

# 最先端研究：重力波天文学



Illustration: Sora

スプリングスクール

JGW-G1604952-v1

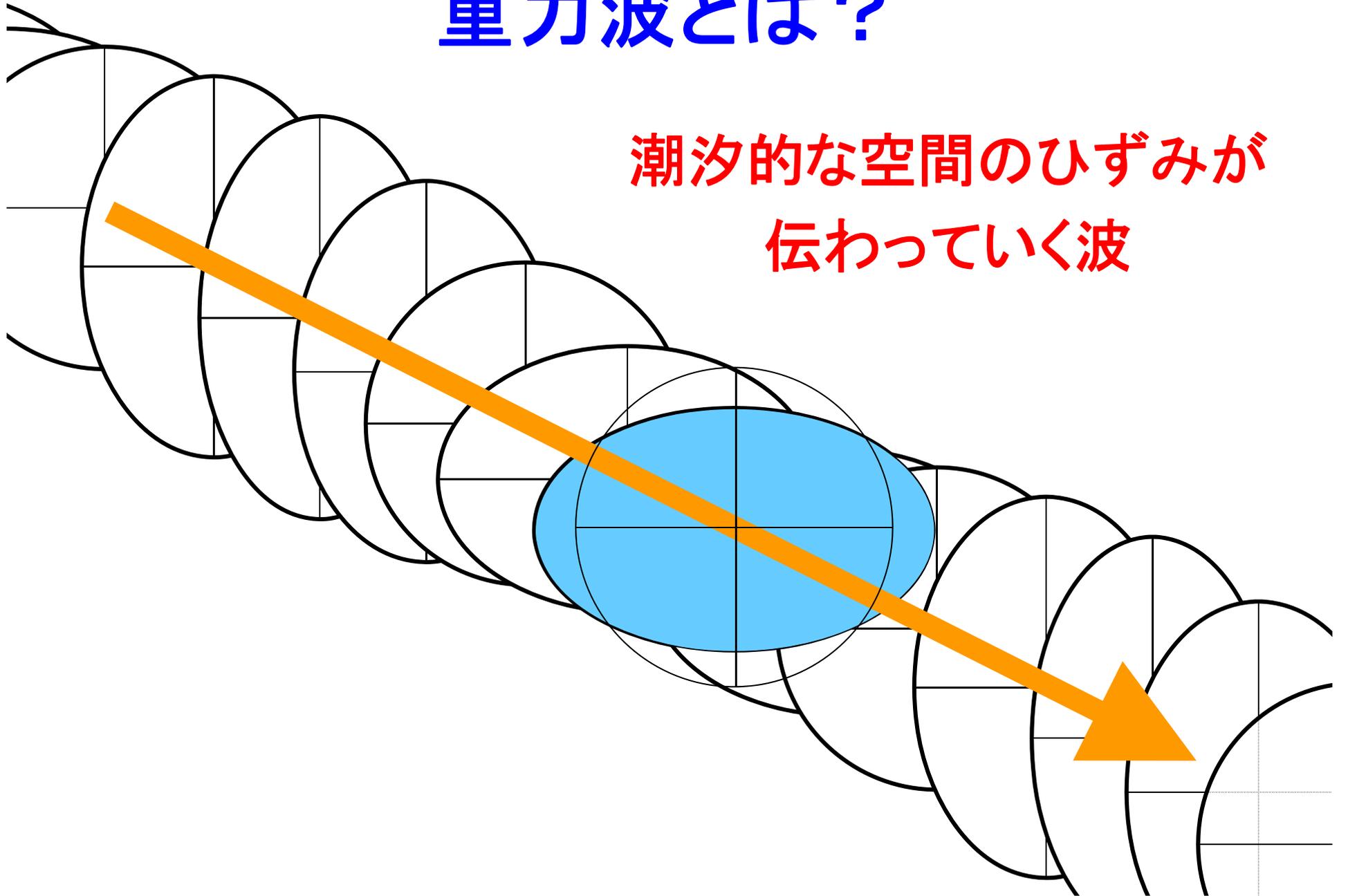
H28. 3. 8 川村静児(東京大学宇宙線研究所)

# 重力波初検出！



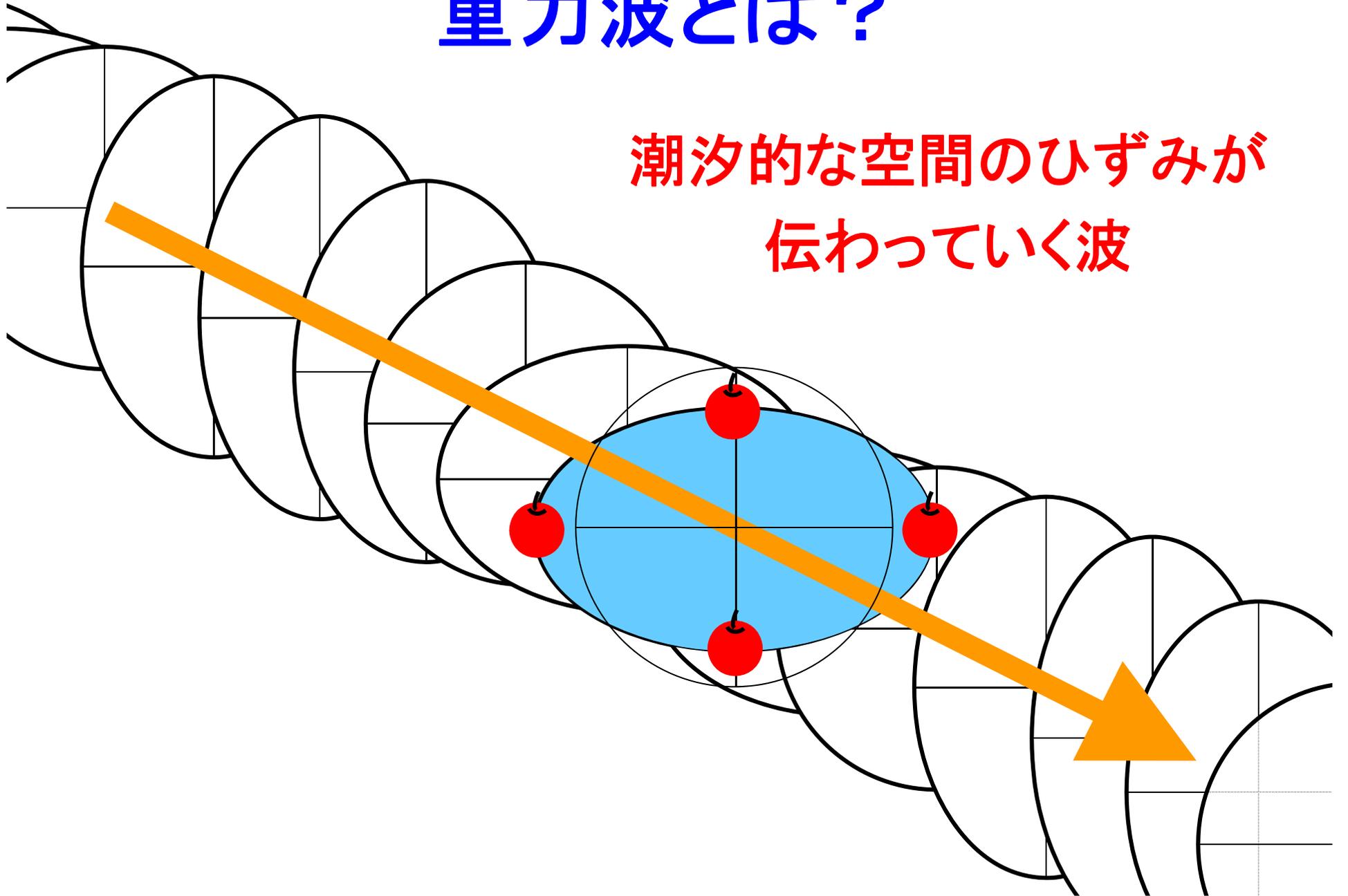
# 重力波とは？

潮汐的な空間のひずみが  
伝わっていく波



# 重力波とは？

潮汐的な空間のひずみが  
伝わっていく波



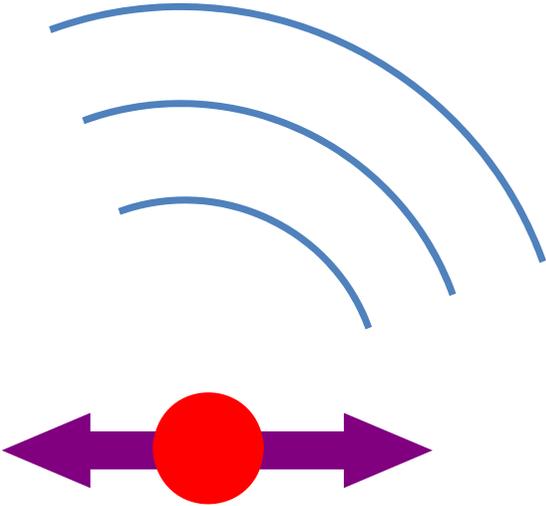
# 重力波のプロファイル

- アインシュタインが一般相対性理論で導出
- 真空中でも伝わる
- 何でもすり抜ける
- つい最近初めて検出された
- 光速で伝わる



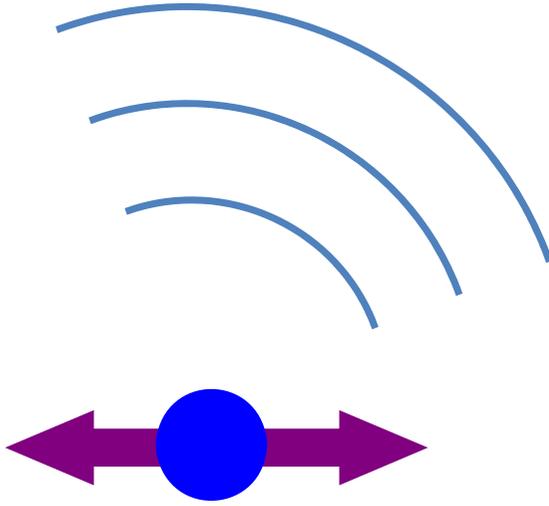
# 重力波は何から出るのか？

電磁波



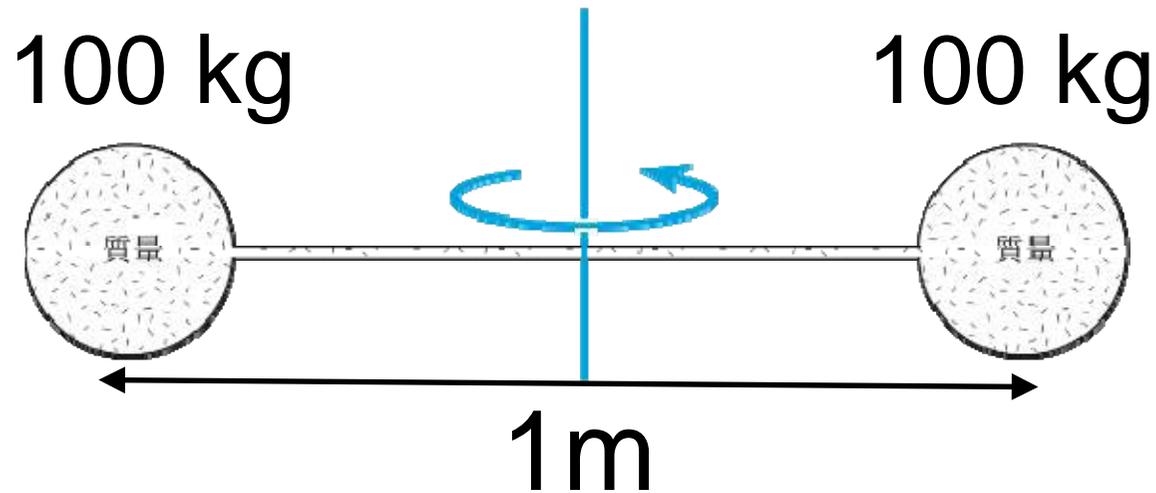
電荷

重力波



質量

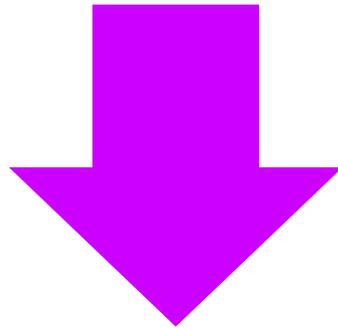
# 人工的に重力波を生成



1000回転/秒

空間のひずみ $\sim 10^{-40}$

**重いものが速く動くほど  
重力波がいっぱい出る！**



~~人工的~~

**天体現象**

# 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

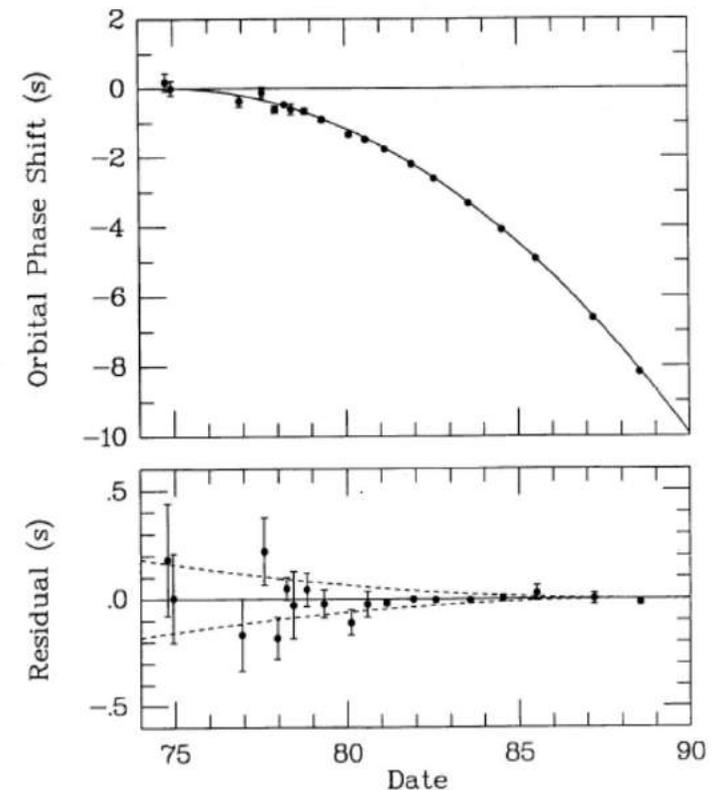
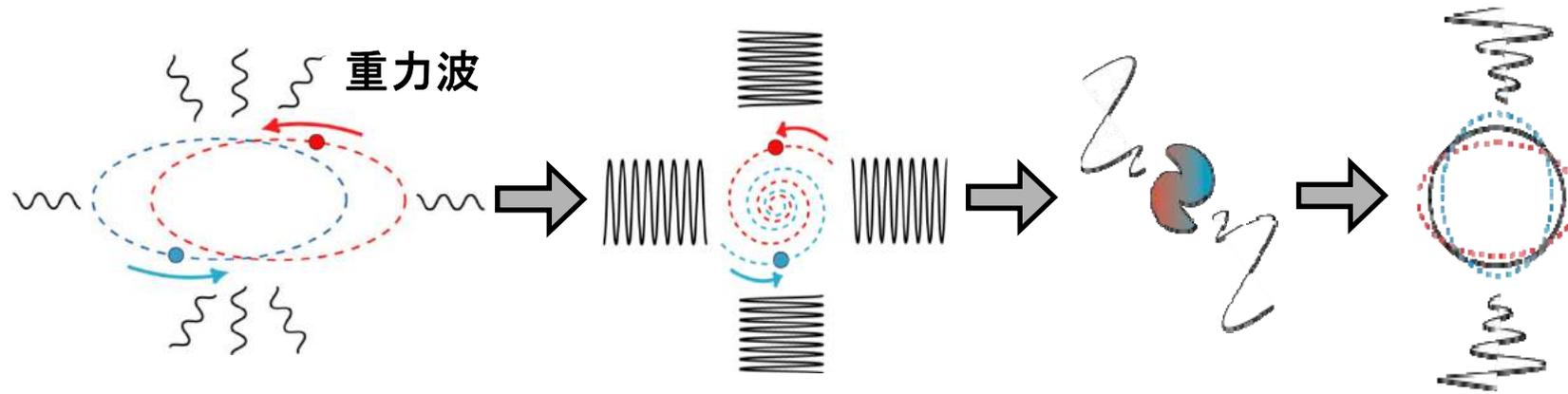


FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves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

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

# 中性子星連星の合体

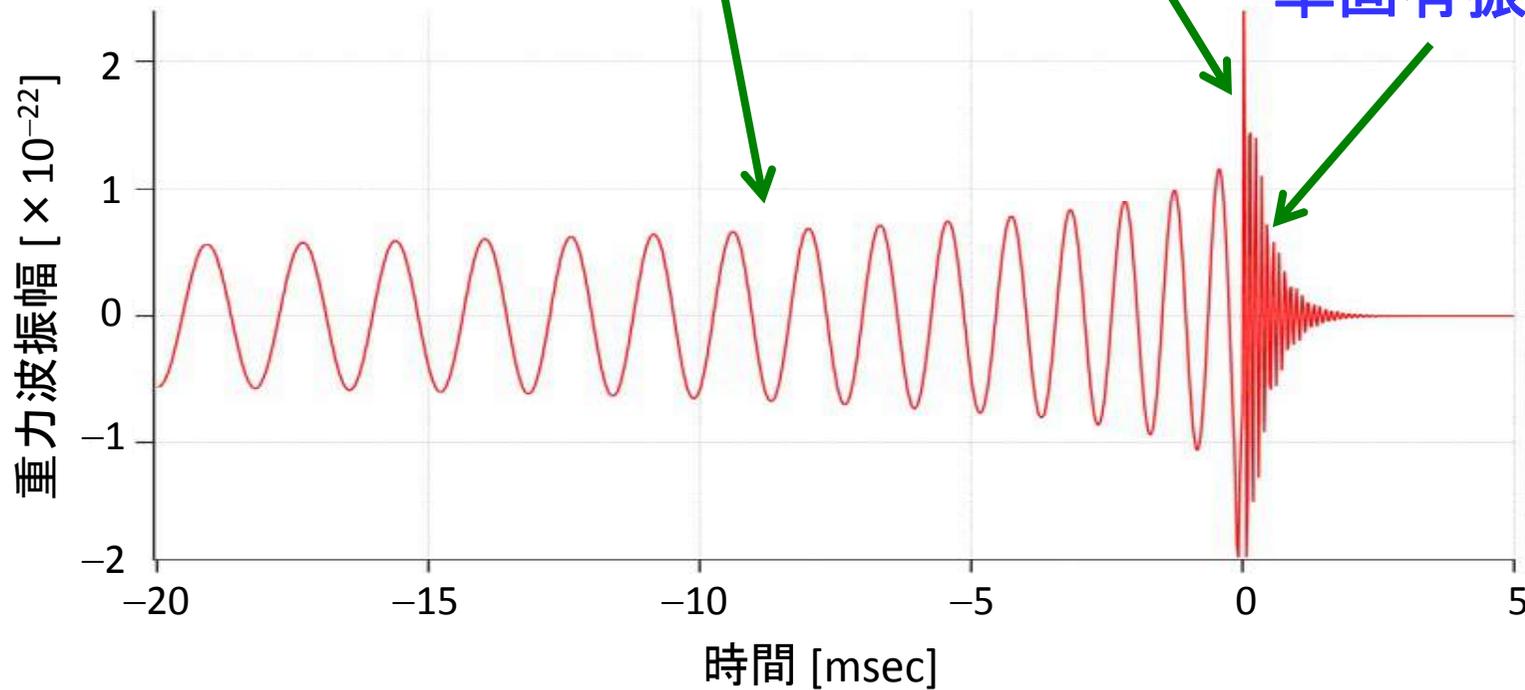


公転運動

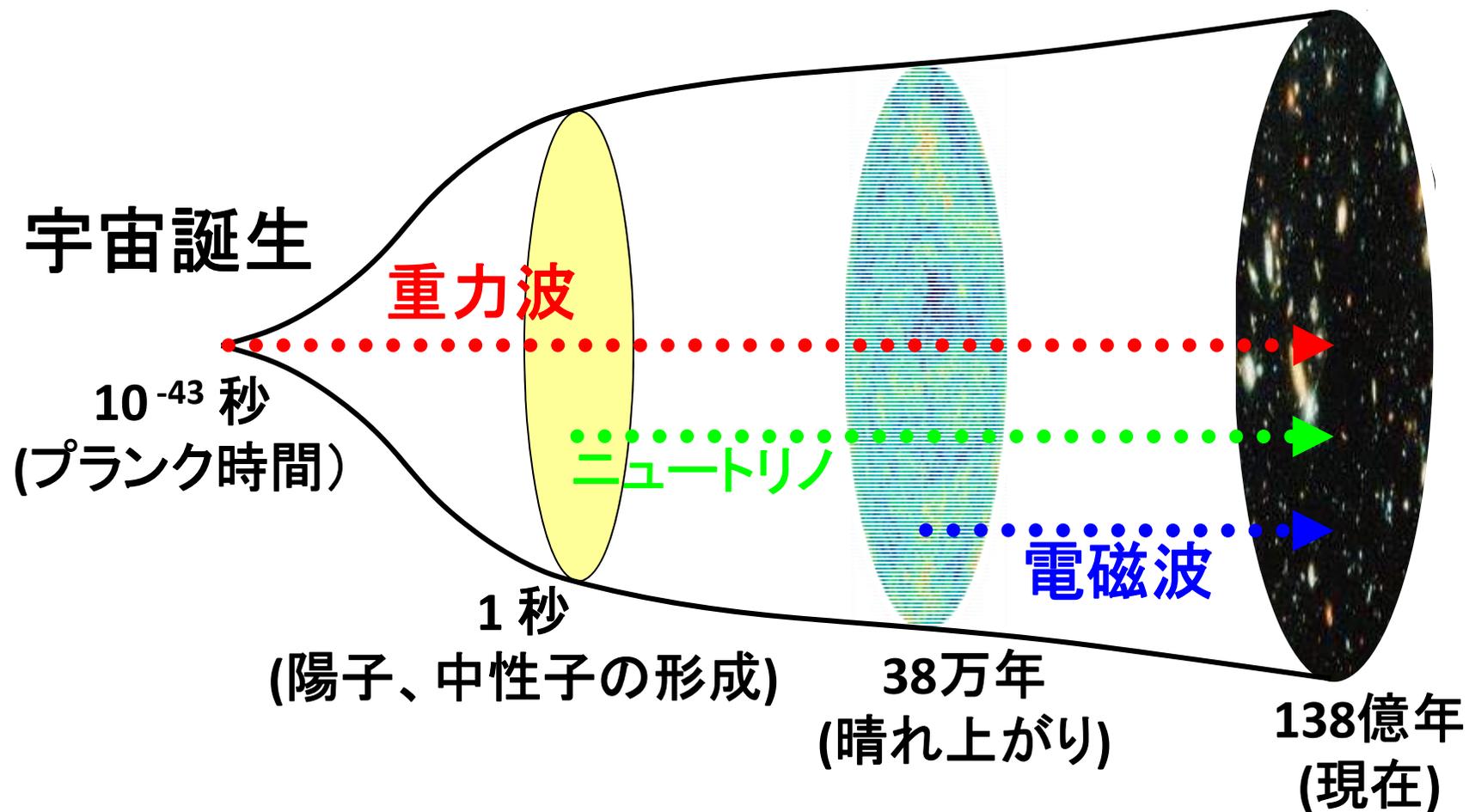
インスパイラル

合体

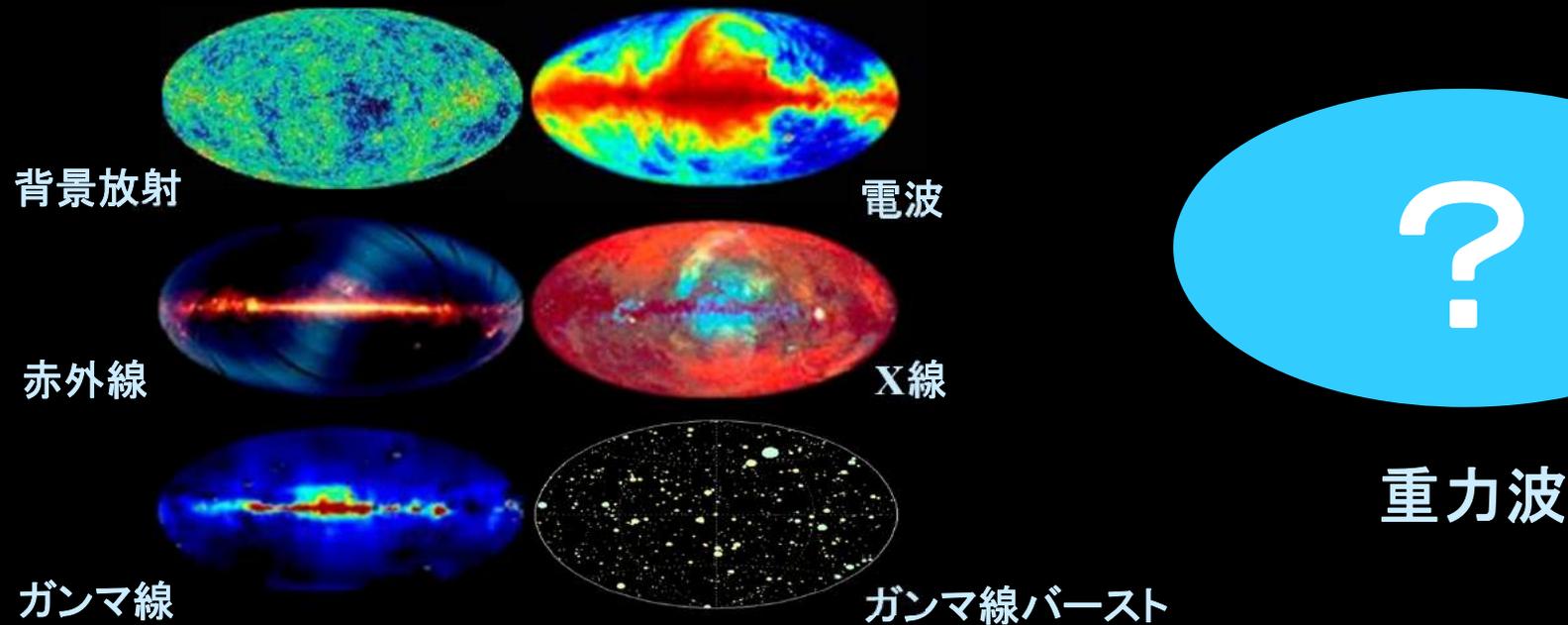
ブラックホールの  
準固有振動



# 重力波で宇宙の始まりを観る！



# 重力波天文学

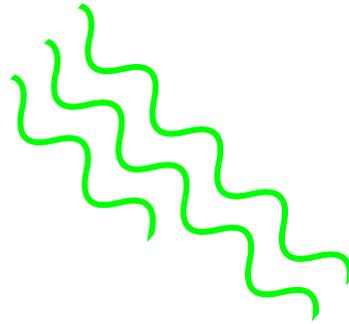


重力波によって想像を絶するような、新しい天体が見つかることも期待できる

# 余剰次元



何か小さいな？

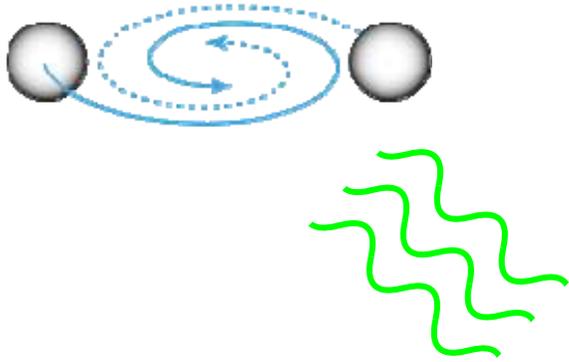


