



KAGRAによる 重力波天文学の創成

物理教室コロキウム
@東京大学宇宙線研究所
平成24年10月5日
川村静児(東大宇宙線研)

イラスト:Sora

JGW-G1201311-v1

話の内容

1. 重力波とその検出
2. 第1世代検出器
3. KAGRA
4. 将来計画
5. まとめ

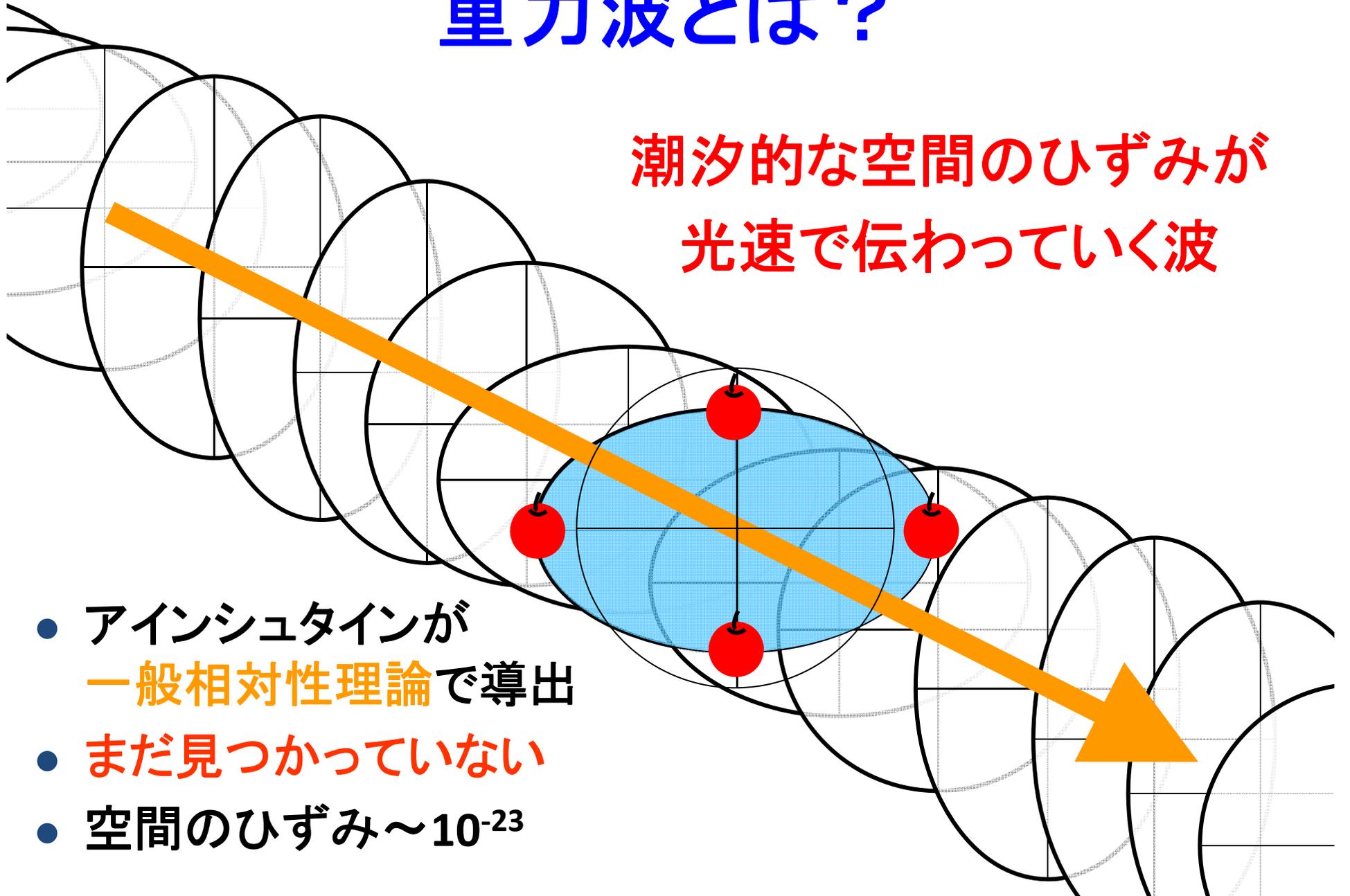
話の内容

1. **重力波とその検出**
2. 第1世代検出器
3. KAGRA
4. 将来計画
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

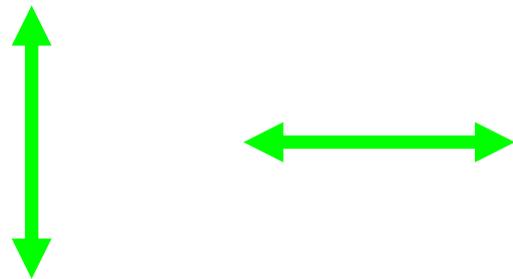
- アインシュタインが
一般相対性理論で導出
- まだ見つかっていない
- 空間のひずみ $\sim 10^{-23}$



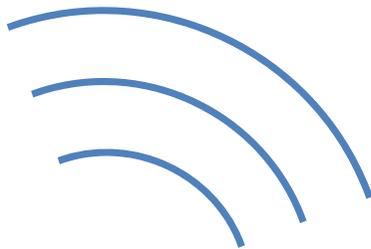
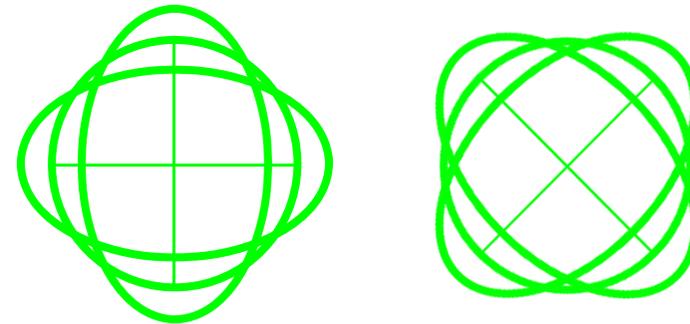
重力波と電磁波の違い

電磁波(ベクトル)

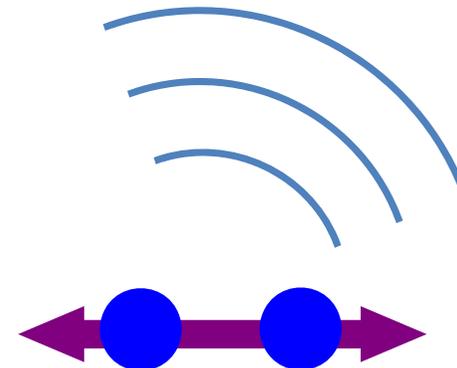
重力波(テンソル)



偏光

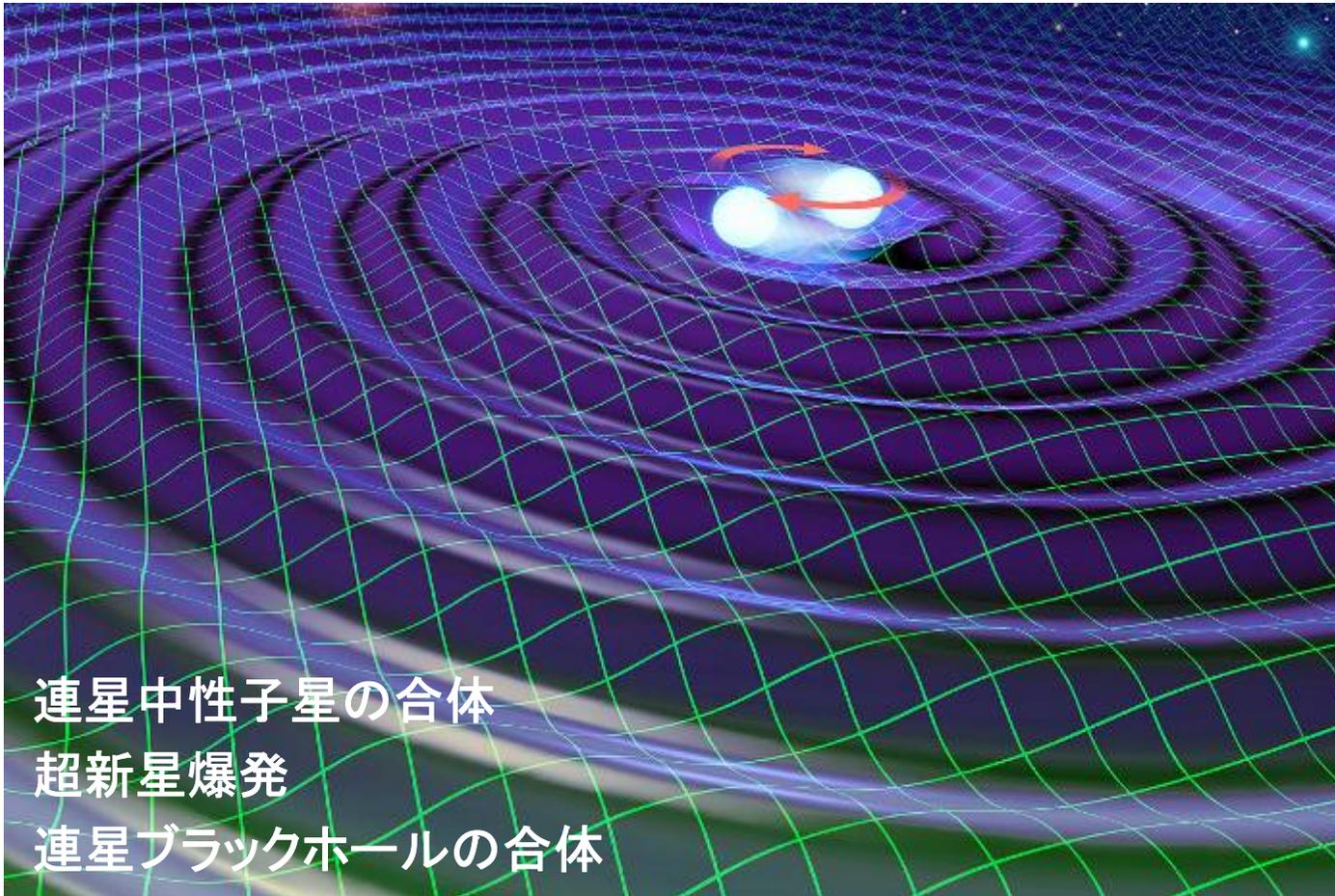


電荷(双極子放射)



質量(四重極子放射)

