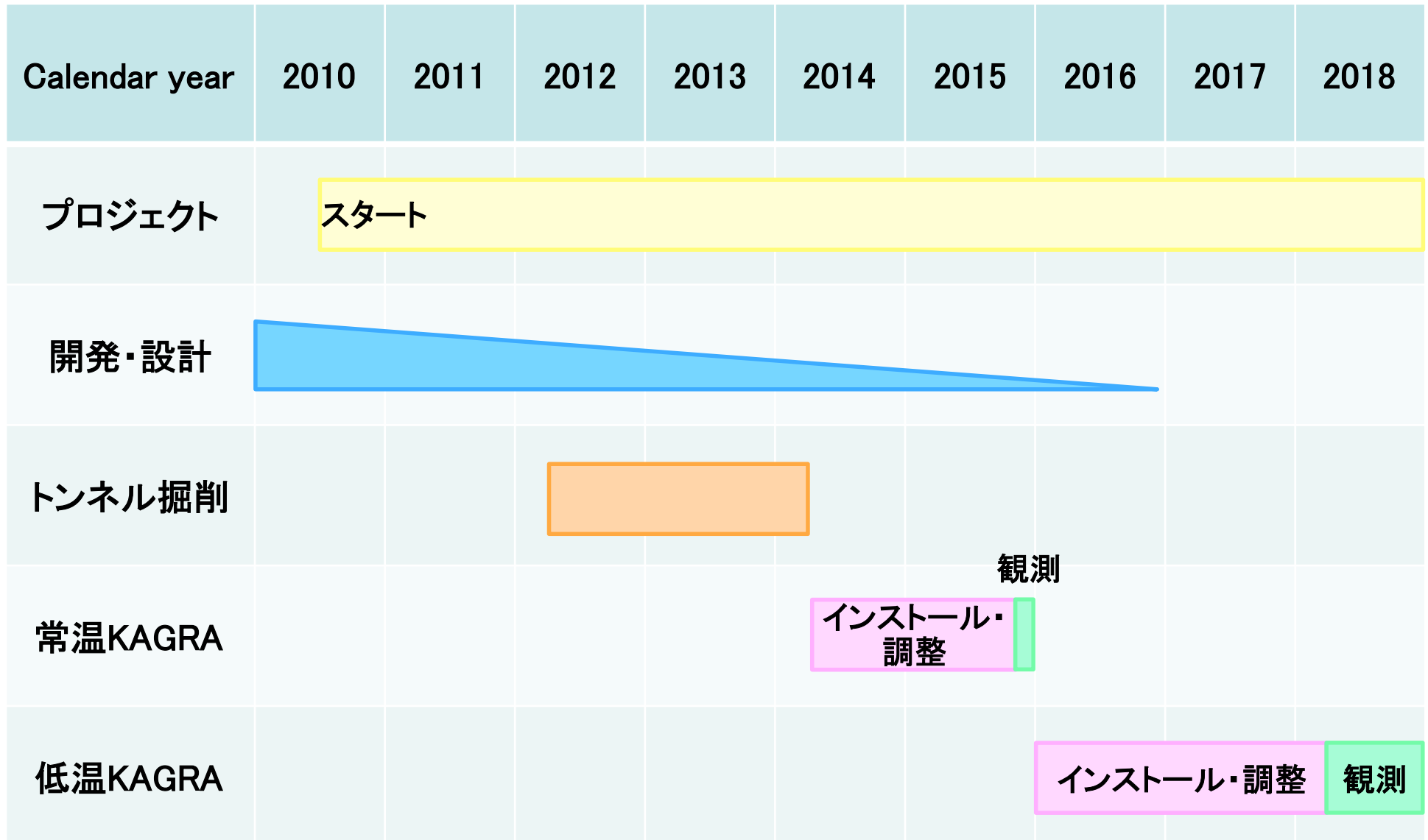
標準量子限界を超える



KAGRAの目標感度



KAGRAのスケジュール





祝：重力波初検出

イラスト：Sora

スペース重力波アンテナ

重力波検出にとって有利

- 低周波で装置の感度が上がる
 - 重力波信号が増幅
 - 光と重力波の相互作用が長く続く
 - ただし高周波では信号がキャンセル
 - 雑音が小さい
 - 地面振動や重力場揺らぎがない/小さい
(地上検出器においては低周波で支配的)
- 低周波では期待できる重力波信号が大きい
 - 重いものはゆっくり動く(低周波)
 - 重いものは大きな重力波を出す