余剰次元にしみ出す？

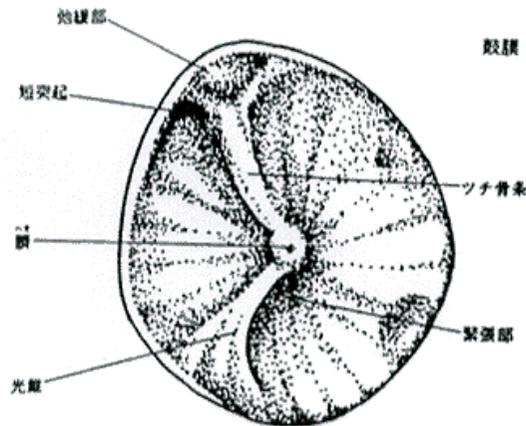
超ひも理論により予言される  
余剰次元の存在の検証？



# 重力波は聞こえるはず？

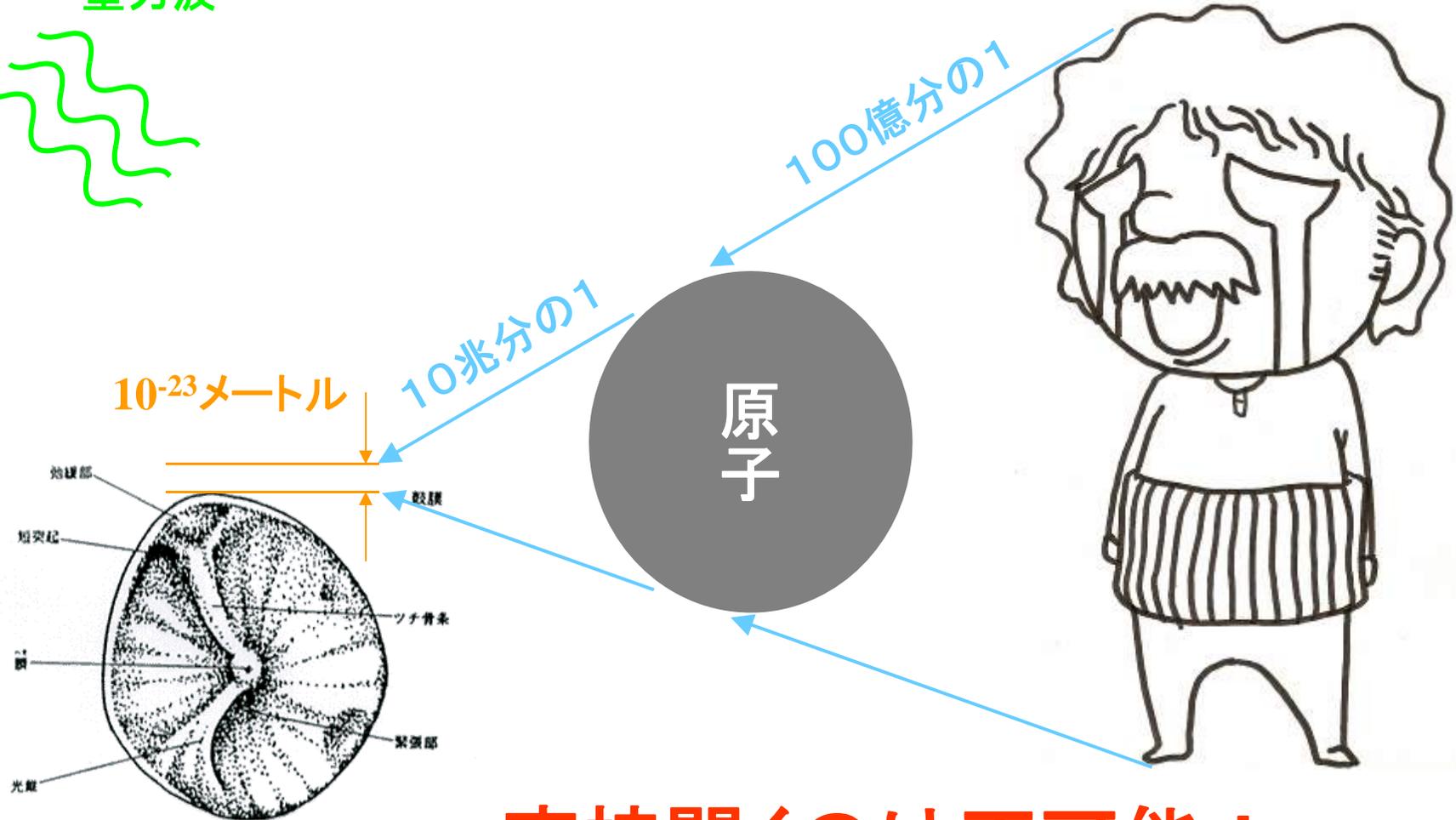
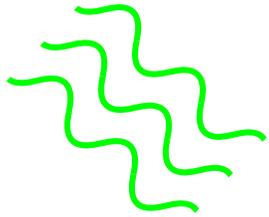


鼓膜



# しかしその振動は・・・

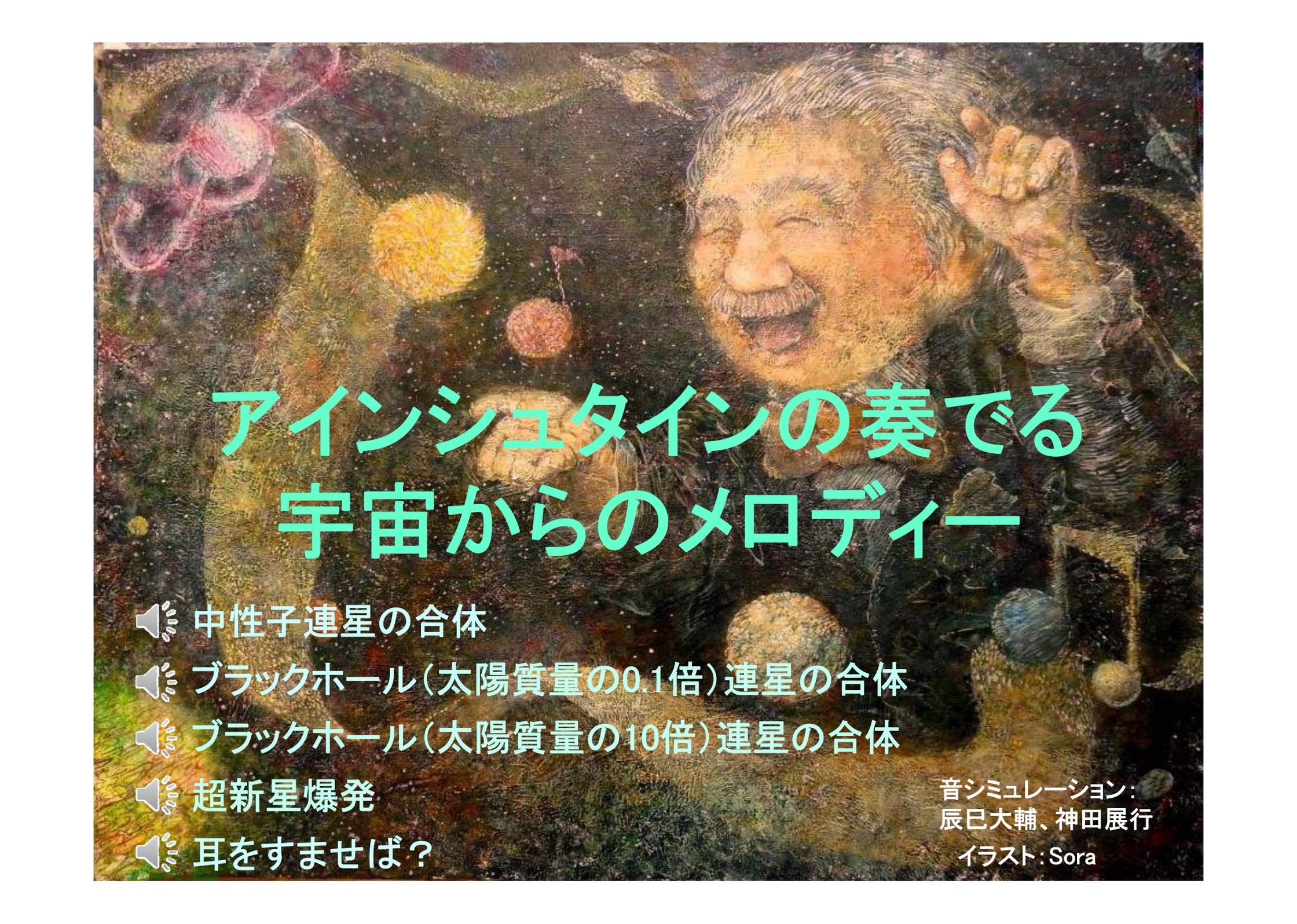
重力波



直接聞くのは不可能！

# 超高感度の補聴器



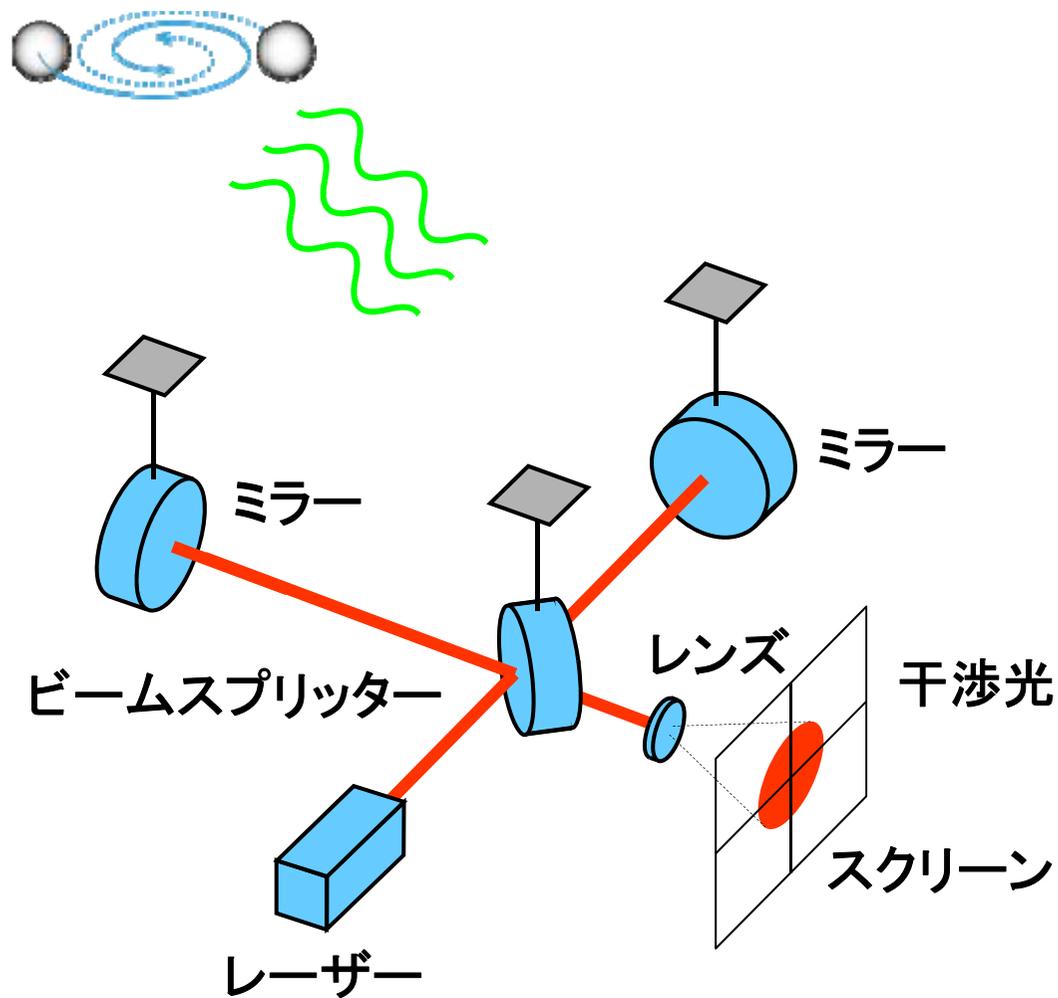


# アインシュタインの奏でる 宇宙からのメロディー

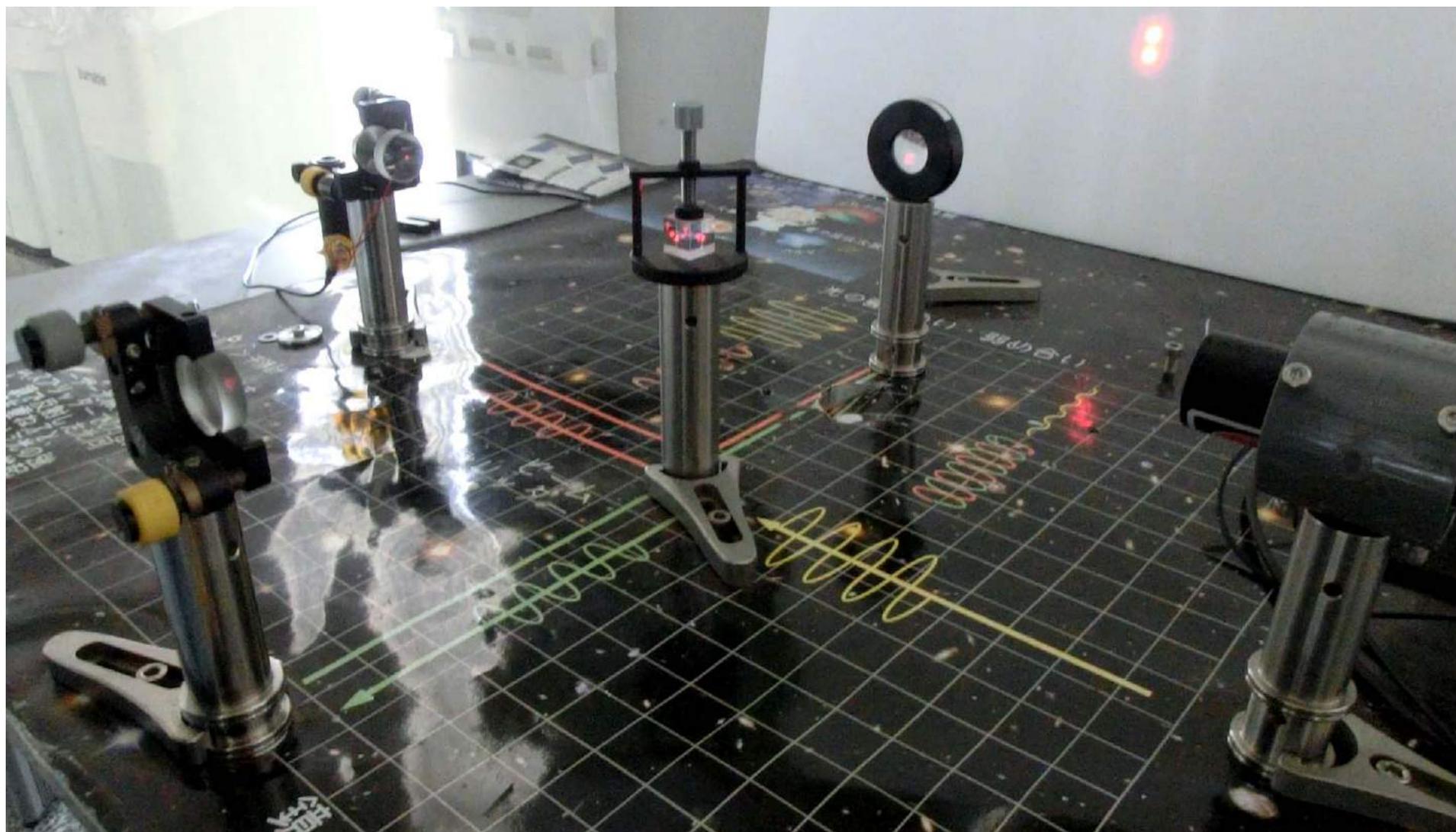
- 🔊 中性子連星の合体
- 🔊 ブラックホール(太陽質量の0.1倍)連星の合体
- 🔊 ブラックホール(太陽質量の10倍)連星の合体
- 🔊 超新星爆発
- 🔊 耳をすませば？

