

# 重力波検出用 宇宙空間レーザー干渉計と 技術的波及

2001年11月22日

電磁波計測部門セミナー

@通信総合研究所

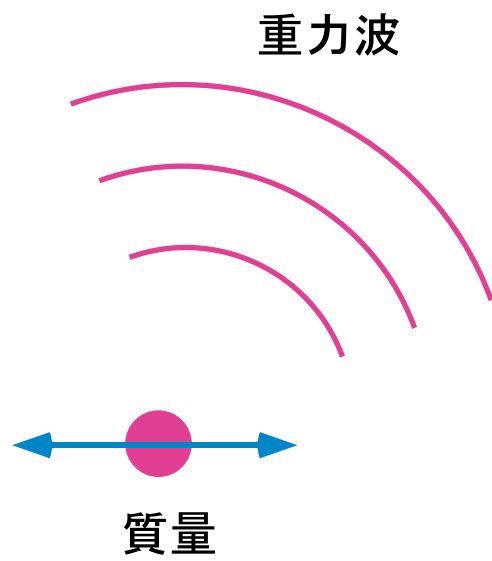
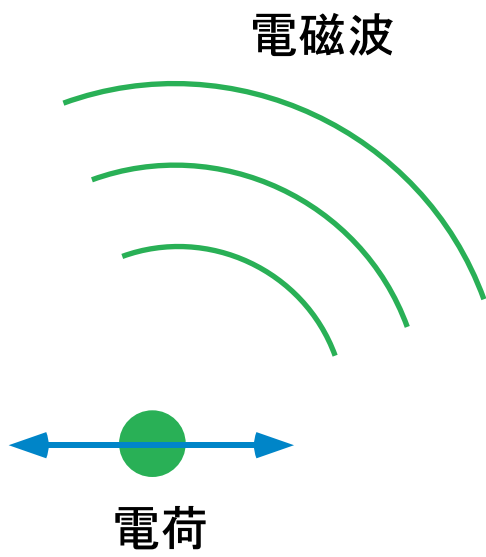
川村静児

国立天文台

# 内容

- 1 . 重力波とは？
- 2 . レーザー干渉計重力波アンテナ
- 3 . 地上の重力波検出計画
  - ・ TAMA300
- 4 . スペースの重力波検出計画
  - ・ LISA
  - ・ 日本の計画
- 5 . 技術的波及
- 6 . まとめ

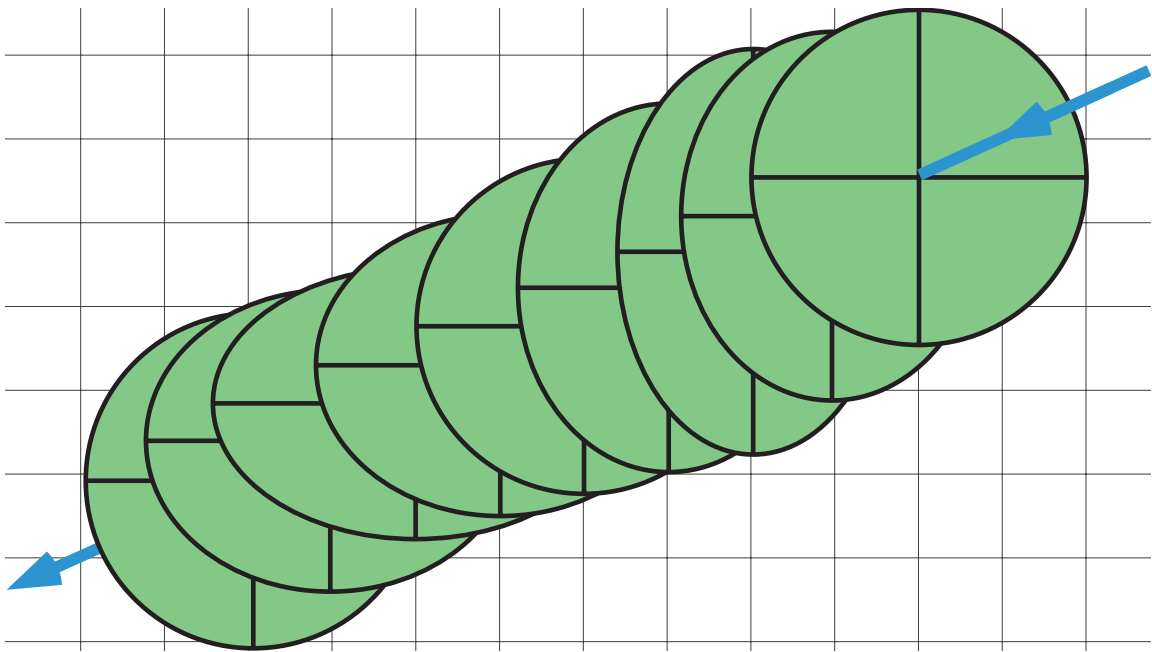
# 重力波と電磁波



# What is Gravitational Wave?

Propagate as transverse wave with speed of light

Change distance between masses tidally



# 重力とは何か？

## ニュートンの万有引力

- ・ 等価原理（重力 = 慣性力）により  
加速度座標系で消すことが可能

## 重力の本質は潮汐力

- ・ 潮汐力は座標系で消すことができない

# 重力波の放射

質量を持った物体が動けば重力波を放射する

- ・ 重ければ重いほど、速ければ速いほど放出される重力波の量は大きい

# 重力波の検出

重力波によって引き起こされる物体間の距離の変化を測ればよい

# 重力波は 未だ発見されていない

重力波が引き起こす距離の変化はあまりにも小さい

- ・ 地上での人工放射

$$\ll 10^{-30}$$

- ・ 宇宙からの重力波

$$\sim 10^{-20}$$

# 重力波の存在は間接的に 確認されている

連星中性子星 PSR1913+16 の公転周期の減少が

重力波による系のエネルギー減少で説明される

Hulse&Taylor :

