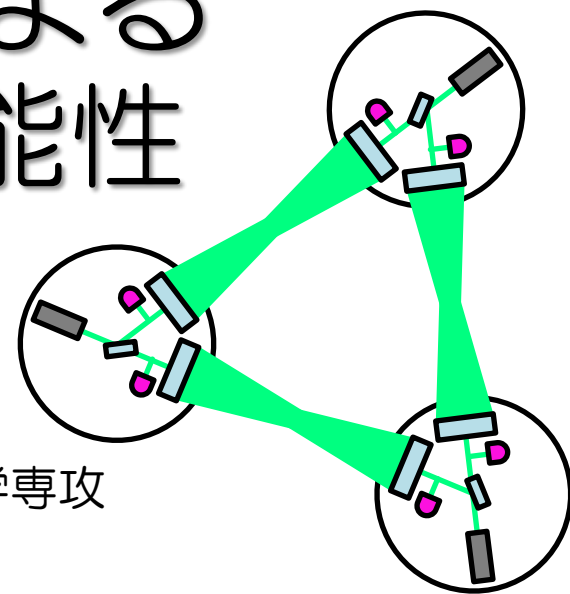


超精密フォーメーションフライト 実証機SILVIAによる 重力波観測の可能性

道村唯太

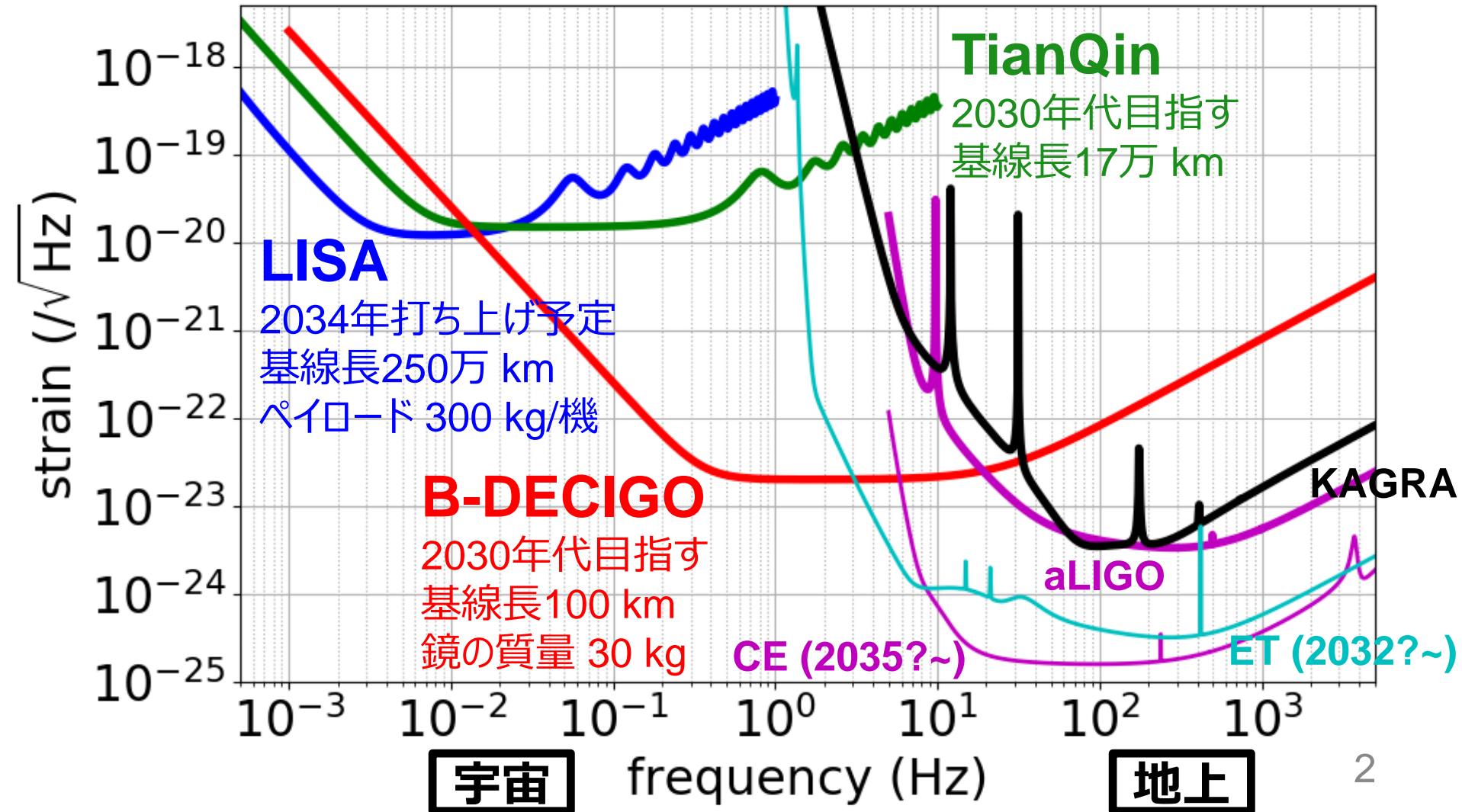
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻



五十里哲, 安東正樹 (東大), 伊藤琢博, 河野功, 船木一幸, 坂井真一郎,
和泉究, 長野晃士 (JAXA), 佐藤修一 (法政大), 武者満 (電通大),
佐藤訓志, 山田克彦 (阪大), 松尾太郎, 金田英宏, 川村静児 (名大),
阿久津智忠, 正田亜八香 (NAOJ), SILVIA 検討グループ

