

# 宇宙重力波干渉計 LISAへの

## 日本の参加

**和泉究**

**(ISAS/JAXA)**

**(宇宙理学委員会 LISA WG主査)**

2021/Aug/10, CRCタウンミーティング

# まとめの先出し

- ▶ 宇宙重力波干渉計LISAへの日本の参加を目指す
- ▶ 搭載機器の開発・提供の技術可能性を調査してきた
  - ▶ **搭載機器フォトレシーバ**の技術検討に活動を一本化
  - ▶ 技術的な達成の目処が立った
- ▶ 2021年度末を目処に**JAXA戦略的海外協力ミッション**としてのプロジェクト提案をまとめる予定
- ▶ 人類最大規模の重力波観測ミッションに天文学先進国として、日本から小規模ながらも国際貢献の責務を果たす
- ▶ 将来の宇宙重力波ミッション（国際協力が必須）に向けた国際協調の下地を作るとともに、若手を含む国内研究者の知見・技術を高める最良の機会

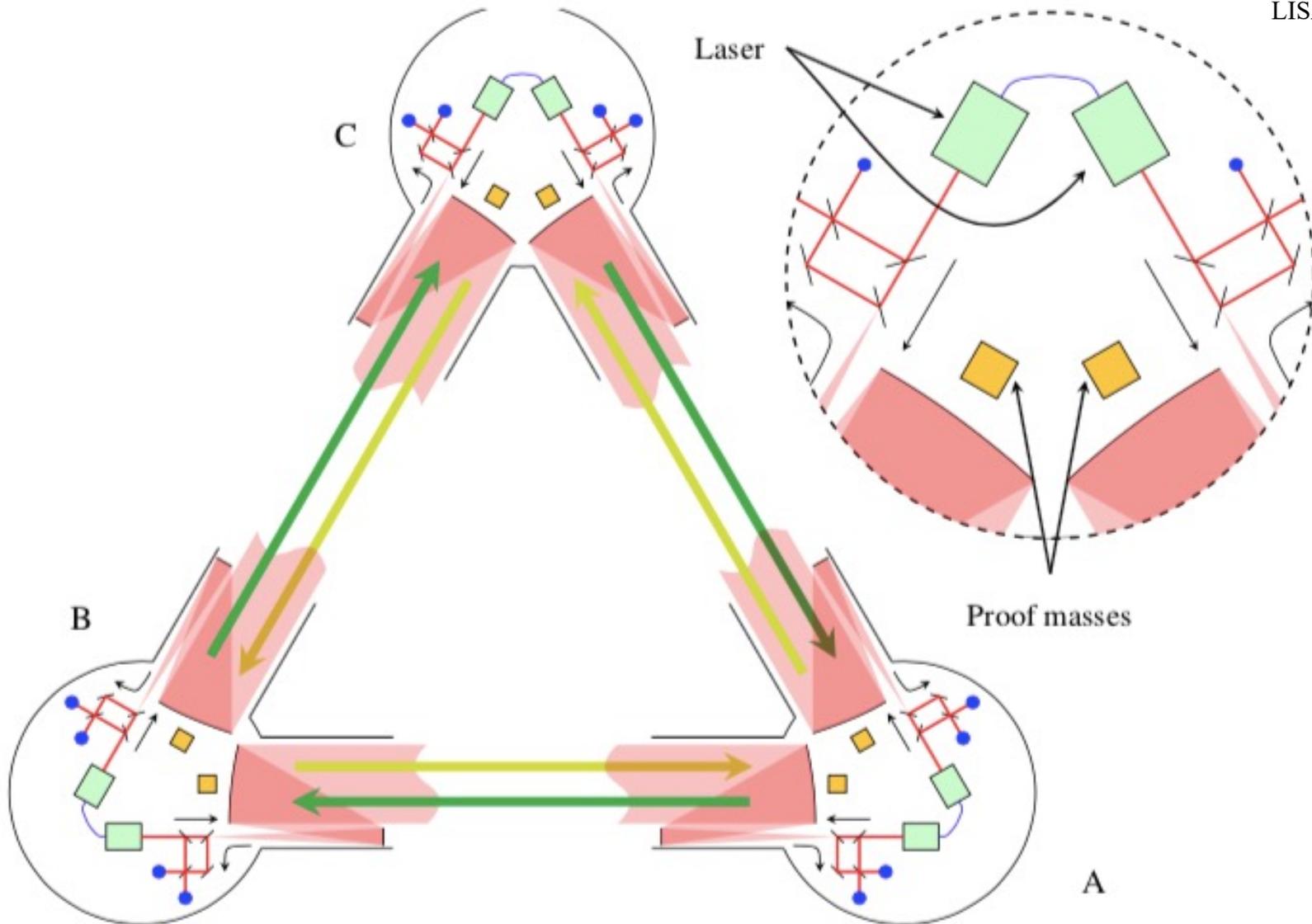
# LISA とは



- ▶ LISA: **L**aser **I**nterferometer **S**pace **A**ntenna  
スペース重力波望遠鏡計画, 2034年打ち上げ予定
- ▶ ESA主導で現在開発が進行中  
Cosmic vision 大型ミッションL3として採択 (2017年)
- ▶ 低周波数 1mHz -100mHz帯の重力波をターゲット
- ▶ 科学目的: 2つの鍵となる質問に答える
  - ▶ 大質量ブラックホールの形成・進化・合体はいかにしてなされ, そして銀河形成との関係はなにか?
  - ▶ BHホライズン近傍から宇宙論スケールにわたる重力の性質は?
- ▶ 総経費: 12億ユーロ
- ▶ 日本から2グループが LISA コンソーシアムへ参加
  - ▶ [理論] Japanese science group (associate members, 8名)
  - ▶ [搭載機器] Japan instrument group (Full members, 11名)