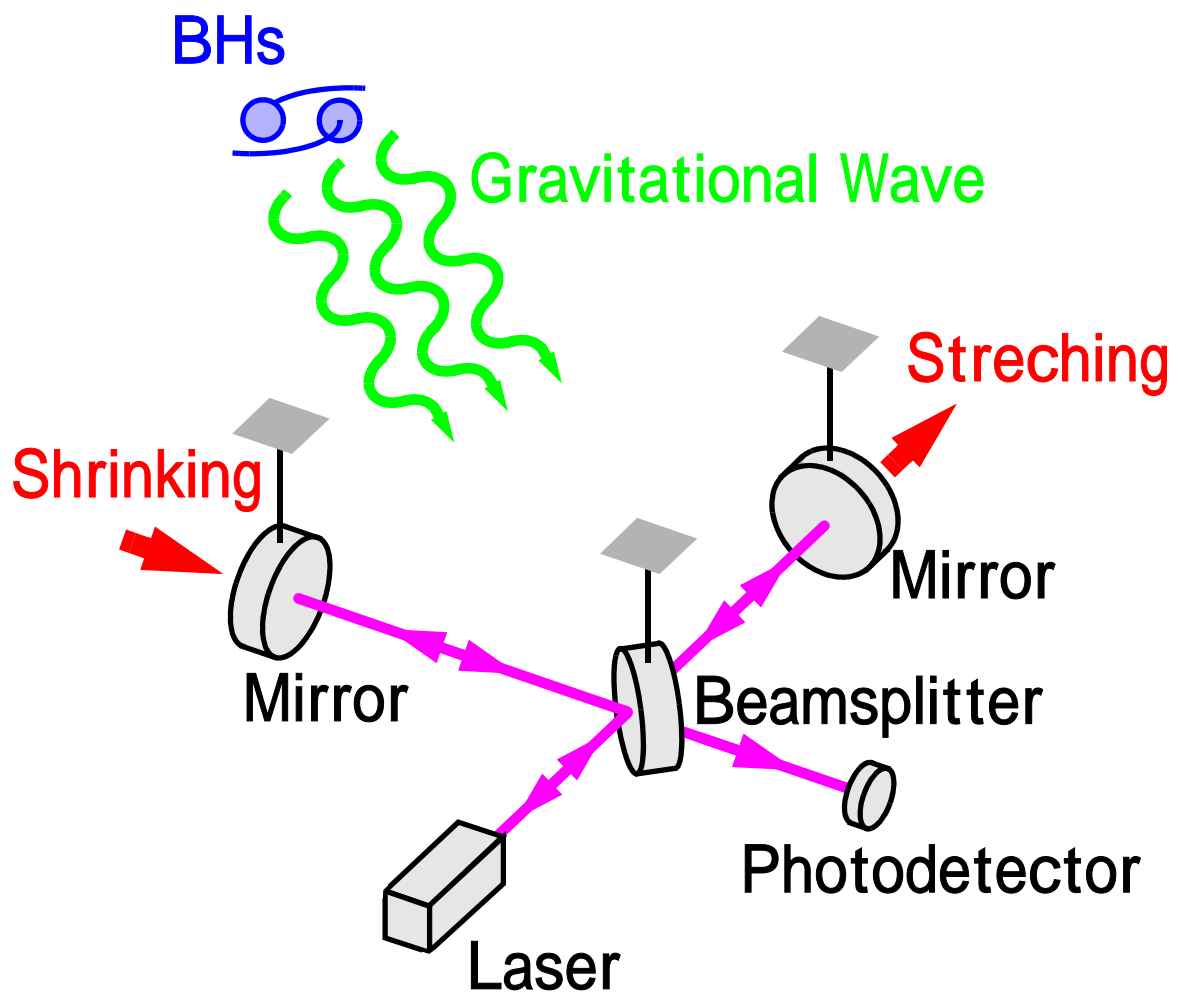
1993 年度ノーベル賞

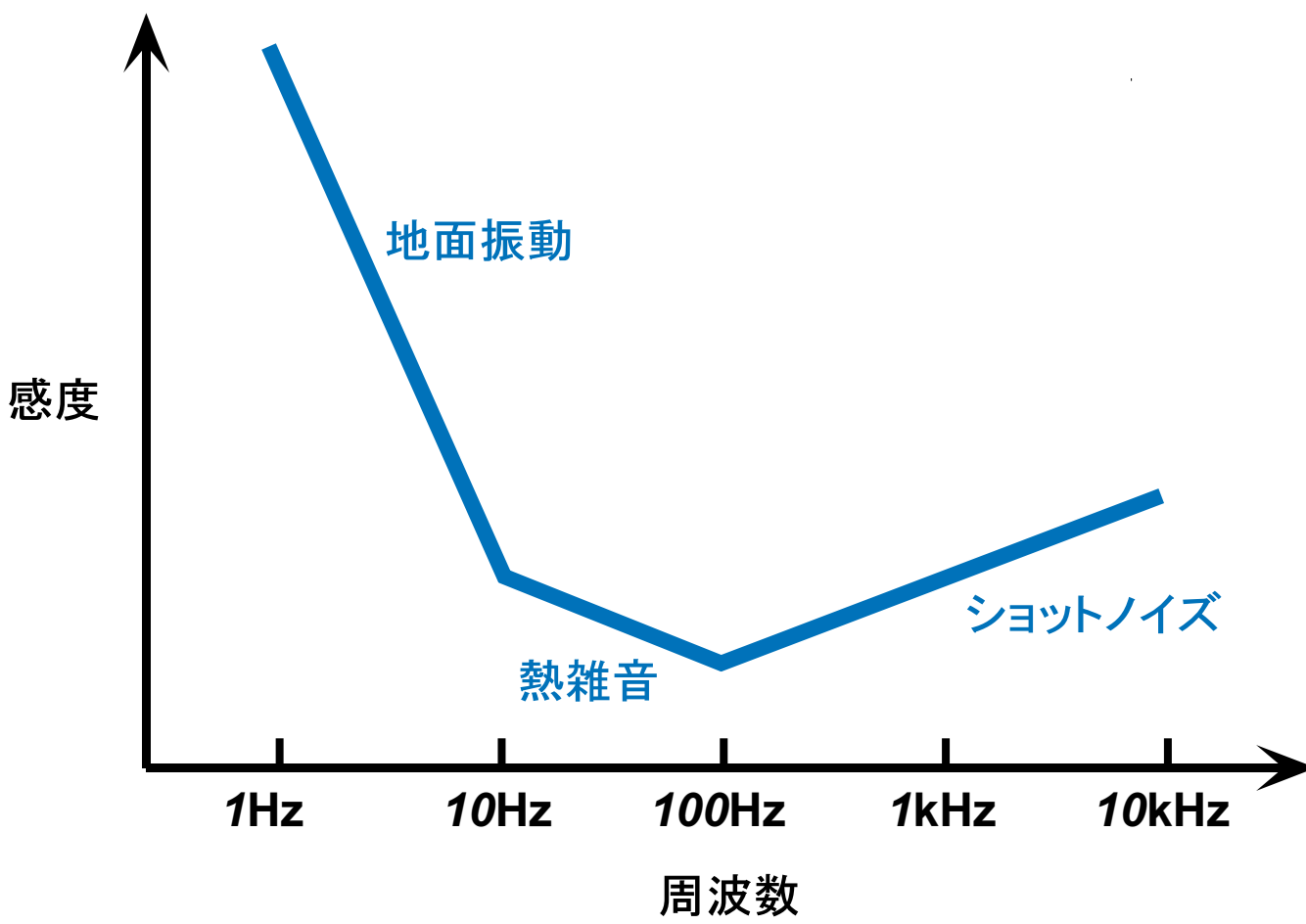


# 重力波源

- ・ ブラックホールや中性子星の連星の公転運動またその合体
- ・ 超新星爆発
- ・ パルサー
- ・ 宇宙初期からの重力波
- ・ 未知の天体

# Detection of GWs Using Laser Interferometer





# Laser Interferometric GW Antennas in the World

LIGO(Washington)



