

# 重力波天文学



Illustration: Sora

宇宙・素粒子スプリングスクール

JGW-G1301564-v1

H25, 3, 6 東京大学宇宙線研究所 川村静児

# 話の内容

- 重力波とは何か？
- 重力波を検出するには？
- KAGRAとは？
- 将来は？

# 重力波とは何か？

## 重力とは何か？

### 特別講座：

### 一般相対性理論

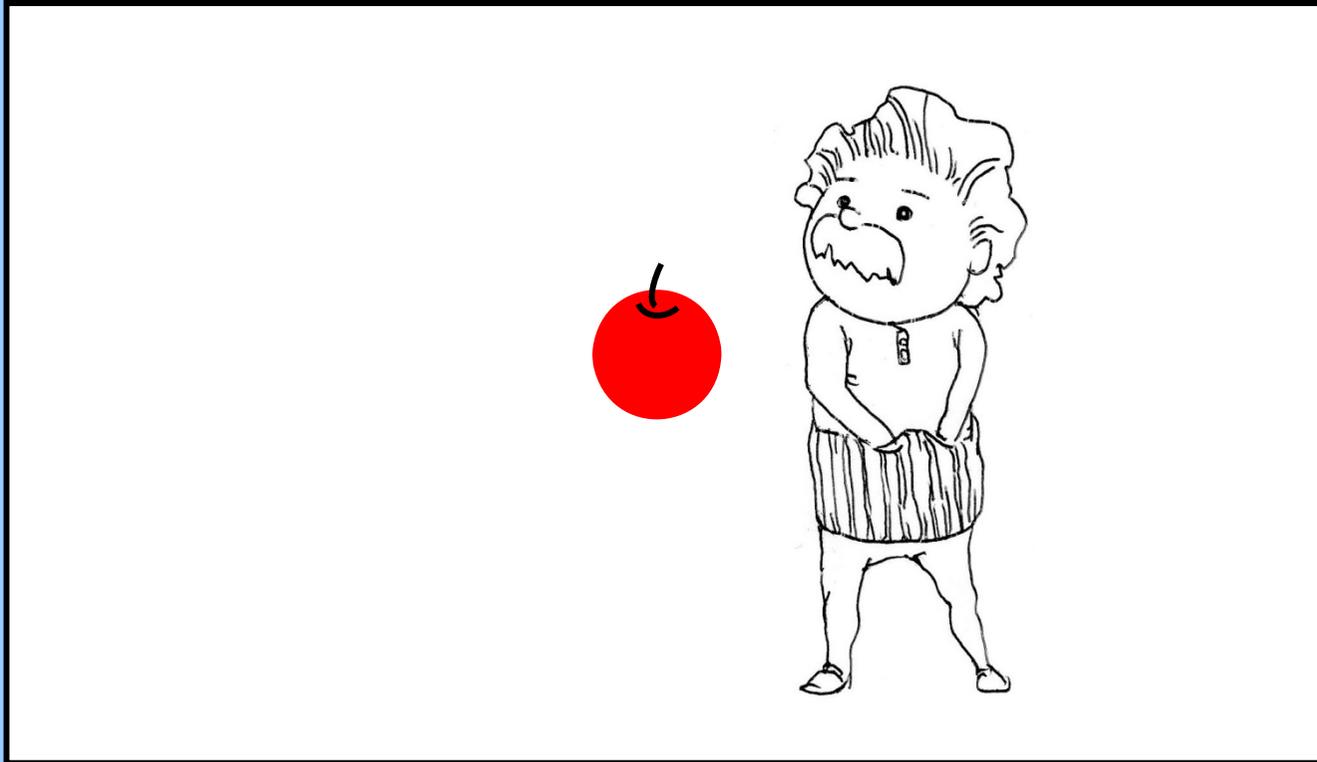
### (3分間コース)