音シミュレーション：  
辰巳大輔、神田展行  
イラスト：Sora

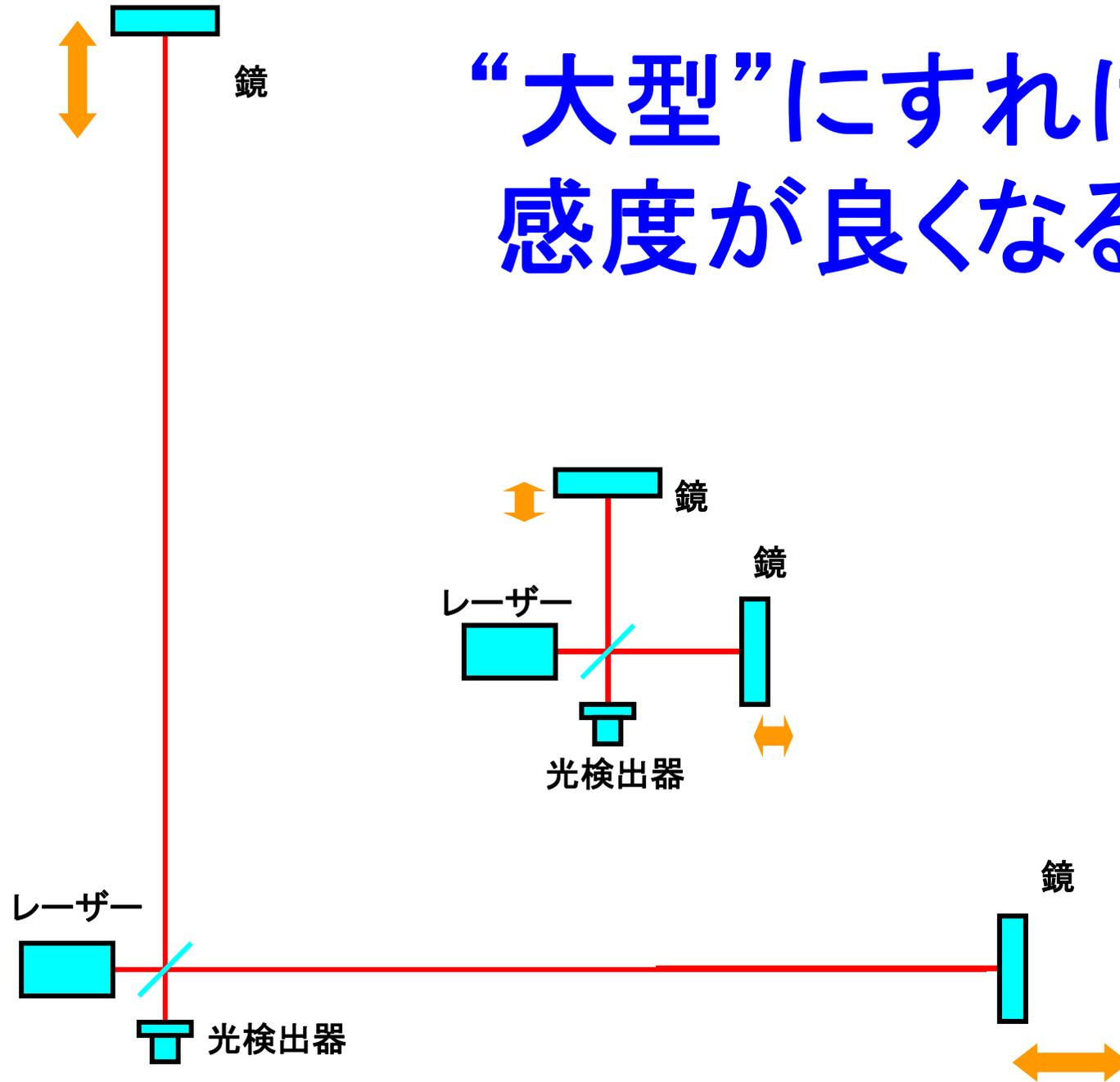
# レーザー干渉計による 重力波検出の原理



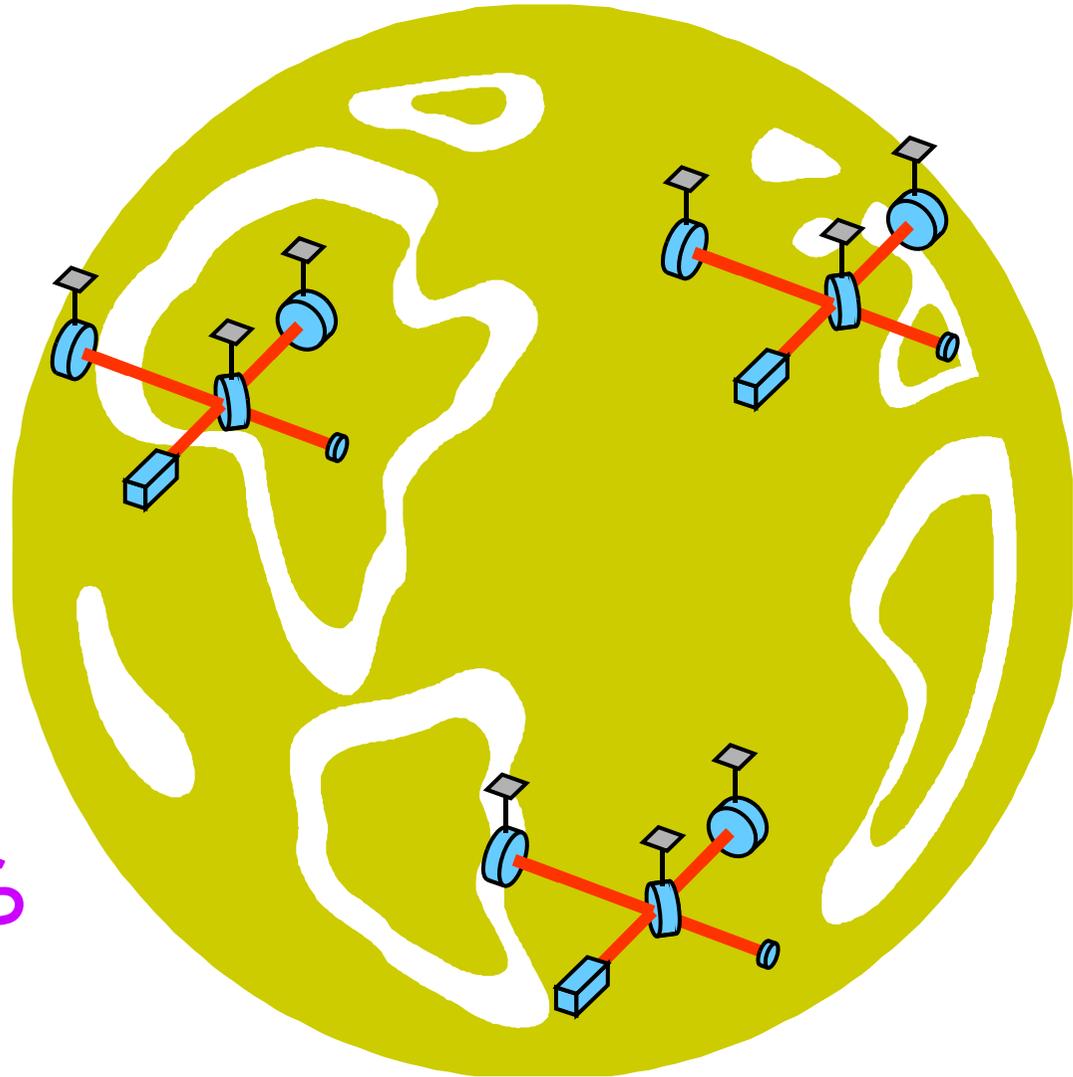
# レーザー干渉計(動画)