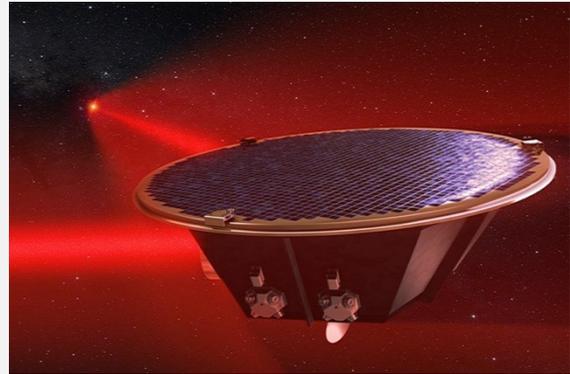
# 主な諸元

LISA assessment study report, ESA/SRE(2011)3

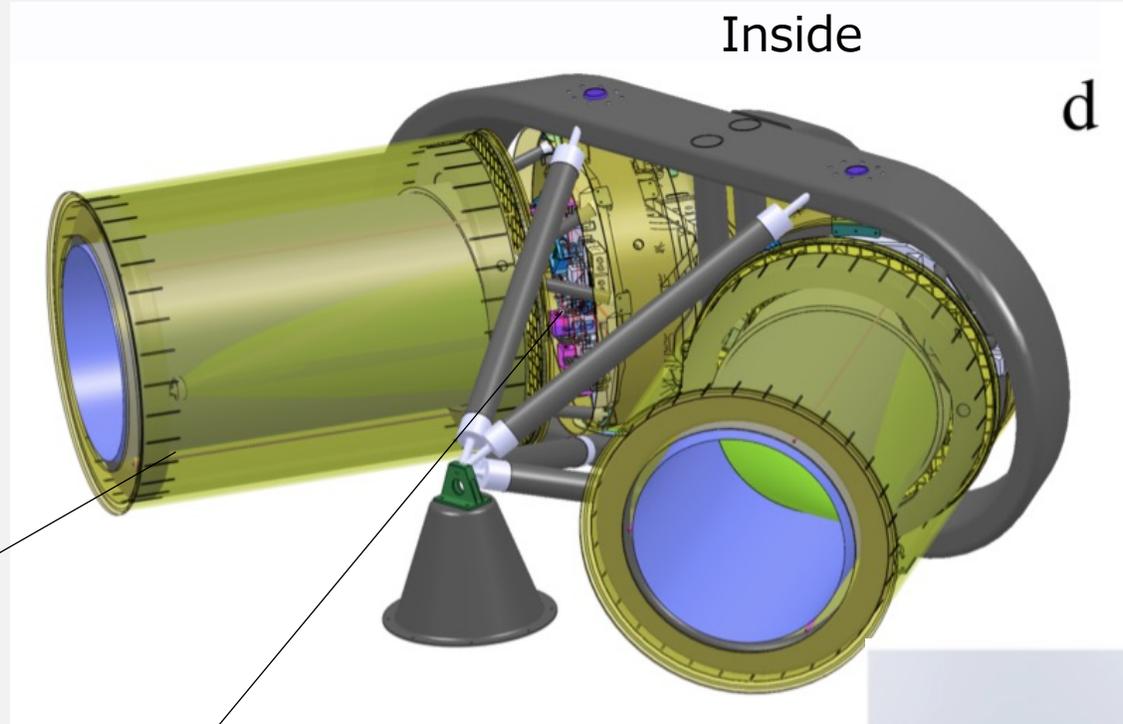


# of S/C: 3  
Arm length: 2,500,000 km  
Orbit: Heliocentric  
# of laser links: 6  
# of test masses: 6  
TM mass: 2 kg  
Wavelength: 1064 nm  
mission duration: 4 6.5 yrs