# 重力は消せる？



綱の切れたエレベーター

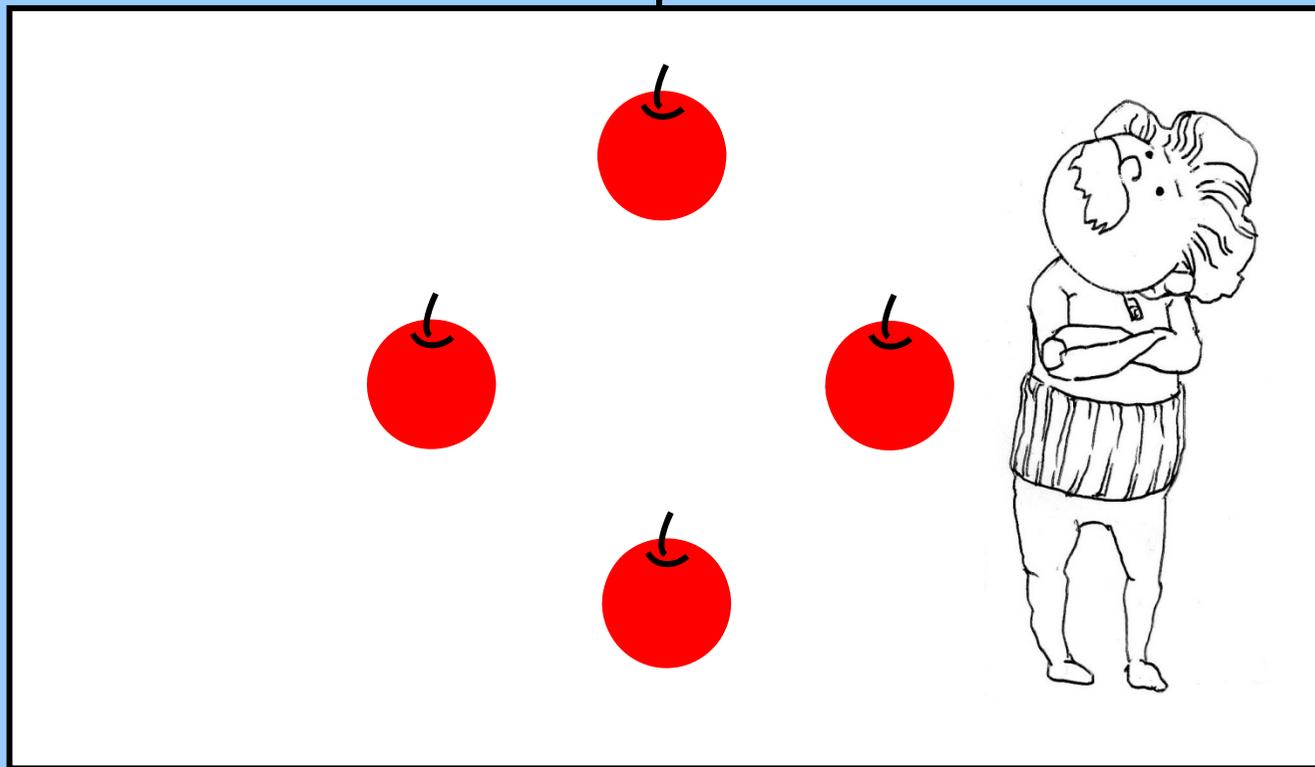


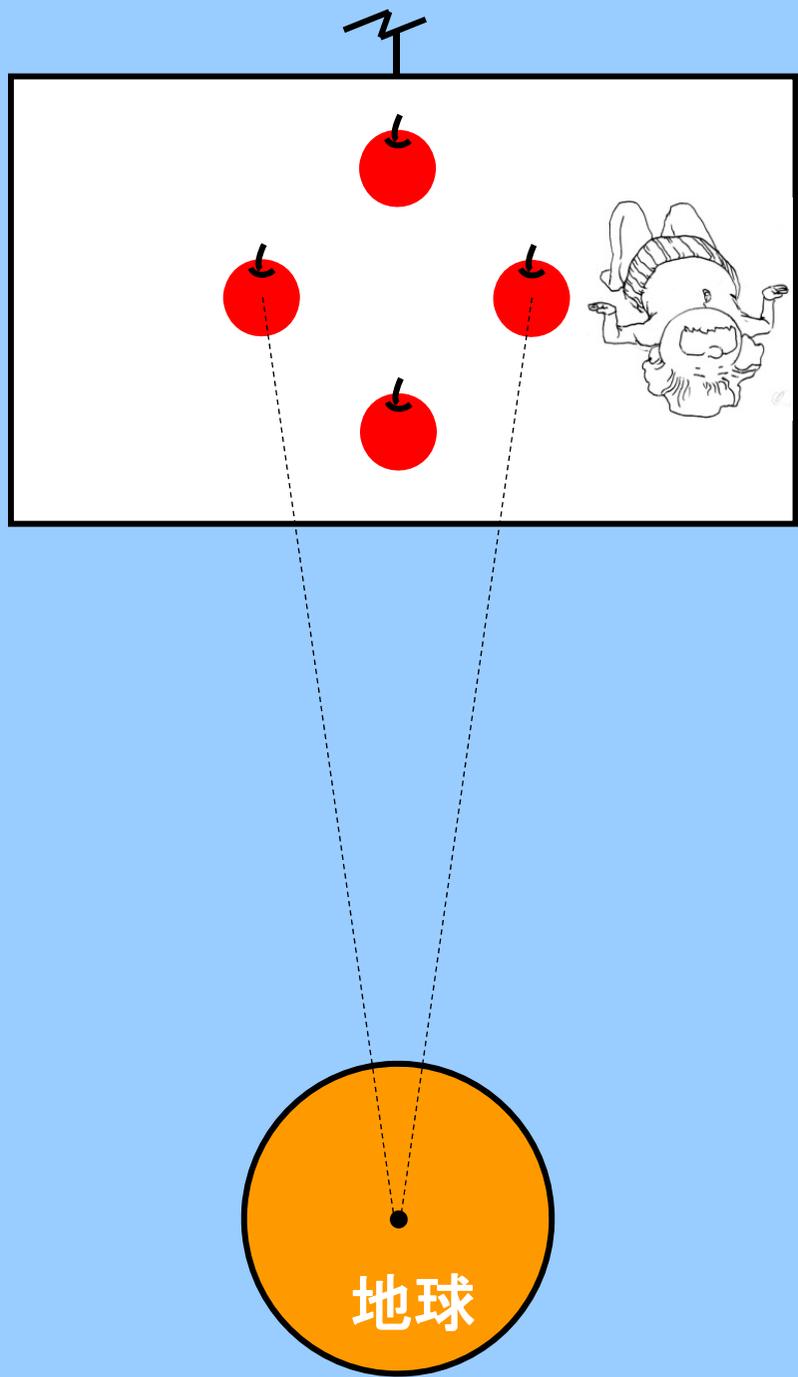
ではいったい重力の本質は？

# りんごが上下左右に 4個あると？

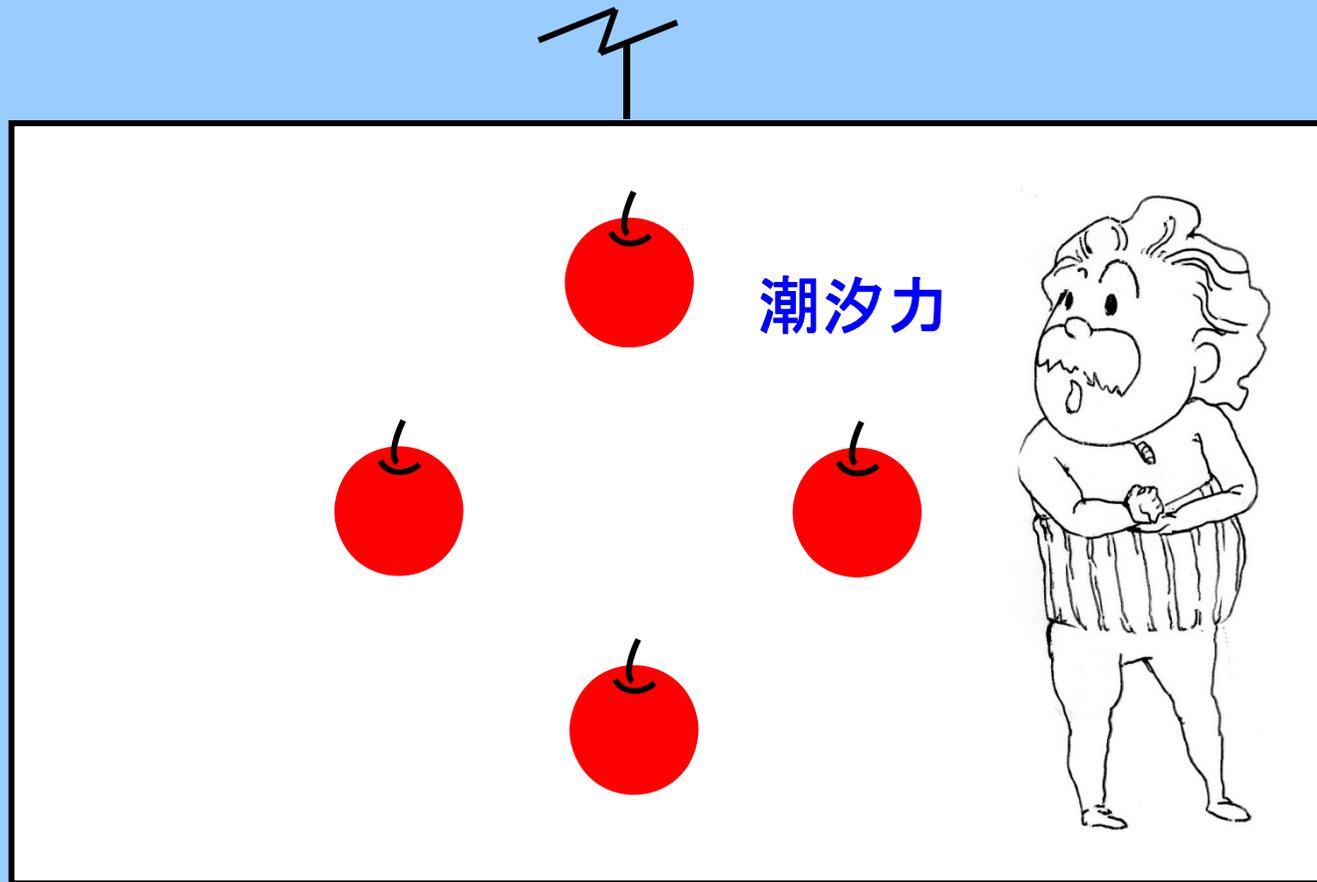


綱の切れたエレベーター

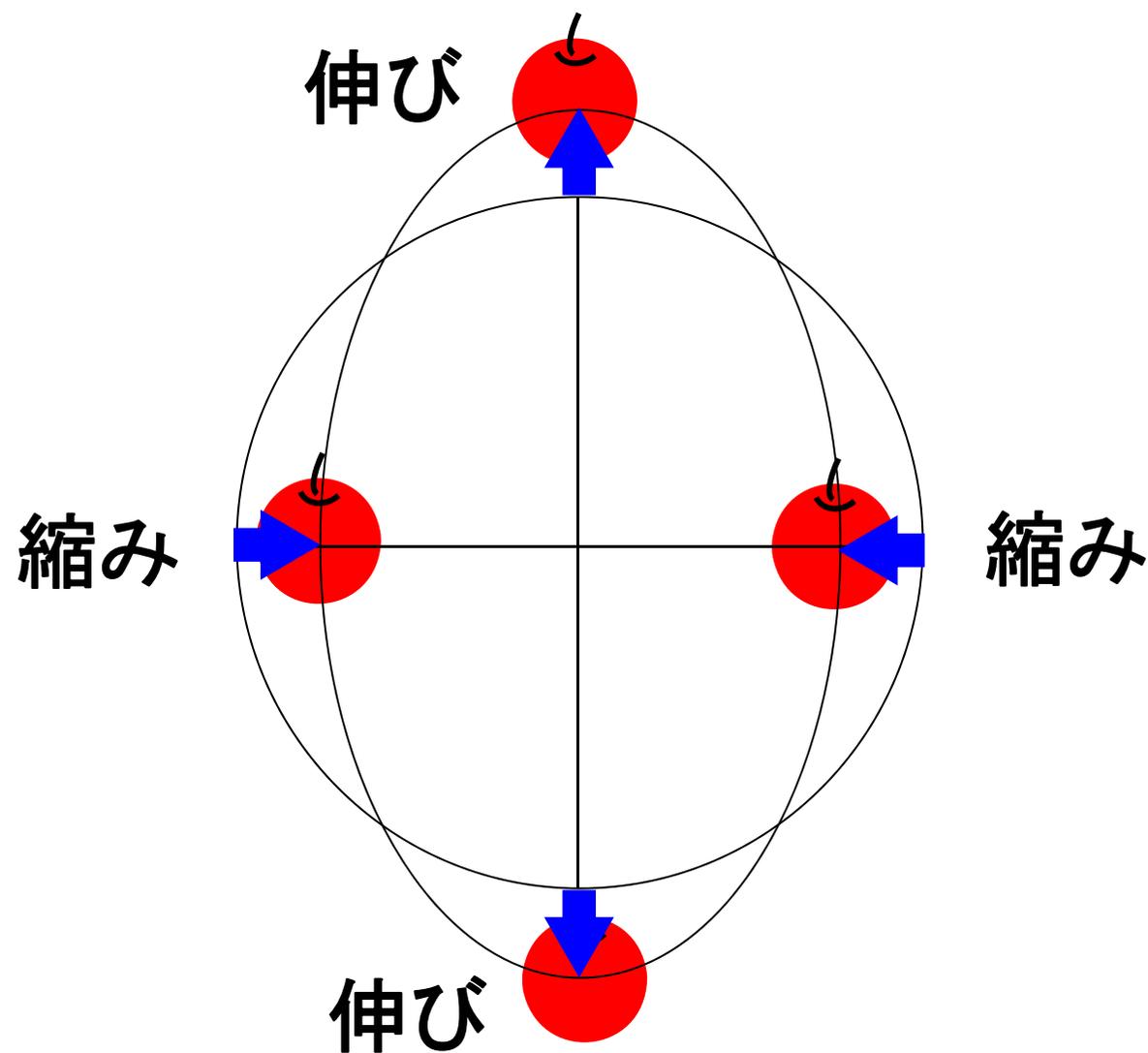


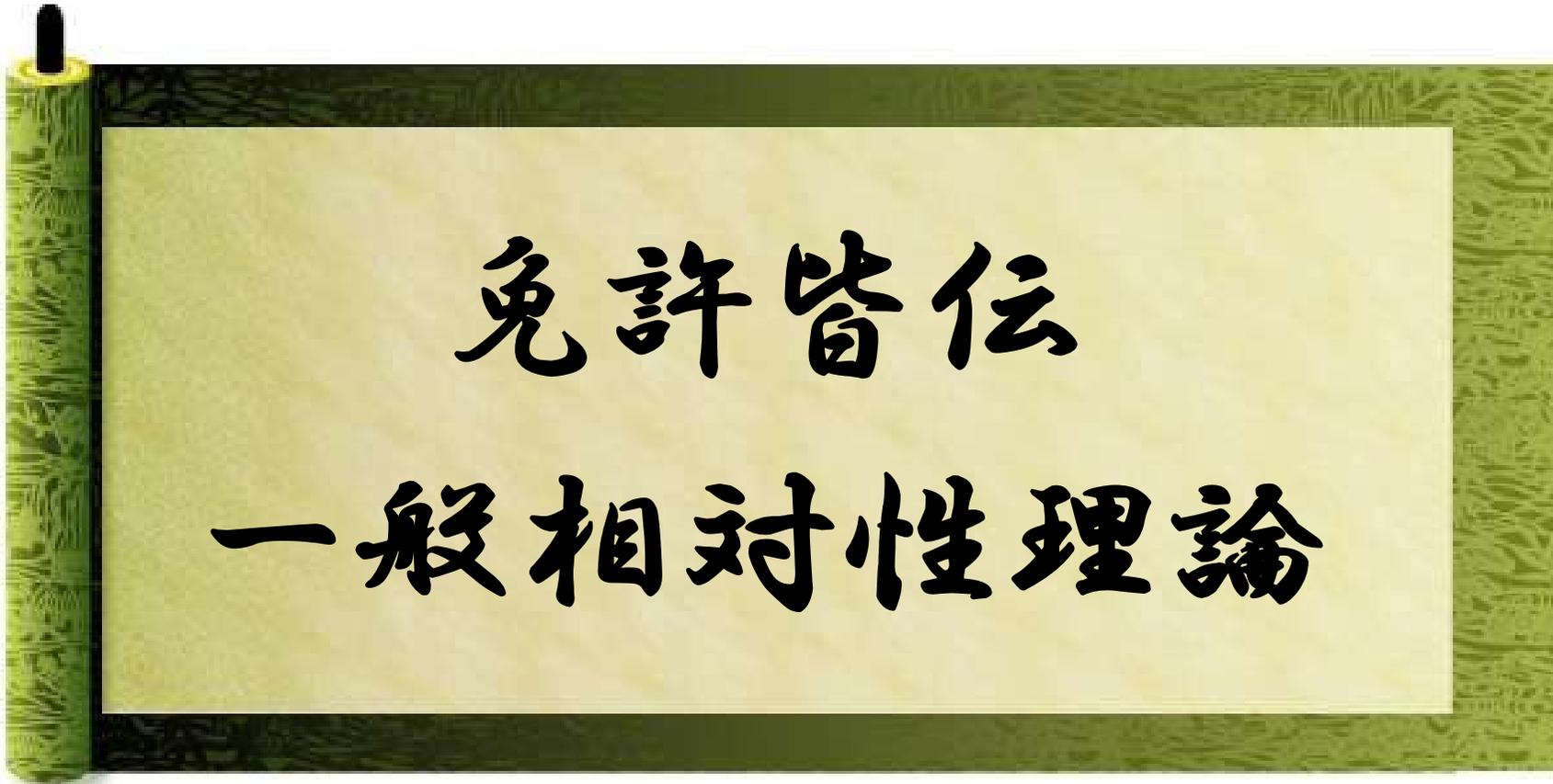


# 観測者から見ると りんごは潮汐的な力を受ける



# 重力の本質：潮汐的な空間のひずみ

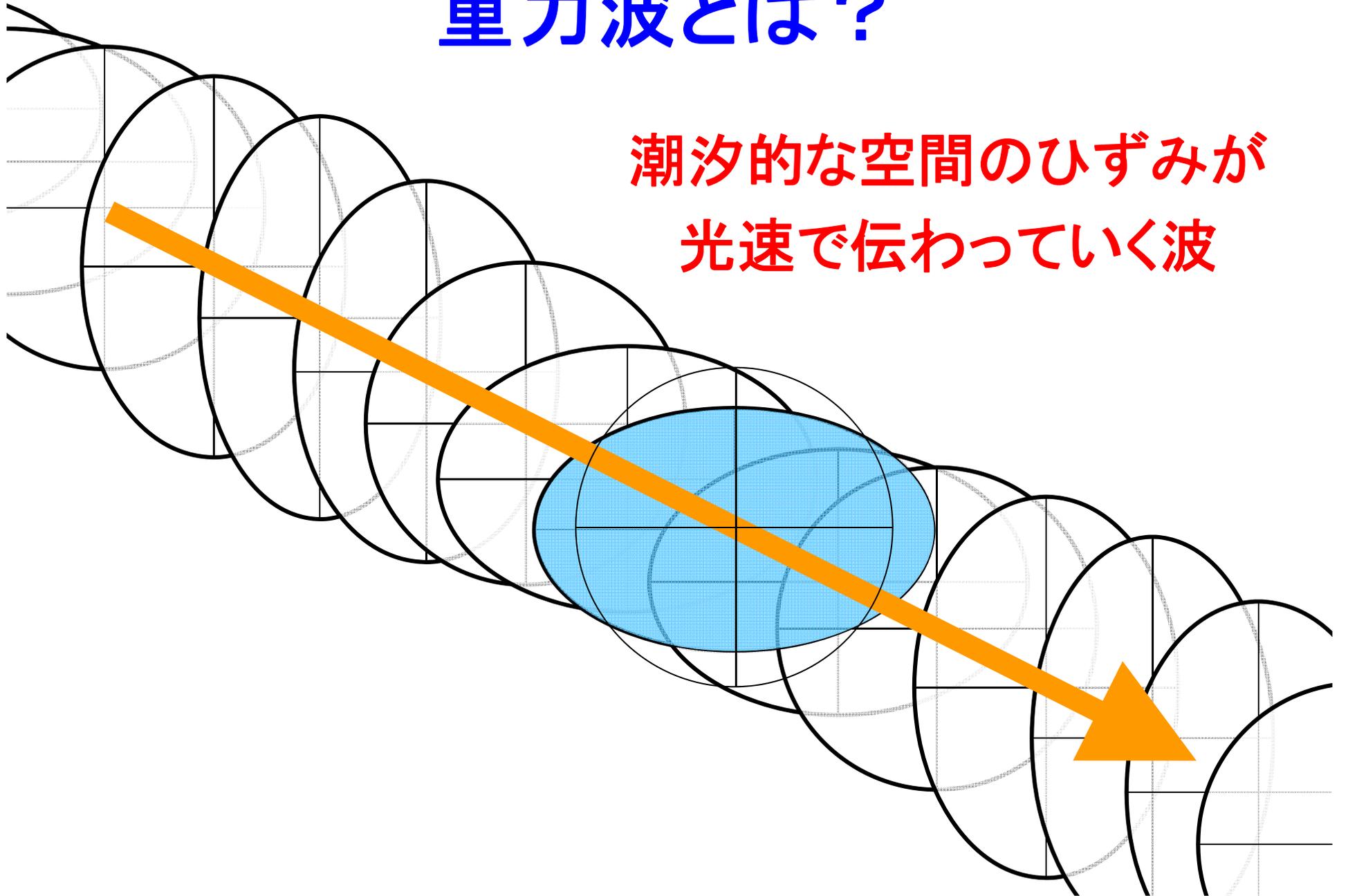




免許皆伝  
一般相対性理論

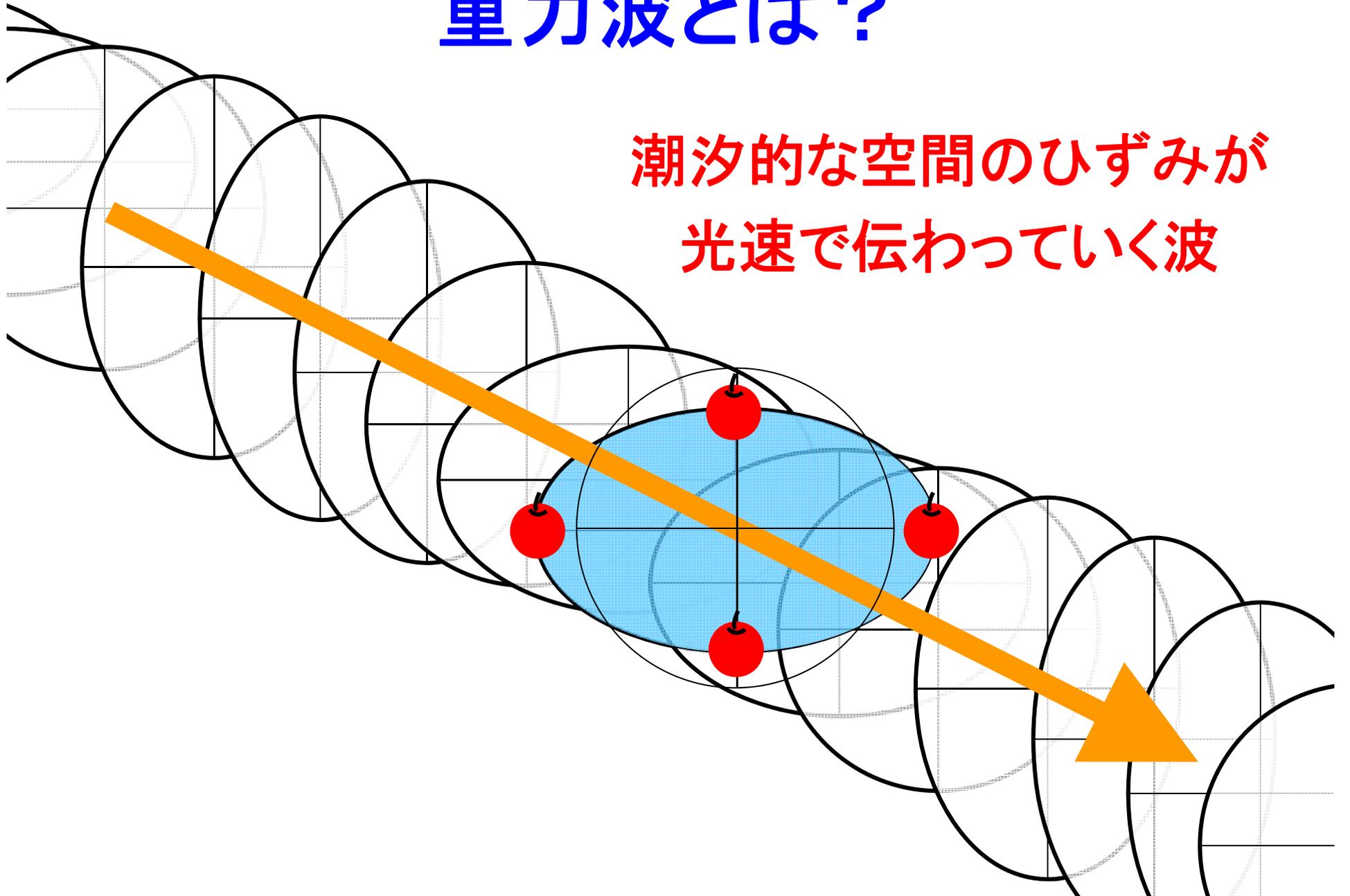
# 重力波とは？

潮汐的な空間のひずみが  
光速で伝わっていく波



# 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



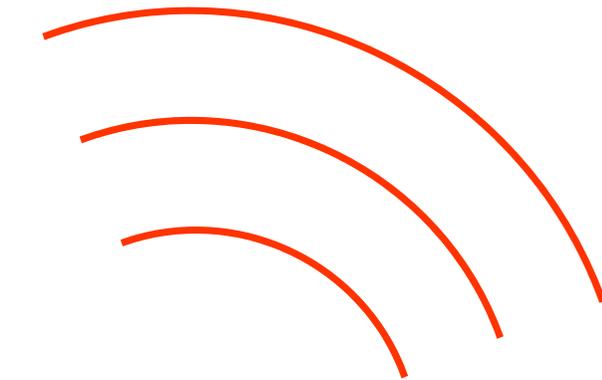
# 重力波のプロファイル

- アインシュタインが**一般相対性理論**で  
導出
- **光速**で伝わる
- **真空中でも伝わる**
- **何でもすり抜ける**
- **まだ見つかっていない**



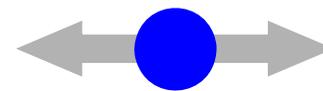
# 重力波は何から出るか？

電磁波



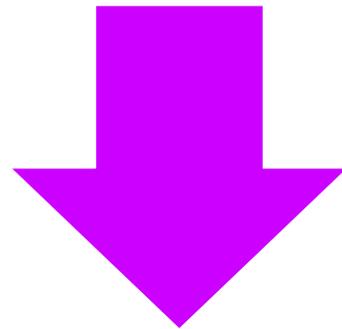
電荷

重力波



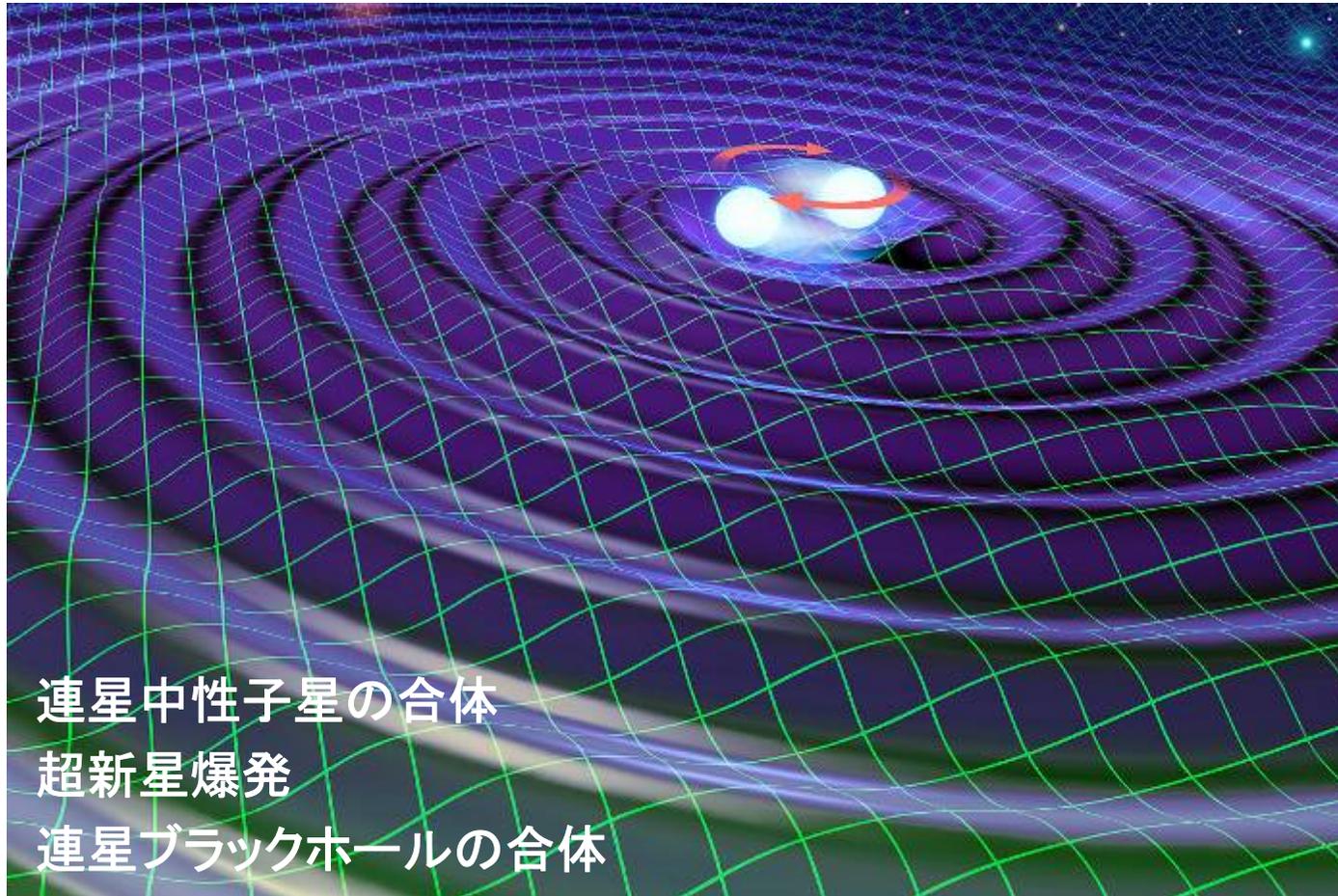
質量

**重いものが速く動くほど  
重力波がいっぱい出る！**



**天体現象**

# 重力波のイメージ

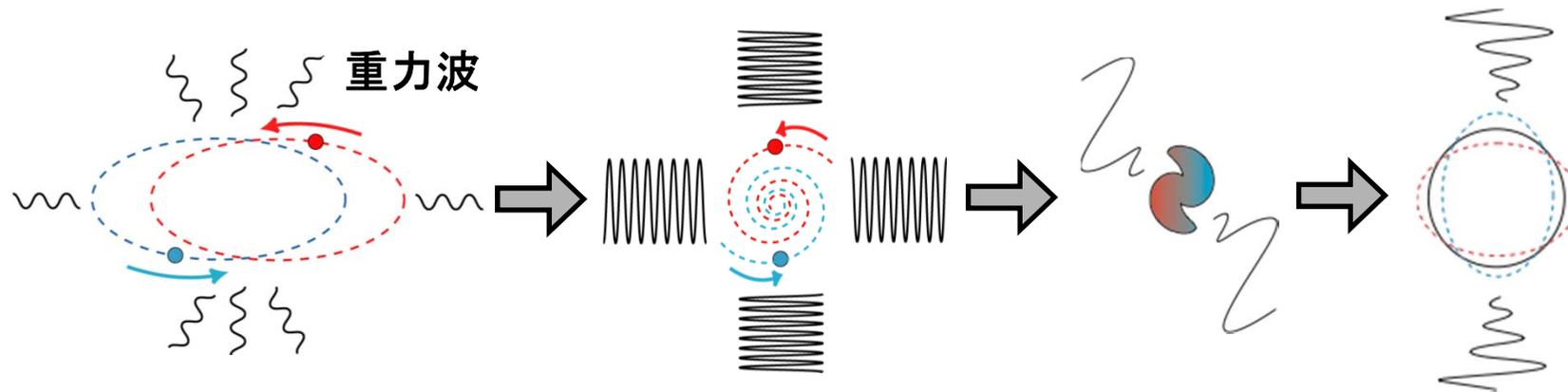


連星中性子星の合体  
超新星爆発  
連星ブラックホールの合体



CG/KAGAYA

# 中性子星連星の合体

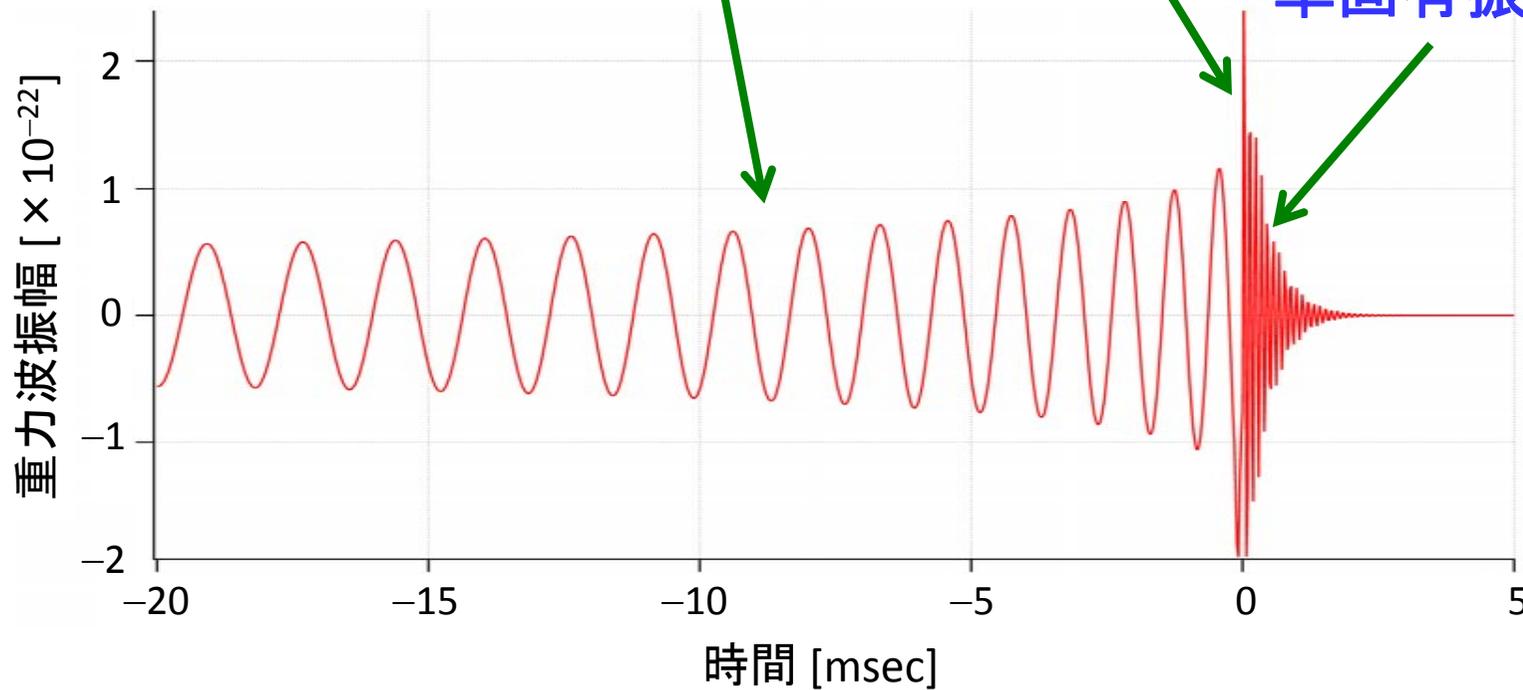


公転運動

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

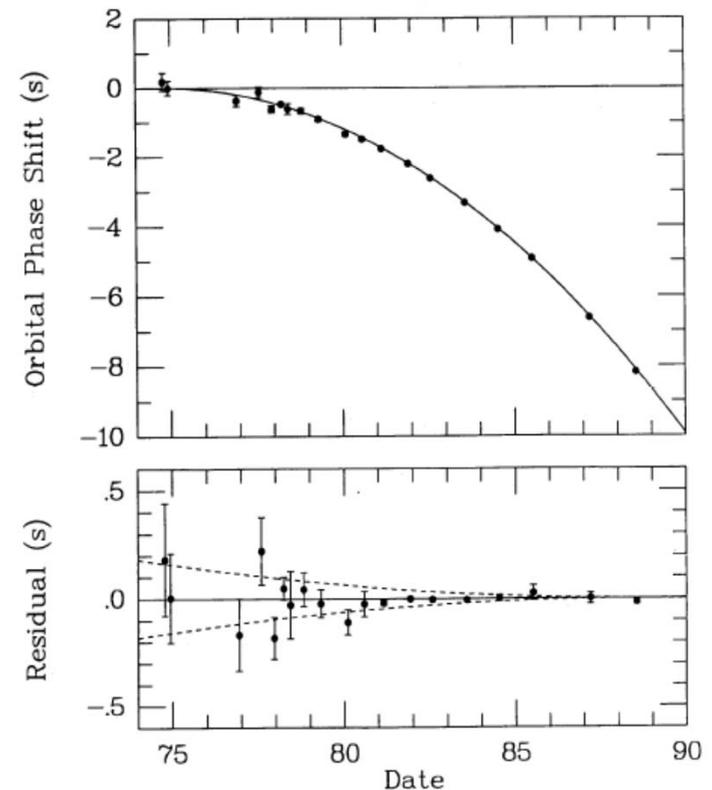
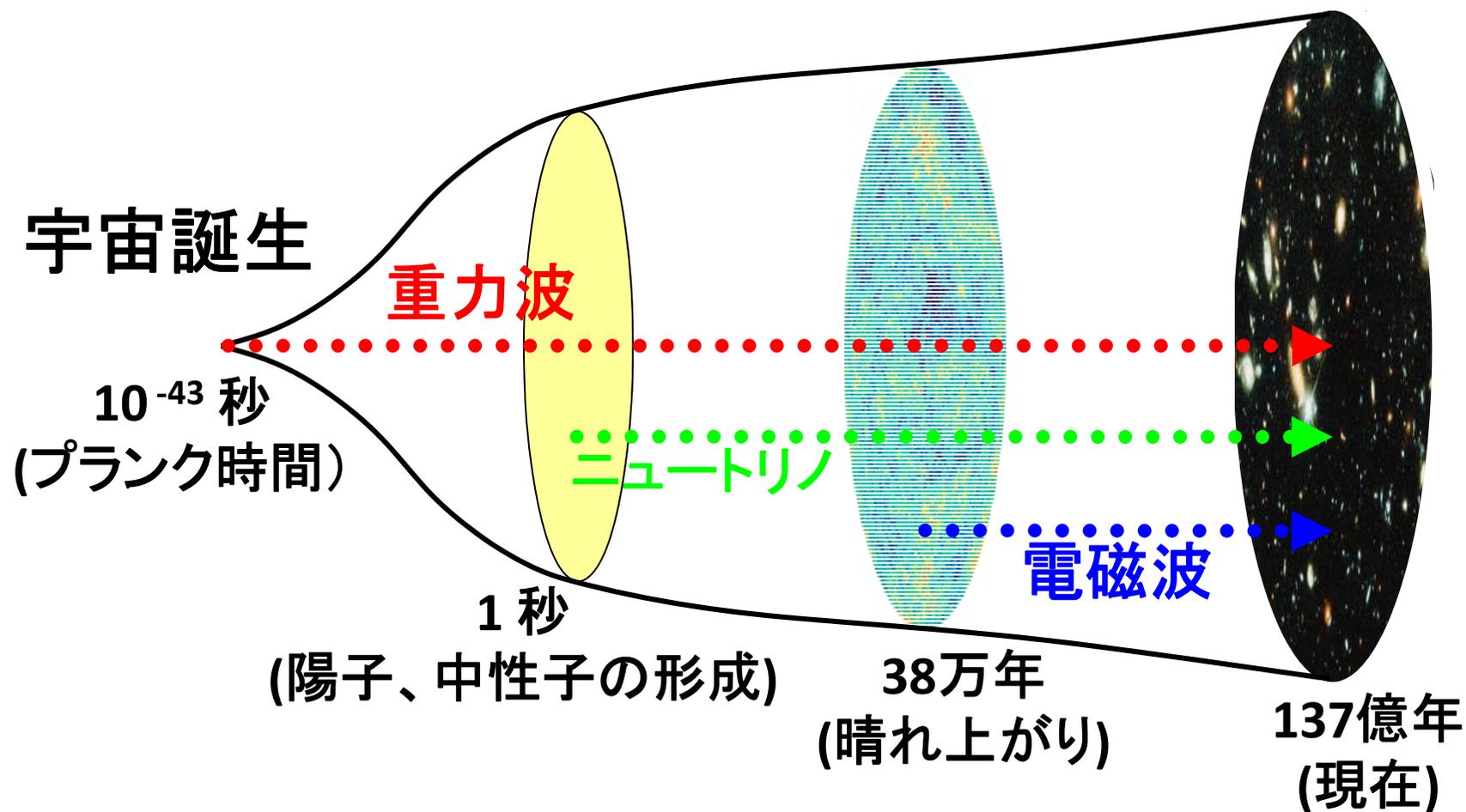