“大型”にすれば  
感度が良くなる

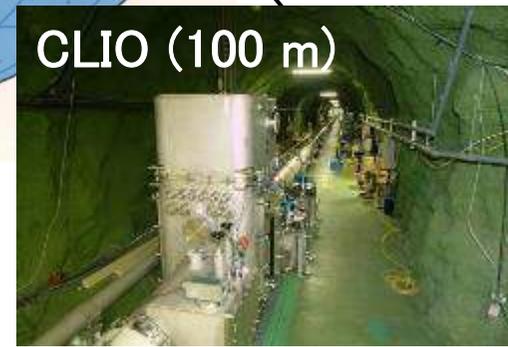


# 重力波源の方向は？

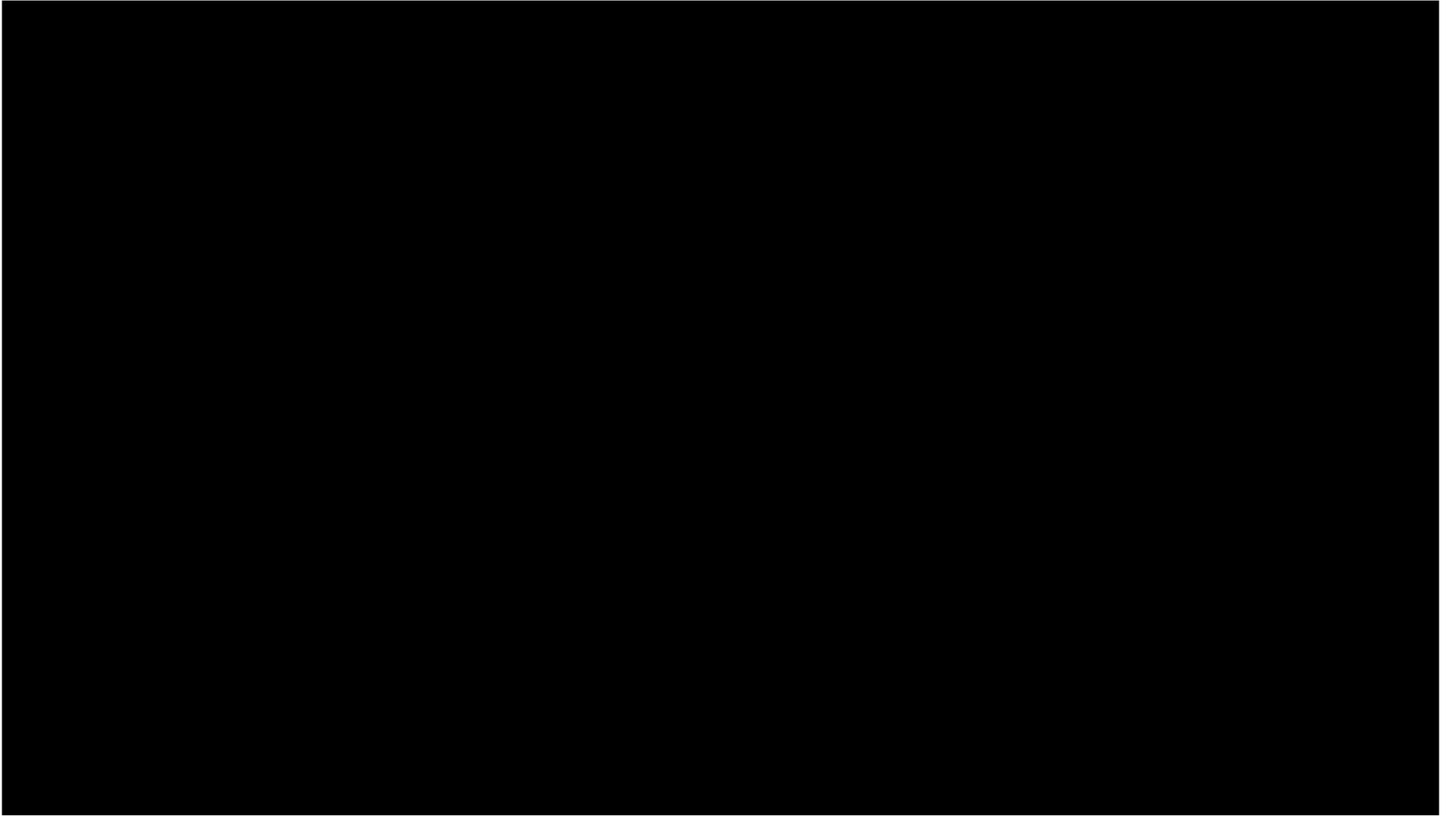


信号の時間差から  
方向が分かる！

# 世界の大型干渉計

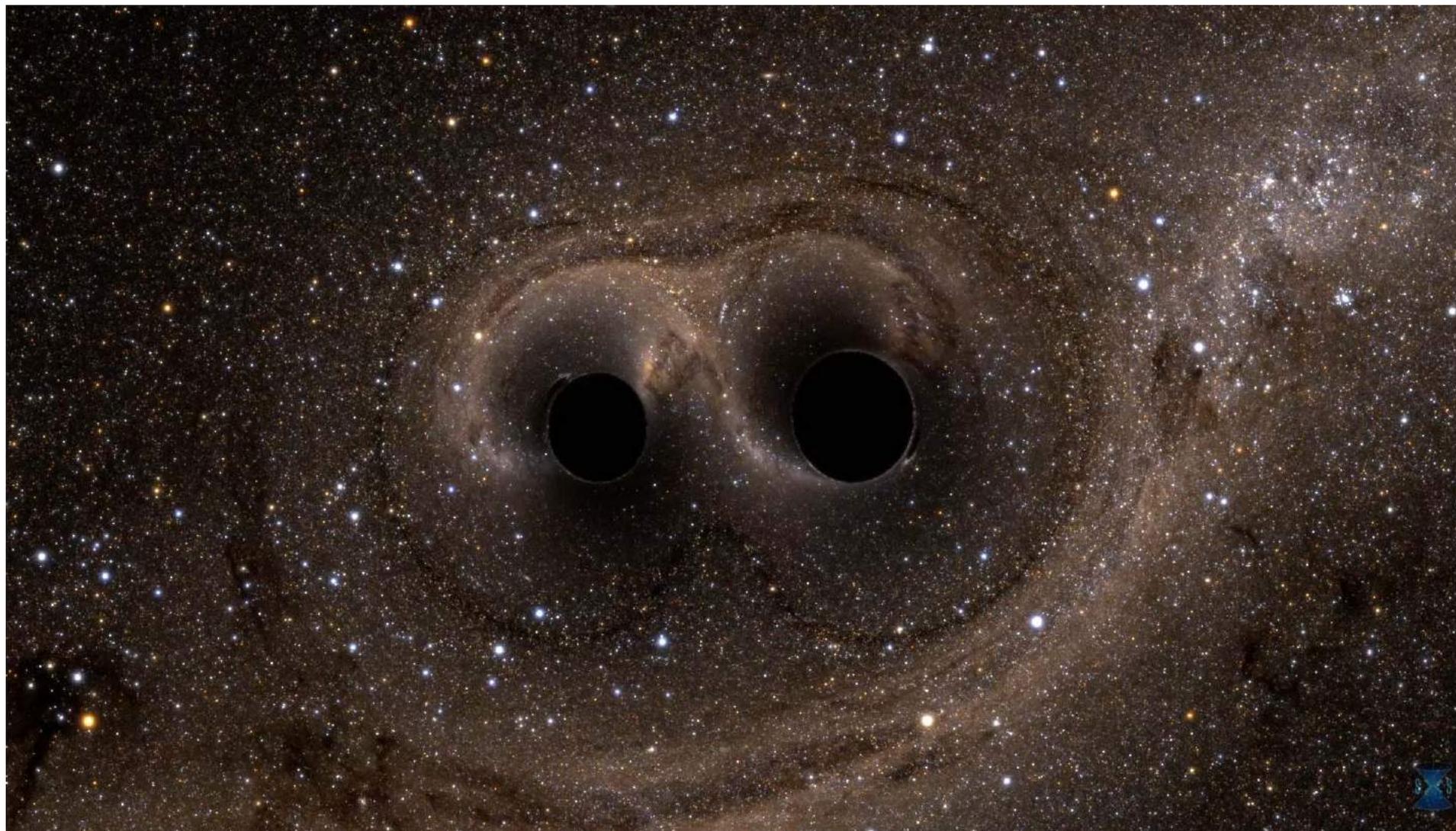


# LIGO



LIGO

# 重力波初検出！



# ブラックホール連星の合体

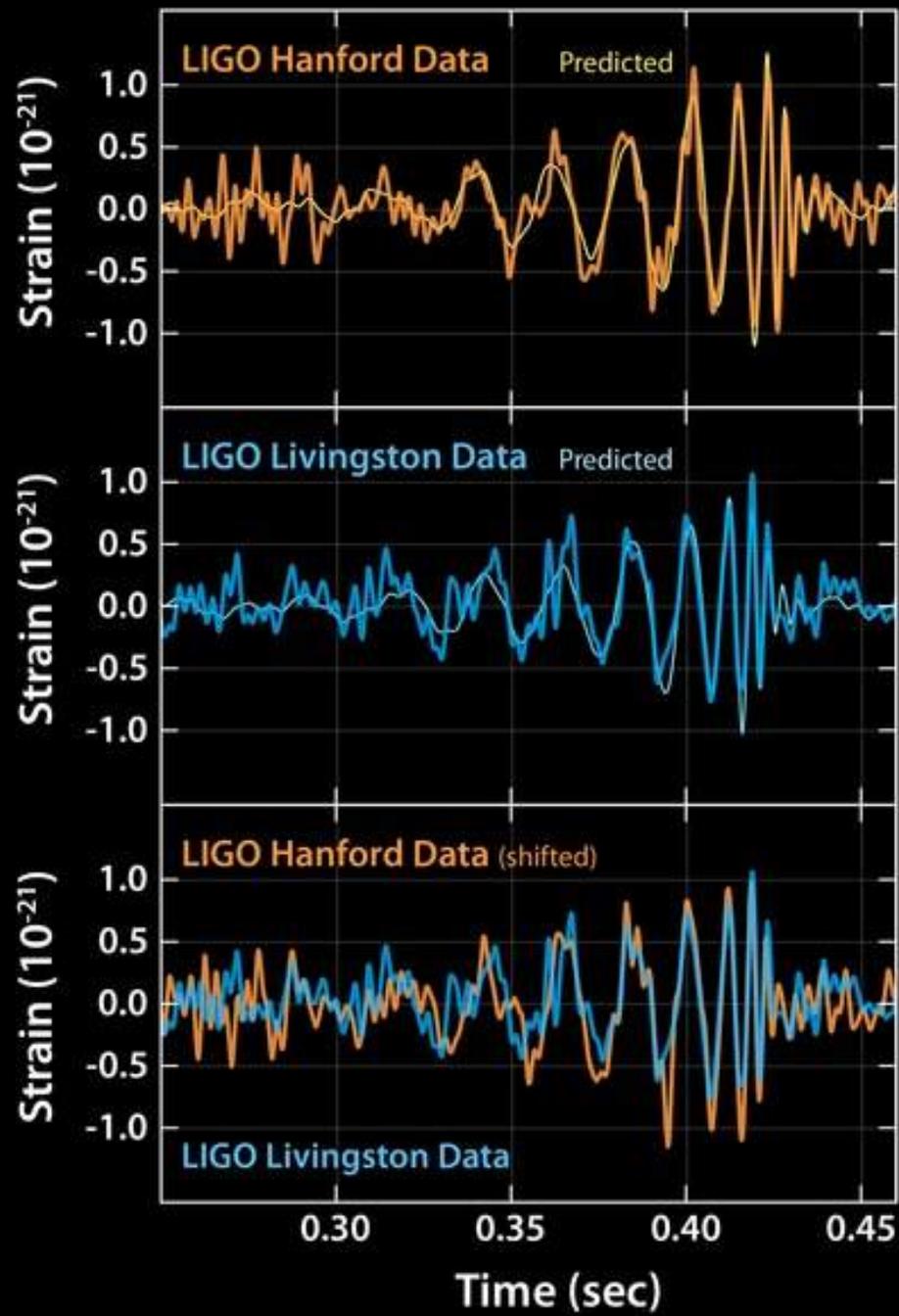
13億光年遠方



SXS

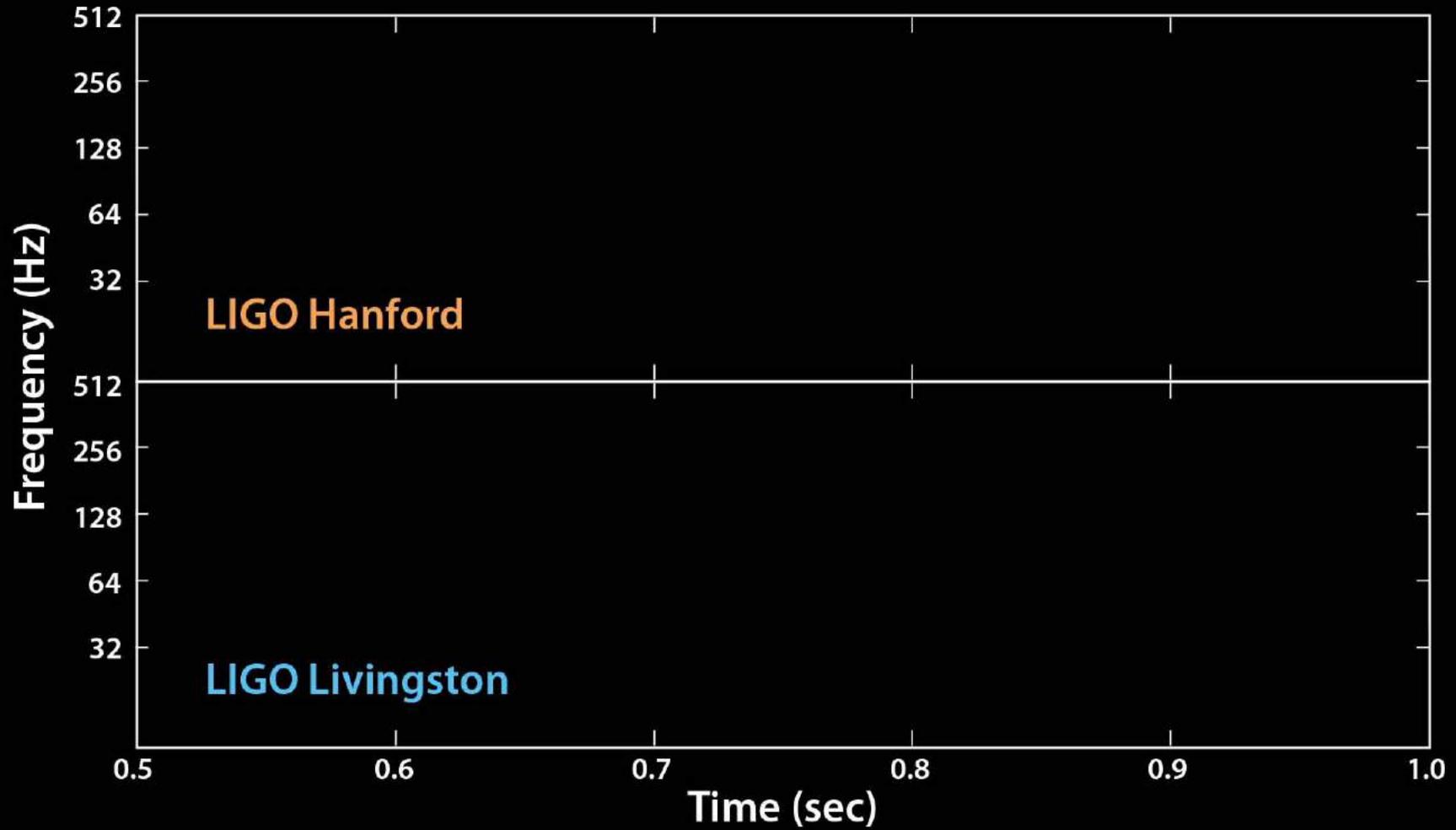
合体後のブラックホール: 太陽質量の62倍

⇒ 太陽3個分の質量が重力波エネルギーとして放出



LIGO

