

スペース重力波アンテナ DECIGO

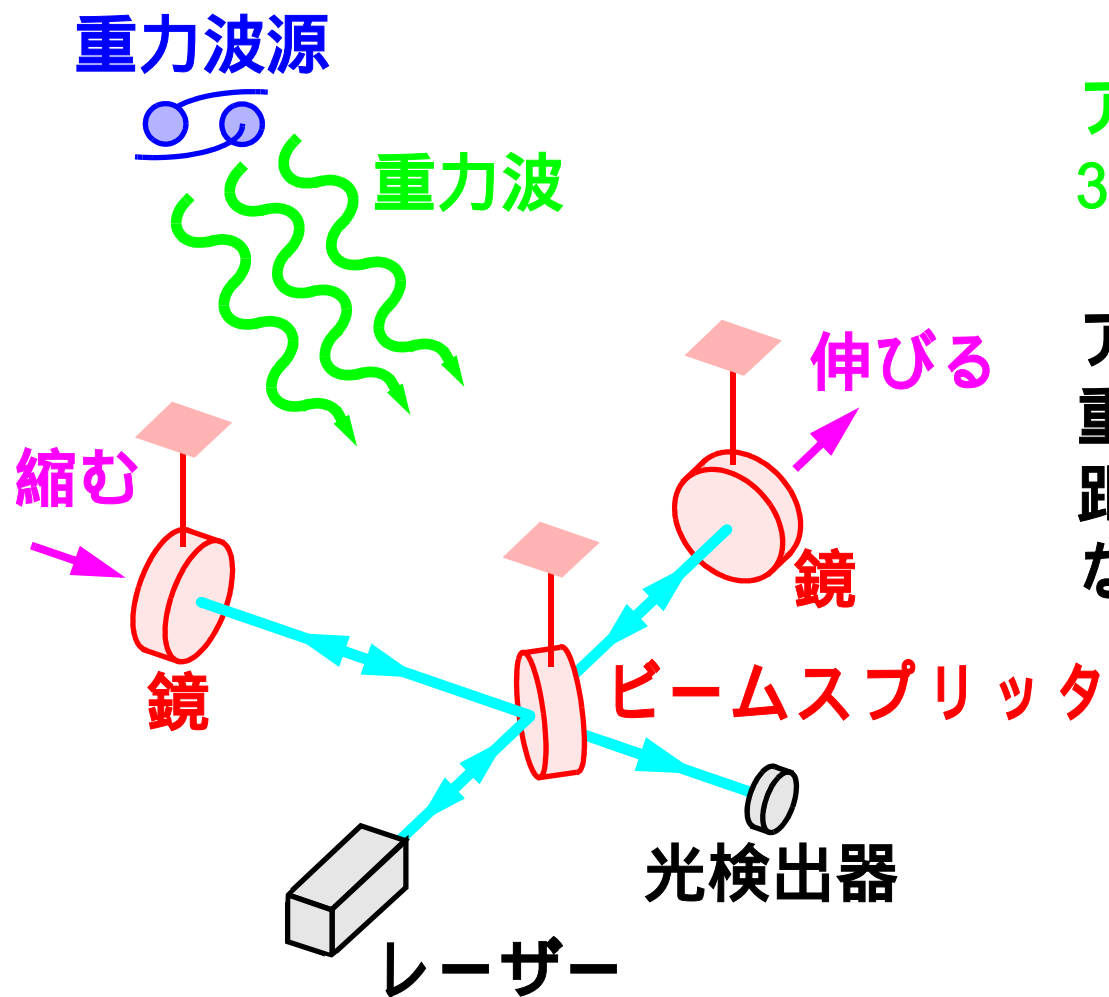
宇宙線研研究会
高エネルギー宇宙の総合的理解
- 新技術で切り開く宇宙線物理 -
2002年3月8日

国立天文台・川村静児

話しの内容

- 1 . 重力波検出実験の簡単な復習
- 2 . スペースアンテナの利点・特徴
- 3 . LISA 計画
- 4 . DECIGO 計画
- 5 . まとめ

巨大レーザー干渉計による重力波検出



アーム長：
300m ~ 4km

アーム長が長いほど
重力波の引き起こす
距離の変化が大きくなるため

世界の重力波検出計画

LIGO(Washington)



LIGO(Louisiana)



TAMA



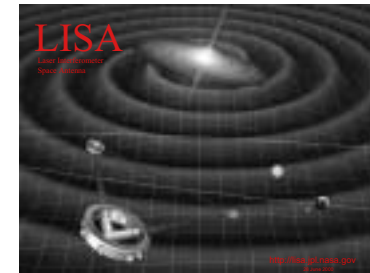
GEO



VIRGO



AIGO



LISA
(宇宙空間)

TAMA300

- 1995 年 多くの大学・研究機関の共同研究としてスタート
- 2000 年 **世界最高感度達成**
- 2001 年 **連続 1000 時間観測**



国立天文台
三鷹キャンパス

アーム長 : 300m

現在の感度 :
 $5 \times 10^{-21} \text{ Hz}^{-1/2}$

重力波源

高密度連星の軌道運動およびその合体

- 白色矮星
- 中性子星
- ブラックホール (MACHOBH ~ 超巨大ブラックホール)

