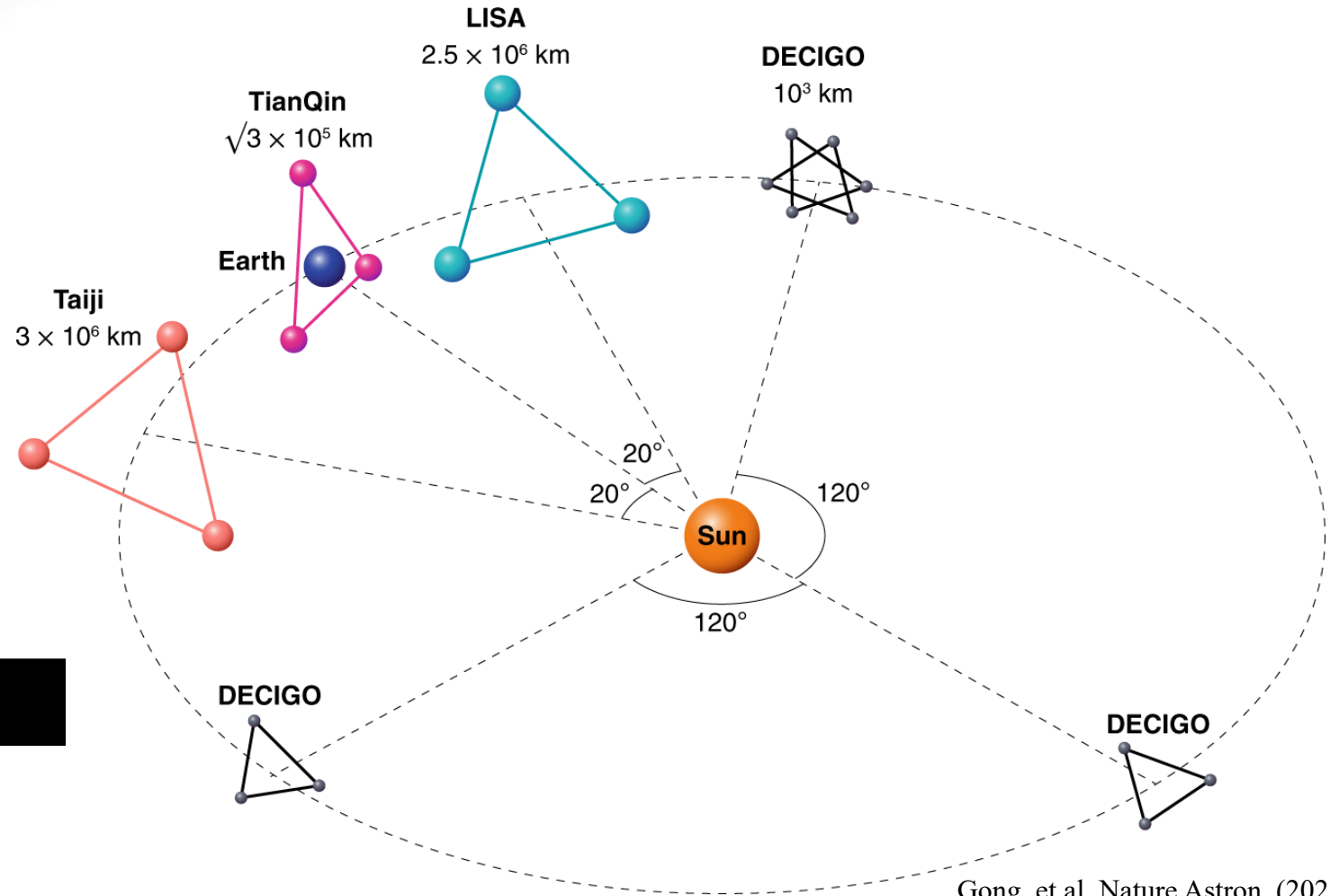


宇宙重力波望遠鏡



和泉究 (ISAS/JAXA)

2024年度第一回CRCタウンミーティング

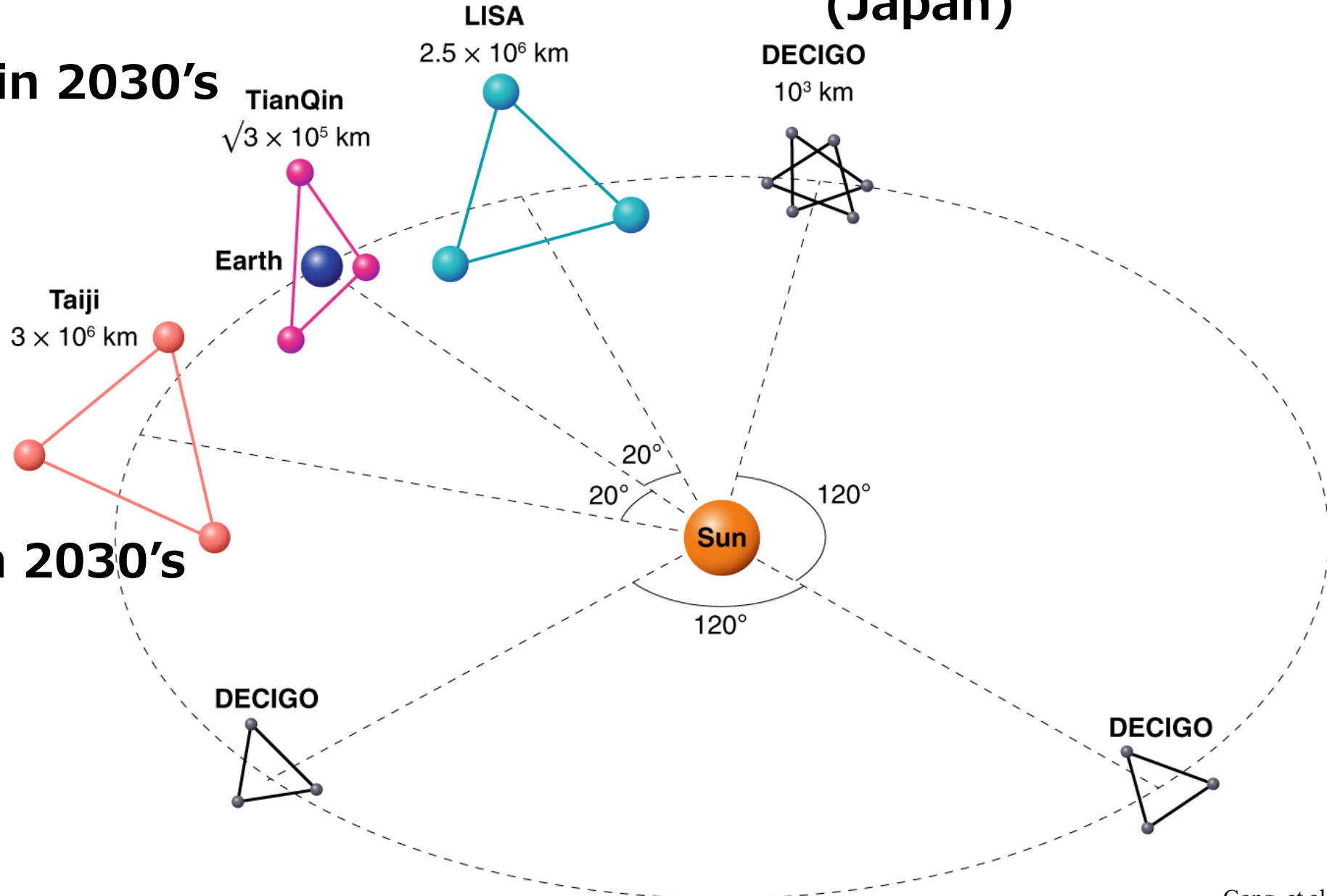
Gong, et al. Nature Astron. (2021)