# How it looks like



Teloscope  
Thermal shroud

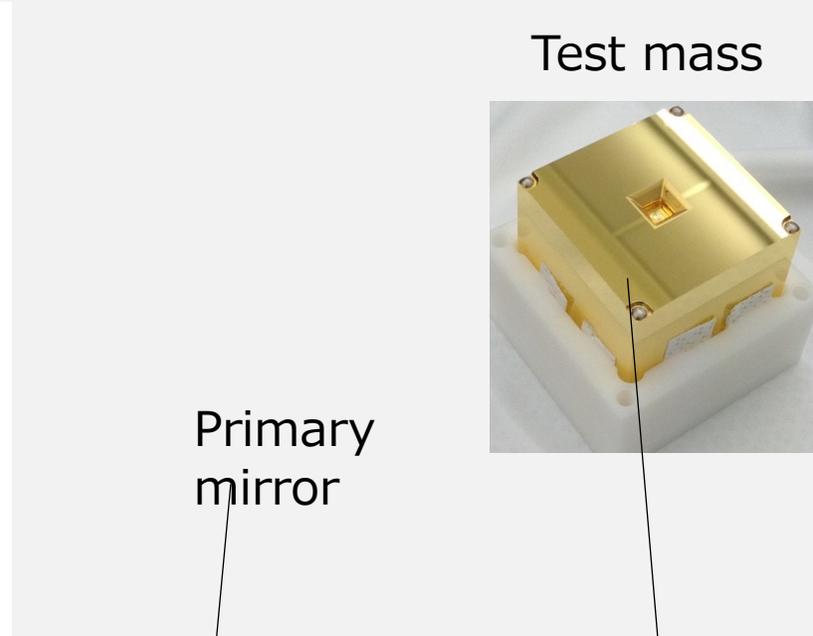


Optical bench

Secondary  
mirror

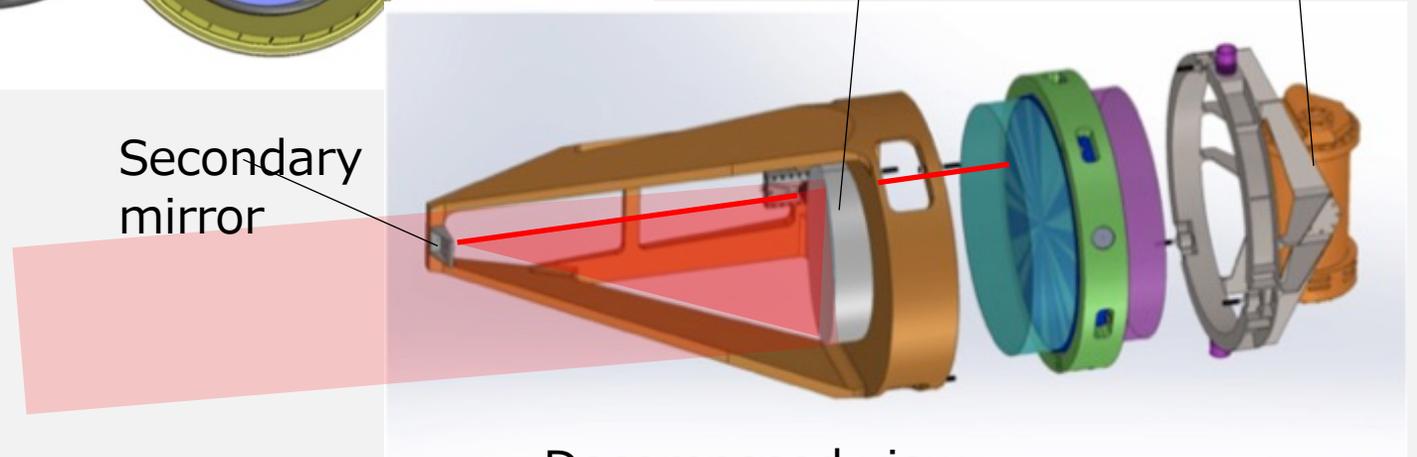
Inside

d



Test mass

Primary  
mirror



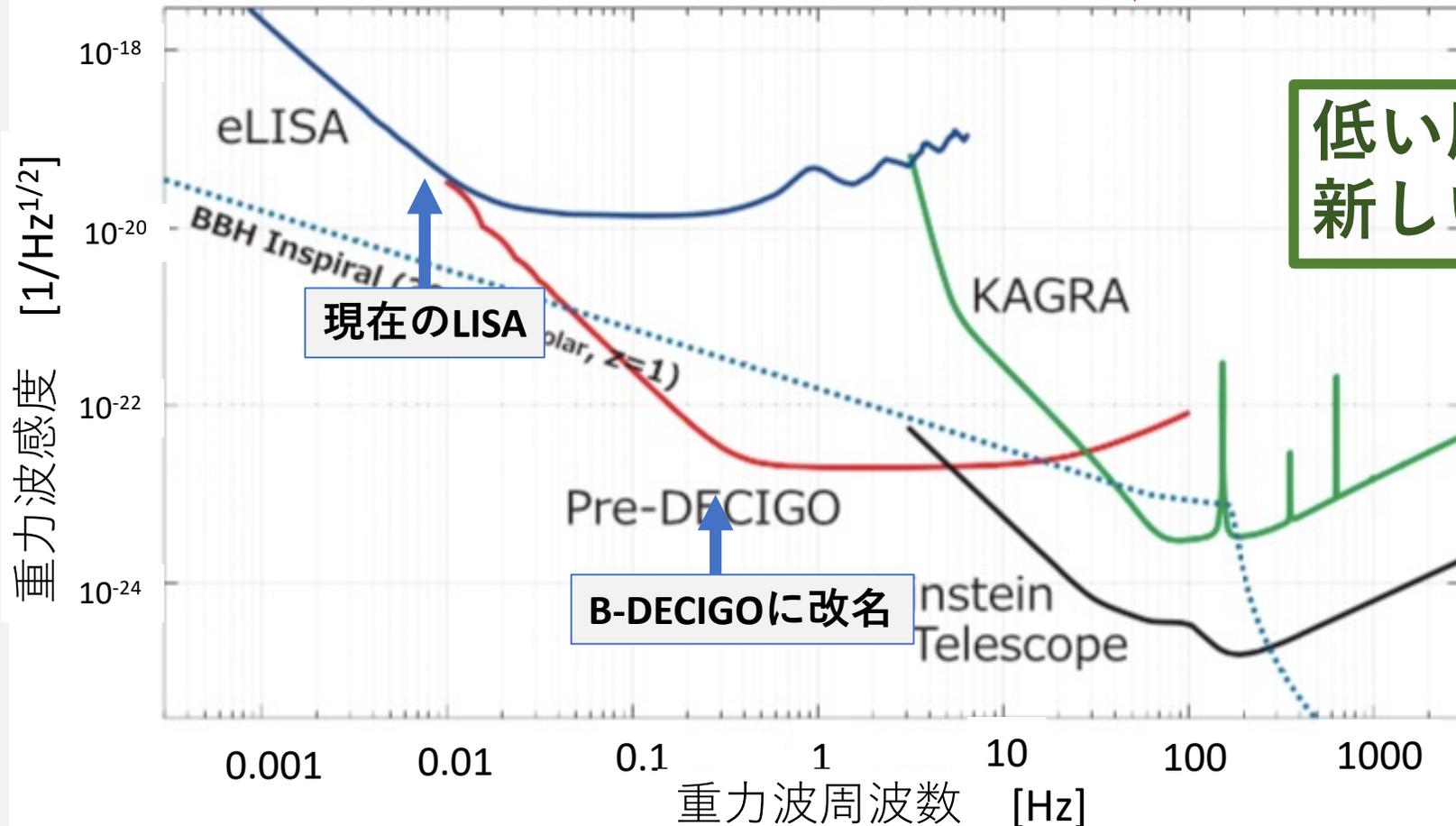
Decomposed view

# 宇宙空間で観測するメリット

地面振動由来の雑音から逃れる  
超長距離のレーザー干渉計



低周波感度の達成  
シンプルな構成で高感度



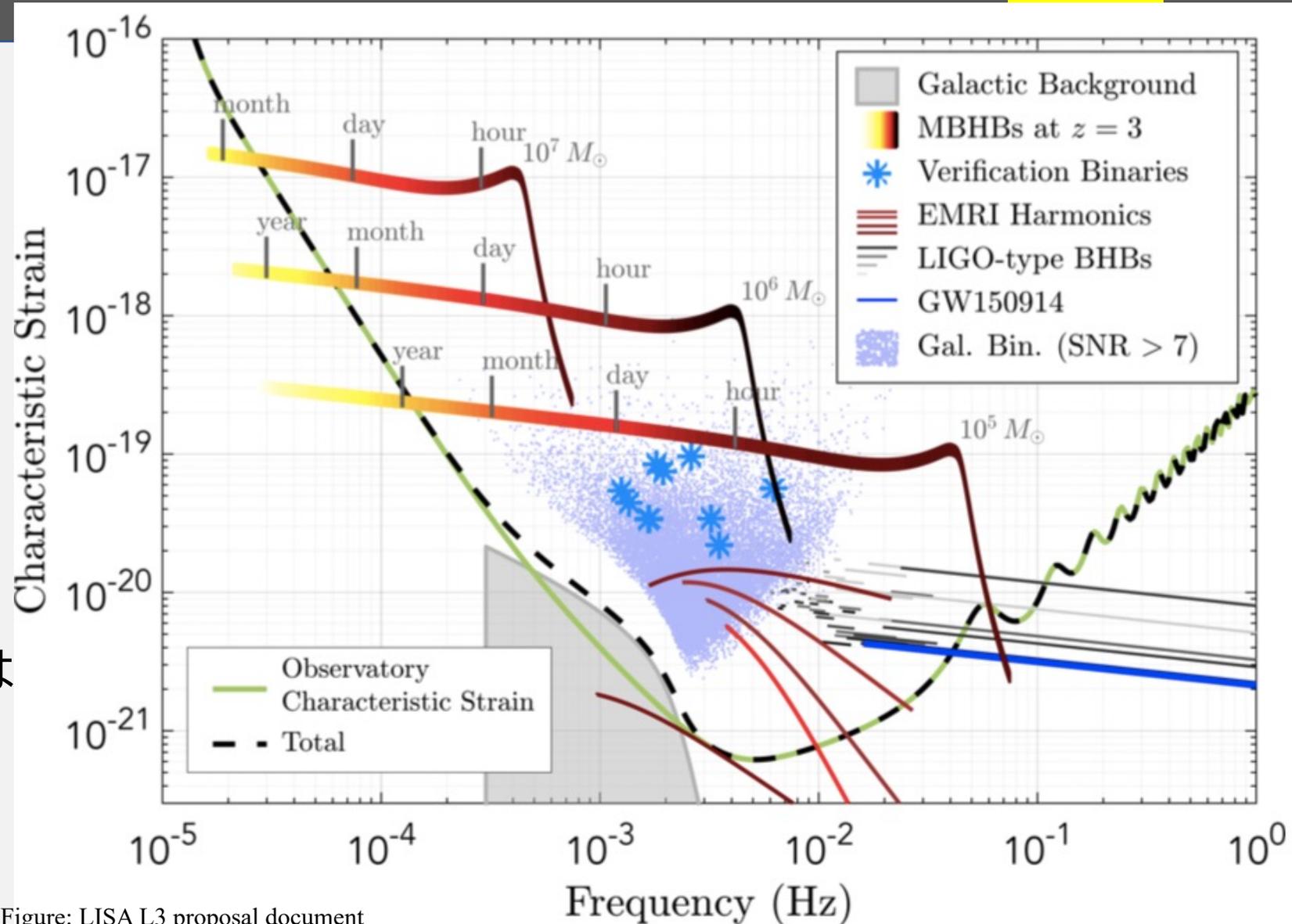
低い周波数での観測  
新しい重力波源の観測・探索