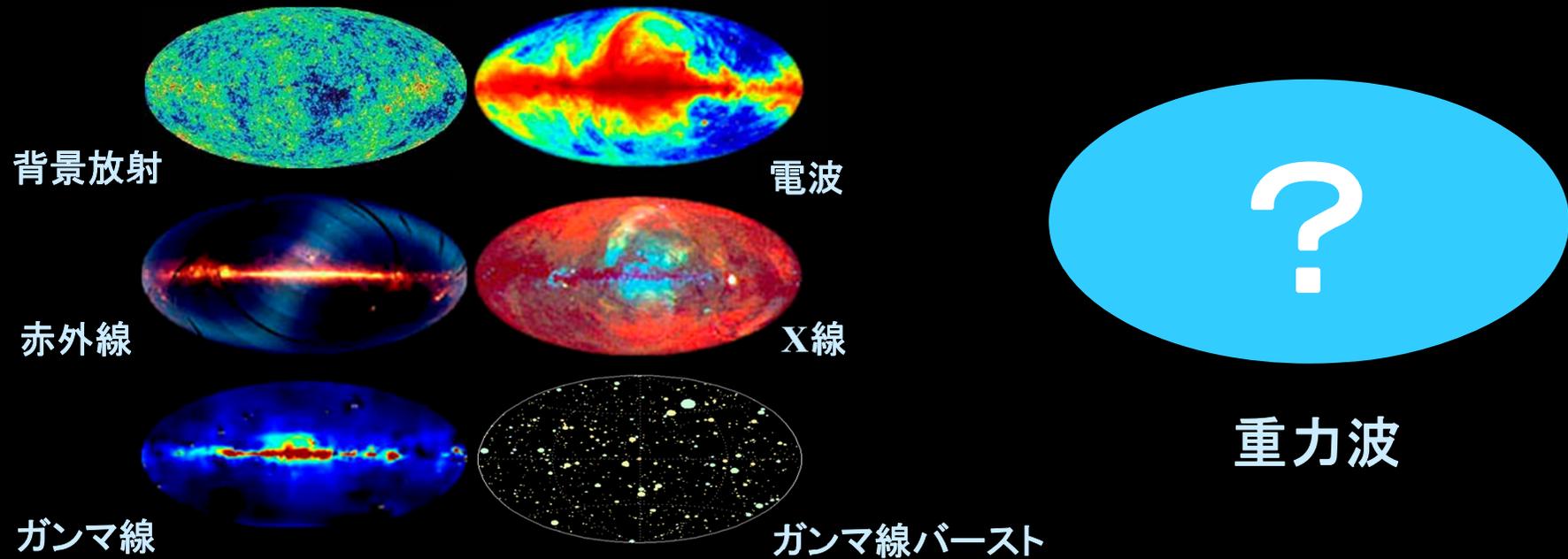
FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves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



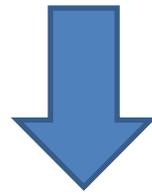
# 重力波天文学



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

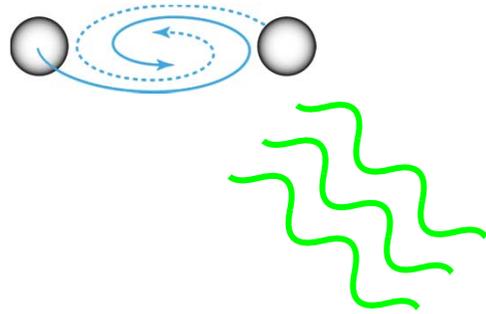
# 余剰次元の検証？

- 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

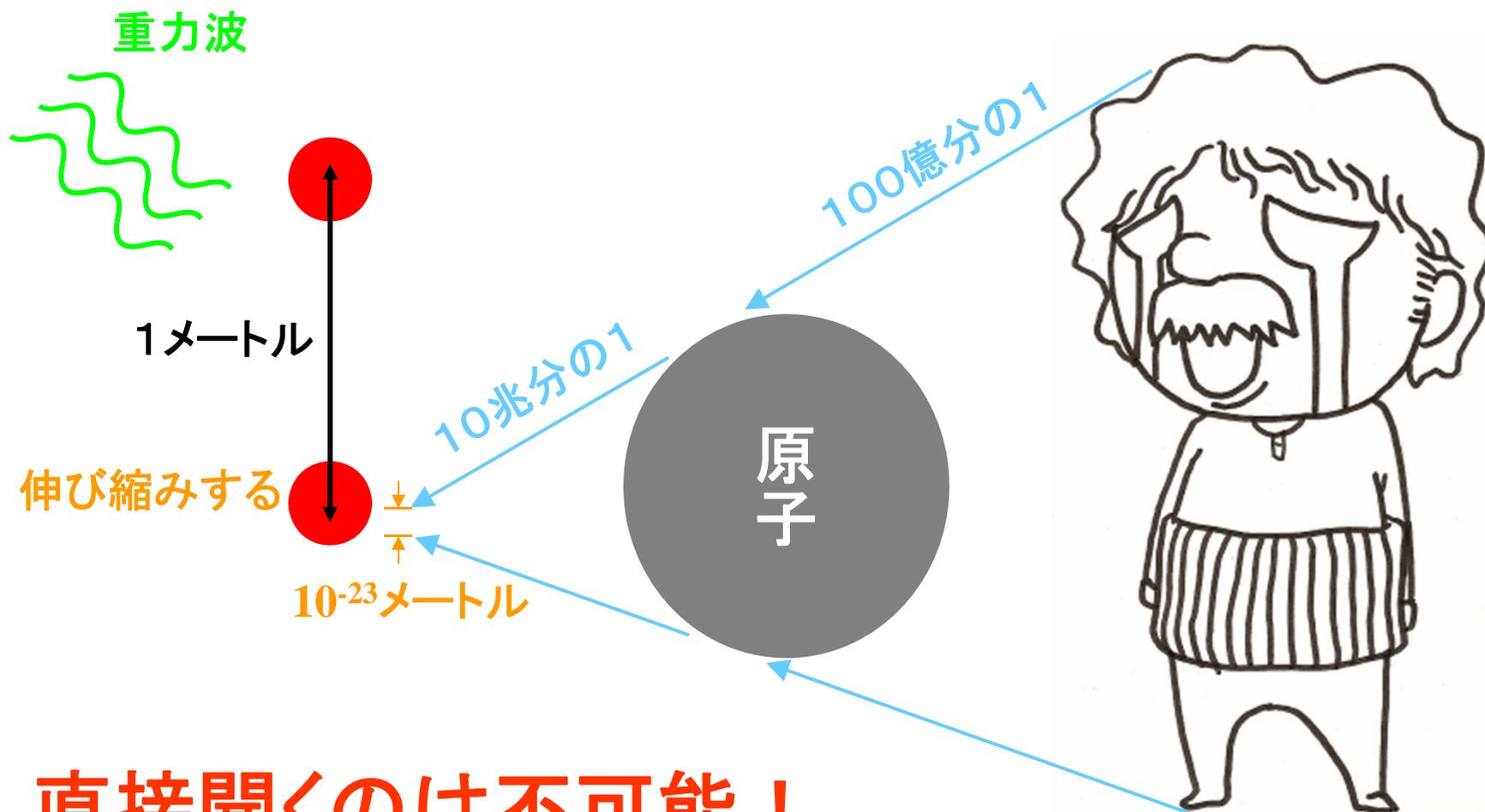


**余剰次元の存在の検証**

# 重力波は聞こえるはず？

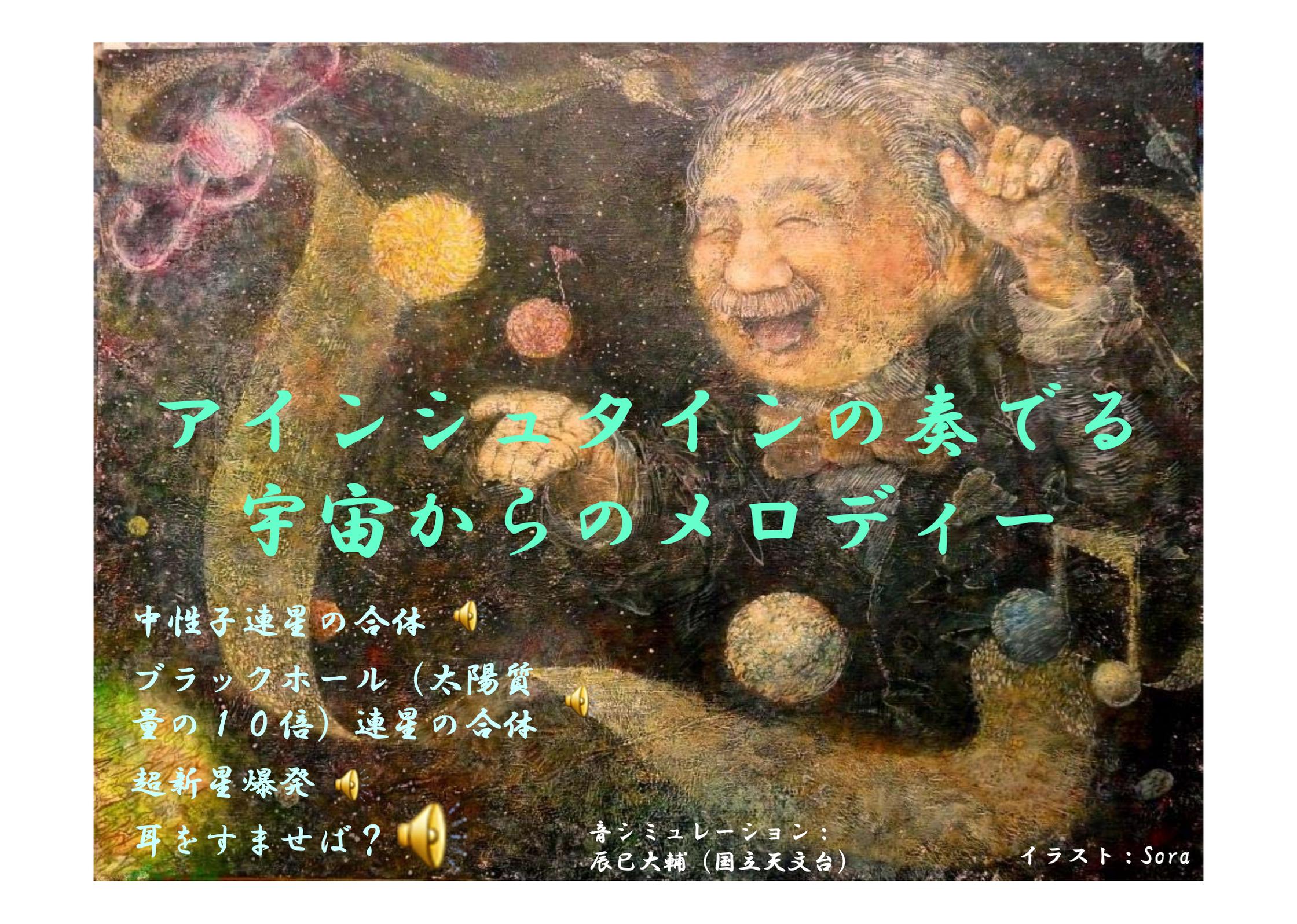


# しかしその振動は・・・



# 超高感度の補聴器





# アインシュタインの奏でる 宇宙からのメロディー

中性子連星の合体 📢

ブラックホール (太陽質量の10倍) 連星の合体 📢

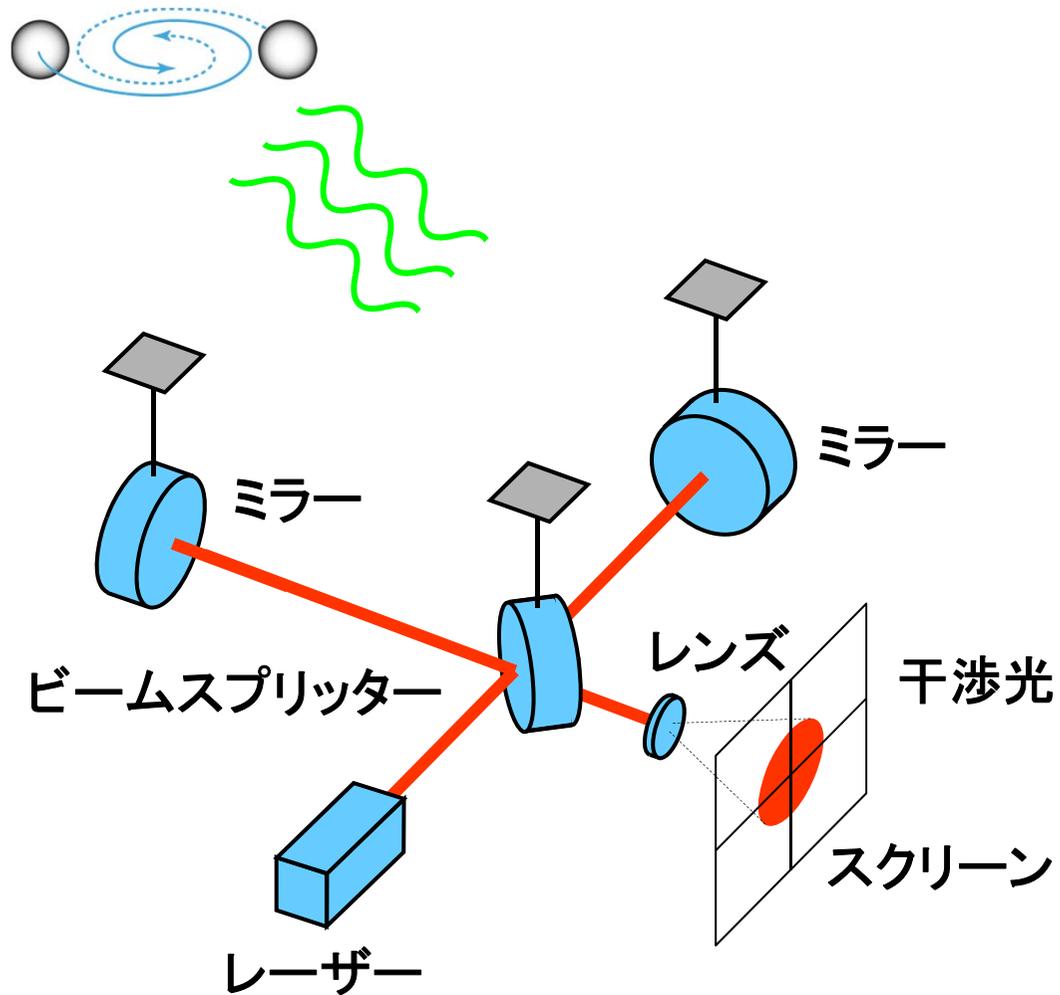
超新星爆発 📢

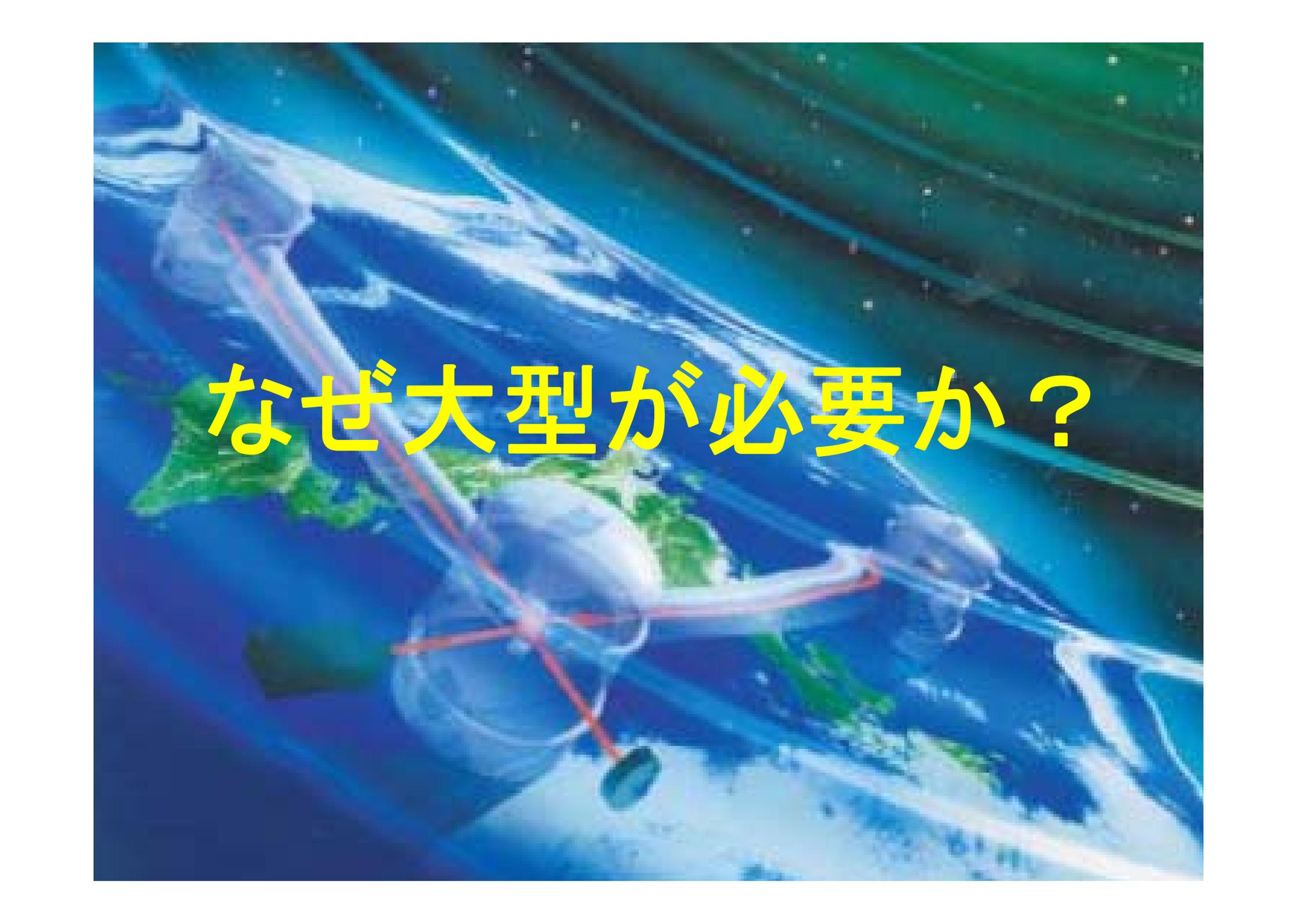
耳をすませば? 📢

音シミュレーション：  
辰巳大輔 (国立天文台)

イラスト：Sora

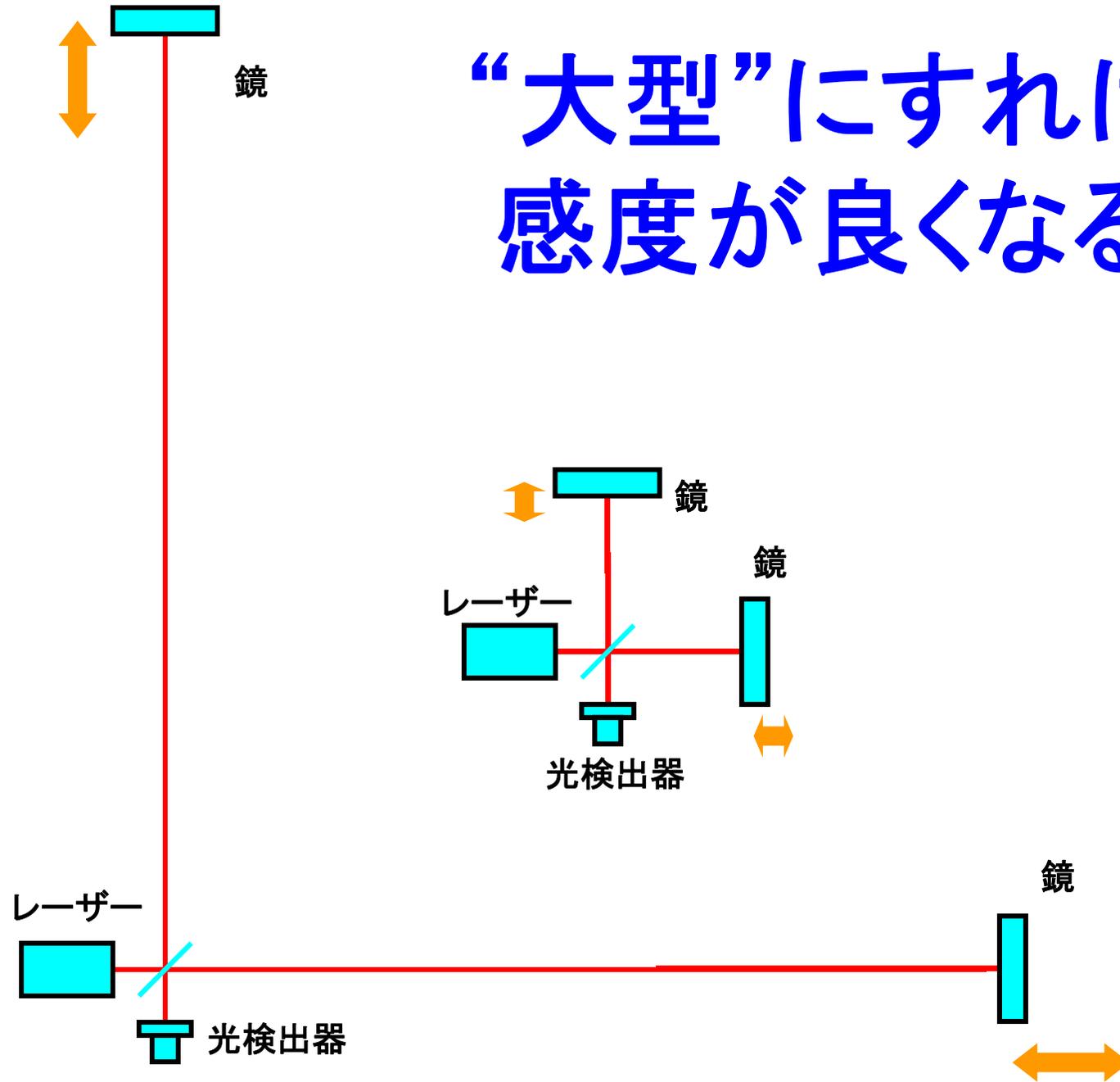
# レーザー干渉計による 重力波検出の原理



A futuristic space station or satellite is shown in orbit above Earth. The station has a central hub with several long, thin arms extending outwards. One arm is pointing towards the Earth, while others are pointing in different directions. The Earth is visible in the background, showing green landmasses and blue oceans. The text 'なぜ大型が必要か？' is overlaid in the center of the image.