重力波のイメージ

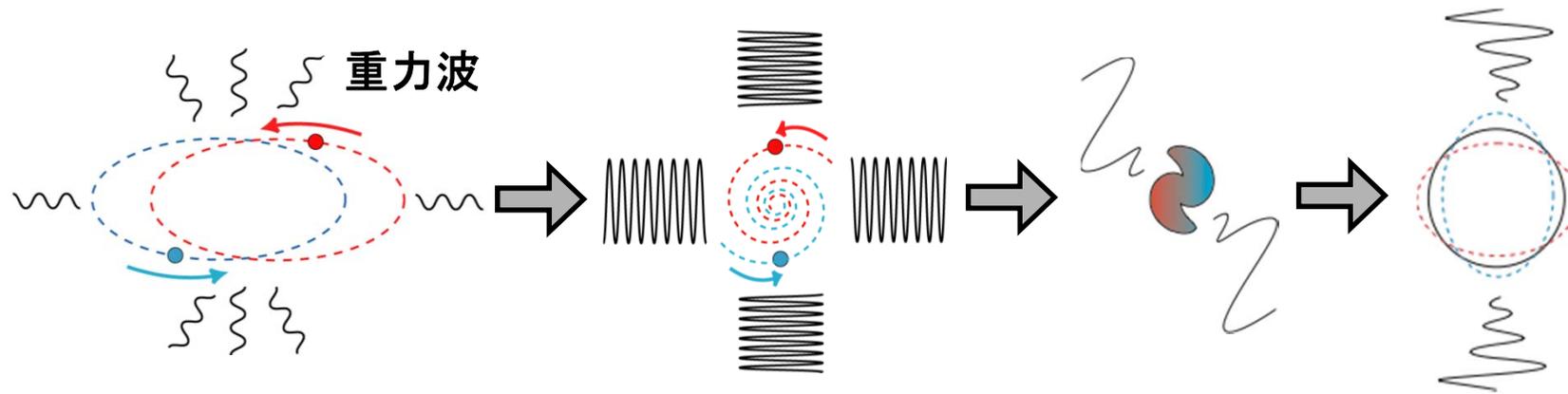


連星中性子星の合体
超新星爆発
連星ブラックホールの合体



CG/KAGAYA

中性子星連星の合体

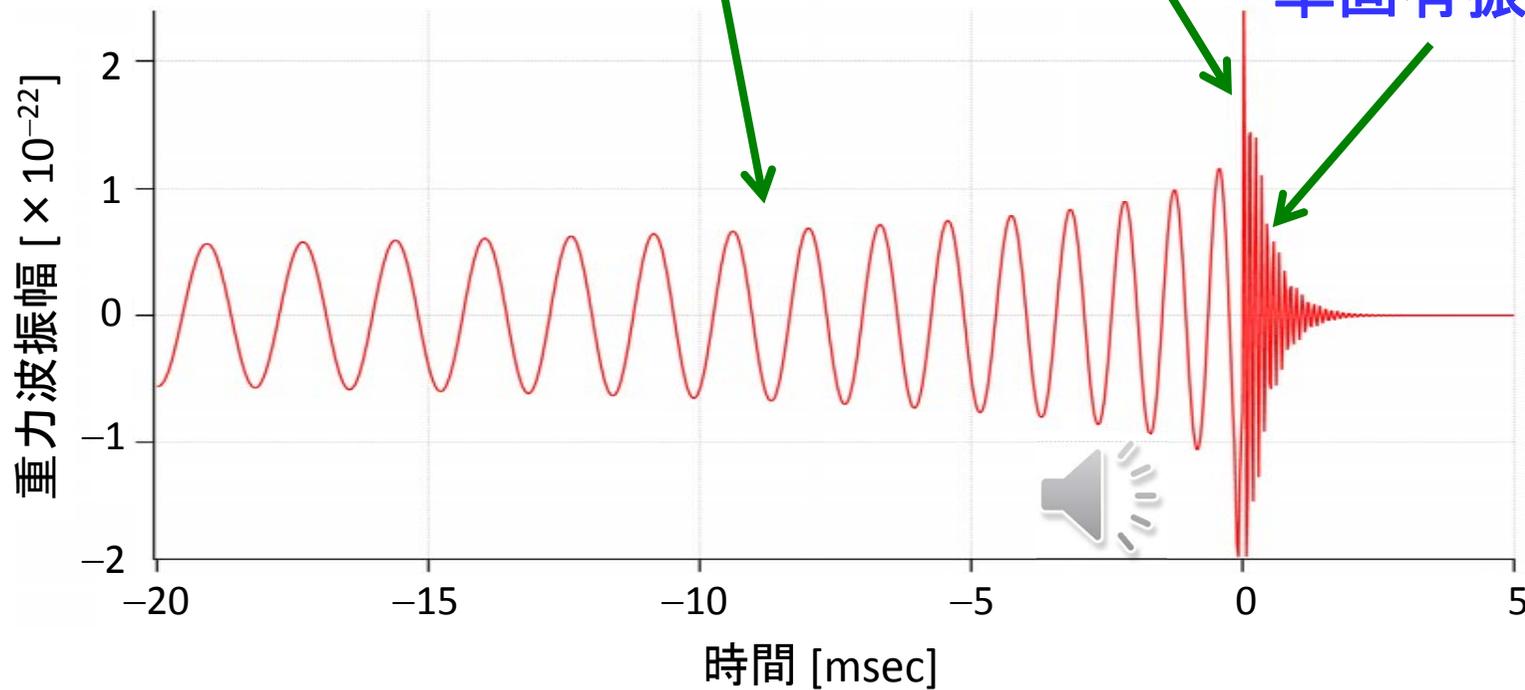


公転運動

インスパイラル

合体

ブラックホールの
準固有振動



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

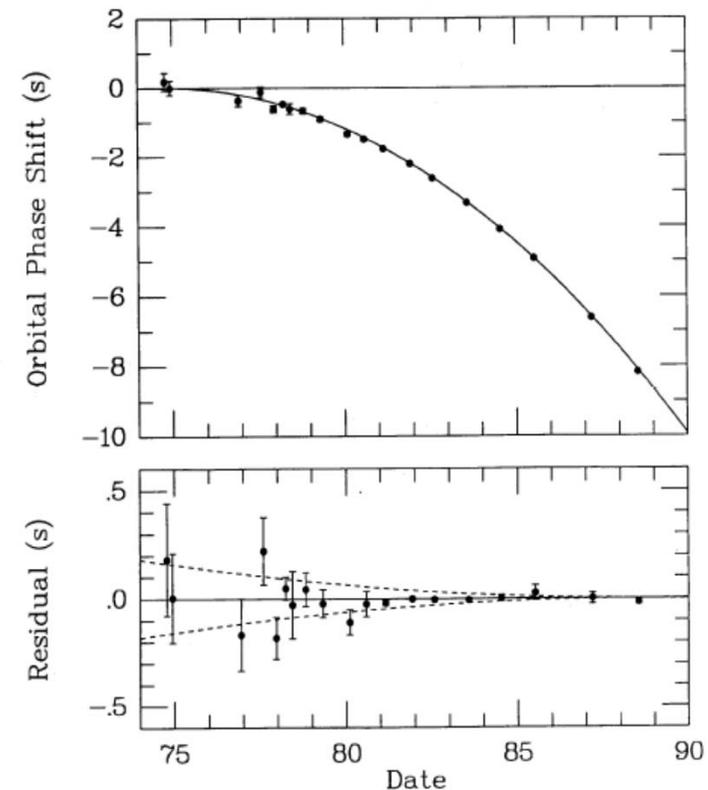
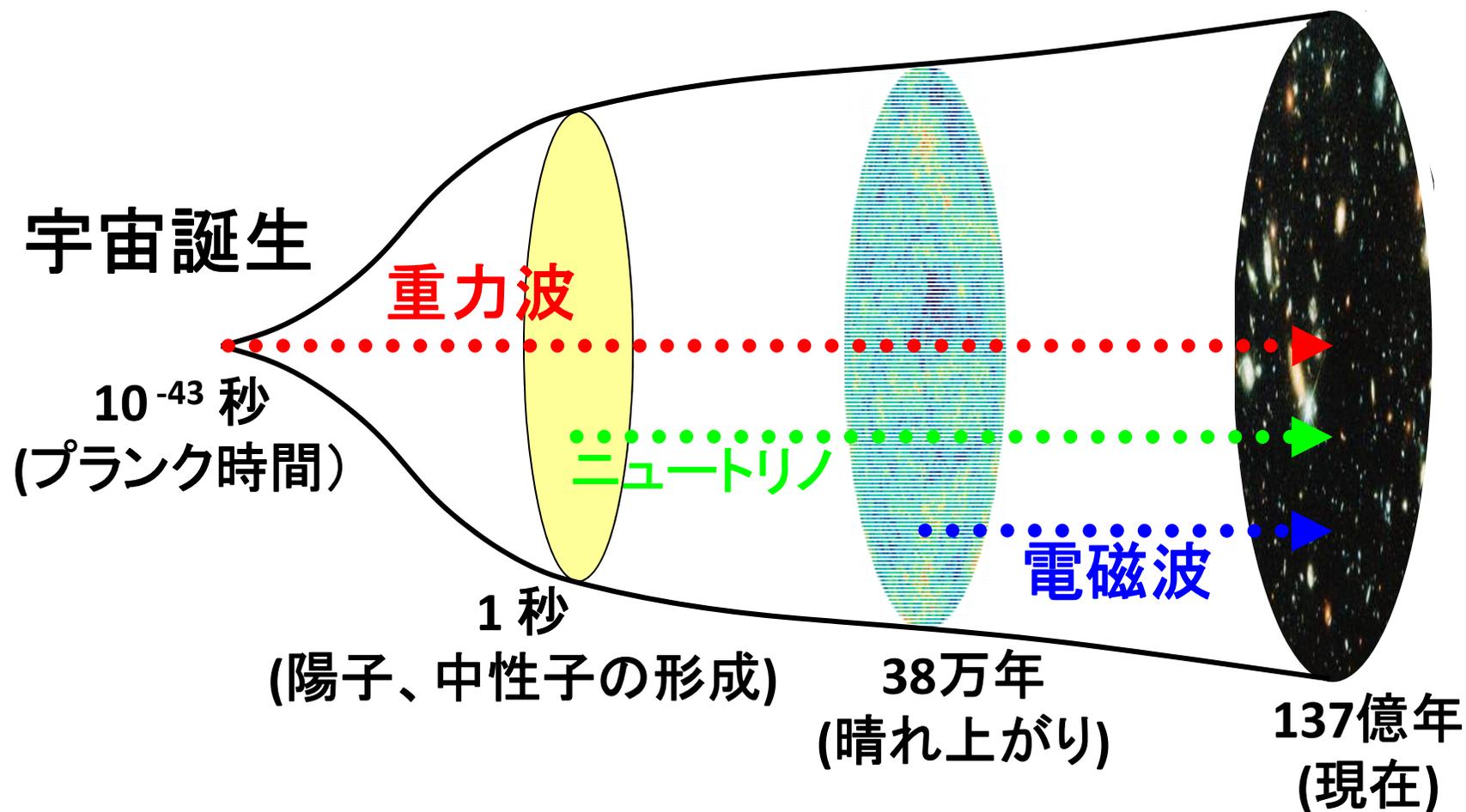


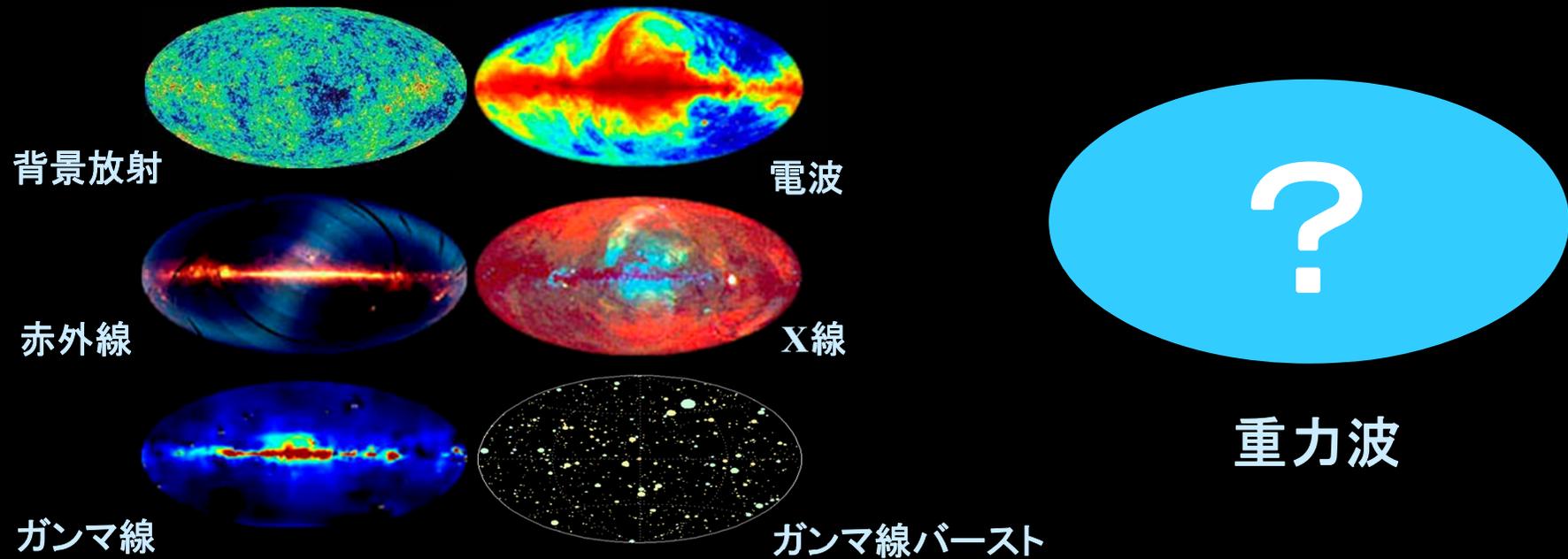
FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves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

重力波で宇宙の始まりを観る！



重力波天文学



重力波によって想像を絶するような、新しい天体が見つかることも期待できる

電磁波・宇宙線による観測との 相補・融合

背景画:
NASA/WMAP Science Team

電磁波による観測

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線

さまざまな天体现象

宇宙背景放射

宇宙論

インフレーション
ダークエネルギー

初期宇宙
からの重力波

未知の重力波源

天文学

星形成
恒星進化
ガンマ線バースト
ブラックホール
巨大
ブラックホール

中性子星連星
からの重力波

低周波
重力波観測

重力波による観測

宇宙線による観測

ニュートリノ 高エネルギー
宇宙線

原子核理論

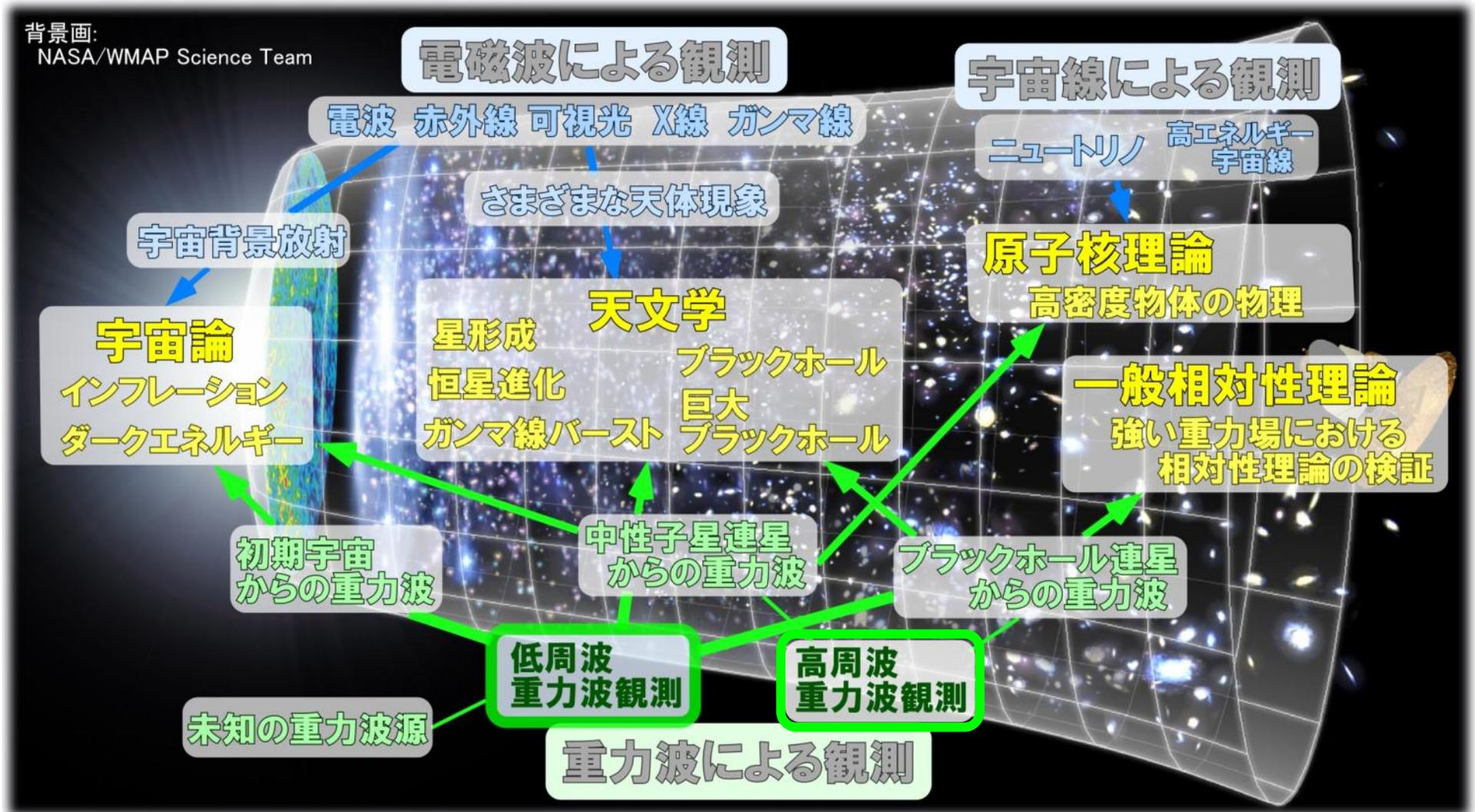
高密度物体の物理

一般相対性理論

強い重力場における
相対性理論の検証

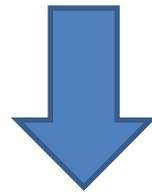
ブラックホール連星
からの重力波

高周波
重力波観測



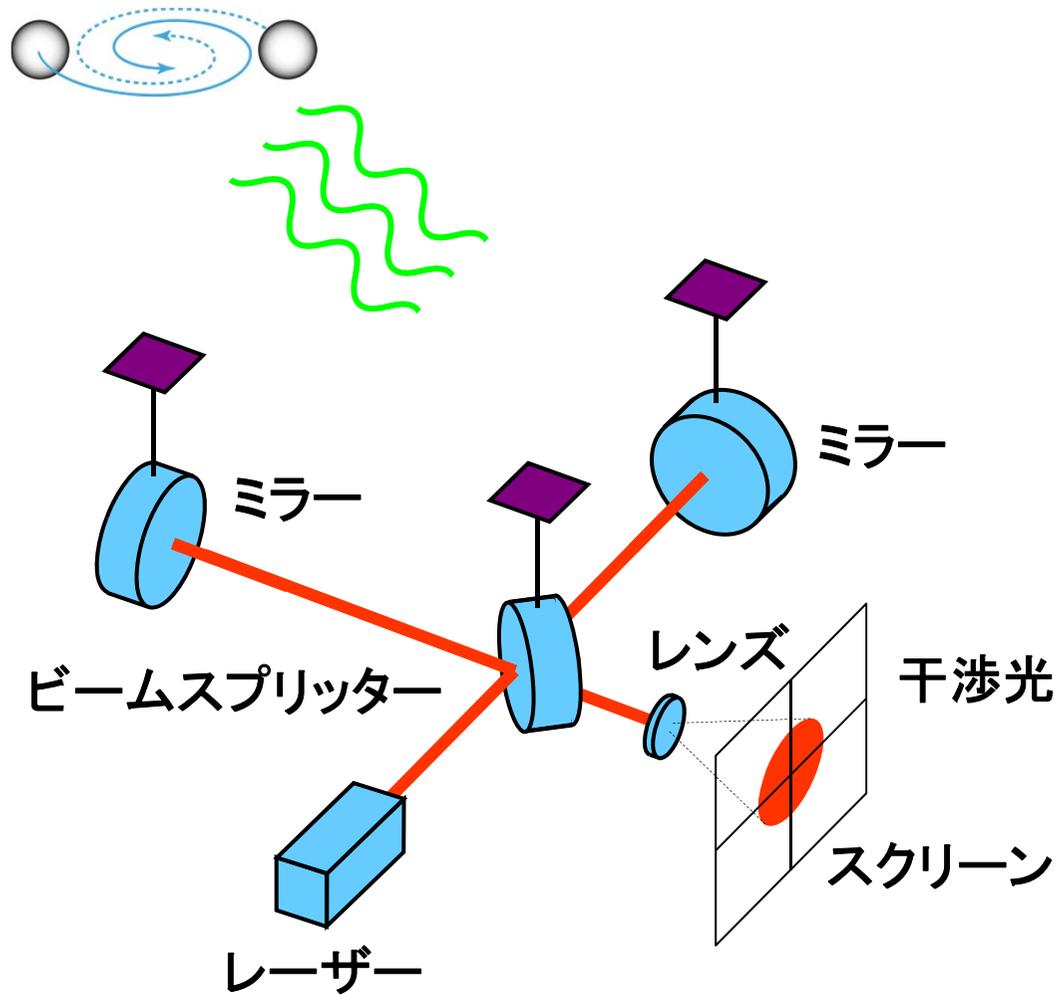
余剰次元の検証？

- もし余剰次元が実在すれば，天体から発せられた重力波が，余剰次元方向に逃げていく可能性がある
- その場合，余剰次元が存在しないと考えた場合よりも，重力波が弱く観測される