超新星爆発

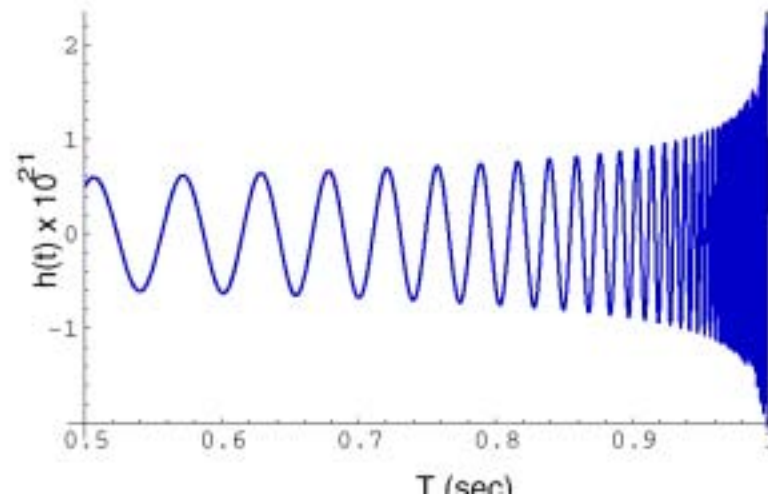
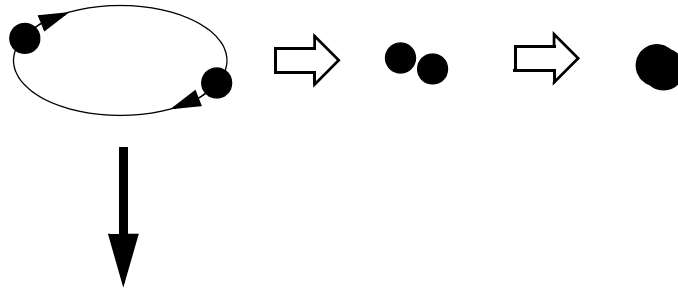
中性子星の自転運動