# LISAによる重力波天文学

ターゲットとなる波源

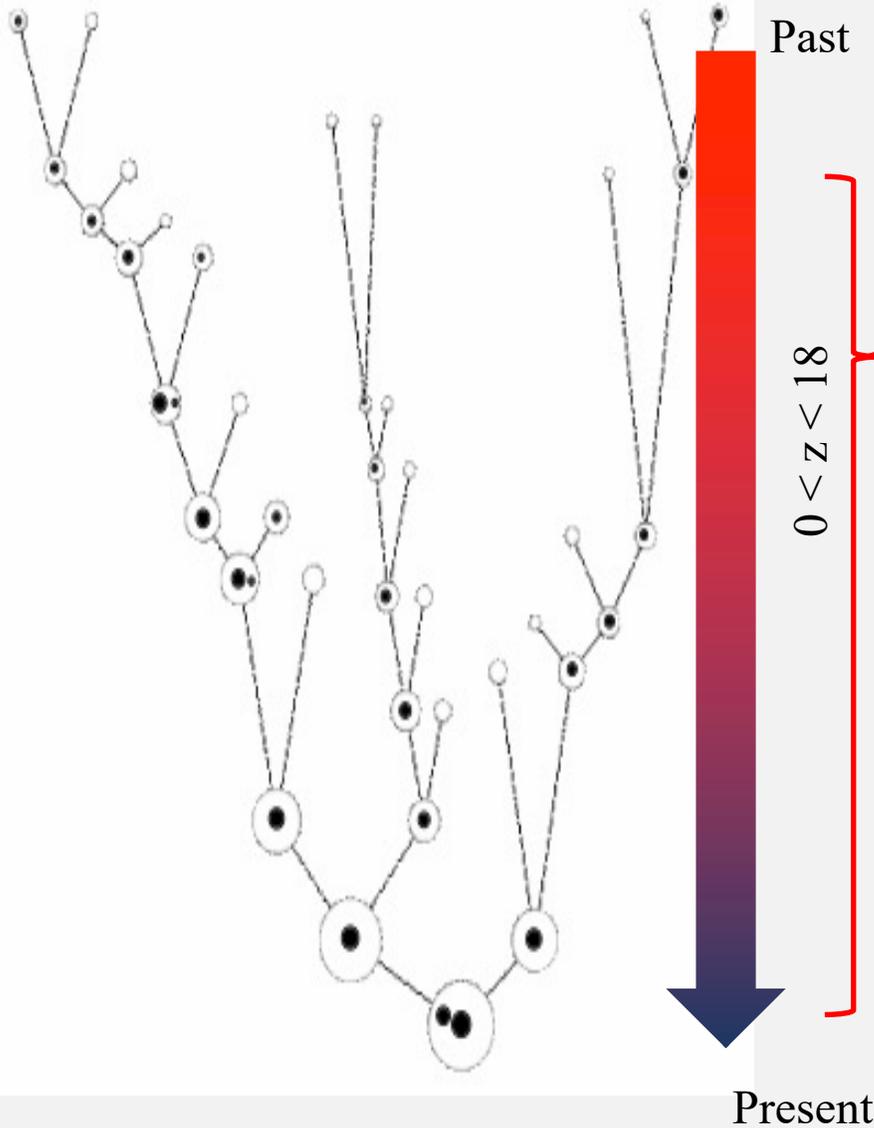
- ▶ 超大質量BH連星衝突合体
- ▶ 極端質量比連星 (EMRI)
- ▶ Galactic binaries  
(白色矮星を含む連星系)
- ▶ そのほか背景重力波など

地上重力波検出器および  
DECIGO/B-DECIGOなどとは  
相補的



# Coalescence event rate prediction v.s. merger tree

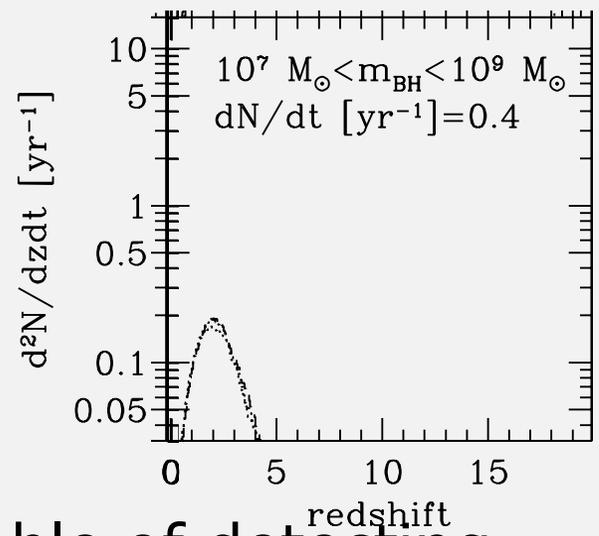
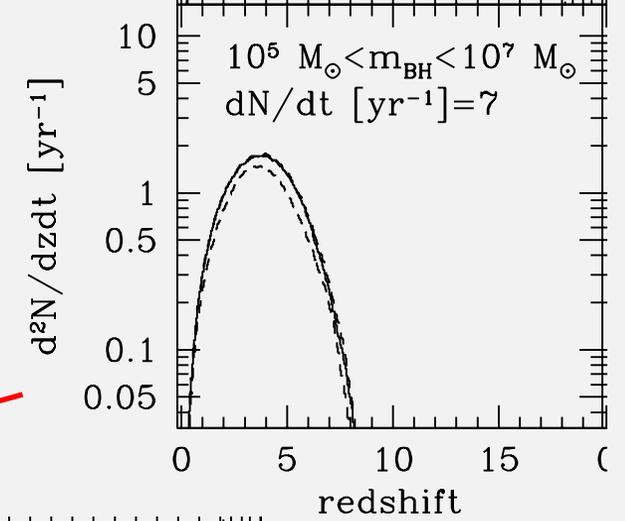
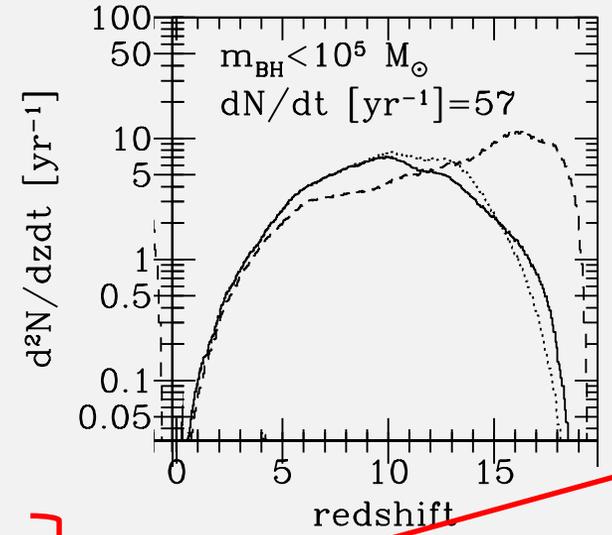
Figures: Sesana+, ApJ (2004)