# 重力波初検出！

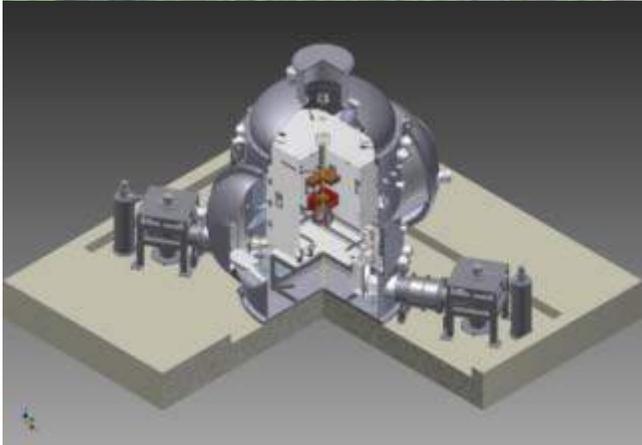


# KAGRA

重力波を検出し  
重力波天文学を創成する



低温鏡



# KAGRAの 特徴

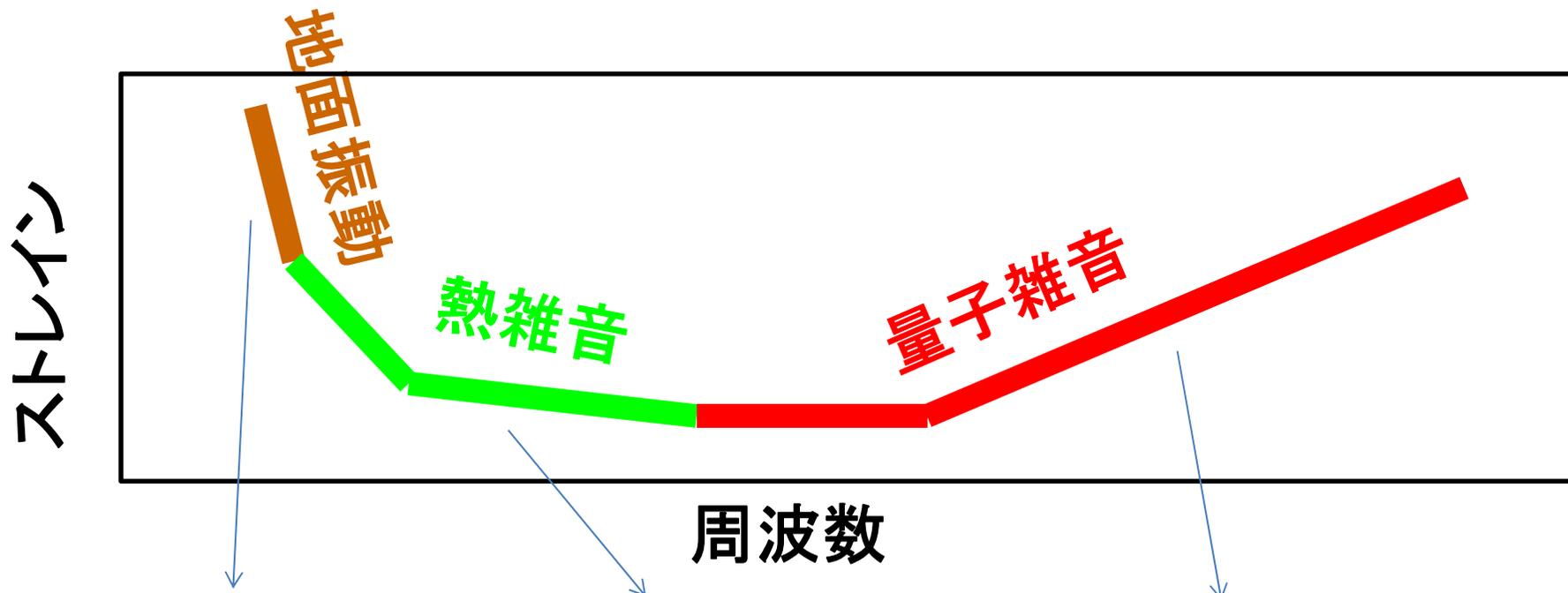
地下設置

第3世代重力波検出器にとって必須の技術

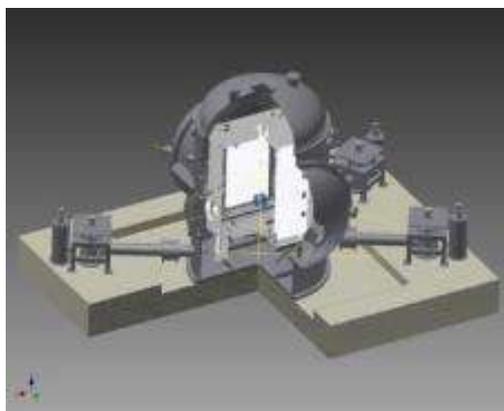




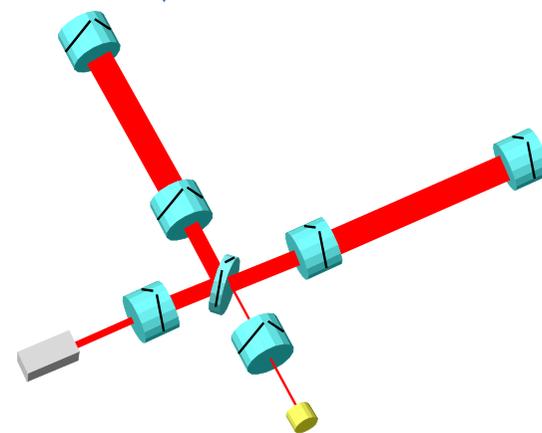
# 雑音対策



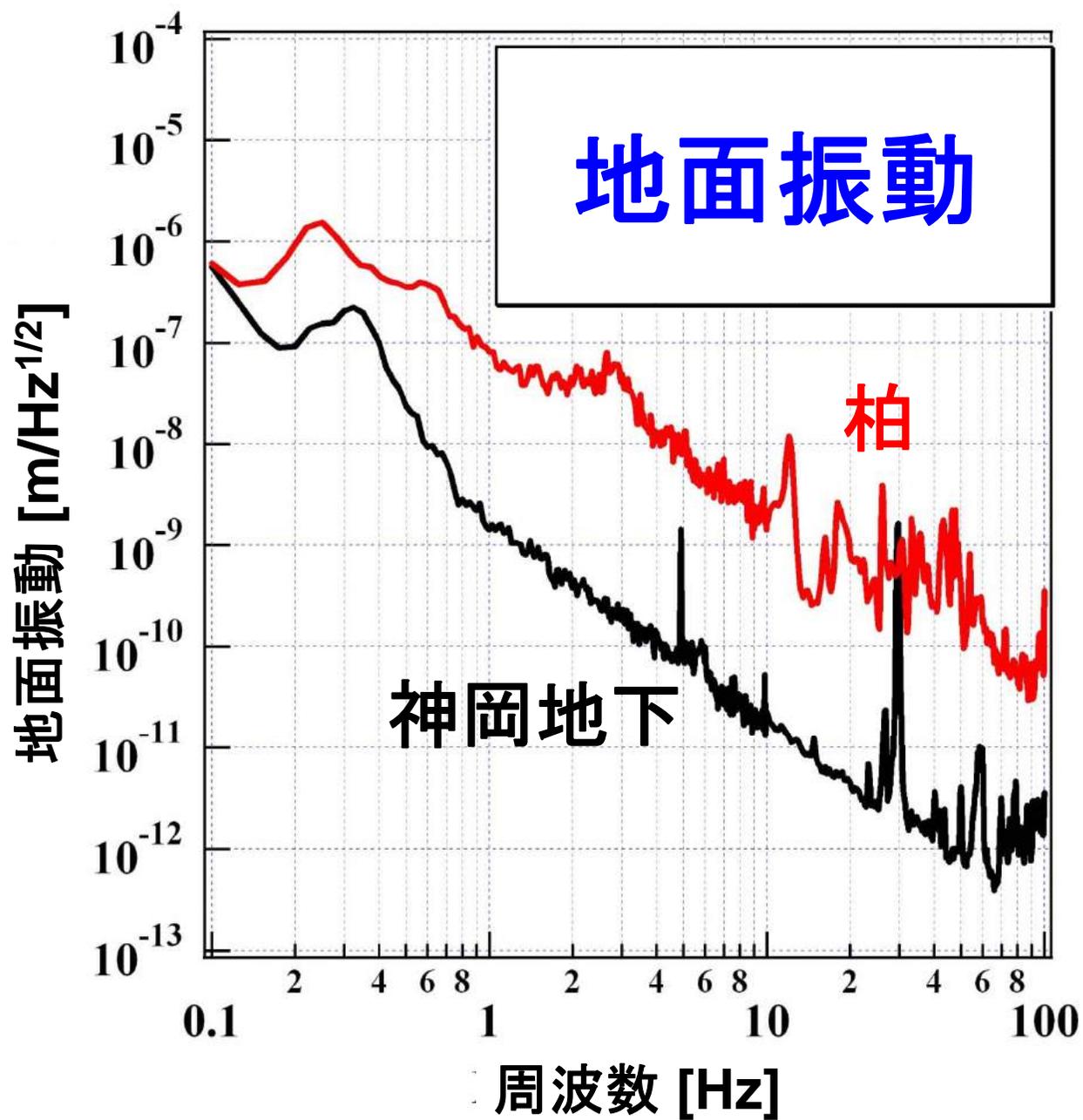
神岡地下



低温ミラー



帯域可変型干渉計



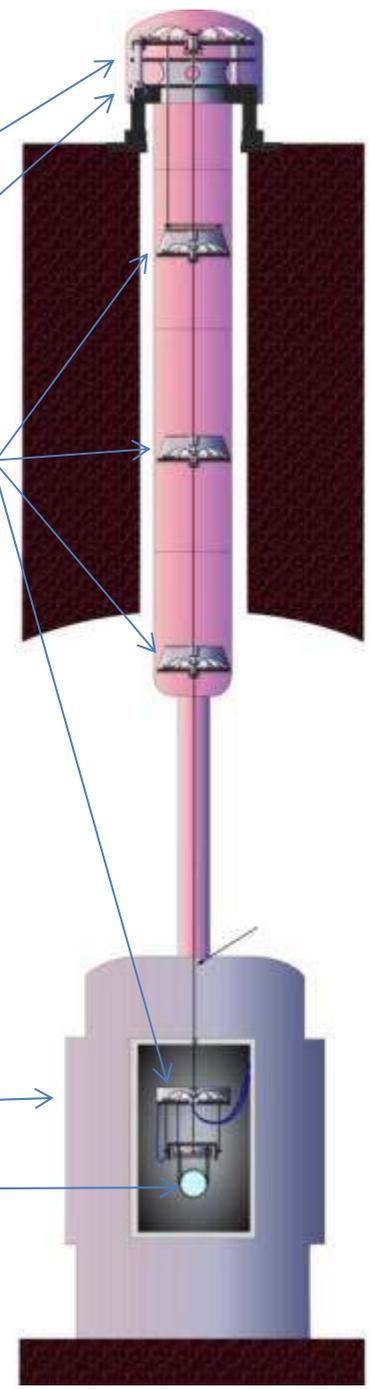
トンネル (2階)