宇宙初期

未知の天体

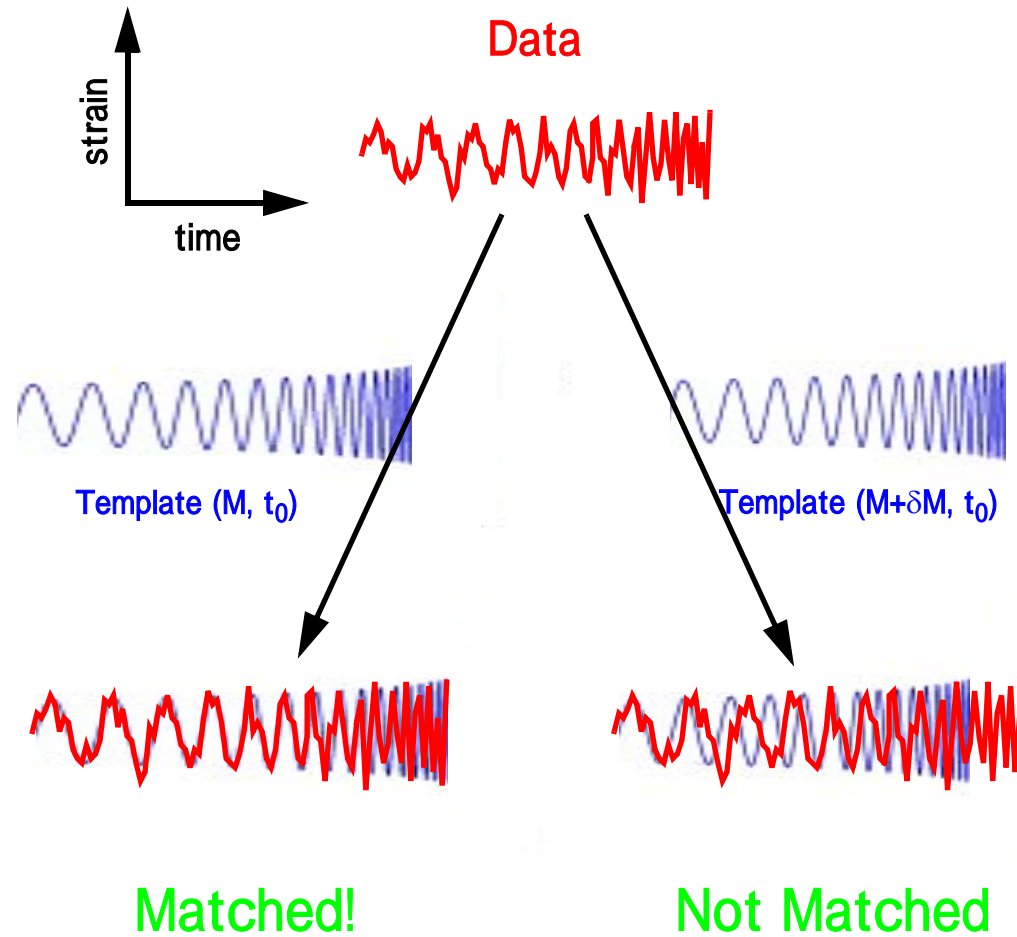
ブラックホールや中性子星連星の合体

Inspiral Merger Ringdown

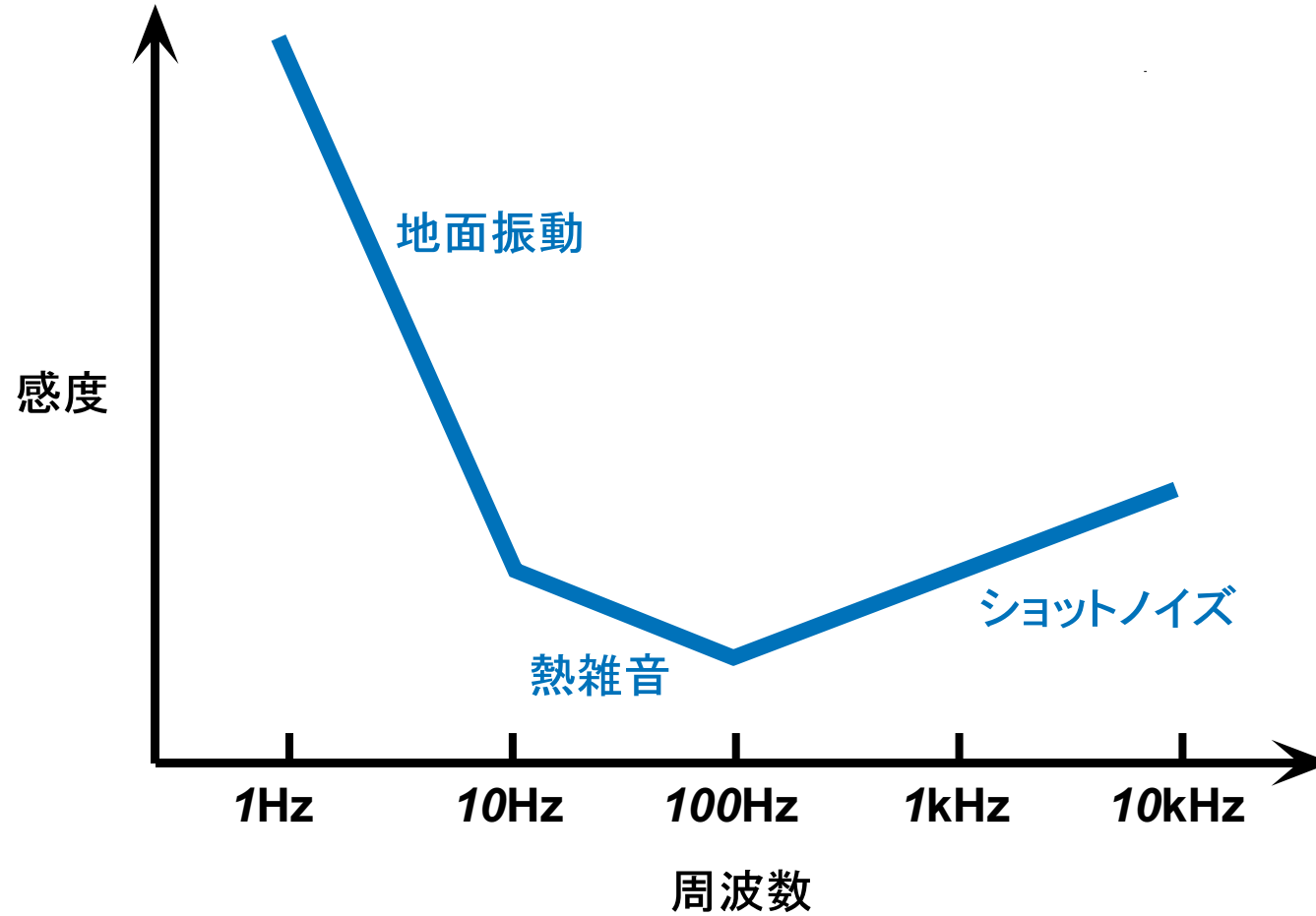


Inspiral Chirp GW Signal

Matched Filter



地上干渉計の雑音



LCGT (Large Scale Cryogenic Gravitational Wave Telescope)

宇宙線研がホスト機関

2005 年予算獲得を目指して現在準備中

3km

ストレイン感度を上げる

低温

熱雑音を下げる

神岡トンネル

地面振動を下げる

その他全ての要素において**先進的技術**を取り入れる
各種雑音を下げる

干渉計をスペースに持っていくと 何が得か？

ミラーの振動が小さい

低周波で雑音が小さくなる

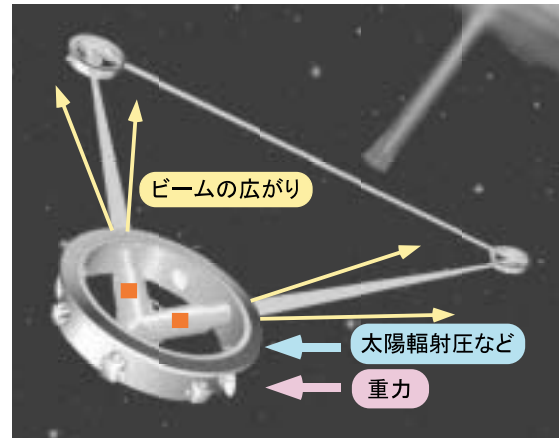
アーム長が長く取れる

低周波で信号が大きくなる

以上2つの理由により

スペース干渉計は低周波で感度が高い

スペース重力波アンテナの特徴



衛星間の距離が長い**ためレーザー光が広がってしまう**

位相ロックして増幅反射

太陽輻射圧などの重力以外の力を受けてしまう

ドラッグフリー衛星

衛星間の距離は重力場の影響により変化してしまう

干渉光のビートをとる**ヘテロダイン検出**

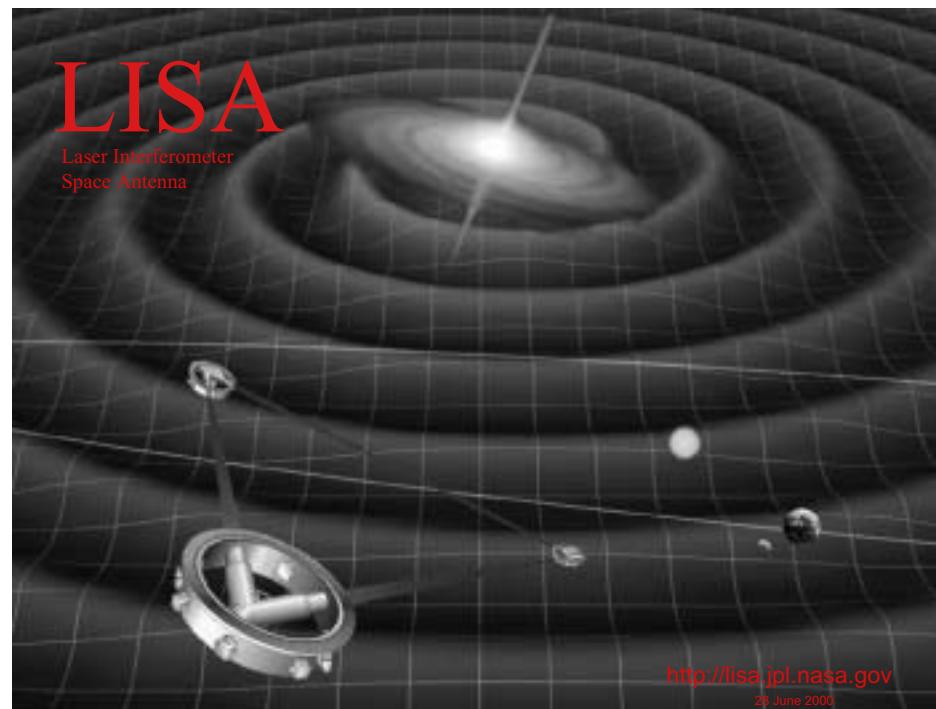
重力場の影響は解析で**取り除く**

LISA(Laser Interferometer Space Antenna)