**Launch in 2034
(ESA + NASA)**

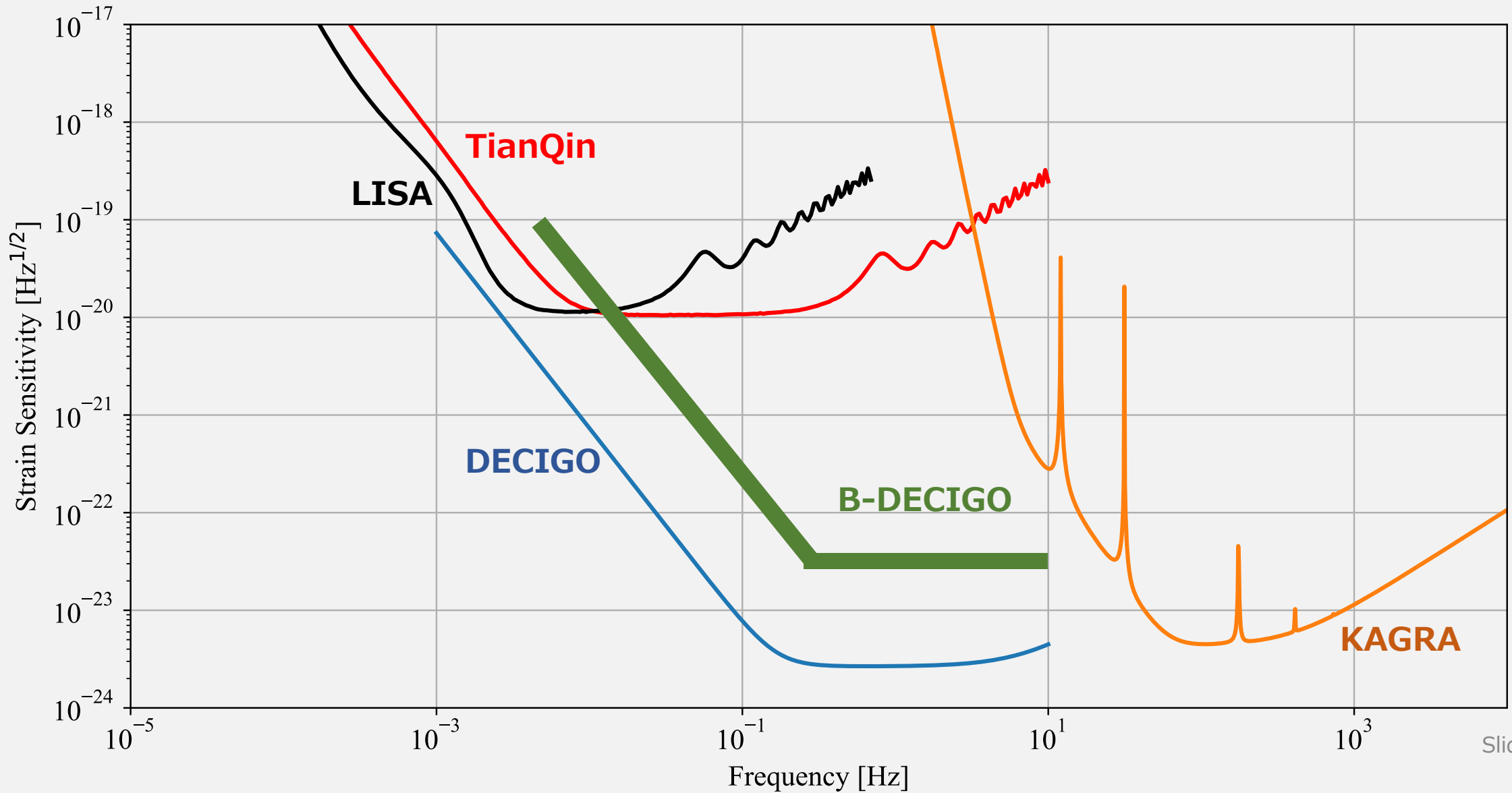
**Launch in 2040's or beyond?
(Japan)**

**Launch in 2030's
(China)**

**Launch in 2030's
(China)**

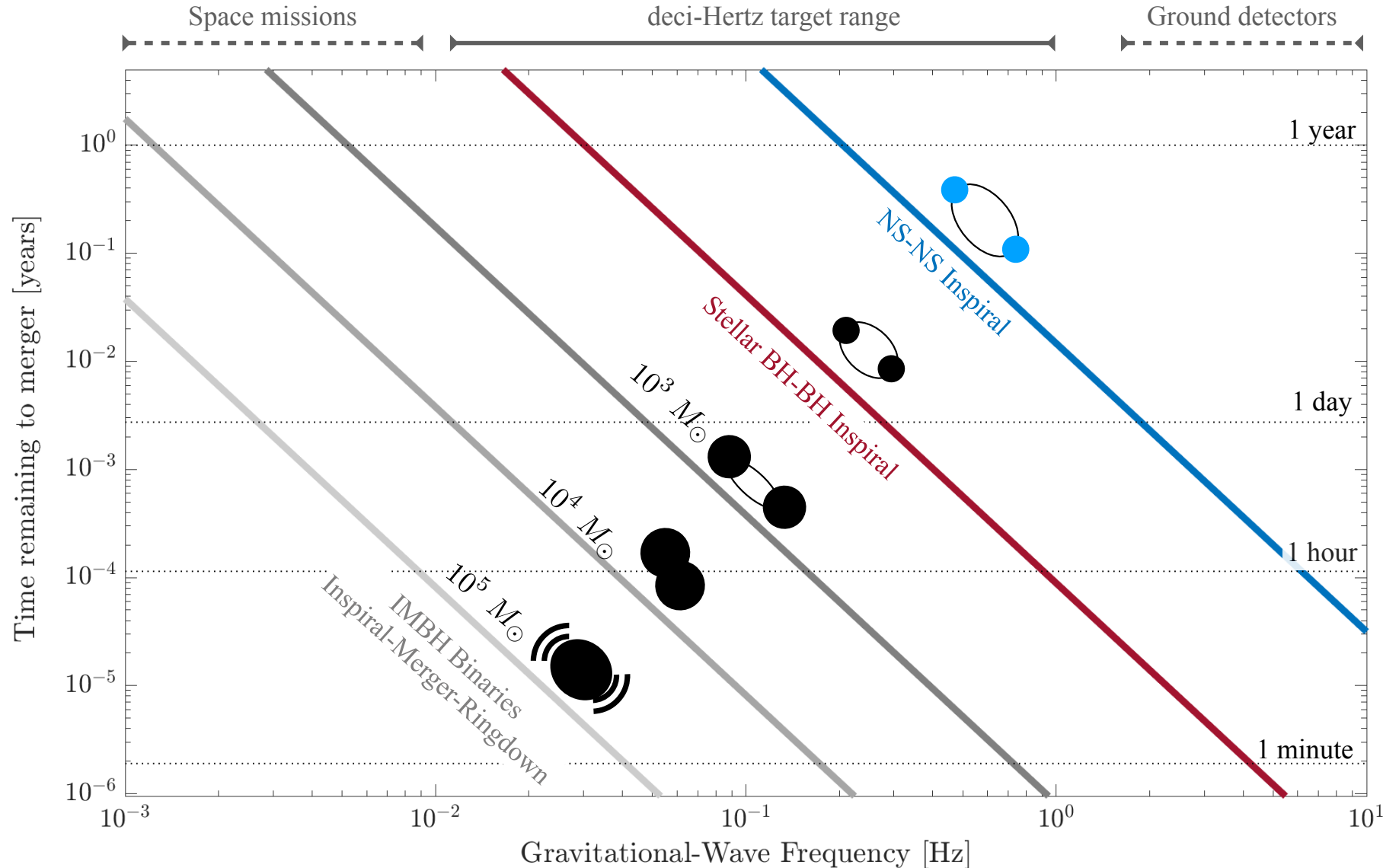


宇宙環境 = 低い周波数帯



地上と異なるターゲット・シナジー

KI and K. Jani, Springer (2022)



国内での構想

LISA, TianQin, Taiji では獲得されない**編隊飛行技術**に先行着手 (SILVIA)

高精度編隊飛行が達成できれば、KAGRA等地上で培われたFabry-Perot干渉計が軌道上で実現 (B-DECIGO/DECIGO)

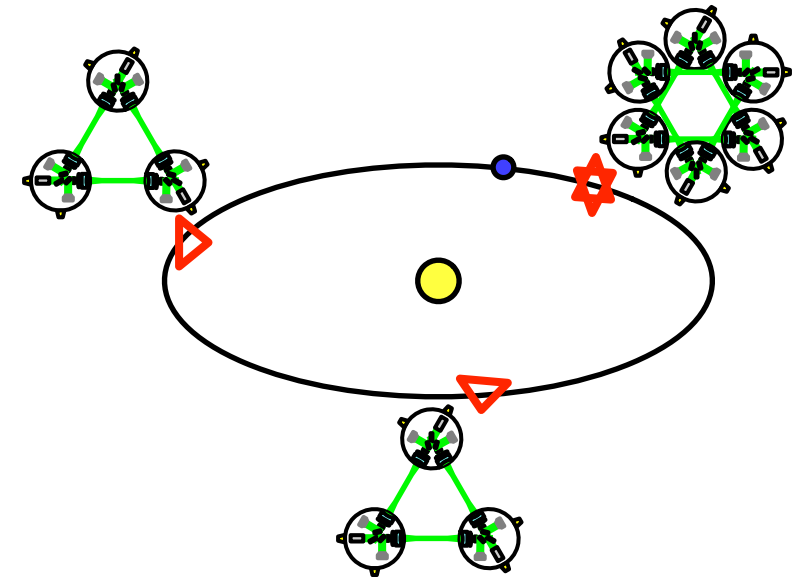
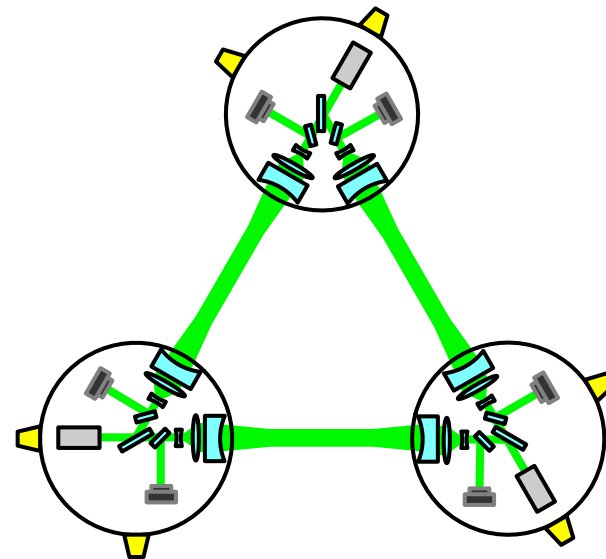
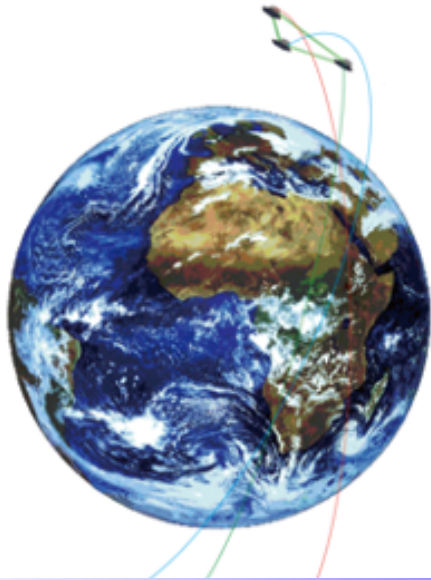
SILVIA

B-DECIGO

DECIGO

技術実証

天文観測



編隊飛行技術

長基線長・外乱抑制技術など

The background of the slide is a deep blue space filled with stars. In the top left corner, a portion of a blue planet is visible. Three bright red laser beams originate from two points on the left and converge towards a bright white and pink starburst in the bottom right corner. The text is overlaid on this background.

LISA

Laser Interferometer Space Antenna

日本からの機器貢献活動

断念しました

経緯

- 2018年10月、LISA Consortium member に登録、11名、グループリード：和泉
理論グループも独立に登録、8名、グループリード：佐合
- 2018年10月、CRCタウンミーティングにてLISA貢献の趣旨説明
- 2018年11月、同上
- 2019年3月、宇宙理学委員会LISA WG設立、主査：和泉
- 2019年12月、CRCタウンミーティング報告
- 2020年12月、活動をフォトレシーバの開発に一本化
- 2021年8月、CRCタウンミーティング報告
- 2021年夏季、**日本貢献提案が secondary option** とすることを LISA SPCワークショップで決定
引き続き2022年度も供給可能性を模索することをコンソーシアムに連絡
- 2023年12月、宇宙理学委員会へLISA WGの活動終了を報告

日本提案が secondary option となった理由

- 欧州グループ（ベルギー・蘭）の提案を第一候補と扱う、というLISA SPCの考え方にもとづく
- 日本からの提案は欧州グループの提案に対して性能的には優れている部分があったものの、プログラムの観点で評価してもらえなかった。

活動の遺産： 将来の国際協調時の交渉カード獲得

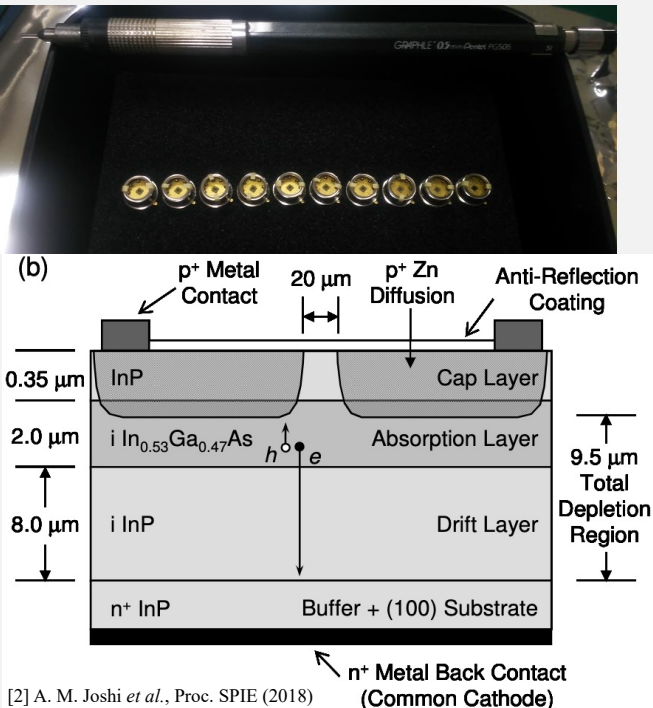
宇宙対応・低雑音InGaAs PINフォトダイオードアレイ

- ・ 浜松ホトニクス社に新規特注開発いただいた (P. Colcombet+, IEEE Trans. Nucl. Sci., 2024)
- ・ 2025年現在、複数の海外ミッションから搭載相談がくるなど分野内外で評価

