

# 重力波検出実験の 最近の進展

第19回理論懇シンポジウム  
「理論天文学の進歩」

平成18年12月25日  
@立教大学

国立天文台 川村静児

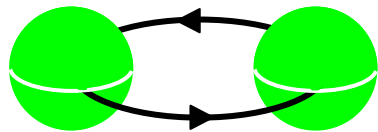
# 話の内容

1. 重力波検出のおさらい
2. 現在・次世代の検出器の現状
3. 第3世代検出器のための先進的技術

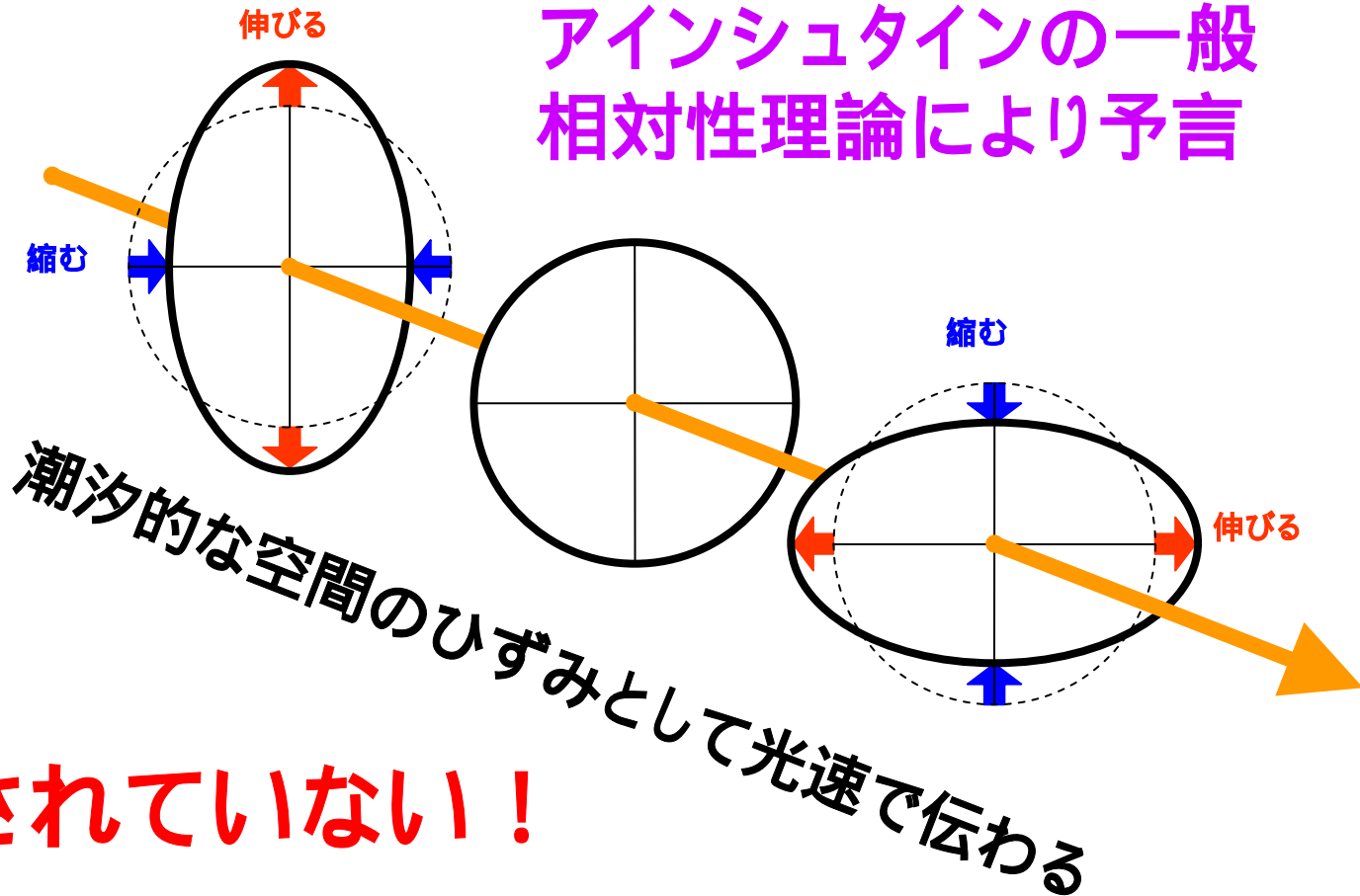
# 重力波検出のおさらい

# 重力波とは？

高速で運動する  
物体から放射



アインシュタインの一般  
相対性理論により予言



まだ検出されていない！

# 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

# 連星の合体

中性子星や  
ブラックホール



1. 公転運動により重力波を出す
2. 連星のエネルギーが運び去られる
3. 連星間の距離が縮まる
4. **最後は合体する**

# 重力波が存在することの間接的な証拠

- 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

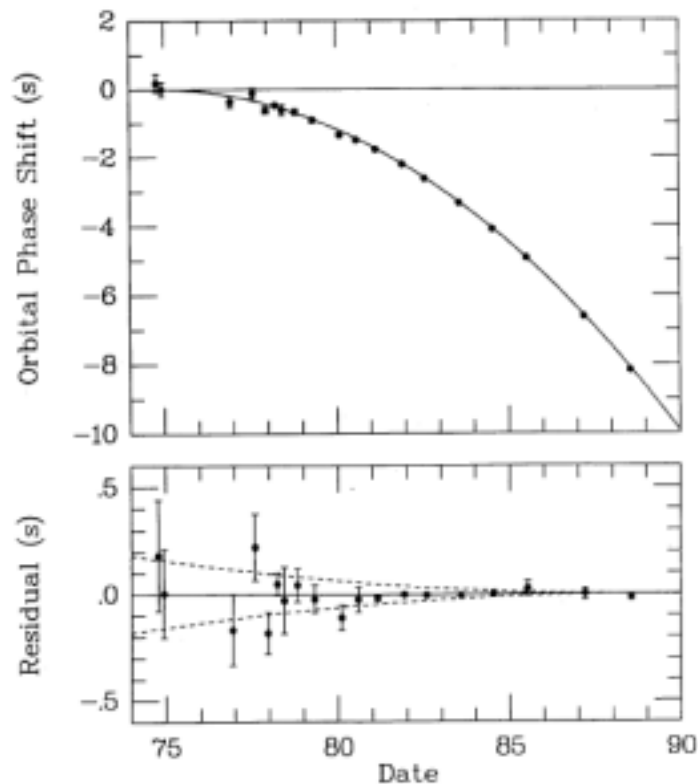
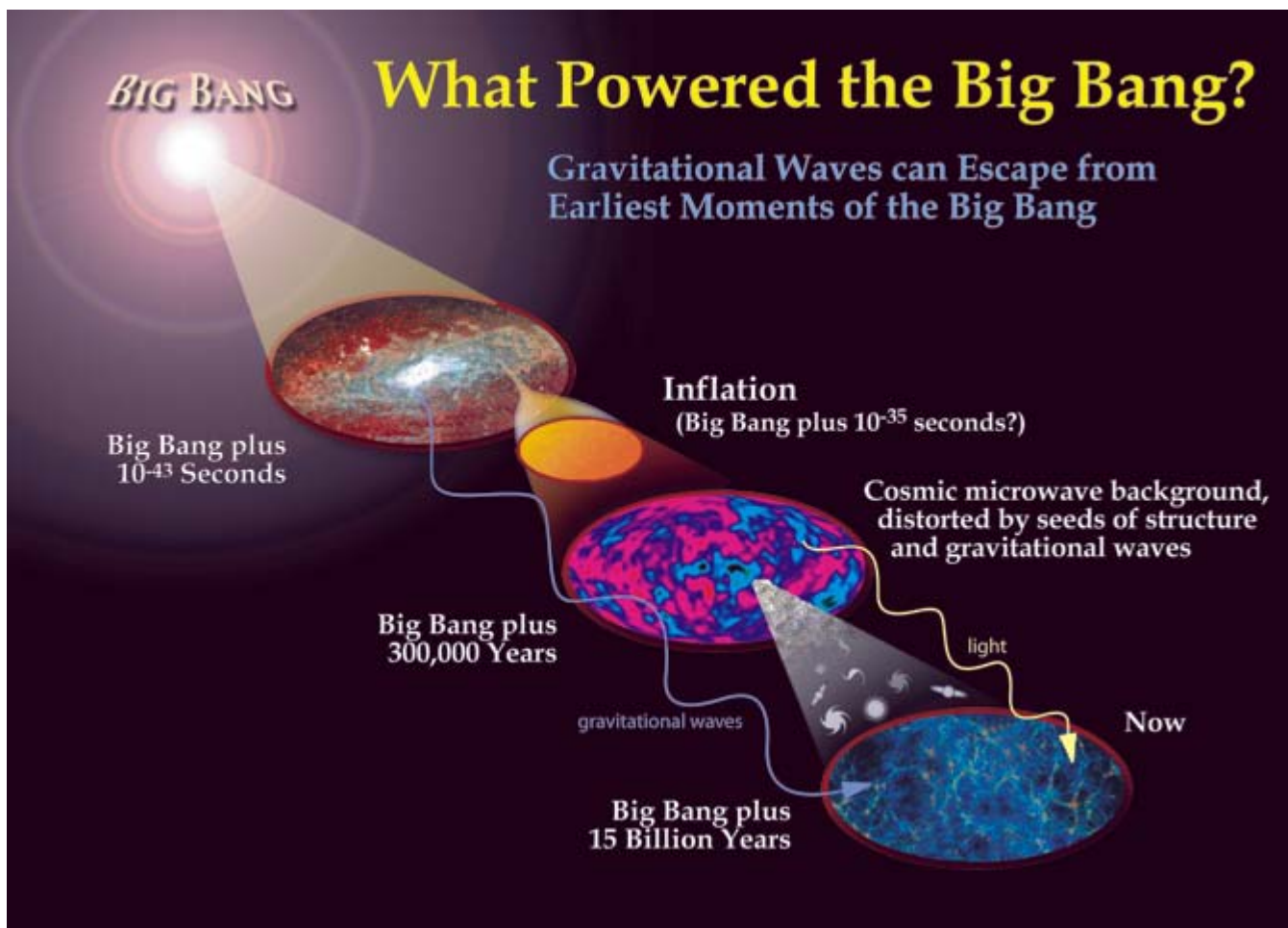


FIG. 5.—*Top*: Cumulative shift of the times of periastron passage relative to a nondissipative model in which the orbital period remains fixed at its 1974.78 value. *Bottom*: Differences between the locally measured periastron times and those expected according to the DD(1) parameter set. Dashed curves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

# 初期宇宙からの重力波



NASA

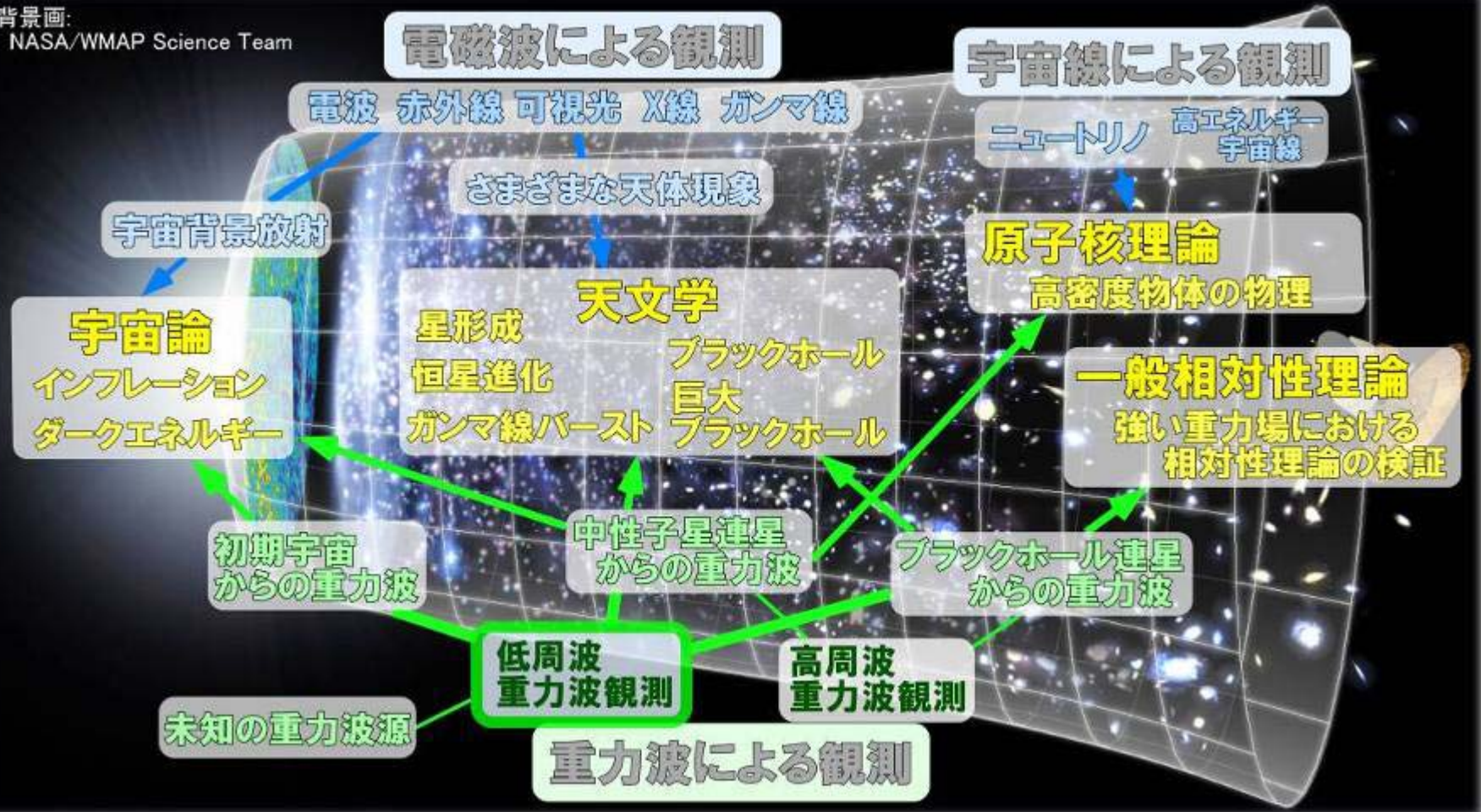


# 新しい天体現象

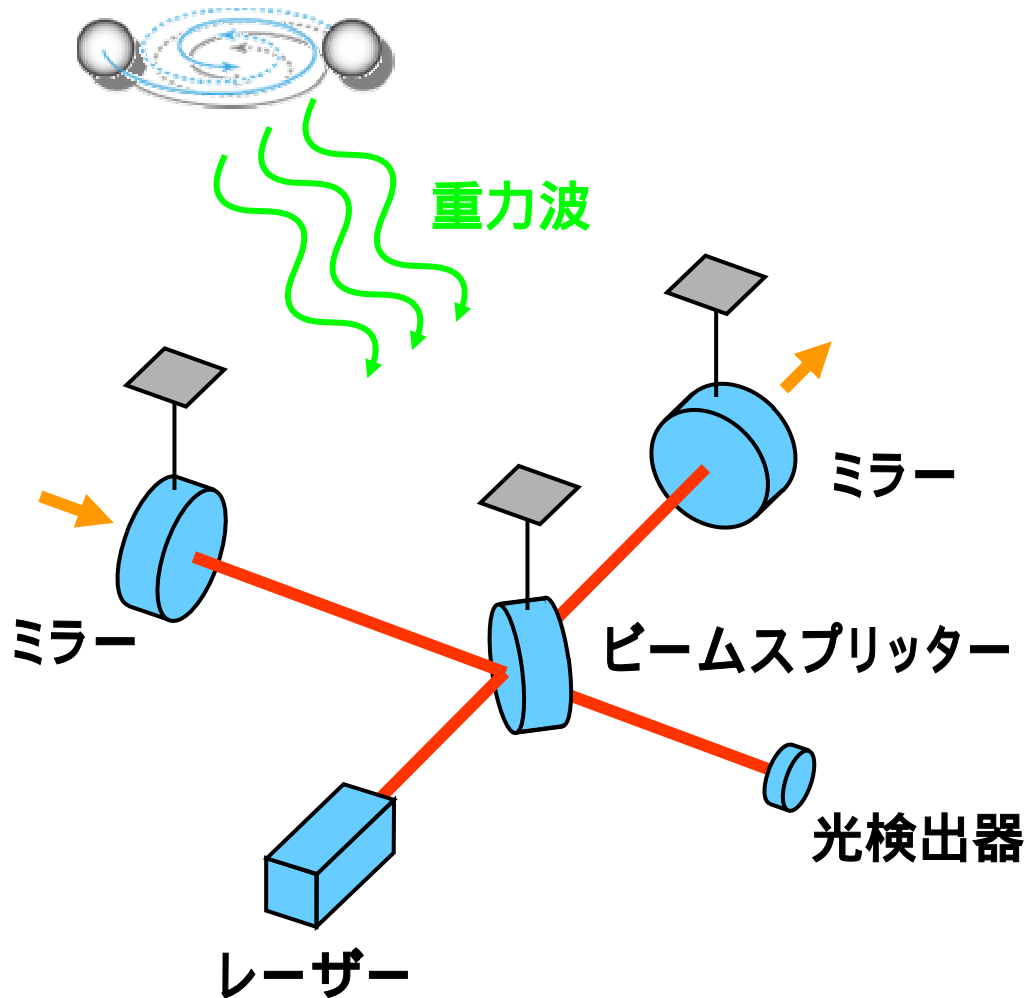
- これまで、**赤外線、電波、X線、ガンマ線**など新しい観測手段が見つかるたびに、それまで想像すらしなかった**新しい天体現象**が見つかってきた
- 重力波によっても想像を絶するような、新しい天体が見つかることが期待できる

# 重力波天文学の創成

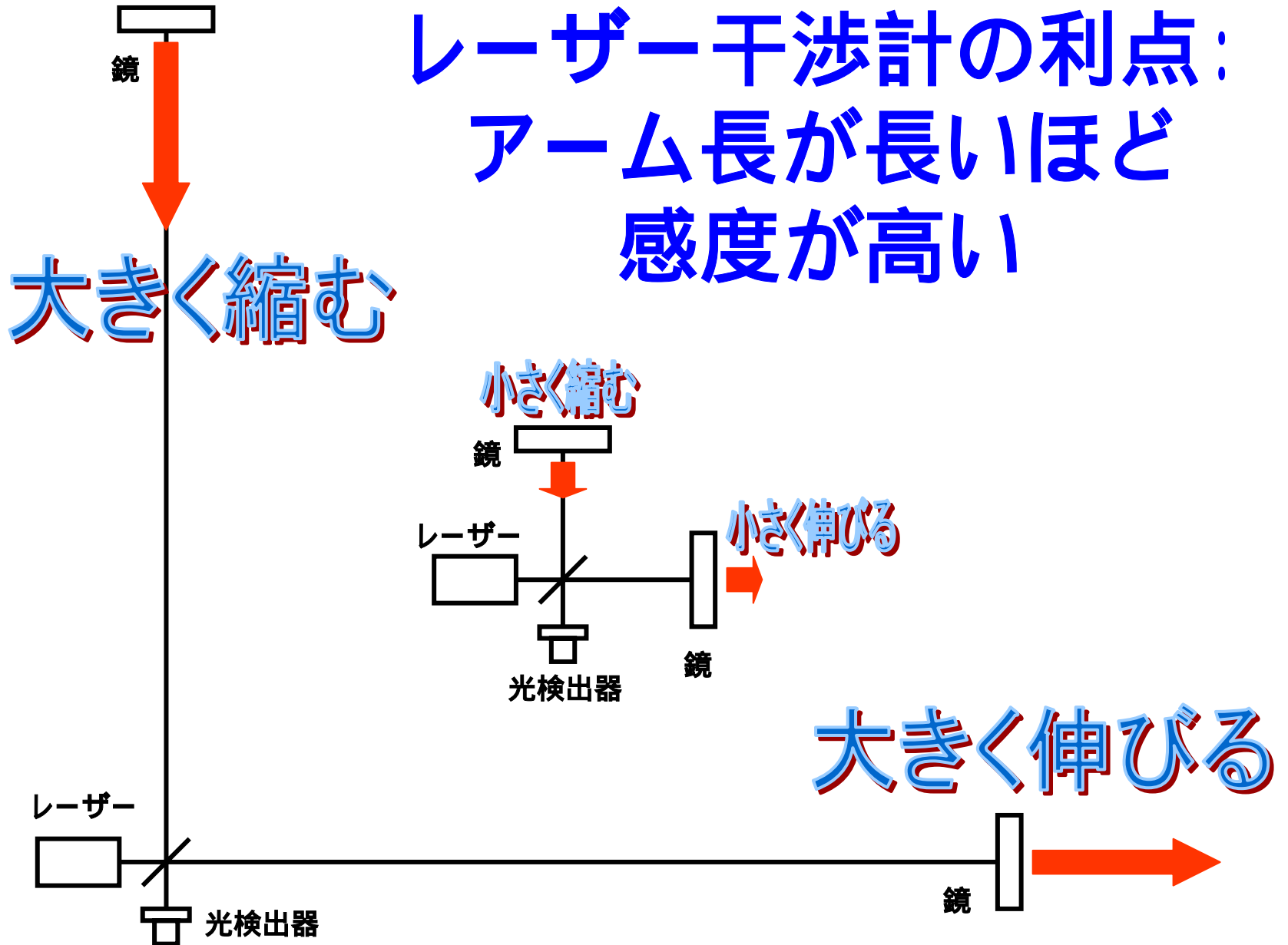
背景画:  
NASA/WMAP Science Team



# レーザー干渉計による重力波検出

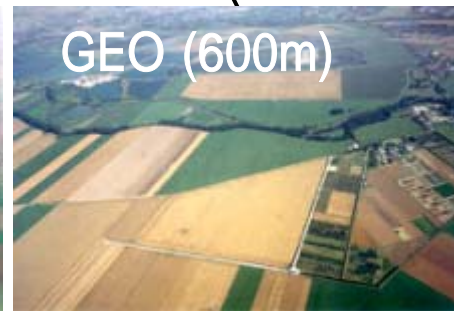
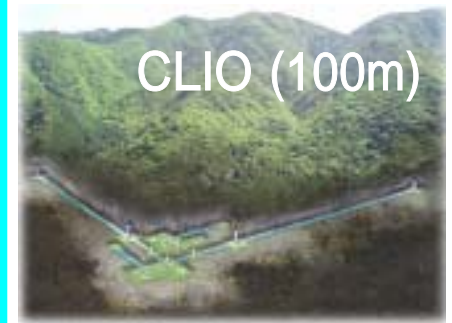
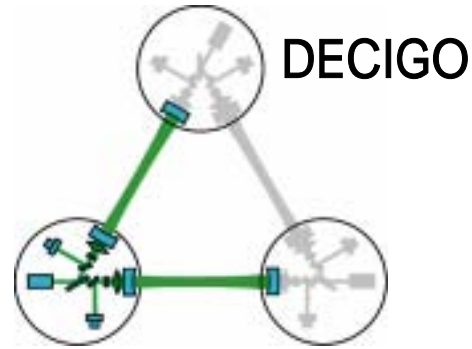
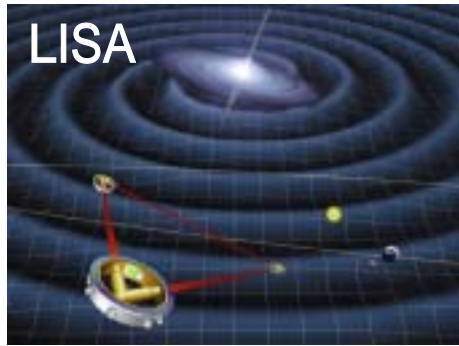