$0 < z < 18$

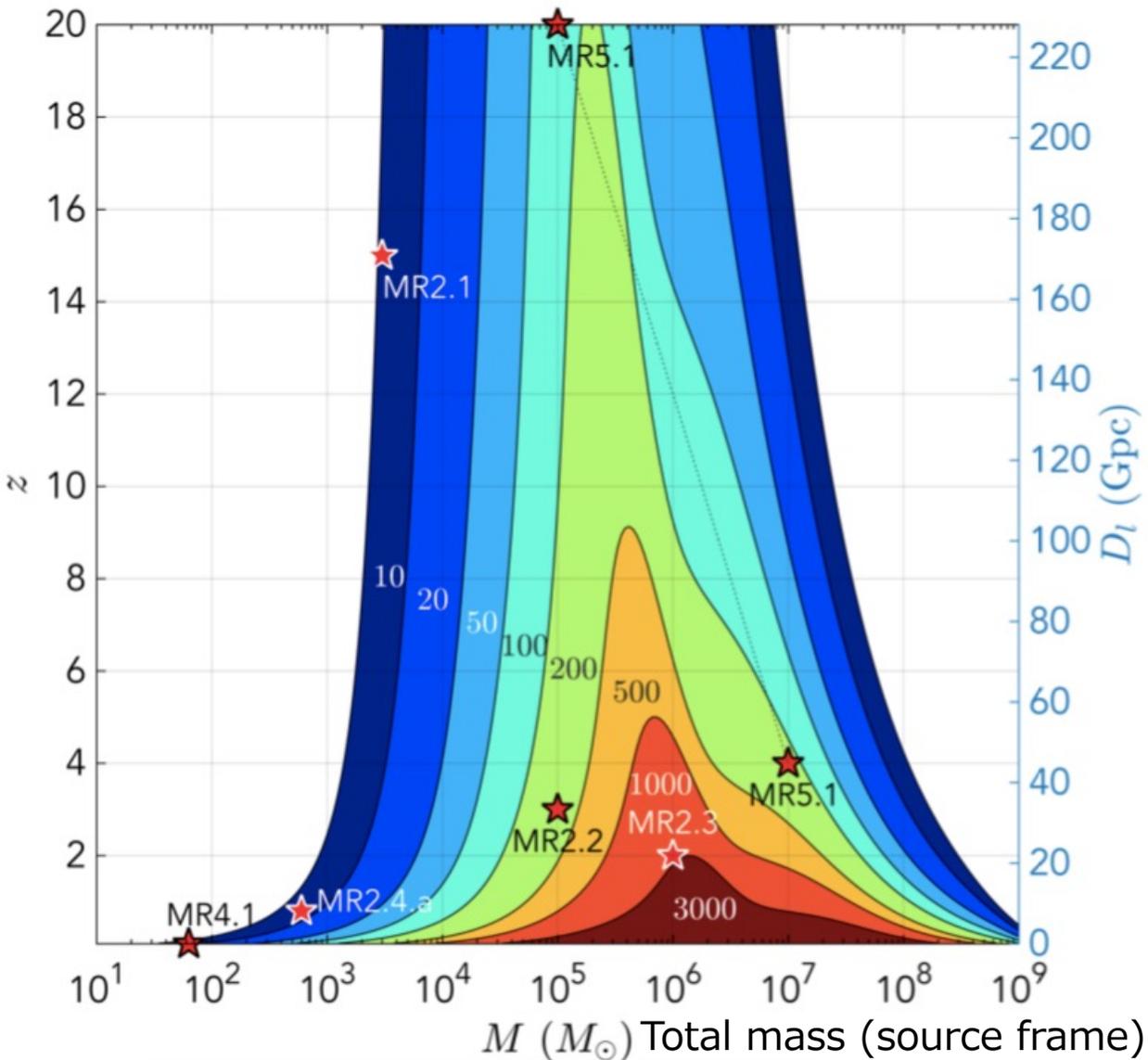
$0 < z < 8$

$0 < z < 4$



LISA capable of detecting  
 $10^3 M_{\odot} < M < 10^7 M_{\odot}$  (beyond  $z = 10$ )