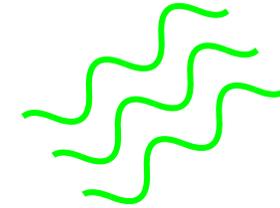
なぜ大型が必要か？

“大型”にすれば  
感度が良くなる

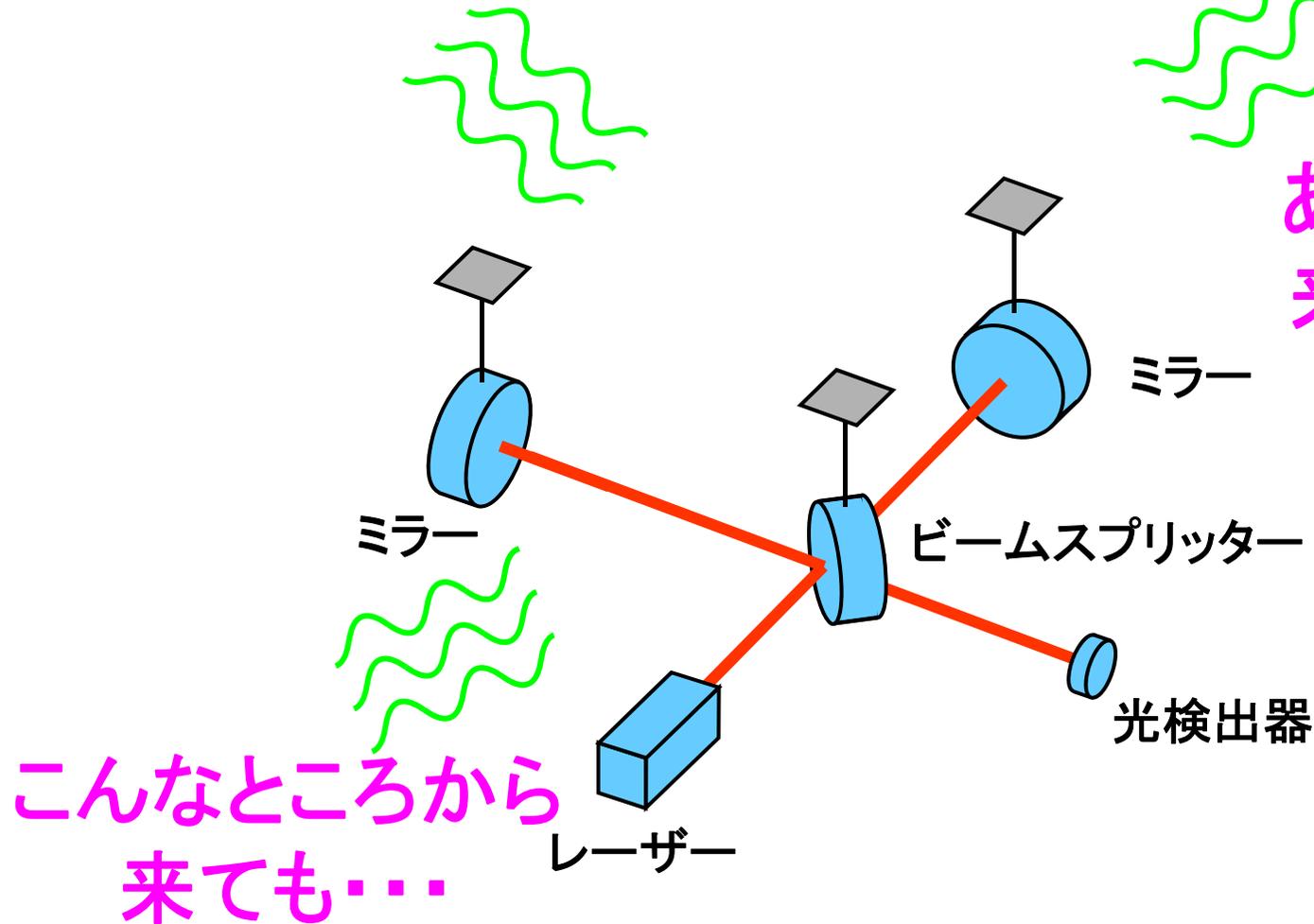


# 望遠鏡との違い

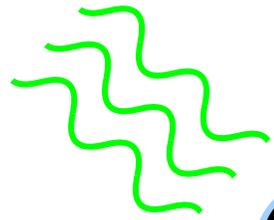
こっちから来ても...



あっちから  
来ても...