LIGO(Louisiana)



TAMA



GEO



VIRGO

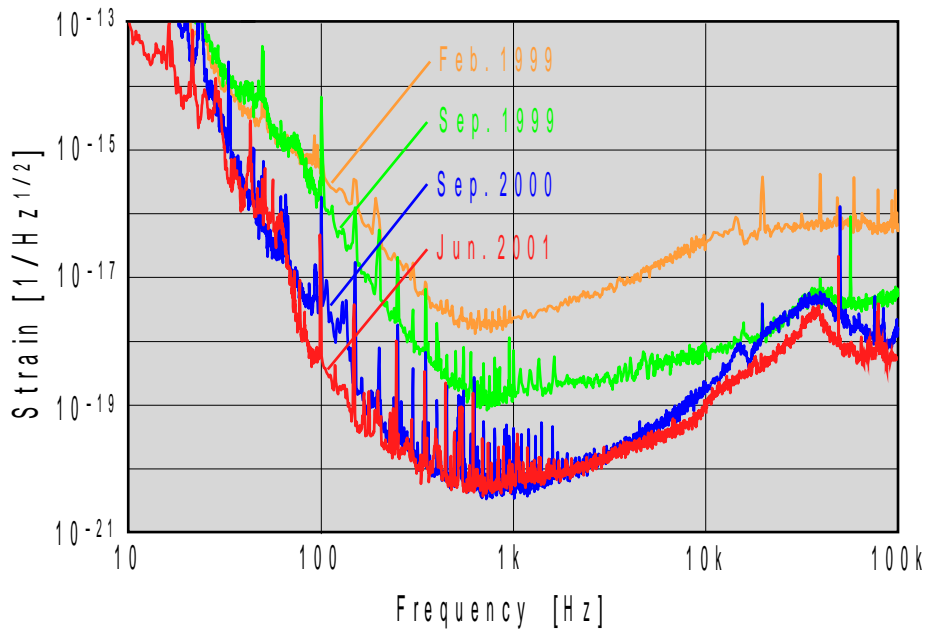


AIGO



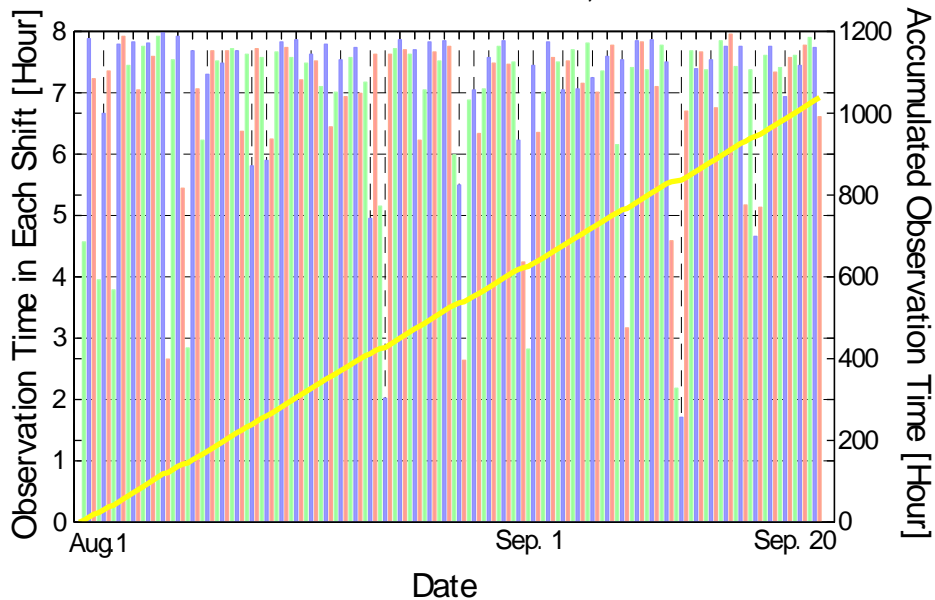
# 2000年夏： 世界最高感度達成

Evolution of Sensitivity of TAMA 300



# 2001年夏： 前人未到の1000時間観測達成

Observation Summary



# なぜスペースか？

## 低周波の重力波検出のため

地面振動がない、重力場勾配が小さい

ミラーの変位雑音が小さい

アーム長が長くとれる