# レーザー干渉計の利点： アーム長が長いほど 感度が高い



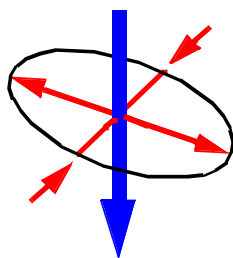


# 世界の大型干渉計

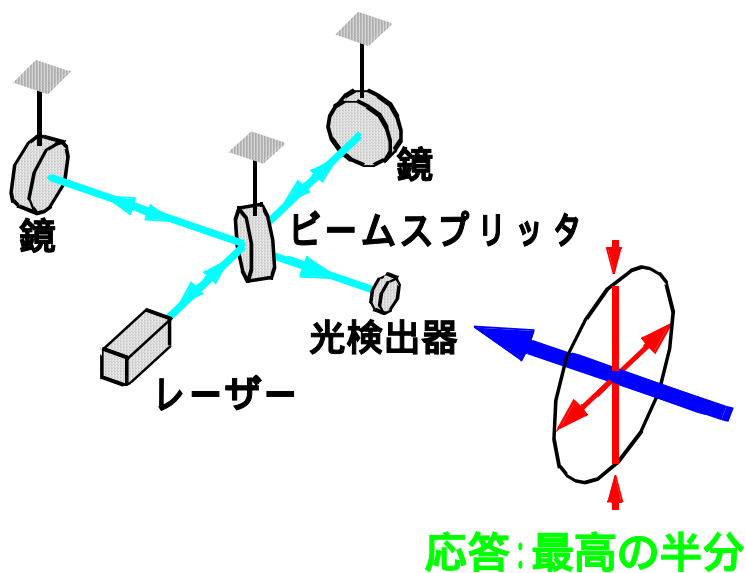
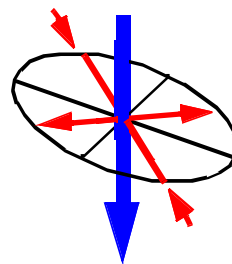


# 干渉計の指向性

応答: 最高



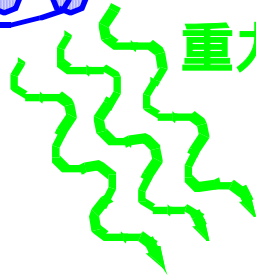
応答: ゼロ



重力波の方向や偏極によって応答が違う

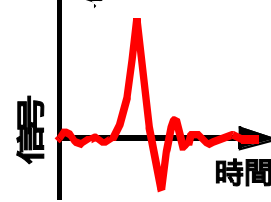
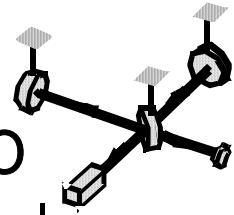
# 複數台必要！

重力波源

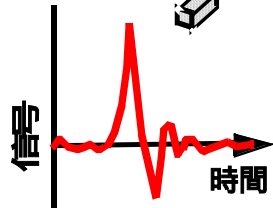
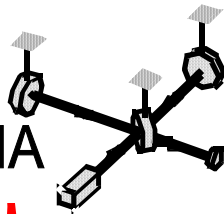


重力波

LIGO

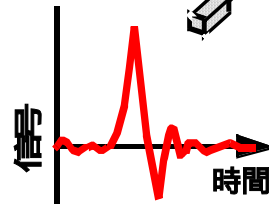
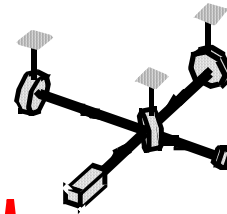


TAMA

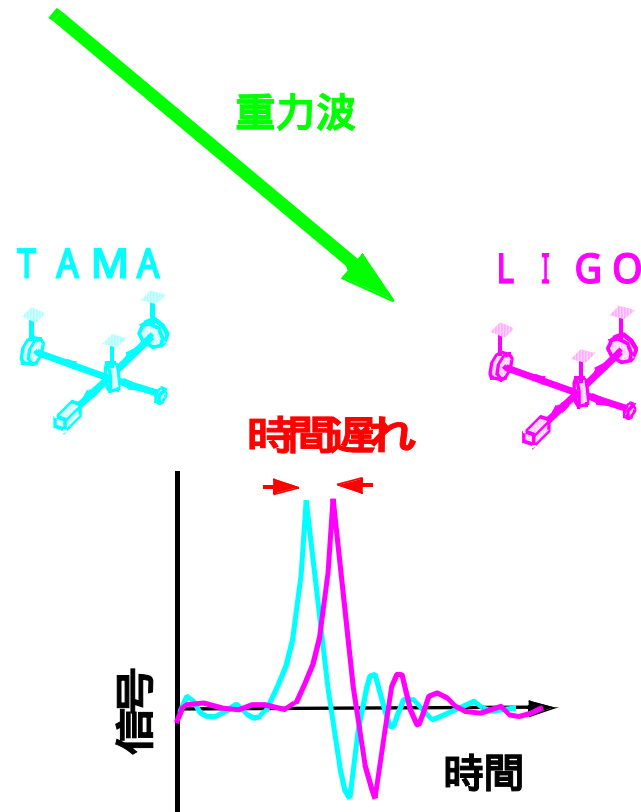


同時觀測

VIRGO



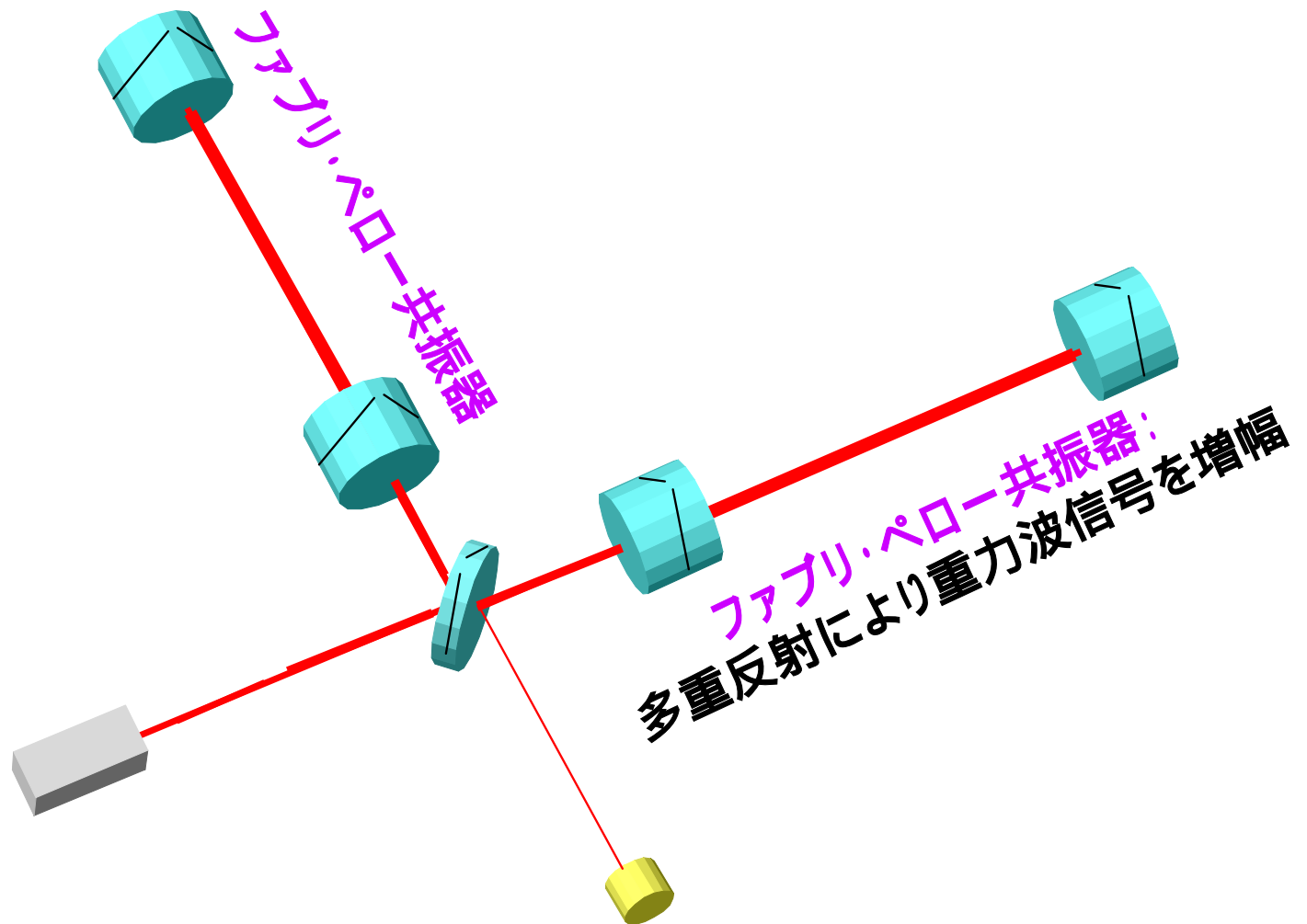
# 重力波源の方向について



検出器が数台あれば  
重力波源の方向が分かる



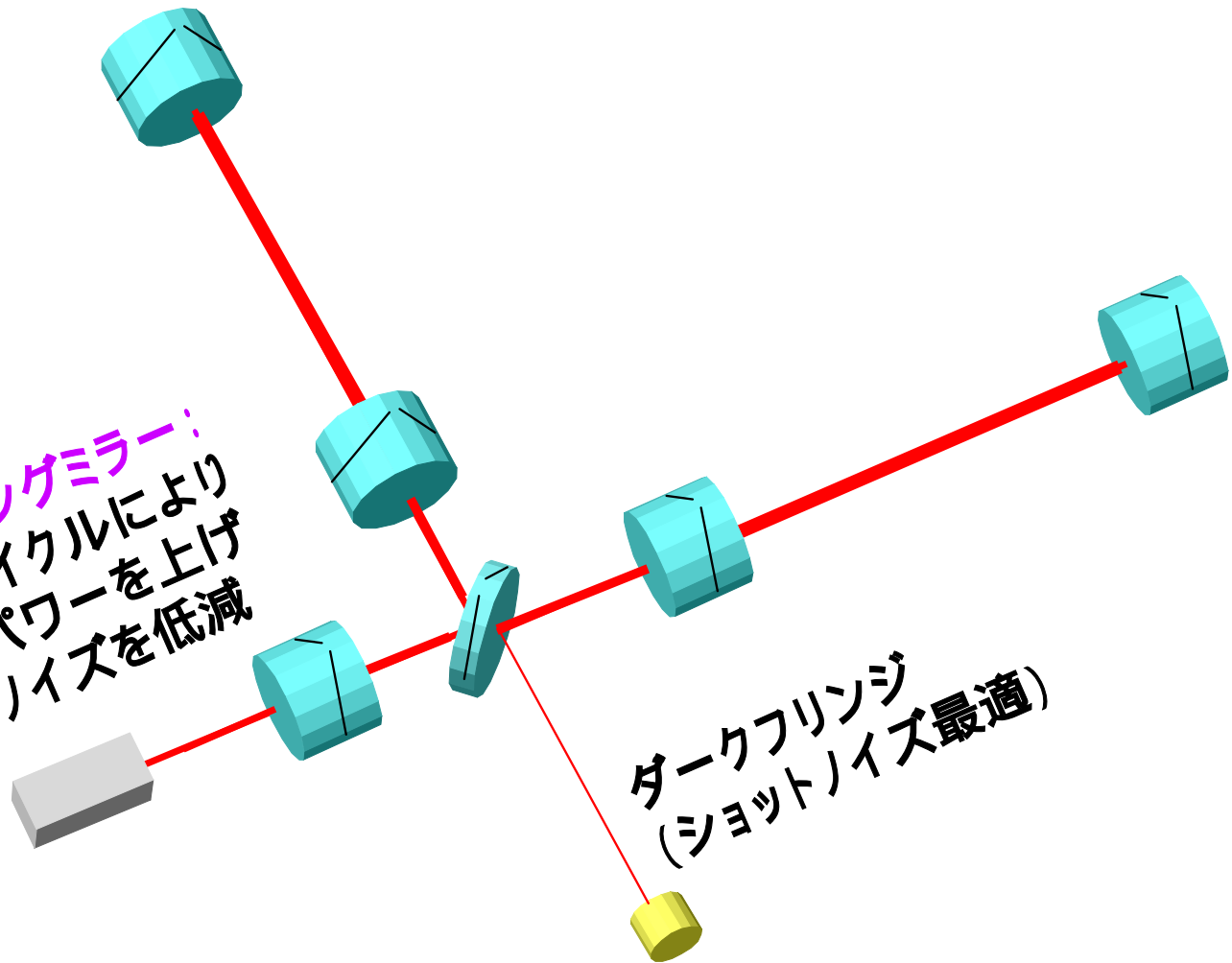
# 感度を高める基本技術(1)



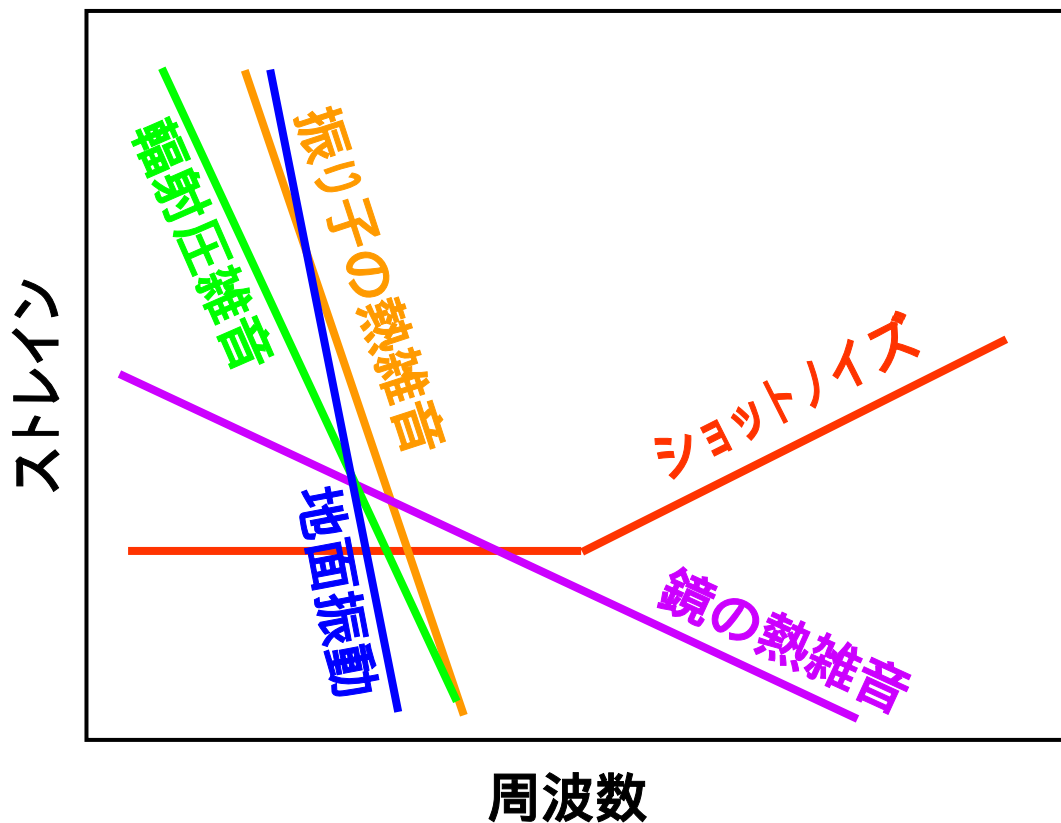
# 感度を高める基本技術(2)

リサイクルリングミラー:  
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

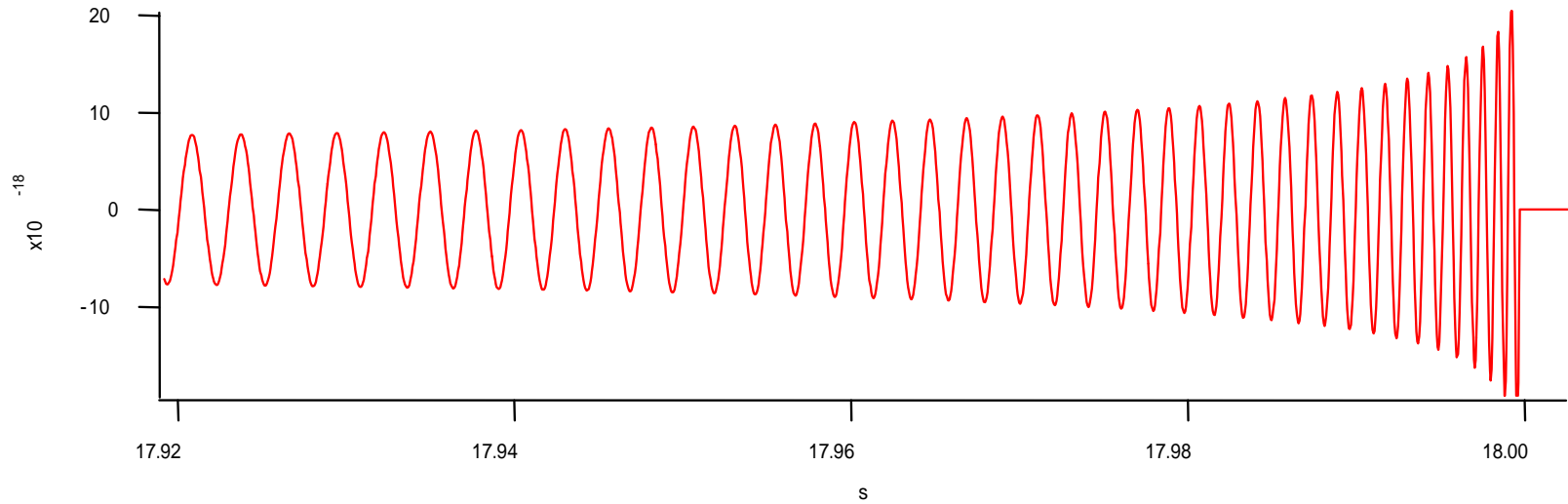
ダークフリンジ  
(ショットノイズ最適)