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

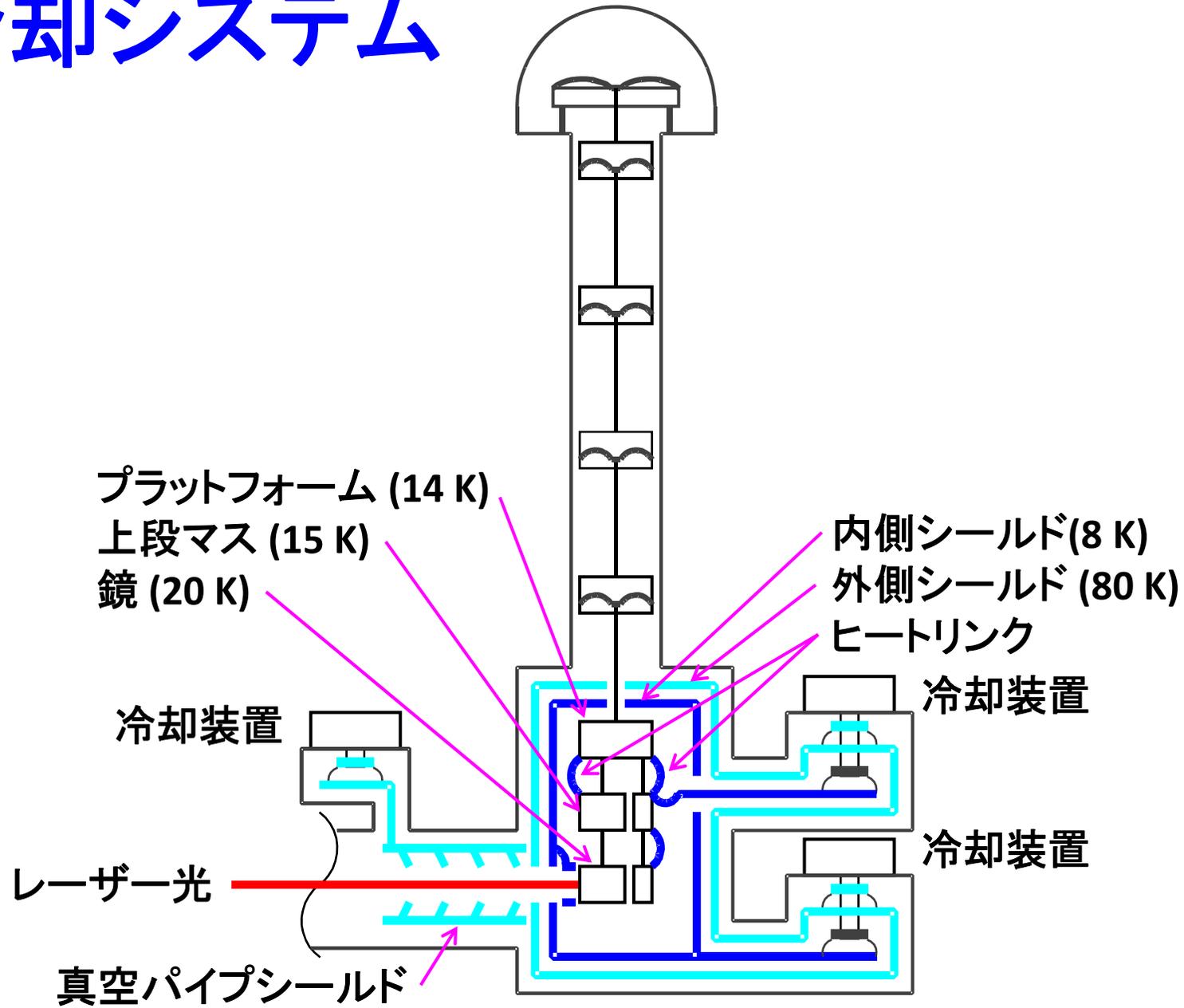
$10^{-11} \text{ mHz}^{-1/2}$



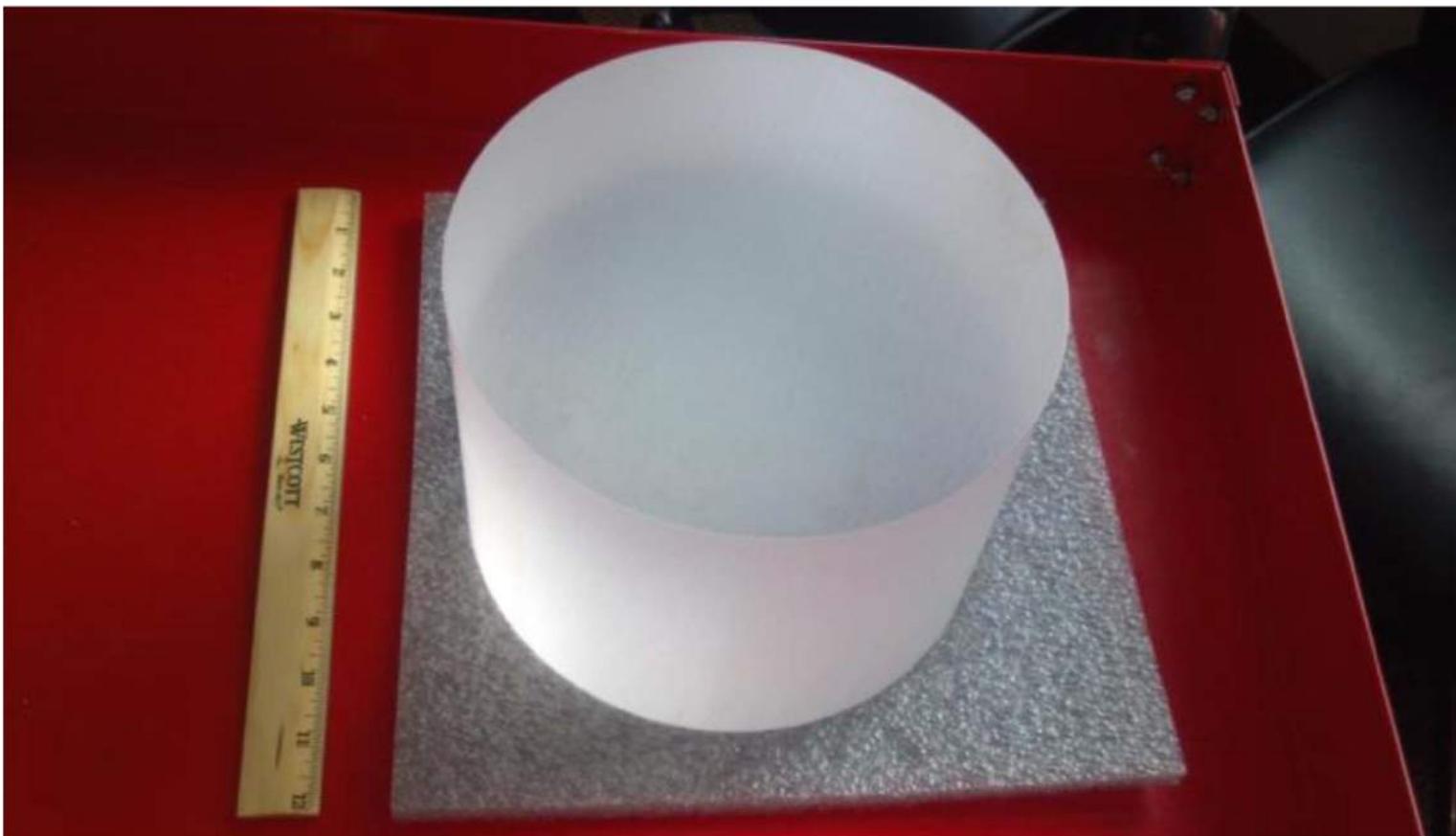
$10^{-18} \text{ mHz}^{-1/2}$

@10 Hz

# 冷却システム

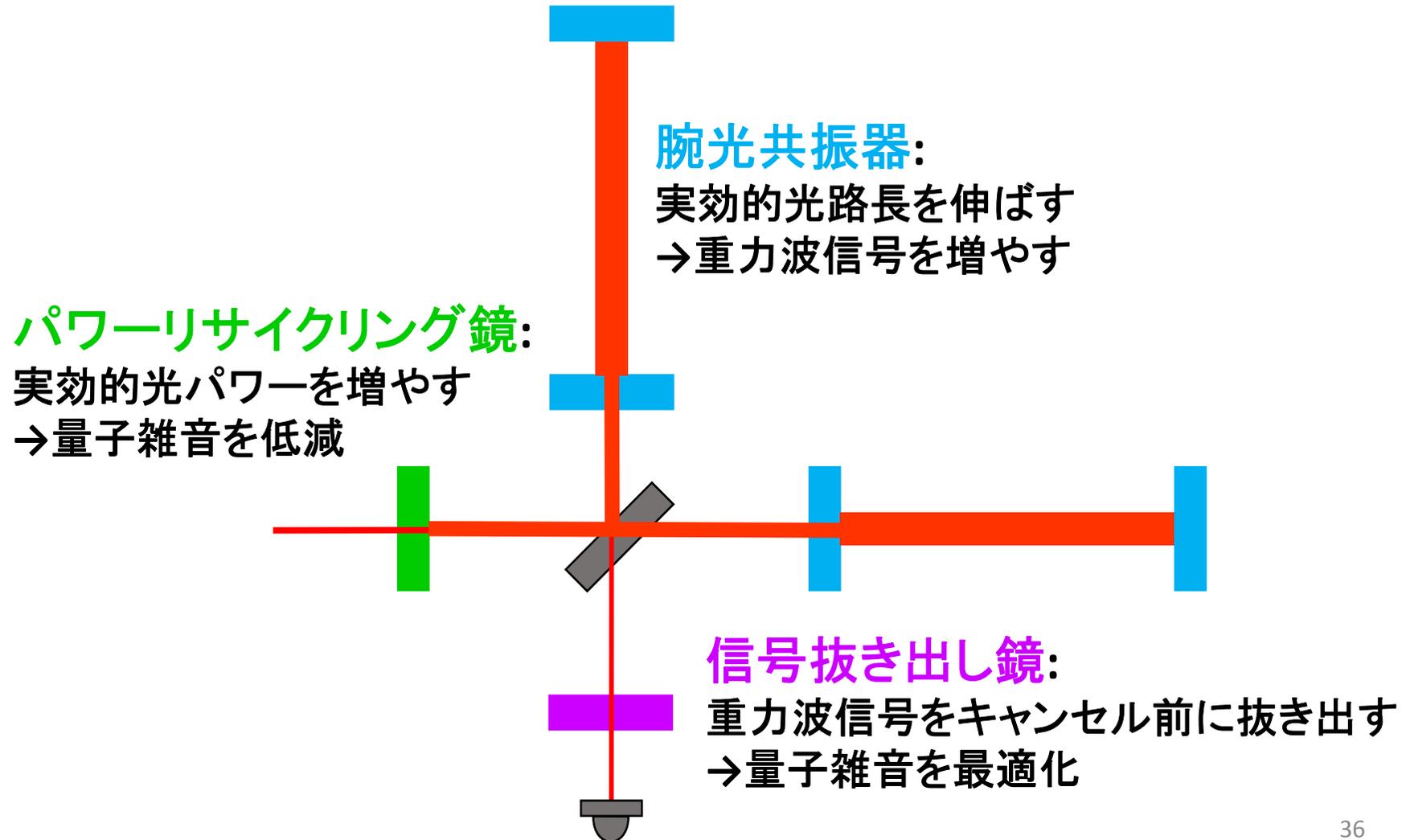


# サファイア鏡

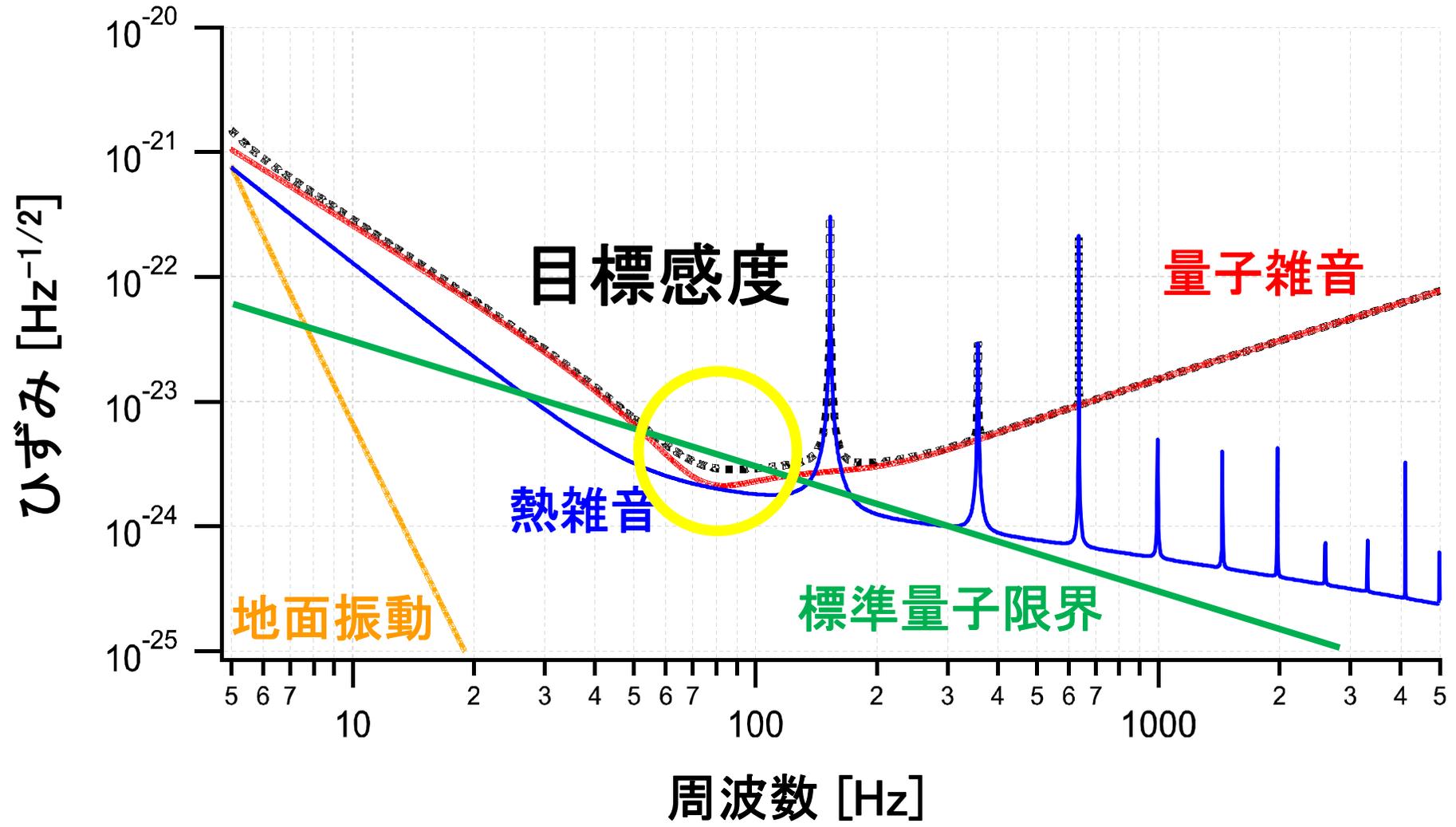


**Φ220mm, t 150mm**

# 帯域可変型干渉計



# KAGRAの目標感度



# 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**

# 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（以前の予想）
- **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！）



新跡津坑口  
(2016.2.8)

# 中央エリア (2016.2.8)





安定化レーザー (2016.2.8)

# 3km 真空パイプ (2016.2.8)

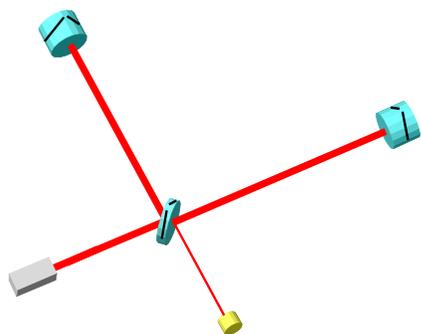




解析棟のコントロールルーム  
(2016.2.9)

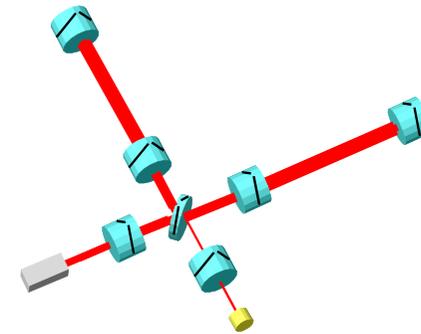
暦年	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
プロジェクト開始	▶								
トンネル掘削			■ (震災のため1年遅れ)						
initial-KAGRA	■								
						観測	■		
baseline-KAGRA								■ 先進的干渉計、超防振システム	
								■ 低温システム	
観測 & 調整								▶	