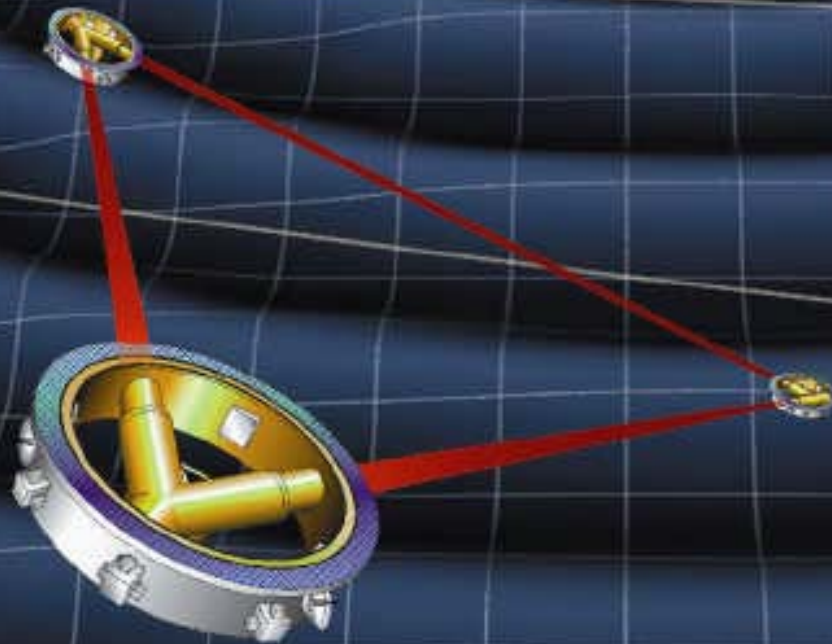
ミラーの変位雑音の影響小さい

したがって低周波領域で感度がよい

ただし高周波領域は感度が悪化

# LISA

Laser Interferometer  
Space Antenna



<http://lisa.jpl.nasa.gov>

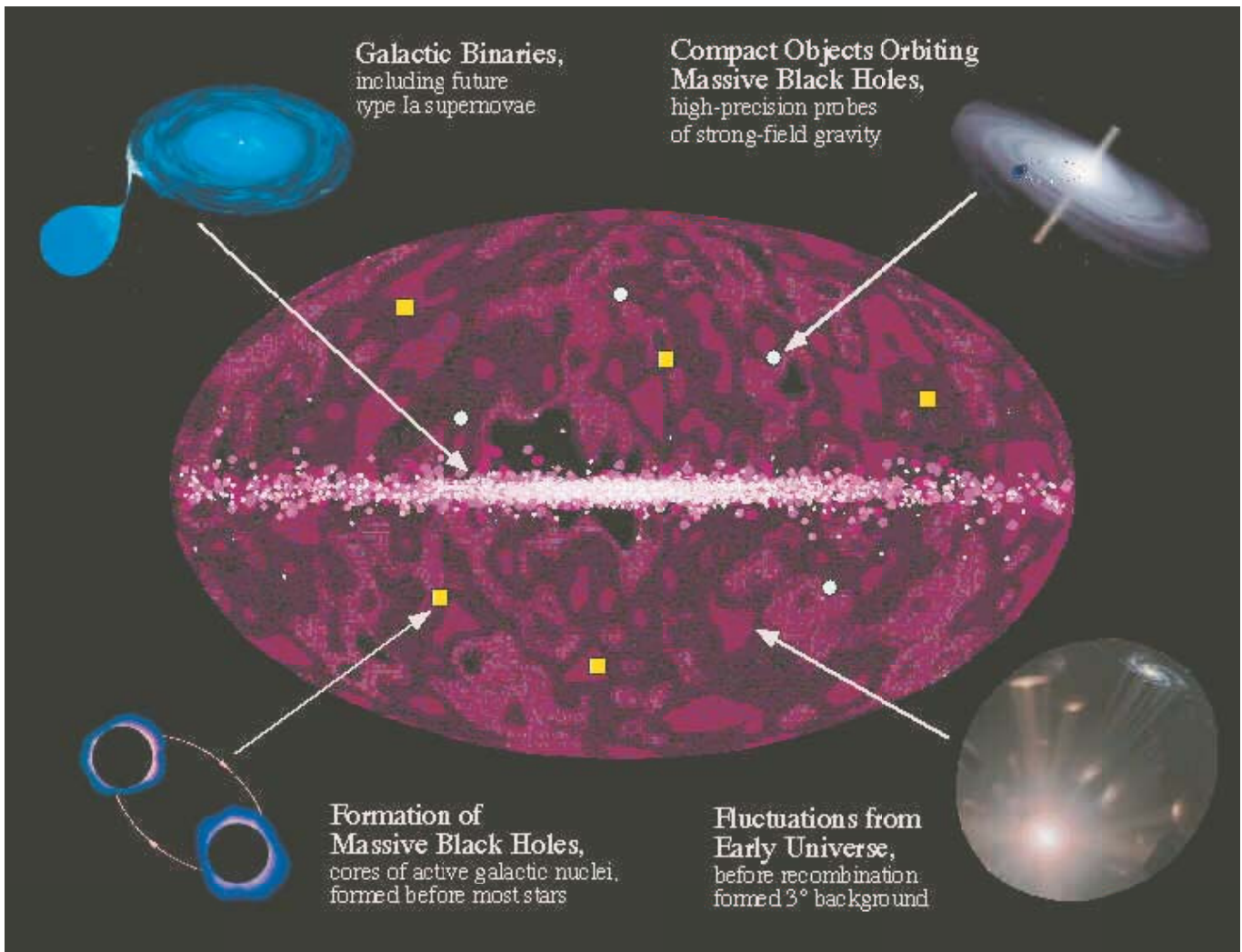
23 June 2000



# LISAのねらう重力波源

我々の銀河内にある各種連星

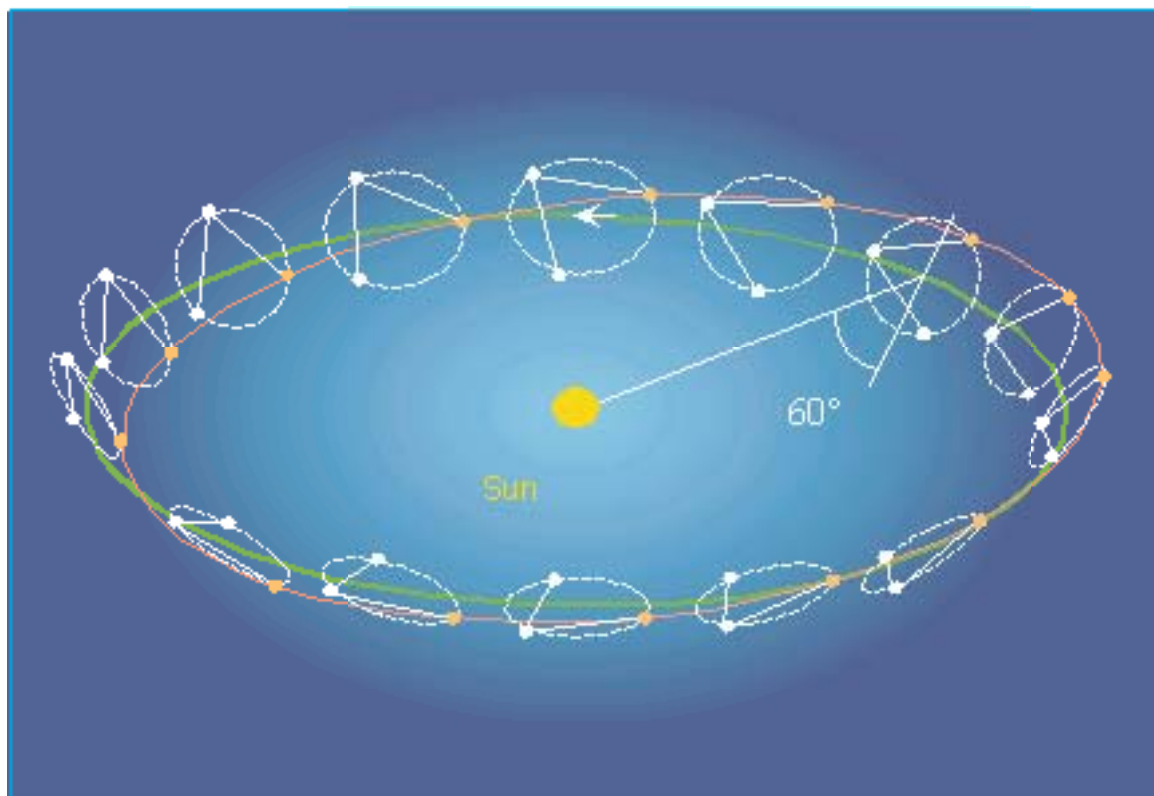
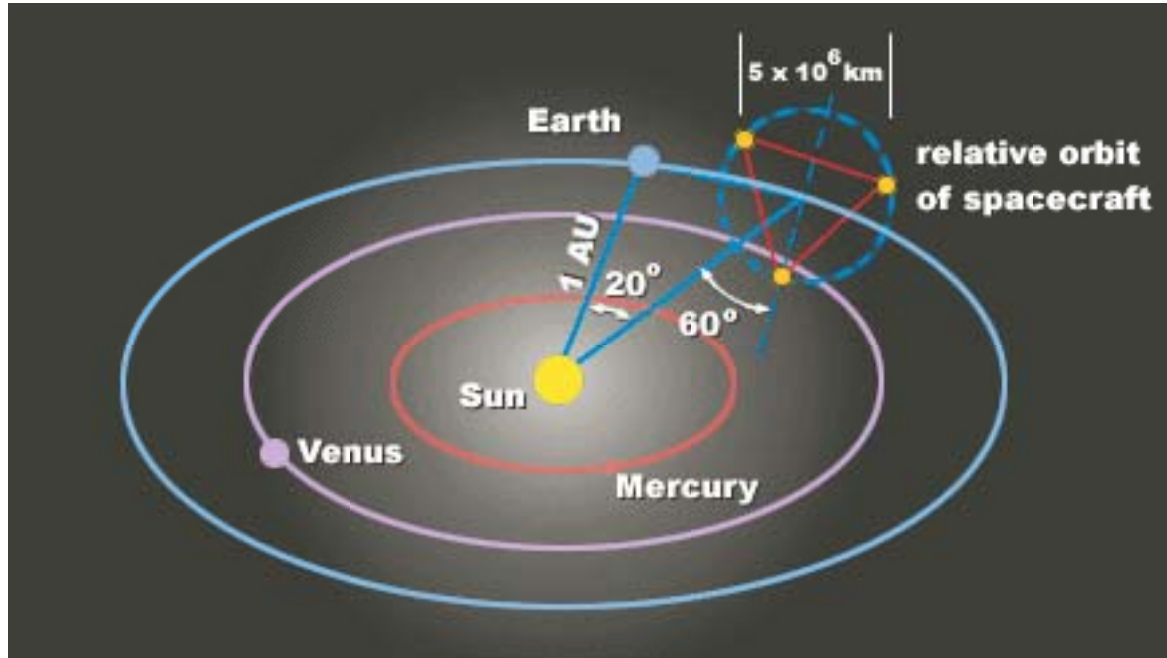
MBHのまわりを回る高密度星