# 干渉計の感度を決める雑音源

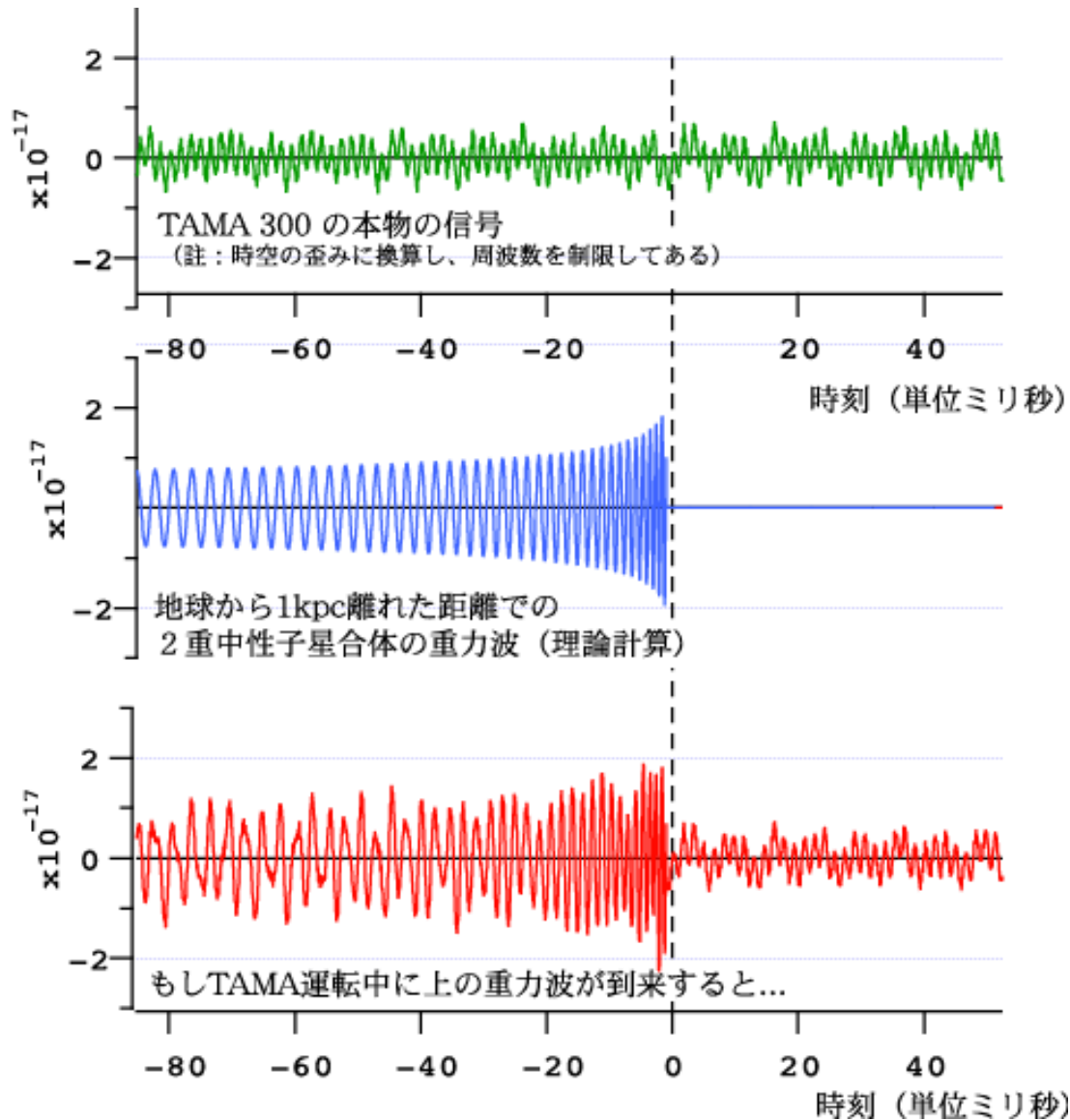


# 連星合体からの重力波信号

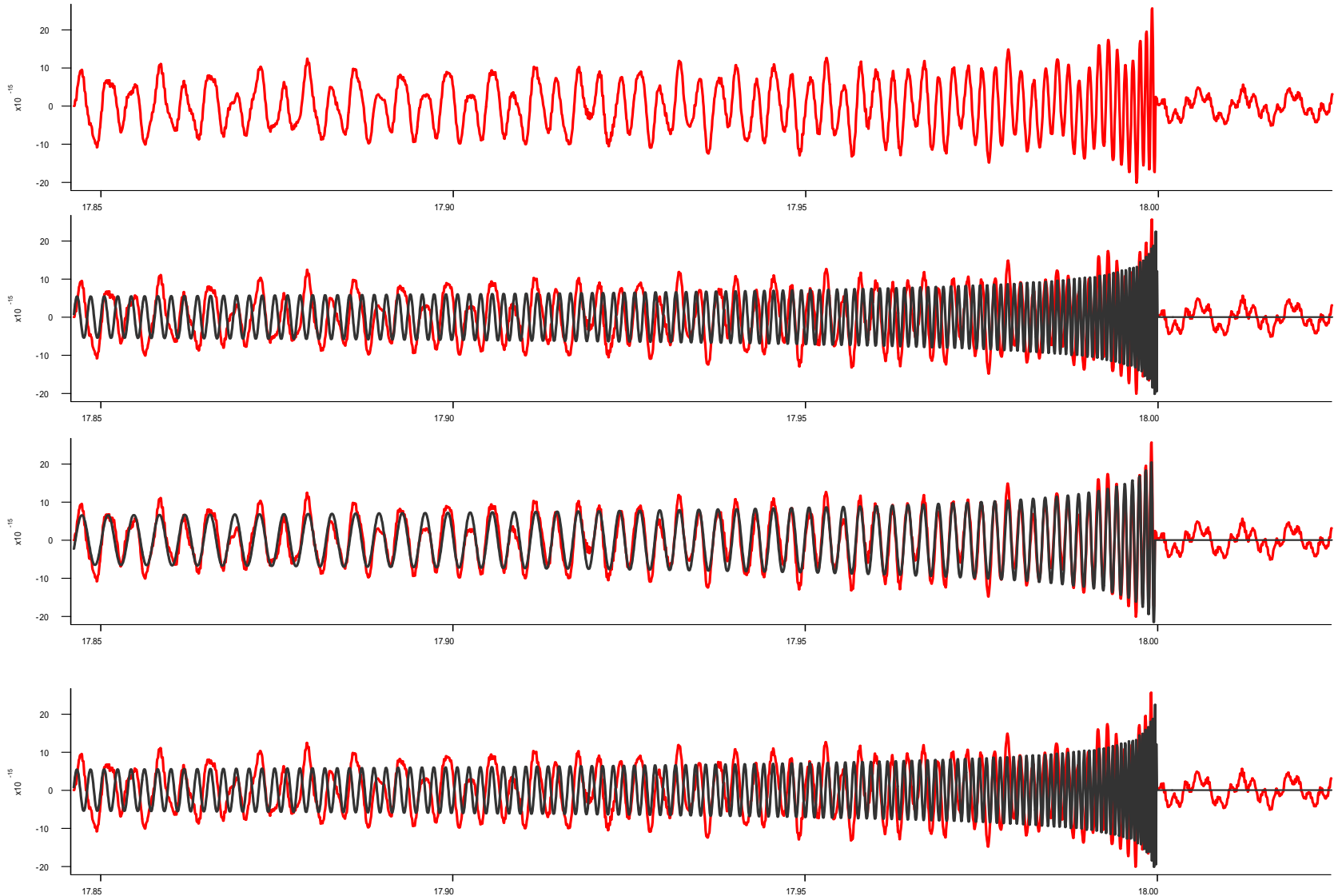


# TAMAの出力+重力波信号

TAMA干渉計で測定する時空の歪み  
(= 1 mのものが何m伸縮するか)

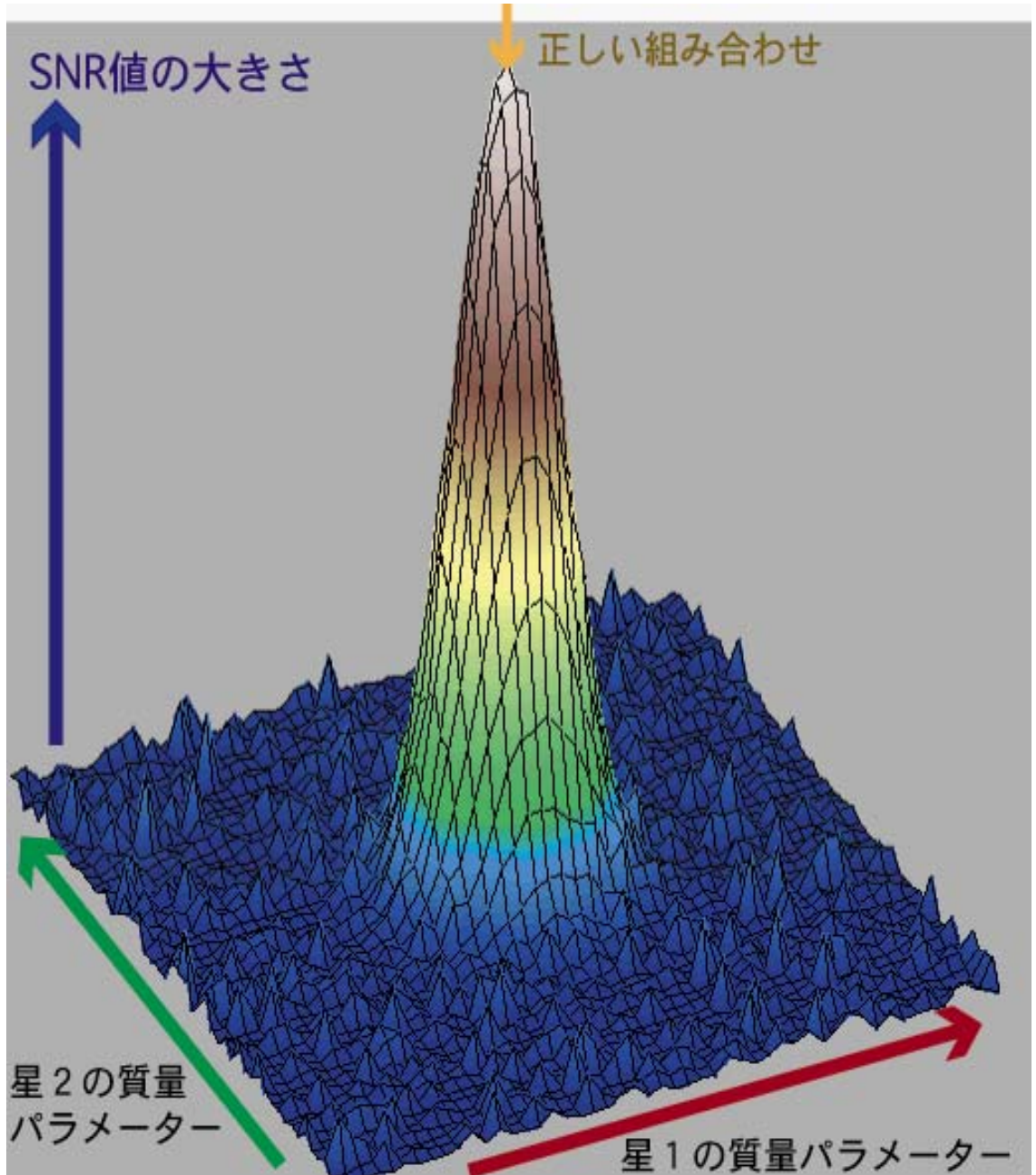


# データ解析: マッチドフィルタ



# マッチドフィルタ ターを使った 信号雑音比

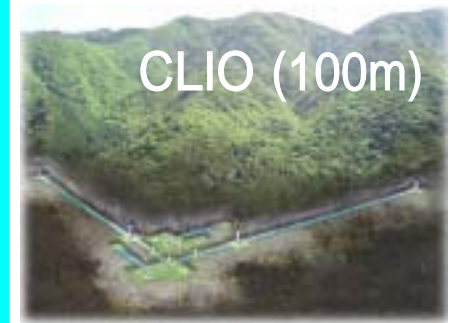
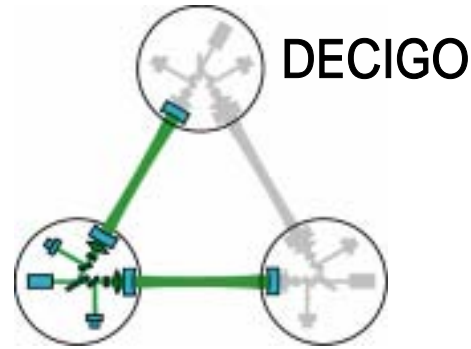
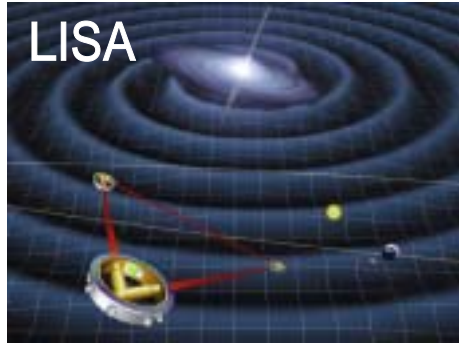
- 重力波には大きな値
- 雑音だけでは小さい値



# 現在・次世代の 検出器の現状



# 世界の大型干渉計



# TAMA300

TAMA300 航空写真(国立天文台・三鷹)





# 内部



# 300m 真空パイプ

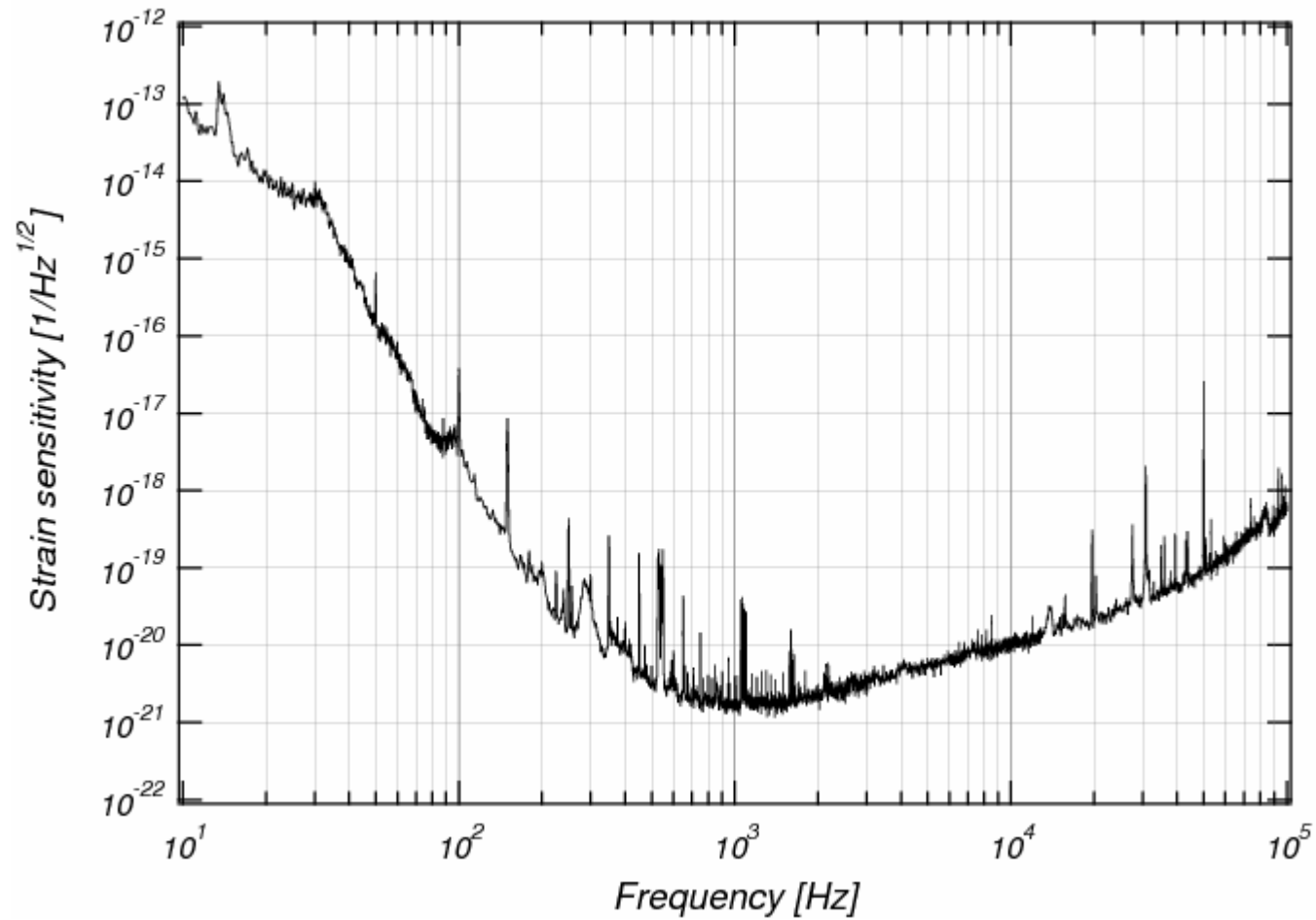


# 鏡吊り下げシステム(旧)

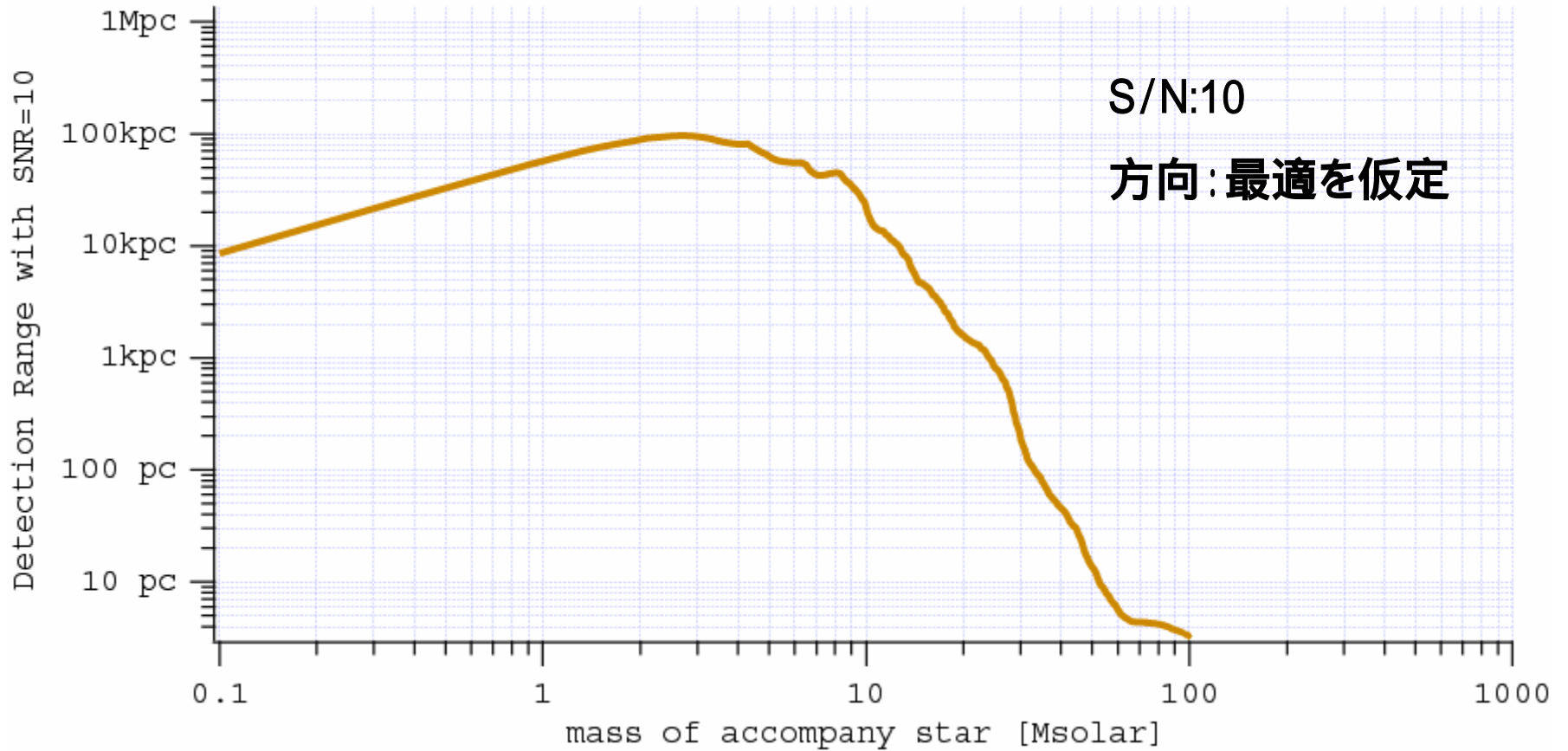


ニコン撮影

# TAMA300の感度

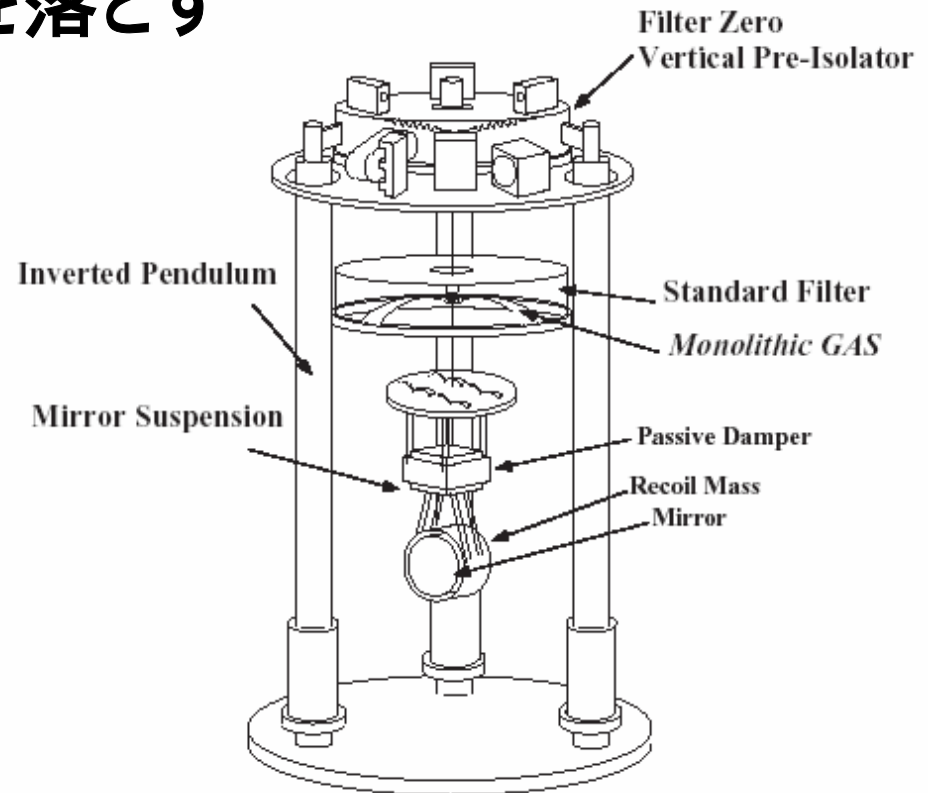
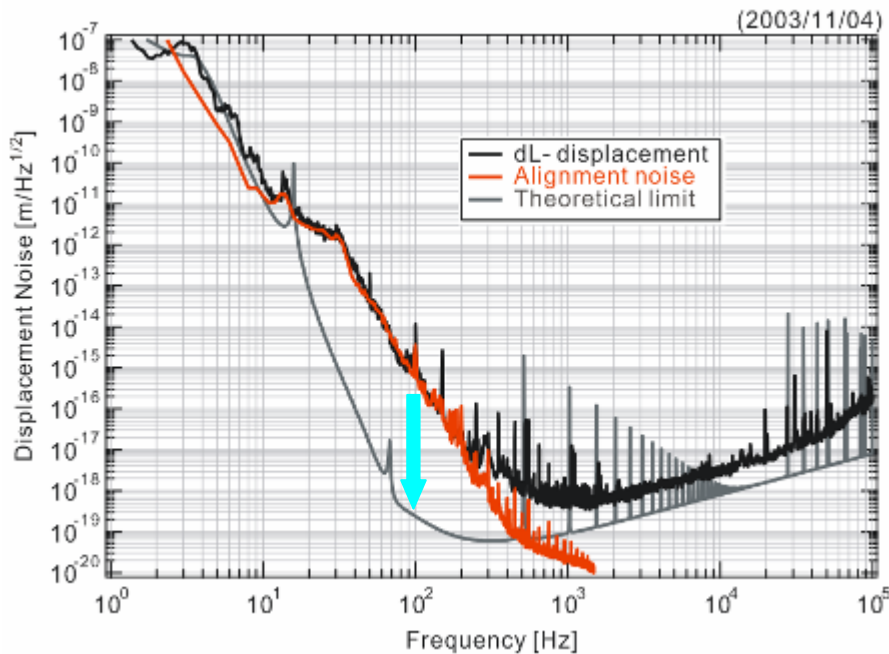