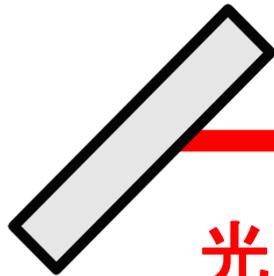
余剰次元の存在の検証

レーザー干渉計による重力波検出



本当に測れるのか？

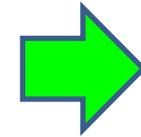
ビームスプリッター



光のみかけの速度が速くなる



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



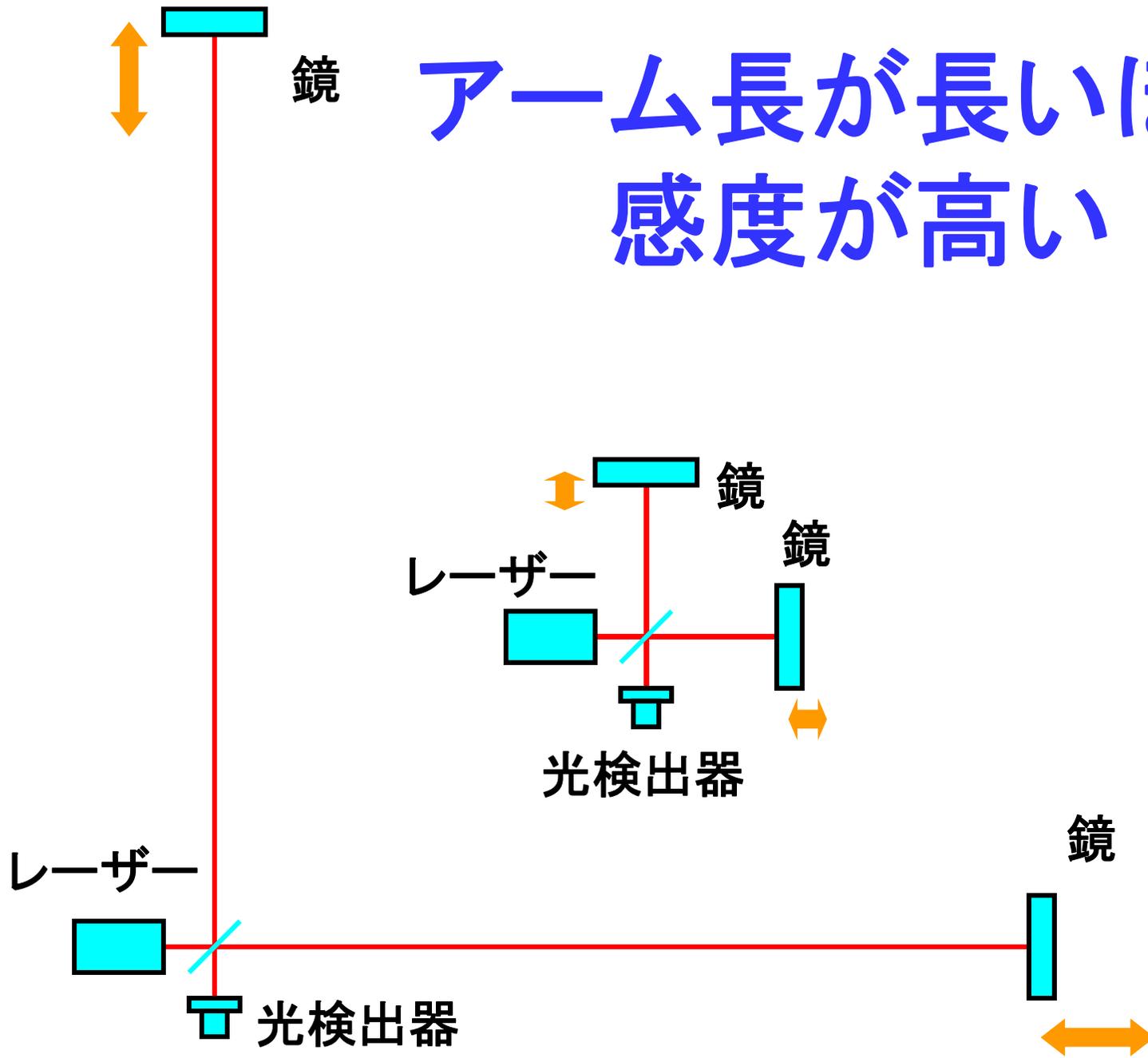
(2) TT座標系



いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！

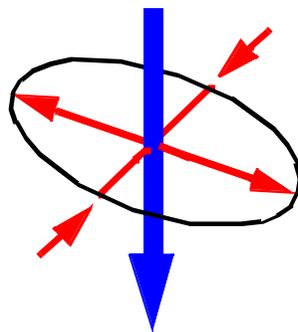
鏡

アーム長が長いほど
感度が高い

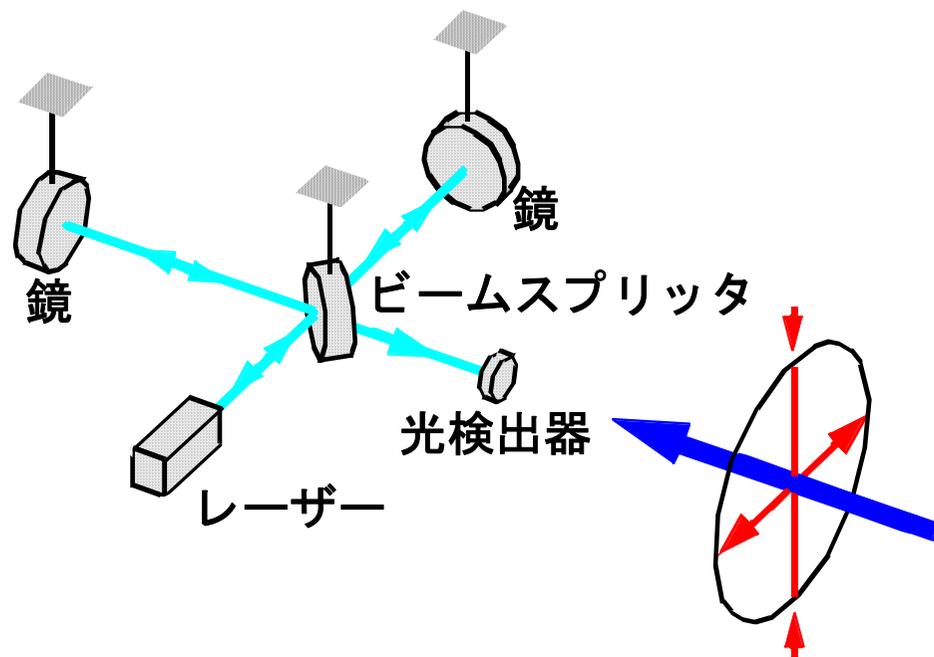
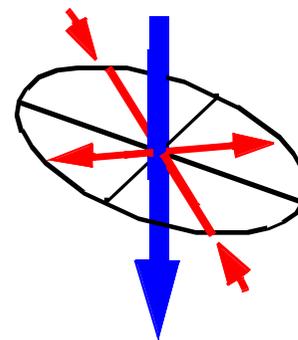


干渉計の指向性

応答:最高



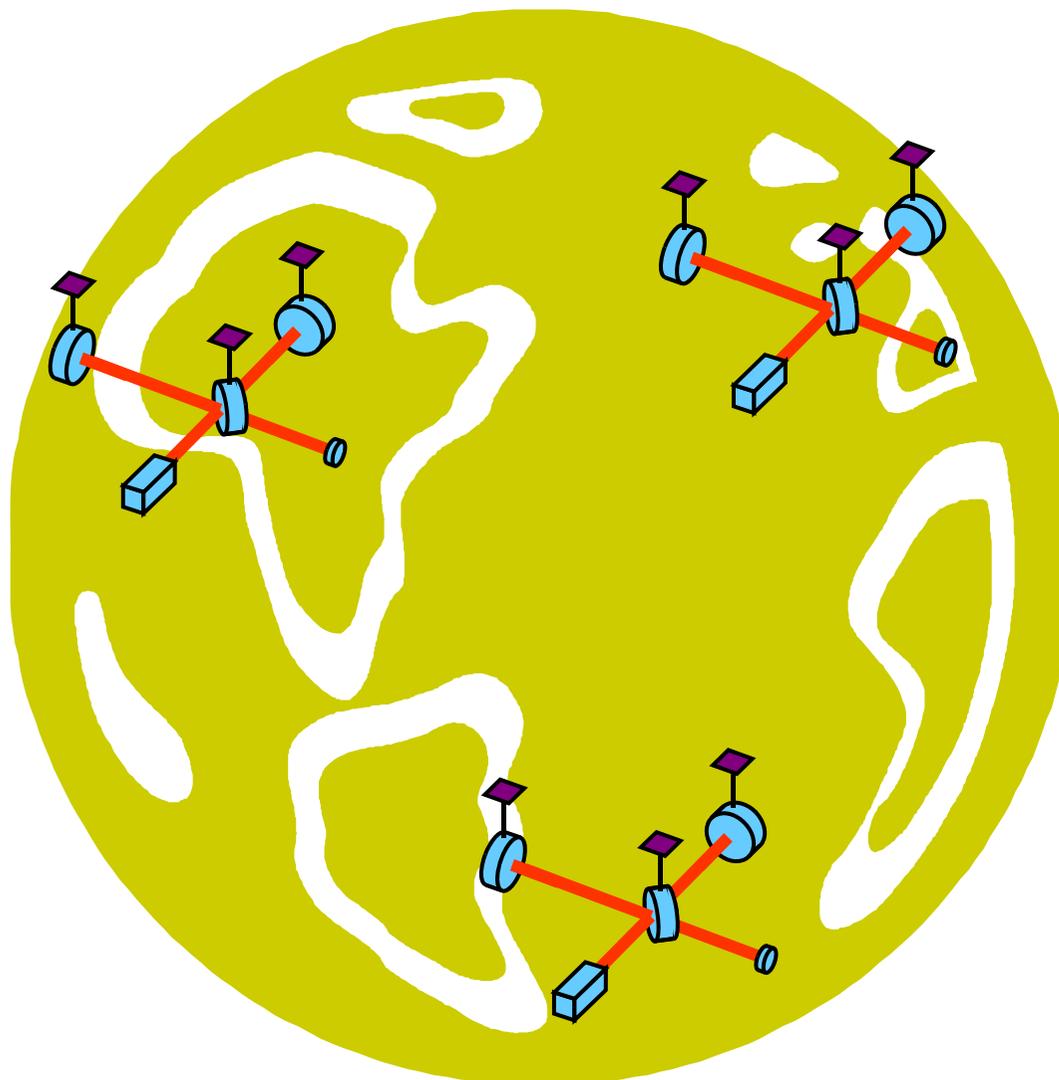
応答:ゼロ



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

重力波源の方向は？

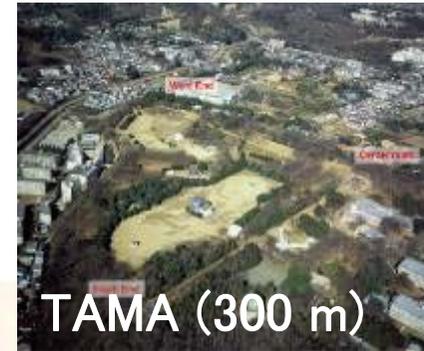


3台あれば
時間差から
方向が分かる！

話の内容

1. 重力波とその検出
- 2. 第1世代検出器**
3. KAGRA
4. 将来計画
5. まとめ

世界の第1世代検出器



An aerial photograph of the TAMA300 facility, showing a large green field in the center, surrounded by trees and buildings. The text 'TAMA300' is overlaid in large yellow characters. The text 'KAGRAのための常温プロトタイプ' is overlaid in yellow characters. The text '2000年から2年間、世界最高感度' is overlaid in yellow characters. The text '達成感度：我々の銀河の中性子星連星の合体からの重力波が検出可能' is overlaid in yellow characters. The text '西エンド' is overlaid in white characters. The text '南エンド' is overlaid in white characters. The text '中央実験室' is overlaid in white characters. The image is split into two parts: the top left shows the interior of the TAMA300 tunnel, and the rest is an aerial view.

TAMA300

西エンド

KAGRAのための常温プロトタイプ

2000年から2年間、世界最高感度

達成感度：我々の銀河の中性子星連星の合体からの重力波が検出可能

南エンド

中央実験室



LIGO

アーム長: 4 km & 2 km

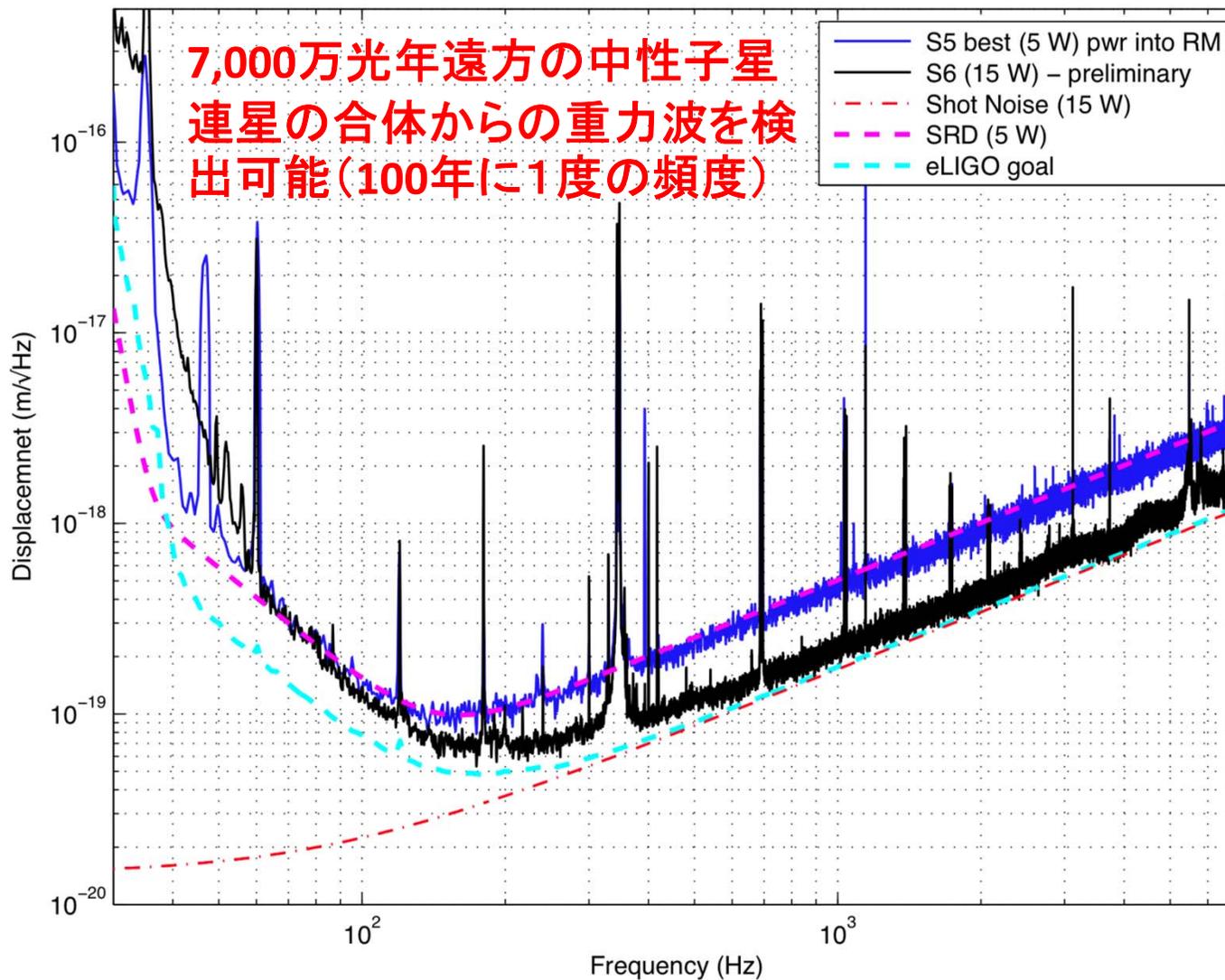
Hanford, Washington

アーム長: 4 km



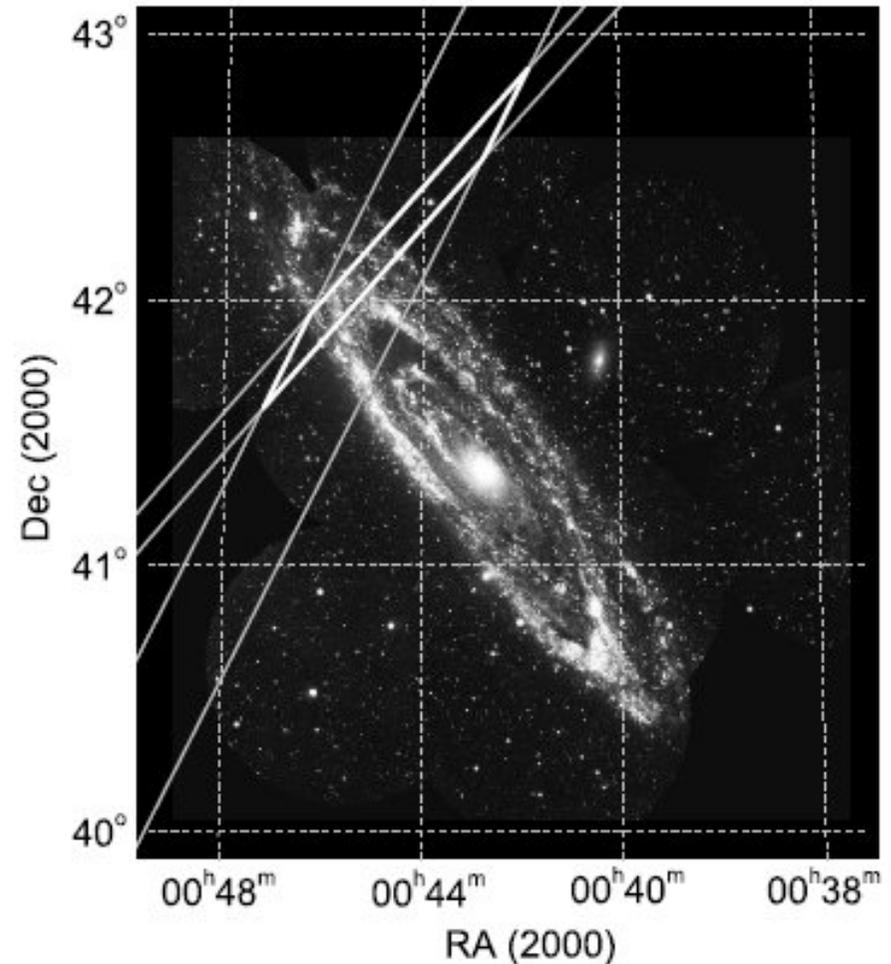
LIGOの感度

H1 DARM Noise. SensMon 21.5 Mpc. GPS 957935880.



GRB 070201

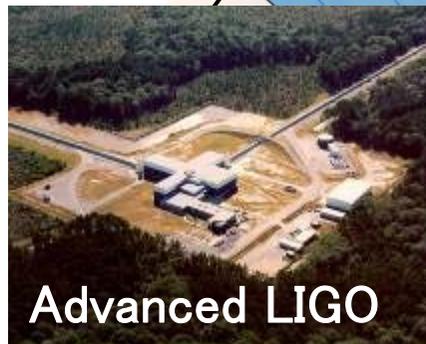
- GRB 070201
 - Short GRB
 - M31の腕を含む方向から到来
- 重力波検出されず
 - LIGO H1のデータ解析(180 s)
- M31におけるNS-NS、NS-BHの合体ではない
 - $m_1:1M_s-3M_s$, $m_2:1M_s-40M_s$
 - 99% CL
- 重力波エネルギー: 7.9×10^{50} erg以下 (if M31)
 - SGR (in M31)の可能性は排除しない