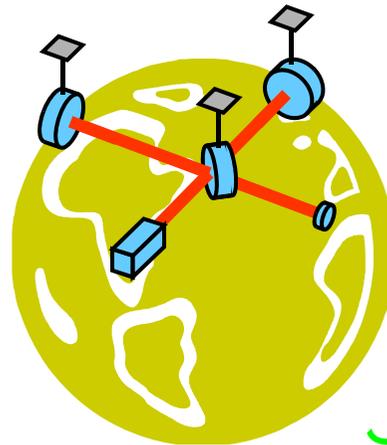


しかも・・・

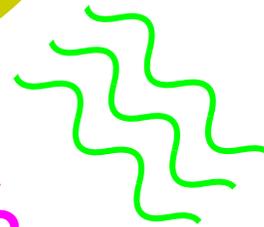


雨の日でも・・・

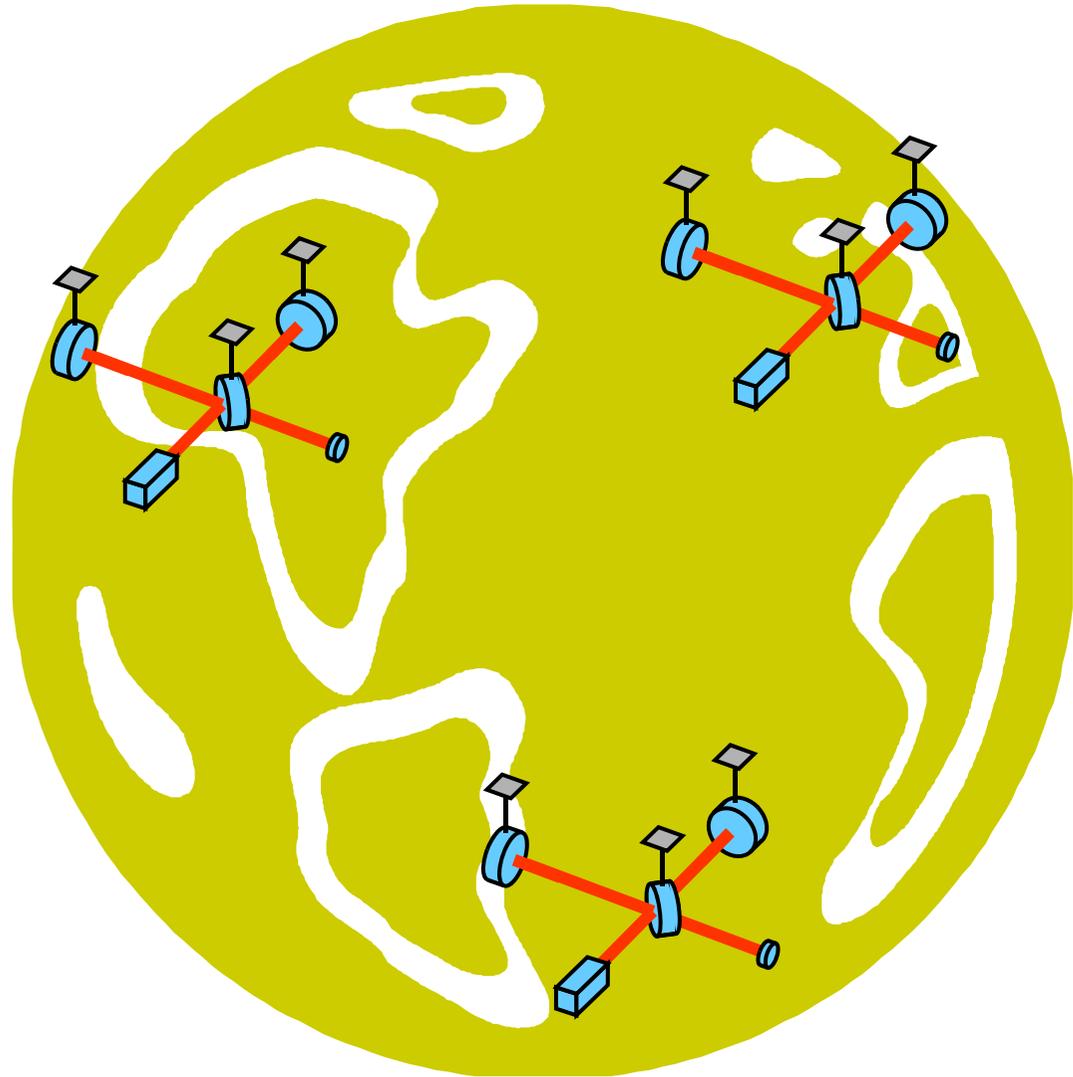
昼間でも・・・



地球の裏側から  
来ようとも・・・

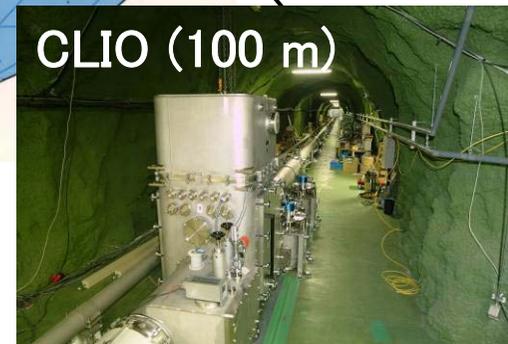


# 重力波源の方向は？



時間差から  
方向が分かる！

# 世界の大型干渉計

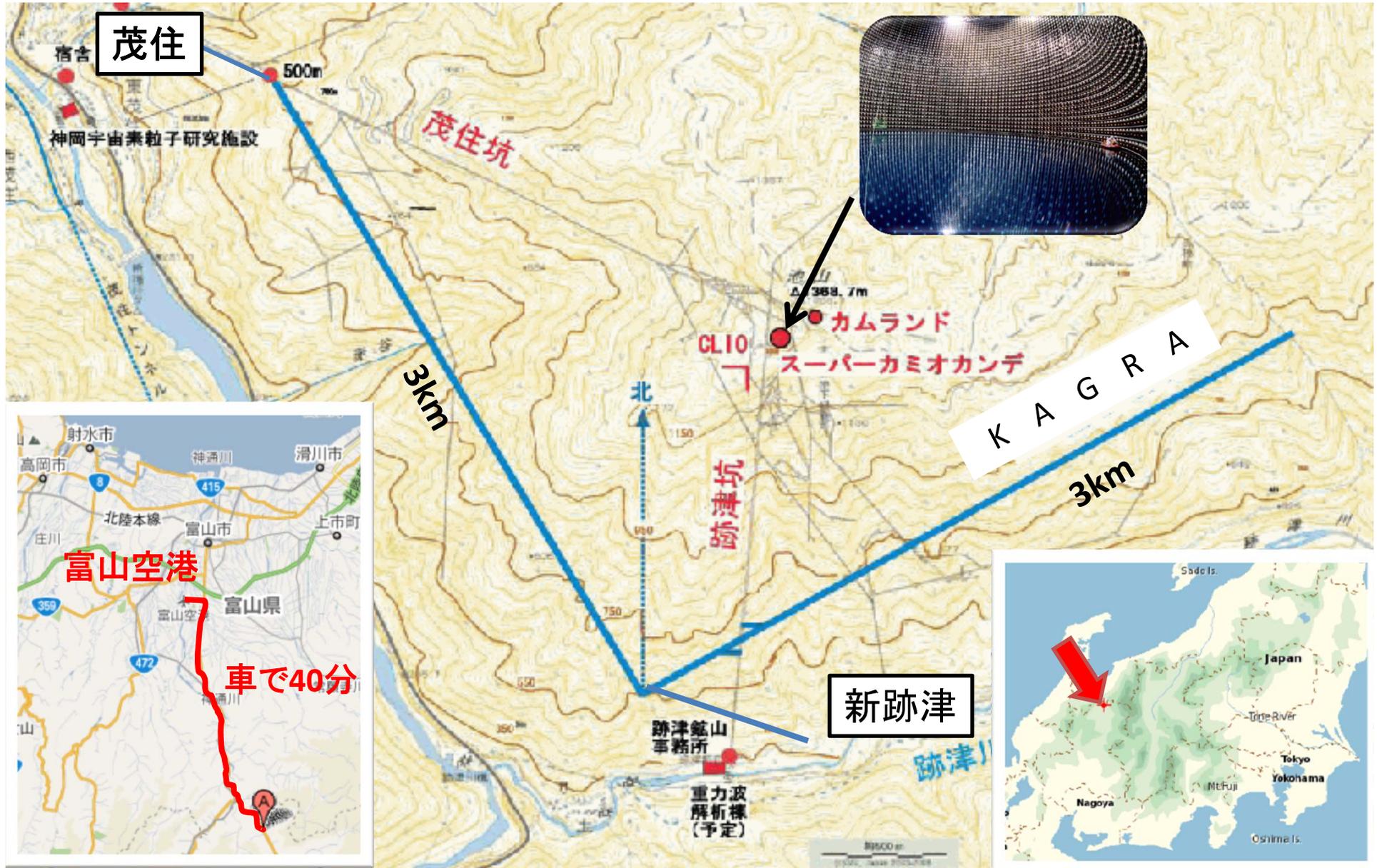


# KAGRA

重力波を検出し  
重力波天文学を創成する

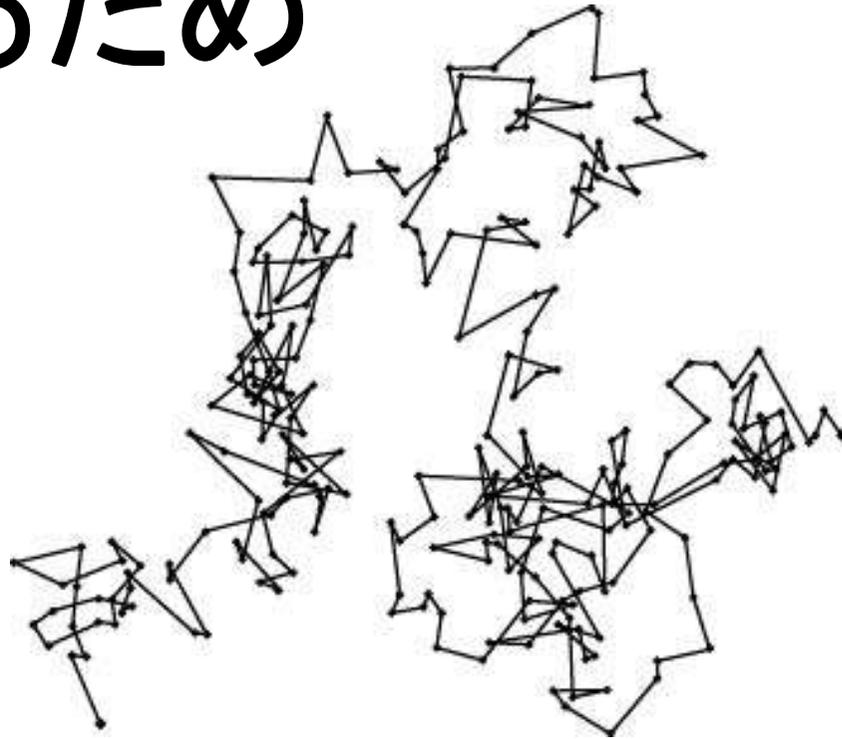


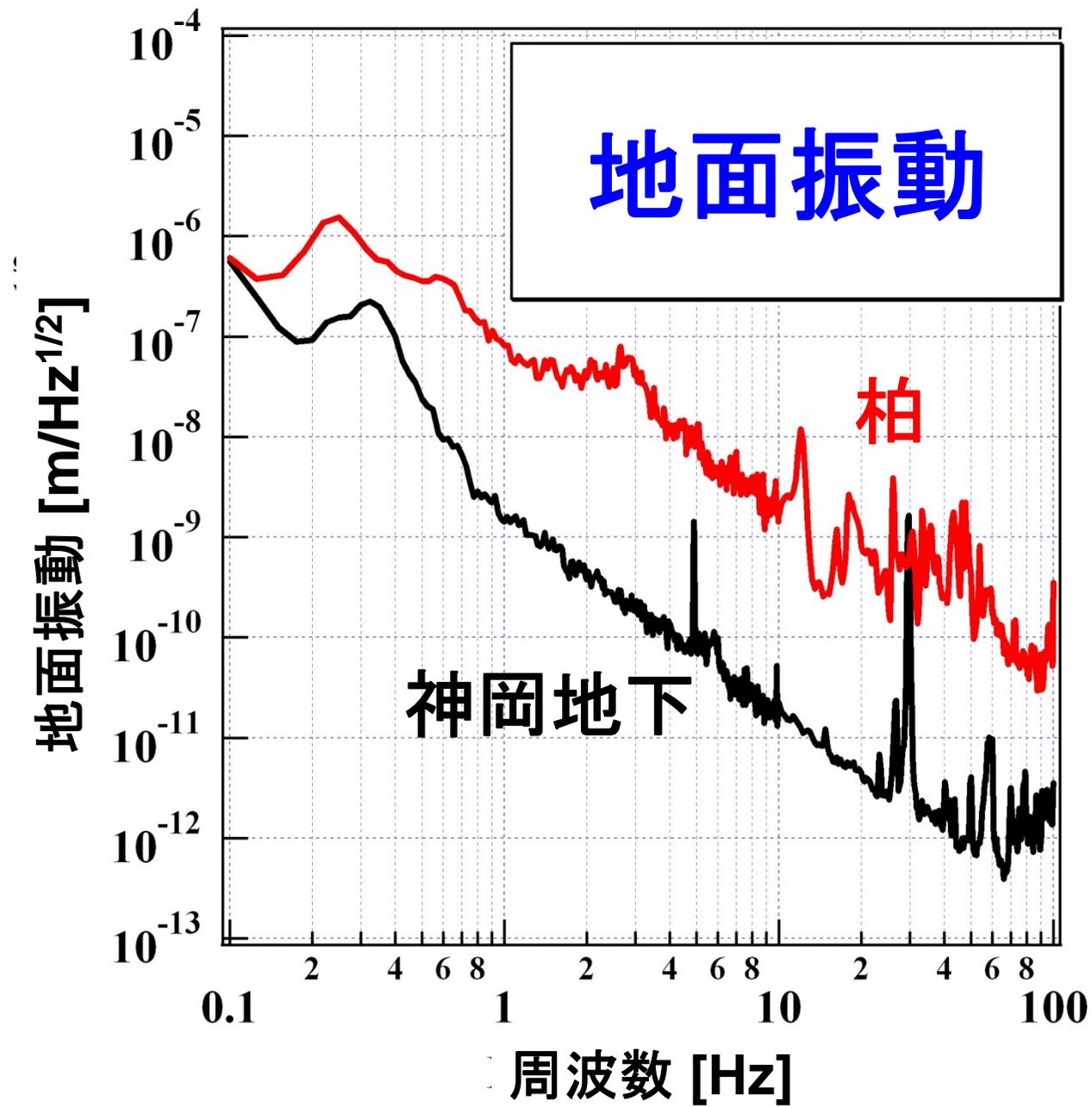
# 神岡



# 低温鏡

鏡のブラウン運動（熱雑音）  
を抑えるため

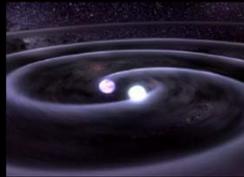




# 高感度化への様々な技術

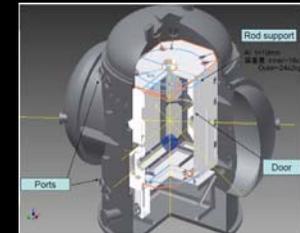
## ・重力波源の理解

理論・解析的計算  
数値相対論  
データ解析手法



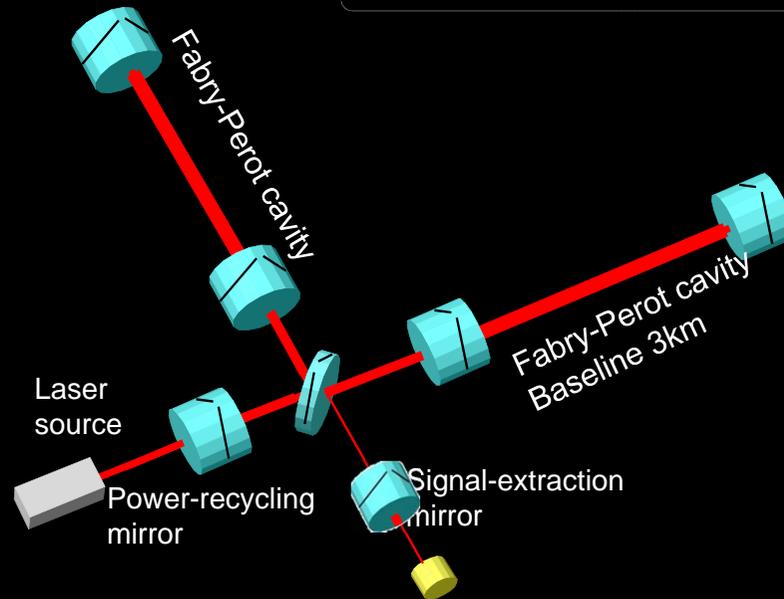
## ・鏡・振り子の熱雑音

鏡・振り子の低温化  
材質の機械損失



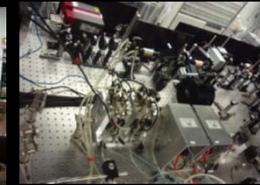
## ・地面振動の影響

静寂な地下サイト  
高性能防振装置



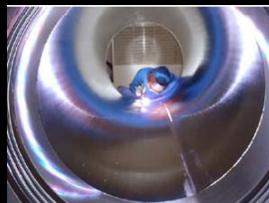
## ・光の量子雑音

大型干渉計  
干渉計方式の工夫  
高出力レーザー光源  
高性能鏡



## ・真空システム

光路長の揺らぎ  
音響雑音などの低減

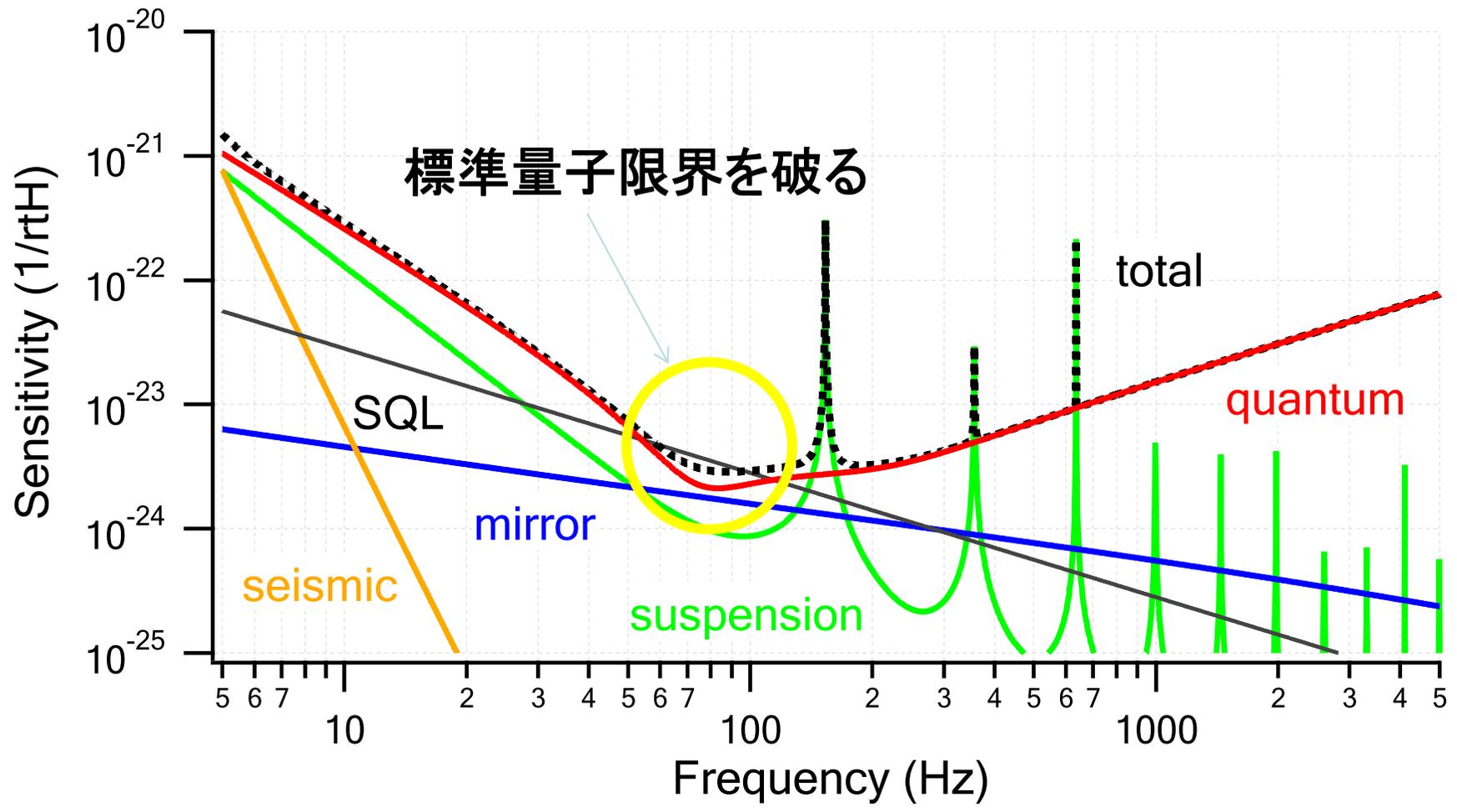


## ・長期・連続観測

デジタル制御・データ取得系  
環境モニタ, データ保管・分配



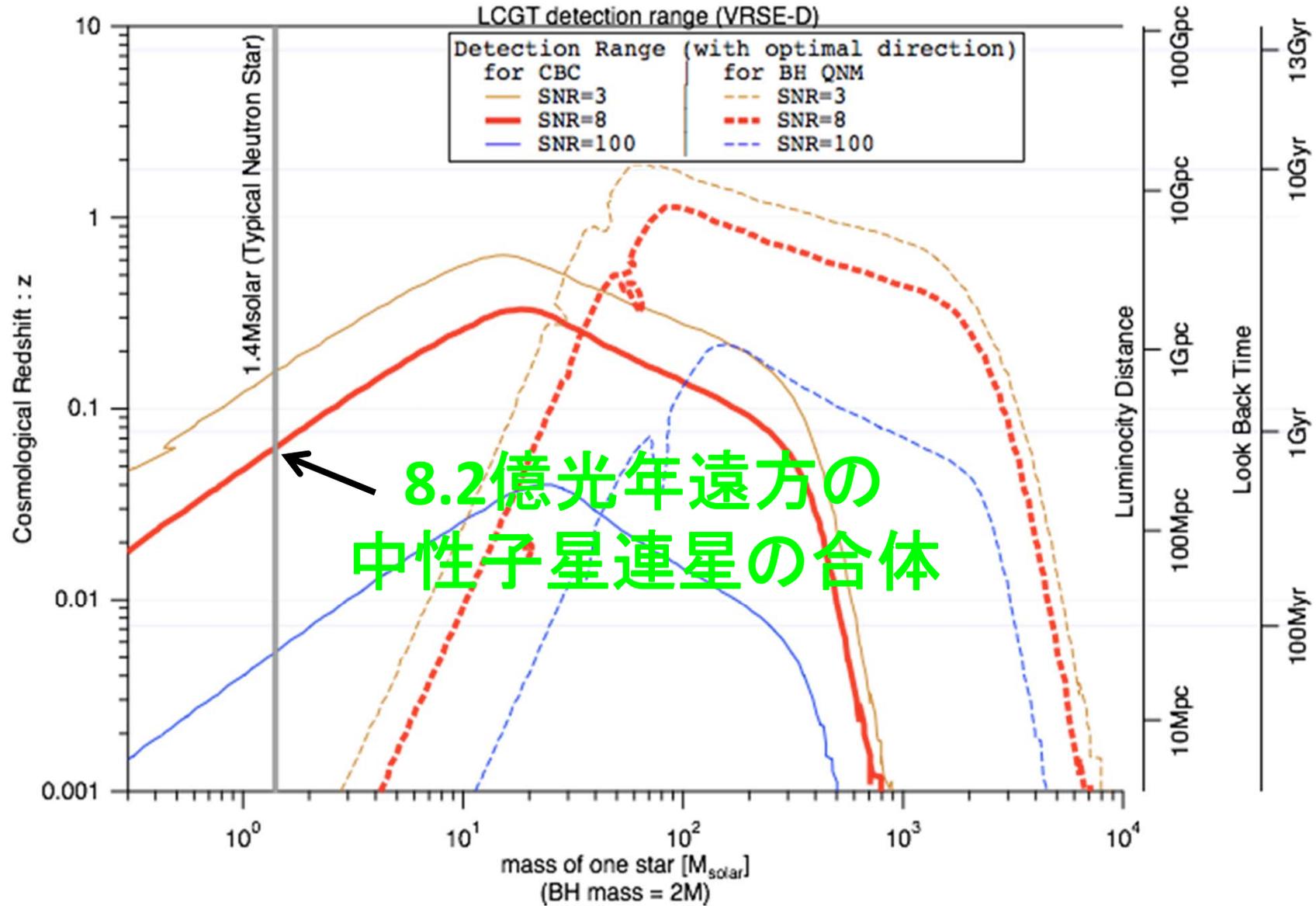
# KAGRAの目標感度



# 中性子星連星からの 重力波検出の可能性

- 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 <sup>a</sup>	59.03	7.75	0.617	0.37
B1534+12 <sup>a</sup>	37.90	10.10	0.274	2.93
J0737-3039A <sup>a</sup>	22.70	2.45	0.088	0.23
J1756-2251 <sup>a</sup>	28.46	7.67	0.181	2.03
J1906+0746 <sup>b</sup>	144.14	3.98	0.085	0.082
J2127+11C <sup>bcd</sup>	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

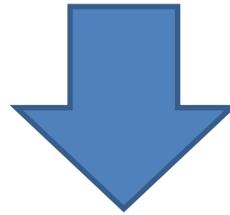
KAGRAのイベントレート：

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

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

# 検出が期待される重力波源

- ブラックホール連星の合体：太陽質量の20倍程度で65億光年遠方、年回1～30個???
- 超新星爆発：330万光年遠方???, 数十年に1個
- パルサー：銀河系内、???