LISA

- ESAと(NASA)の共同計画
- アーム長: 500万km?
- 帯域: 0.3 mHz – 30 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)



スペース重力波アサ
DECIGO

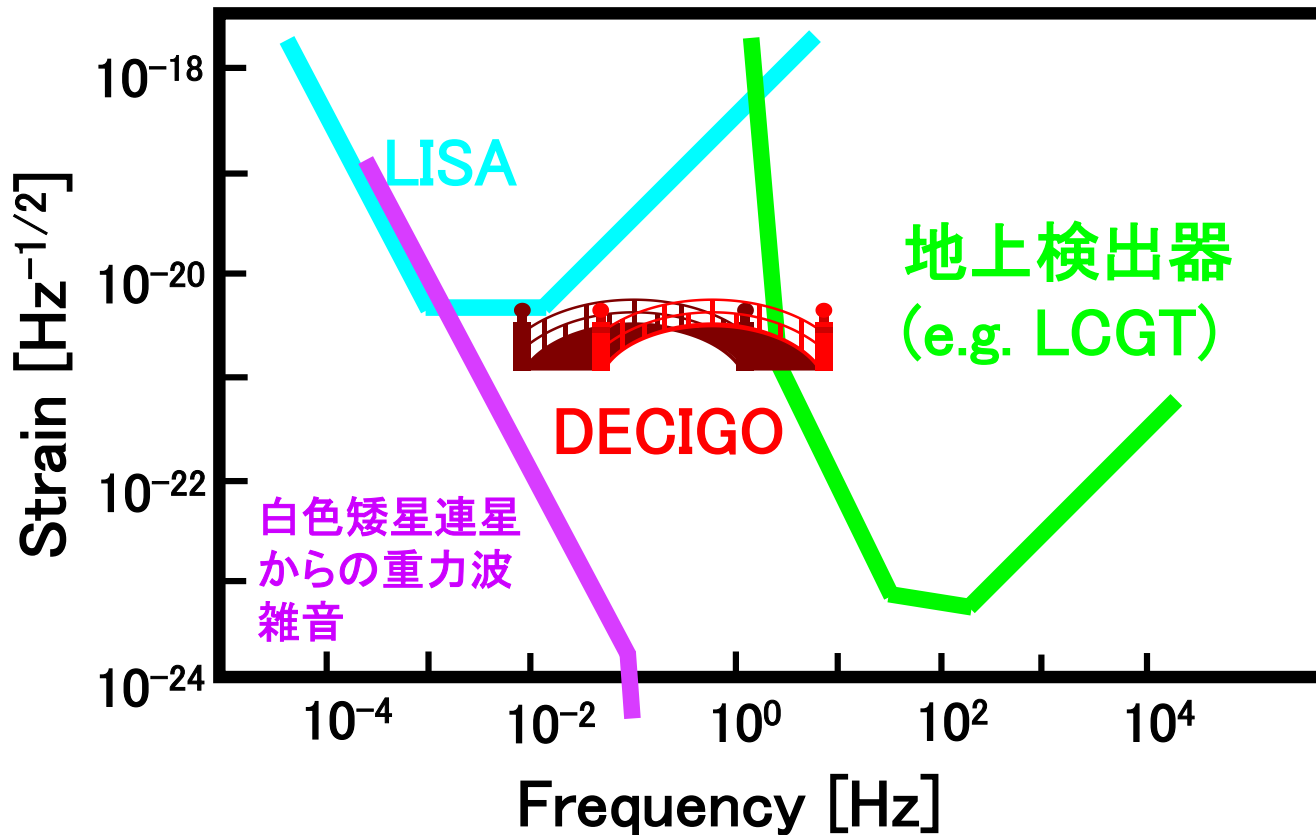


イラスト: Sora

DECIGOとは？