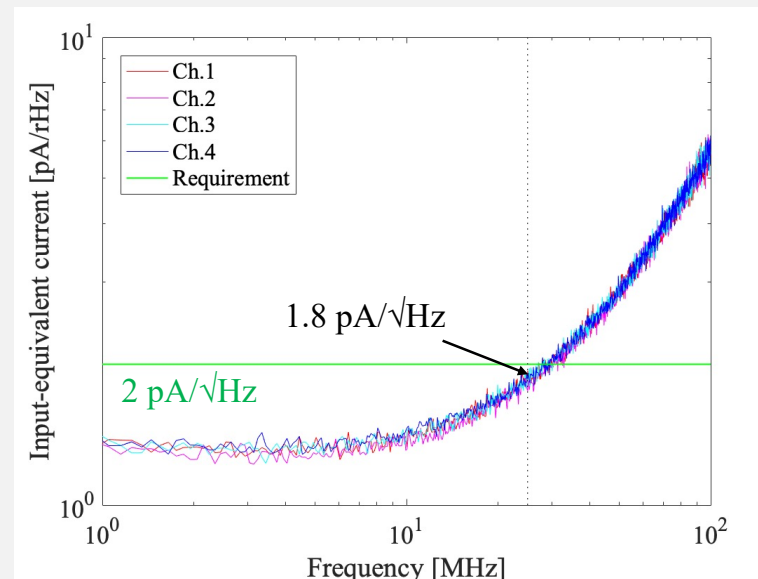
LISAへの実質的な貢献と国際的ビジビリティ向上

- ・ 小森（東大）らによる回路トポロジー提案がLISAのベースラインとして採用された

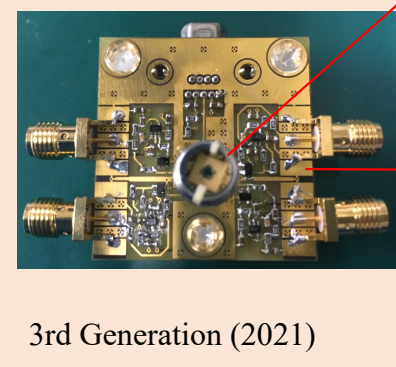
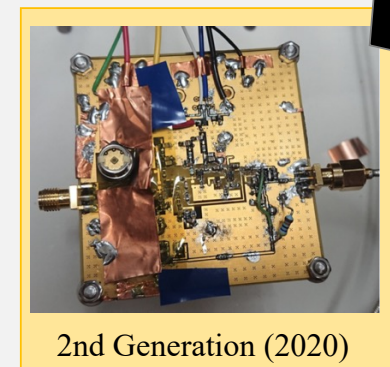
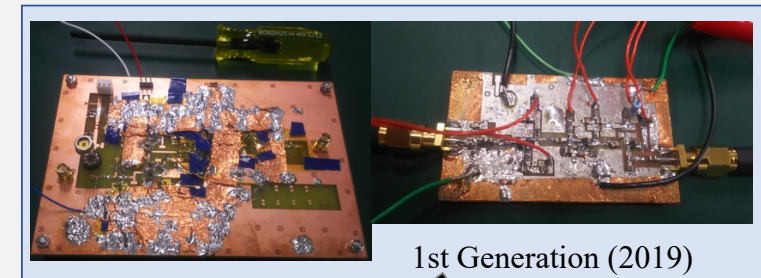
(上) InGaAs PINダイオードアレイ
(下) InGaAs の放射線耐性向上の手法



LISAの雑音要求を満足するフォトレシーバの開発を達成



3世代サイクルの開発を実施、小型化も完了

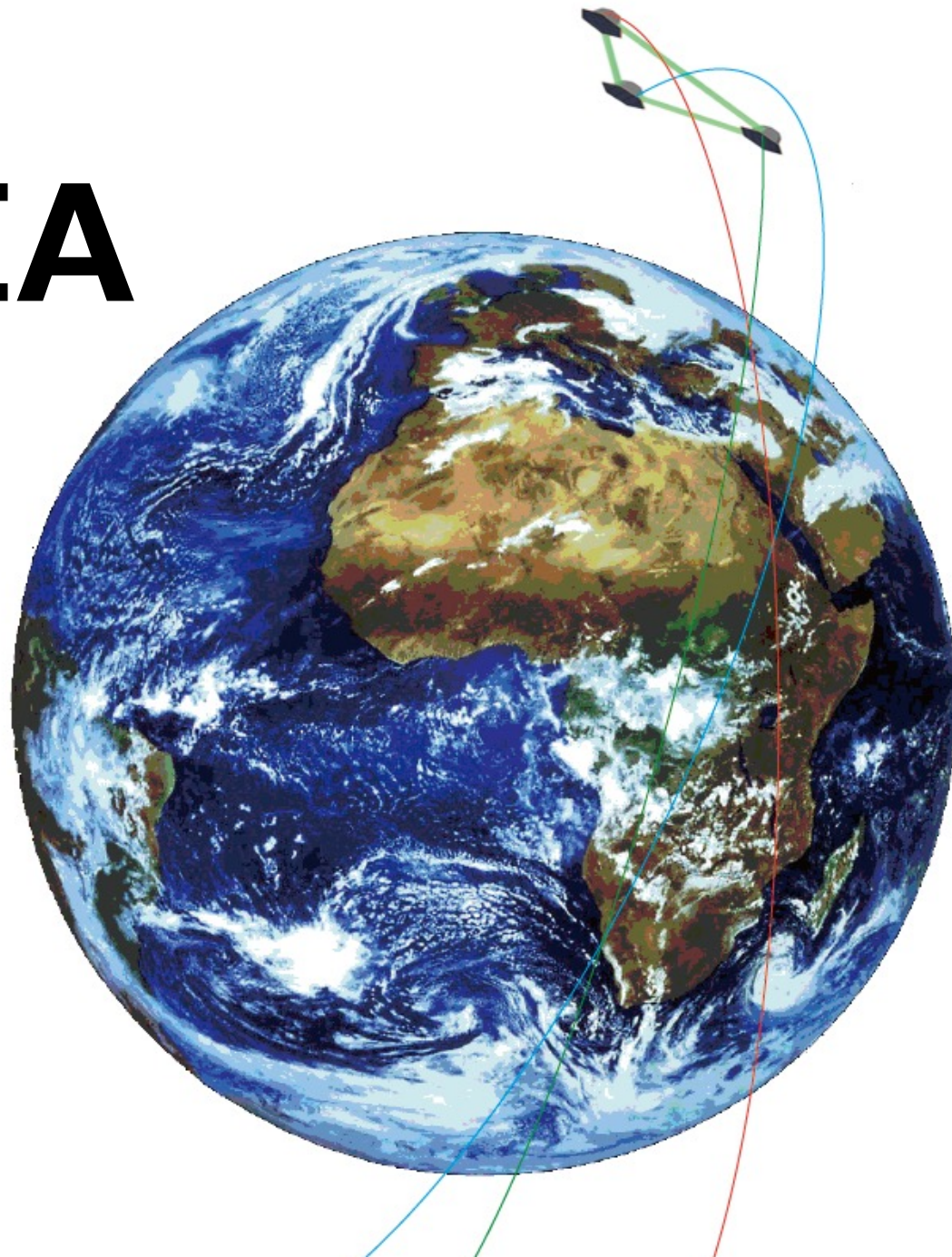


成果報告

読み上げ割愛

- 発表論文
 - 1) P. Colcombet, ..., K. Izumi, K. Komori, et al., "Radiation Tolerance of Low-Noise Photoreceivers for the LISA space mission", proceedings of RADECS2023 conference, arXiv:2310.09809
 - 2) G. F. Barranco and G. Henzel, "A DC-coupled, BHT-Based Transimpedance Amplifier for the LISA Quadrant Photoreceivers," IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, 57, 5, 2899 (2021)
 - 3) K. Izumi, et al., "The current status of contribution activities in Japan for LISA," Prog. Theor. Exp. Phys., 2021, 5 05A106 (2020)
- 学会発表等
 - a) K. Izumi, "LISA and Instrument Contributions from Japan," RESCEU workshop for space gravitational-wave detection, Univ. Tokyo (2019)
 - b) K. Izumi et al., "QPR development in Japan," The 4th LISA consortium meeting, Univ. of Florida, Gainesville, FL, USA (2019 年 4 月)
 - c) 和泉究ほか, 「スペース重力波望遠鏡 LISA に向けた機器開発」, 日本天文学会秋季大会, 熊本 大学, V2-0242-a, (2019 年 9 月)
 - d) 和泉究ほか, 「スペース重力波望遠鏡 LISA への参加」, 第 63 回宇宙科学技術連合講演会, ア スティ 徳島, 1N07(2019 年 11 月)
 - e) 小林雅人ほか「宇宙重力波望遠鏡 LISA のためのフォトレシーバ開発」, 宇宙科学シンポジウ ム、宇宙科学研究所, ポスター発表 P2.61(2020 年 1 月)
 - f) 和泉究ほか, 「低雑音大口径広帯域 InGaAs フォトレシーバ」・天文学に関する技術シンポジウ ム, ポスター発表 P13, 国立天文台(2020 年 1 月)
 - g) 小林雅人ほか, 「宇宙重力波検出器LISAのためのフォトレシーバーの開発」日本物理学会春季大会, 名古屋大学, 17ak16-3(2020 年 3 月)
 - h) Nicoleta Dinu-Jaeger and QPR working group, "Overview of Quadrant Photoreceivers development for LISA," the 13th LISA symposium, online (2020年9月)
 - i) 岡坂洋輝ほか, 「LISA搭載用フォトレシーバの開発」, 日本物理学会秋季大会, オンライン開催, 15pSM-12 (2020 年 9 月)
 - j) 和泉究ほか, 「スペース重力波望遠鏡LISAへの参加(2)」, 第64回宇宙科学技術連合講演会, オ ンライン開催, 3B04(2020 年 10 月)
 - k) 岡坂洋紀ほか, 「LISA搭載用フォトレシーバの開発(2)」日本物理学会春季年会14pW3-7(2021 年 3 月)
 - l) 和泉究ほか, 「スペース重力波望遠鏡LISAのための機器開発:フォトレシーバ」日本天文学会 春季年会, V217a(2021 年 3 月)
 - m) 小森健太郎ほか, 「宇宙重力波望遠鏡 LISA のための広帯域低雑音光検出器の開発」日本物理 学会秋季年会 14aW3-9(2021 年 9 月)
 - n) 和泉究ほか「宇宙重力波アンテナLISAへの日本の参加」宇宙科学シンポジウム・ポスター発表, P-152 (2022 年 1 月)
 - o) 小森健太郎ほか「宇宙重力波望遠鏡LISAのための広帯域低雑音光検出器の開発」宇宙科学シンポジウム・ポスター発表, P-152(2022 年 1 月)
 - p) 和泉究「マルチメッセンジャー天文学と将来への展望」宇宙科学シンポジウム・企画セッシ ョ ン講演, S7-004(2022 年1月)
 - q) 内藤隆人ほか, 「遺伝的アルゴリズムによるフォトレシーバ回路設計 - 重力波望遠鏡への応用 -」, 22pW3-8 (2023年3月)

SILVIA



SILVIA

(Space **I**nterferometer **L**aboratory **V**oyaging towards **I**nnovative **A**pplications)