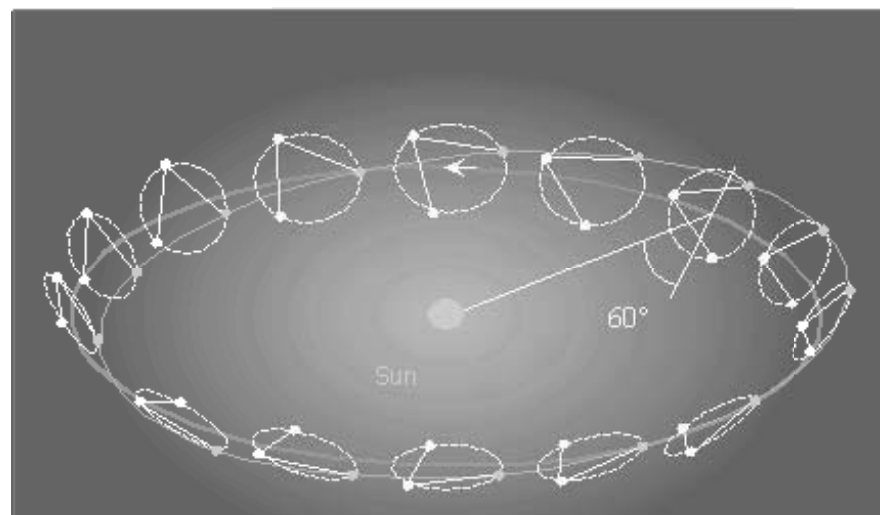
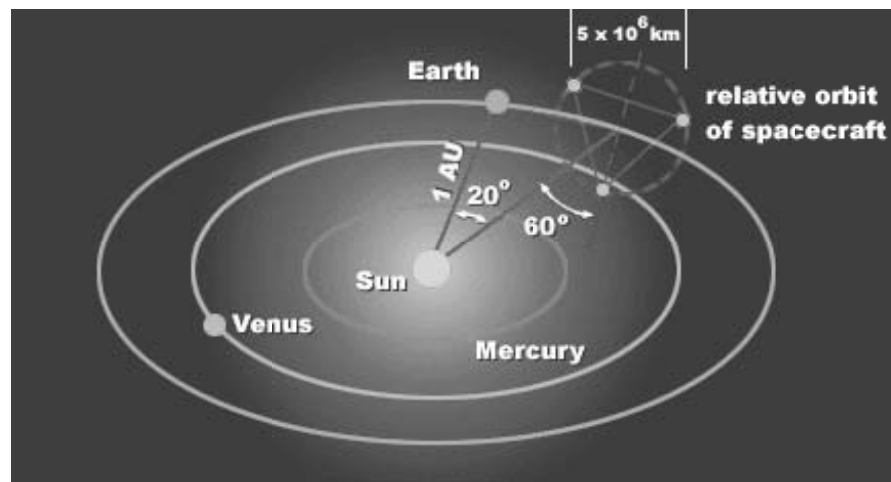
NASA と ESA の共同プロジェクト (総予算 : \$ 500M)