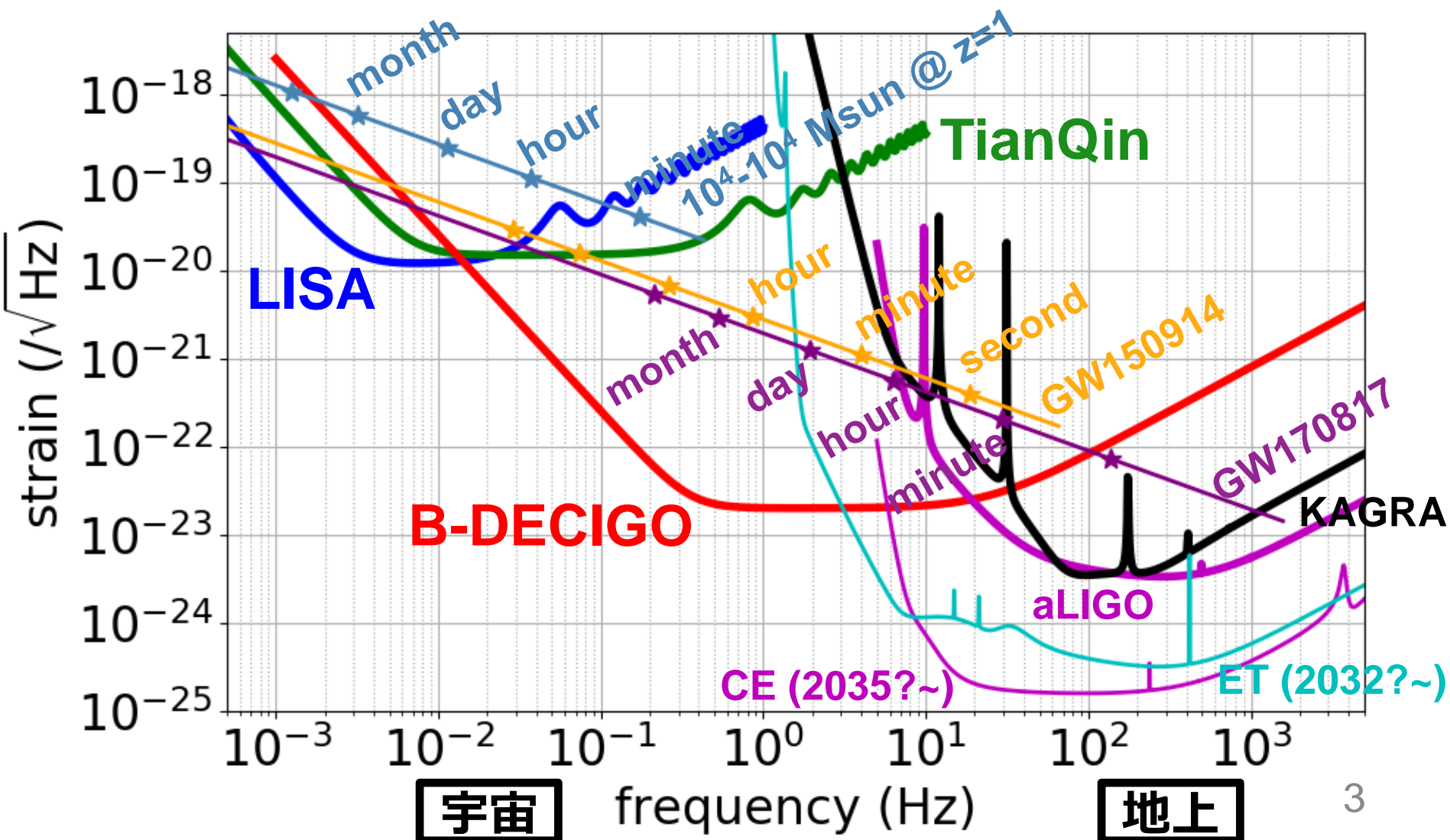
宇宙重力波望遠鏡

- 2030年代以降に欧米・中国・日本で計画中



宇宙では地上と異なる観測が可能

- 重い連星の合体や、軽い連星のインスパイラル期



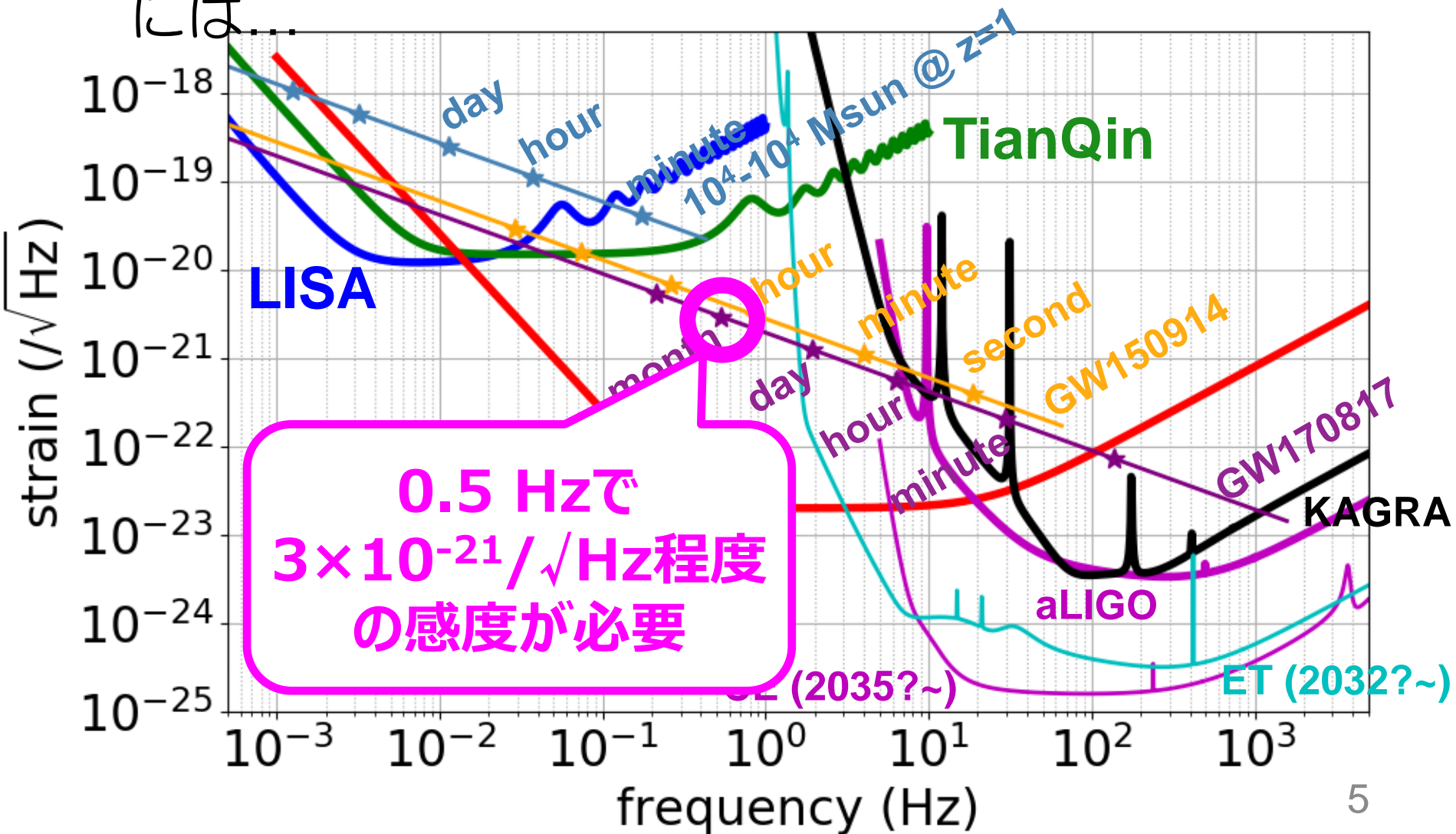
小型で宇宙重力波観測は可能か？

- 既存の計画は大型・中型計画
時間がかかる。実証機が必要。
- JAXA 公募型小型計画規模を想定
打ち上げ費込みで**150億円**以下