話の内容

1. 重力波とその検出
2. 第1世代検出器
- 3. KAGRA**
4. 将来計画
5. まとめ

世界の第2世代検出器

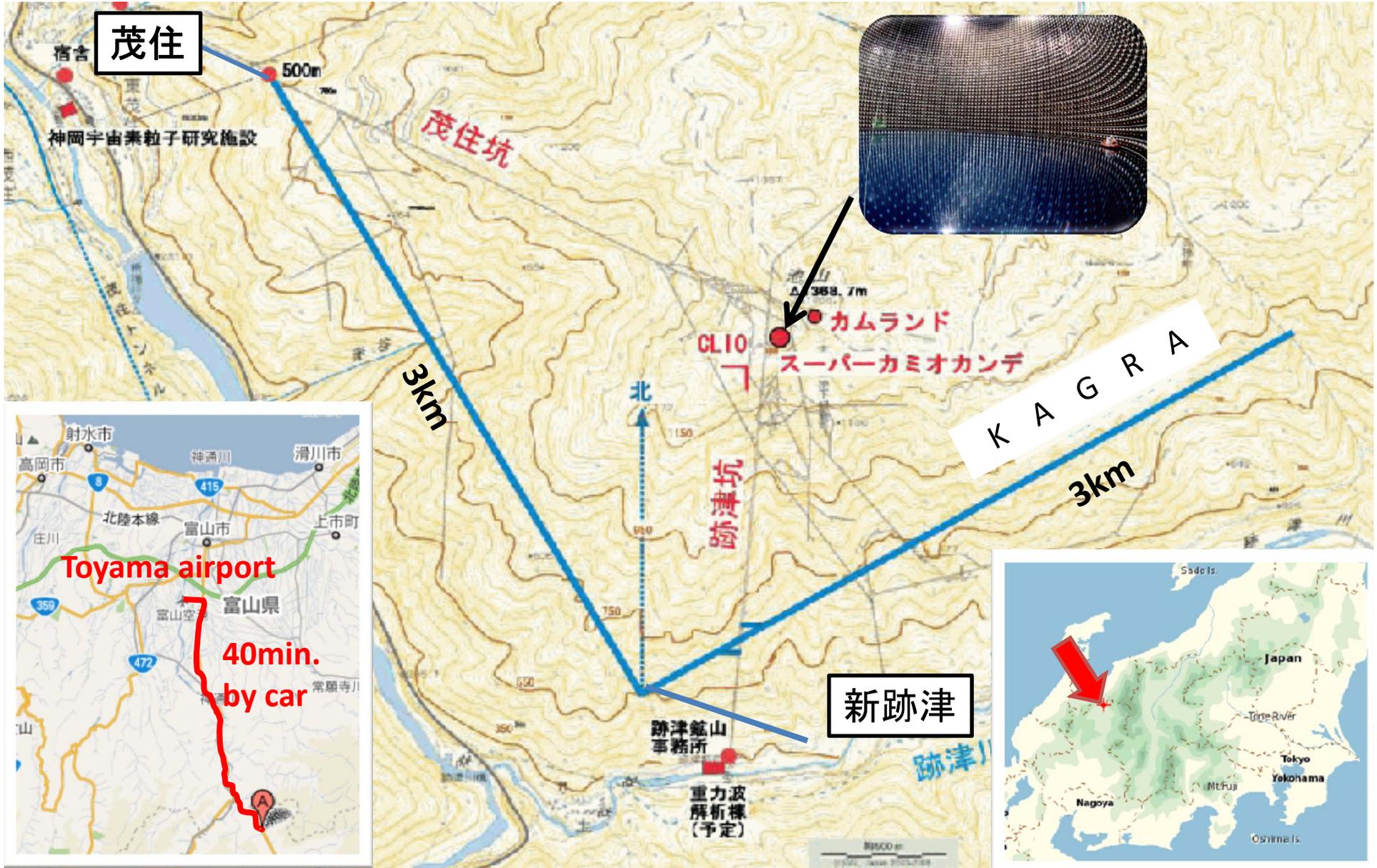


KAGRA

重力波を検出し
重力波天文学を創成する



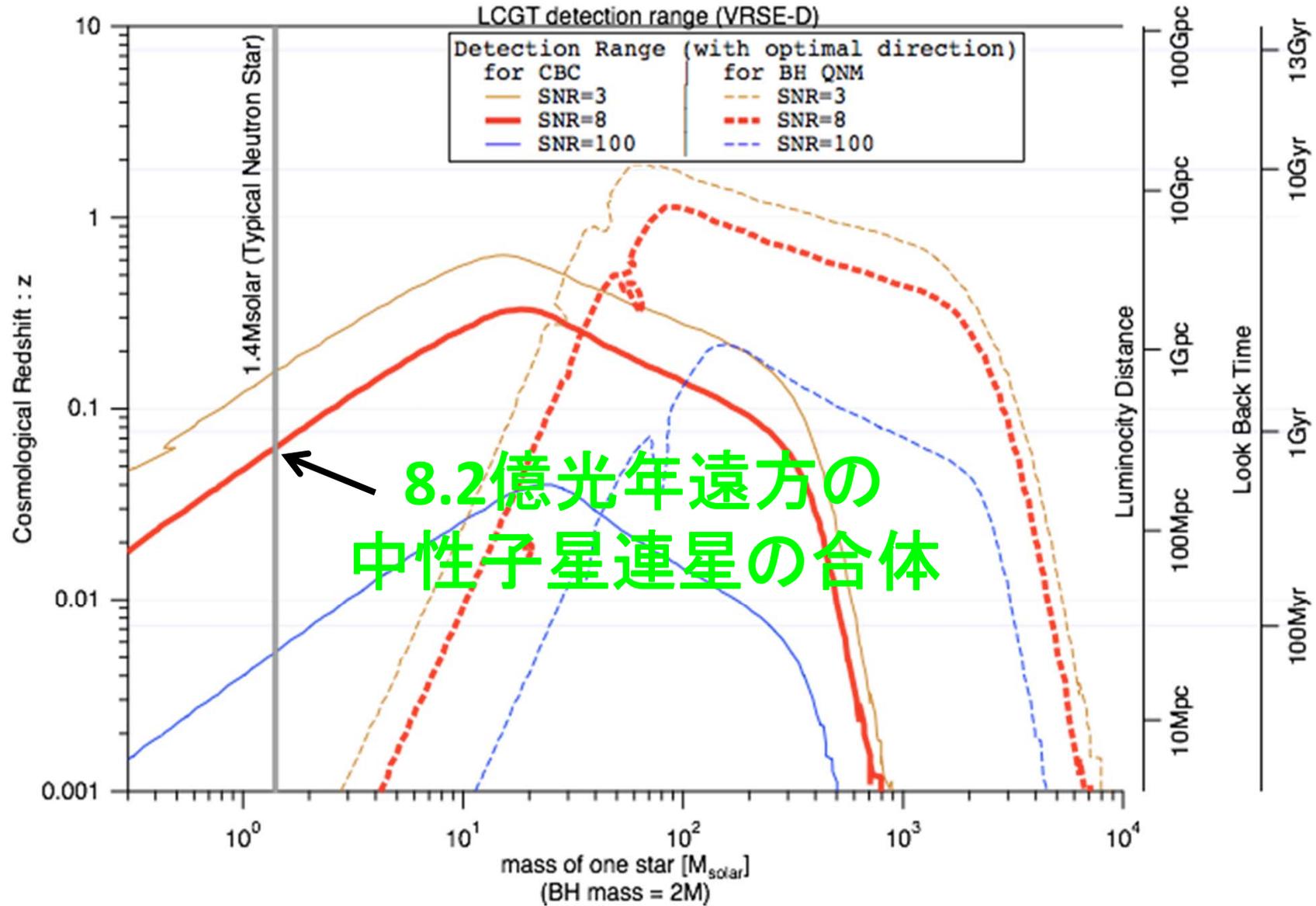
神岡



最も有力な重力波源

- 中性子星連星の合体直前に出される重力波
 - 波形がよく分かっている
 - 数秒間積分できる
- 期待される検出頻度は？
 - どのくらい遠くまで見れるか？
 - 合体はどのくらいの頻度で起こるか？

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

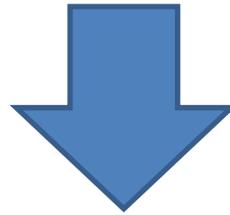
LCGTのイベントレート：

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

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

ブラックホール連星の合体

- 例えば太陽質量の20倍程度のブラックホール連星に対して、65億光年遠方までの検出を目指す
- ブラックホール連星の合体の頻度についてはまだよく分かっていないが、1～30個/年という予測もある

ブラックホールの準固有振動

- 連星合体でブラックホールが生成されたり、ブラックホールに小さな天体が落ち込んだりする際には、特徴的な減衰を含むブラックホールの準固有振動が起こる
- **100億光年遠方**で起こる太陽質量の100～300倍程度のブラックホールの準固有振動を検出することを目指す

超新星爆発

- 周波数は100 Hz～1 kHz
- 約330万光年遠方で起こる超新星爆発からの重力波の検出を目指す
- 局所銀河群のかなりの部分をカバー
- 数十年に1度程度の検出を期待
- スーパーカミオカンデとの同時観測が非常に重要

パルサー

- **かにパルサー**や**ベラパルサー**などはスピンダウンレートから求まる重力波振幅の上限値が大きいため、検出の可能性あり
- ビームが地球の方向を向いていないため、**電波**などでは見つかっていない**パルサー**からの重力波が検出されるかもしれない

初期宇宙

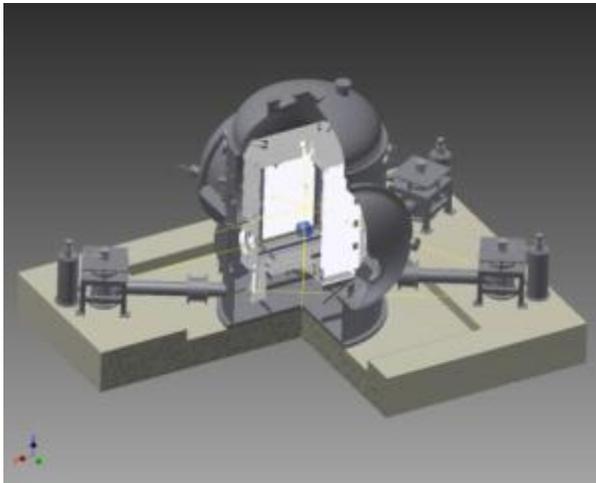
- **標準モデル**で予測されるインフレーションから発生する重力波の検出は期待できない
- しかし、初期宇宙に起こった相転移や、その化石である位相的欠陥の運動に伴って生成した重力波など、**思わぬ起源の重力波**が検出される可能性はある

未知なる天体

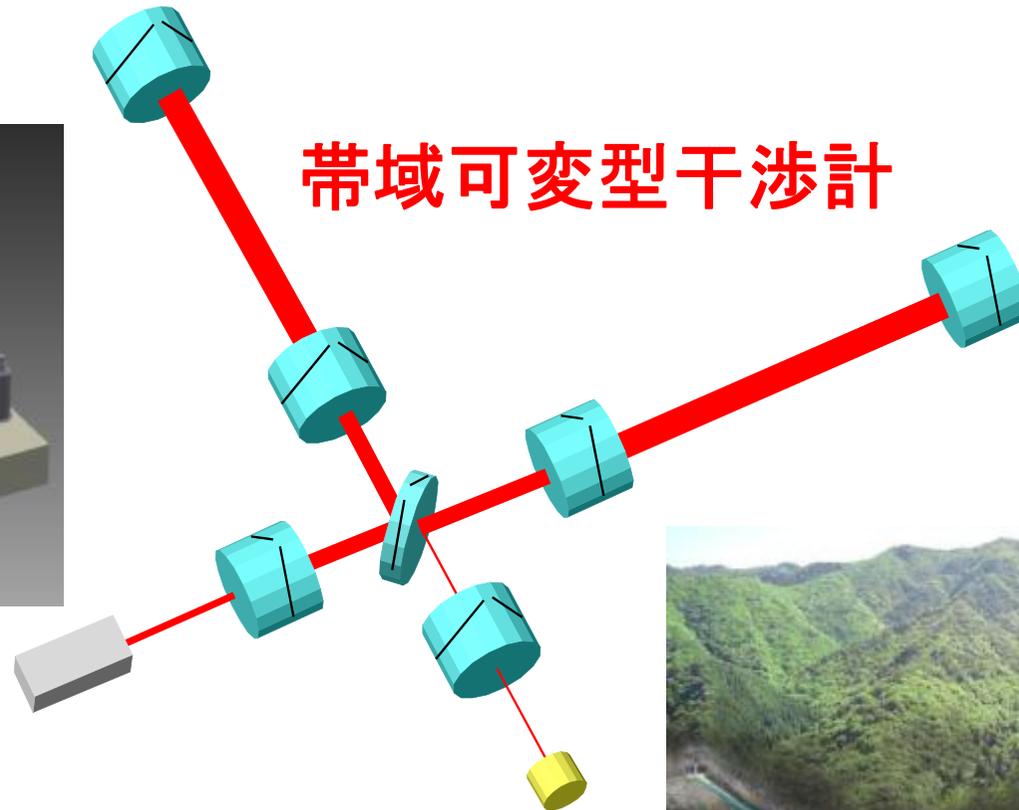
- これまでの天文学の歴史においては、**新しい窓**が開かれると新しい天体現象が見つかることがしばしば起こってきた
- したがって、重力波においても、現在の知識では想像すらできないような**全く新しい天体現象**がKAGRAによって見つかる可能性も十分にある