# Covering almost all the epoch in merger tree



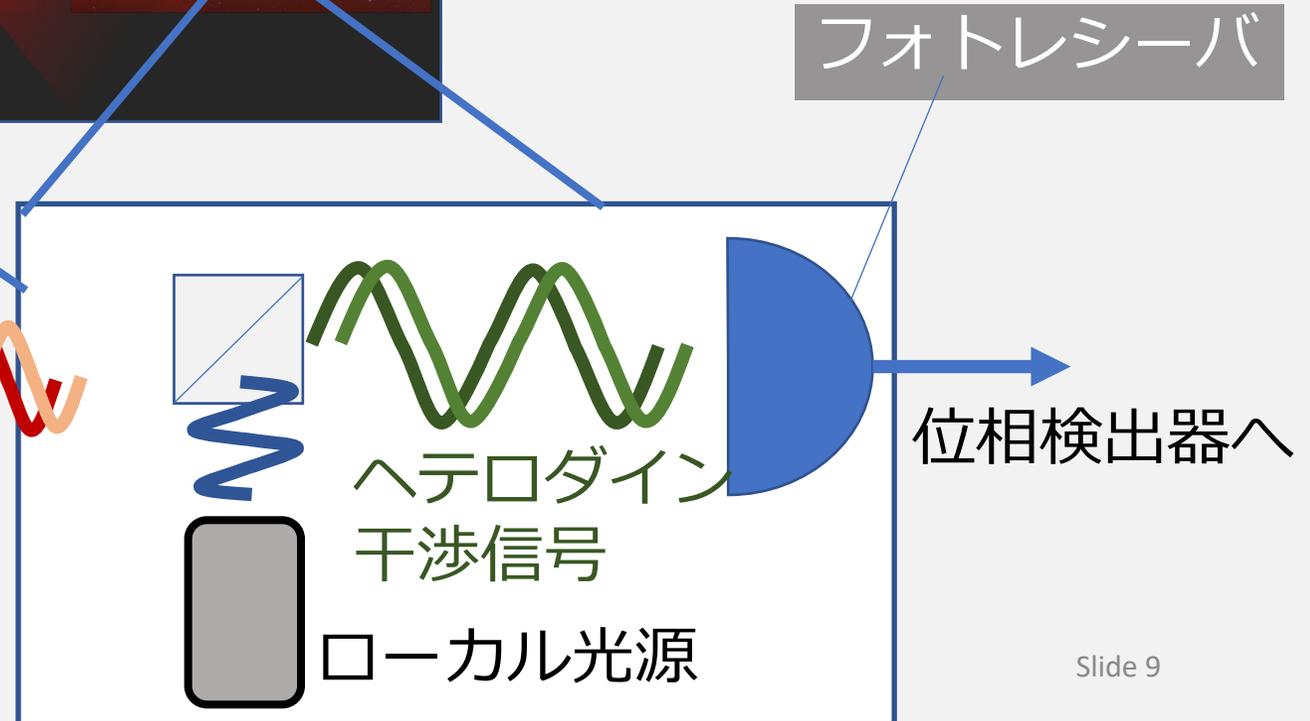
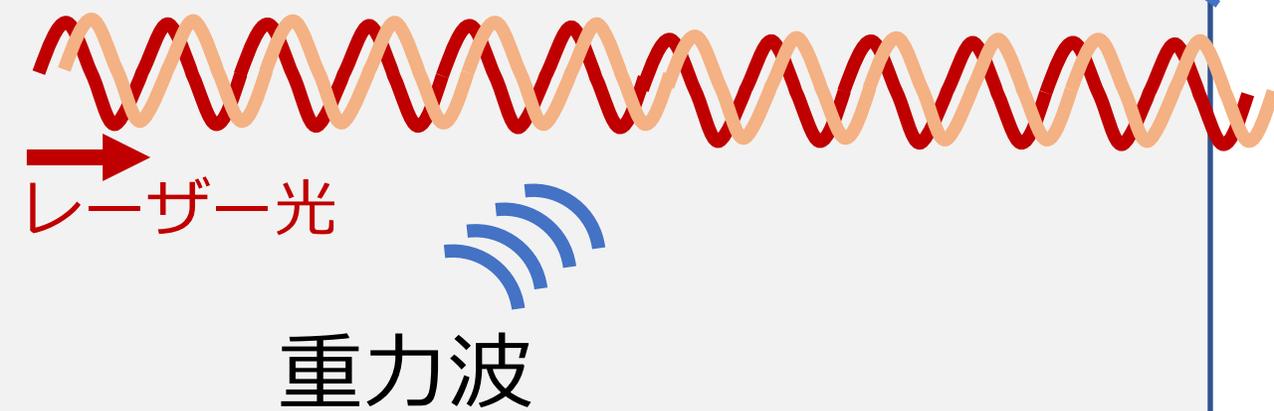
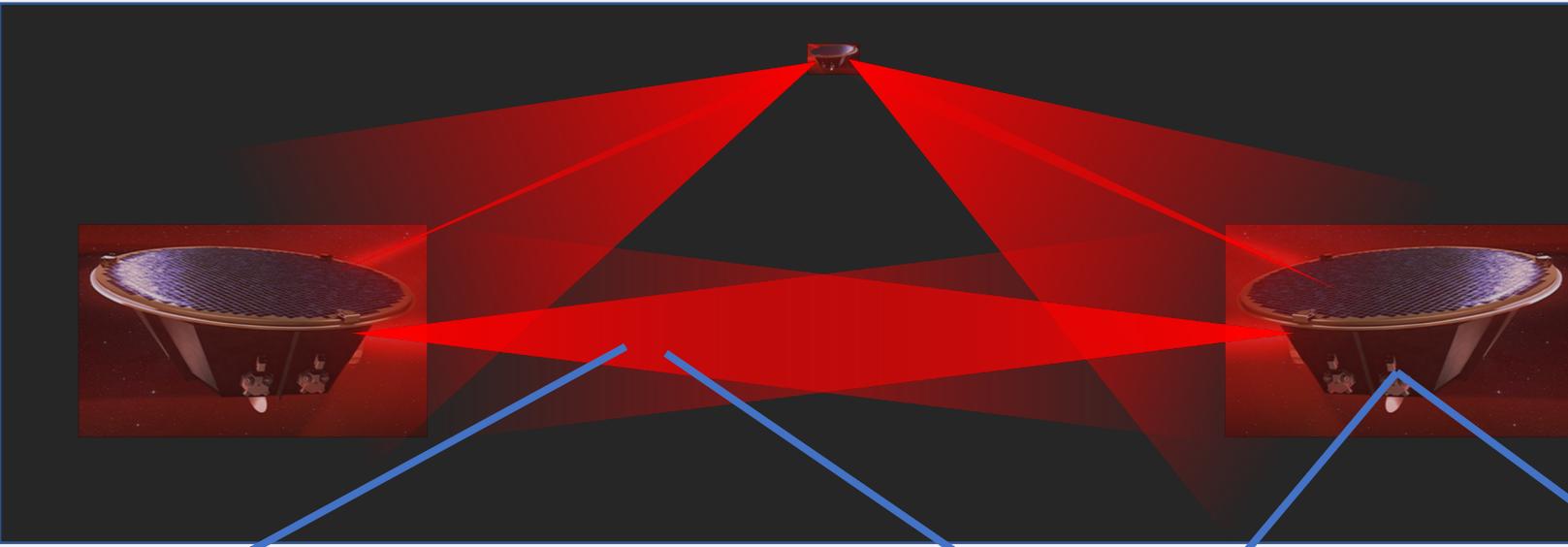
- ▶  $10^3 M_{\odot} < M < 10^7 M_{\odot}$
- ▶ Beyond  $z = 10$

Merger ツリーを辿っていくことが可能

# レーザーヘテロダイン測定による 重力波検出



- ▷ 宇宙機間の距離  $2.5 \times 10^6$  km
- ▷ 換算測距精度  $\sim 10$  pm/Hz<sup>1/2</sup>



# 2019年度将来計画タウンミーティング からの変更点

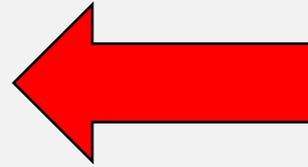
機器開発貢献に関しては複数の貢献候補から、一本化

光検出器（フォトレシーバ）

低振動雑音信号線ハーネス

精密可動ステージ  
(Active Aperture Mechanism)

ISSきぼう実験棟JSSOD  
宇宙環境試験の機会提供

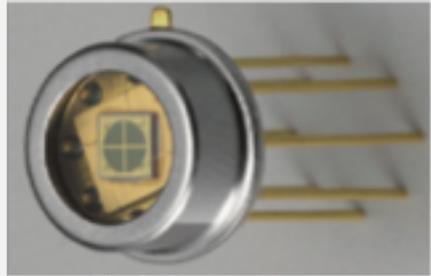


一本化  
日本の強みを生かした技術

宇宙理学委員会に2020年12月に変更を通達。承認済み

# 日本での搭載機器検討： フォトレシーバ

フォトレシーバは低雑音レーザー干渉計読み出しの心臓部，120ユニット必要



四分割InGaAs  
光ダイオード

Example image  
© Hamamatsu

+



読み出し回路  
(増幅回路)