イプシロンロケットによる打ち上げ
2年に1度の公募、採択から6-7年程度
→**2020年代**に打ち上げられる可能性
- LISAやTianQinよりも早く
観測が開始できる可能性がある
- 特に**0.1-10 Hz帯**を狙えばLISAや
LIGOとは質的に異なる観測が可能



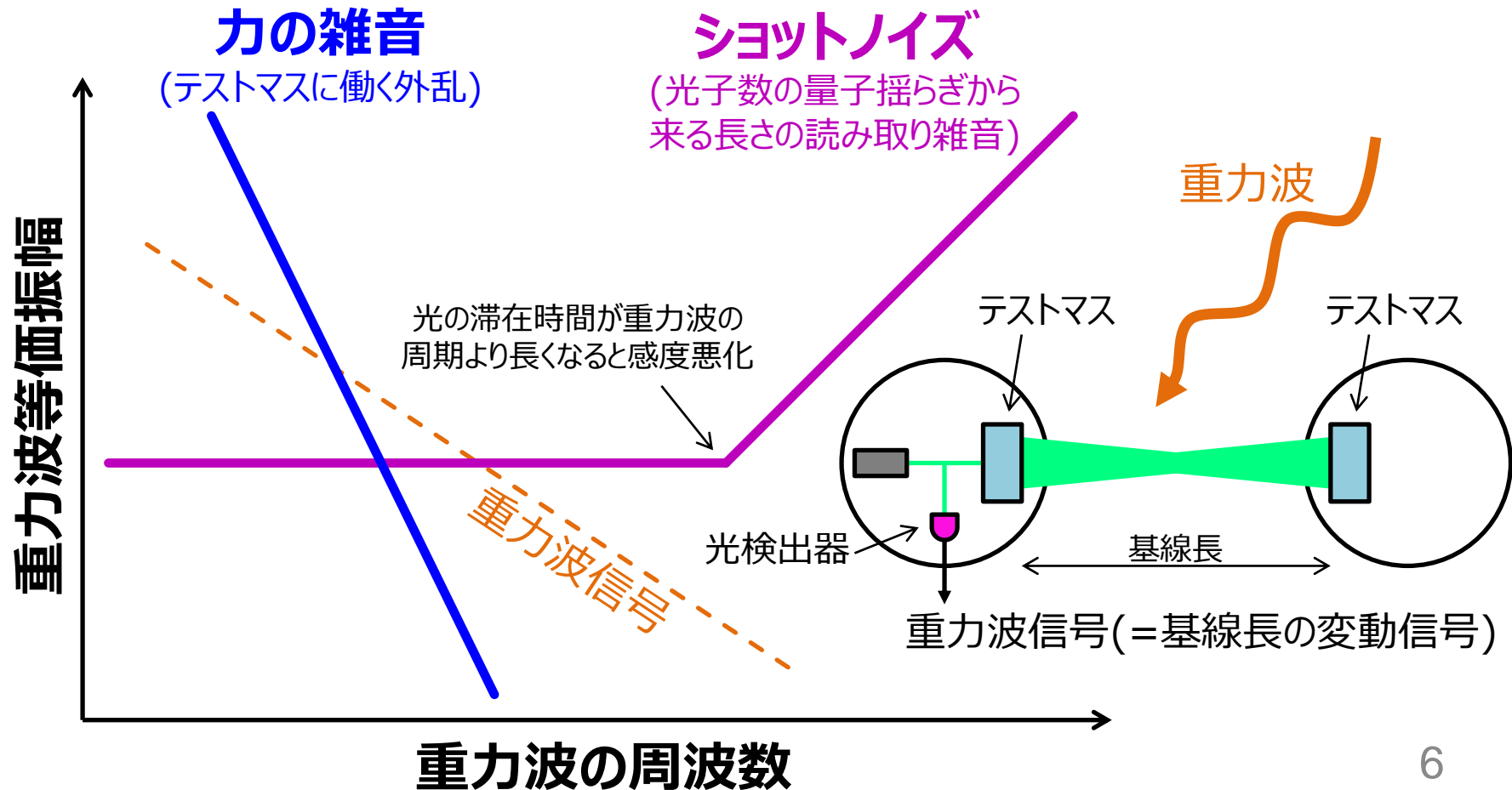
“确实”な重力波観測に必要な感度

- LIGOが既に検出しているような重力波を検出するには...