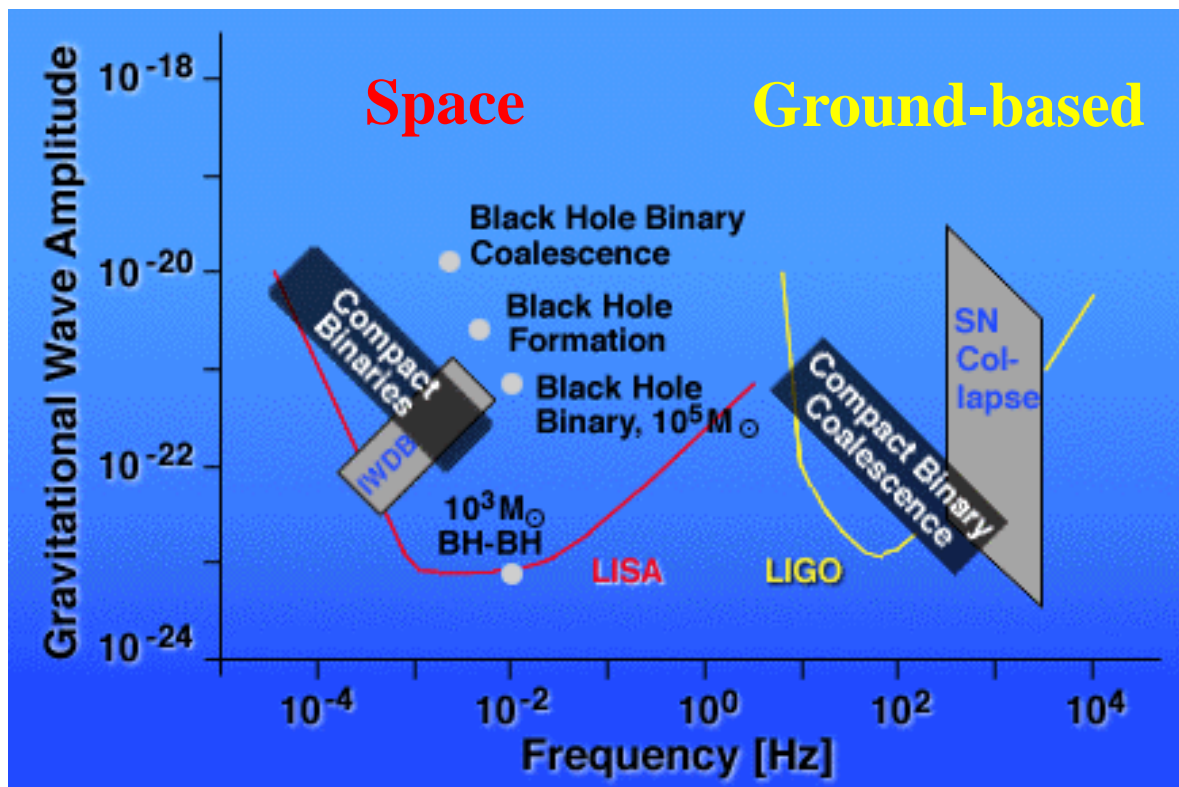
MBH連星とその合体

宇宙初期からの重力波

# LISAの軌道

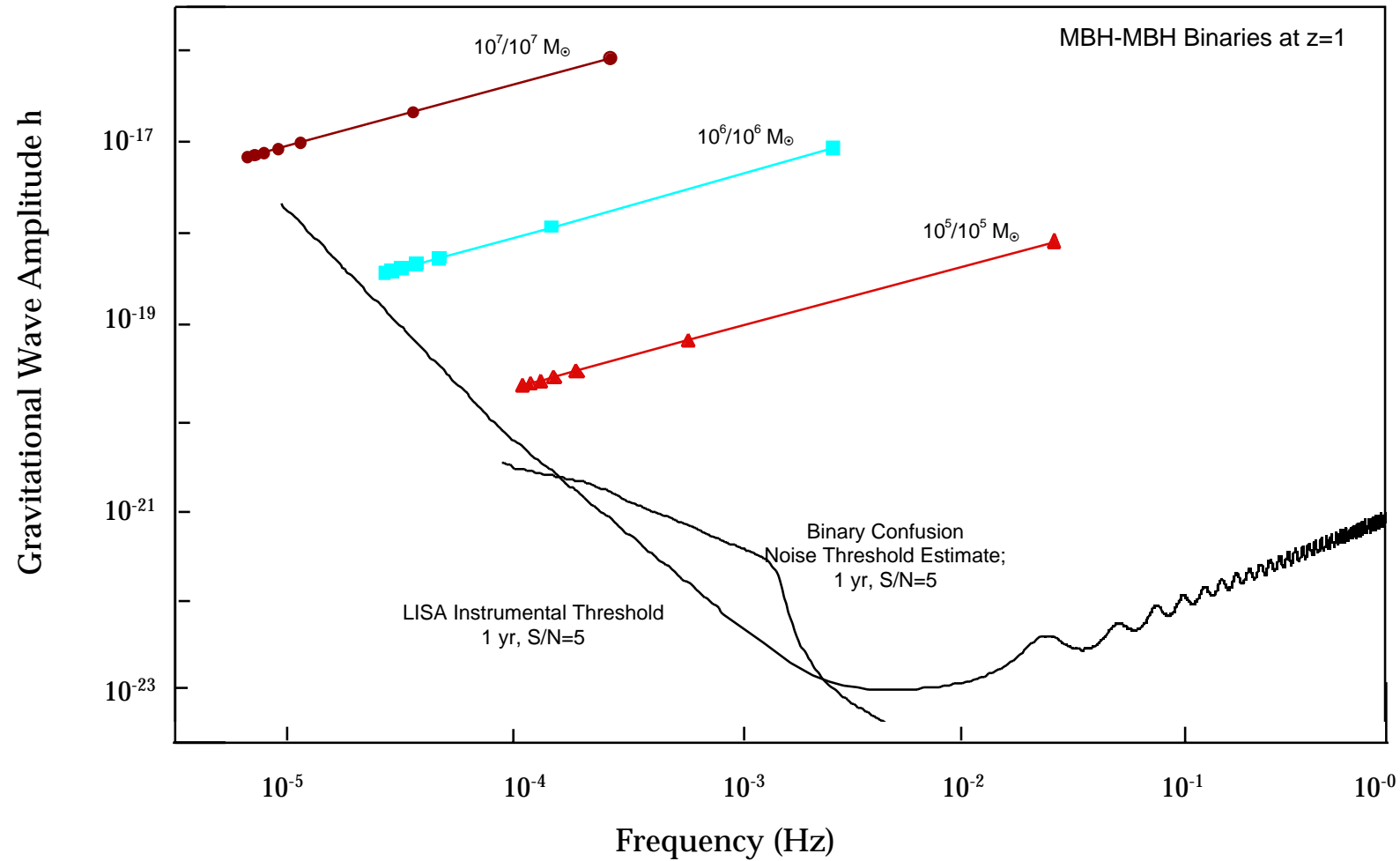


# Ground-based Antenna and Space Antenna

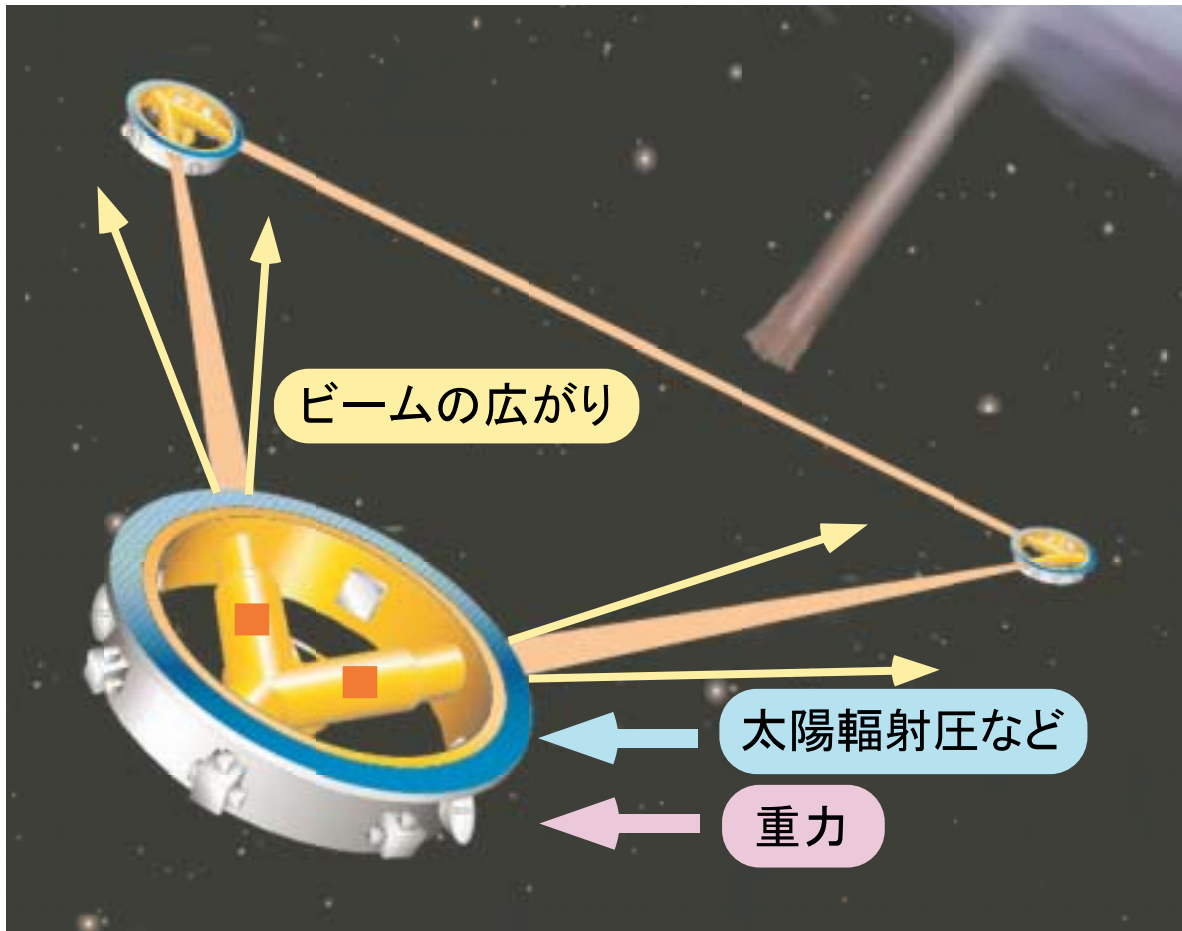




# Massive Black Holes in Merging Galaxies

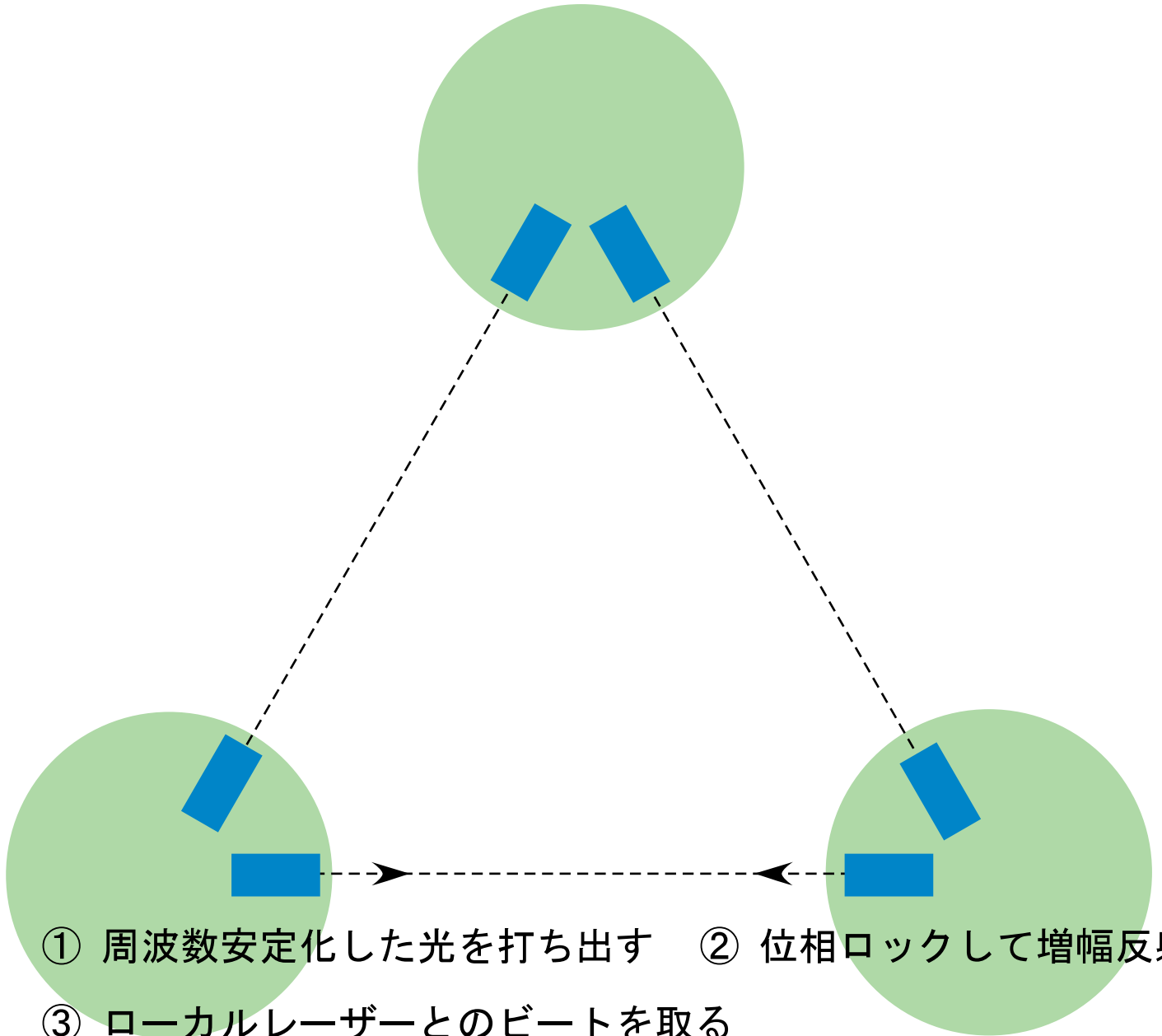


# LISAの構成



- ドラッグフリー
- 位相を合わせて増幅反射
- ヘテロダイン検出

# LISAの測距技術



- ① 周波数安定化した光を打ち出す
- ② 位相ロックして増幅反射
- ③ ローカルレーザーとのビートを取る
- ④ 超安定発振器でビートダウンしてから位相検出

# 測距に伴う雑音

目標感度 :  $2 \times 10^{-11}$  m/rHz