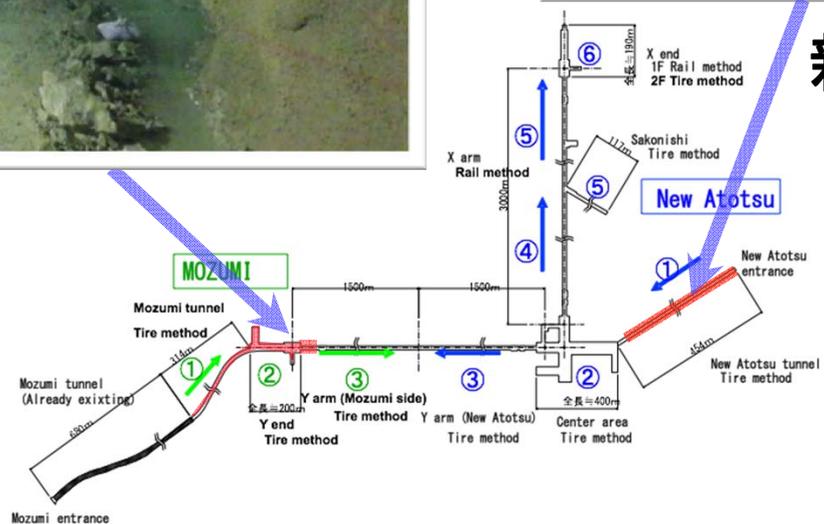
# トンネル掘削



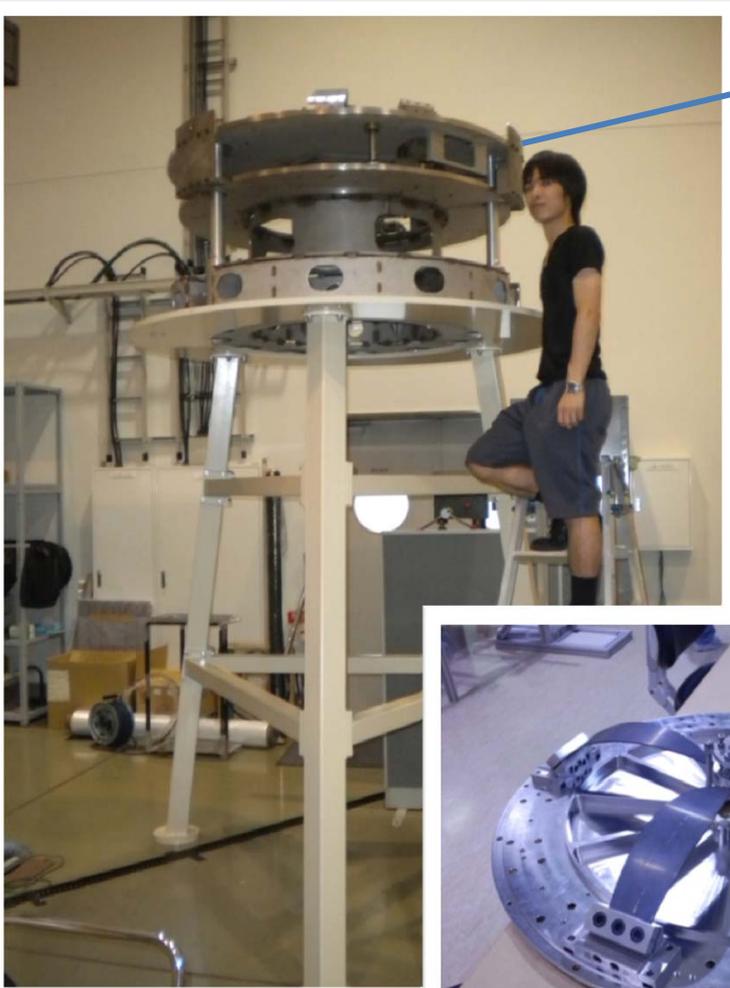
Y-エンド



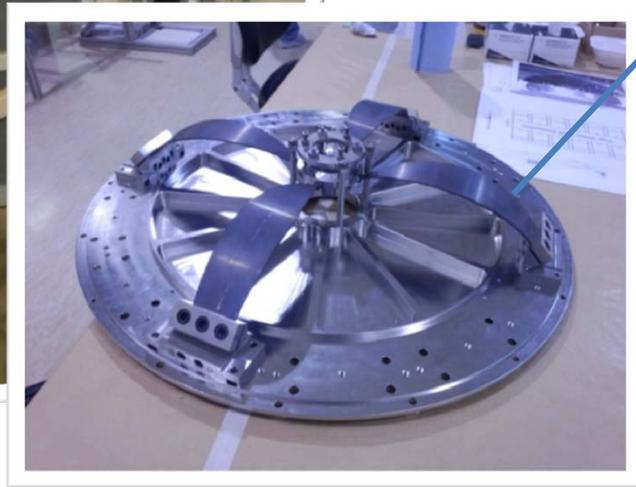
新跡津



# 防振システム

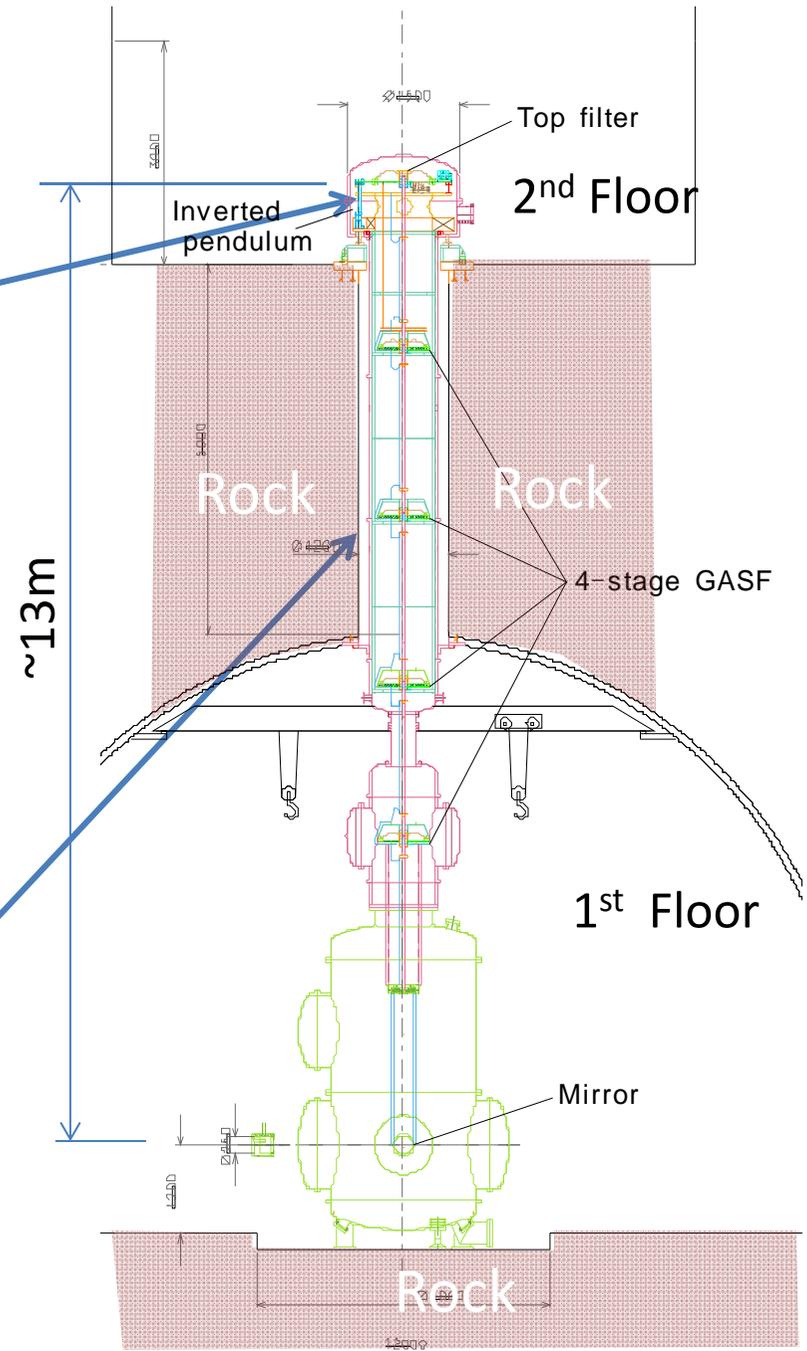


Prototypes



Top filter

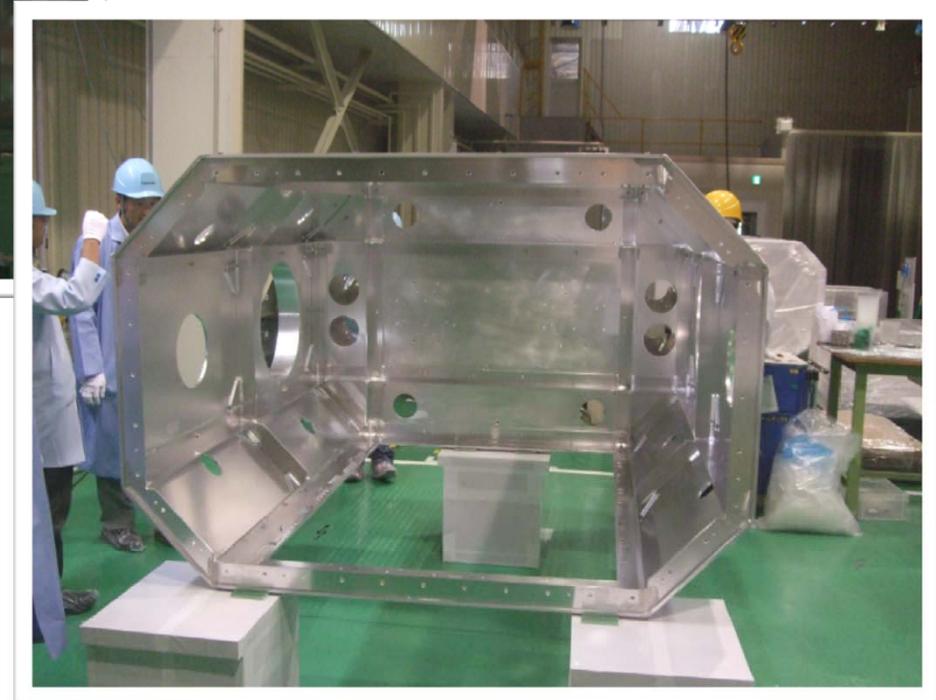
Standard filter



# クライオスタット

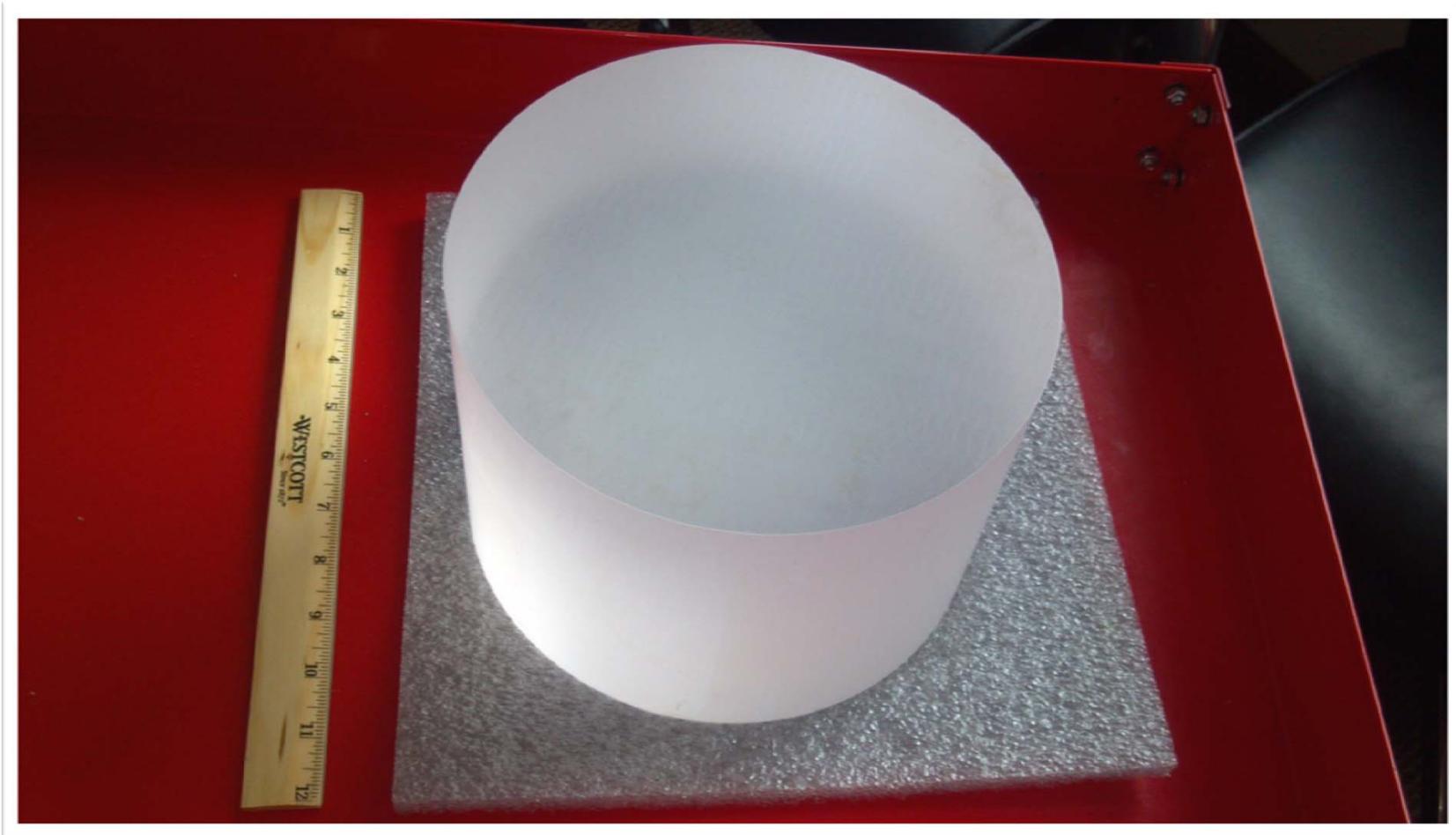


クライオスタット



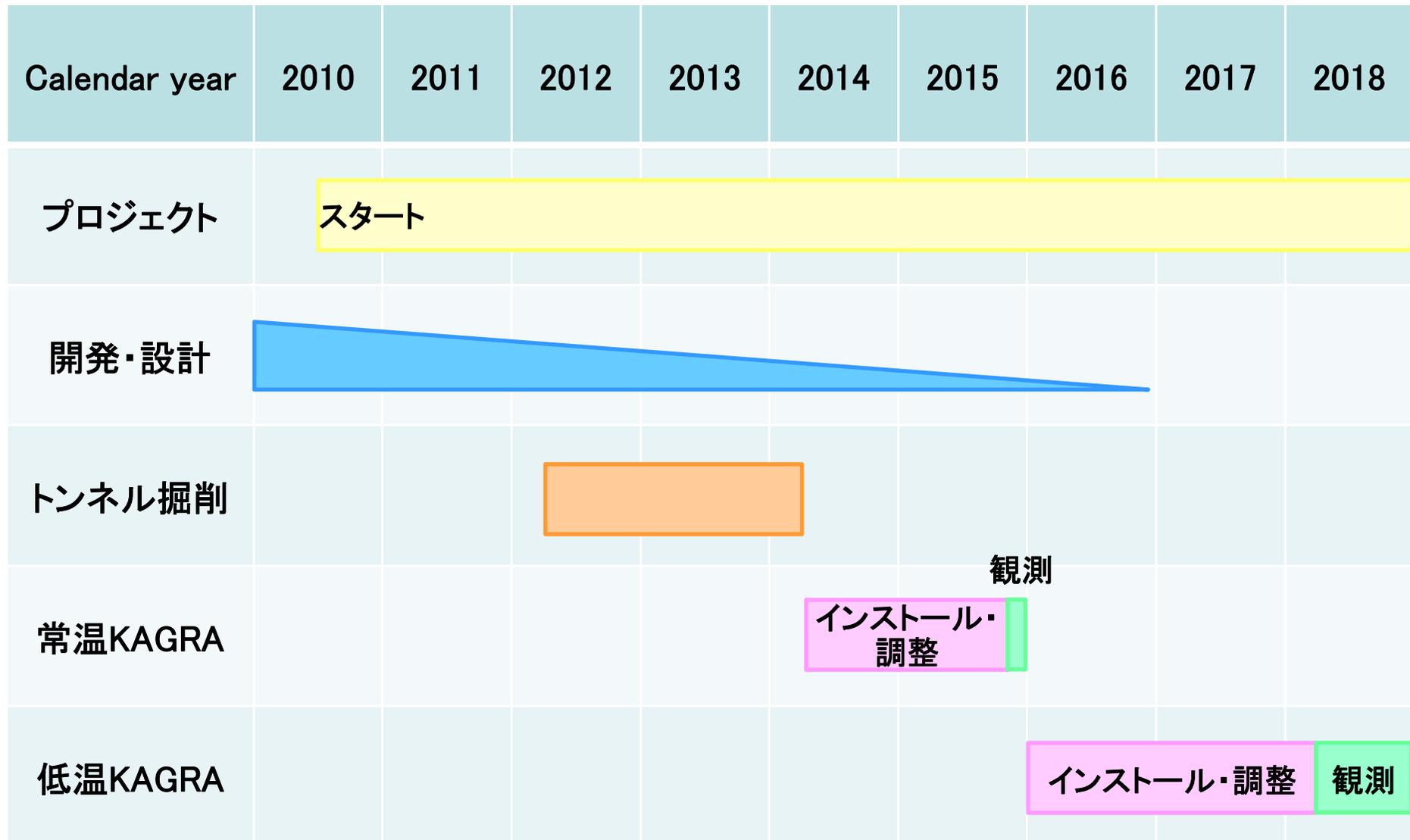
熱シールド

# サファイアミラー



22 cm $\phi$ , 15 cmt

# KAGRAのスケジュール



さらに将来は？

問：もっと大きく？

答：宇宙へ！

スペース重力波アンテナ  
DECIGO計画



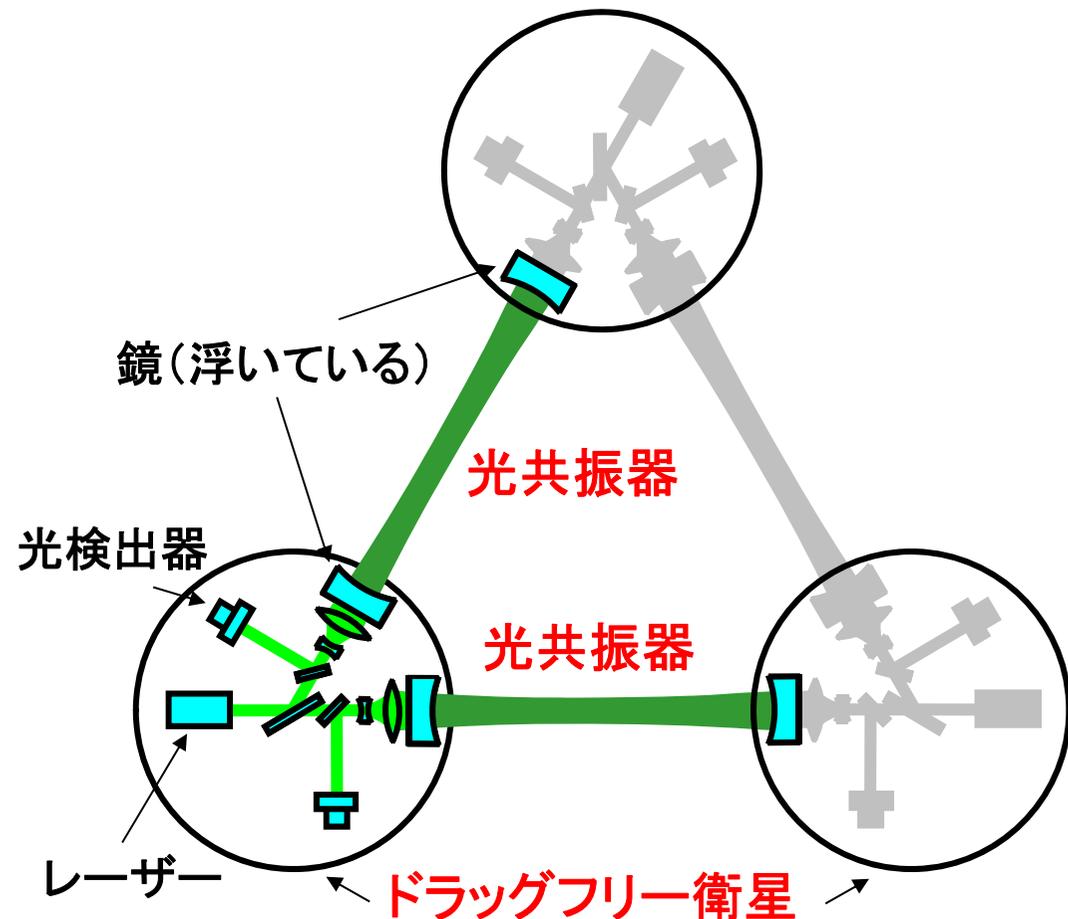
# スペース重力波アンテナDECIGO

Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory

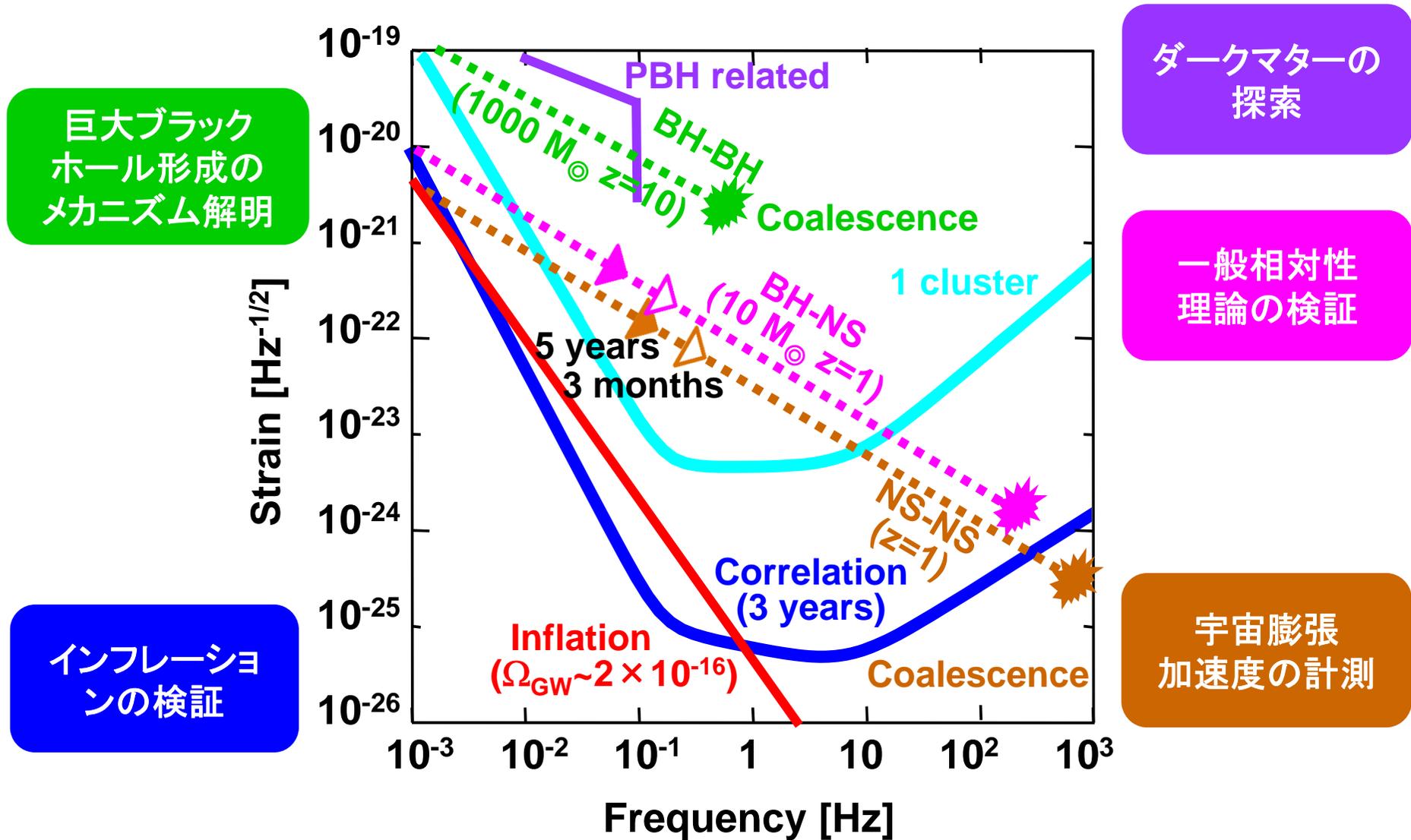
アーム長: 1000 km  
ミラー直径: 1 m  
レーザー波長: 532 nm

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



# DECIGOの目標感度と得られるサイエンス



重力波天文学の  
夜明けは近いぜよ！

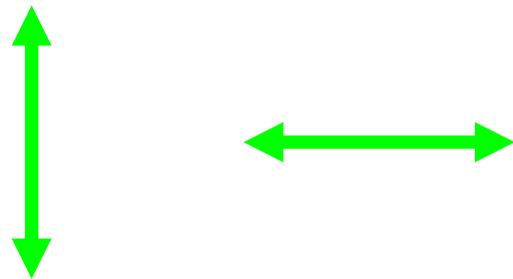


イラスト：  
Sora

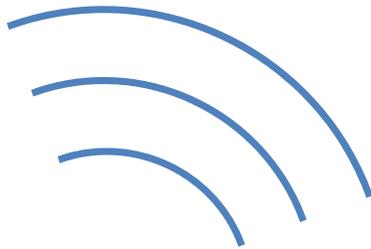
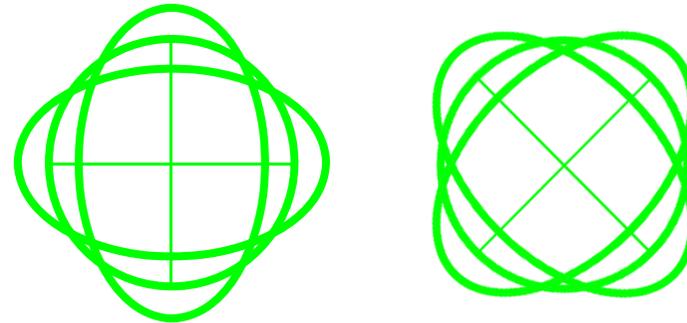
# 重力波と電磁波の違い

電磁波(ベクトル)

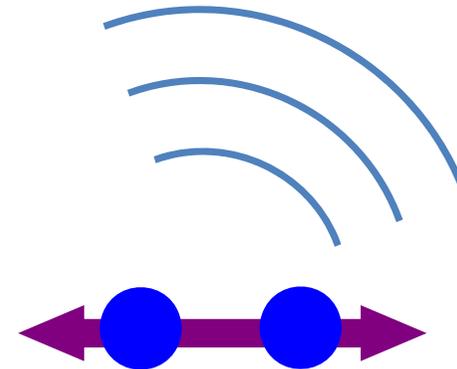
重力波(テンソル)



偏光



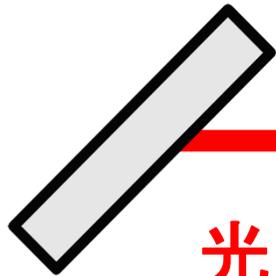
電荷(双極子放射)



質量(四重極子放射)

# 本当に測れるのか？

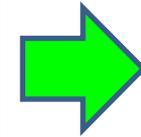
ビームスプリッター



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！



# LIGO

アーム長: 4 km & 2 km

Hanford, Washington

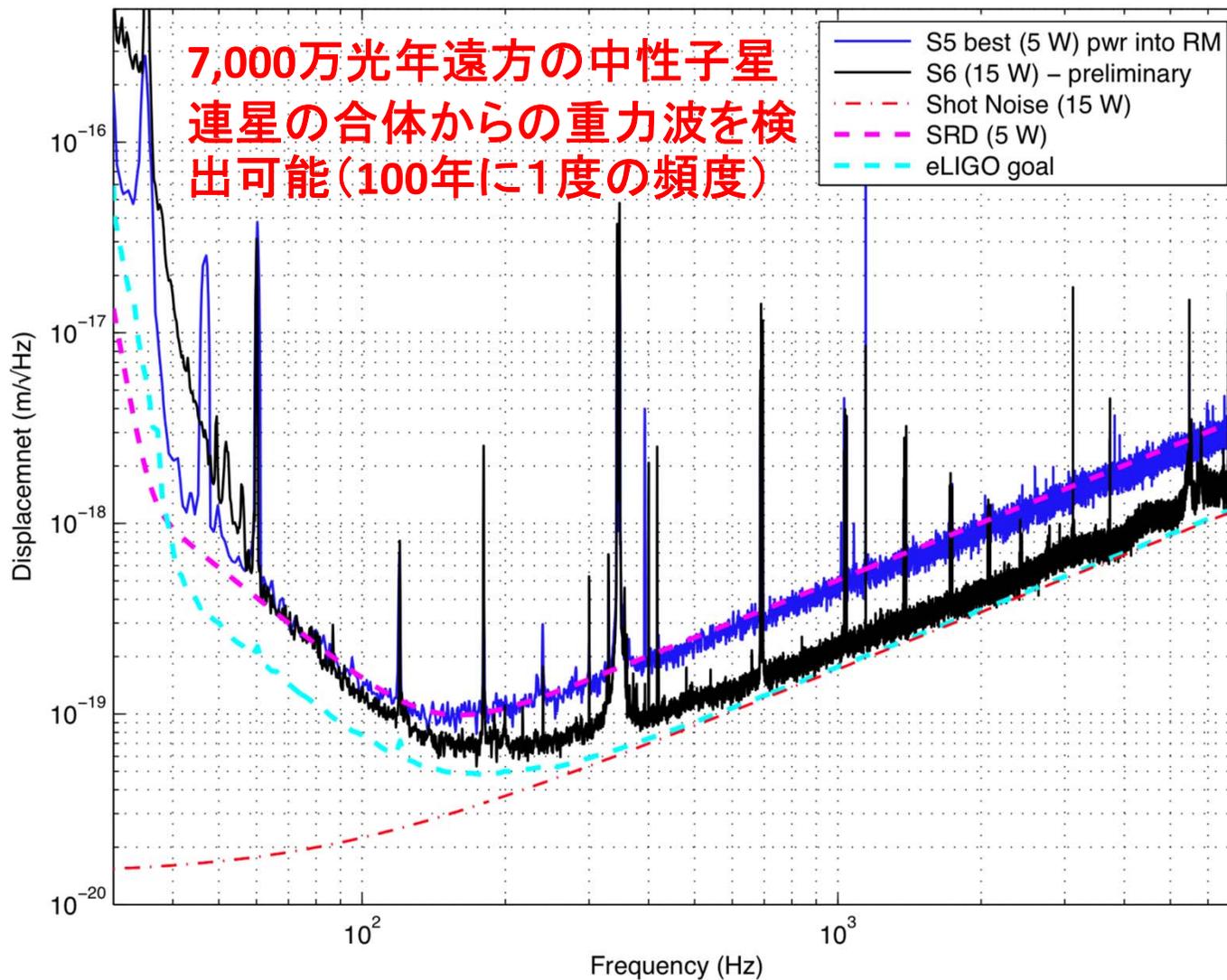


アーム長: 4 km



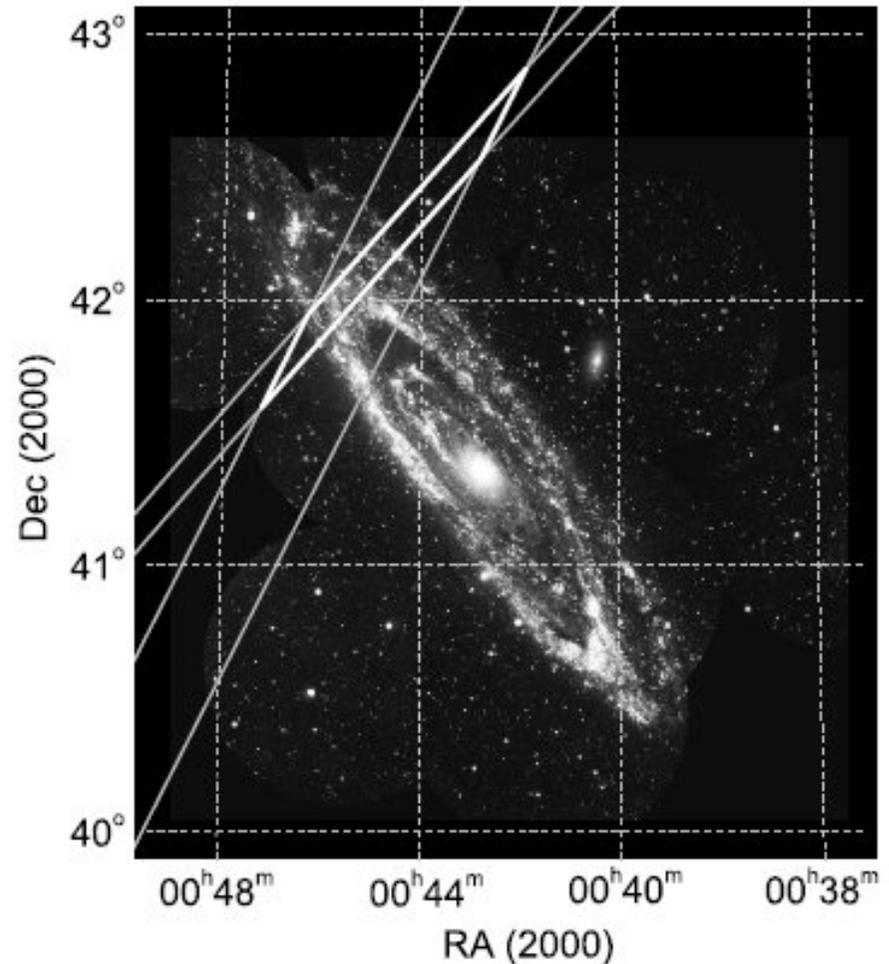
# LIGOの感度

H1 DARM Noise. SensMon 21.5 Mpc. GPS 957935880.