宇宙重力波望遠鏡の感度

- 力の雑音(加速度雑音)とショットノイズの合計で決まる (他の雑音を十分小さく抑えた場合)



感度を決める雑音の表式

- 力の雑音

$$h_f = \frac{n_f}{m\omega^2 L}$$

鏡に加わる外乱のスペクトル
※LISA Pathfinderでは
 $4 \times 10^{-15} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ @ 1 mHzを達成

テストマス質量 m

重力波の角周波数 ω

基線長 L

→ 外乱のスペクトルを仮定すると、 mL に条件

- ショットノイズ

$$h_{\text{shot}} = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{hc\lambda}{2P} \frac{\pi}{2\mathcal{F}}}$$

レーザー波長 λ

フィネス \mathcal{F}
※光の往復回数の指標

レーザー強度 P

基線長 L

→ レーザー波長と強度を仮定すると $L\mathcal{F}$ に条件

重力波観測の条件

- 力の雑音より、
 $4 \times 10^{-15} \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ とすると

$$mL > 120 \text{ kg} \cdot \text{km}$$

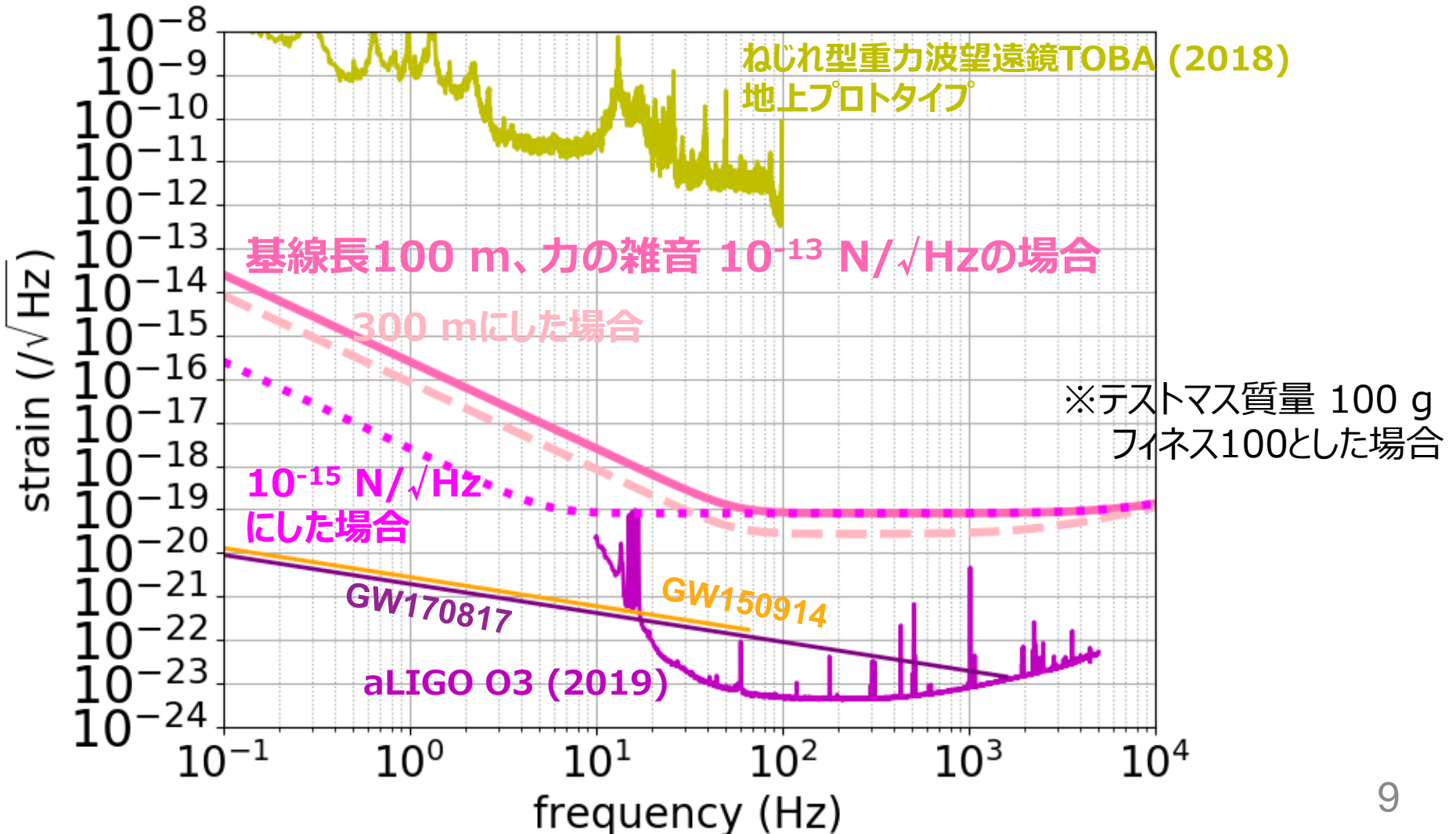
- ショットノイズより、
レーザー波長515 nm、強度10 mWとすると

$$LF > 180 \text{ km}$$

- **kg級**のテストマス、**km級**の基線長が必須
→ 既に知られているような連星合体からの
重力波の確実な観測は小型衛星では難しい

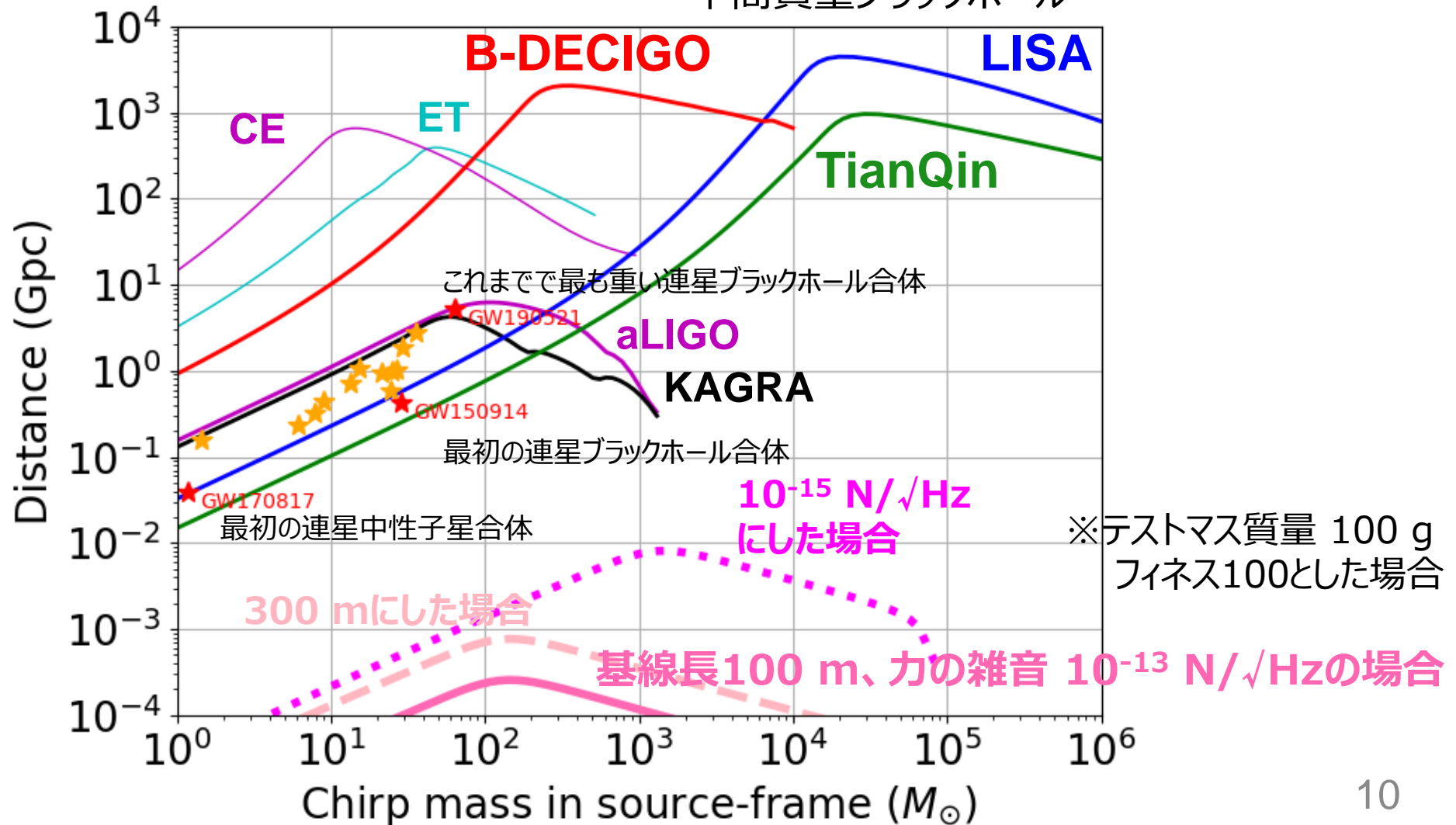
小型級で実現可能な感度

- 地上では実現できない低周波数帯での感度が可能



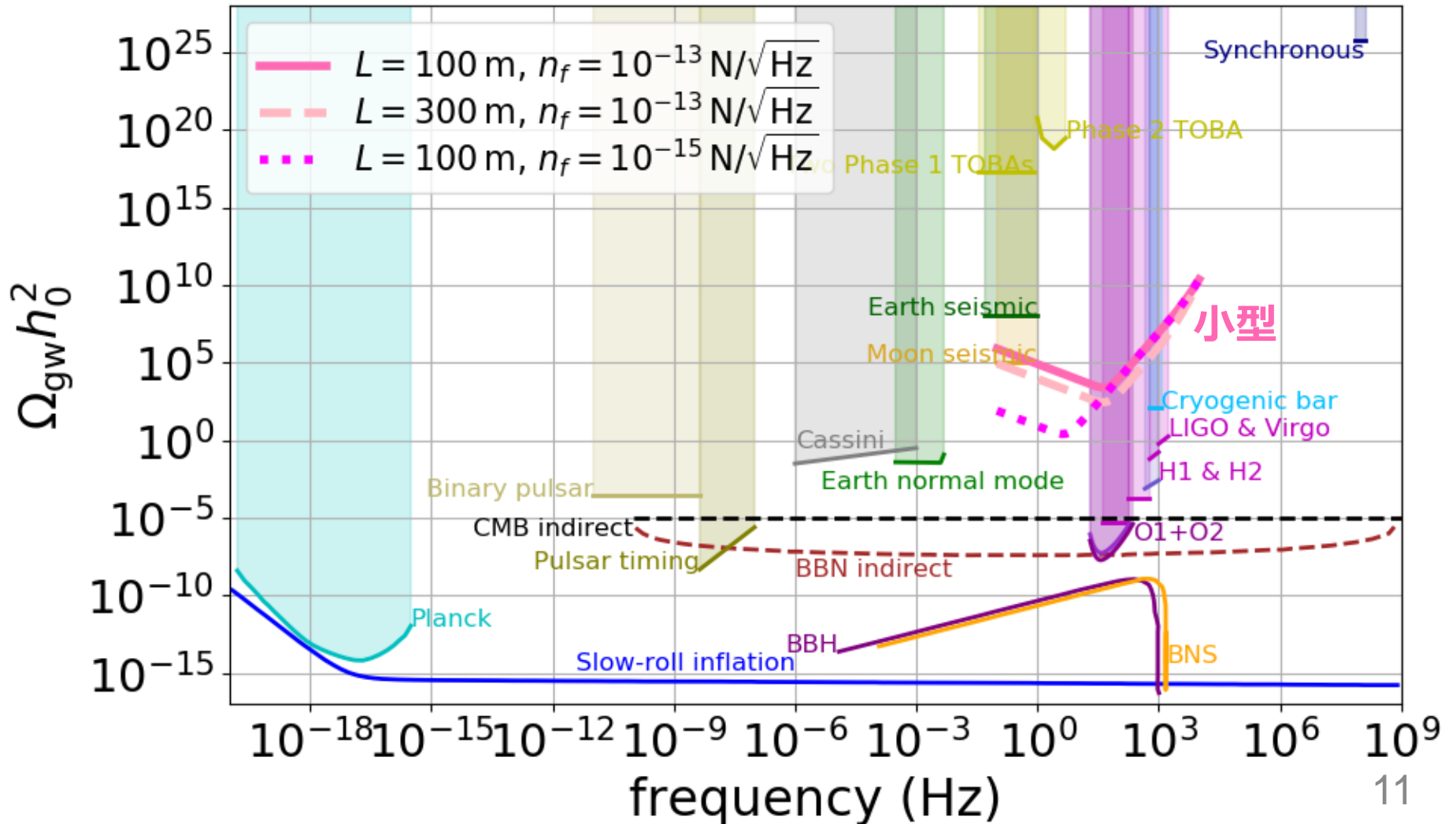
小型級で実現可能な観測レンジ

- 地上では未探索の**重い連星合体を探索可能**
中間質量ブラックホール



小型級による背景重力波探索

- 1-10 Hz帯では最高性能での背景重力波探索が可能



まとめ

- 地上重力波望遠鏡LIGOなどにより重力波物理学・天文学が幕を開けた
- より低周波数帯の重力波観測のためには宇宙重力波望遠鏡の実現が重要
- 宇宙重力波望遠鏡でこれまで見つかったような重力波を検出するにはkg級のテストマス、km級の基線長が必須
- テストマス100 g級、基線長100 m級のJAXA公募型小型クラスのミッションでも2020年代に実現できれば、未探索領域の低周波重力波探索が可能
中間質量ブラックホール連星合体
1-10 Hz帯での背景重力波