500 万 km 離れた 3 つの人工衛星間の測距

1mHz ~ 10mHz で最高感度



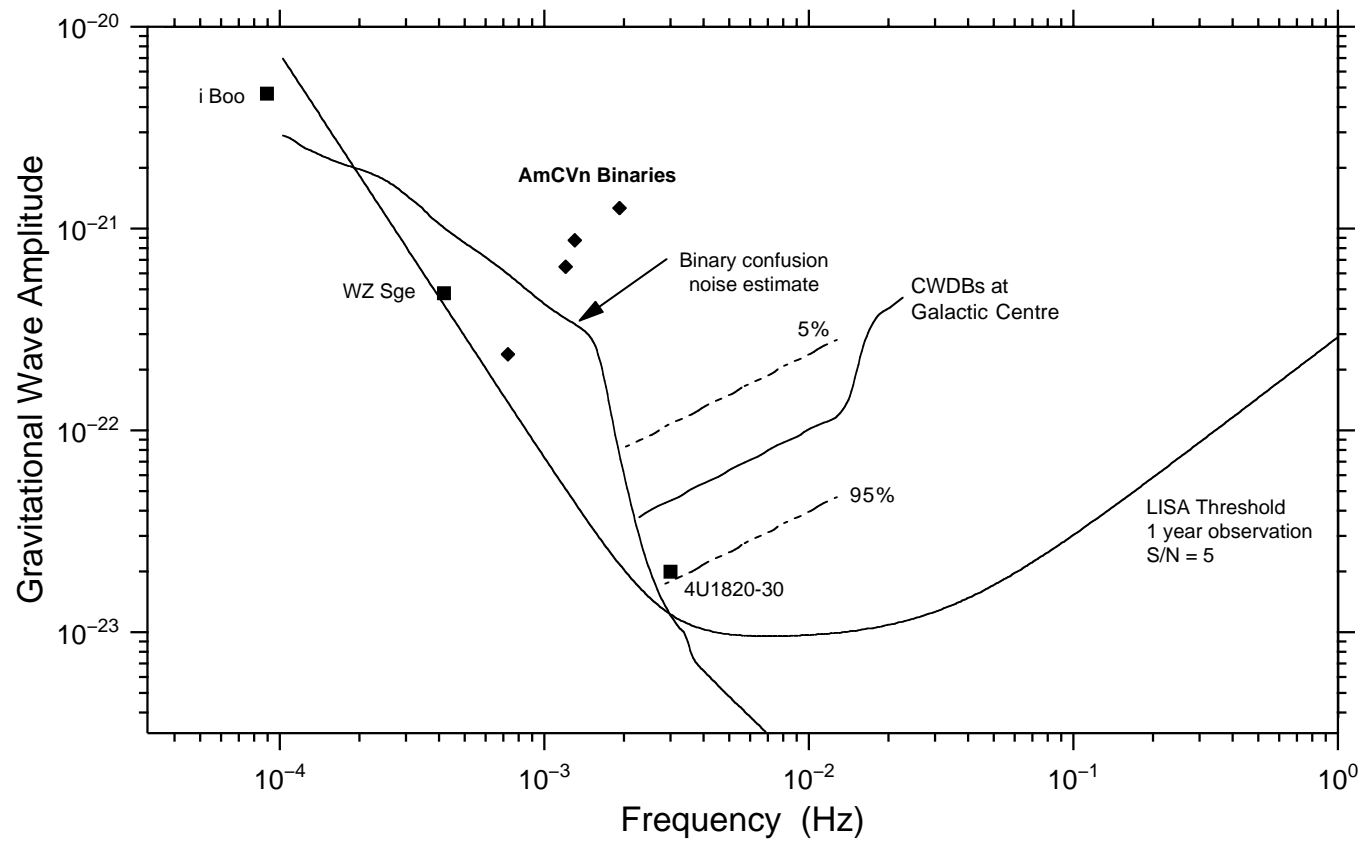
LISA の軌道



LISA の狙う重力波源

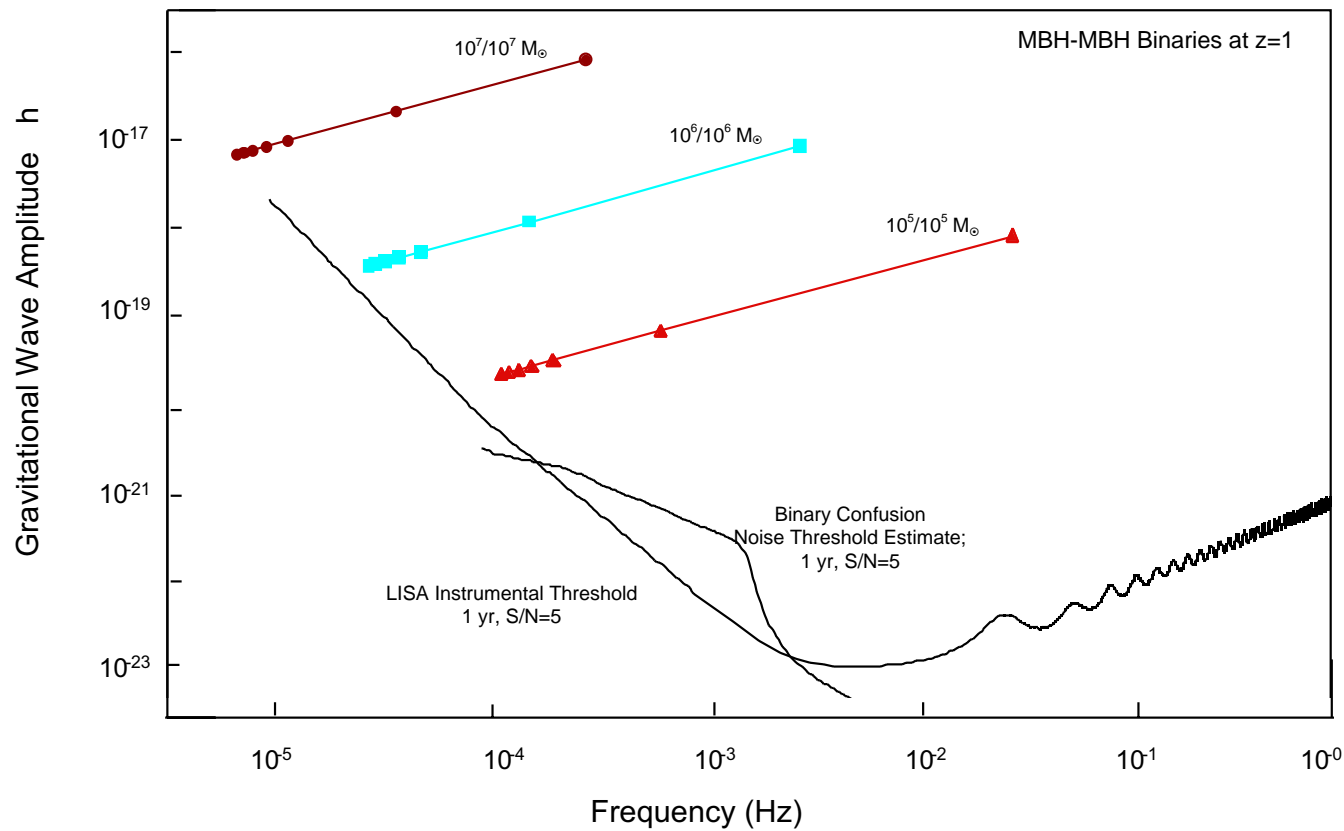
各種連星

目標感度が達成できれば必ず検出できる



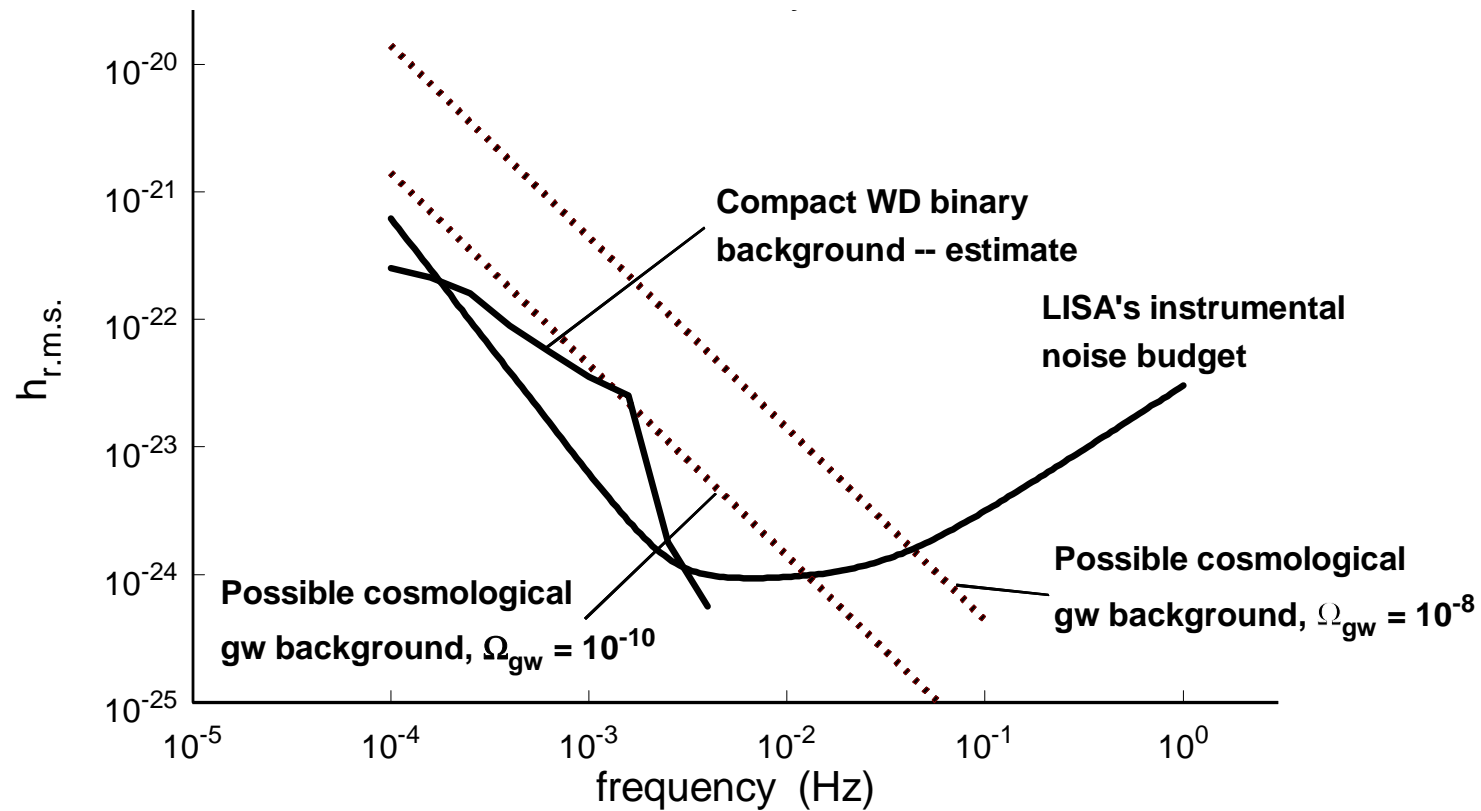