# TAMA300のInspiral Range



# アップグレード

超高防振システム (TAMA-SAS) を導入して、低周波の雑音を落とす



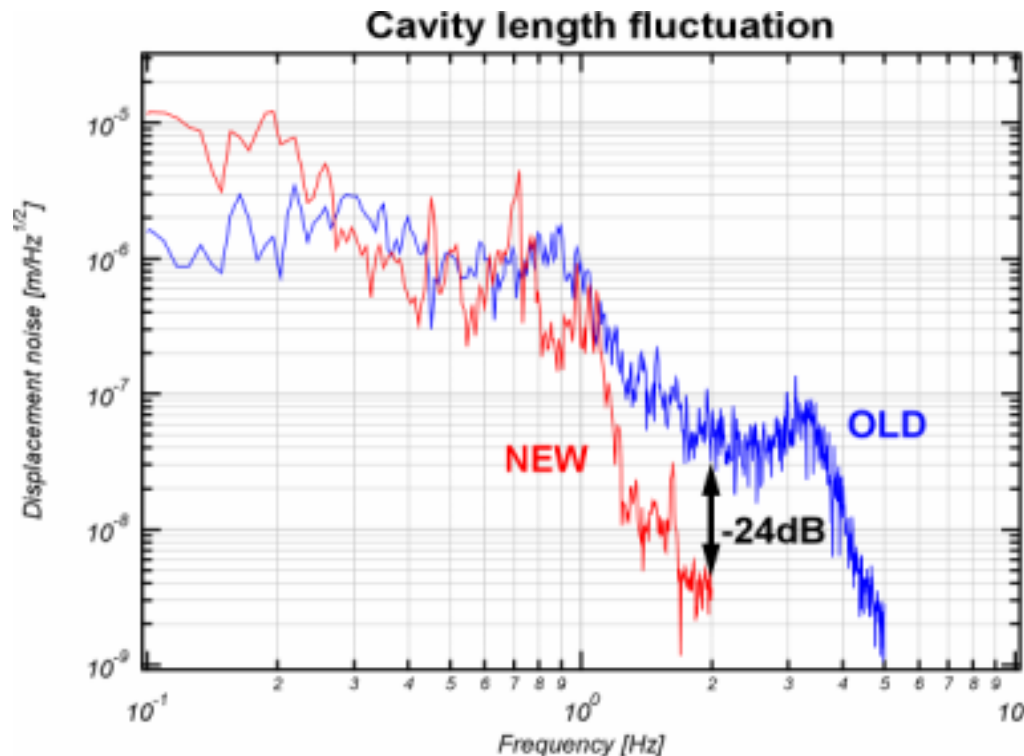


# インストール作業のようす



# 現状

- 4つのTAMA-SASがインストールされた
- 1つのアーム共振器がロックした
- 低周波のミラーの揺れが激減した



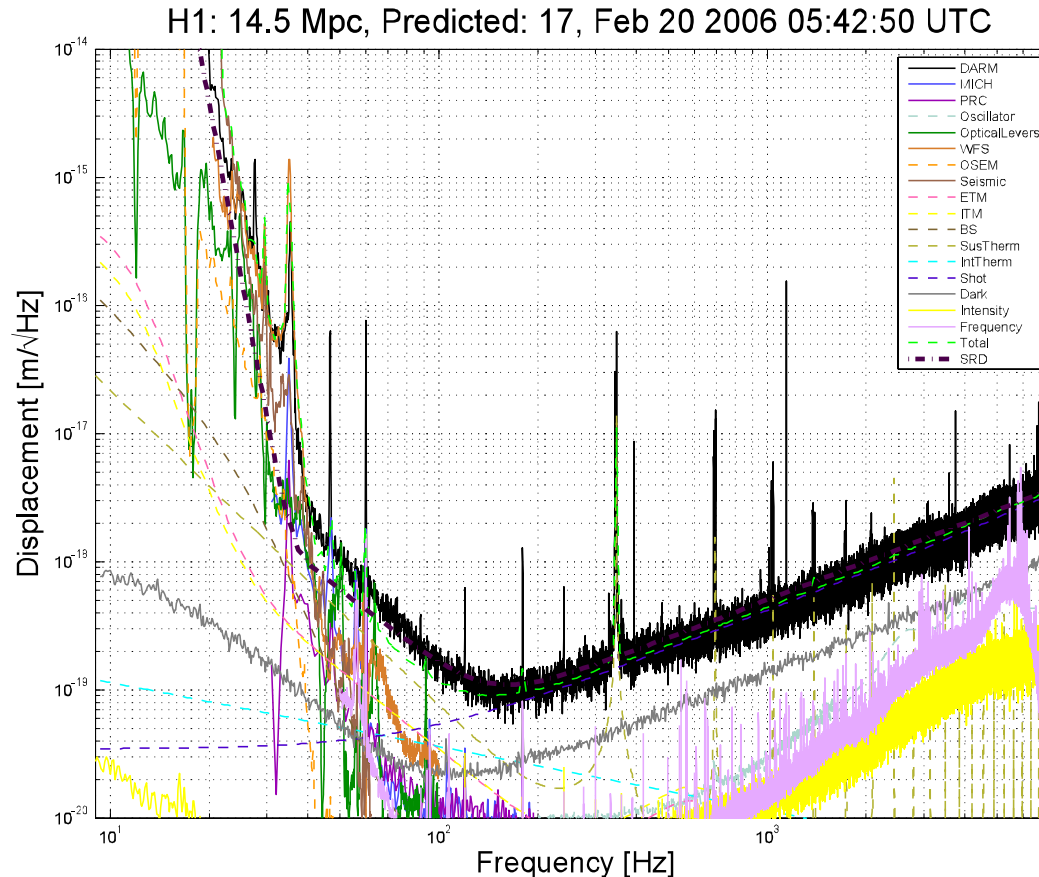
# LIGO

- 総予算：～800億円
- LIGO Scientific Collaboration (LSC)
  - 8カ国、40研究機関、400人



# 感度

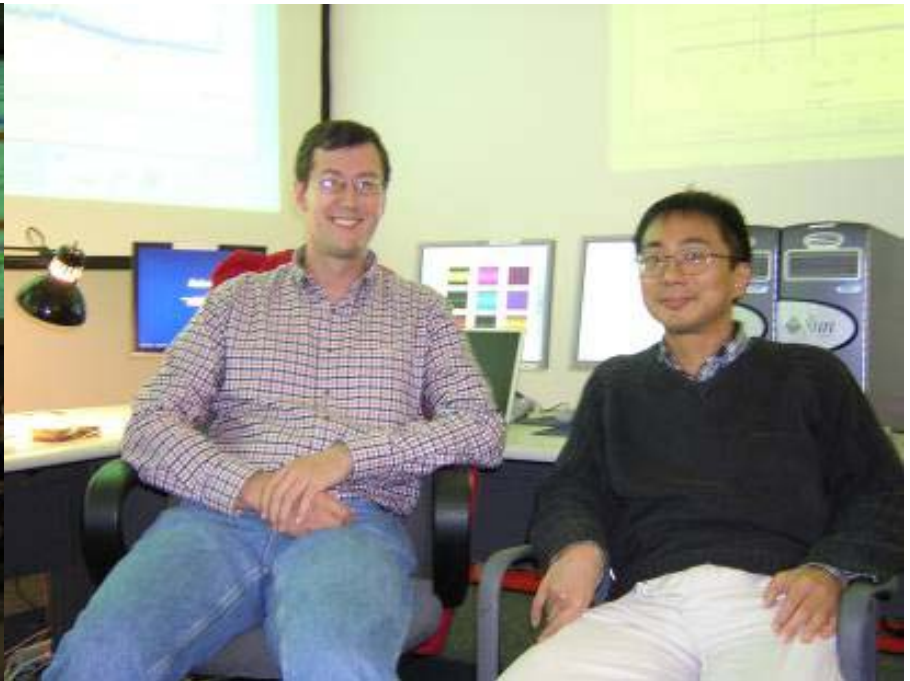
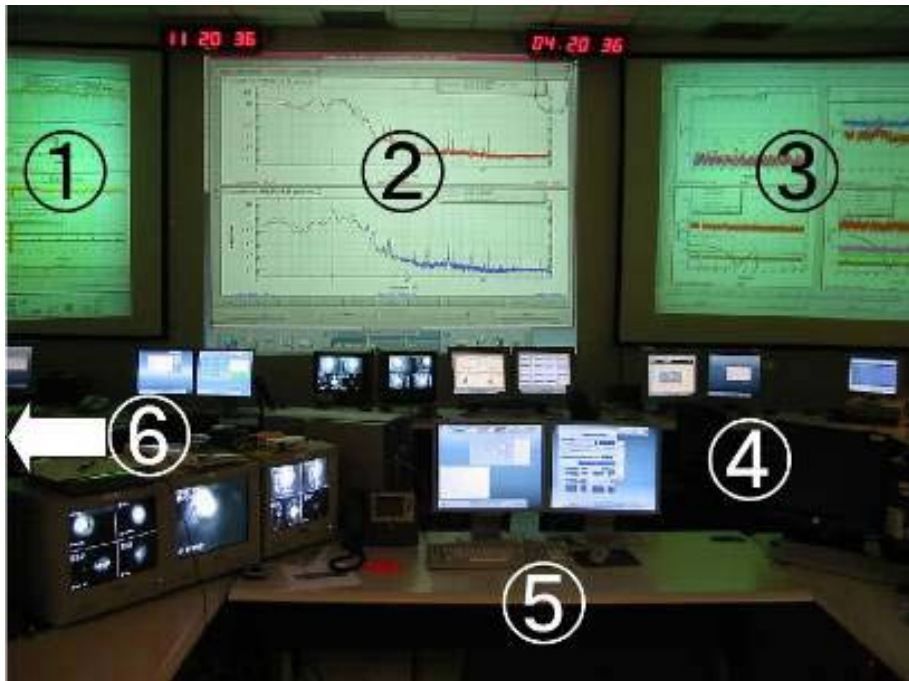
- 目標感度達成 (中性子星連星の合体のレンジ15 Mpc)



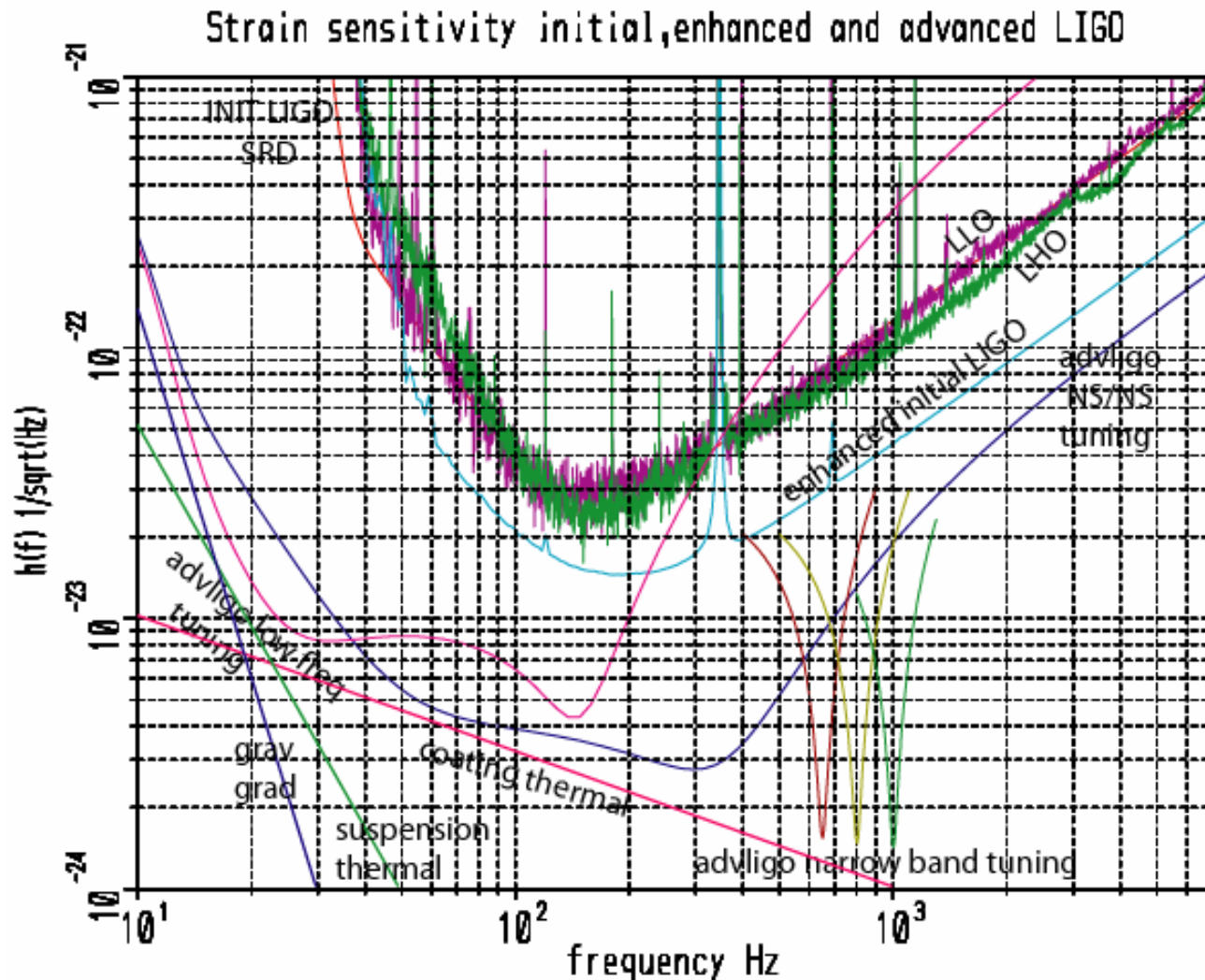


# Science Run (S5)

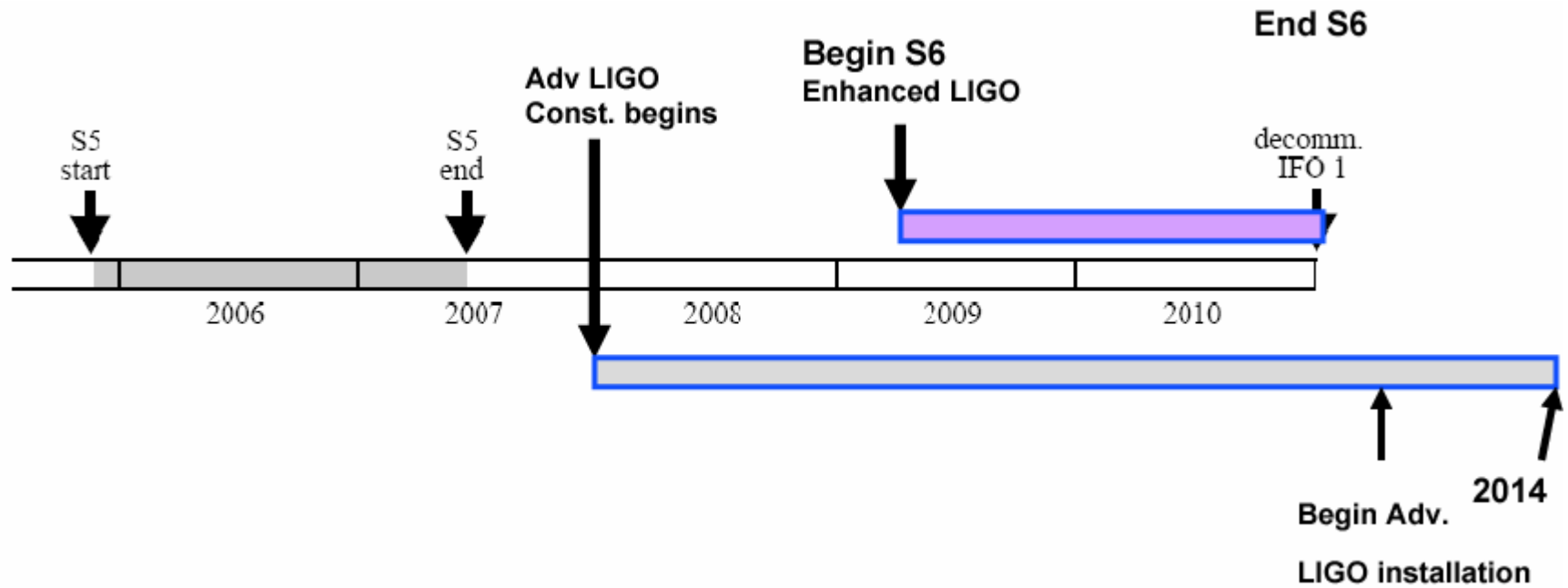
- 2005年11月より、S5続行中(目標:3台同時観測1年間)、稼働率~50%
- シフト:12時~22時、22時~8時