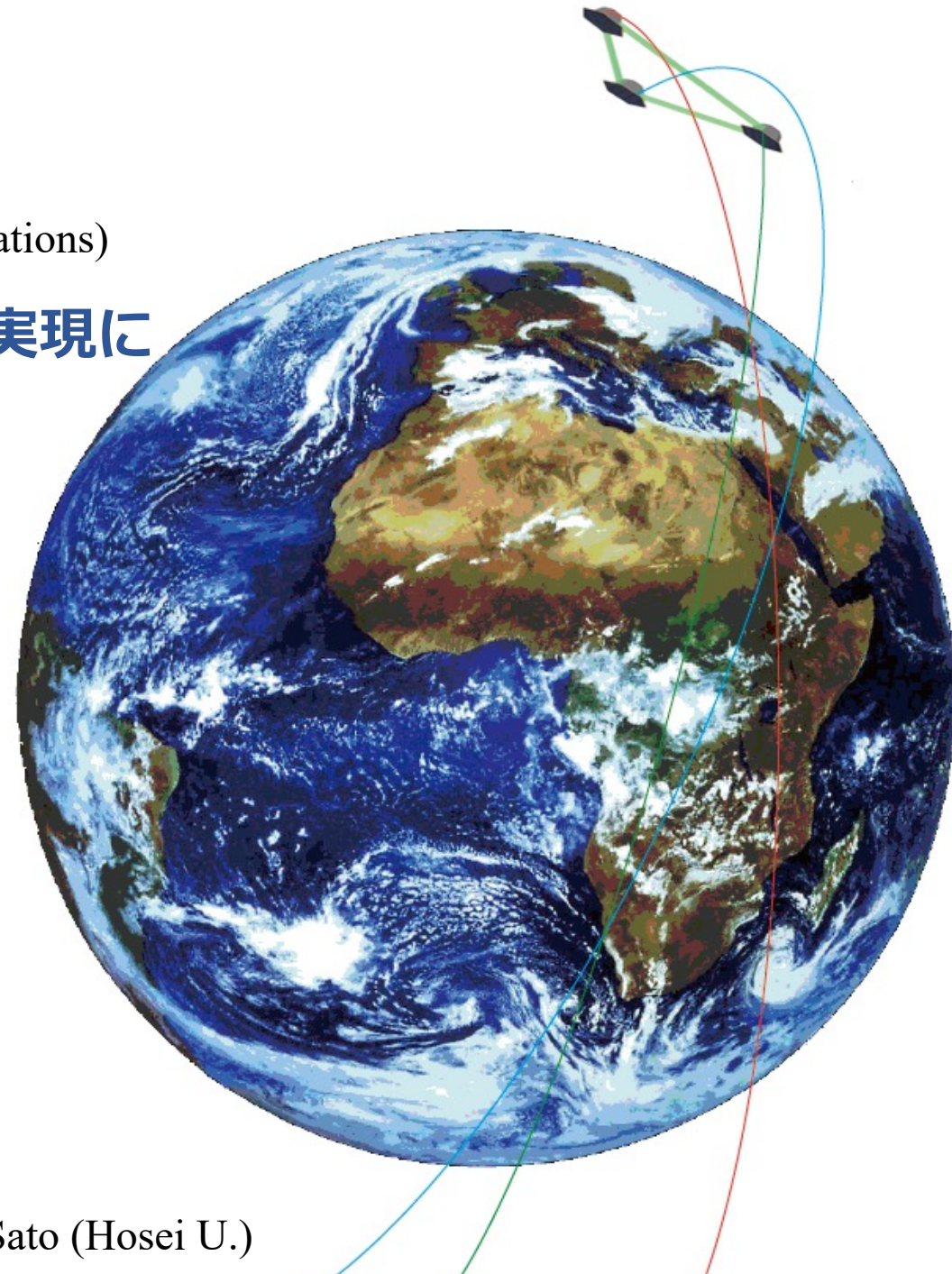
新時代の高精度天体観測手法である宇宙干渉計の実現に
必須となる超高精度FF技術の軌道上実証を目指す

❖ JAXA公募型小型計画として提案

- 提案2020年2月
- 強化型イプシロンロケット打上げ想定

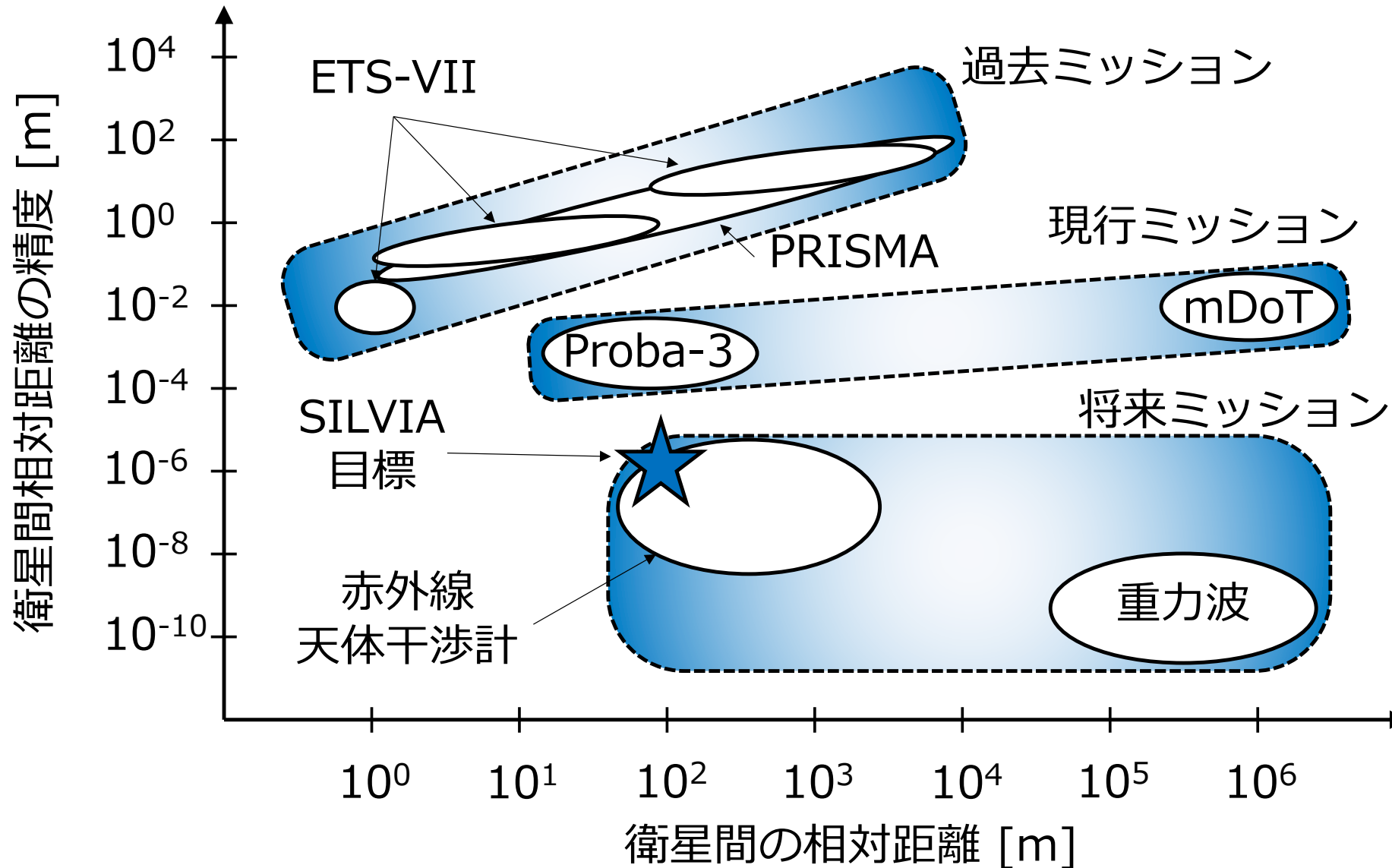
❖ 工学実証衛星

- 超高精度の編隊飛行 (FF)
- 衛星間レーザー干渉計



SILVIAの立ち位置

編隊の高精度化をねらう

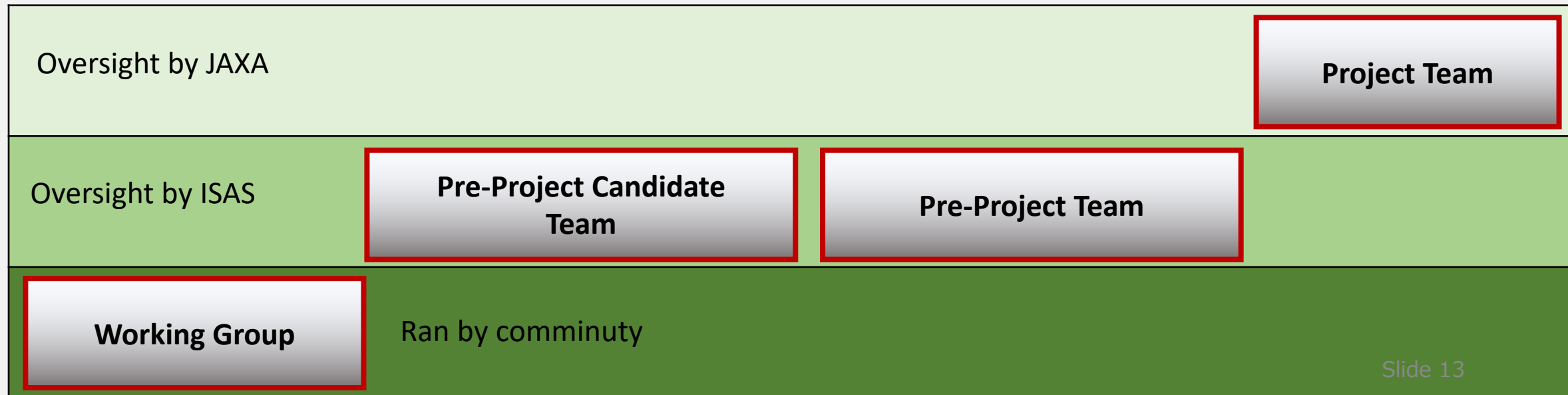
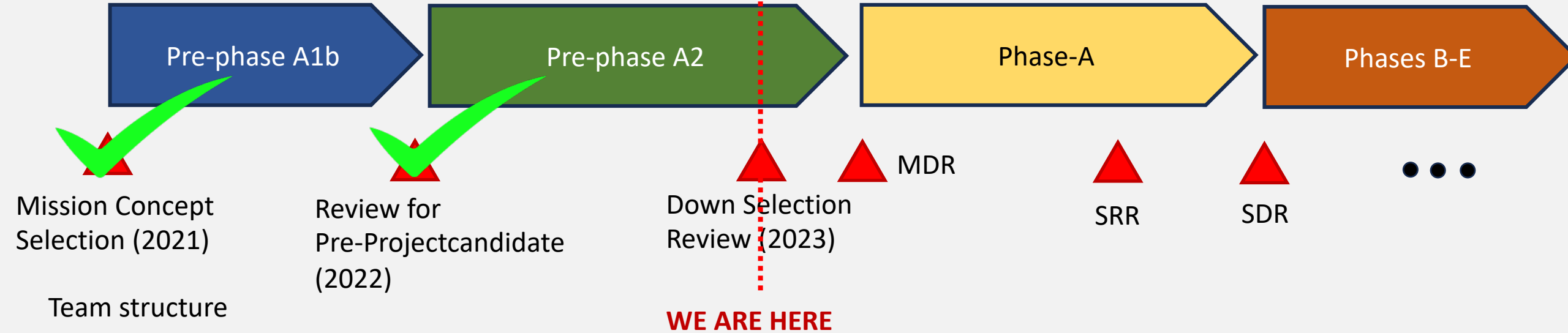