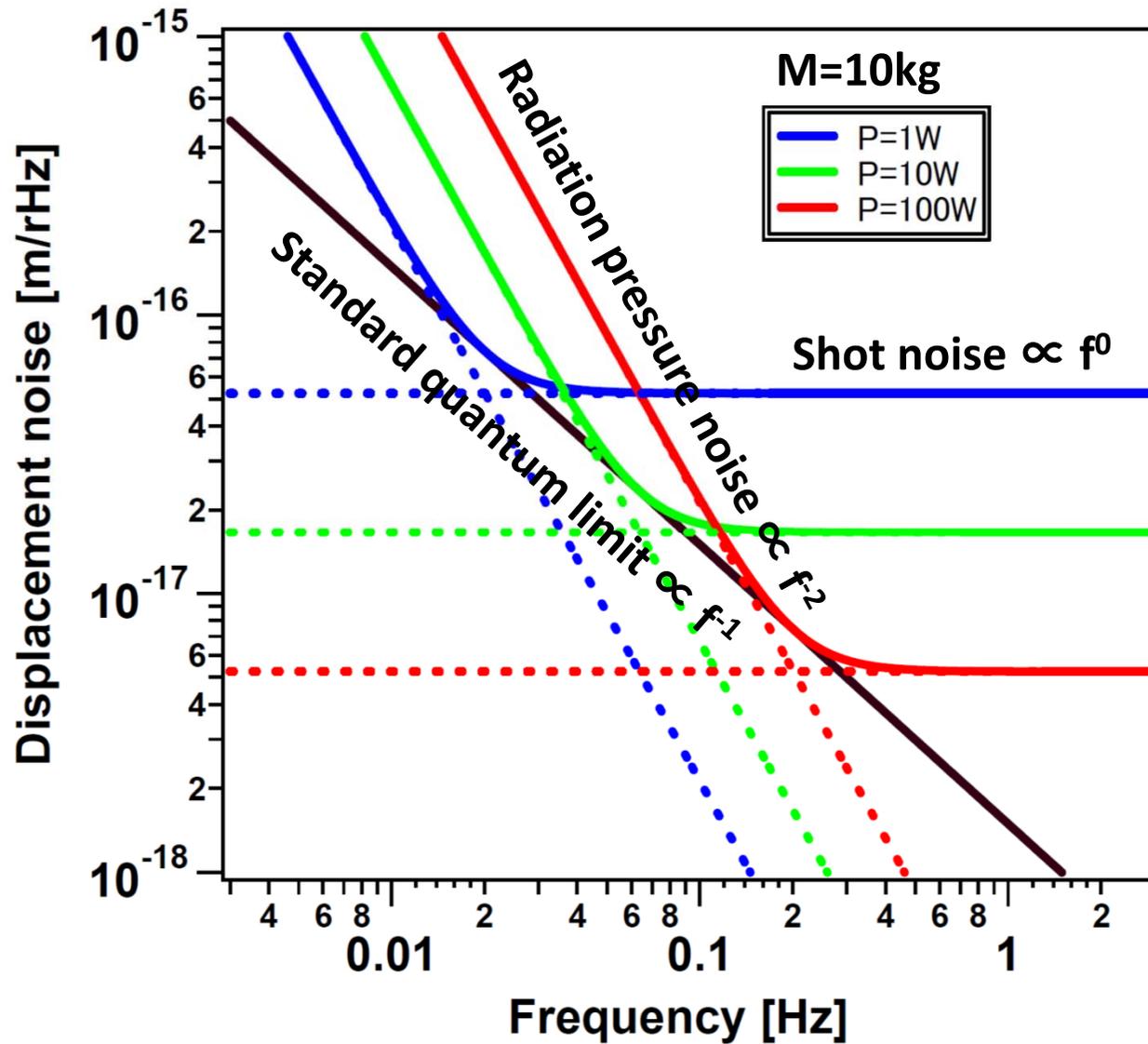


# GRB 070201

- 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:  $7.9 \times 10^{50}$  erg以下 (if M31)
  - SGR (in M31)の可能性は排除しない



# Standard quantum limit



# Standard quantum limit

## Heisenberg Uncertainty Relation

$$[\Delta x(t_1)] [\Delta x(t_2)] \geq \left| \frac{\hbar(t_2 - t_1)}{M} \right|$$

$t_1$ : right after 1st measurement

$t_2$ : right before 2nd  
measurement



## Standard Quantum Limit

$$S_x(\Omega) = \sqrt{\frac{2\hbar}{M\Omega^2}}$$

V.B. Braginsky, Sov. Phys. JETP 26, 831  
~1968

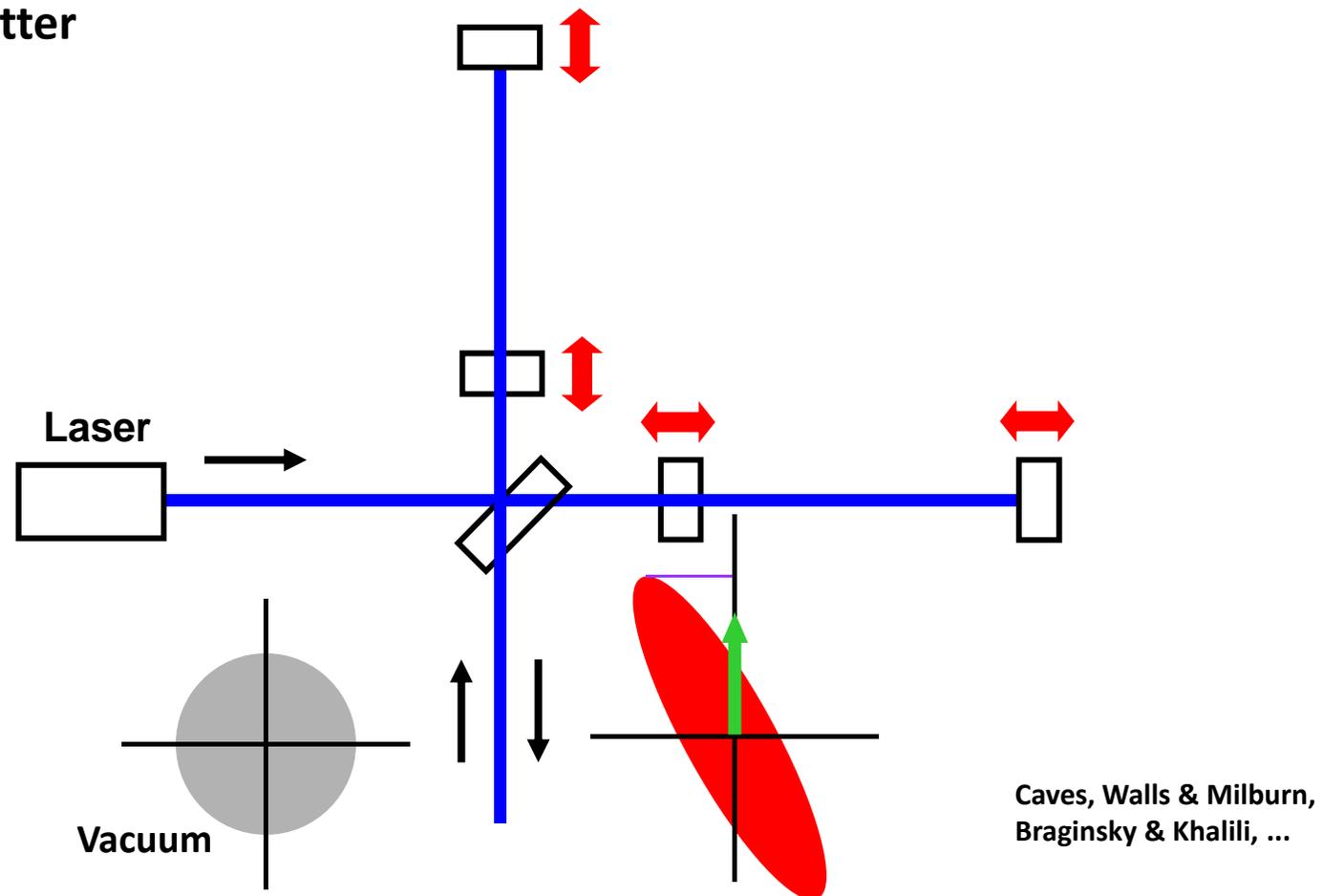
V.B. Braginsky and Yu.I. Vorontsov, Sov.  
Phys. Usp. 17, 644 ~1975

V.B. Braginsky, Yu.I. Vorontsov, and F.Ya.  
Khalili, Sov. Phys. JETP, 46, 705 ~1977

# Quantum noise in an interferometer

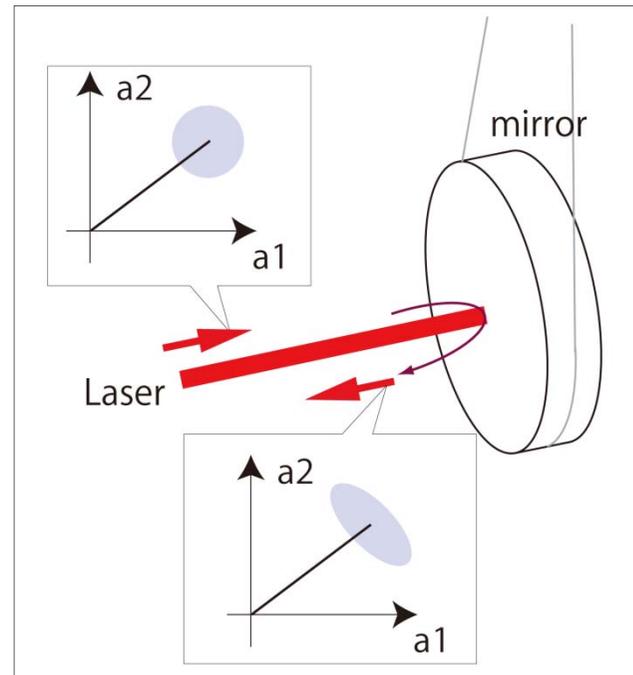
## Proper model

- Vacuum fluctuation is injected into the interferometer from the back of the beam splitter



# Ponderomotive squeezing

**Incident light: (Amplitude fluctuations) + (Phase fluctuations)**



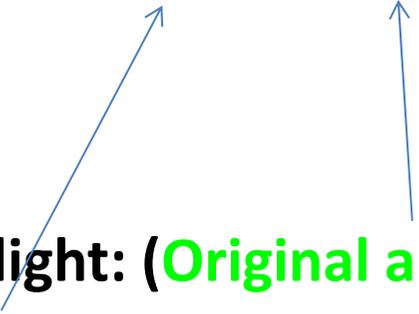
**Reflected light: (Original amplitude fluctuations)  
+ (Phase fluctuations caused by the original amplitude fluctuation)  
+ (Original phase fluctuations)**

# Ponderomotive squeezing

Incident light: (Amplitude fluctuations) + (Phase fluctuations)

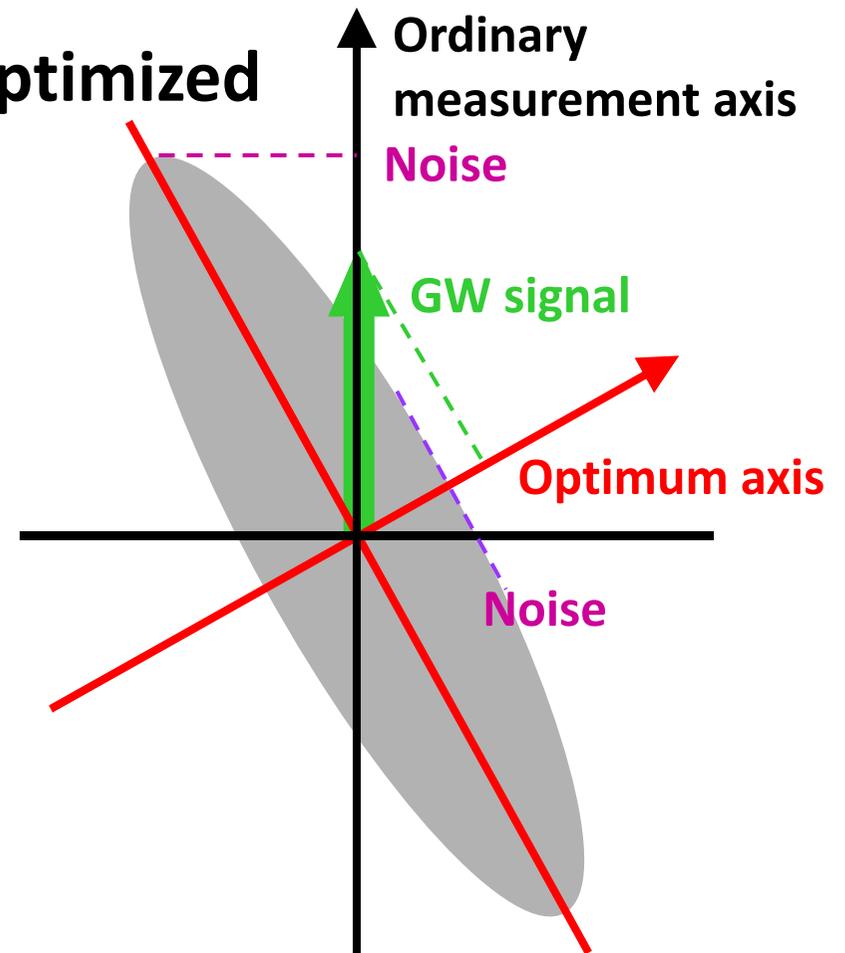
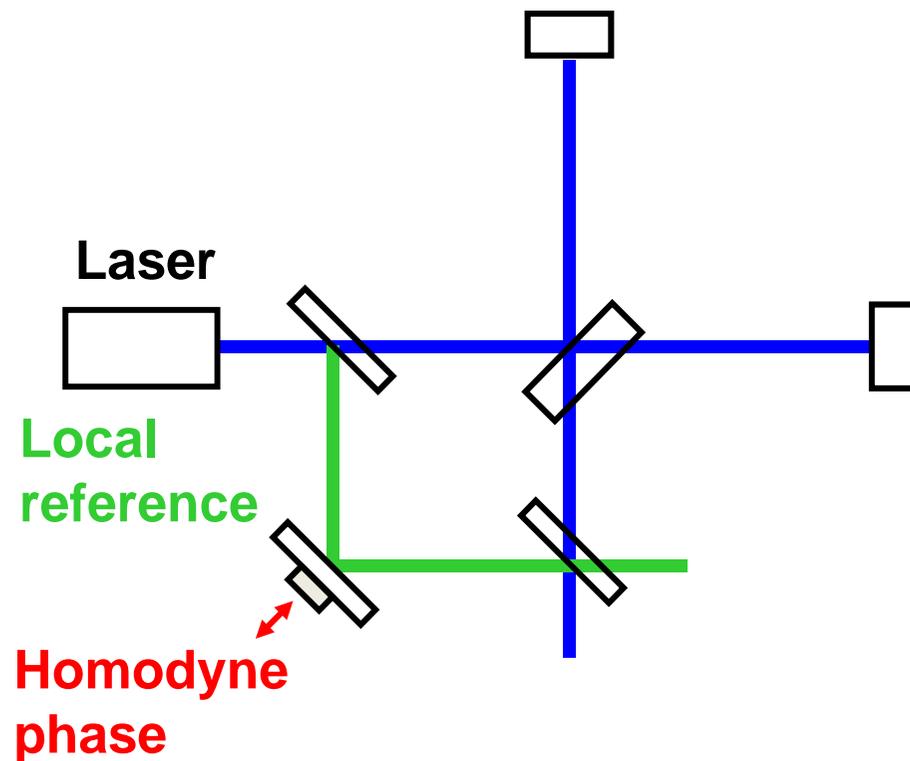
**Can be Cancelled out with  
homodyne detection**

Reflected light: (Original amplitude fluctuations)  
+ (Phase fluctuations caused by the original amplitude fluctuation)  
+ (Original phase fluctuations)



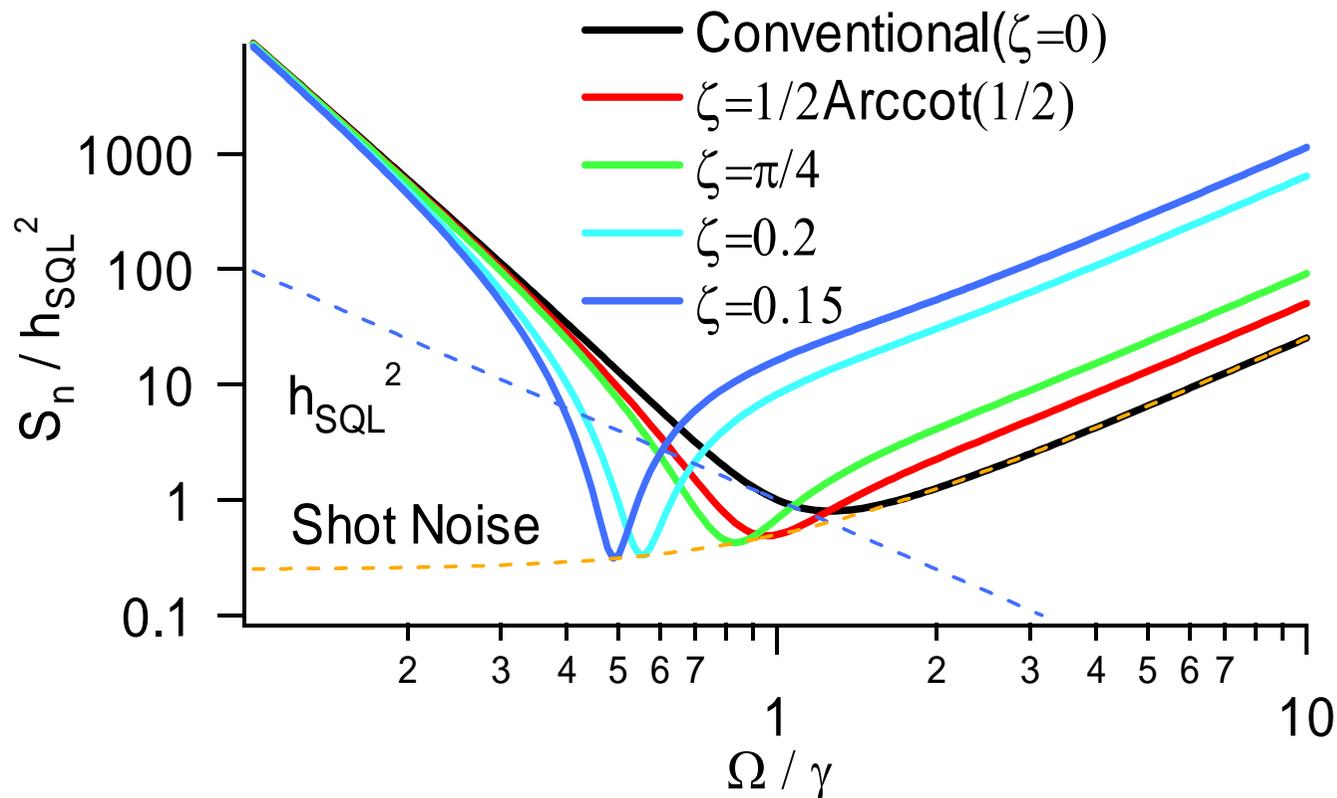
# Homodyne detection

- Picked-off light can be used as a reference beam
- Homodyne phase should be optimized