# Enhanced LIGO, Advanced LIGO



# スケジュール



# 日本の将来計画: LCGT

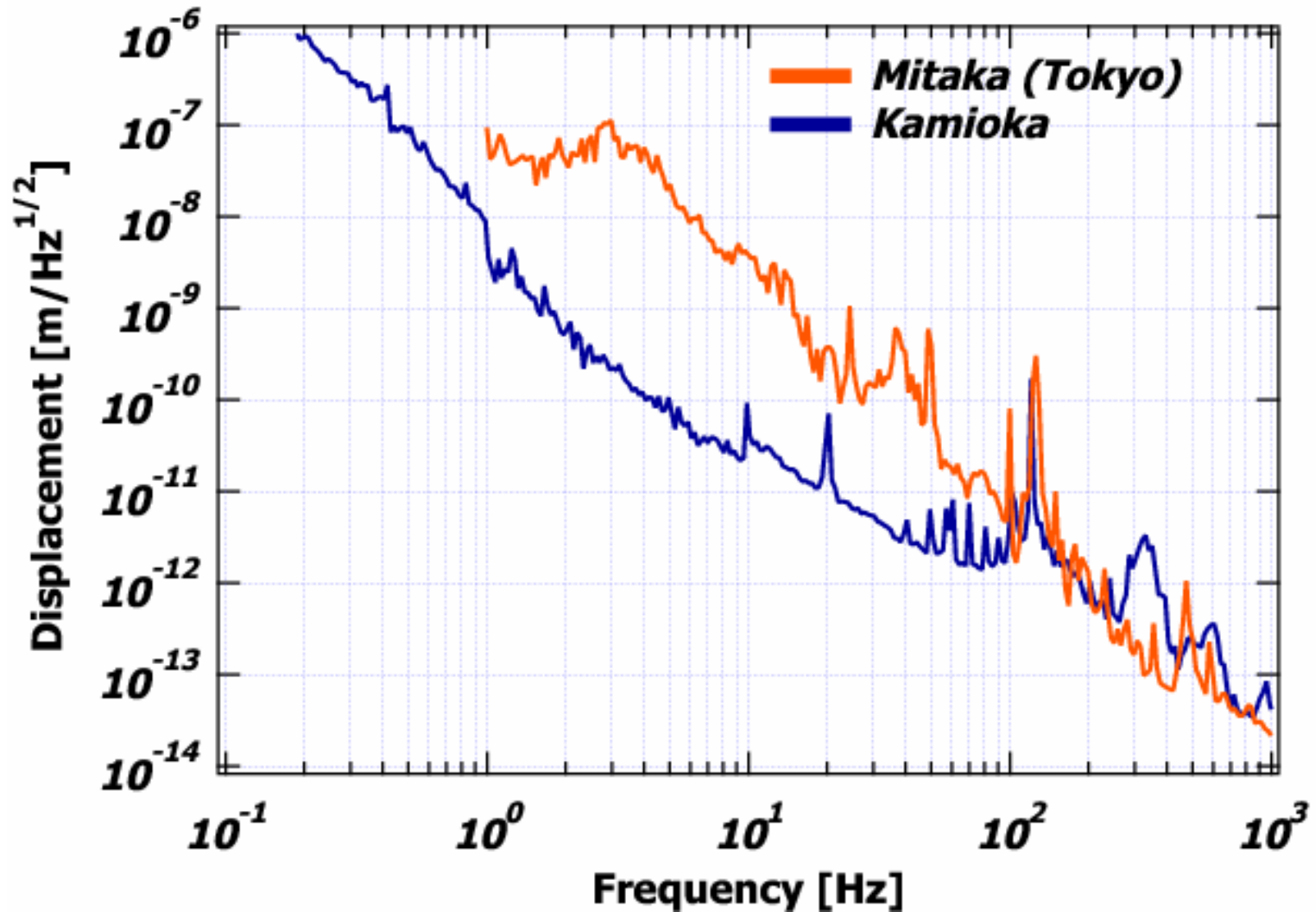




# LCGTの特徴

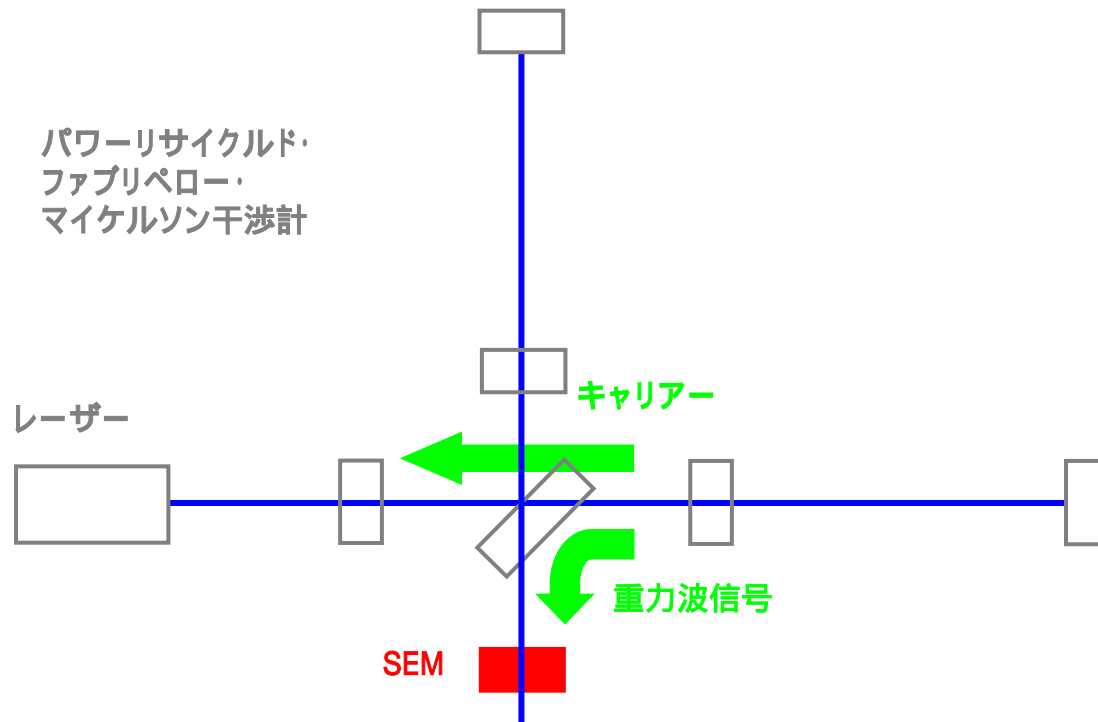
- **低温**  
鏡の熱雑音(ブラウン運動)を抑える
- **トンネル・超高性能防振装置**  
地面振動を抑える
- **帯域可変型干渉計**  
量子雑音の最適化

# 地面振動



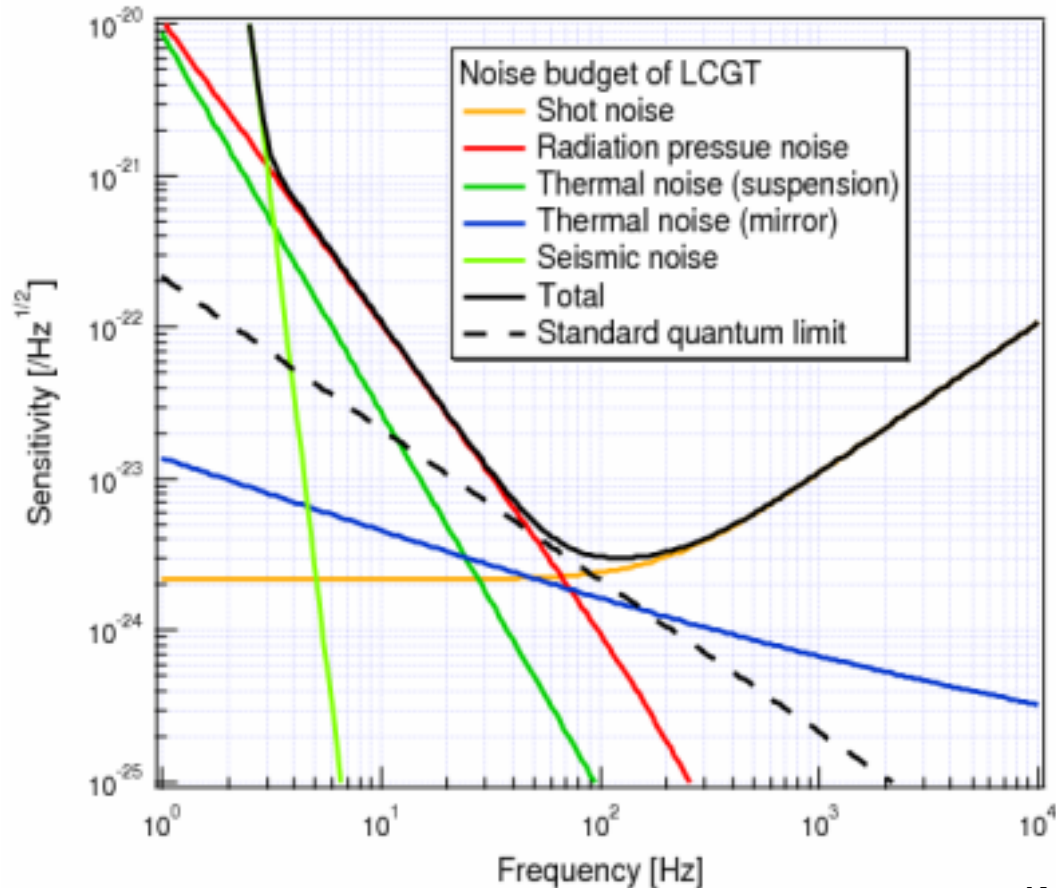
# 帯域可変型干渉計

- パワー・リサイクルド・ファブリペロー・マイケルソン干渉計に**シグナル・エクストラクション・ミラー (SEM)**を追加
- SEMにより重力波信号を腕共振器内でキャンセルする前に抜き出す
- SEMを**ディチューン**することにより狭帯域で高感度化もできる

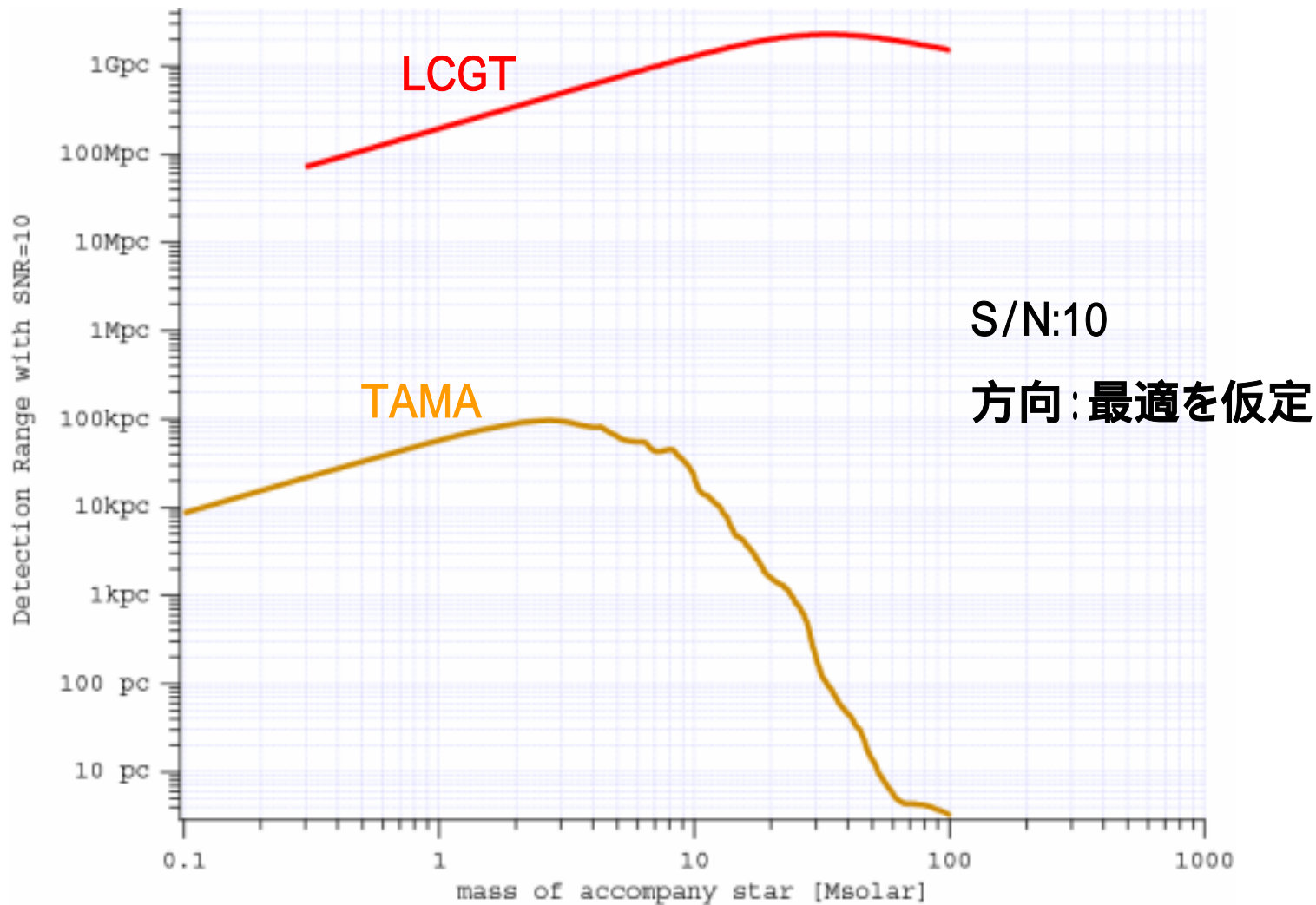


# LCGTの目標感度

## Goal sensitivity of LCGT



# LCGTのInspiral Range



# 現状

- 平成15年、16年と東大から概算要求  
– 非採択
- 来年も概算要求の予定

# CLIO

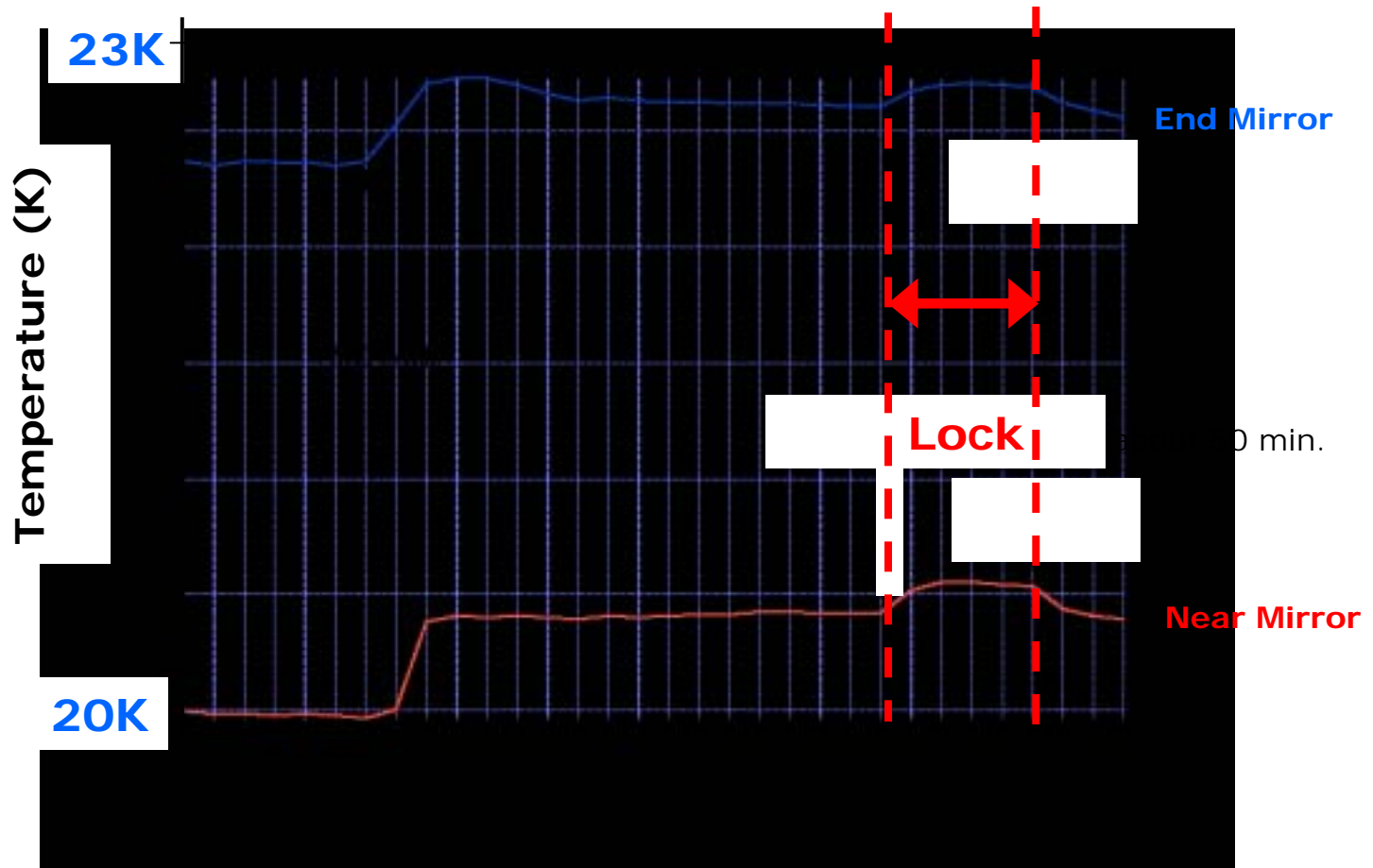
**C**ryogenic **L**aser **I**nterferometer **O**bservatory  
in Kamioka mine