巨大ブラックホールの合体

銀河中心の超巨大ブラックホールの形成の謎に迫る



宇宙初期からの重力波

検出できなくても、有為なアッパーリミットを与える



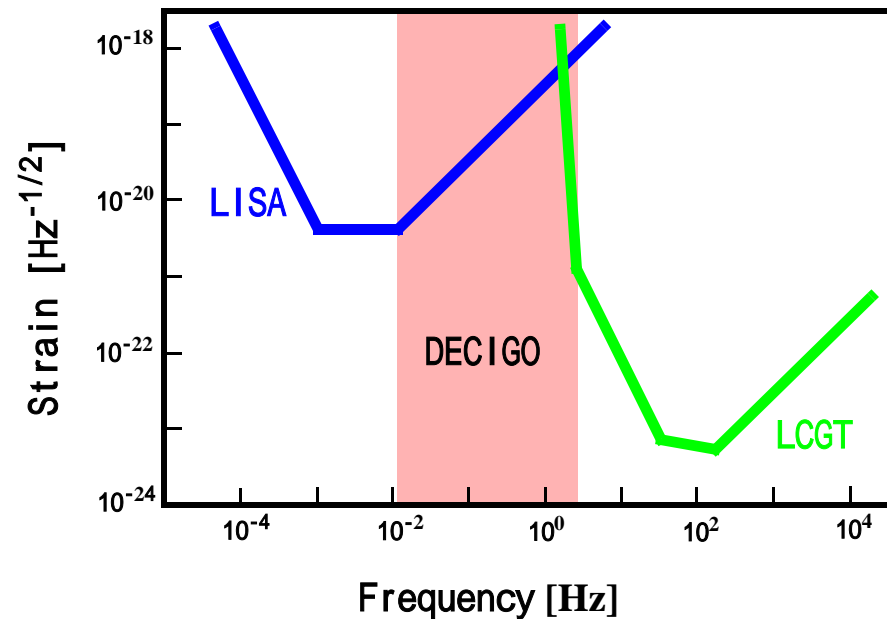
DECIGO とは何か？

LISA と地上干渉計との間の周波数帯を狙う

短距離型スペース重力波アンテナ

中村さんにより瀬戸論文のなかで命名

(0.1Hz の Deci の意 ; Decide and go)