KAGRAの3つの特徴

低温ミラー



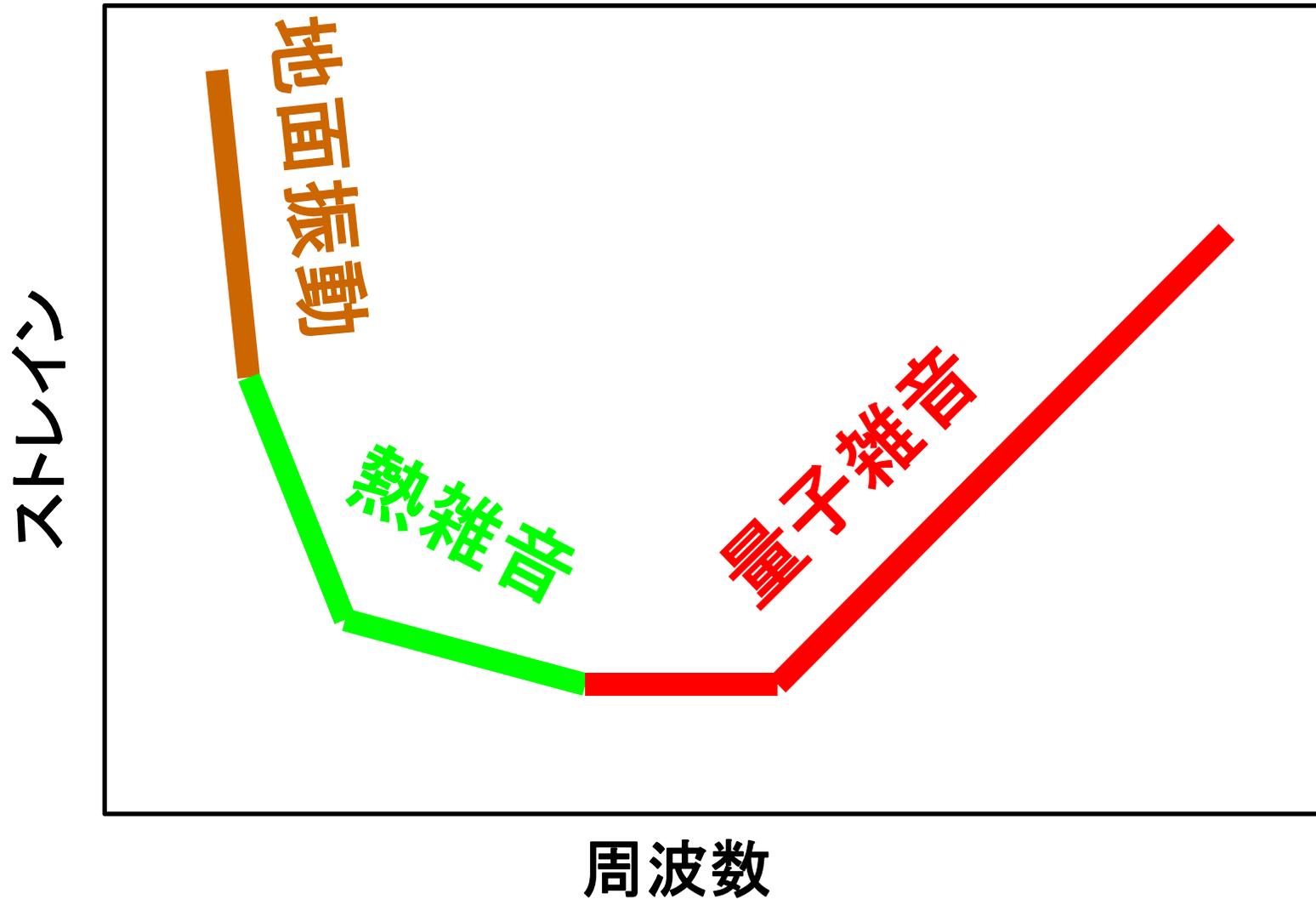
帯域可変型干渉計



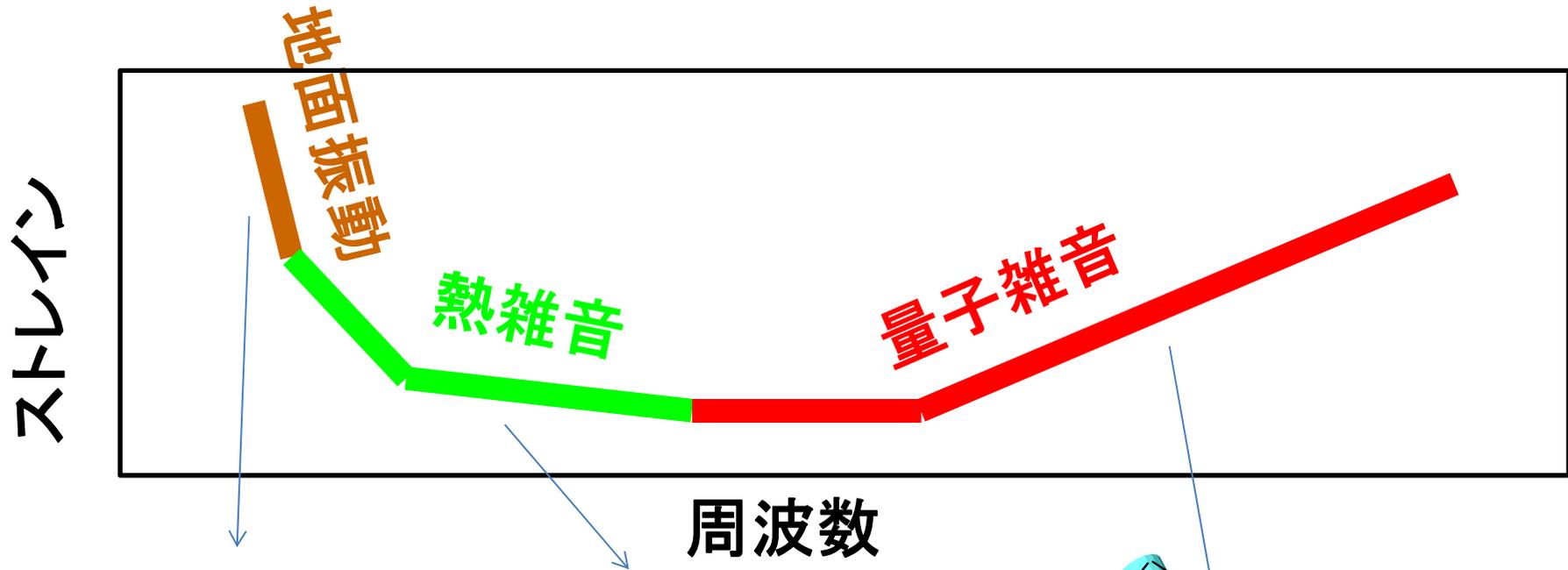
神岡地下のサイト



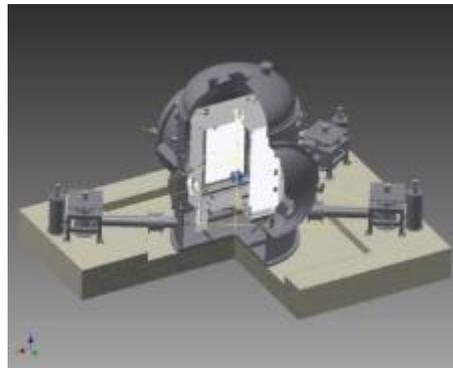
干渉計の感度を決める3つの雑音



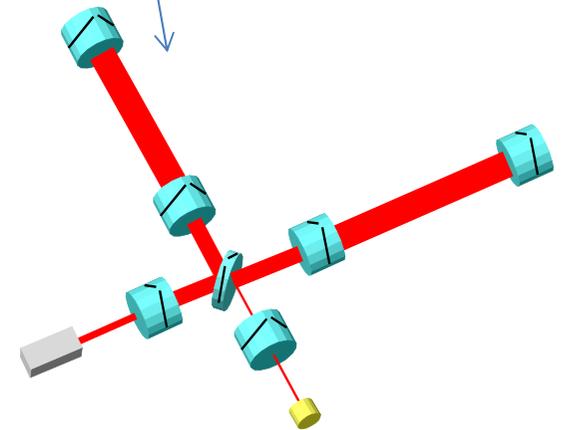
雑音対策



神岡地下

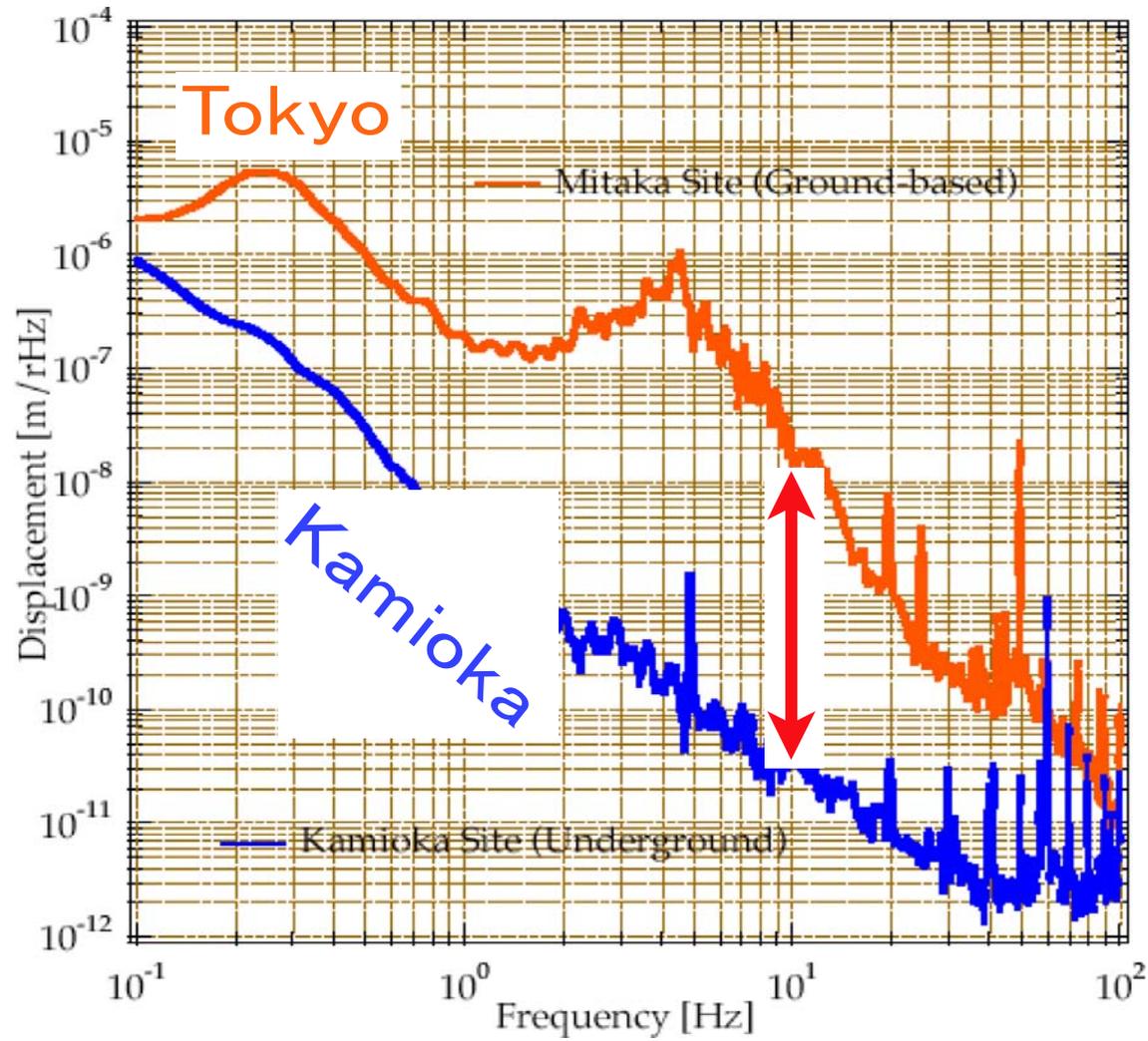


低温ミラー



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

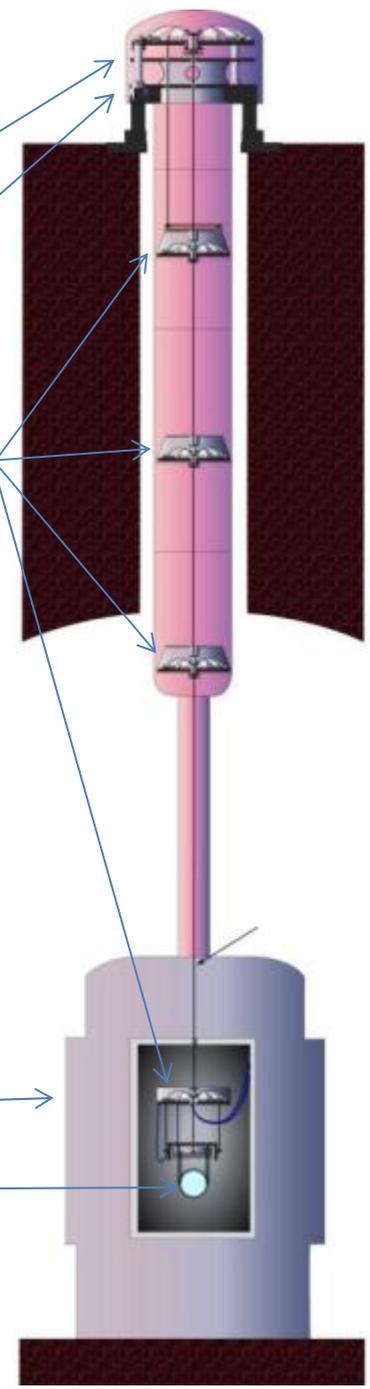
鏡の振動

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



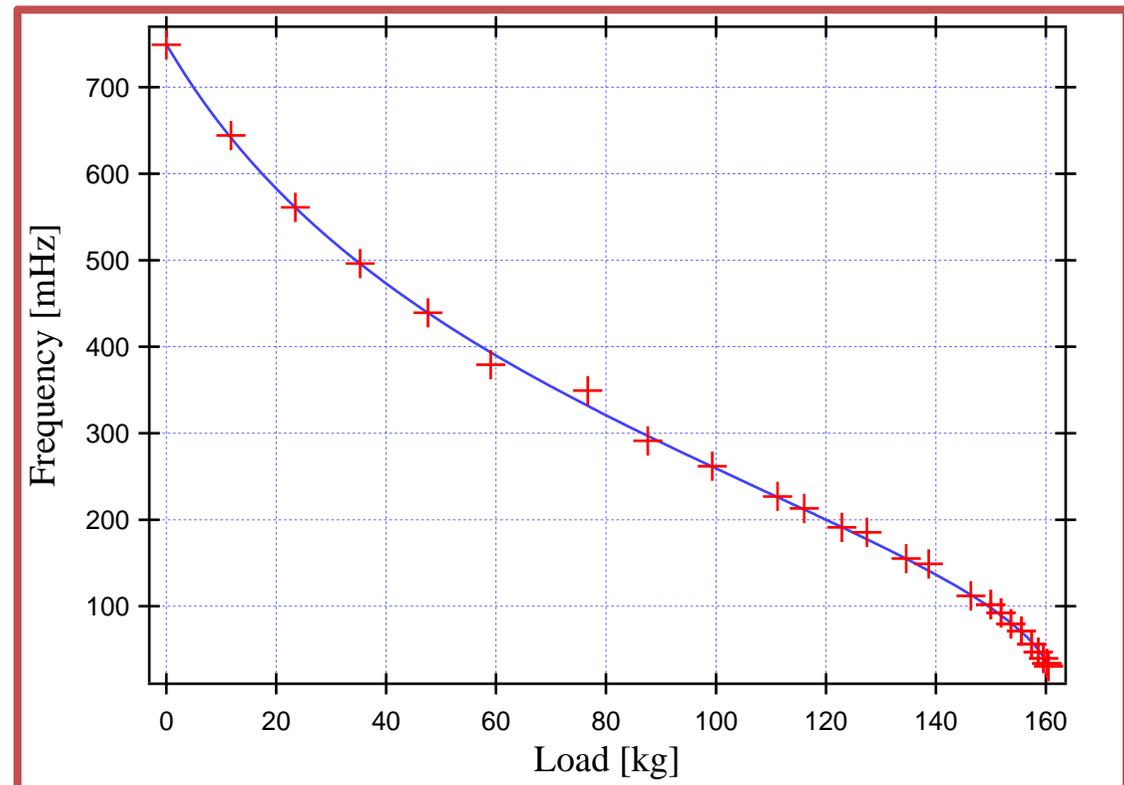
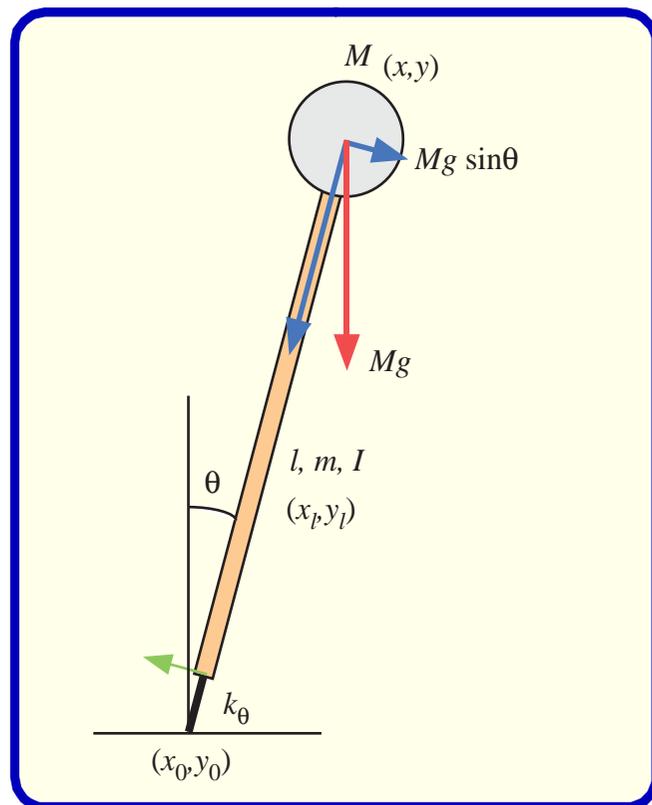
$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

@10 Hz



倒立振り子

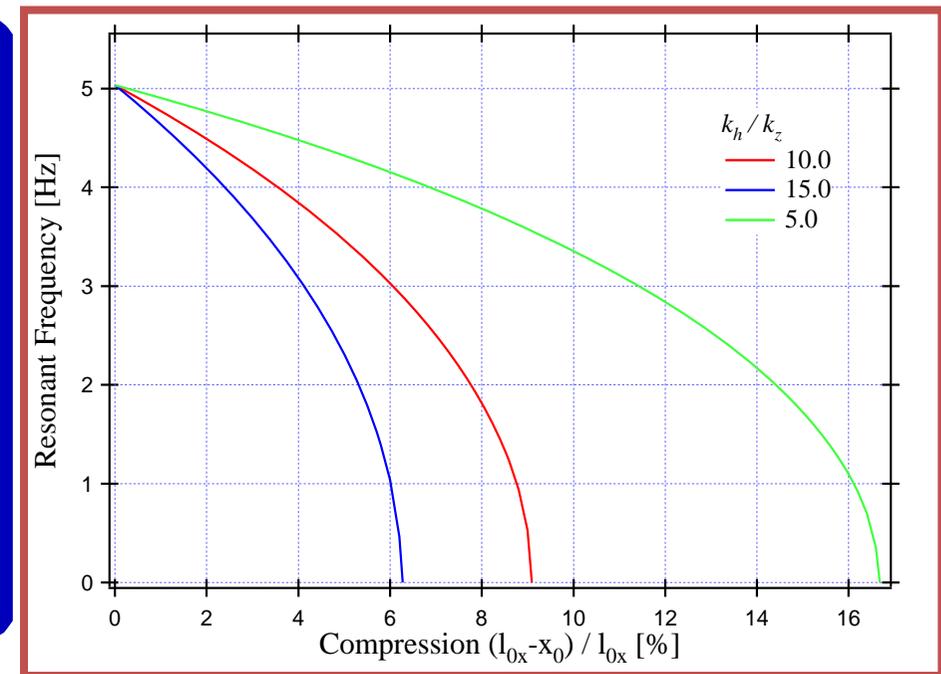
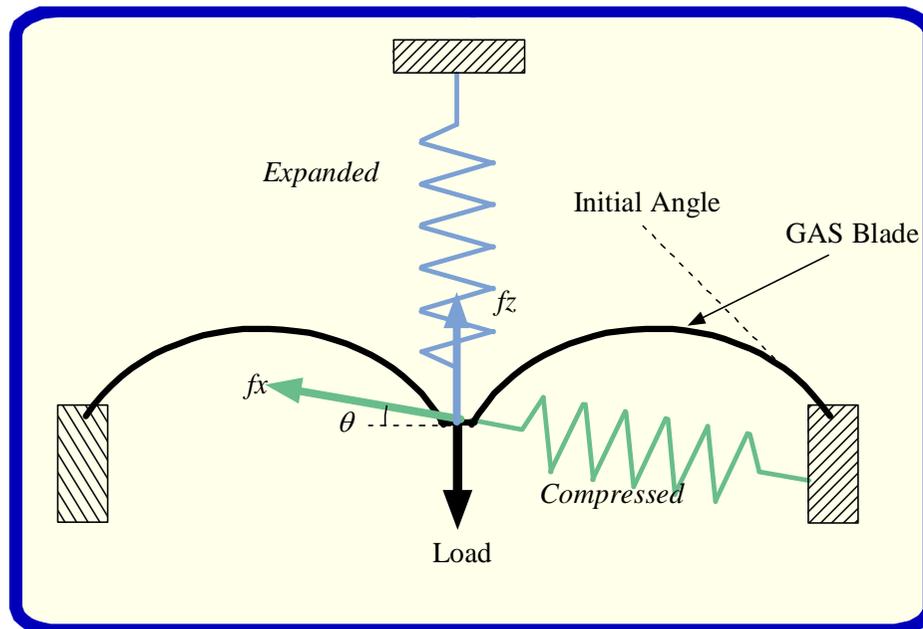
復元力= 金属のバネ力+ 重力の反バネ力
⇒ 共振周波数の低減



Geometric Anti-Spring (GAS) Filter

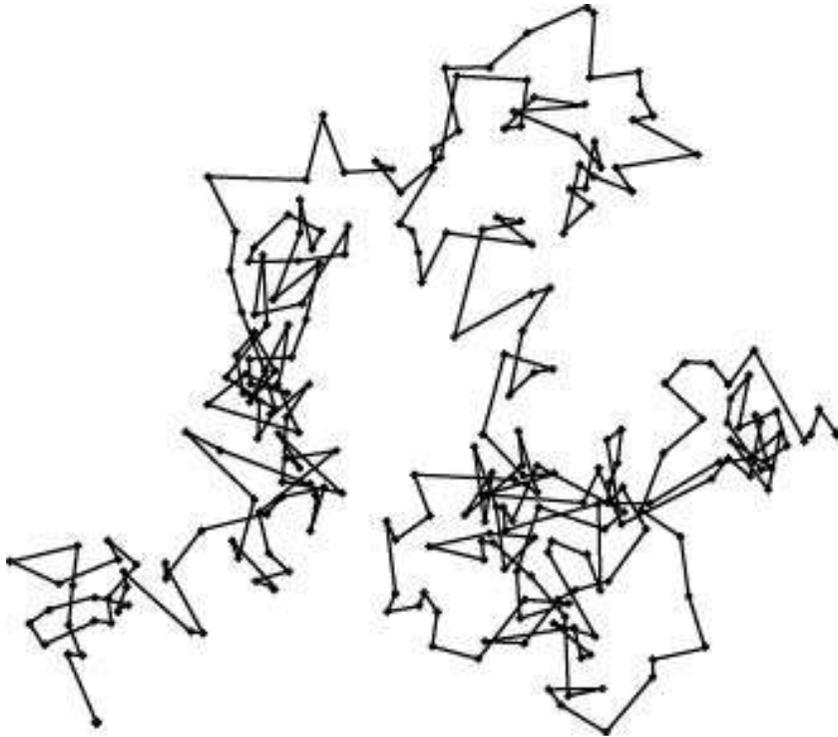
復元力= ブレードのバネ力+ 押し付けることにより生じる反バネ力

→ **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:

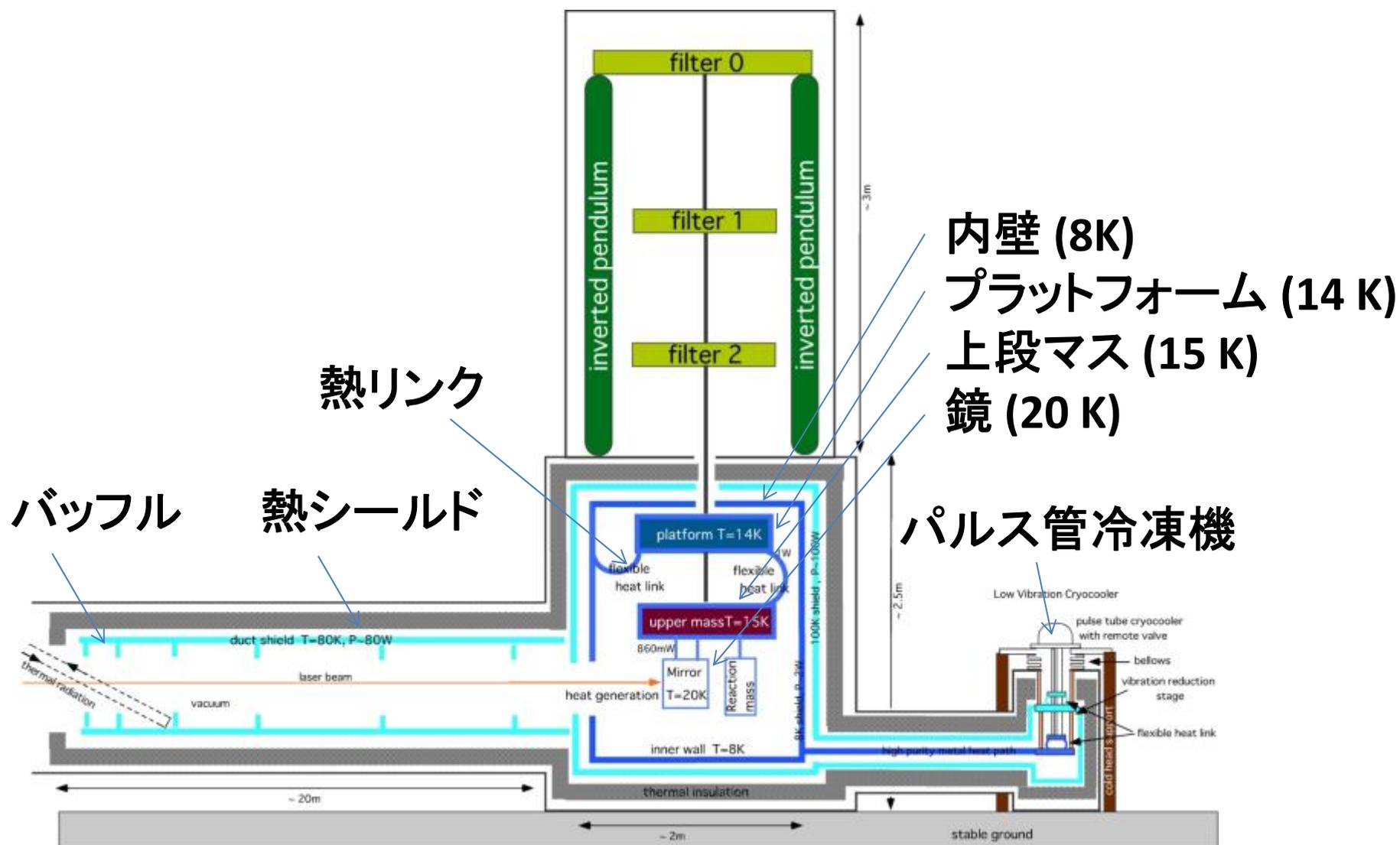
$$(\frac{1}{2})mv^2 \sim kT/2$$

⇒

鏡の変位雑音:

$$\delta x \propto T^{1/2}$$

冷却システム



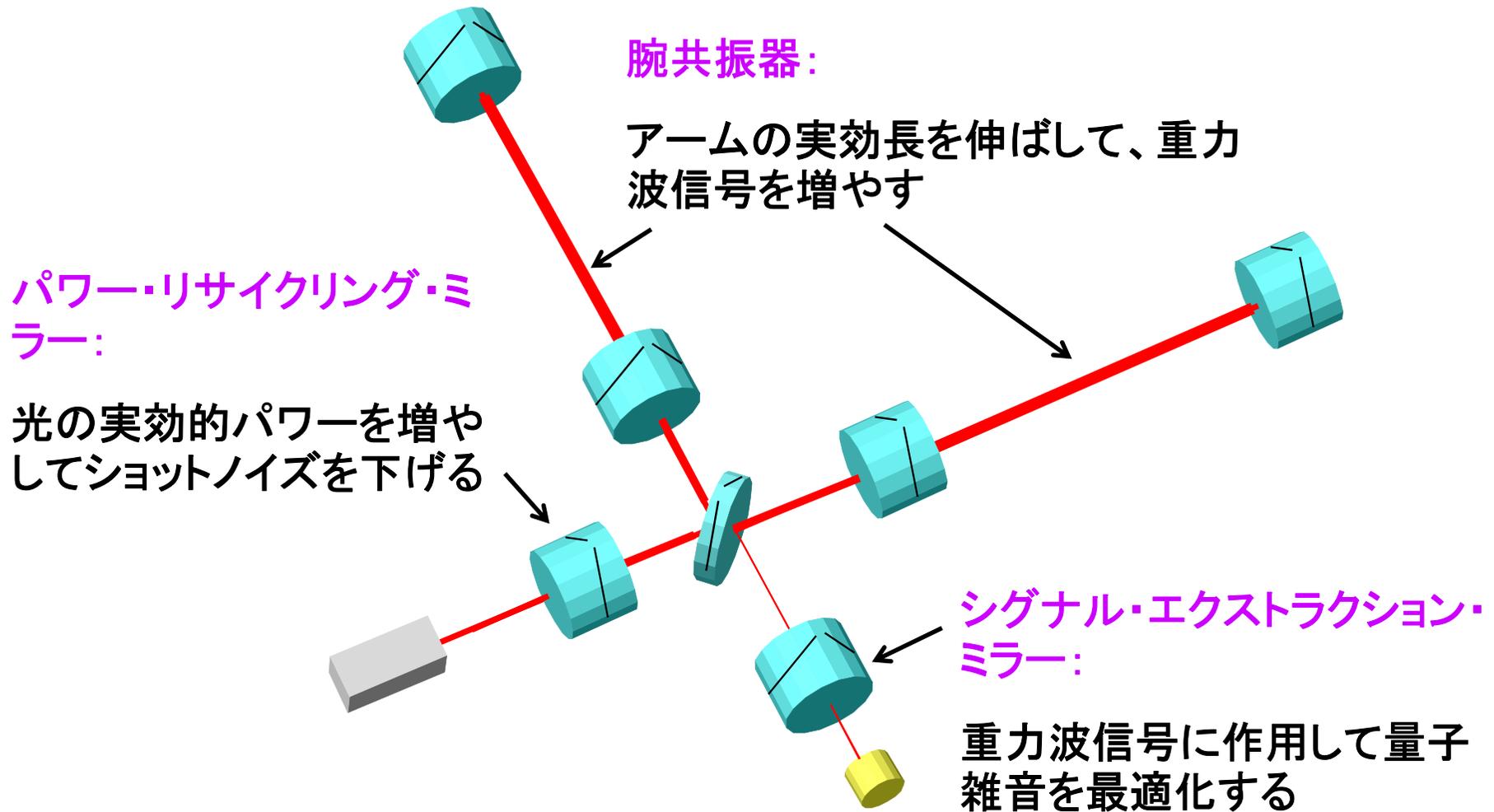
CLIO

KAGRAの低温プロトタイプ

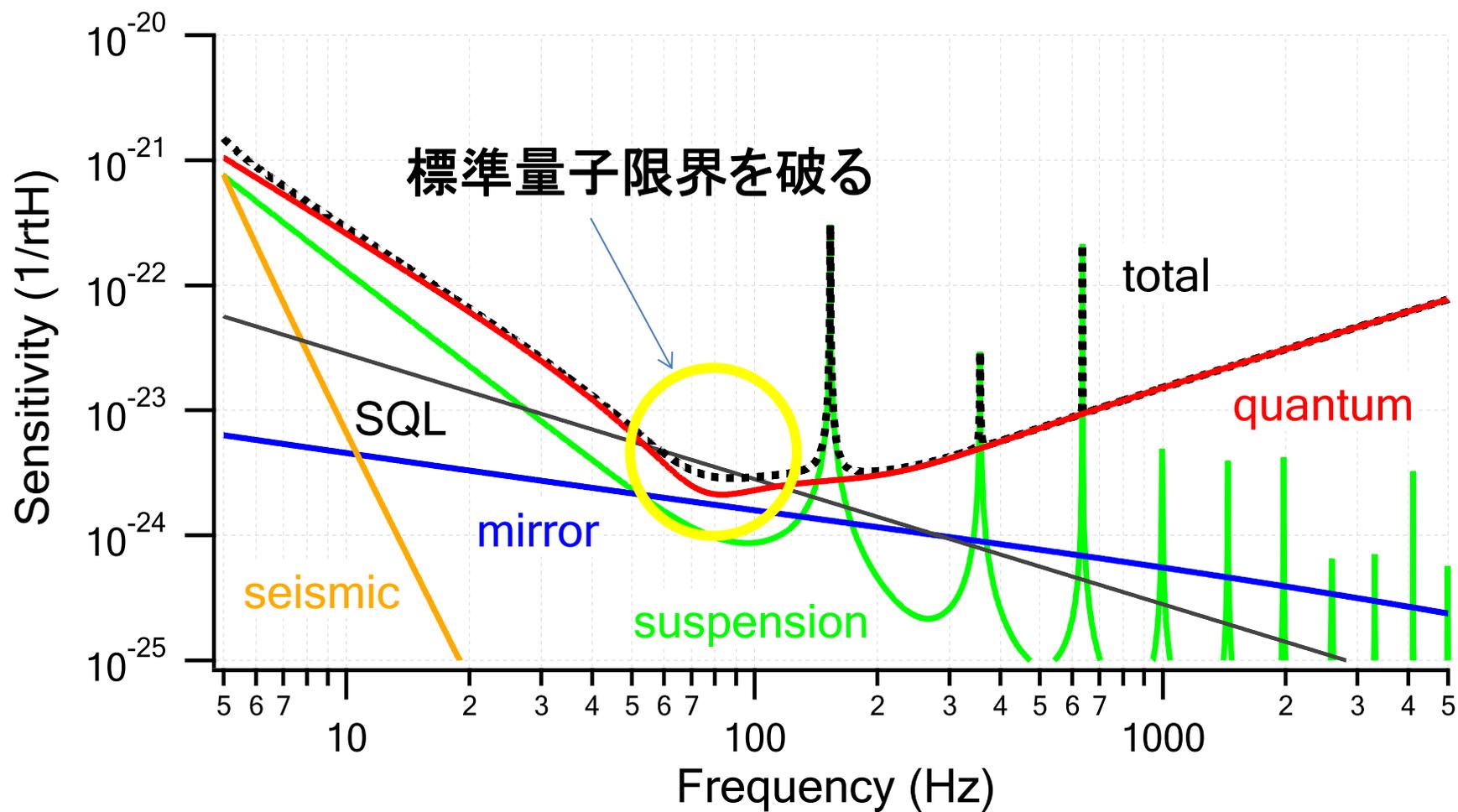
低温化による熱雑音の低減
実証(世界初)