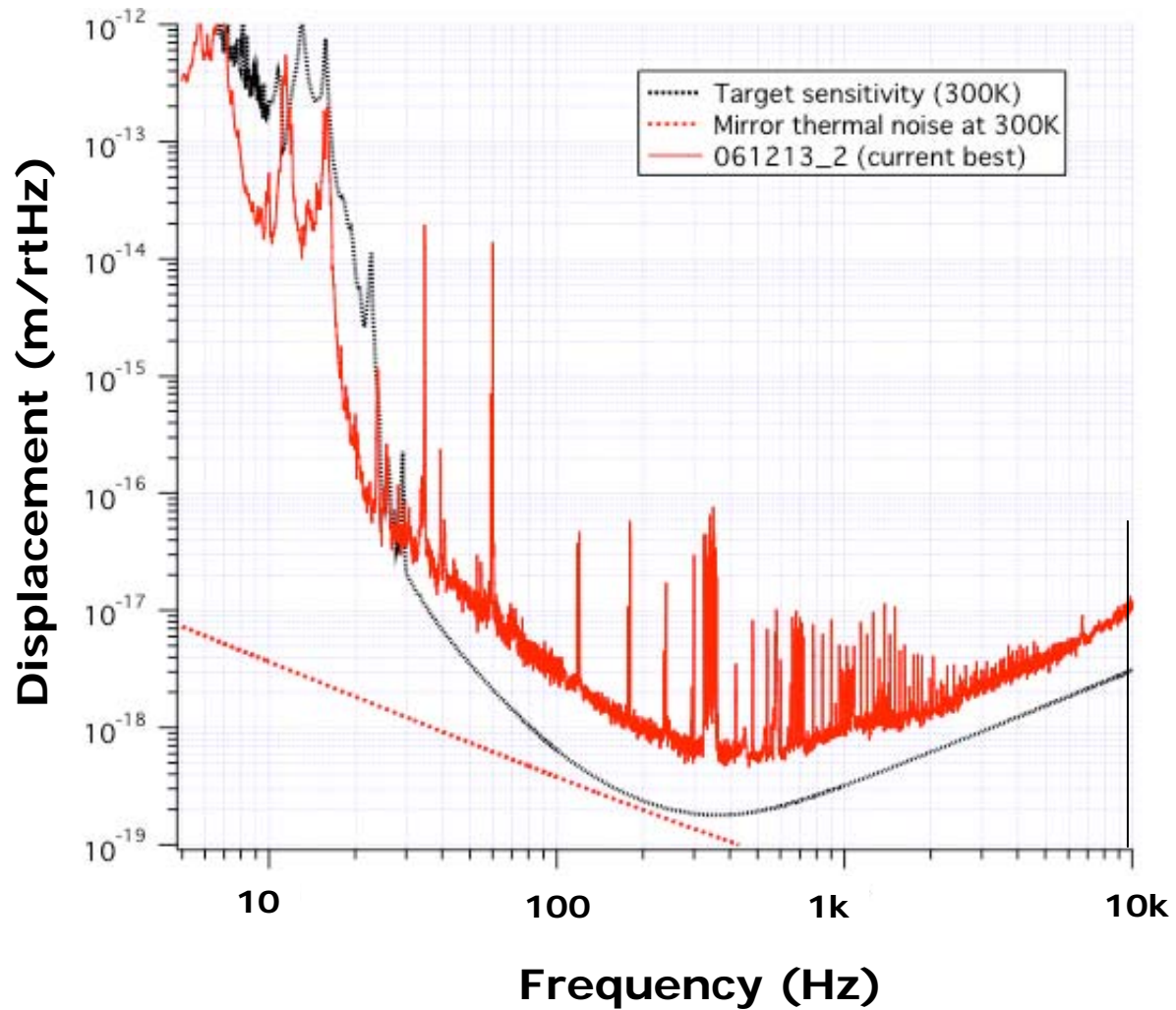


# これまでの成果

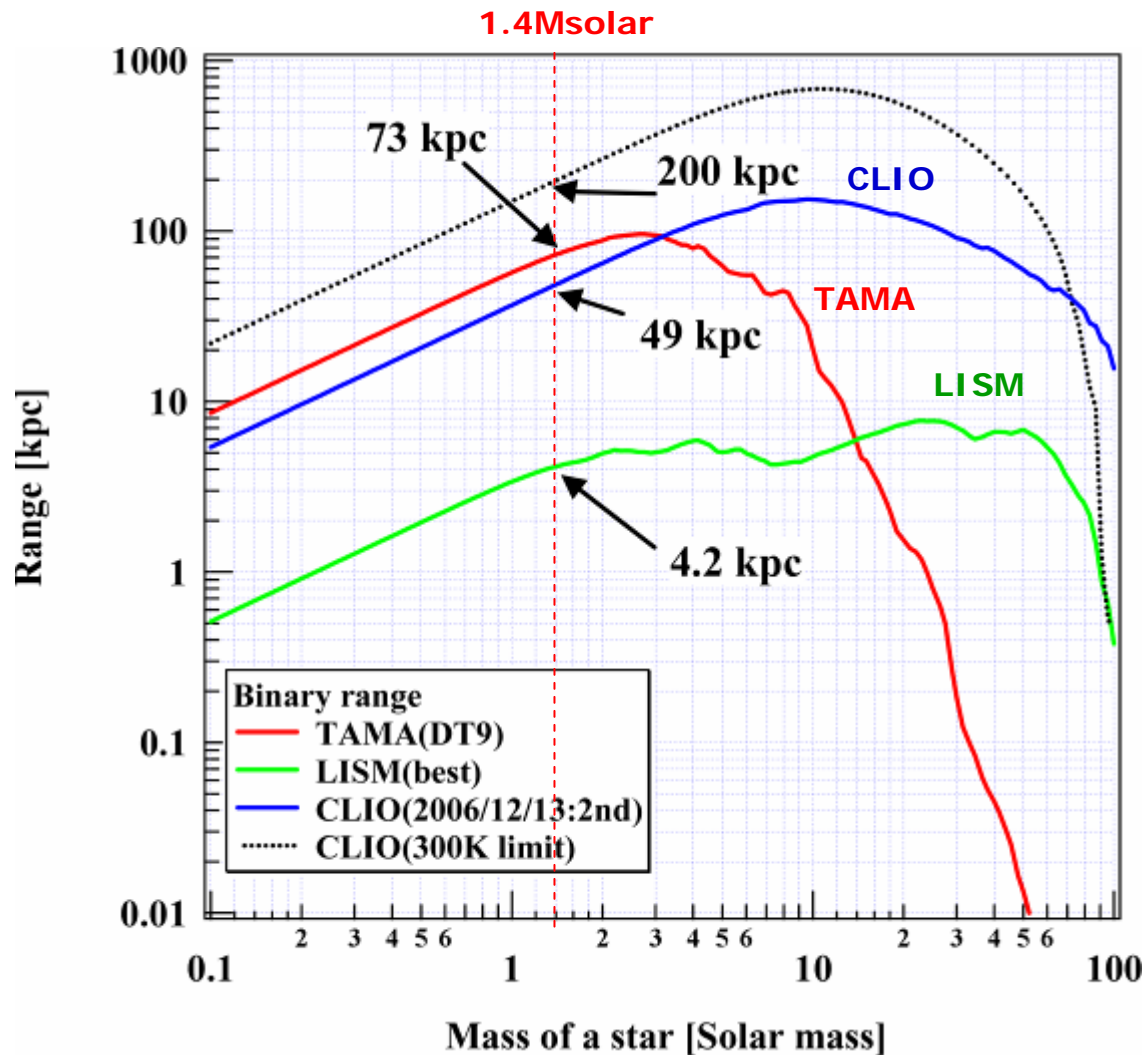
- 低温での動作に成功



# 感度 (@ 常温)



# インスパイラル・レンジ



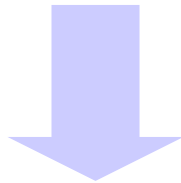
# 干渉計を宇宙に持っていくと もっと長くできる

- 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

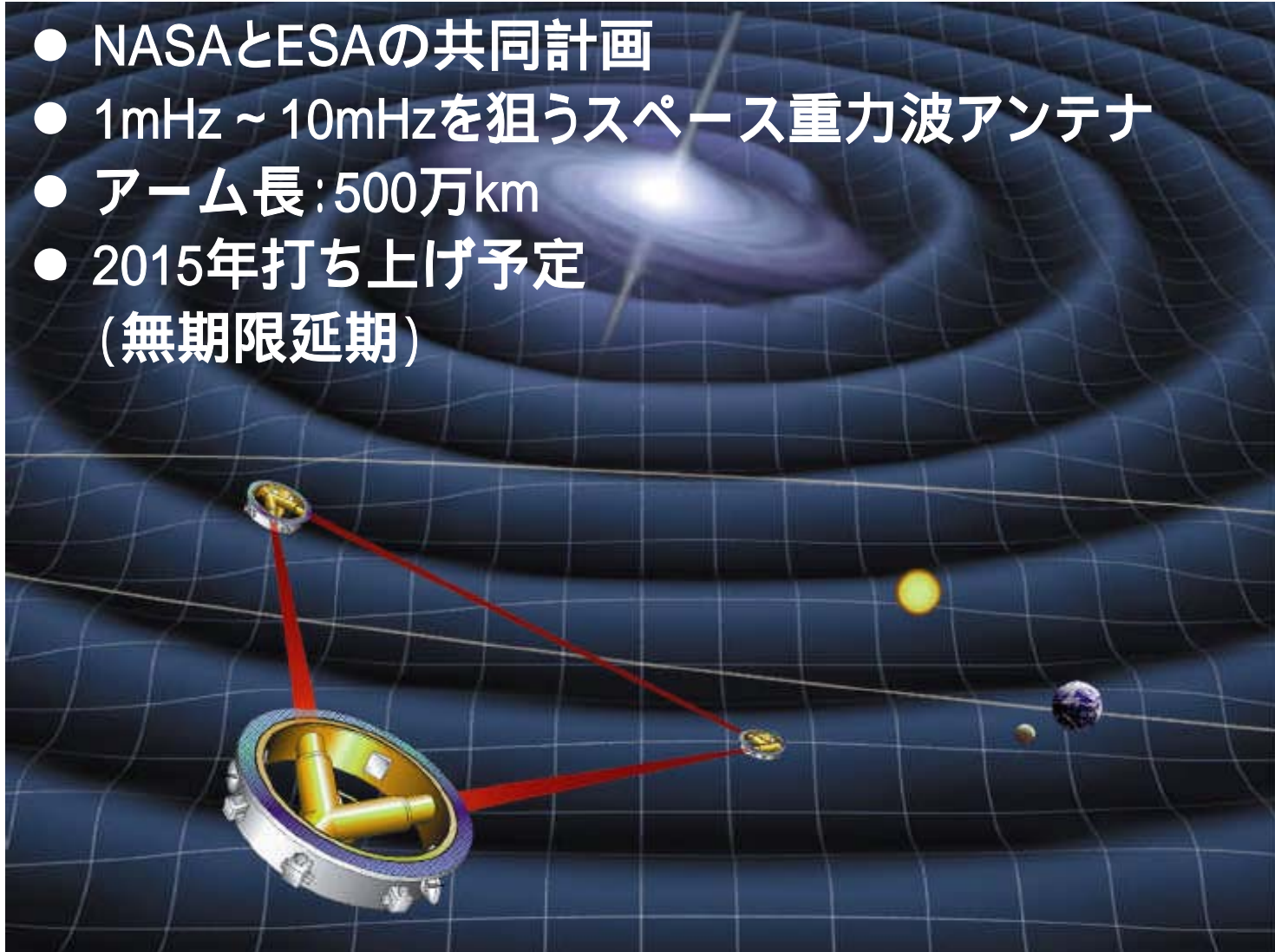
- 地面振動や重力場の揺らぎノイズが小さい



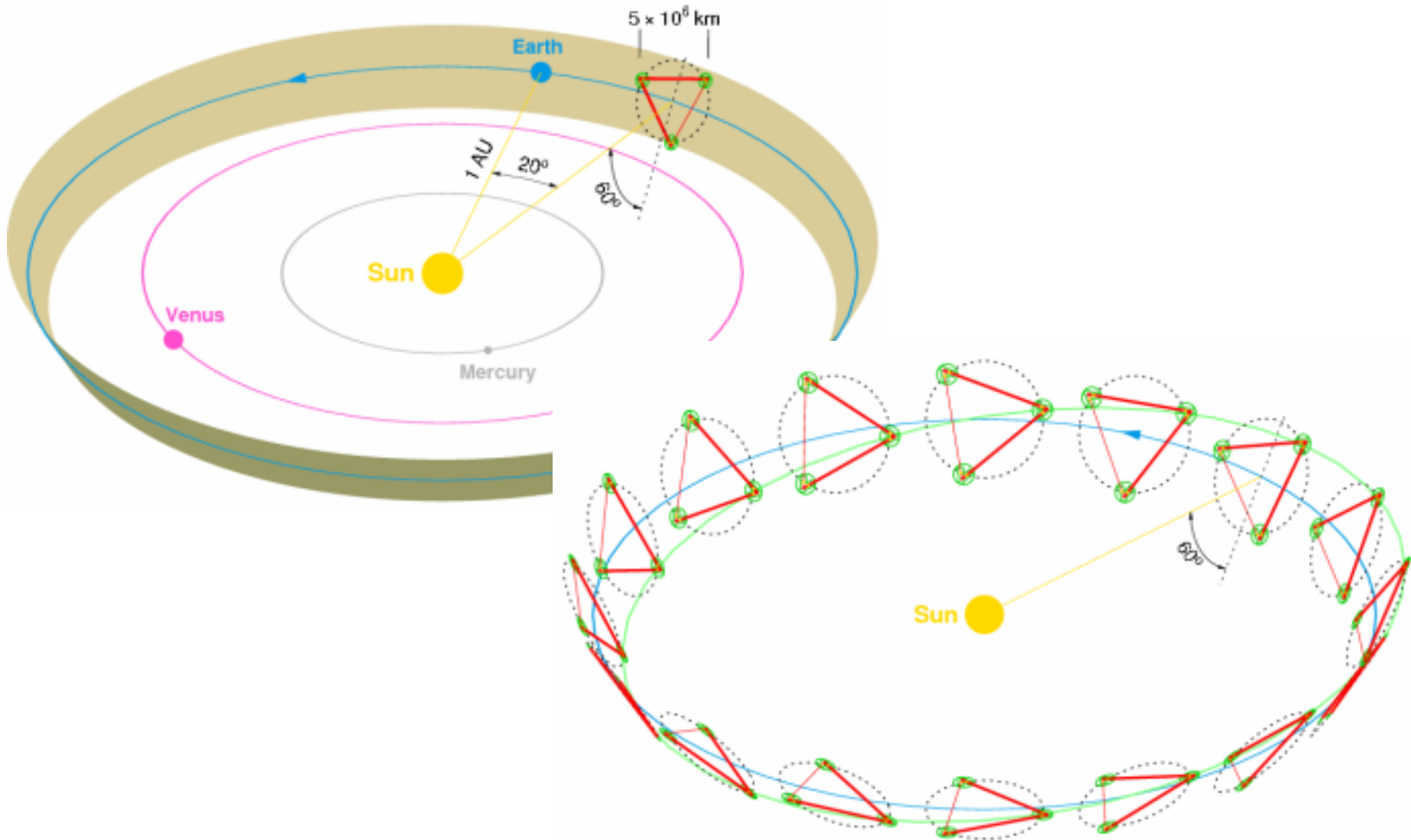
低周波で感度がよくなる

# LISA

- NASAとESAの共同計画
- 1mHz ~ 10mHzを狙うスペース重力波アンテナ
- アーム長: 500万km
- 2015年打ち上げ予定  
(無期限延期)



# LISAの軌道

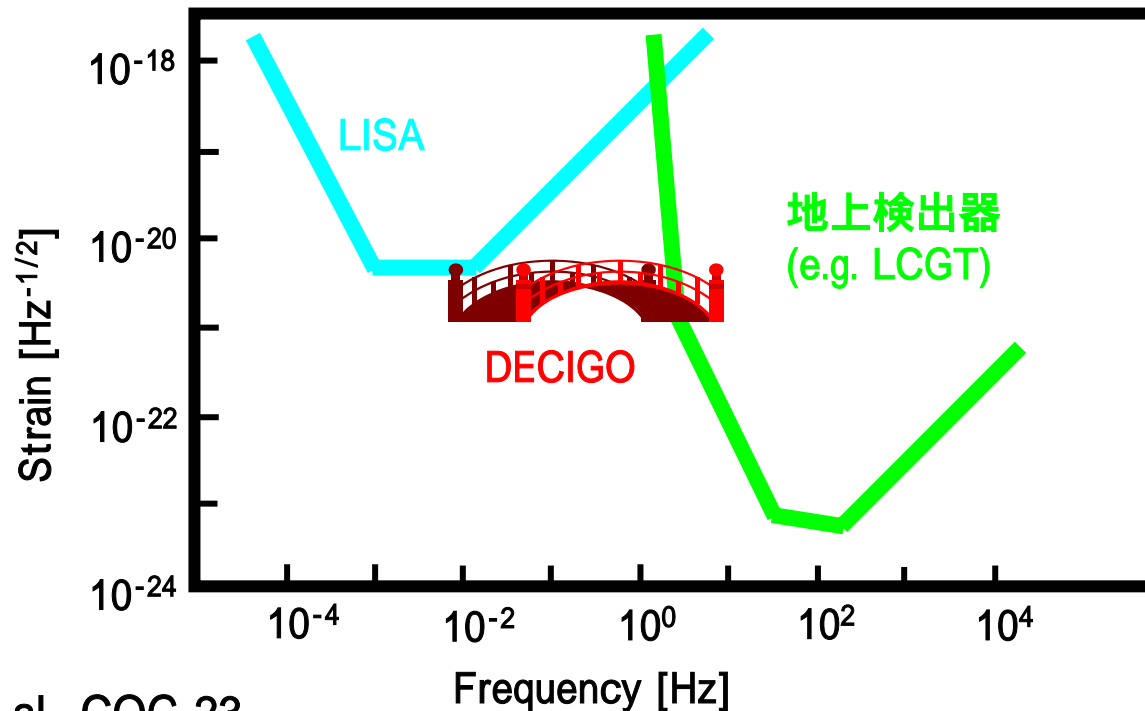




# DECIGOとは？

*Deci-hertz Interferometer Gravitational Wave Observatory*

- LISAと地上検出器の帯域のギャップを埋める
- 超高感度の実現



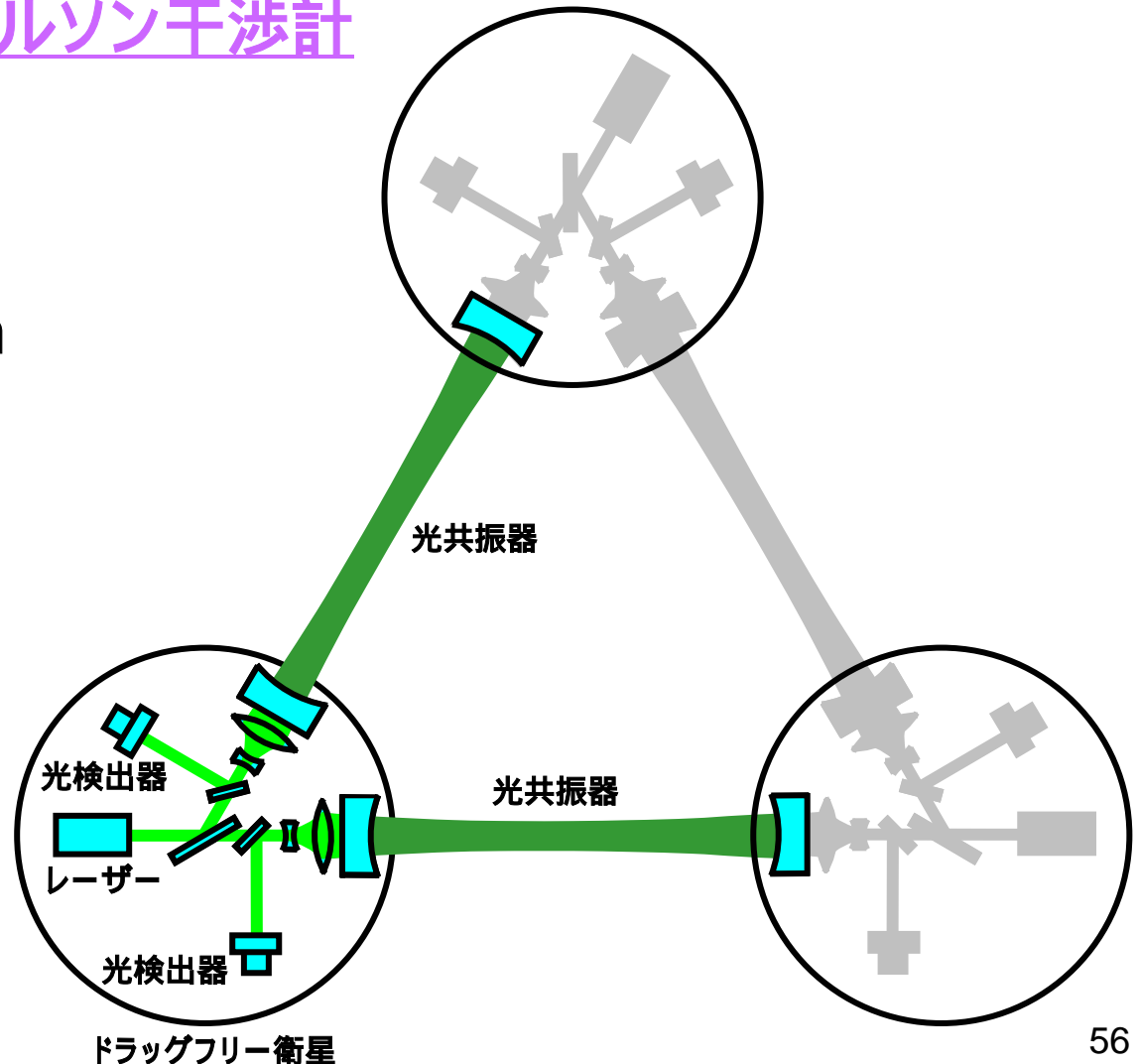
# WD連星からの重力波

- WD連星は我々の銀河にたくさんありすぎるため、そこからの重力波が**分離できず雑音となる。**
- LISAの感度はこの**Confusion Noise**で制限される。
- WD連星はすぐに合体するため**0.1Hz以上の重力波は出ない。**
- したがって**0.1Hz以上では極端に高い感度を実現**することができる。

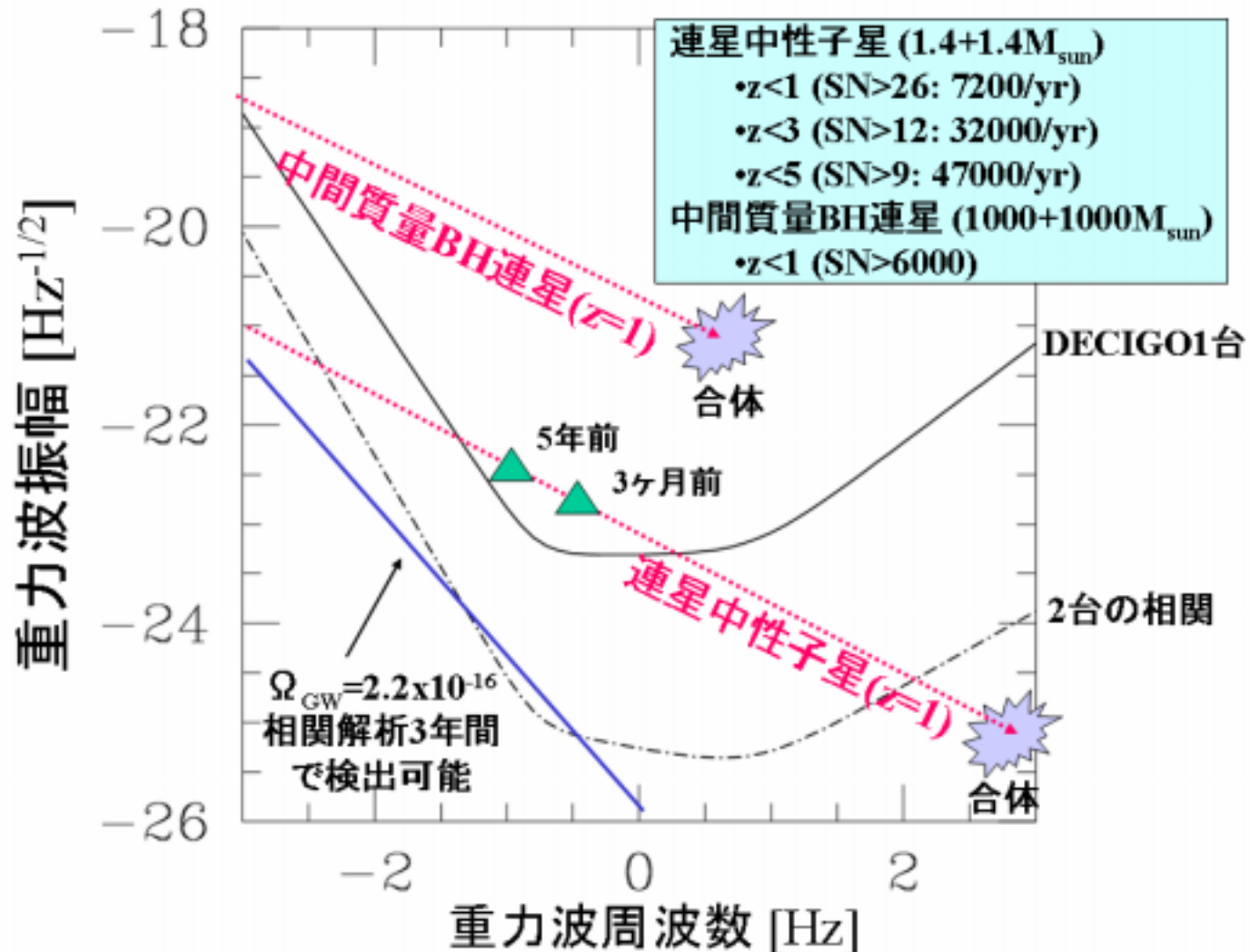
# 予備概念設計

## ファブリペロー・マイケルソン干渉計

アーム長: 1000 km  
レーザーパワー: 10 W  
レーザー波長: 532 nm  
ミラー直径: 1 m  
ミラー質量: 100 kg  
フィネス: 10