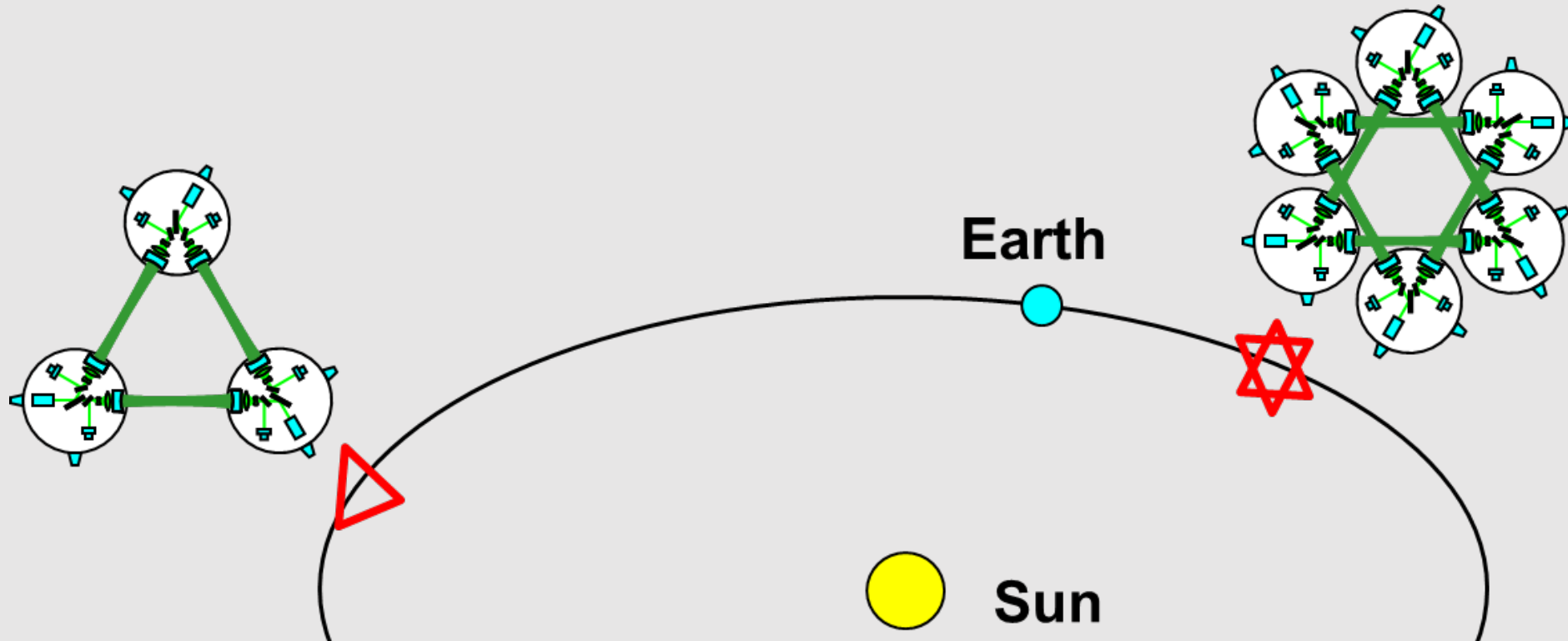
SILVIA 現状

宇宙科学研究所プリプロ準備候補チームとして絶賛活動中
公募型小型計画として2030年代初頭の打上げを目指す

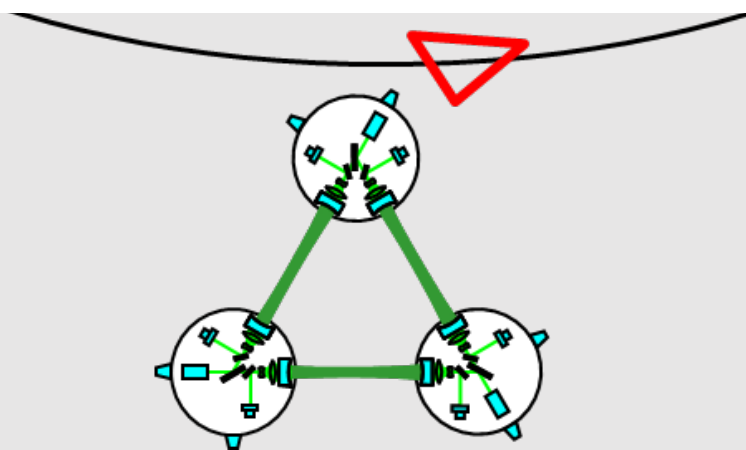
- 2023年：公募型小型5号機ダウンセレクションを受審、不採択
- 2024年：新体制へ、PI: 伊藤琢博 (JAXA)、チーム長: 和泉 (JAXA)
 - チーム編成: 42名 (JAXA、東大、電通大、法政大、阪大、名大、京大、国立天文台)
 - ミッションのスコープ (最低限達成すべき成果) を調整変更
- 2025年：
 - 1st論文を近々投稿予定。技術情報を公開する方向へ。
 - 2026年想定のダウンセレクションの再受審を目指す

イマココ

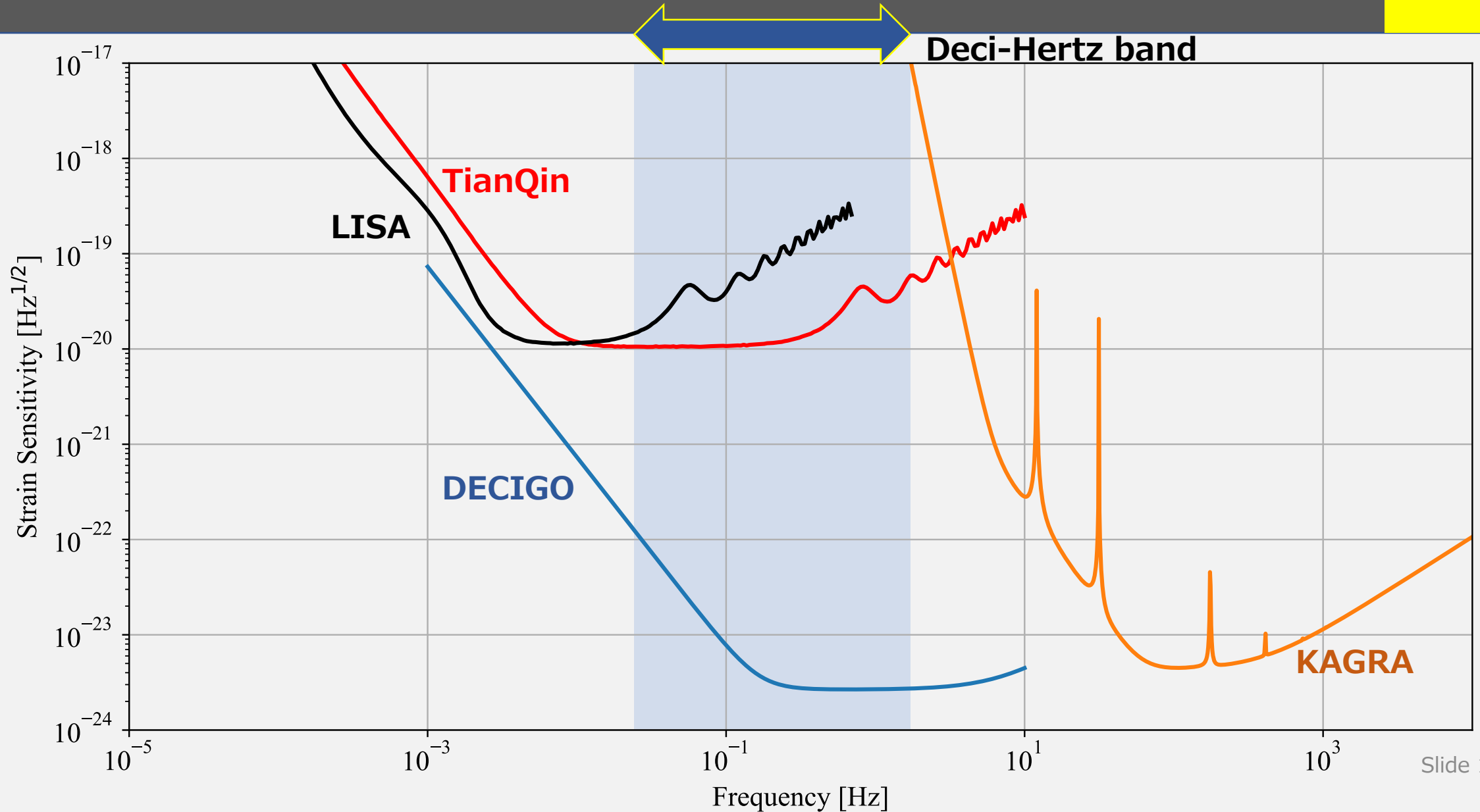




DECIGO



This is what DECIGO will do



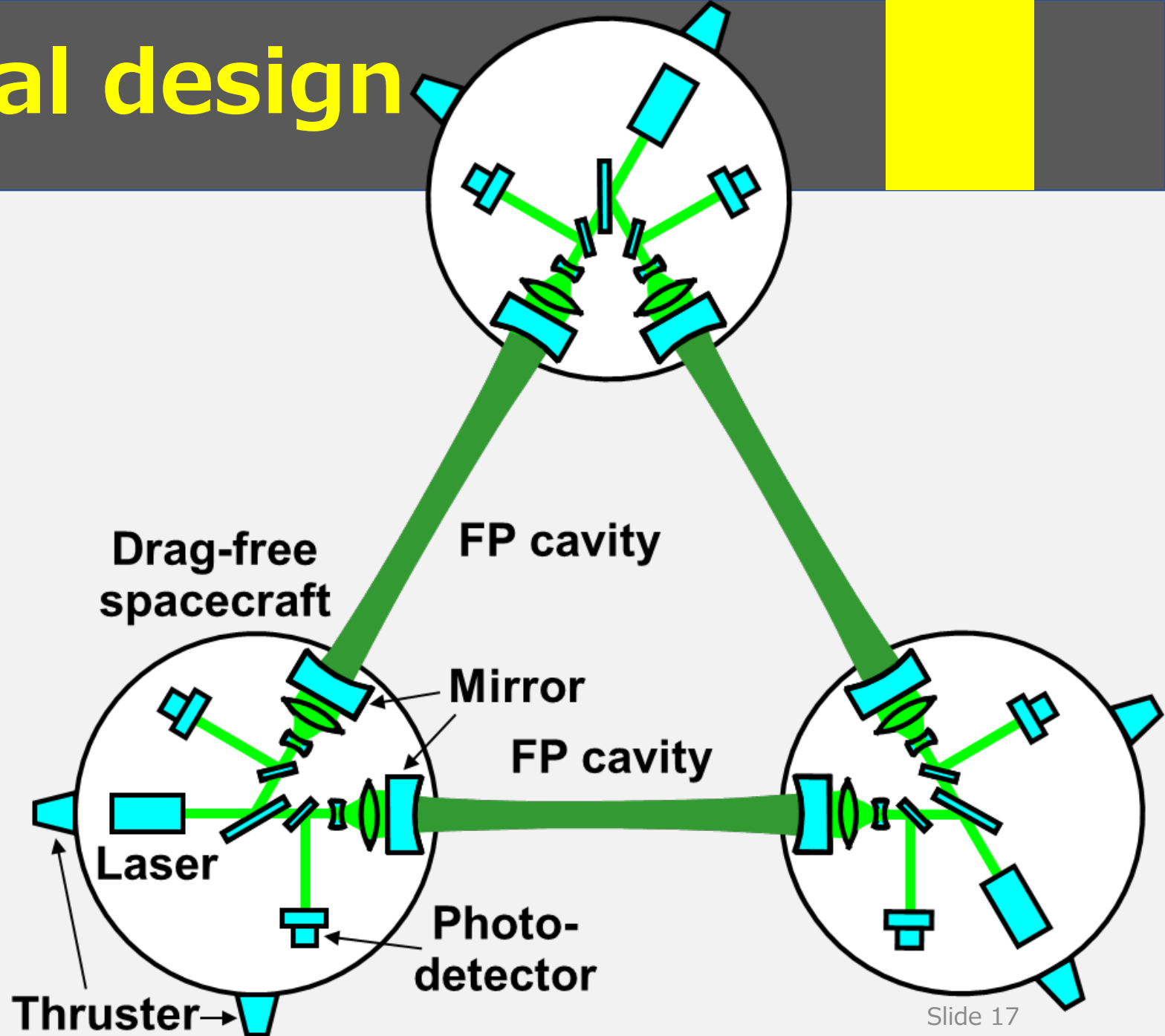
DECIGO

Deci-hertz Interferometer **G**ravitational Wave **O**bservatory

- A space laser interferometer concept proposed in 2001 [1]
- Fill the gap between the ongoing space interferometer antenna (LISA, TianQin, Taiji) and terrestrial detectors
- Confusion noise expected to be low
 - Enabling extremely high sensitivity
- Fully exploit the multi-band gravitational wave observation
- Highly rewarding but challenging
- DECIGO working group
 - Leader changed from Prof. Kawamura to Prof. Ando in April 2024
 - 101 members (as of 2022 Dec.)