地下の静かさの有利性を実

帯域可変型干渉計



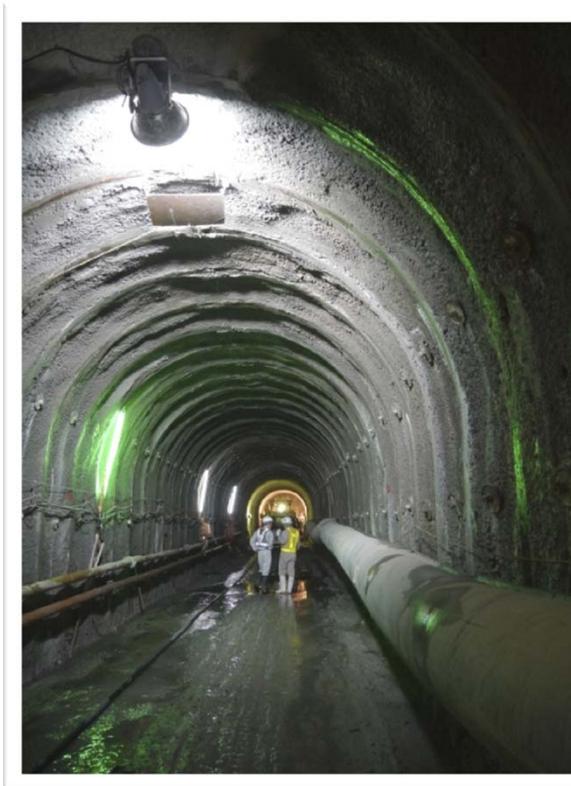
KAGRAの目標感度



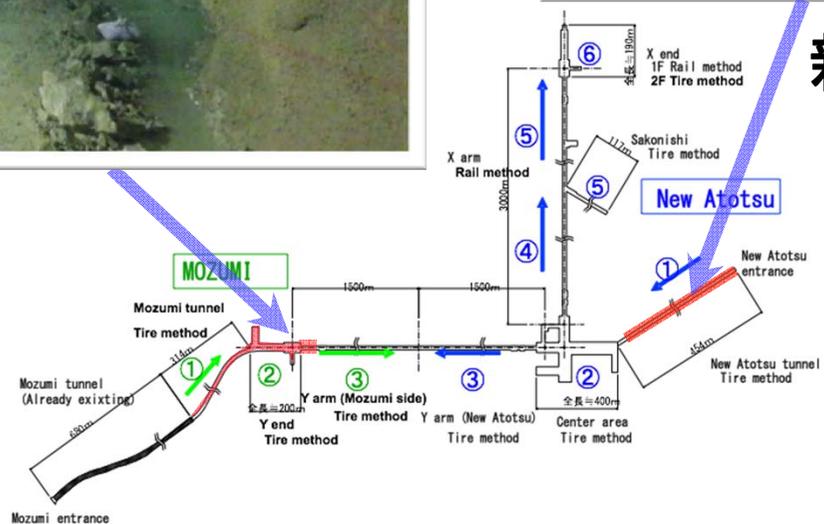
トンネル掘削



Y-エンド



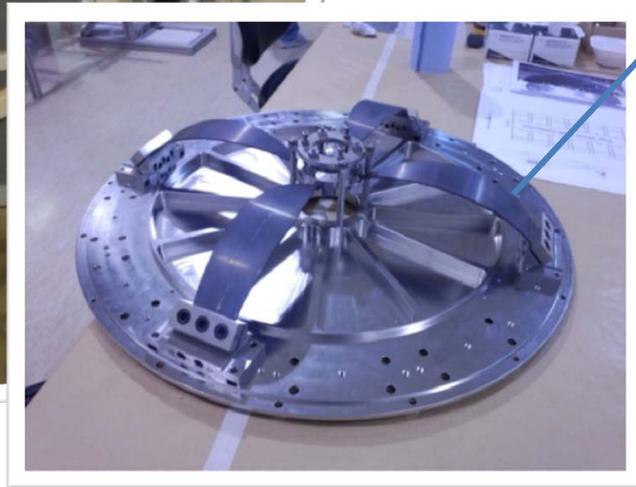
新跡津



防振システム

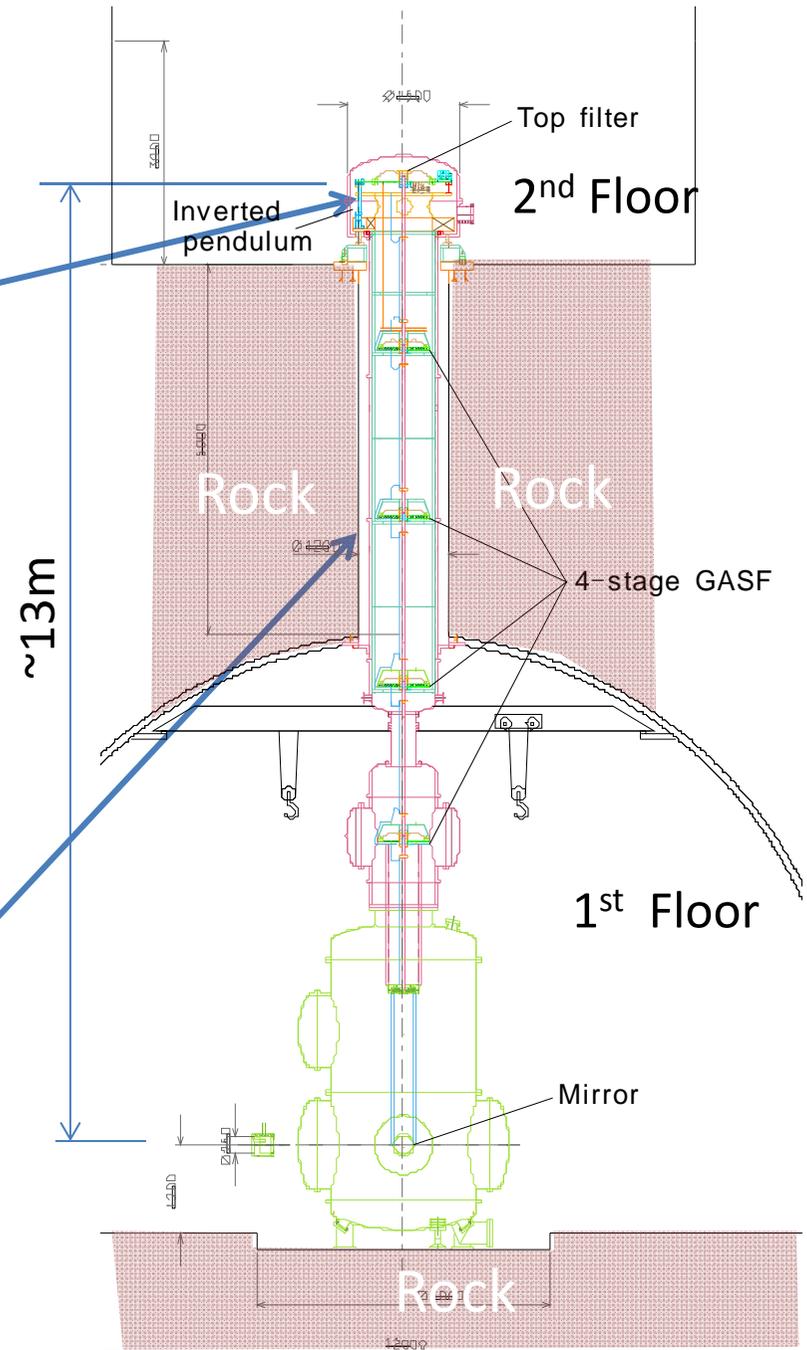


Prototypes



Top filter

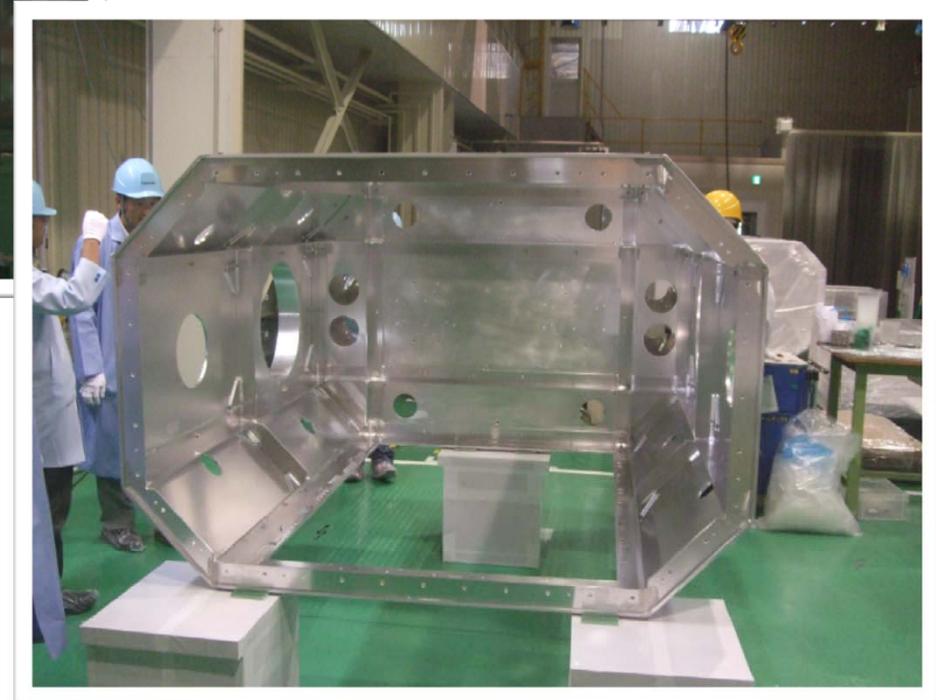
Standard filter



クライオスタット

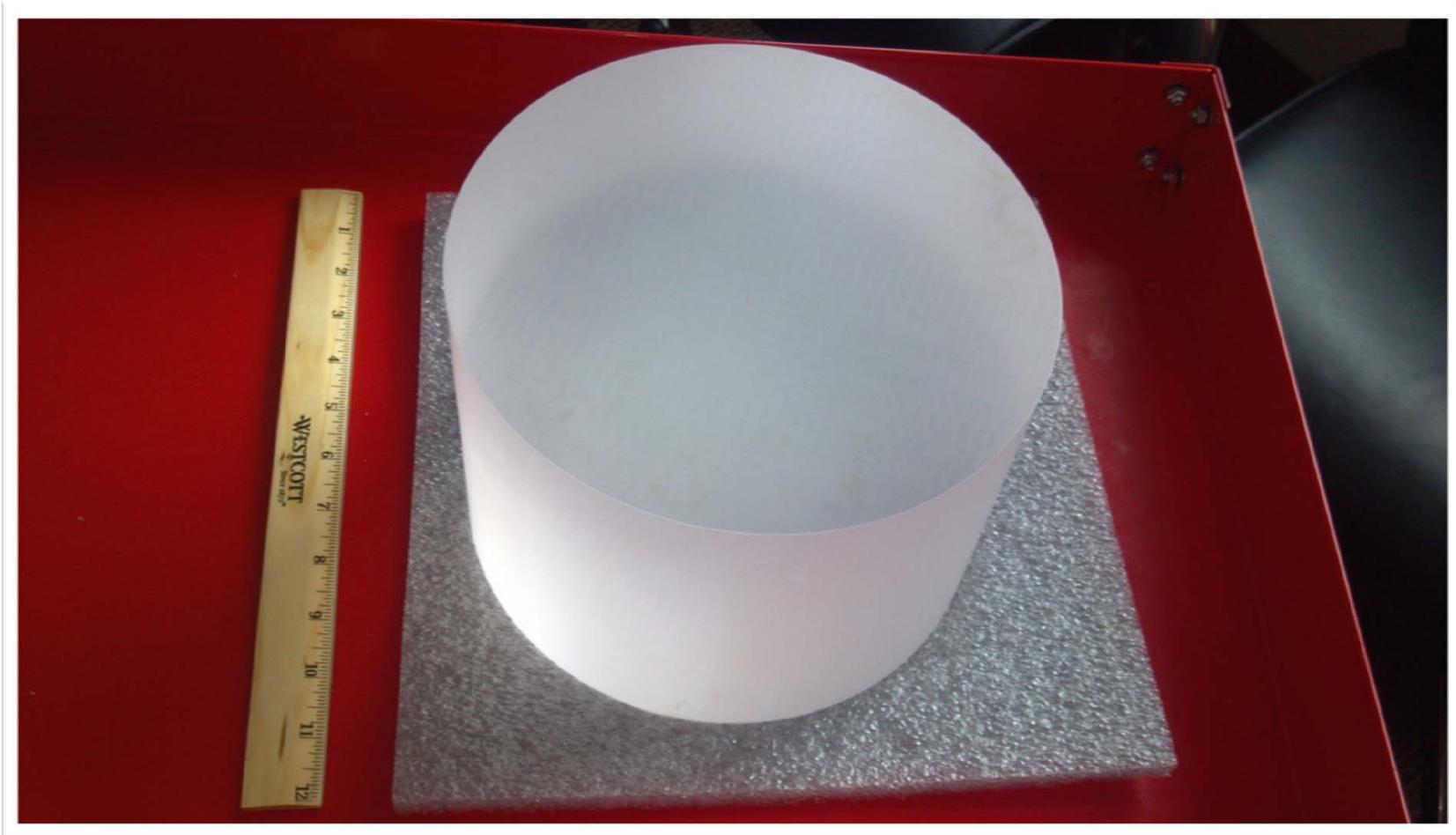


クライオスタット



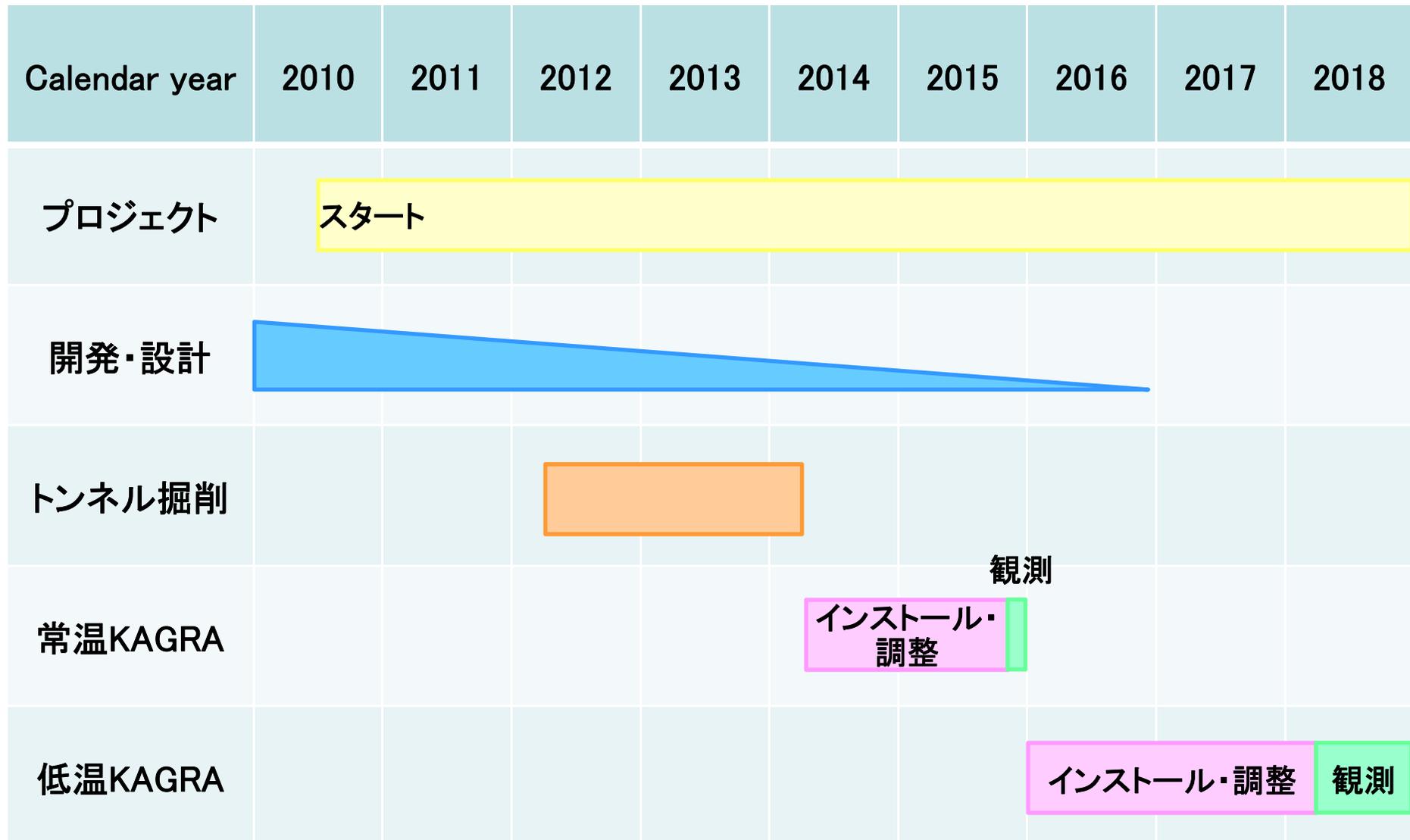
熱シールド

サファイアミラー



22 cm ϕ , 15 cmt

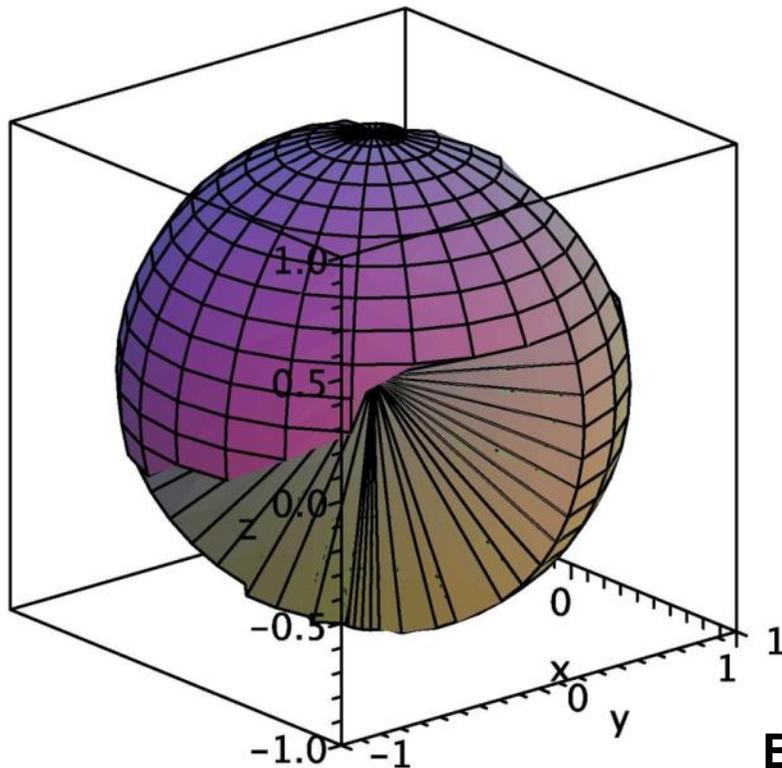
KAGRAのスケジュール



重力波検出器ネットワーク

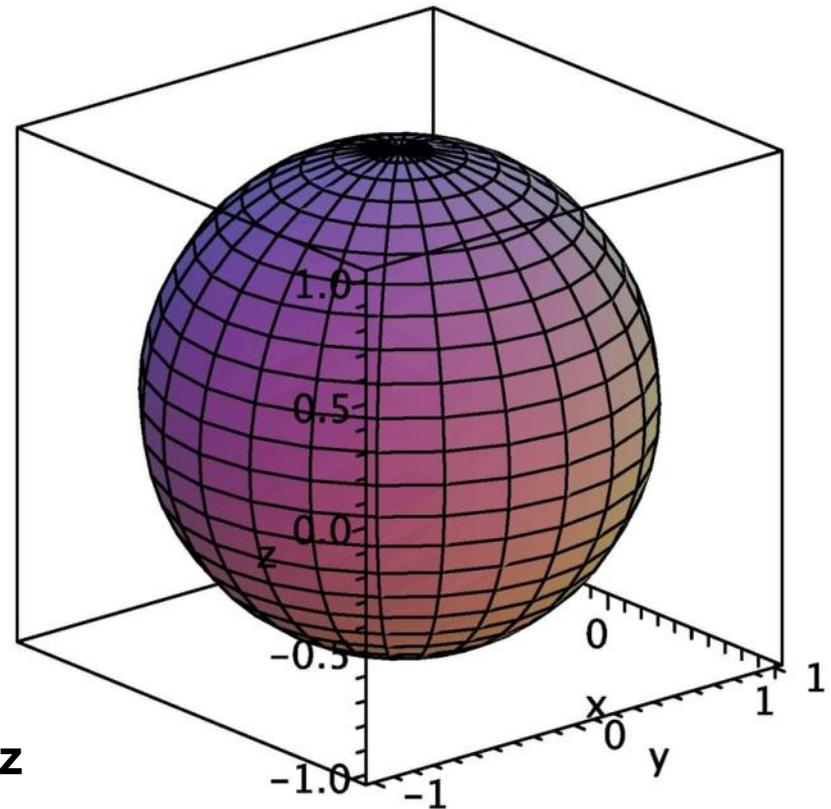
LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo

- 1/2最大感度の範囲: 72%
- 3台稼働率: 51%



LIGO(H)+LIGO(L)+Virgo+KAGRA

- 最高感度: +13%
- 1/2最大感度の範囲: 100%
- 3台稼働率: 82%



B. F. Schutz

References

- ニュートン： 2012年8月号
- 日本物理学会誌： 川村静児, “LCGT建設開始：重力波の初検出を目指して”, 66, No.11 (2011) p.841–844
- <http://gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

話の内容

1. 重力波とその検出
2. 第1世代検出器
3. KAGRA
- 4. 将来計画**
5. まとめ

Einstein Telescope (ET)

- ヨーロッパの共同計画
- アーム長 : 10 km
- 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

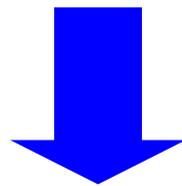
干渉計を宇宙に持っていくと もっと長くできる

- 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

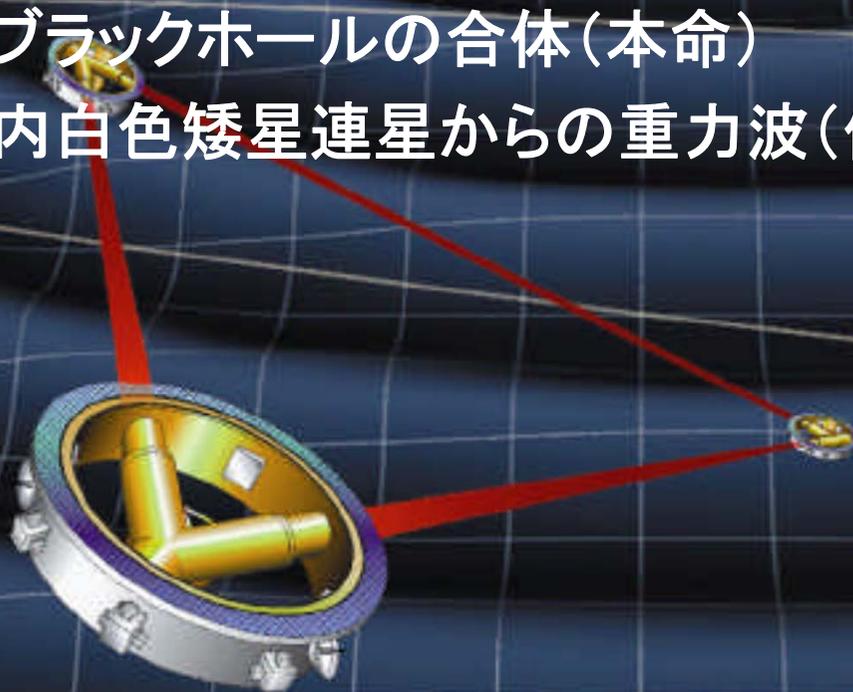


低周波で感度がよくなる

しかも、期待できる重力波信号が大きい

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)