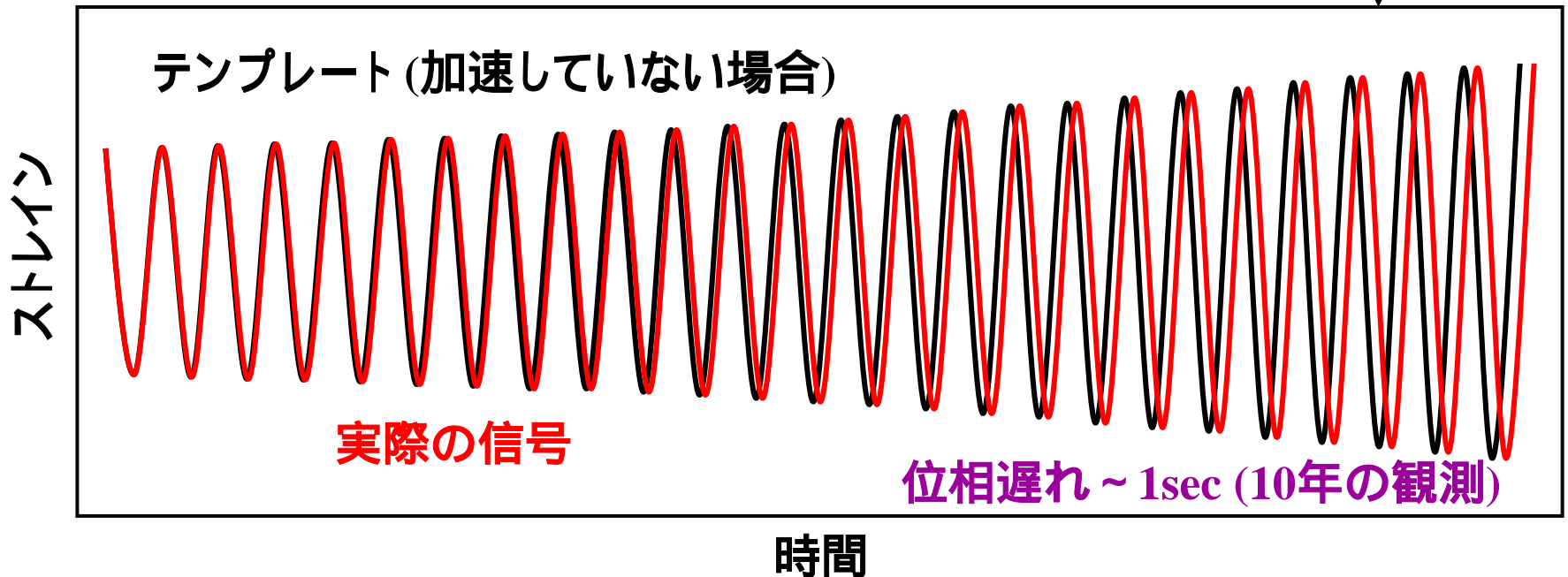
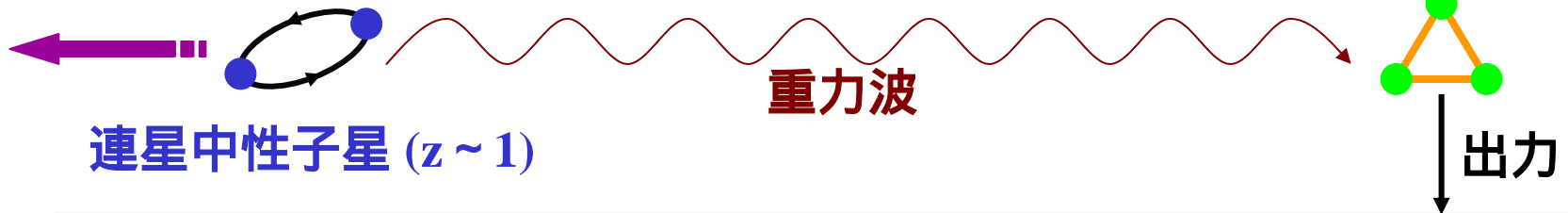


# DECIGOの目標感度と重力波源



# 宇宙の膨張加速度の直接計測

膨張 + 加速？



# DECIGOによる ダークエネルギーの制限

中性子星連星までの**距離 赤方偏移**関係から  
モデルに制限 加速膨張(超新星と同じ)

- ・ 距離 ← チャープシグナルから、直接決定

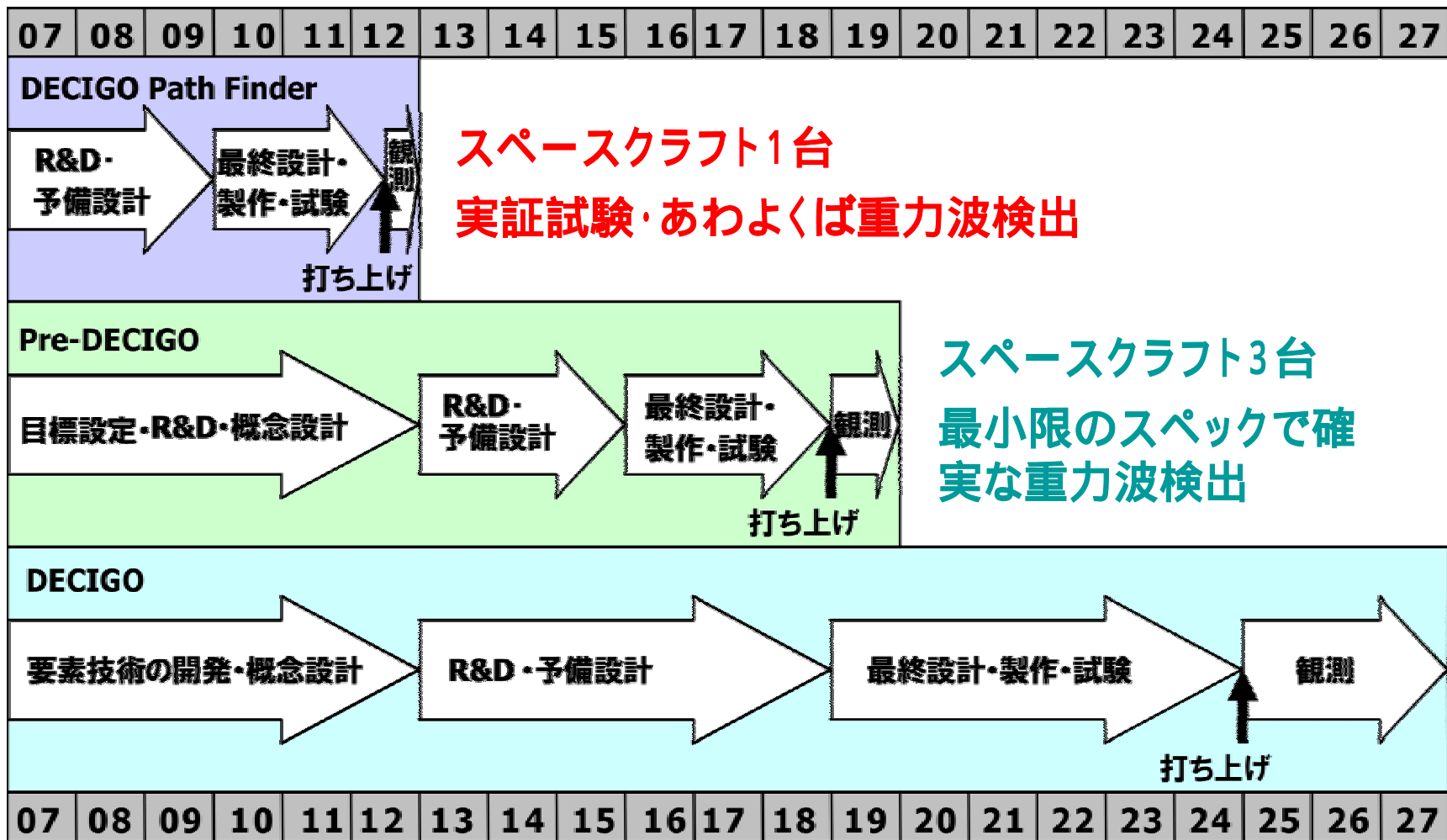
- ・ 赤方偏移

  - ← host galaxy, host quasar を特定

角度分解能     $\sim 10\text{arcmin}$     (1 ユニット)  
                   $\sim 10\text{arcsec}$     (3 ユニット)    at  $z=1$

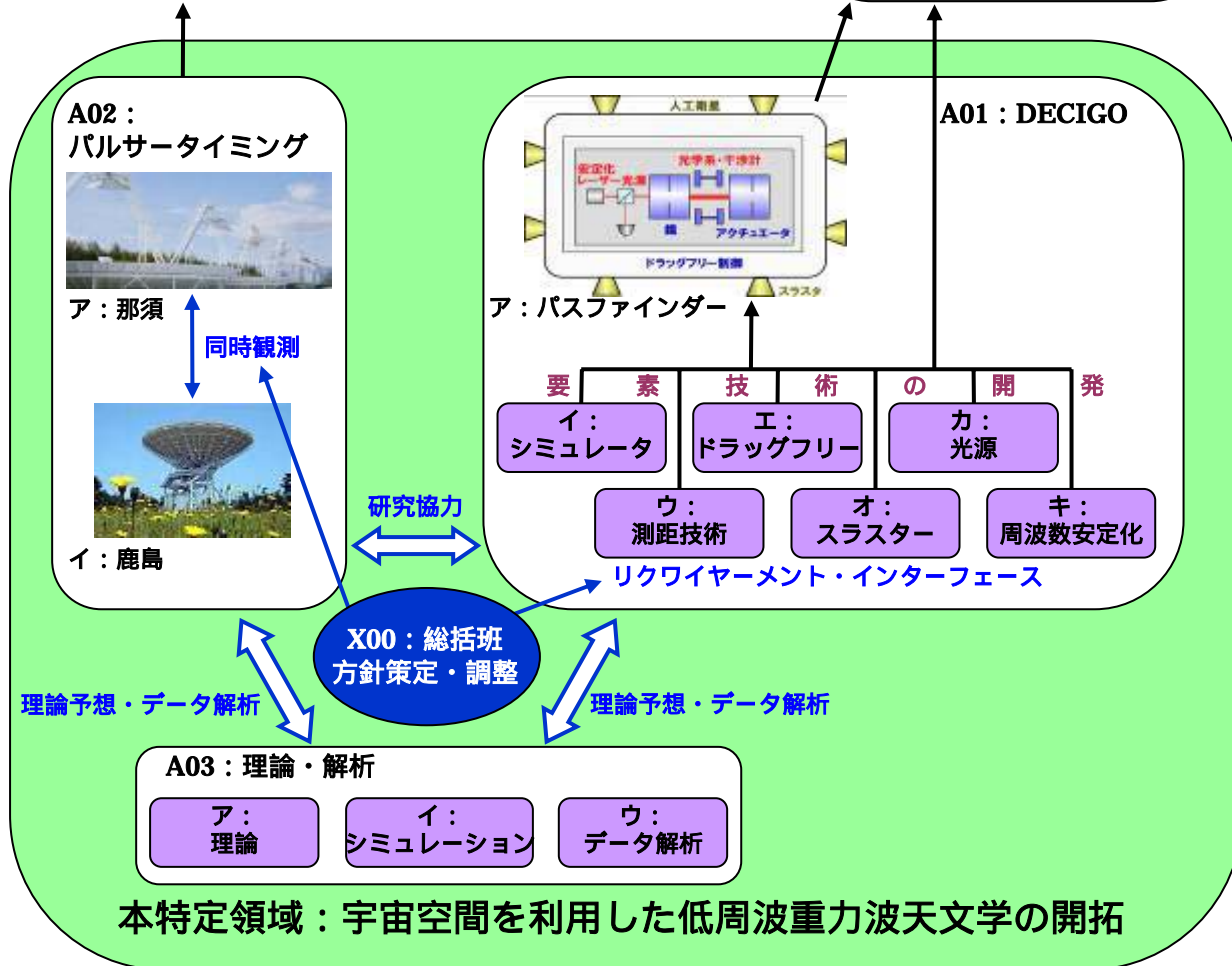
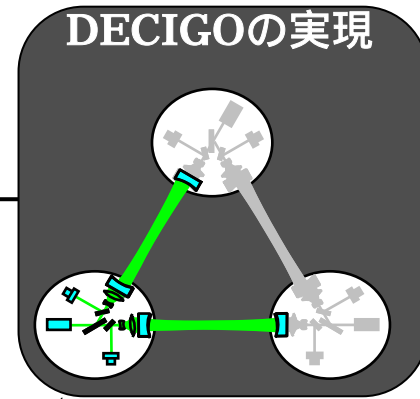
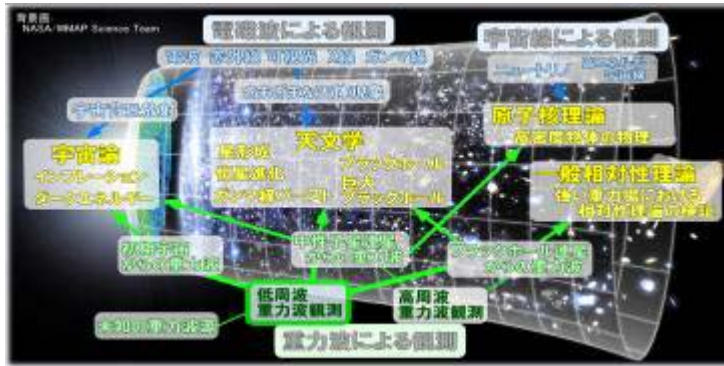


# DECIGO実現へのロードマップ



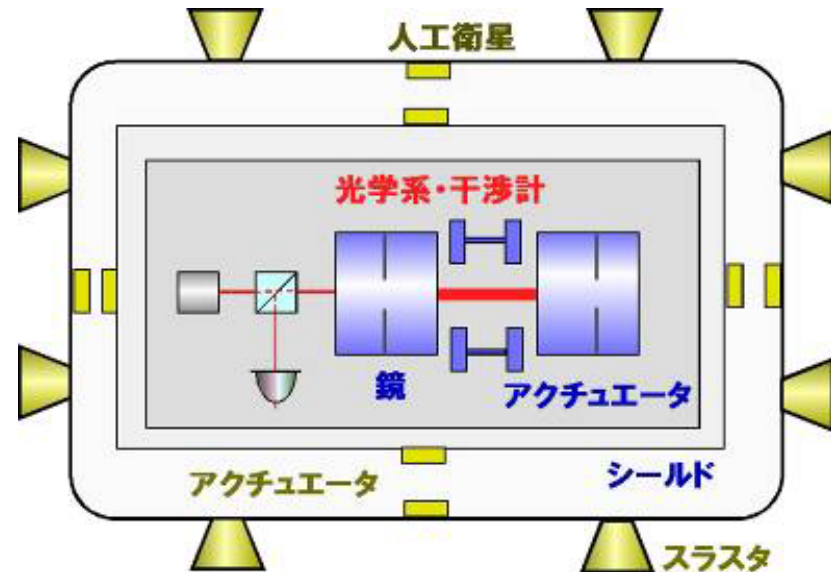
# 特定領域申請中

## 重力波天文学の創成



# DECIGO-Pathfinder

- DECIGOのための宇宙実証試験
- 低周波の重力波観測
  - BH準固有振動 ( $10^5 M_{\text{sun}}$ , 1Mpc)
  - 中間質量BH連星の合体 ( $10^3 M_{\text{sun}}$ , 10kpc)
- コスト: 8億円
- 開発期間: 5.5年
- 打ち上げ:  
JAXAの小型衛星  
打上げ公募



# 第3世代検出器のための 先進的技術

# 天文台での研究

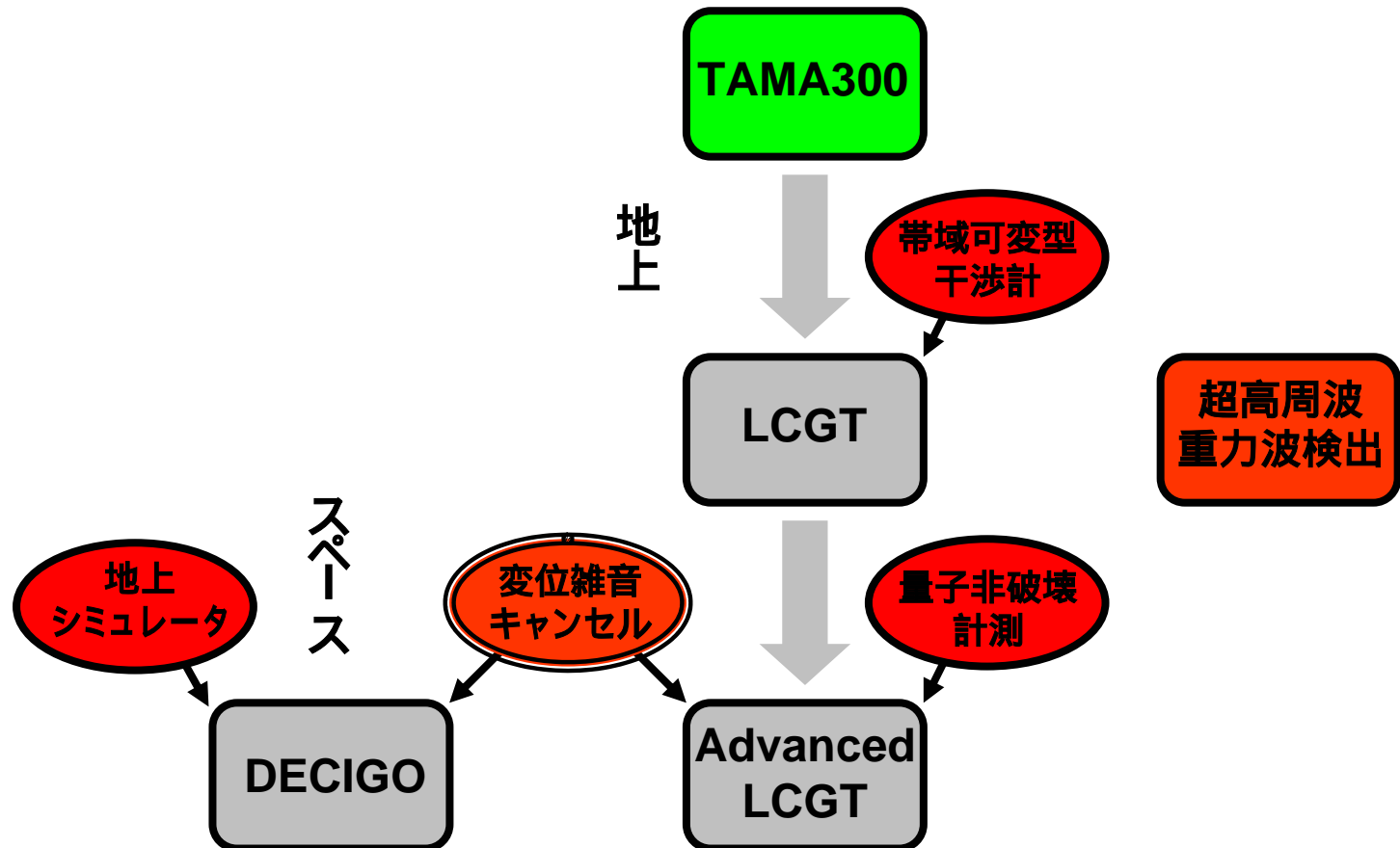
周波数

1mHz-10Hz

10Hz-10kHz

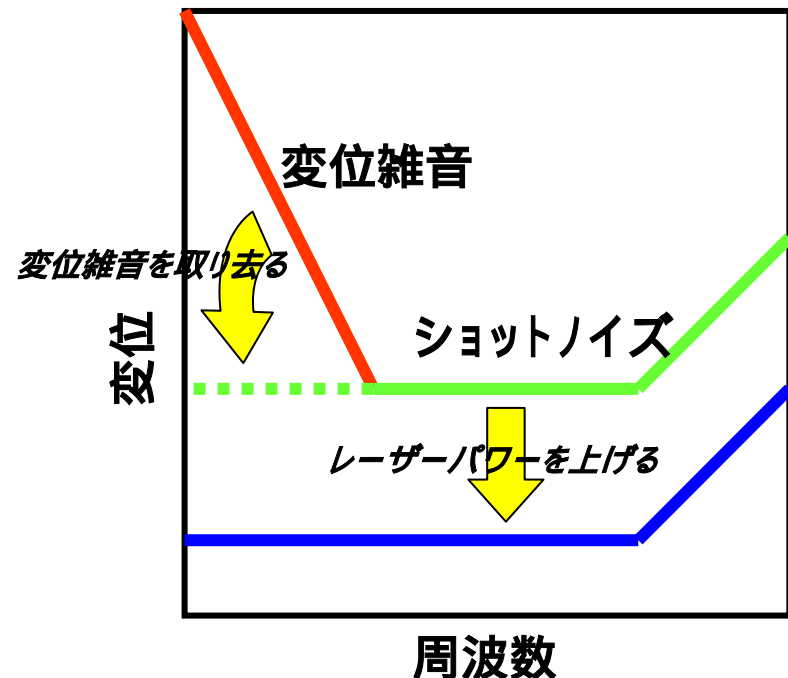
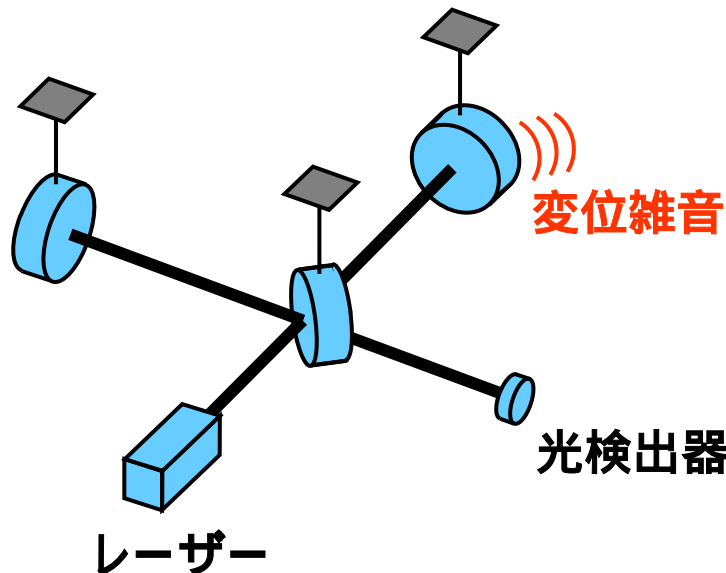
100kHz-100MHz