Pre-conceptual design

- Arm length: 1,000 km
- **Inter-satellite Fabry-Perot**
- Mirror diameter: 1 m
- Laser wavelength: 515 nm
- Finesse: 10
- Laser power: 10 W
- Mirror mass: 100 kg
- S/C: drag free
- 3 interferometers
- Heliocentric orbit
- 4 clusters



Science Cases

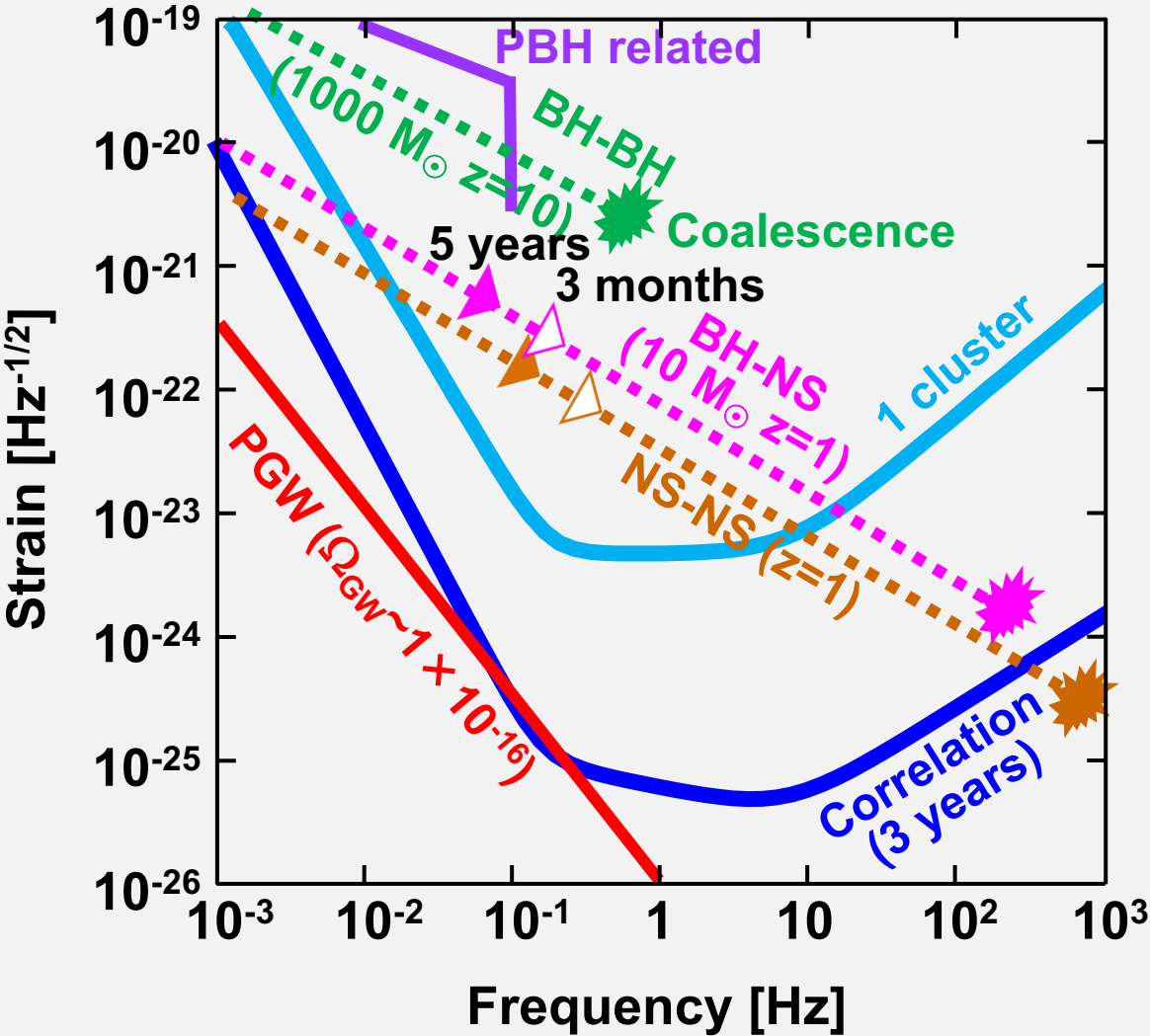
Slide from S. Kawamura

Intermediate-mass BH

Forecast of BNS coalescence

Takahashi, Nakamura
APJ 2003

Primordial GW



Dark Matter

Saito, Yokoyama
2009, 2011

General relativity

Yagi, Tanaka 2010

Acceleration
of expansion
of Universe

Thermal history of early Universe

- Reheating energy scale provides hints for inflatons
 - Thermal history of early Universe
- Reheating energy scale changes the transfer function
 - Resulting in different PGW spectra [1]
- Complementary to ongoing CMB experiments
 - LiteBIRD, ground-based CMB experiments
- Additionally a variety of experiments
 - Parity violation [2]
 - Searches for vector and/or scalar modes [3]

[1] Nakayama+ JCAP 2009

[2] Seto 2007

[3] Nshizawa+, 2010

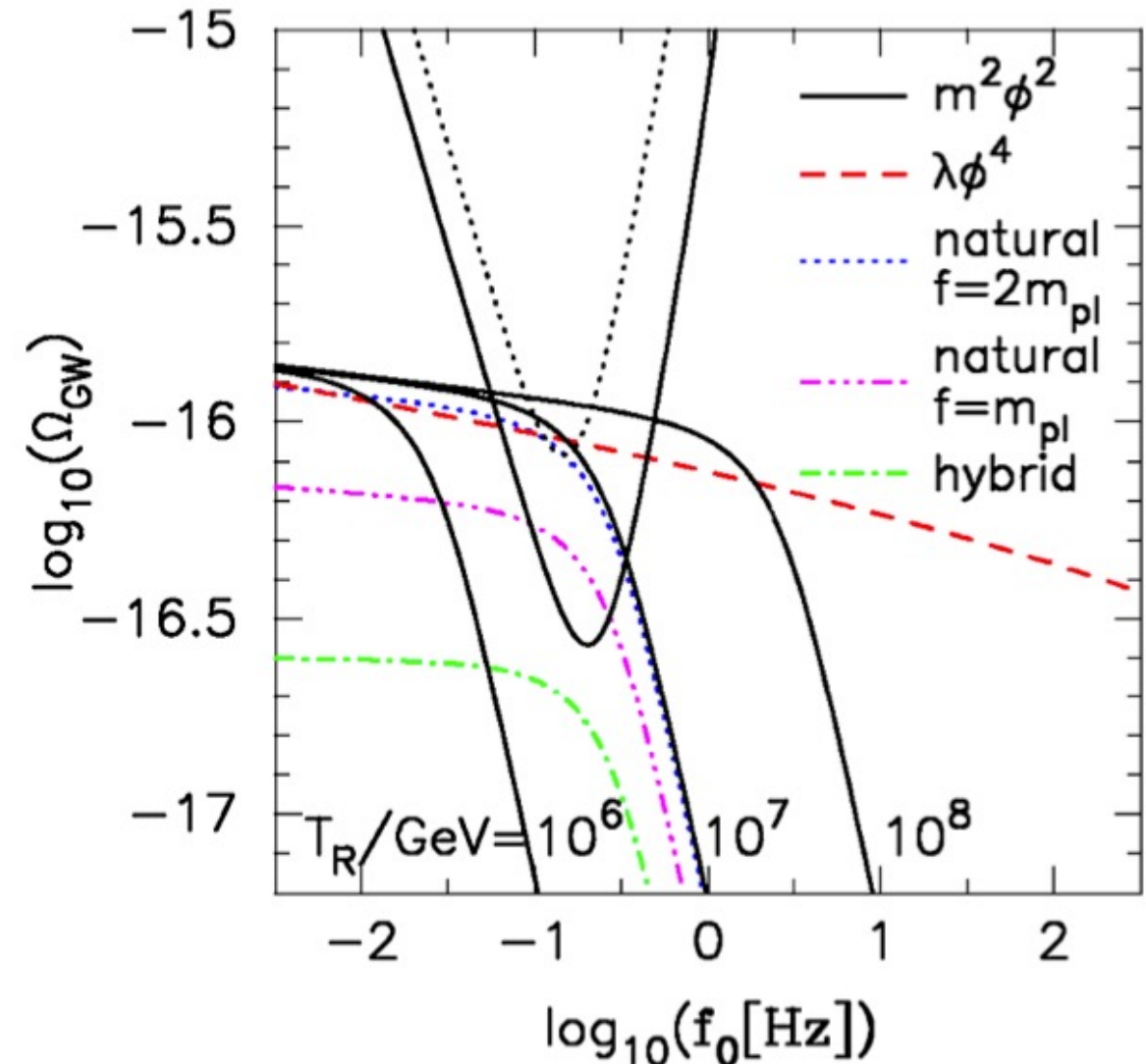
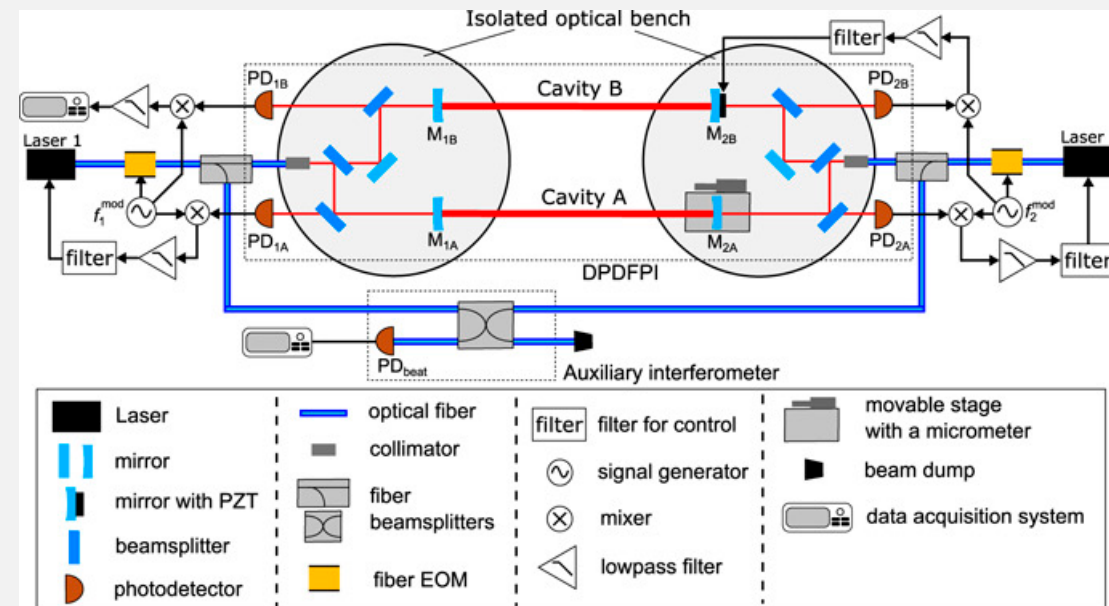
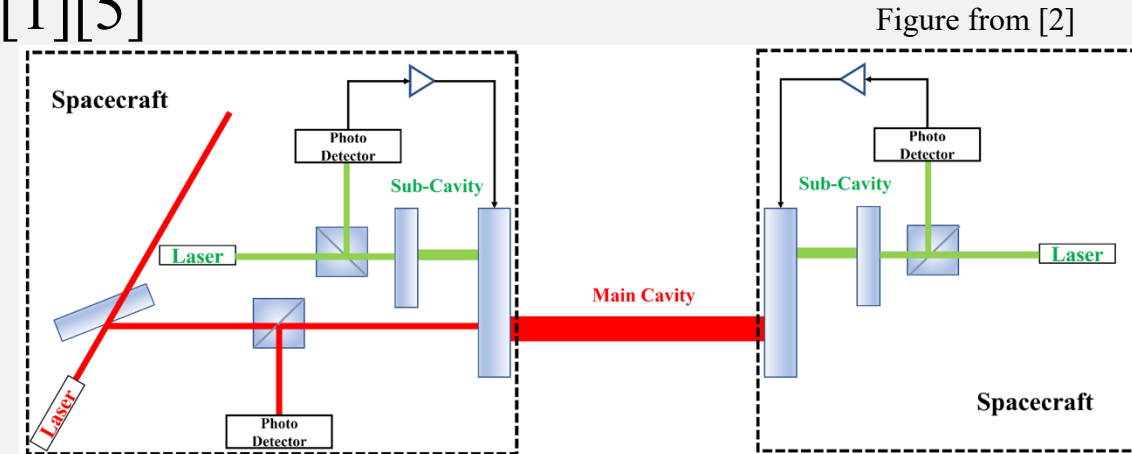
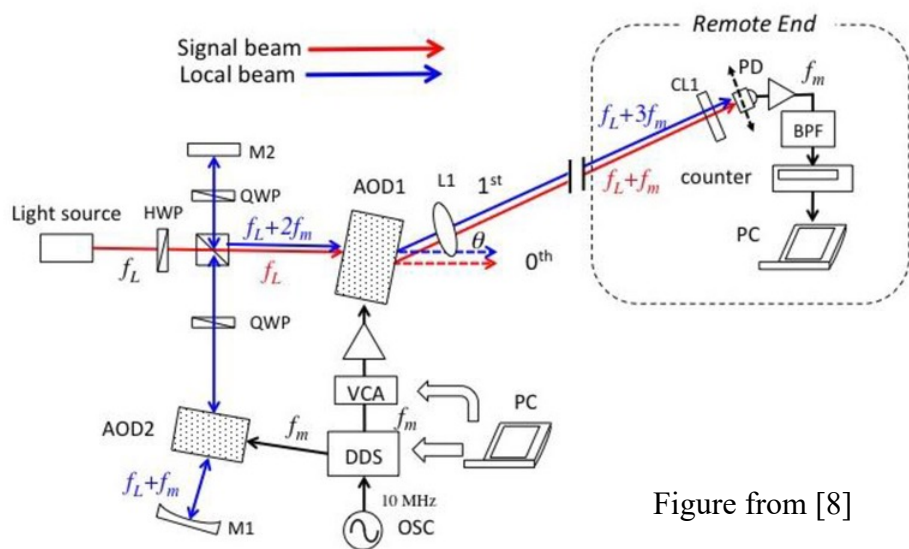