## 1. ショットノイズ

- ・ パワーに反比例
- ・ a few pW しか届かない
- ・ 無相関に 4 回の検出 (x2)
- ・ 予想されるショットノイズ :  
 $2 \times 10^{-11}$  m/rHz

## 2. 周波数雑音

- ・ 両腕の光路長差 ( $10^5$  km) にカップル :  
$$\delta x = \Delta x \frac{\delta \nu}{\nu}$$
- ・  $2 \times 10^{-12}$  m/rHz を実現するには  
 $6 \times 10^{-6}$  Hz/rHz @ 1 mHz が必要
- ・ 光共振器で 30 Hz/rHz @ 1 mHz まで安定化 (光共振器の断熱が必要)
- ・ 残りは、アーム長のコモンモードの測定を使って補正

# ミラーを直接揺らす雑音

力一定、加速度一定、つまり変位  $f^{-2}$

目標加速度：  $3 \times 10^{-15} \text{ ms}^{-2}/\text{rHz}$  (1個あたり)

## 1. 衛星の熱変形

- ・ 熱変形による衛星の重力場のゆらぎ
- ・  $1 \times 10^{-16} \text{ ms}^{-2}/\text{rHz}$  に抑えるためには  $10^{-6} \text{ K/rHz @ 1 mHz}$  が必要

## 2. 衛星と基準ミラーとの相対位置

- ・ 衛星からの重力の変動
- ・  $5 \times 10^{-17} \text{ ms}^{-2}/\text{rHz}$  に抑えるためには  $1 \text{ nm/rHz}$  が必要



# 日本の取るべき道は？

## 1. LISA に参加

日本に何ができるか？  
時すでに遅し？

## 2. 短距離型スペースアンテナ

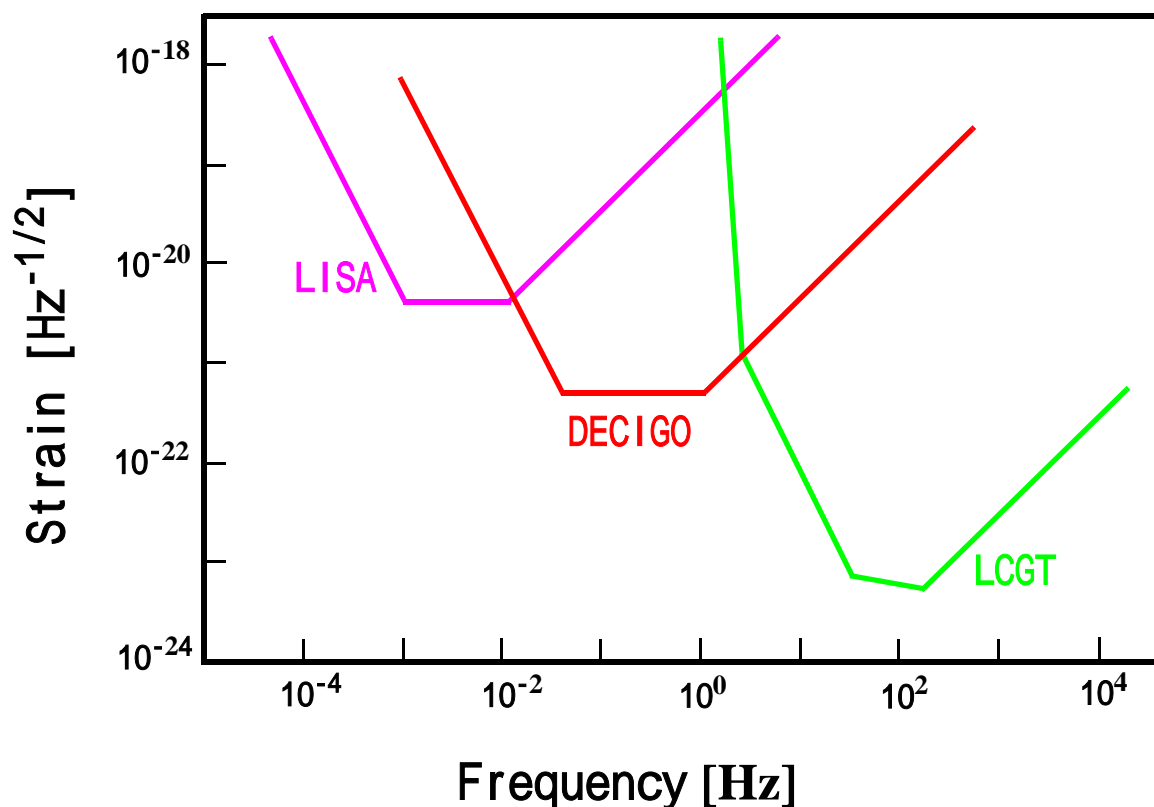
地上と LISA との狭間を狙う！  
NS-NS 合体の前兆  
中間質量の星の合体  
未知なる天体