# Quantum noise

- Radiation pressure noise can be cancelled at narrow band
- The frequency can be chosen by adjusting the homodyne phase
- Can even beat the standard quantum limit



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

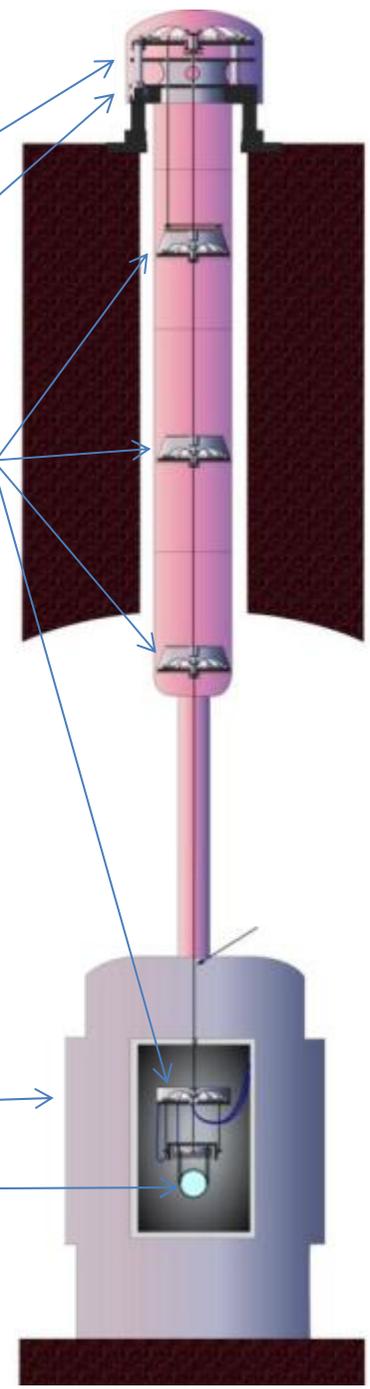
鏡の振動

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



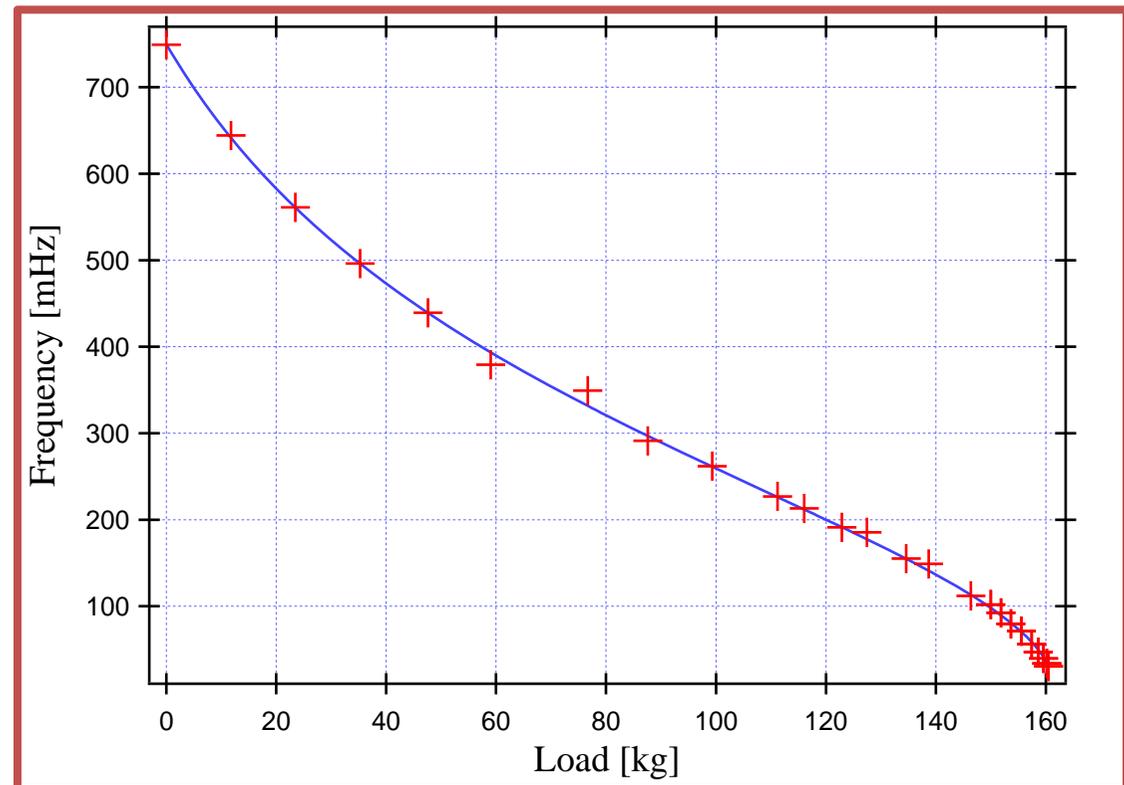
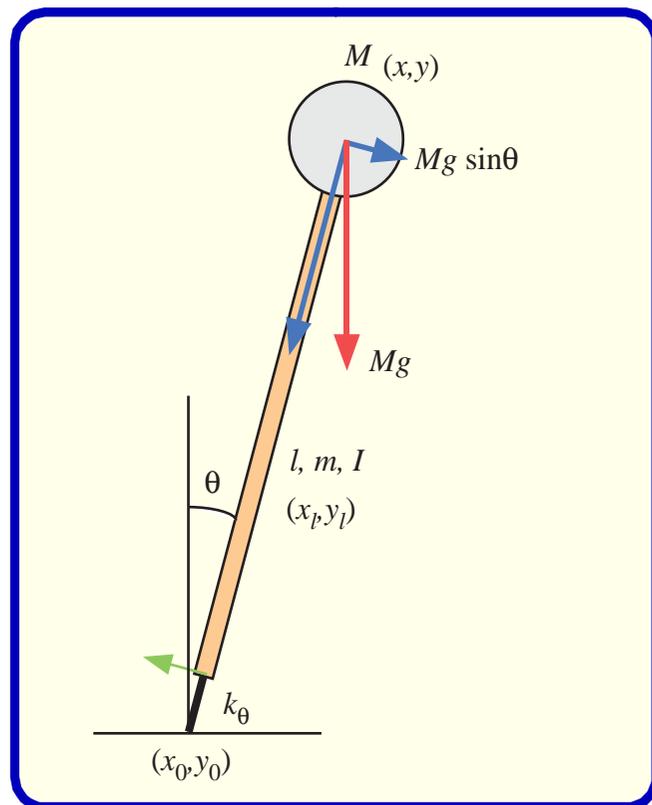
$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

@10 Hz



# 倒立振り子

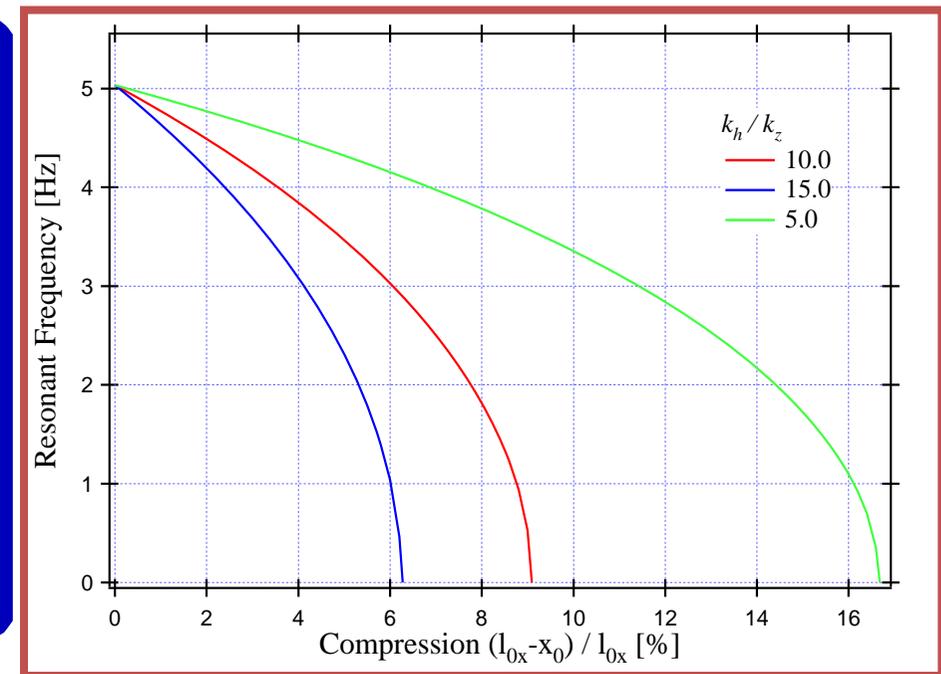
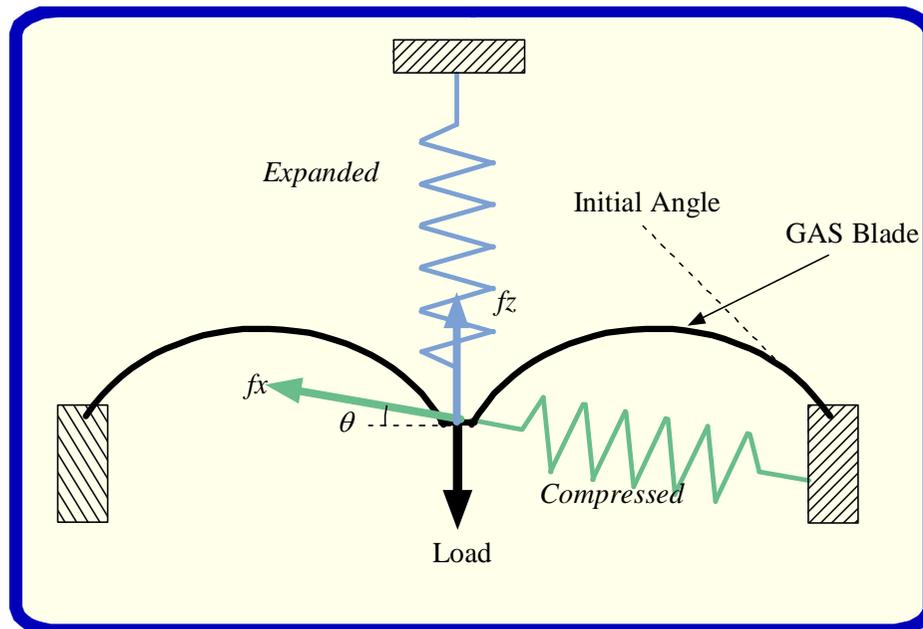
復元力= 金属のバネ力+ 重力の反バネ力  
⇒ 共振周波数の低減



# 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**



# LISA

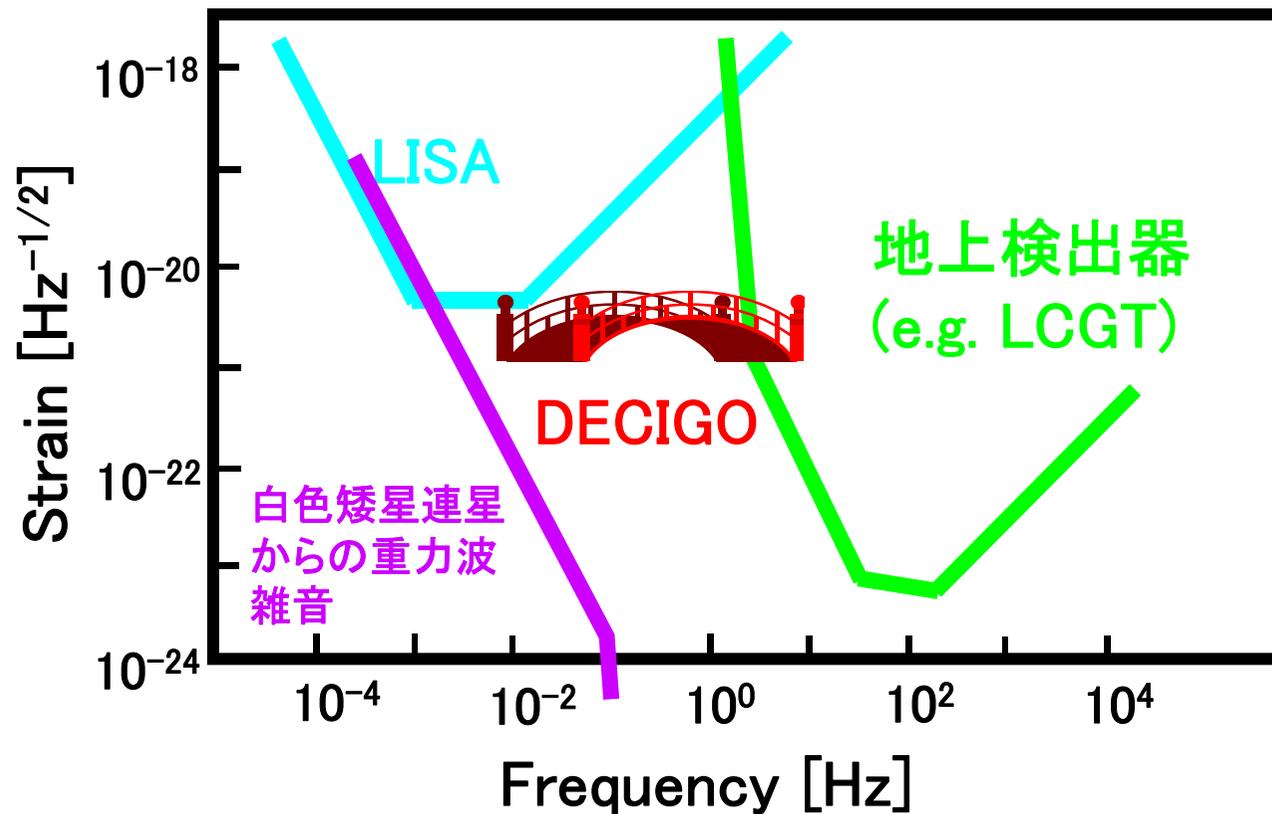
- ESAとNASAの共同計画
- アーム長: 500万km
- 帯域: 0.3 mHz – 30 mHz
- 目的:
  - 巨大ブラックホールの合体(本命)
  - 銀河内白色矮星連星からの重力波(保険)



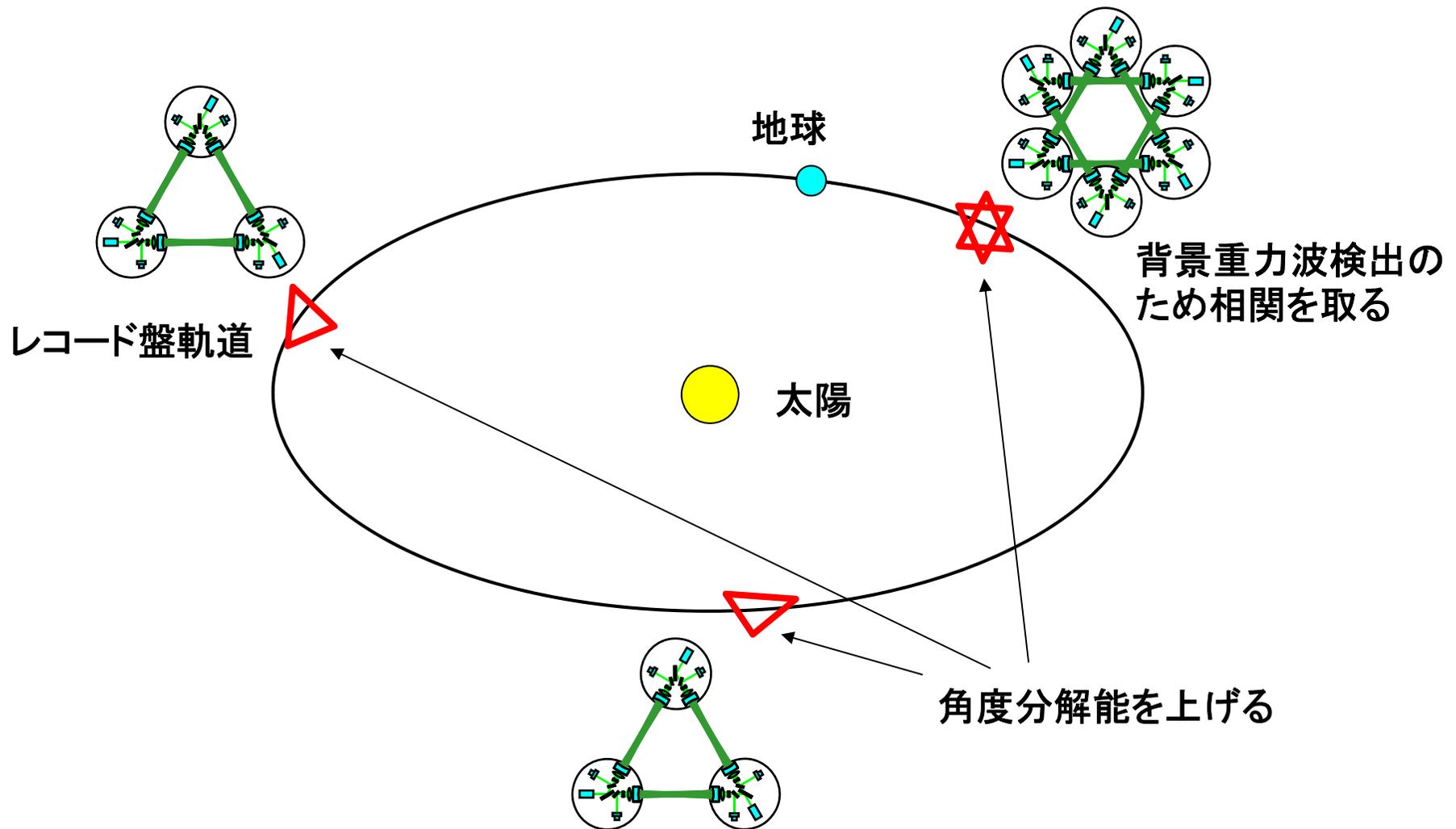
# DECIGOとは？

*Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory*

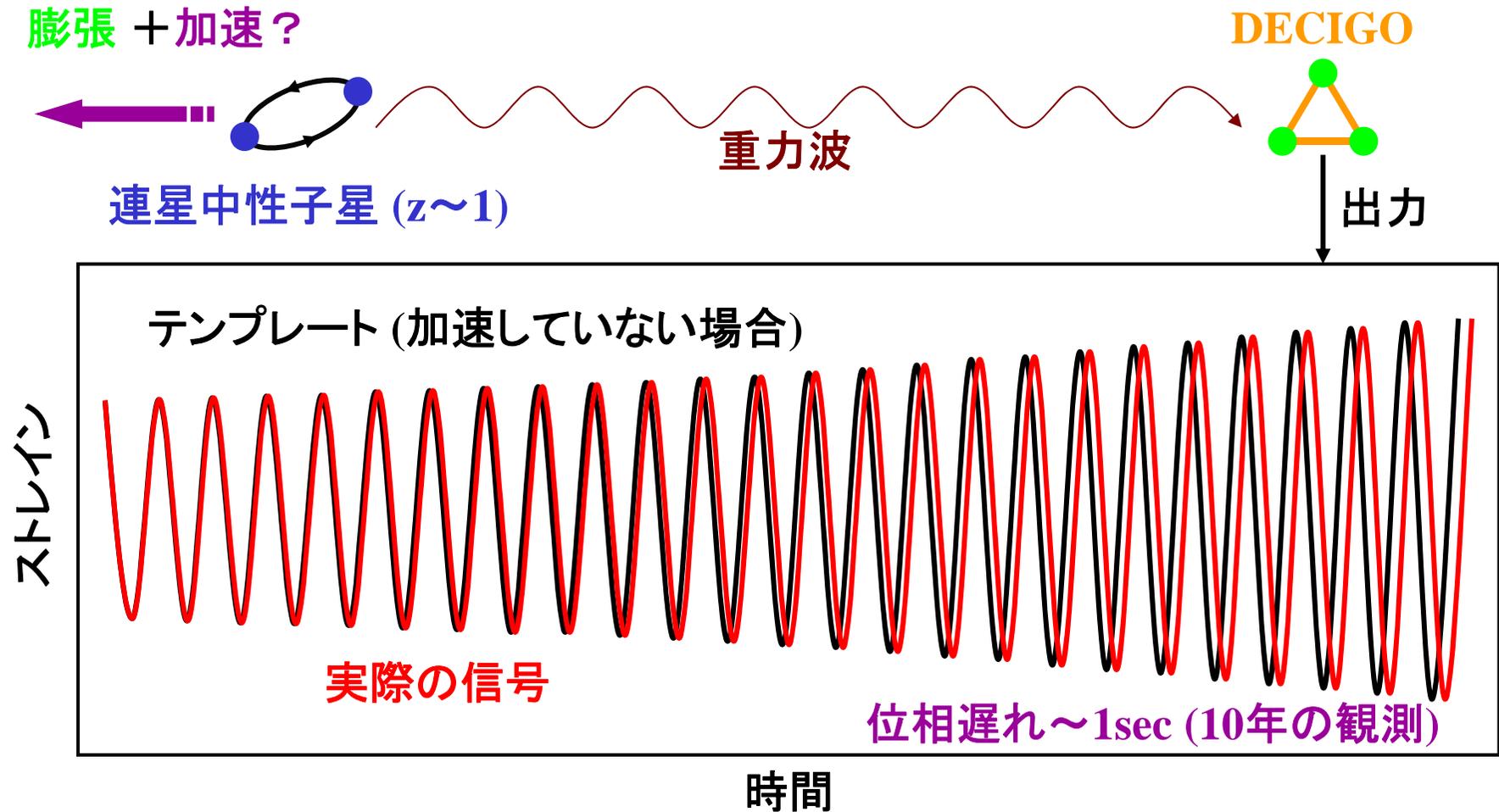
- LISAと地上検出器の帯域のギャップを狙う
- 超高感度の実現が可能！



# 軌道とコンステレーション(案)



# 宇宙の膨張加速度の直接計測



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