## iKAGRA



- ローパワーレーザー
- マイケルソン干渉計
- 常温溶融石英鏡
- 簡易防振システム

## bKAGRA



- ハイパワーレーザー
- 帯域可変型干渉系
- 低温サファイア鏡
- 超高防振システム

さらに将来は？

問：もっと大きく？

答：宇宙へ！

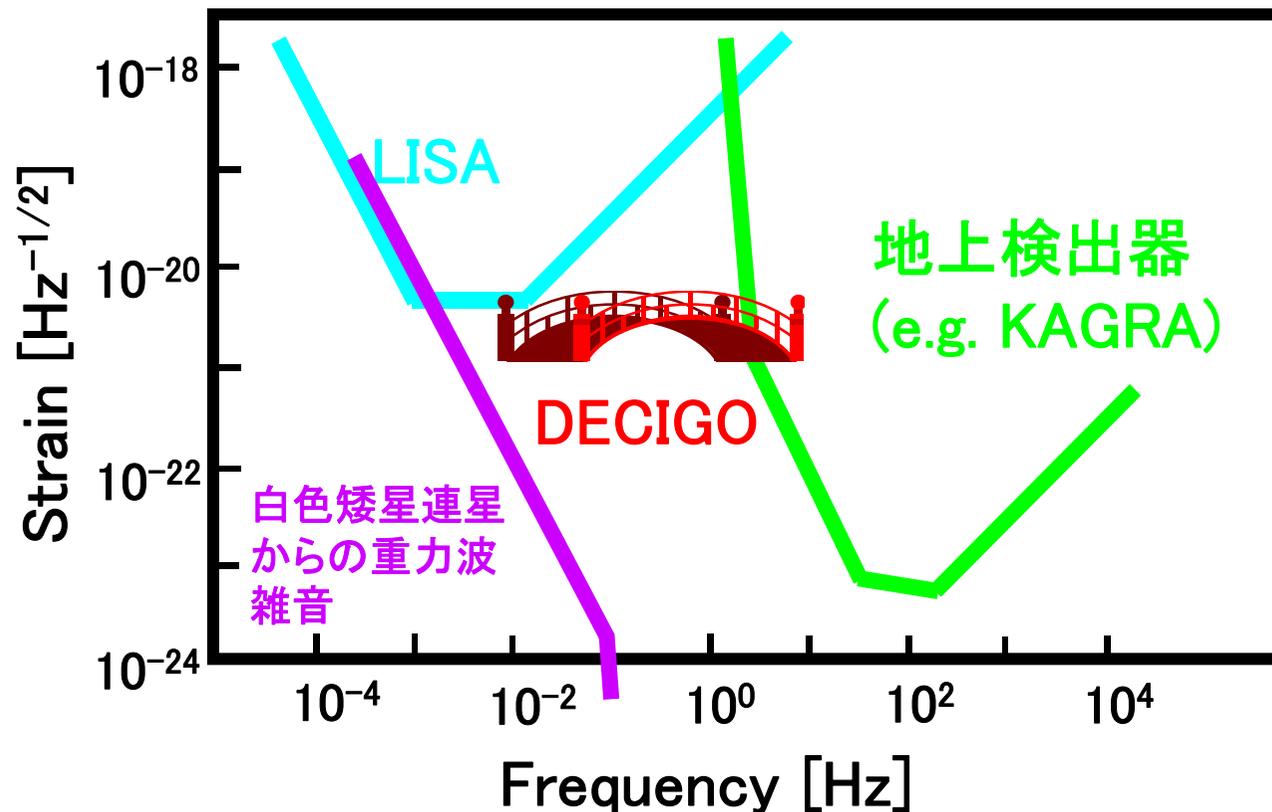
スペース重力波アンテナ  
DECIGO計画



# 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！

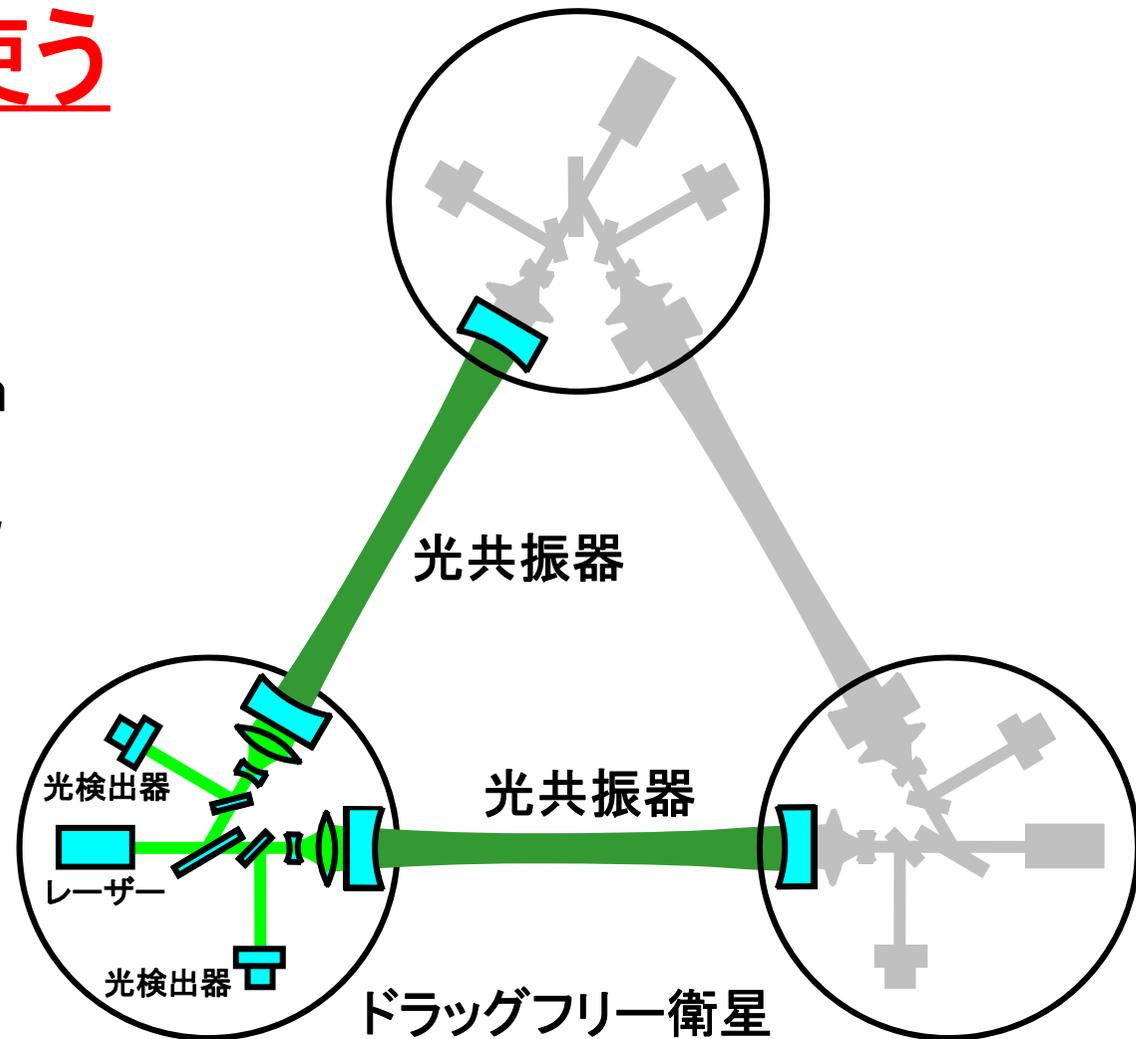


# 予備概念設計

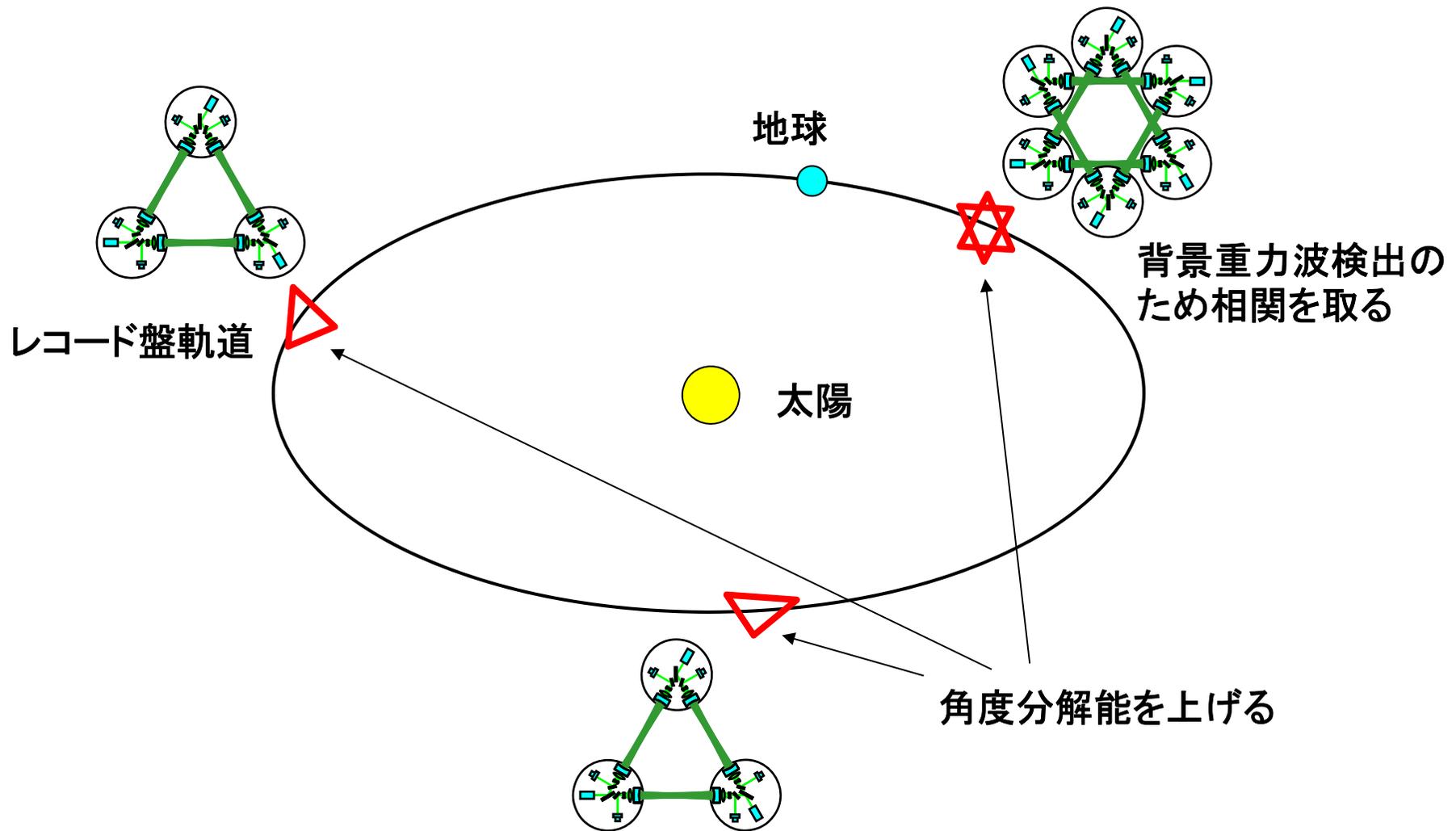
## 光共振器を使う

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



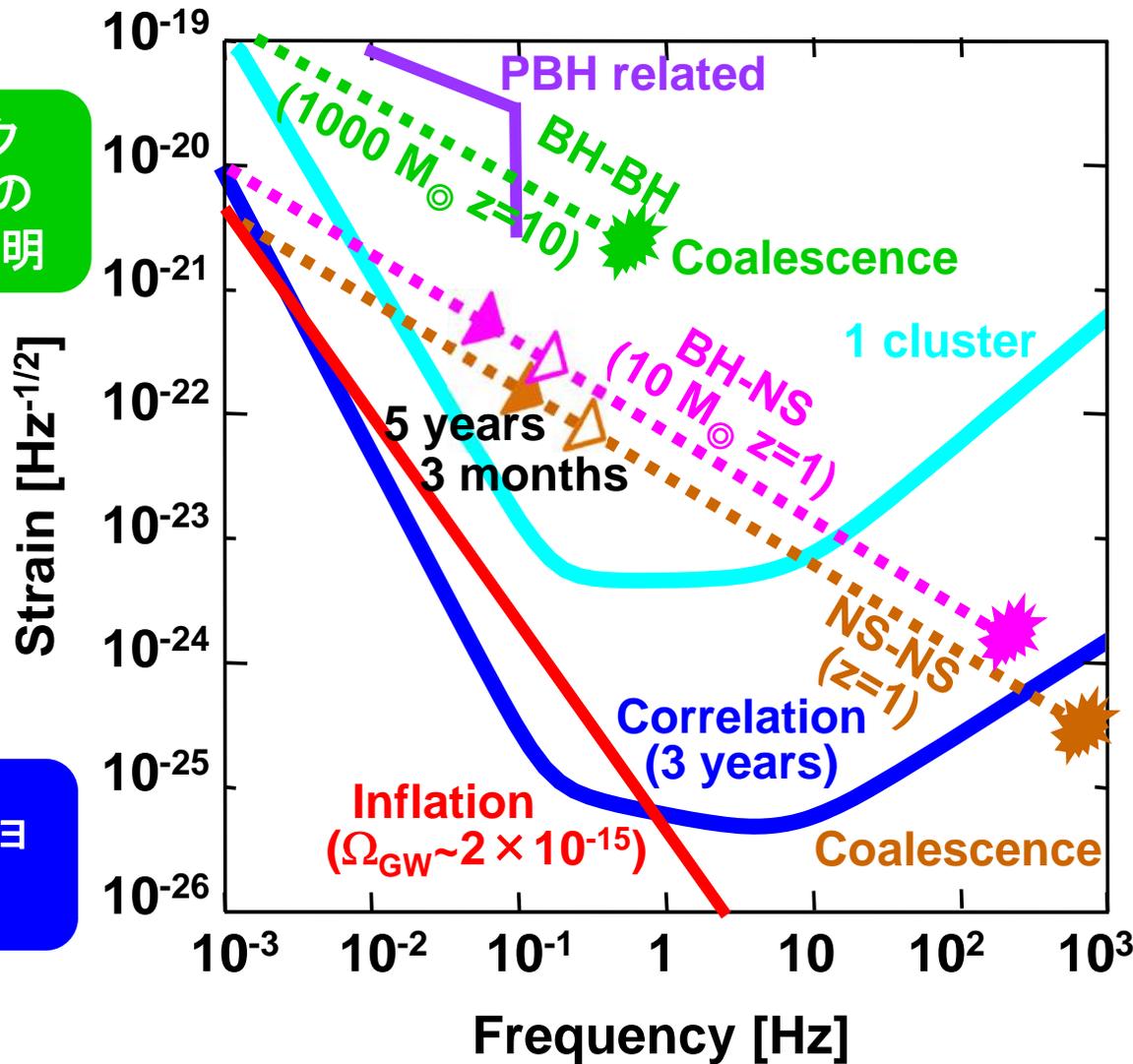
# 軌道とコンステレーション(案)



# 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

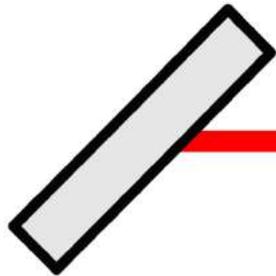
重力波天文学の  
夜明けが来たぜよ！



イラスト：  
Sora

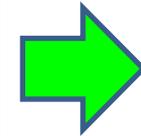
# 本当に測れるのか？

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



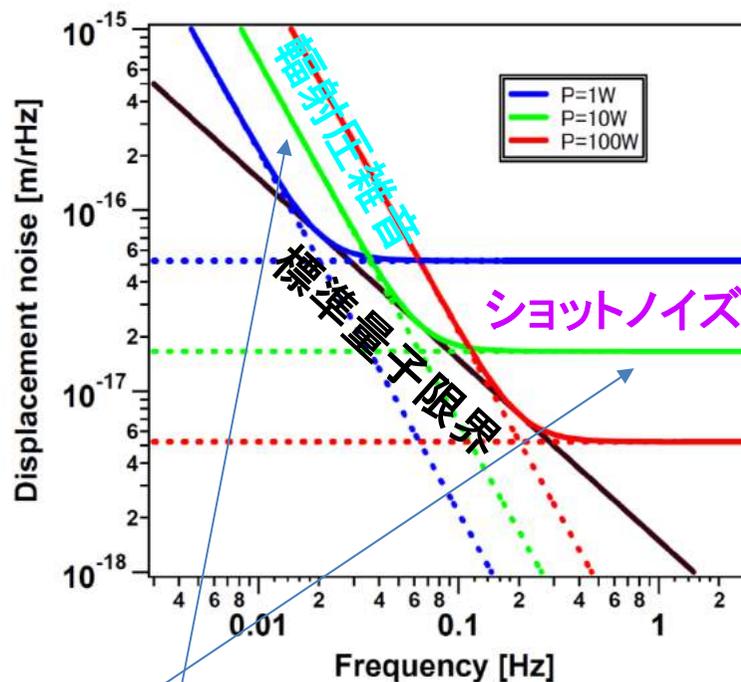
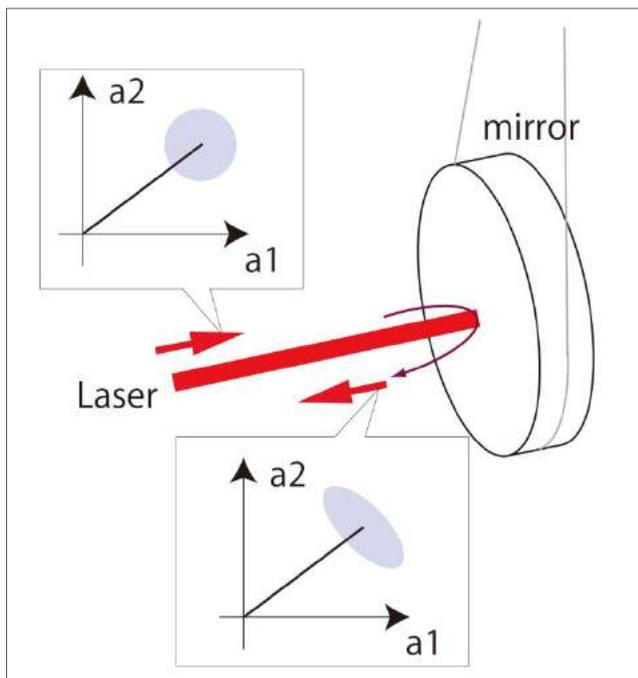
## (2) Transverse Traceless座標系



いずれの座標系においても光の伝播時間は変化する！

# ポンディロモーティブスキージング(1)

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ージング(2)

入射光: (強度揺らぎ) + (位相揺らぎ)

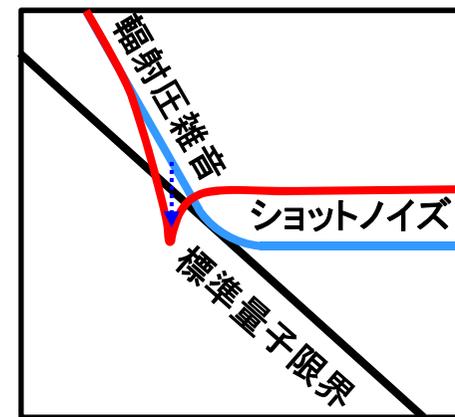
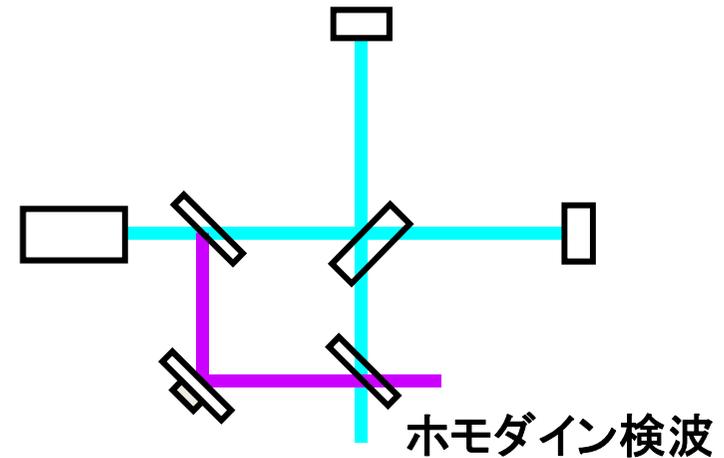
ホモダイン検波により  
キャンセルできる

→ 輻射圧雑音を消せる  
→ 標準量子限界を破る

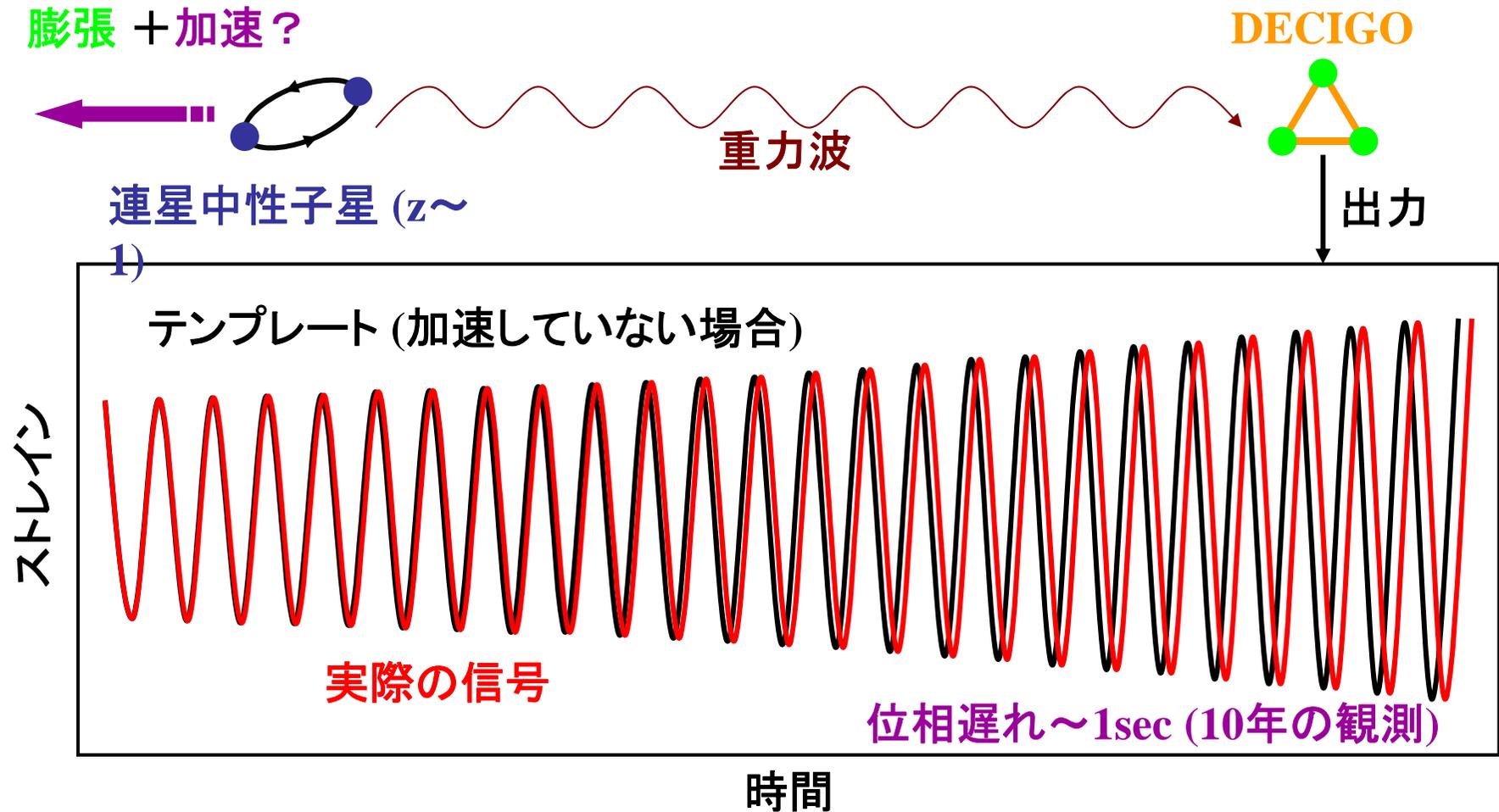
反射光: (元の強度揺らぎ)

+ (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)



# 宇宙の膨張加速度の直接計測



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