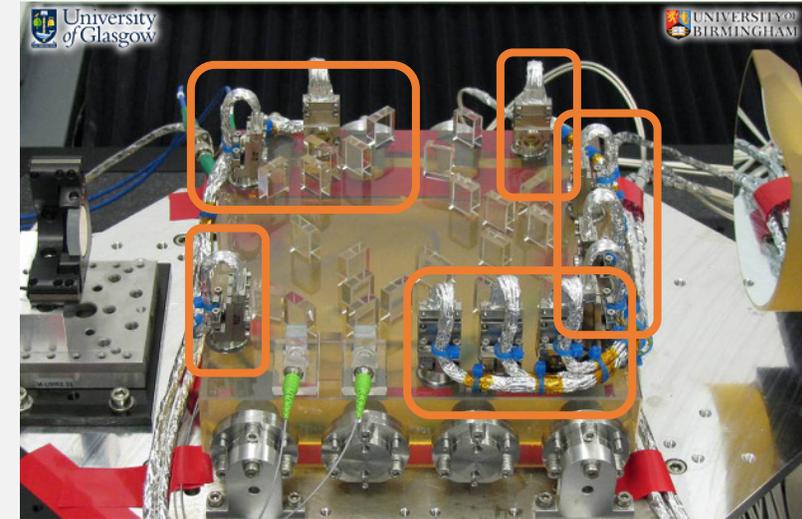
=

フォト  
レシーバ

## 主な要求と仕様

- ▶ 四分割のInGaAs PIN 光ダイオードアレイ
- ▶ 20  $\mu\text{m}$  以下の小さいアレイ間ギャップ
- ▶ 1 mm 以上の大口径アクティブエリア (2 mm 理想)
- ▶ 5-25 MHz の早い応答
- ▶ 2  $\text{pA}/\text{Hz}^{1/2}$  の低電流雑音 (入力換算)
- ▶ 50  $\text{mW}/\text{seg}$  以下の消費電力

© ESA/U. Glasgow/U. Birmingham



※LISA Pathfinder 光学系  
フォトレシーバは低膨張ガラス光学定盤上  
へ配置. LISAも同様.

# 開発の進捗：概ね予定どおり

2019年度CRC将来計画タウンミーティング資料

## 貢献検討その1：フォトレシーバ開発

### (A) 低容量 InGaAs 光ダイオードの開発



第一試作光ダイオード



- InGaAs 4分割素子、1 mm 以上の直径
- 第一試作（浜松ホトニクス）納品
- 14pF/seg のジャンクション容量を達成

第二試作を協議検討中。10pF 以下をねらう

達成

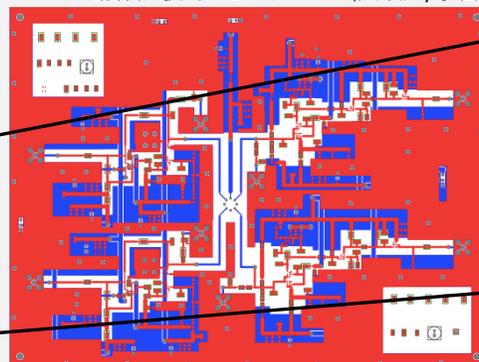
### (B) 低雑音TIA回路の開発

- SiGe:C ヘテロBJT を利用した初段増幅回路
- レギュレーテッドベース接地の採用
- 2 pA/Hz<sup>1/2</sup> in 5-25 MHz を目標

▲ 年度内のテスト回路動作試験

▲ CMOS 集積化による低消費電力・高速化を半導体メーカーT社と検討開始

動作試験用PCBデザイン（法政大/宇宙研）

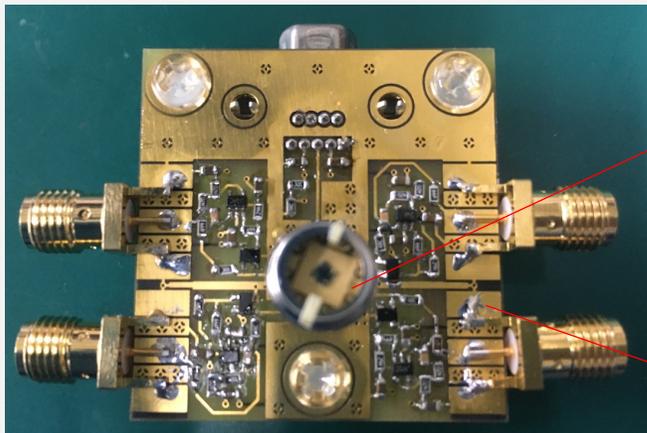


達成

メーカーと折り合いがつかず  
(インハウス研究で検討)

# 準備状況：フォトレシーバ技術

主たる要求機能を満たすブレッドボードモデルの獲得に成功  
放射線耐性に重大なリスクがなければ、企業にEM・FM製造を依頼できる状態  
仏ARTEMISグループが2021年11月に放射線耐性の評価を実施予定



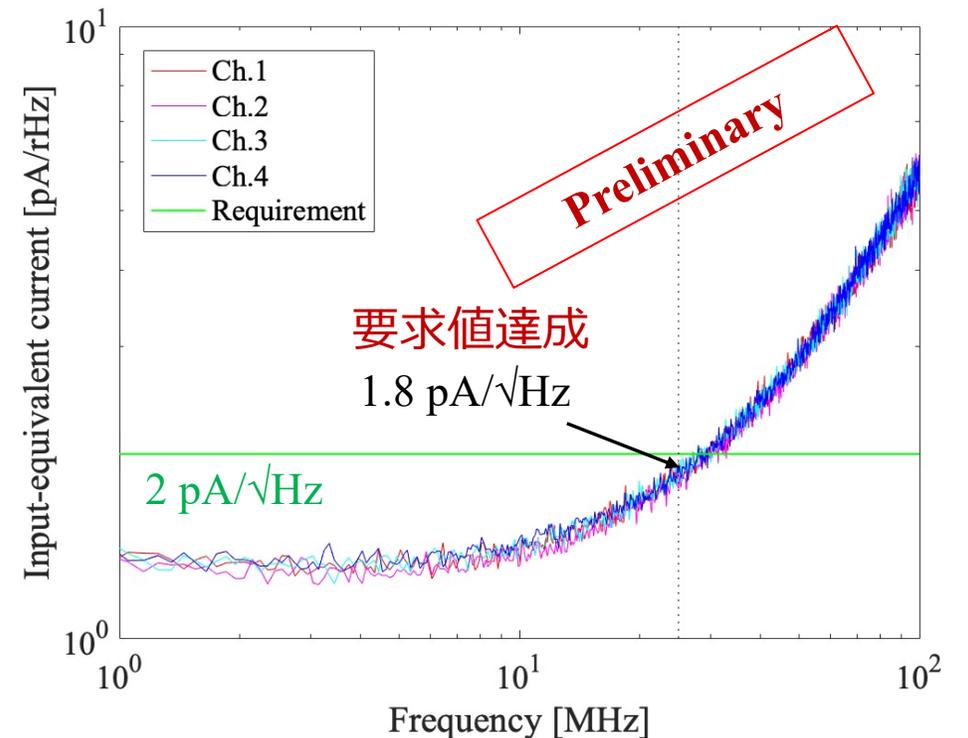
ブレッドボードモデル  
(第三世代)  
40 mm x 40 mm  
4層プリント基板