Figure Kuroyanagi+, Phys. Rev. D 83, 043514 (2011)

Recent conceptual studies

読み上げ割愛

- Optimization of quantum noise using quantum locking [2-4, 7]
- Noise studies on inter-satellite Fabry-Perot cavities [1][5]
- Acousto-optic deflector for satellite positioning [7]
- Demonstration of dual-pass Fabry-Perot [6]



- [1] K. Tsuji+, Galaxies 12(2) 13 (2024) FP
- [2] K. Tsuji+, Galaxies 11(6) 11 (2023)
- [3] T. Ishikawa+, Phys. Rev. D 107 022007 (2023)
- [4] T. Ishikawa+, Galaxies 9(1) 14 (2021)
- [5] S. Iwaguchi+, Galaxies 9(1) 9 (2021) FP
- [6] K. Nagano+, Class. Quantum Grav. 38 085018 (2021)
- [7] R. Yamada+, Phys. Lett. A 384(26) (2020)
- [8] M. Musha+, ICSO proceedings, SPIE (2019)

Slide 21

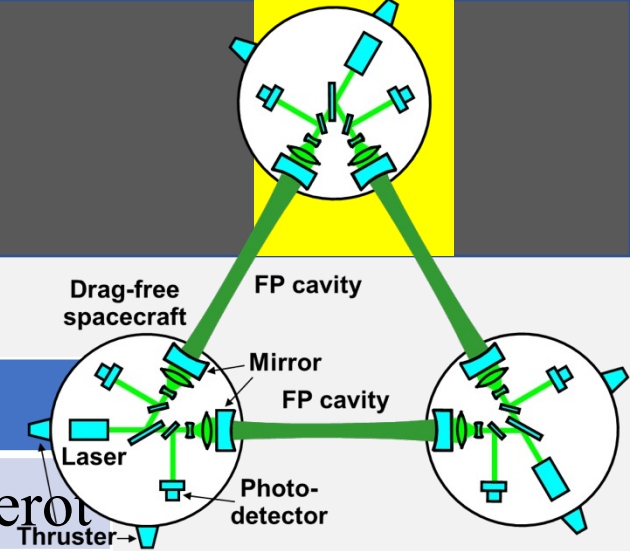


B-DECIGO

B-DECIGO

Astrophysically meaningful, yet paving the way towards DECIGO

	B-DECIGO	DECIGO
Interferometer type	Differential Fabry-Perot	Differential Fabry-Perot
Arm length	100 km	1,000 km
Mirror diameter	30 cm	1 m
Laser wavelength	515 nm	515 nm
Finesse	100	10
Laser power	1 W	10 W
Mirror mass	30 kg	100 kg
S/C	Drag-free controlled	Drag-free controlled
Orbit	(TBD)	Heliocentric, cartwheel
# of clusters	1	4



Science objectives

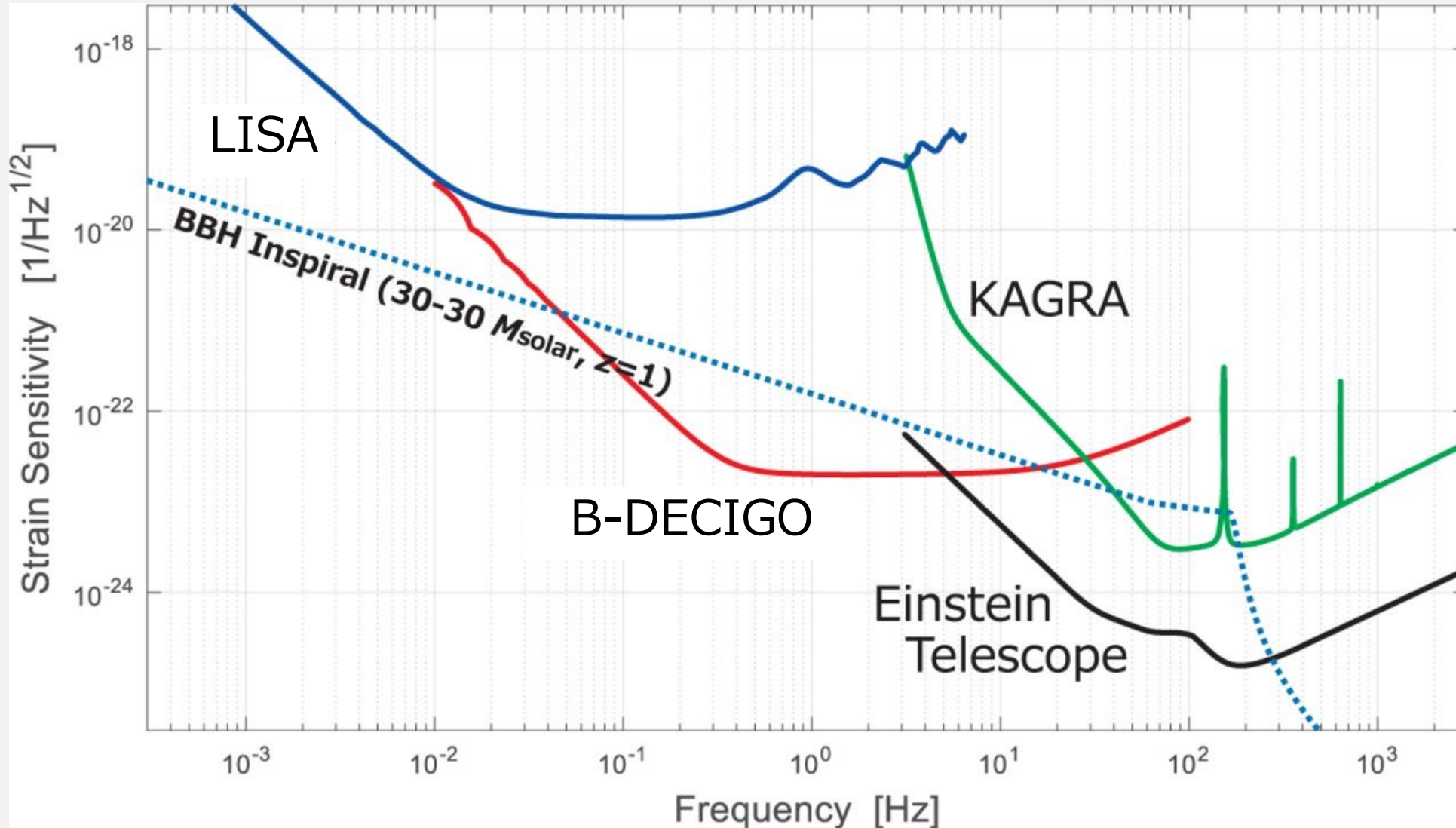
- Observation of NS-NS (BH) binary
 - Forecast BNS (or NS-BH) coalescence
 - 100 /year
- Revelation of origin of ~ 30 M BBH (Nakamura+ 2016)
- Better parameter estimation of binaries (Isoyama+ 2018)
- Removal of foreground for DECIGO
- Verification of technologies for DECIGO