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory

- LISAと地上検出器の帯域のギャップを狙う
- 超高感度の実現が可能！



日本の重力波検出実験の流れ

まずは、

KAGRAで重力波初検出

⇒重力波天文学の創成



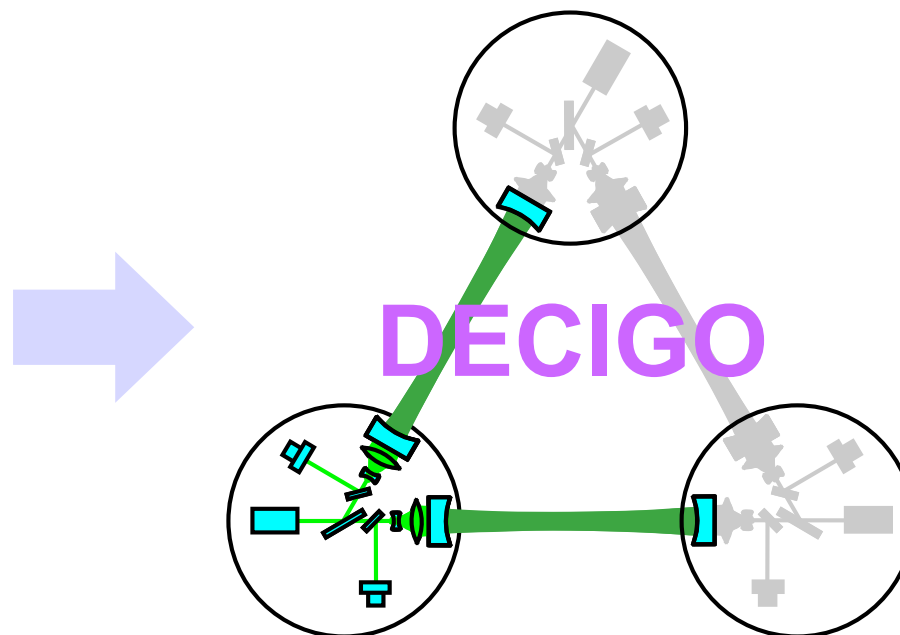
First Priority !