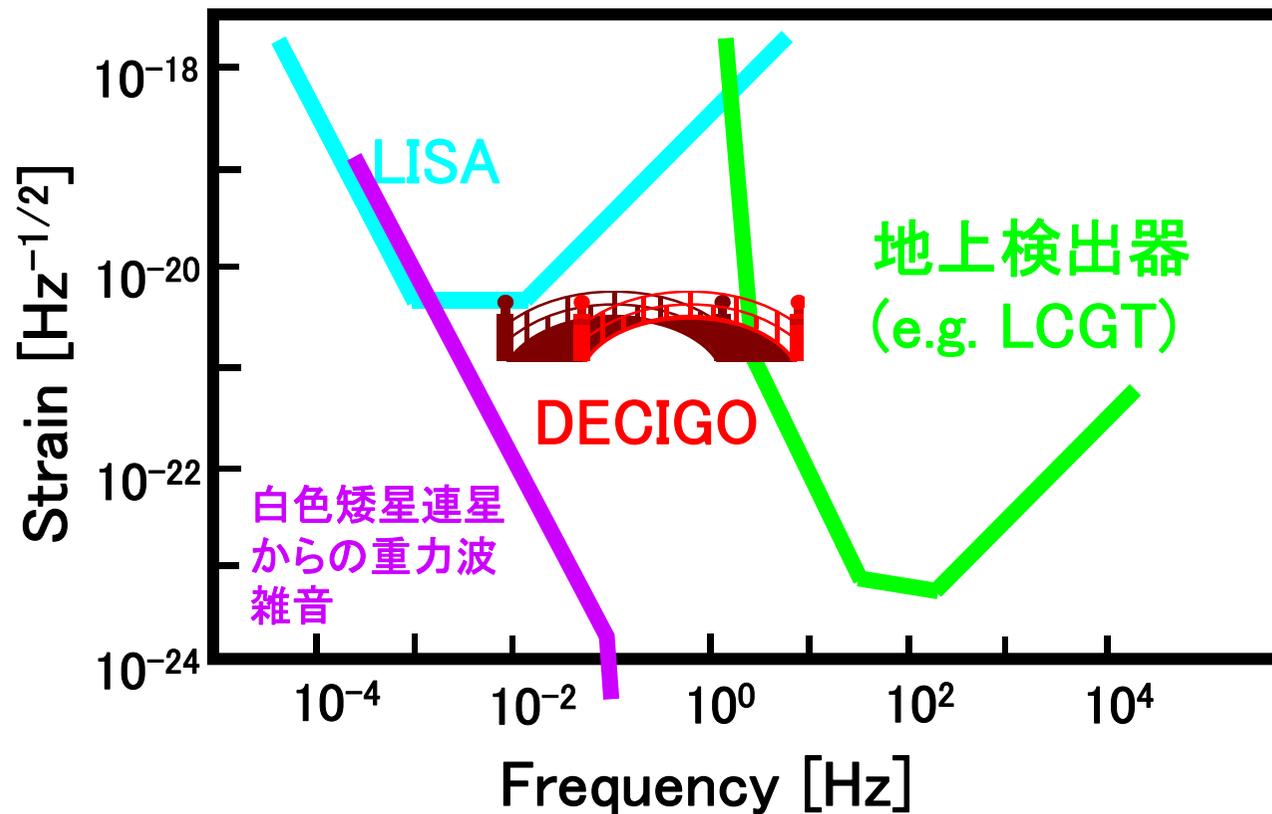
スペース重力波アンテナ
DECIGO



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！

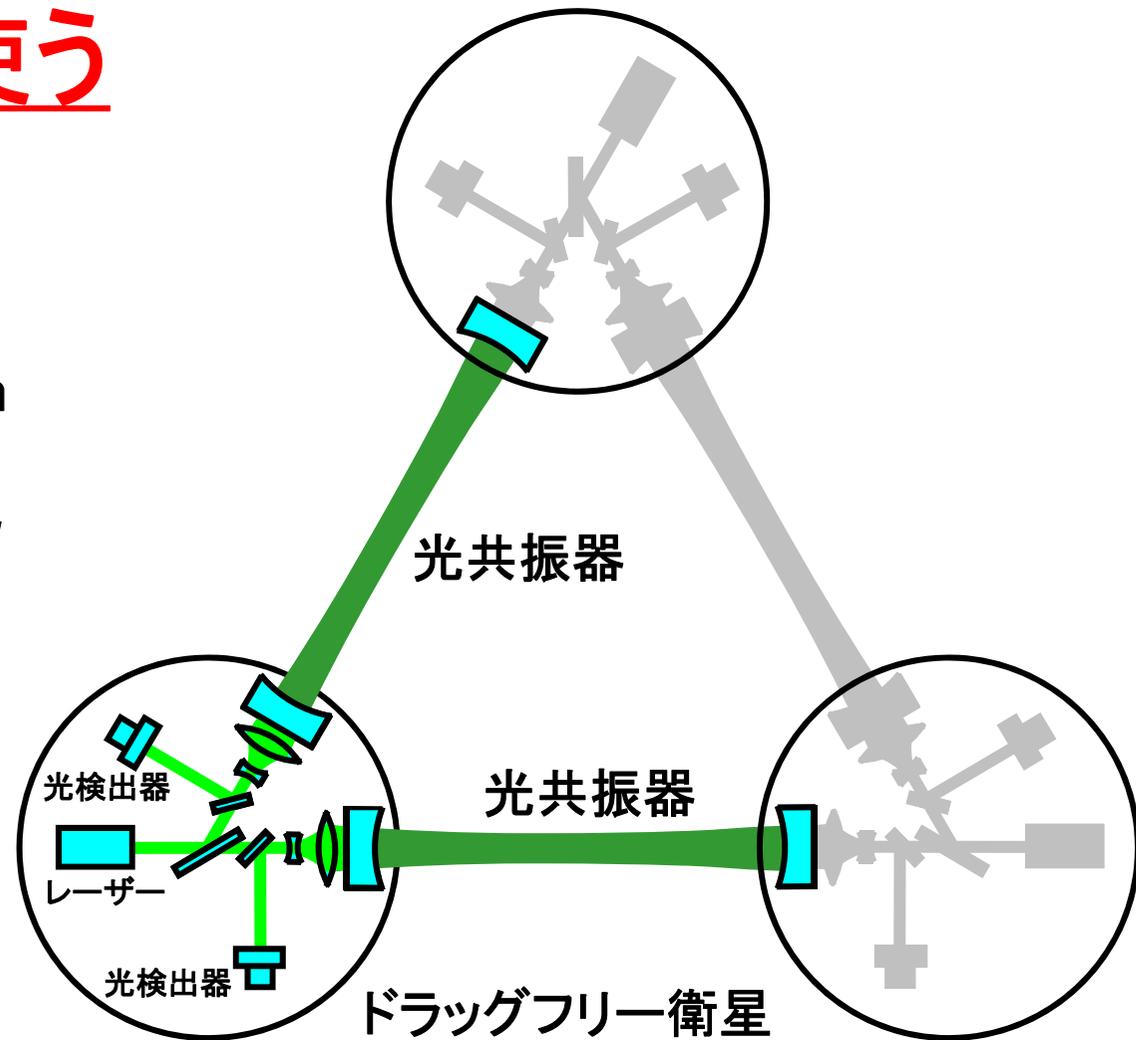


予備概念設計

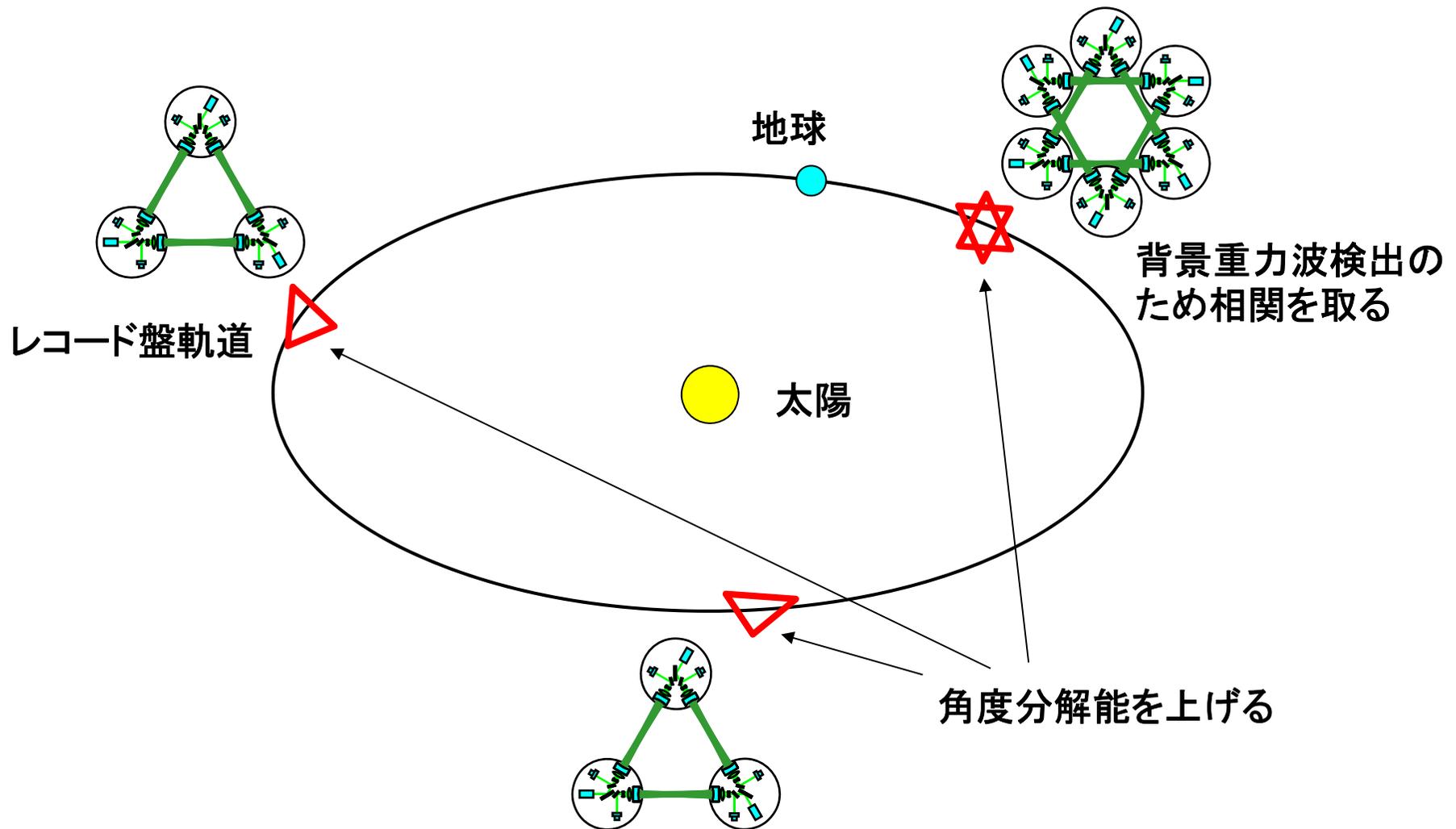
光共振器を使う

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



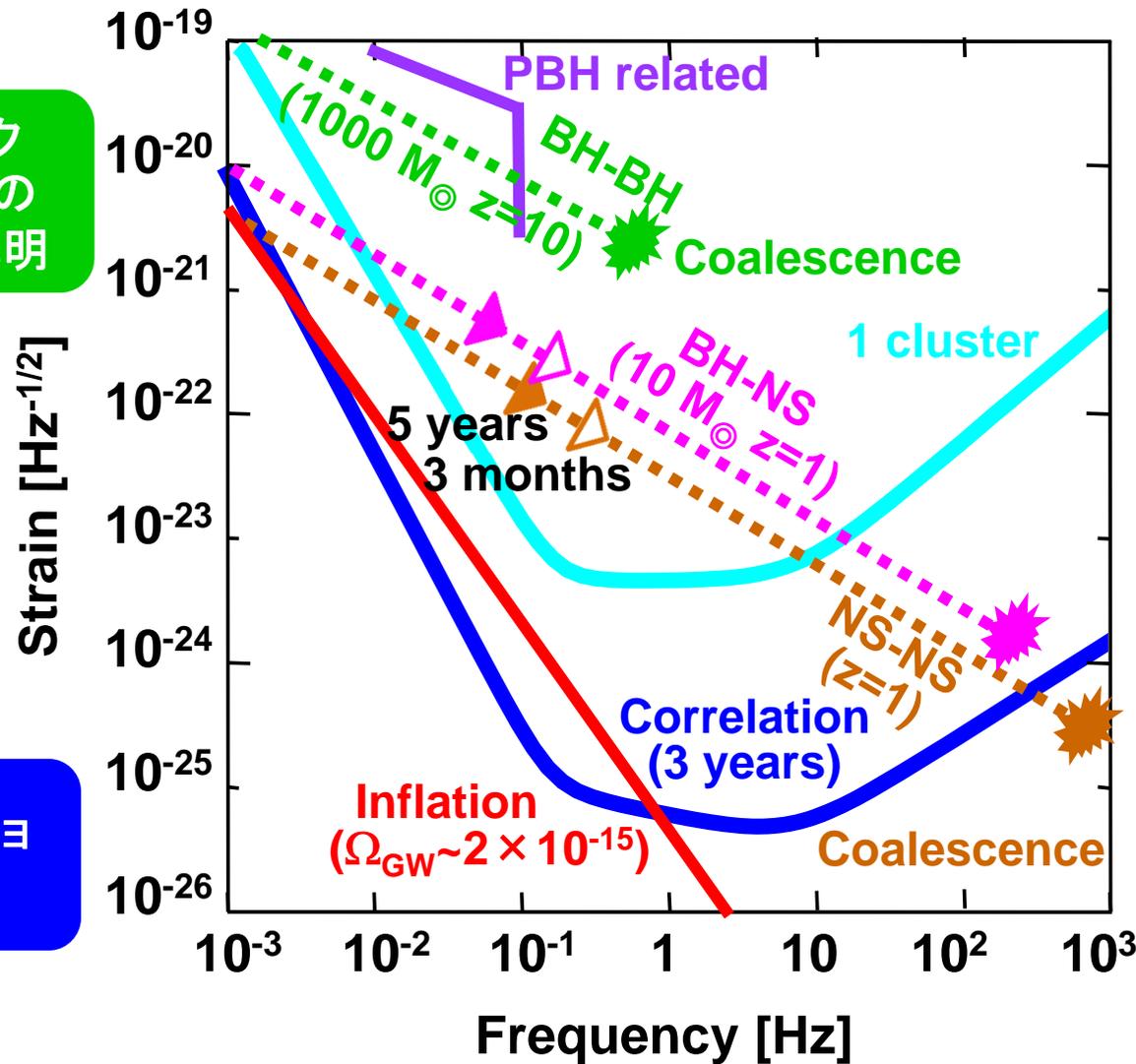
軌道とコンステレーション(案)



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

インフレーションの検証



ダークマターの探索

Saito, Yokoyama 2009

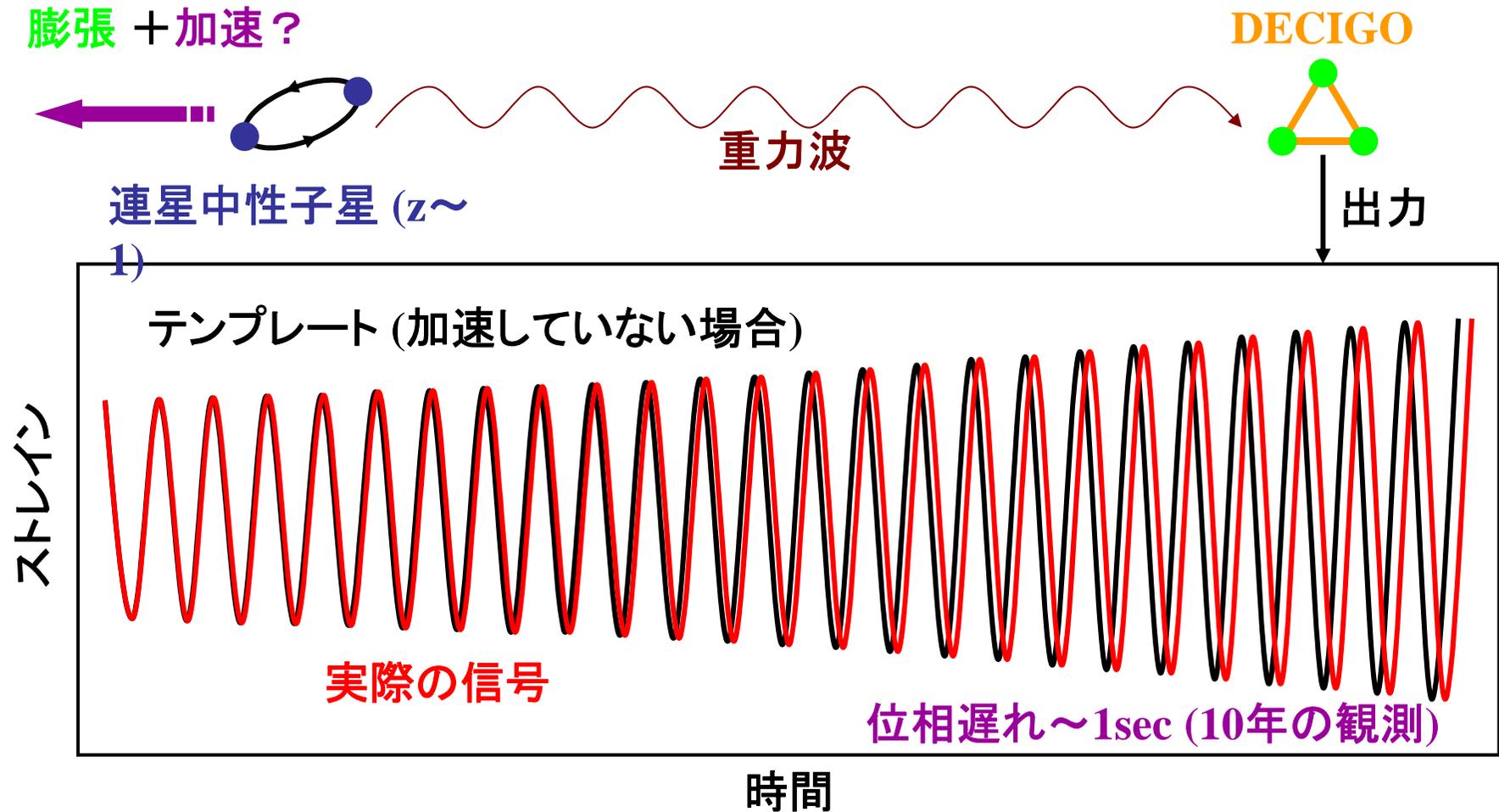
一般相対性理論の検証

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



Seto, Kawamura, Nakamura, PRL 87, 221103 (2001)

話の内容

1. 重力波とその検出
2. 第1世代検出器
3. KAGRA
4. 将来計画
5. **まとめ**

まとめ

- **重力波の検出**によりこれまで見ることのできなかった宇宙の姿が見れるようになる。
- KAGRAにより中性子連星の合体などからの重力波が検出され、**重力波天文学**が創成されるであろう。
- KAGRAの次はDECIGOなどによって**宇宙の誕生の様子を観察**するなど、驚くべきサイエンスが得られることが期待される。

重力波天文学の
夜明けは近いがやき！



イラスト：
Sora