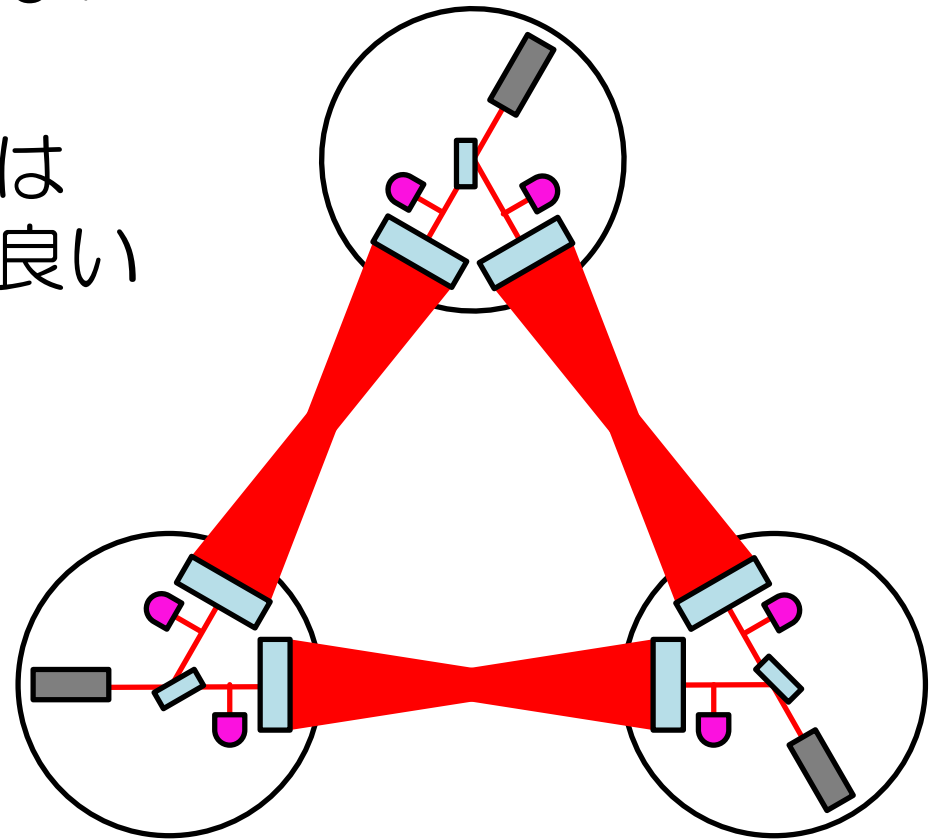
補助スライド

Design Comparison

	LISA	TianQin	B-DECIGO
Arm length	2.5e6 km	1.7e5 km	100 km
Interferometry	Optical transponder	Optical transponder	Fabry-Pérot cavity
Laser frequency stabilization	Reference cavity, 1064 nm	Reference cavity, 1064 nm	Iodine, 515 nm
Orbit	Heliocentric	Geocentric, facing J0806.3+1527	Geocentric (TBD)
Flight configuration	Constellation flight	Constellation flight	Formation flight
Test mass	1.96 kg	2.45 kg	30 kg
Force noise req.	8e-15 N/rtHz Achieved PRL 120, 061101 (2018)	7e-15 N/rtHz CQG 33, 035010 (2016)	1e-16 N/rtHz

干渉計方式 (Fabry-Perot)

- 入射光強度が小さくてすむ
- 鏡と同程度の大きさのテレスコープは必要だが主干渉計内には入っていない
- 衛星とテストマス間のローカルセンサの感度は主干渉計より低くても良い

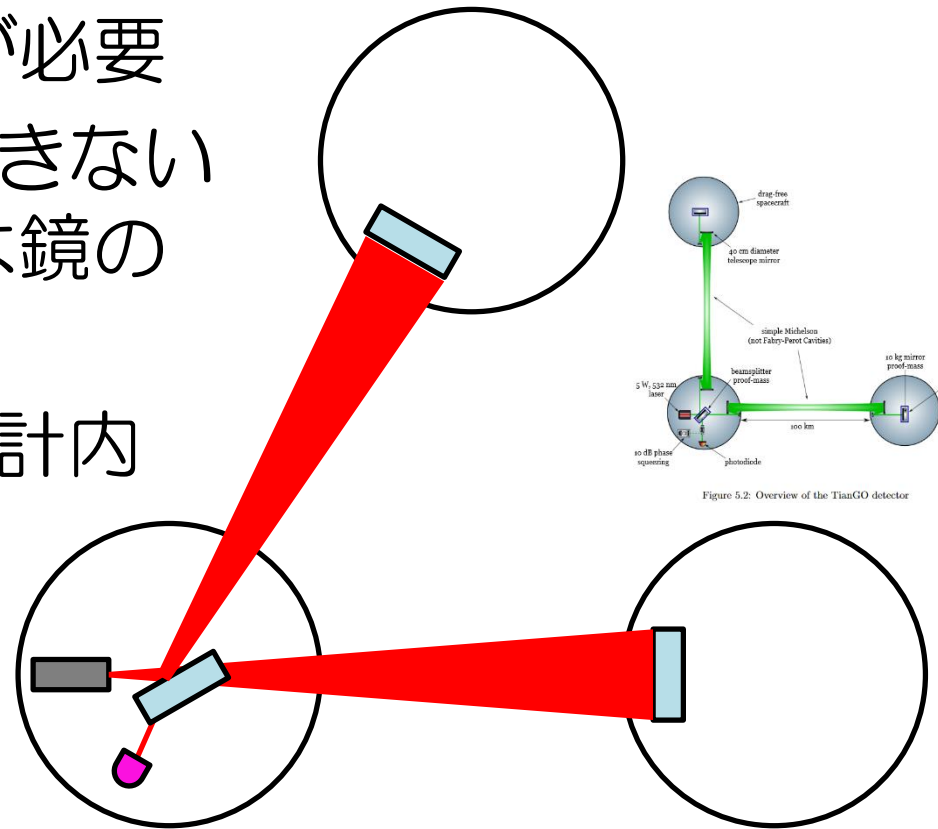


干渉計方式 (Michelson)