Science driven

Technology driven

Multi-wavelength observation

T. Nakamura+ Prog. Theor. Exp. Phys 093E01 (2016)

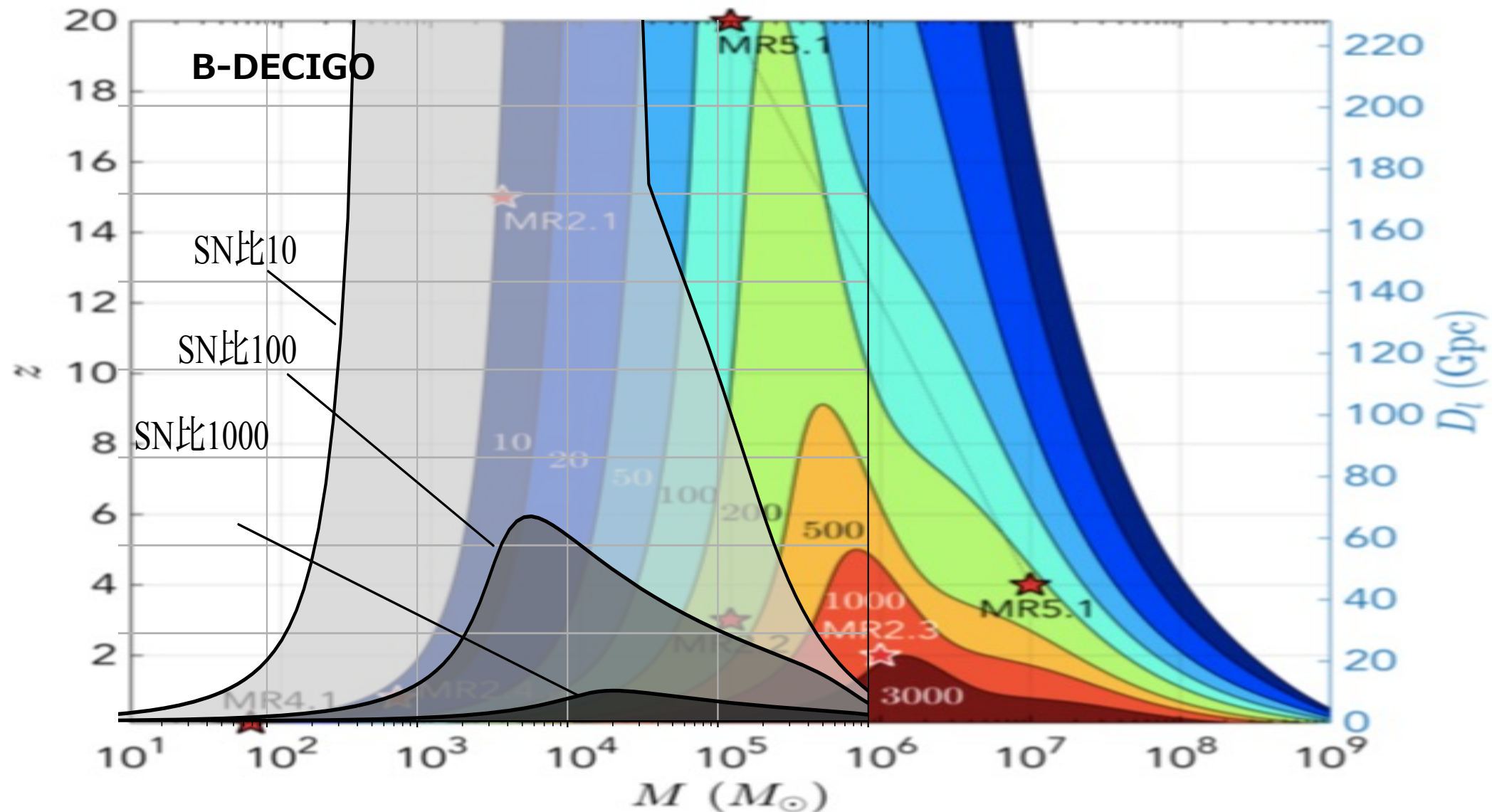


Force noise
 $1 \times 10^{-16} \text{ N/Hz}^{1/2}$

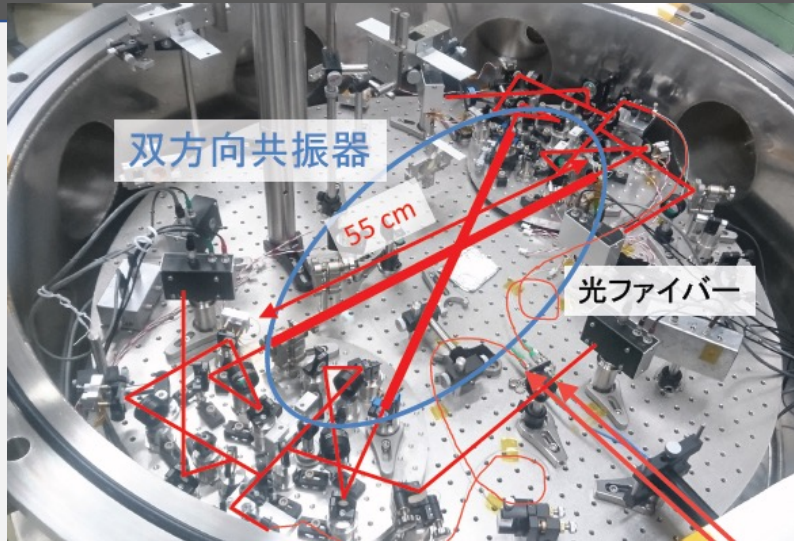
Displacement noise
 $1 \times 10^{-18} \text{ m/Hz}^{1/2}$

Astrophysical reach

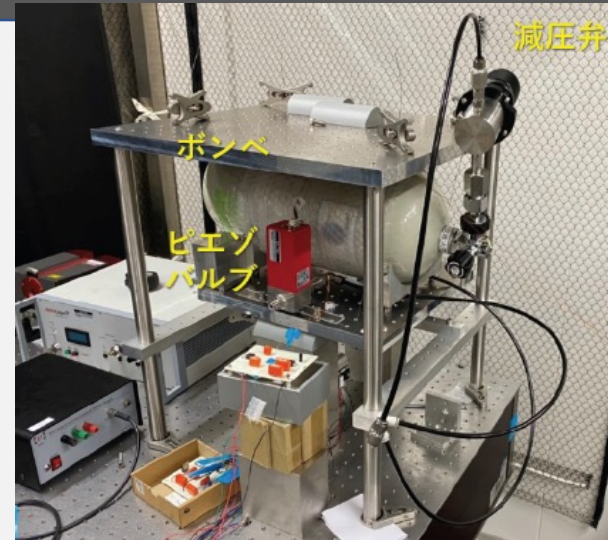
Caveat: unofficial



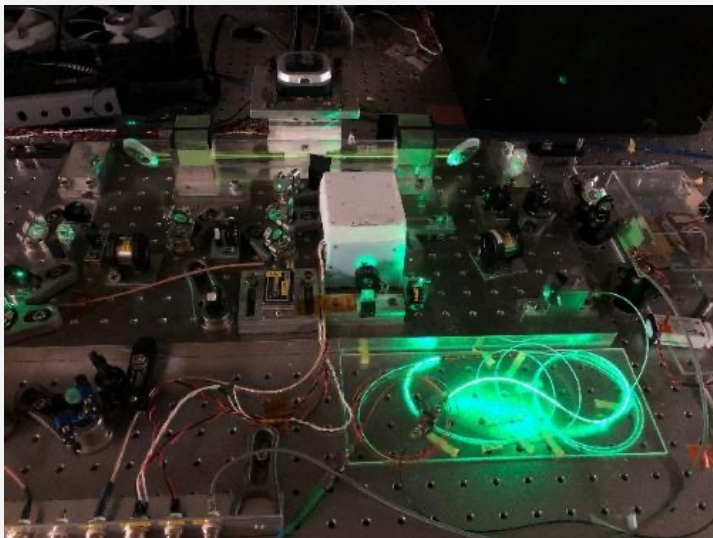
Progressing technologies for B-DECIGO



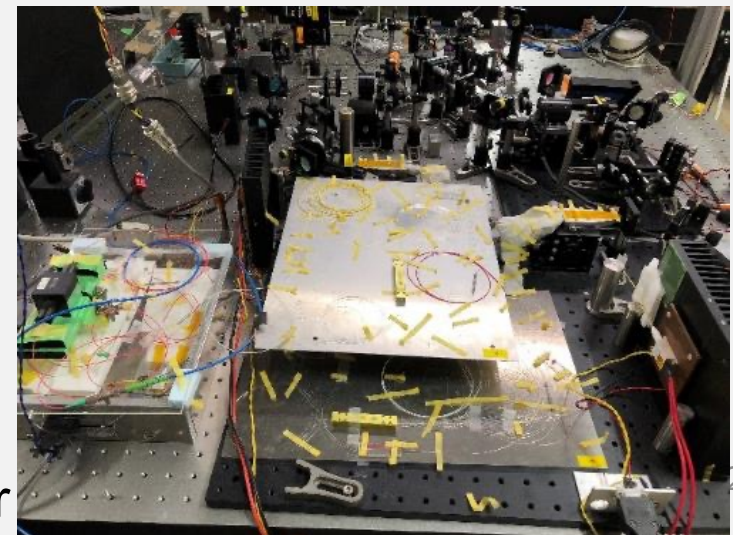
Bi-directional interferometer



Low-noise thruster



High-power stabilized laser



B-DECIGO in 日本学術会議・未来の学術振興構想

2023年9月26日：日本学術会議HPで公表

<https://www.scj.go.jp/ja/info/kohyo/kohyo-25-t353-3.html>

グランドビジョン19

自然界の基本法則と宇宙・物質の起源の探究

CRCタウンミーティングでの議論とCRCからの推薦、
天文・宇宙分科会での議論と推薦など、
サポートいただいた

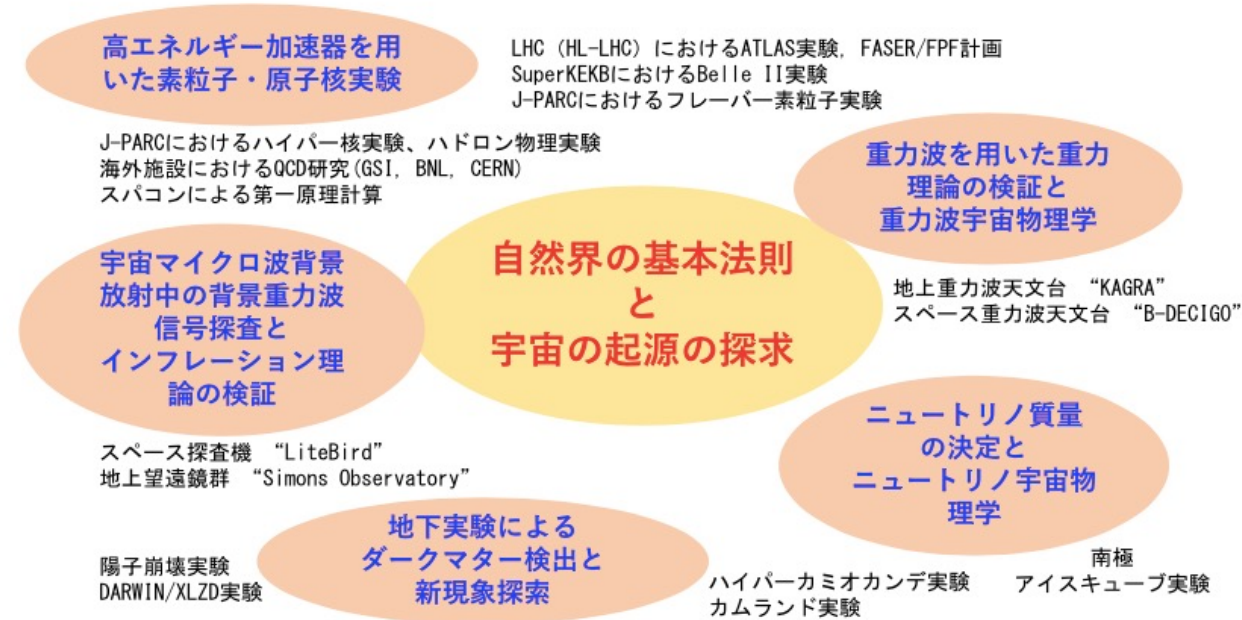


図 20 本グランドビジョンに関する実験・観測プロジェクトの俯瞰

(出典) 本提言にて、独自に作成

提言「未来の学術振興構想（2023年版）より

Let's talk about future

日本天文学会、天文月報2024年7月号

◆◆◆◆◆ シリーズ：2040年代のスペース天文学へ ◆◆◆◆◆

精密編隊飛行が切り拓く 新しい天文学

松 尾 太 郎¹・和 泉 究²

〈¹ 名古屋大学 〒464-8604 名古屋市千種区不老町〉

〈² 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒252-5210 相模原市中央区由野台〉

e-mail: ¹matsuo@u.phys.nagoya-u.ac.jp, ²kiwamu@astro.isas.jaxa.jp



松尾



和泉

宇宙干渉計のニーズ、国際協調

- 赤外干渉計構想の機運が高まりつつある（SEIRIOS等）
 - 編隊飛行と宇宙干渉計は親和性が高い。潜在ニーズがある
 - SILVIAでは赤外干渉計への貢献検討し協力的に活動
- 2030年代を超えてくると本格ミッションへと切り替え
 - 国際協調が間違いなく鍵**（LISA; 1.5Bユーロ ~ 2,400億円）
 - 2030年代にどれだけ国際交渉のカード（技術）を獲得できるかが重要**