## 3. 長距離型スペースアンテナ

宇宙初期からの重力波  
SMBH の合体前  
各種連星からの重力波  
未知なる天体

## 4. なにもしない

# 短距離型スペース重力波アンテナの感度



## スペック

基線長 : 5 万 km (LISA の 100 分の 1)

レーザーパワー : 10W (LISA の 10 倍)

集光径 : 1m (LISA の 3 倍)

変位雑音 : LISA と同程度

# 短距離型スペース 重力波アンテナの特徴

LISA と比べて :

基線長が短いため、

- ・ 受光パワーが高くフェイロック増幅が容易
- ・ 重力による相対位置の変化が小さくヘテロダイン検出が容易

地球周回軌道であれば、

- ・ 打ち上げや初期配置が容易
- ・ 地上との通信システムが容易
- ・ 地球の重力場の変動を受けやすい

# 国立天文台将来計画 (スペース重力波アンテナ) ワーキンググループ

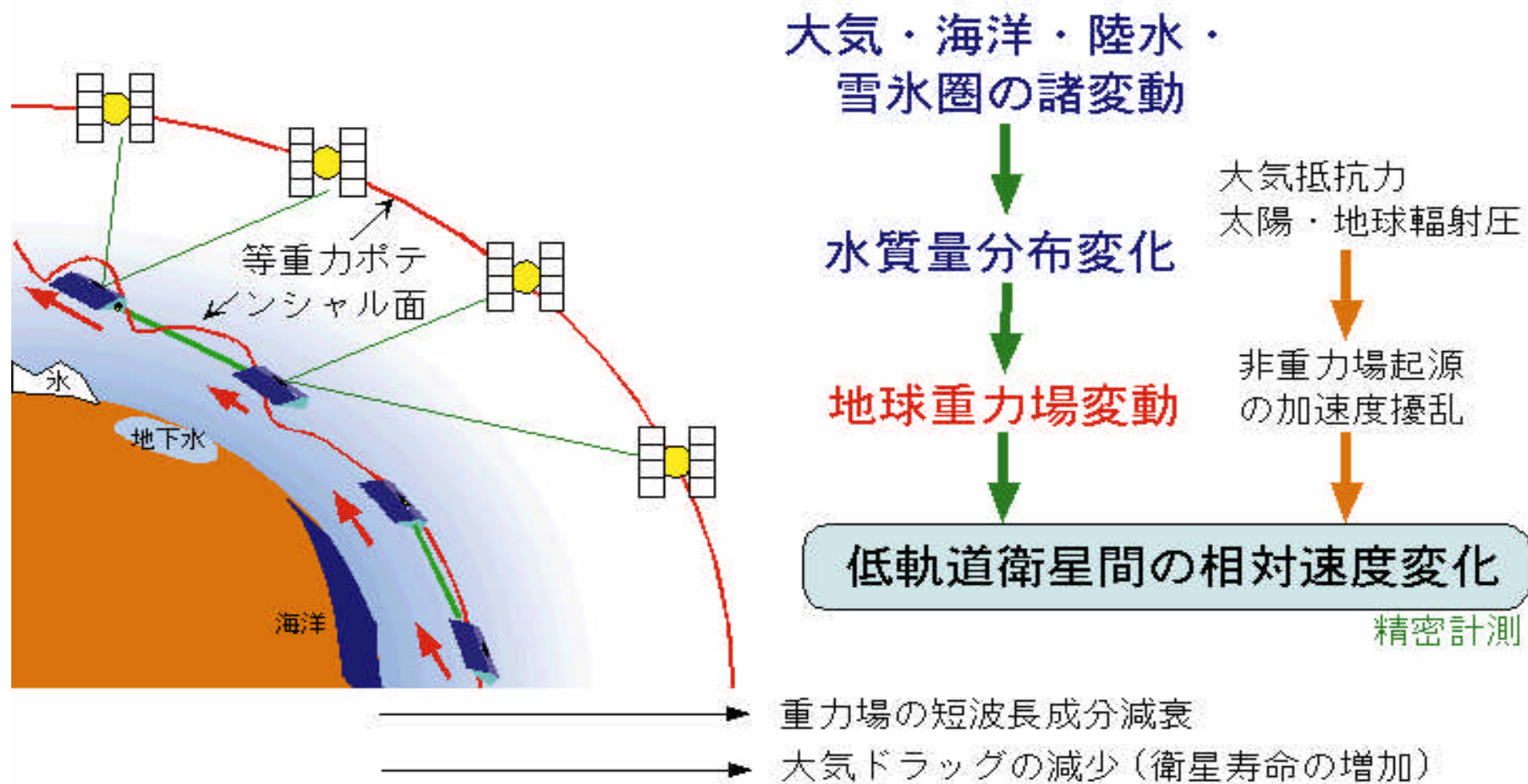
国立天文台**将来計画委員会**主催の**第1回**  
**将来計画シンポジウム**にて**日本のスペース**  
**重力波アンテナ計画**の可能性を発表

その後**将来計画委員会**にて将来計画の4  
つの候補の1つとして**ワーキンググルー**  
**プの発足**を決定

現在、メンバー募集中（交渉）：

通信総合研究所  
宇宙科学研究所  
地球計測グループ  
重力波理論グループ  
TAMA/LCGT グループ  
など

# 衛星重力ミッションの原理



図D3

# まとめ

1. **地上の重力波アンテナ**は、人類初の重力波検出に向かって順調に動き始めている。**数年後には重力波検出**、そしてその後さらに感度が高められ、**最終的には重力波天文学の創成**へと繋がるであろう。

2. **LISA 計画**は2010年ころの打ち上げをめざして、**多分承認される**であろう。LISAに必要な技術はその多くが今後の開発を必要とするが、成功の暁には、**重力波検出が保証されている**だけでなく、**重要な天体現象に関わる重力波の検出**がされる可能性がある。

3. 地上検出器において先導的な役割を果たしてきた日本であるが、現在のところスペース・アンテナに関しては遅れをとっている。**短距離型スペースアンテナ**などを含めて**日本で何が実現可能かの検討**を行なう必要がある。