DECIGO の狙う重力波源

中規模ブラックホールの合体

中規模ブラックホールへのコンパクト星のスパイラル

連星中性子星

地上干渉計へのアラーム

宇宙膨張加速についての情報

宇宙初期

DECIGO による宇宙膨張加速度の計測

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

High- z の超新星爆発のデータにより示唆された宇宙の加速膨張を検証する

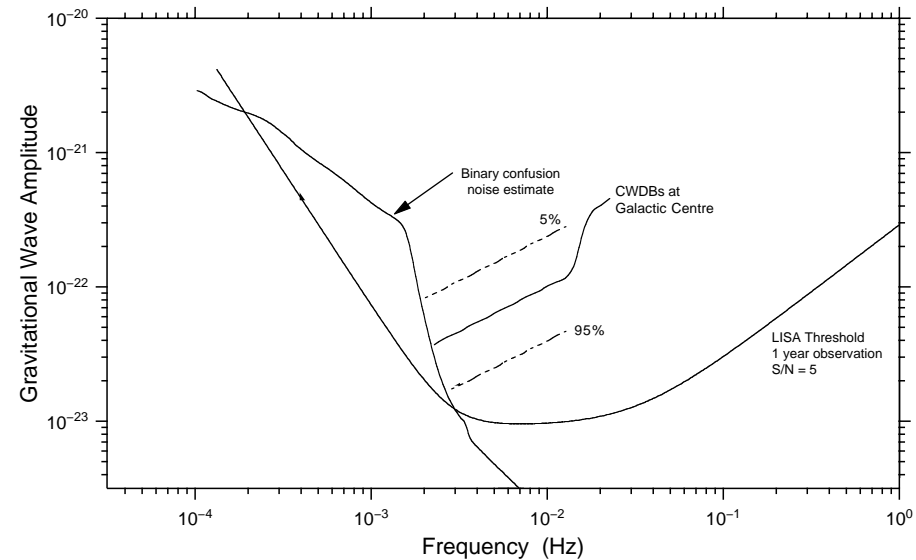
0.1Hz 付近で High- z の連星中性子星からの重力波を長期間観測し、ドップラーシフトの時間変化による信号のずれを測る

宇宙膨張加速度の直接計測

Confusion 雑音について

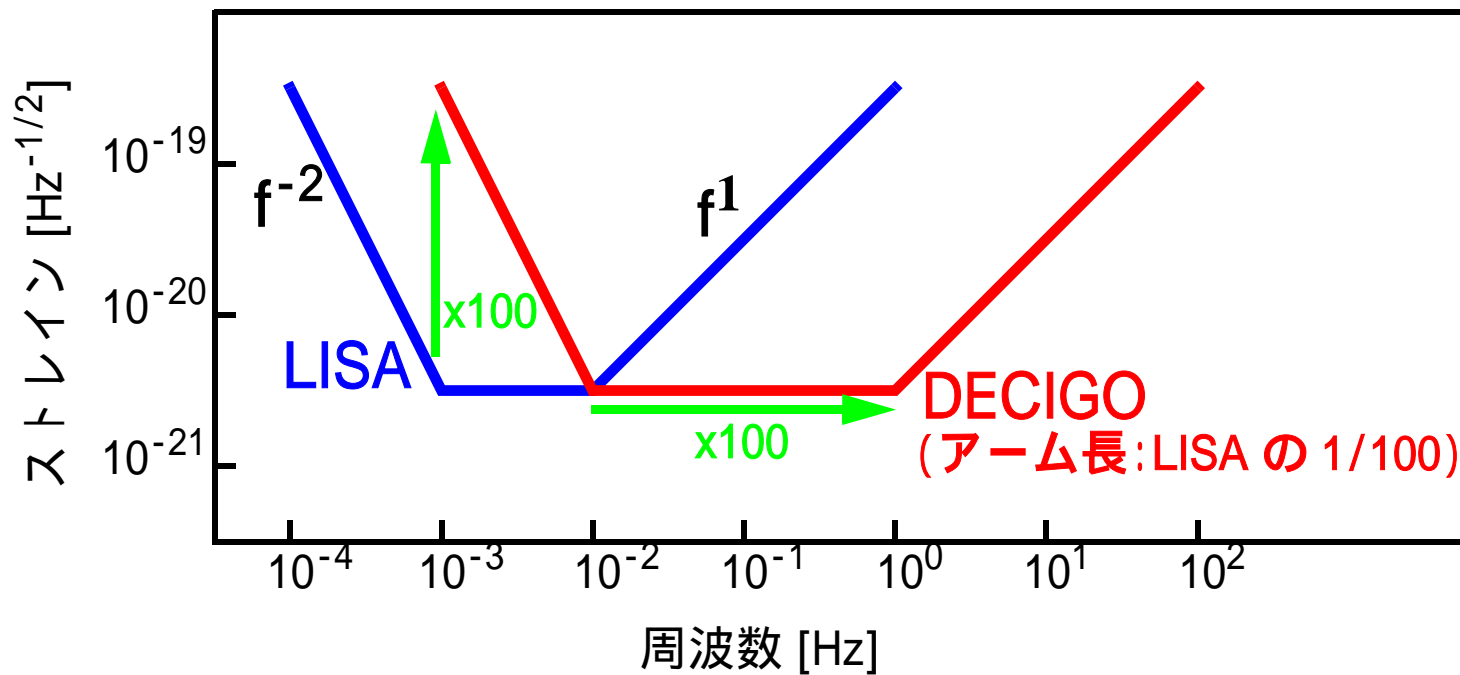
低周波 (10mHz 以下) では、**白色矮星連星からの重力波が分離できない** **LISA の限界**