- 入射光強度を(フィネス)²倍すればFabry-Perot共振器と同等の感度を実現することは可能

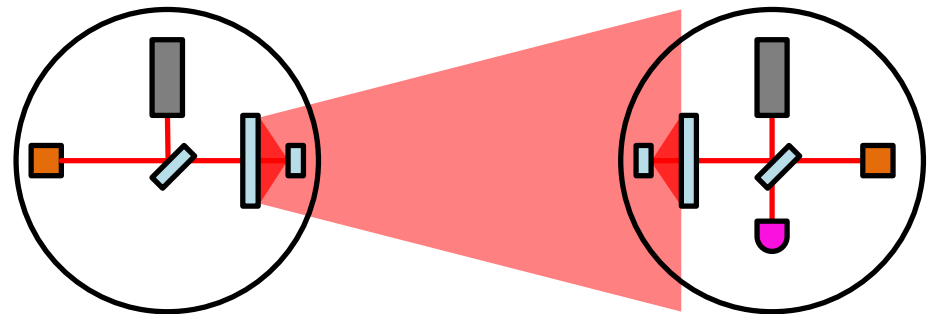
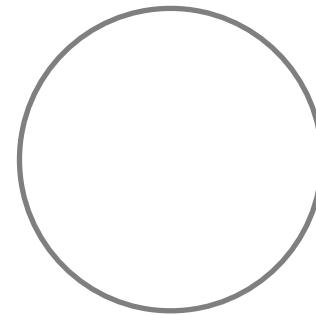
Michelson 1 W \Leftrightarrow FP 10 mW & Finesse 10

- BSの保持方法の工夫が必要
- 双方向にすることができない
(冗長性を持たせるには鏡の数を増やす必要)
- テレスコープが主干渉計内
- 主干渉計と同程度の変位感度を持つ衛星とテストマス間のローカルセンサが必要



干渉計方式 (Optical Transponder)

- 光の損失を許せば、距離を長くすることが可能 (Michelson干渉計の感度を低周波側にスライドするイメージ)
- Michelsonと同等の大きさの鏡があれば1 W全ての光を受け取って同等の感度 (ただしdark fringe制御必要)
- テレスコープが主干渉計内
- 主干渉計と同程度の変位感度を持つ衛星とテストマス間のローカルセンサが必要



DECIGOとBBO

- DECIGOはFabry-Perot
 - 鏡の質量 100 kg (直径1 m程度、直径60cmでも十分)
 - 共振器長 1000 km
 - 入射パワー 10 W、フィネス 10
 - 波長 515 nm (532 nm?)
 - 力の雑音への要求値 $1e-16$ N/rtHz
- BBO/LISAはOptical transponder
 - 鏡の質量 10 kg [2 kg for LISA]
 - 基線長 50,000 km [2,500,000 km for LISA]
 - テレスコープ直径 2.5 m [0.3 m for LISA]
 - レーザーパワー 300 W (8 W received) [3 W for LISA]
 - 波長 355 nm (拡がり小さくするため) [1064 nm for LISA]
 - 力の雑音 $<8e-16$ N/rtHz程度? [$<8e-15$ N/rtHz for LISA]

イプシロンロケットの打ち上げ性能

- [Epsilon Launch Vehicle ユーザーズマニュアル](#)