KAGRAで重力波検出技術の熟成

次に、

DECIGOで重力波の頻繁な検出

⇒重力波天文学の発展



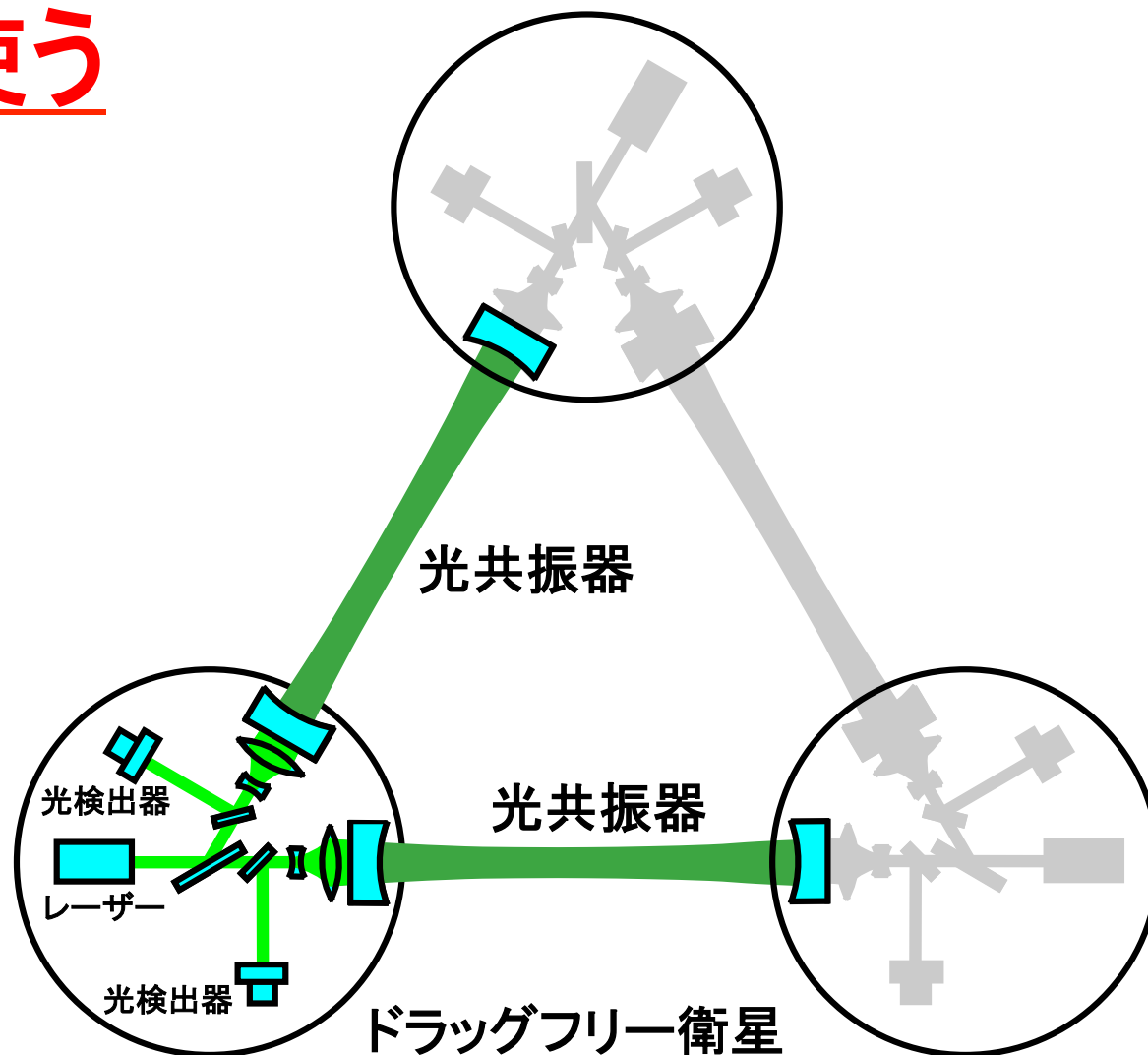
その技術をDECIGO に応用

予備概念設計