InGaAs PIN フォトダイオード  
浜松ホトニクス社と協力して試作  
1.5mmφ, 4分割素子  
接合容量 < 10 pF/seg

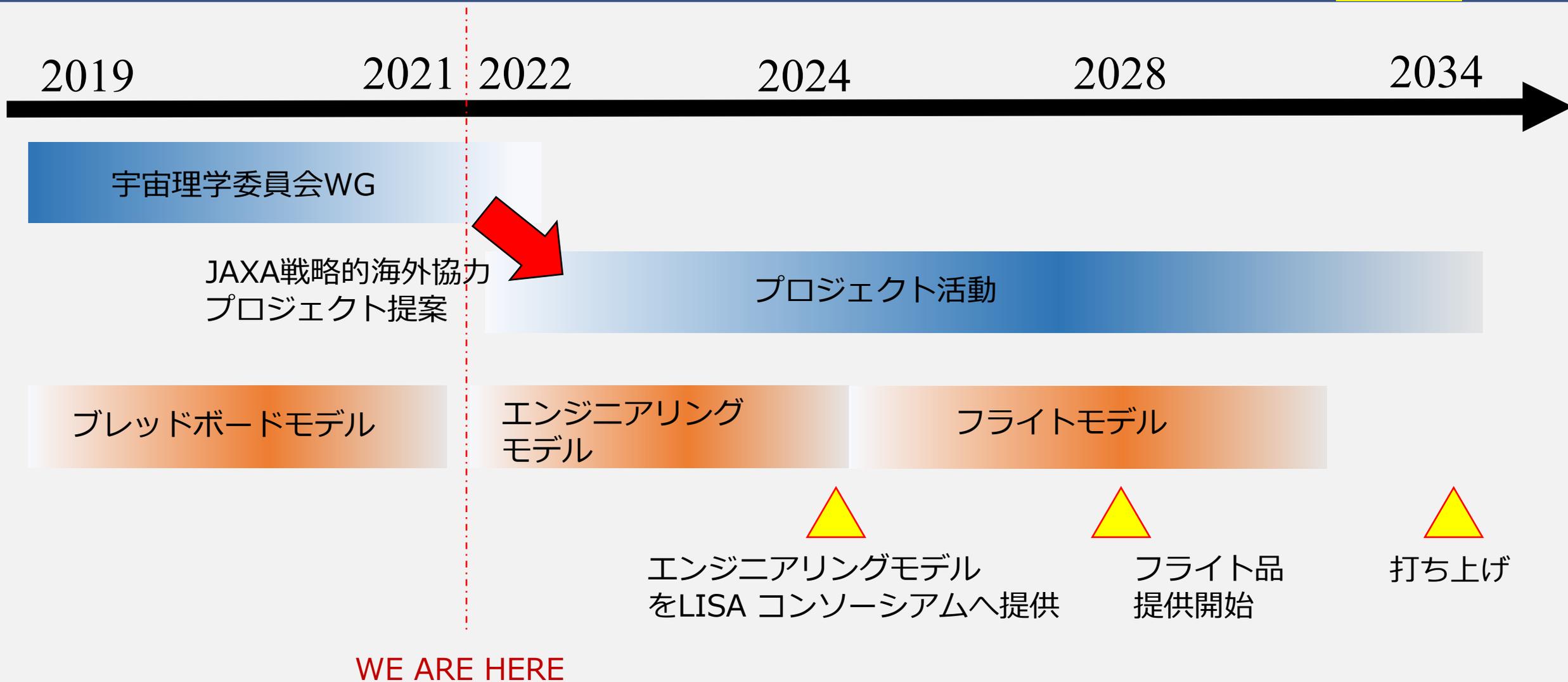
低雑音読み出し回路  
回路構成は日本独自の提案  
SiGe:C ヘテロ接合トランジスタ  
帯域幅 > 25 MHz  
電力消費 ~20mW/seg

※宇宙研宇宙理学委員会・戦略的開発研究経費を利用

入力換算電流雑音の実測定



# タイムライン



# LISAスケジュール更新

## 現在 ESA project Phase-A (概念設計) の段階

| Event                              | From                | To                  | Status  |
|------------------------------------|---------------------|---------------------|---|
| Phase 0 instrument contributions   | 2017-JUL            | 2017-NOV            | Done  |
| Mission Definition Review (MDR)    | 2017-NOV-27         | Late 2021           | Done  |
| Phase A (mission & instruments)    | 2018-APR            | <del>2019-DEC</del> |  |
| Mission Consolidation Review (MCR) | 2019-FEB            | 2019-MAR            |   |
| Mission Formulation Review (MFR)   | <del>2019-OCT</del> | <del>2019-DEC</del> |   |
| Adoption                           | <=2024              |                     |   |
| Implementation (Phase B2/C/D)      | 8.5 years           |                     |   |
| Launch                             | 2034                |                     |   |
| Transfer & Commissioning           | 2.5 years           |                     |   |
| Operations                         | 4 years             |                     |   |
| Extension (TBD)                    | 6 years             |                     |   |
|                                    |                     |                     | 10 years of total science   |

2年程度の延長

2034年を保持

# 準備状況： プロジェクト化に向けた活動

## 国際分担の調整

オランダ・ベルギーのチームもフォトレシーバの開発・供給に興味。  
今年の冬期を目処に**分担調整を開始**。  
宇宙研PO室と連携しながら提案をまとめる予定。

## 国内体制の強化

機器開発は実験研究者11名，現状FTEは3程度。プロジェクト化に向けた**国内体制強化が必須**。機器設計エキスパートなどを取り込むとともに，**企業パートナー候補の選定**に注力。  
狙う**サイエンス報酬の明確化**とそれに伴うチーム拡大も必要。

## そのほか準備活動

フォトレシーバのEM・FM品開発供給で**10億円程度**を想定。  
企業と協力し工程数とその達成にかかる経費を**今年度詳細化**の予定。

# まとめ

- ▶ LISAは1mHz帯の低周波数重力波をターゲットとする宇宙重力波干渉計計画。重力波天文学の更なる展開を担う国際計画。
- ▶ 日本からのLISAへの参加を検討してきた。
  - ▶ フォトレシーバ開発の技術的目処がたった。
- ▶ 今年度末までに戦略的海外協力ミッションとして提案をまとめる。