DECIGO(10mHz ~ 1Hz) では、この問題は存在しない
将来的には DECIGO が有利！



感度とアーム長の関係

フラットな領域でのショットノイズはアーム長によらない
コーナー周波数はアーム長に反比例
変位雑音の影響はアーム長に反比例



DECIGO の感度をさらにはげるには？

レーザーの実行パワーを上げる

搭載するレーザーのパワーを上げる

集光ミラー径を大きくする

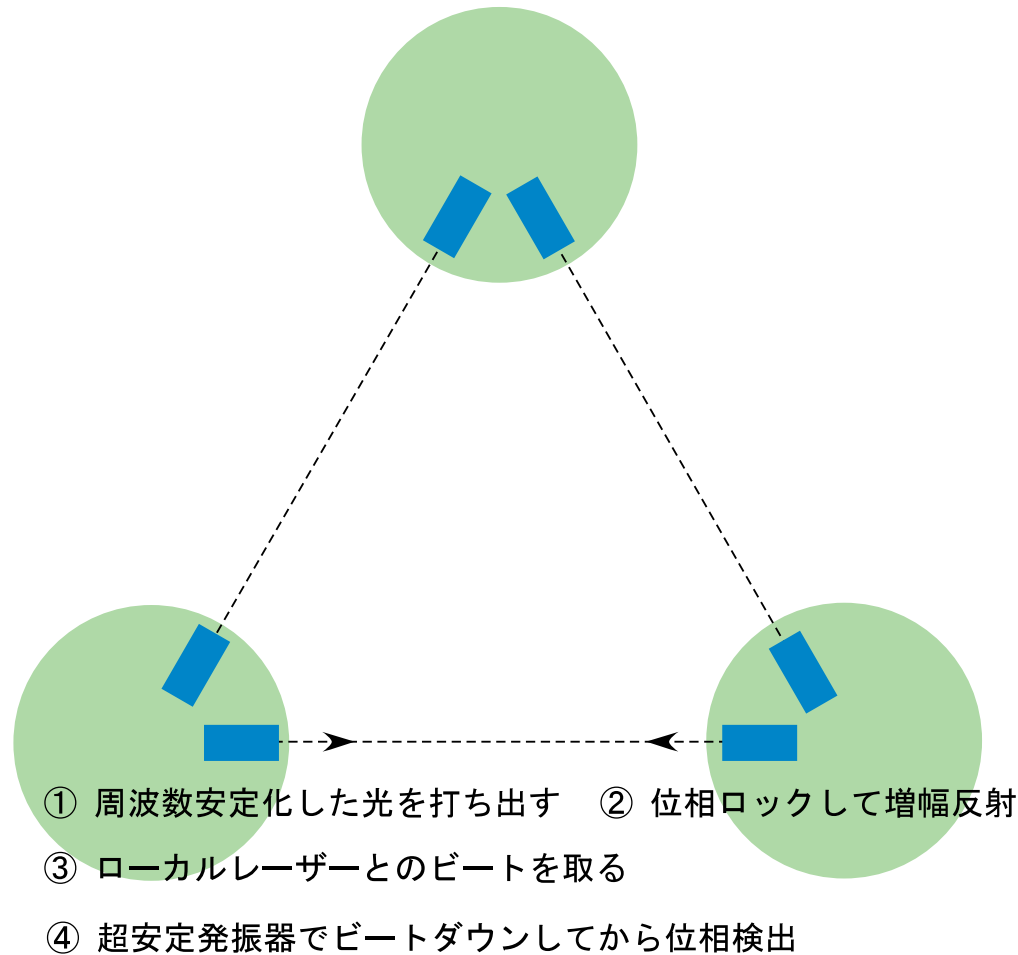
ミラーの位置雑音を抑える

より厳しい設計

その他の雑音を抑える

より厳しい設計

DECIGO の測距技術



LISA の感度から DECIGO の感度へ — 測距に伴う雑音 —

目標雑音 (LISA) : 2×10^{-11} m/rHz

1. ショットノイズ (LISA)

- ・ パワーに反比例
- ・ 1W 出して数 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 :
 2×10^{-11} m/rHz

DECIGO ではパワーは 1 万倍多く届く・検出系が容易
しかしストレイン感度は同じ

LISA の感度から DECIGO の感度へ — 測距に伴う雑音 —

2 . 周波数雑音 (LISA)

- ・ 両腕の光路長差 (10^5 km) にカップル
- ・ 2×10^{-12} m/rHz (ショットノイズの 1/10) を
実現するには 6×10^{-6} Hz/rHz @ 1 mHz が必要
- ・ 光共振器でまず 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で安定化

DECIGO で光路長差が 1/100 になるなら、
目標位置感度 (1/100) を満たすための周波数安定度は同じ
なおアーム長のコモンモードの安定度は同じ

LISA の感度から DECIGO の感度へ — 測距に伴う雑音 —

3 . 時計の雑音 (LISA)

- ・ 衛星間の相対速度によるドップラーシフトは最大 15 MHz (アーム 3)
- ・ USO でビートダウン
- ・ 時計の雑音と観測周波数との割合が位相雑音を

決める : $\delta\phi = \frac{\delta F}{f}$

- ・ 2×10^{-12} m/rHz (ショットノイズの 1/10) を実現するには 1×10^{-8} Hz/rHz @ 1 mHz が必要
- ・ 時計の周波数が 15 MHz なら 8×10^{-16} /rHz @ 1 mHz が必要だが通常の USO では無理

3 . 時計の雑音 (LISA) つづき

- ・ 光に USO で変調を加え、アーム長にリファーマーして安定化
- ・ 他の USO はその安定化された USO にロック

DECIGO で相対速度によるドップラーが $1/100$ になるなら、 0.1Hz (100 倍) で目標位置感度 ($1/100$) を満たすための時計の安定度は同じ

LISA の感度から DECIGO の感度へ — ミラーを直接揺らす雑音 —

目標加速度 (LISA) : $3 \times 10^{-15} \text{ ms}^{-2}/\text{rHz}$ (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
 $10^{-6} \text{ K}/\text{rHz}$ @ 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 nm/rHz が必要

DECIGO でも条件は同じ

LISA の感度から DECIGO の感度へ ー ミラーを直接揺らす雑音ー

3 . 光の強度雑音

- ・ 輻射圧の揺らぎ
- ・ 100 μW がミラーに作用
- ・ $1 \times 10^{-16} \text{ ms}^{-2} / \text{rHz}$ に抑えるためには
 $2 \times 10^{-4} / \text{rHz}$ が必要
- ・ 強度安定化が必要

DECIGO でも条件は同じ

国立天文台・スペース重力波アンテナ ワーキンググループ

国立天文台では ALMA の次の将来計画を検討している
いくつかの将来計画の候補について WG をたちあげる

スペース重力波アンテナ WG 発足！
(現在メンバー 58 人)

得られる科学的成果の掘り起こし
フェージビリティ・スタディー
小規模な実験をたちあげる
宇宙研・NASDA・NAL への働きかけ
LISA から学ぶ

まとめ

1. スペース重力波アンテナは地上干渉計と比べ、**低周波で感度が高く**、また**スペース特有の技術**が必要となる
2. DECIGO は **LISA と地上干渉計のはざまの周波数帯**を狙うものであるが、将来的には **Confusion 雑音**のため LISA より DECIGO の方が有利となる
3. DECIGO(アーム長が LISA の 1/100) の感度は LISA と同程度の技術を用いると **0.1Hz で LISA よりも 1 桁高く**、さらに**最高感度帯域は 1 桁広がる**
4. DECIGO でさらに感度をあげるには、人工衛星に関するさまざまな技術の進歩が必要である