時間



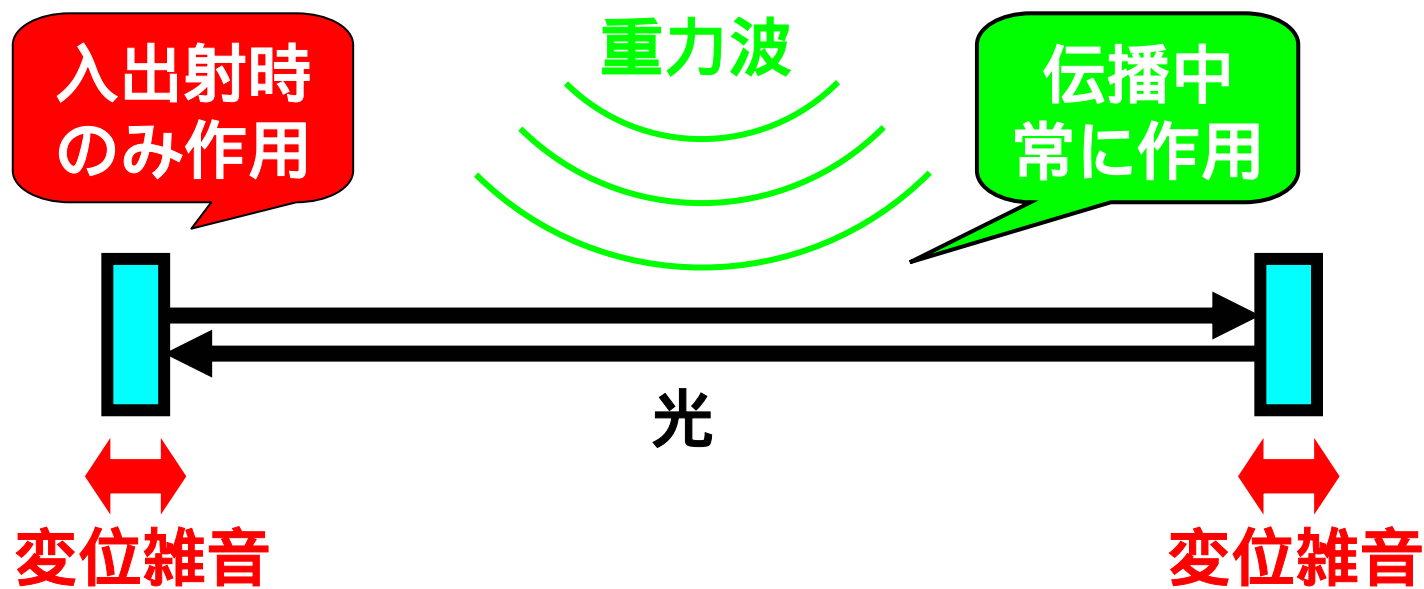
# 変位雑音キャンセルに関する研究

- 変位雑音：地面振動、熱雑音、輻射圧雑音
- 変位雑音を取り去る ショットノイズだけ残る
- レーザーパワーを上げる 感度は無限に上がる



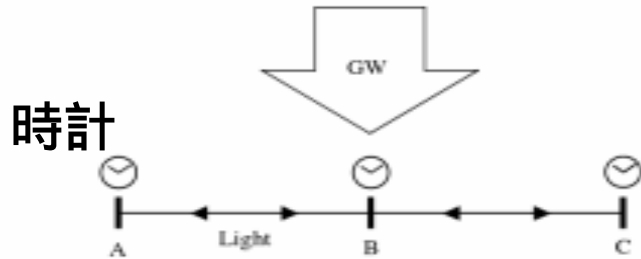


# 原理その1: 重力波信号と変位雑音は光に対する作用が違う

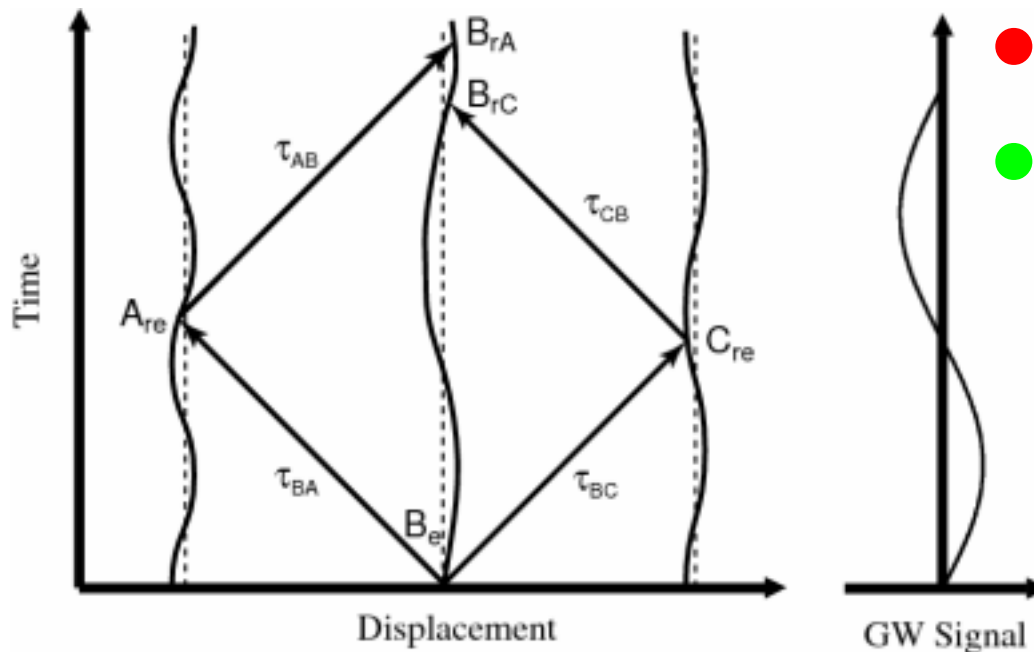


重力波の波長 ~ 物質間距離だとその差は顕著

# 変位雑音を取り去る



$$\tau_{BA} - \tau_{AB} + \tau_{BC} - \tau_{CB}$$



- 変位信号がキャンセル
- 重力波信号は残る

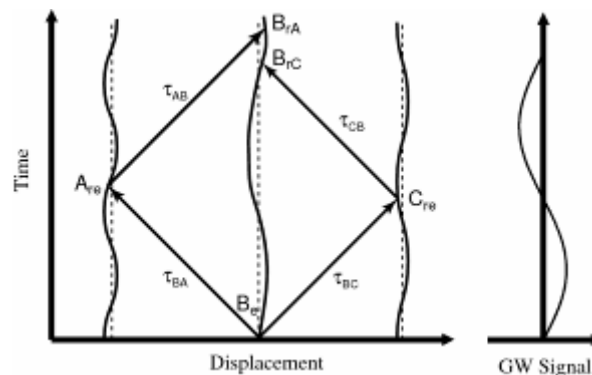
Kawamura and Chen, PRL,  
93, (2004) 211103

# なぜ変位ノイズが消せるのか？

測定値数 ( 4 個 ) > 変位パラメタ数 ( 3 個 )

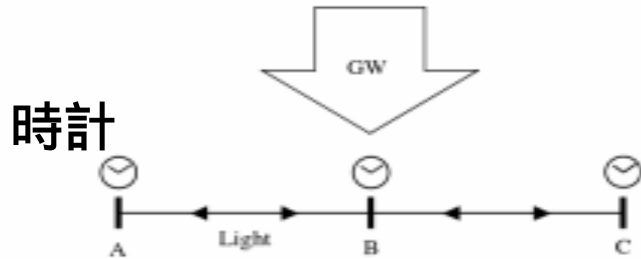
測定値: AB間行き帰り ( 2 個 ) + BC間行き帰り ( 2 個 )

変位パラメタ: A, B, C各検出器 1 個

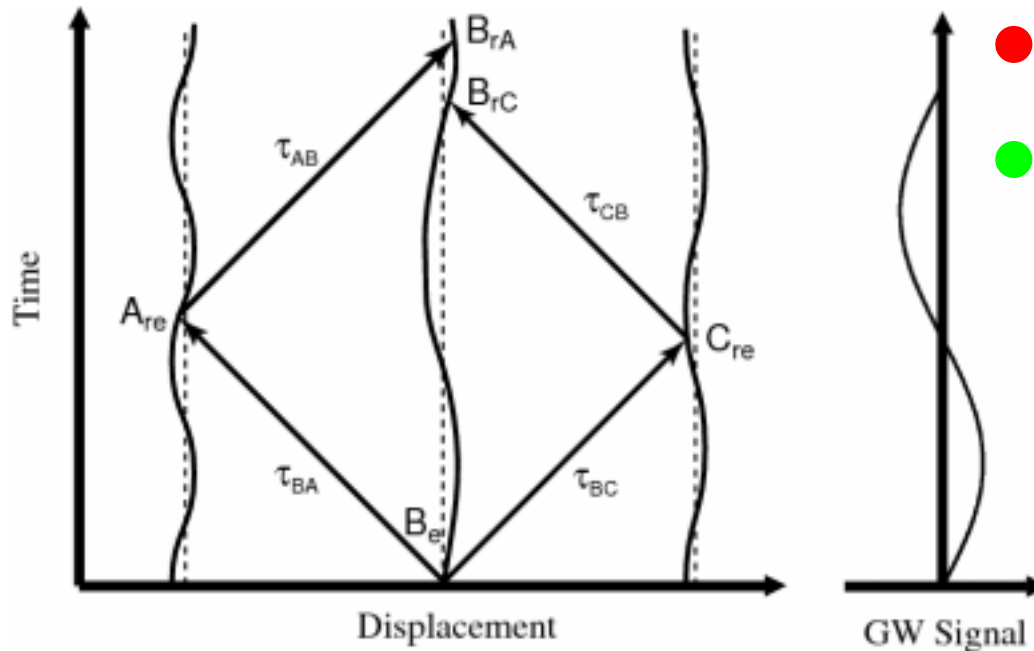


したがって変位パラメタを含まない測定値のコンビネーションが一つ存在

# 時計の雑音



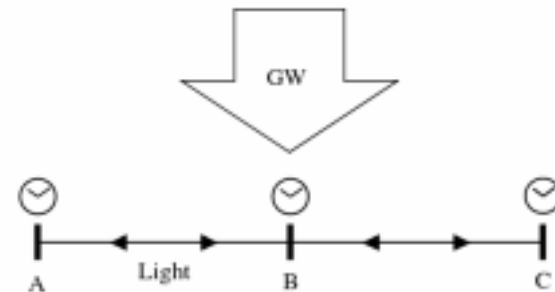
$$\tau_{BA} - \tau_{AB} + \tau_{BC} - \tau_{CB}$$



- 変位雑音はキャンセル
- 時計の雑音は残る

# なぜ時計の雑音は残るのか？

時計パラメタの数: 3個  
変位パラメタ: 3個  
測定値: 4個



したがって時計・変位両パラメタを含まない測定値のコンビネーションはつくれない

# 時計の雑音も取り去るには？

d:次元数、N:物体数として

変位パラメタの数： $Nd$

時計パラメタの数： $N$

合計： $N(d+1)$

観測値の数： $N(N-1)$

したがって $N(N-1) > N(d+1)$  すなわち $N > d+2$  (2次元なら5個、3次元なら6個)なら変位・時計パラメタを持たない観測値のコンビネーションが作れる

重力波信号を持つかどうかチェック

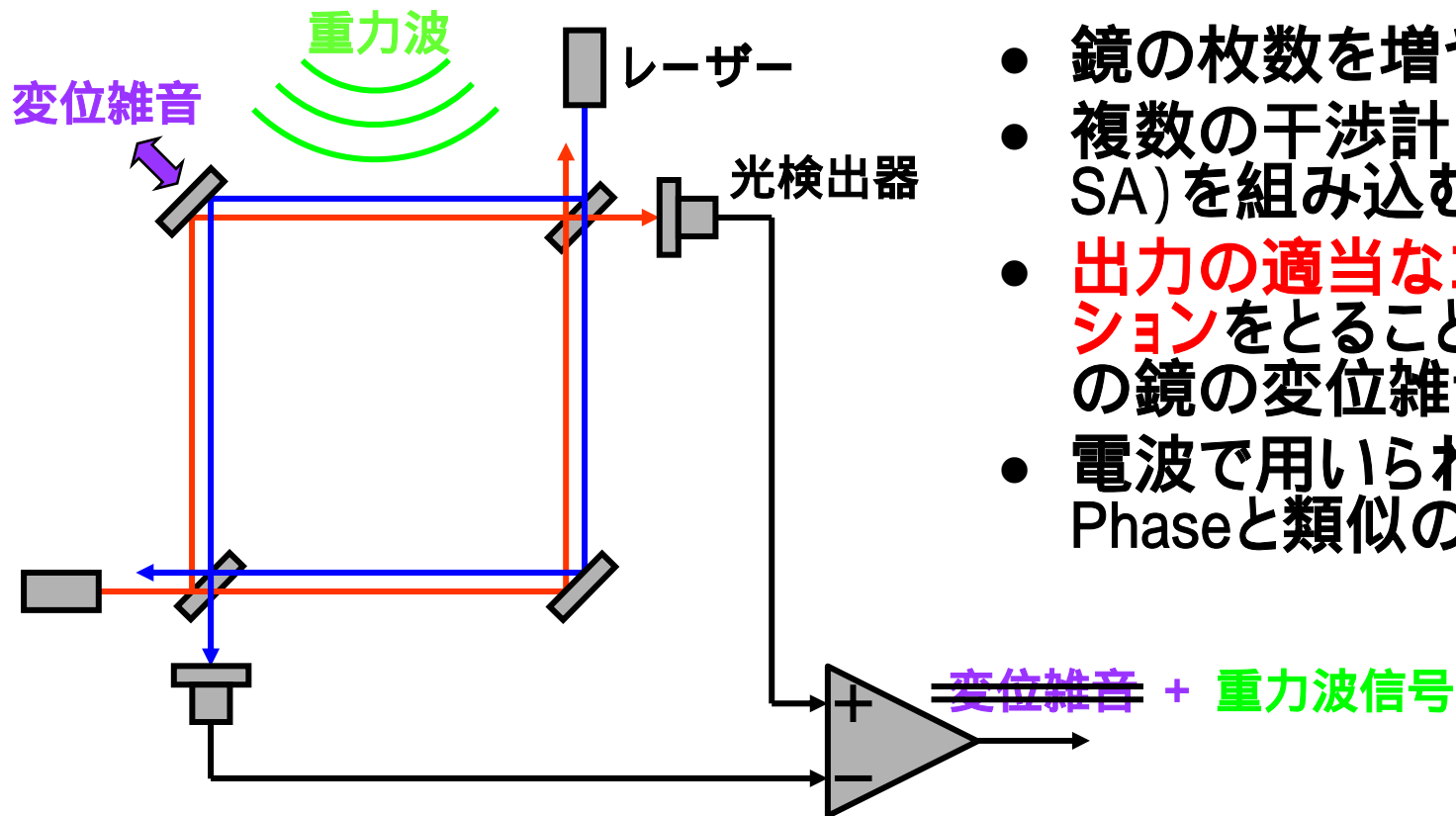
# 干渉計への応用

## 伝播時間計測法と干渉計の対応

伝播時間計測法	干渉計
物体の変位	ミラーの変位
時計	光源の周波数



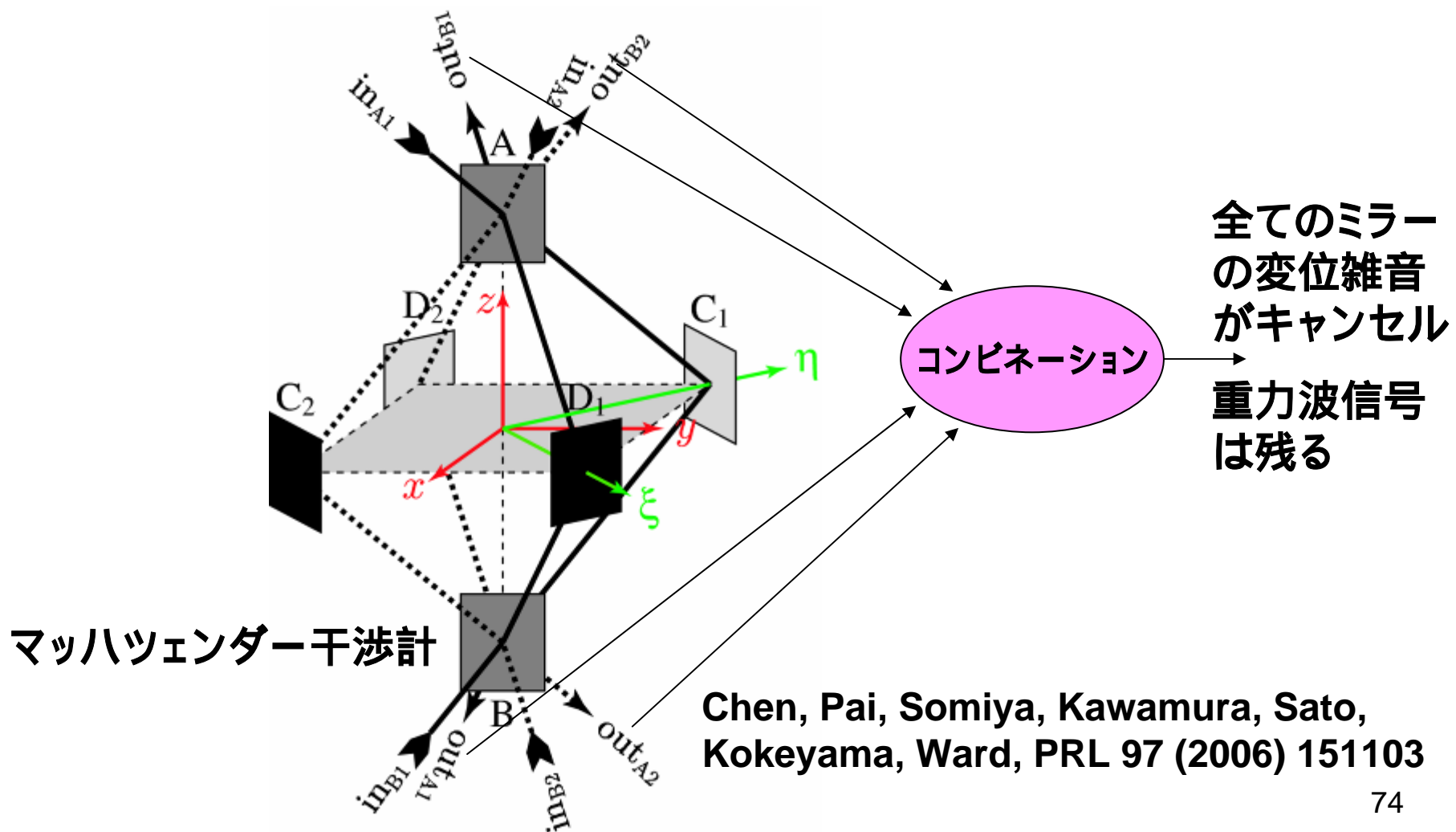
# 原理その2： 複数の干渉計の組み合わせ



- 鏡の枚数を増やす
- 複数の干渉計 (MH、MZ、SA) を組み込む
- 出力の適切なコンビネーションをとることにより全ての鏡の変位雑音が消せる
- 電波で用いられる Closure Phase と類似の技術

双方向マッハツェンダー干渉計

# 変位雑音キャンセル干渉計の例 (3次元で6個のミラー)



# 現状

- **原理確認実験終了**
  - 双方向入射のマッハツェンダー干渉計を使って変位雑音のキャンセルと重力波シミュレーション信号が残ることを確認
  - Sato, Kawamura, Kokeyama, Ward, Chen, Pai, and Somiya, submitted to PRL
- **光共振器を使って有効周波数領域を広げる理論的研究続行中**

# まとめ

- LIGOのS5で重力波検出がなされる可能性もある
- Advanced LIGOやLCGTなら、中性子星連星の合体からの重力波の検出が、年間数回程度の頻度で期待できる
- DECIGOが実現すれば、頻繁な検出が期待でき、重力波天文学の創成へとつながる
- さらなる高感度化を目指してさまざまな先進的技術の開発が行われている