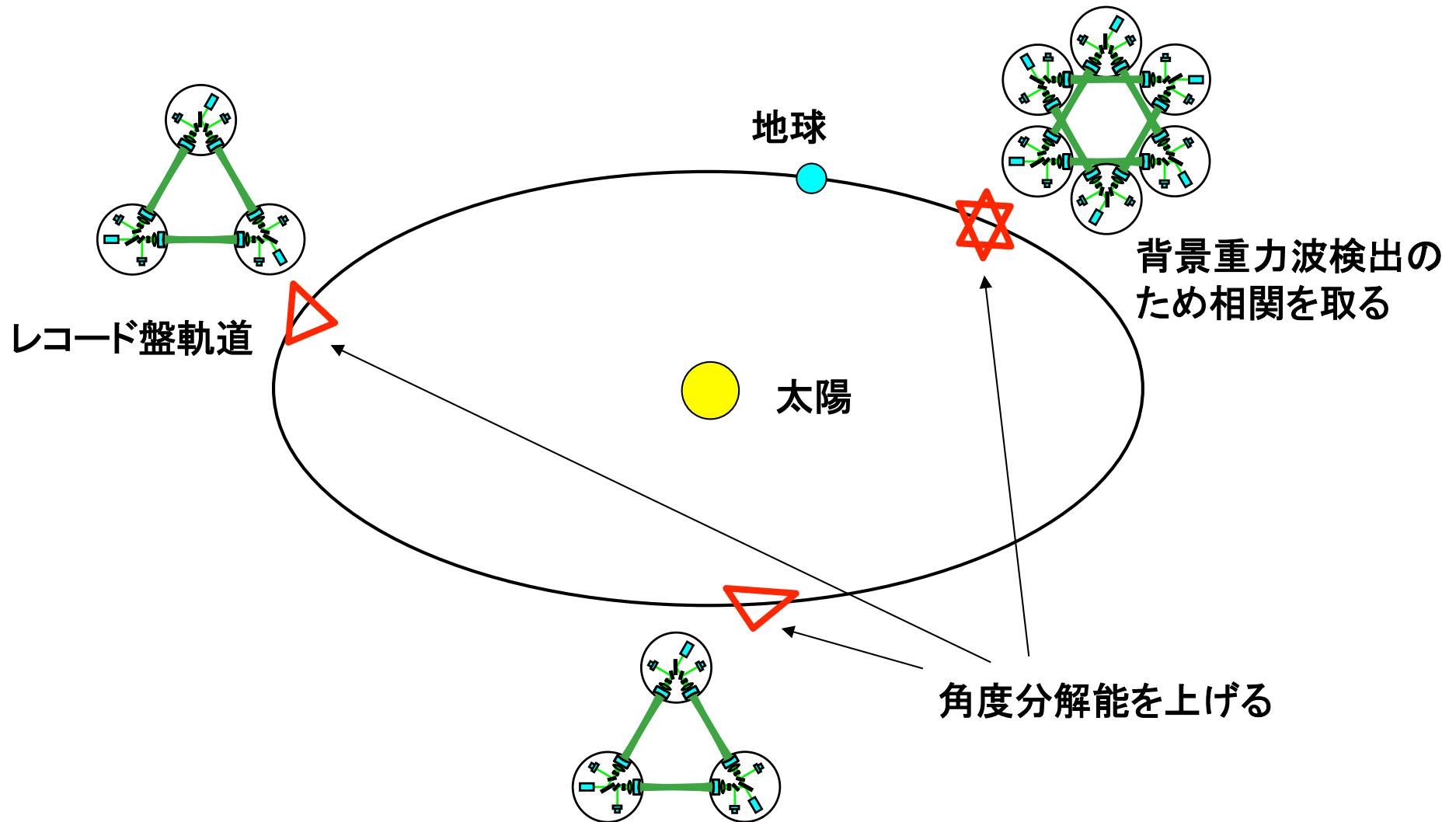
光共振器を使う

アーム長: 1000 km
ミラー直径: 1 m
レーザー波長: 532 nm
フィネス: 10
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

ダークマターの探索

Saito, Yokoyama 2009

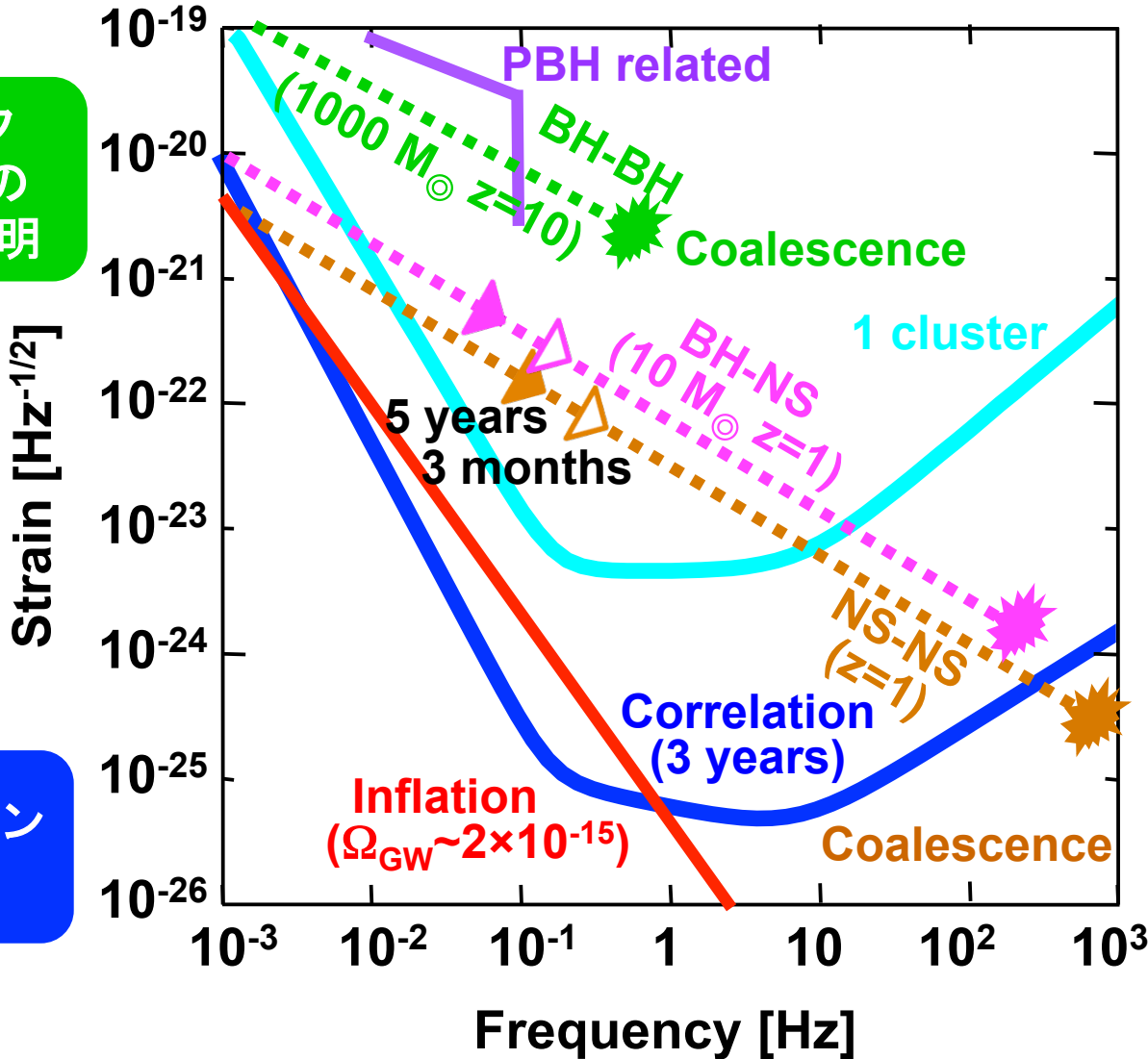
一般相対性理論の検証

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

インフレーションの検証



初期宇宙の直接観測

- インフレーション(宇宙誕生後 10^{-35} 秒後)において発生した重力波の直接観測
 - インフレーション存在の実証
 - インフレーションモデルの正否
 - パリティの破れ(右巻き、左巻きの非対称性)
 - Seto 2007
 - テンソル、スカラー、ベクトルモードの分離
 - Nishizawa, Taruya, Kawamura 2010
- 成功すれば(2個目の)ノーベル賞

ロードマップ

	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								

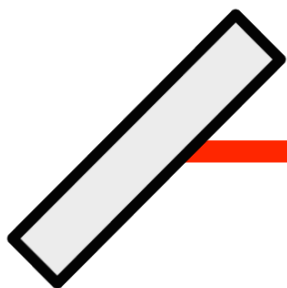
21世紀は
重力波の時代ぜ
よ！



イラスト：
Sora

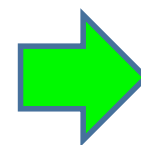
本当に測れるのか？

ビームスプリッター



光の速度が速くなる

ミラー



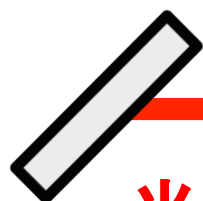
伸びる

キャンセルして測れないのでは？？？

測れます！

(1) 局所慣性系

ビームスプリッター



光の速度は一定

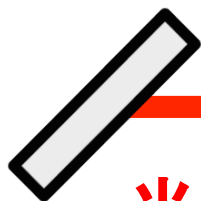
ミラー



伸びる

(2) TT座標系

ビームスプリッター



光の速度が遅くなる

ミラー



動かない

いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！