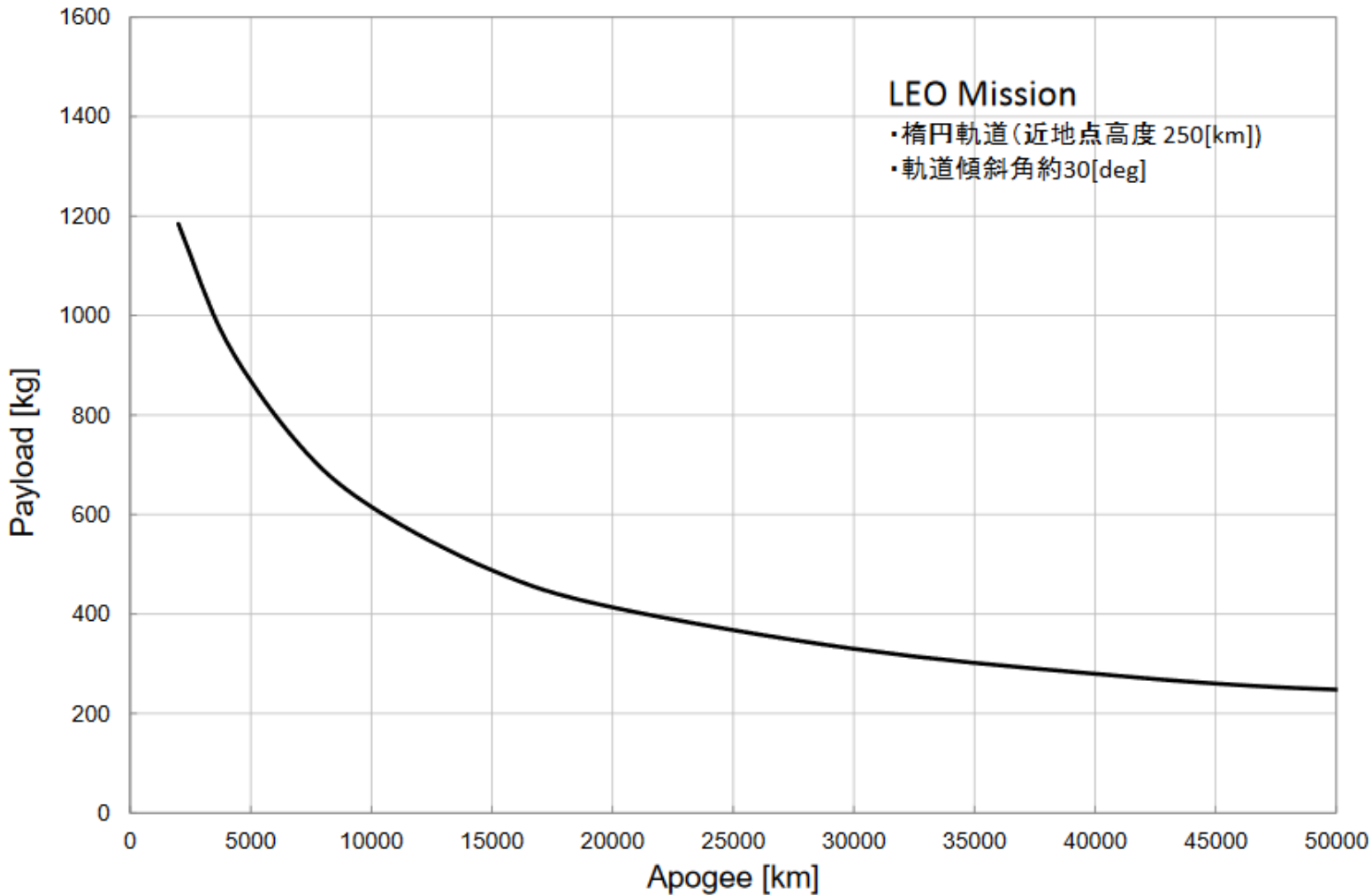


図 3-13 打ち上げ能力(基本形態)

DPFの雑音見積もり

• DECIGOパstrupァインダー(DPF)ミッション提案書

表 B.1: DPF 重力波検出器の主な外乱・雑音の評価. 力の大きさ・鏡の相対加速度は, 静的な値を表す. 干渉計に対する加速度雑音と変位雑音は, 0.1 Hz での値を記載している.

2008年9月

外乱・雑音要因	力の大きさ [N]	鏡の相対加速度 [m/s ²]	干渉計加速度雑音 [m/s ² /Hz ^{1/2}]	干渉計変位雑音 [m/Hz ^{1/2}]
試験マスに直接働く外乱				
重力	太陽	6.0×10^{-3}	2.4×10^{-14}	
	月	3.3×10^{-5}	5.2×10^{-14}	
	衛星	1.5×10^{-9}	3.0×10^{-9}	
	地球	7.8	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-18}
電磁力	衛星磁場	1.2×10^{-14}	1.5×10^{-16}	
	ローレンツ力	3.5×10^{-14}	6.9×10^{-18}	
その他	残留気体分子		8.6×10^{-16}	
	宇宙線の衝突	1.1×10^{-17}	1.8×10^{-18}	
	熱輻射		1.5×10^{-16}	
衛星に働く外乱				
	太陽輻射圧	2×10^{-5}	8.9×10^{-19}	
	地球大気の摩擦	7×10^{-6}		
	衛星スラスタ	1×10^{-4}	6.3×10^{-17}	
干渉計の雑音				
	散射雑音			2.7×10^{-18}
	レーザー輻射圧	5×10^{-8}	8.2×10^{-17}	
	鏡の熱雑音			2.0×10^{-17}
	光源周波数雑音			1.8×10^{-16}
合計 (2乗和の平行根)			9.4×10^{-16}	1.8×10^{-16}

Other Space Mission Proposals

- DECIGO [CQG 28, 094011 \(2011\)](#)
- ALIA [arXiv:1907.11305](#) (post LISA, 500,000 km)
- BBO [CQG 23 4887 \(2006\)](#) (post LISA, 50,000 km)
- TOBA [PRL 105, 161101 \(2010\)](#) (10m torsion bar)
- GEOGRAWI [arXiv:1111.2576](#) (73,000 km LISA) -> gLISA [arXiv:1608.04790](#)
- GADFLI [arXiv:1111.3708](#) (73,000 km LISA)
- LAGRANGE [arXiv:1111.5264](#) (660,000 km LISA)
- OMEGA [white paper \(2011\)](#) (1,000,000 km LISA)
- SAGE [arXiv:1811.04743](#) (Sagnac interferometer)
- AMIGO [arXiv:1709.05659](#)
- MAGIS [arXiv:1711.02225](#) (atom interferometer)
- Taiji [arXiv:1807.09495](#) (almost LISA)
- INO [arXiv:1809.10317](#) (optical lattice clocks)
- SAGE [arXiv:1907.03867](#) (atom interferometer or atomic clocks)
- TianGO [arXiv:1908.06004](#) (100 km, 10 kg Michelson with squeezing)
- DO [arXiv:1908.11375](#) (1e8 m LISA, Voyage2050)

Comparison of Proposals

- Wei-Tou Ni, [IJMPD 25, 1630001 \(2016\)](#)

Table 1. A compilation of GW mission proposals.

Mission concept	S/C configuration	Arm length	Orbit period	S/C #	Acceleration noise [fm/s ² /Hz ^{1/2}]	Laser metrology noise [pm/Hz ^{1/2}]
<i>Solar-Orbit GW Mission Proposals</i>						
LISA ⁹	Earthlike solar orbits with 20° lag	5 Gm	1 year	3	3	20
eLISA ²¹	Earthlike solar orbits with 10° lag	1 Gm	1 year	3	3	12(10)
ASTROD-GW ³⁶⁻⁴⁰	Near Sun-Earth L3, L4, L5 points	260 Gm	1 year	3	3	1000
Big Bang Observer ⁴⁵	Earthlike solar orbits	0.05 Gm	1 year	12	0.03	1.4×10^{-5}
DECIGO ⁴⁴	Earthlike solar orbits	0.001 Gm	1 year	12	0.0004	2×10^{-6}
ALIA ⁴⁷	Earthlike solar orbits	0.5 Gm	1 year	3	0.3	0.6
TAIJI (ALIA-descope) ⁴⁸	Earthlike solar orbits	3 Gm	1 year	3	3	5-8
Super-ASTROD ⁴²	Near Sun-Jupiter L3, L4, L5 points (3 S/C), Jupiterlike solar orbit(s)(1-2 S/C)	1300 Gm	11 year	4 or 5	3	5000
<i>Earth-Orbit GW Mission Proposals</i>						
OMEGA ^{54,55}	0.6 Gm height orbit	1 Gm	53.2 days	6	3	5
gLISA/GEOGRAWI ⁴⁹⁻⁵¹	Geostationary orbit	0.073 Gm	24 h	3	3, 30	0.3, 10
GADFLI ⁵²	Geostationary orbit	0.073 Gm	24 h	3	0.3, 3, 30	1
TIANQIN ¹⁹	0.057 Gm height orbit	0.11 Gm	44 h	3	1	1
ASTROD-EM ⁴³	Near Earth-Moon L3, L4, L5 points	0.66 Gm	27.3 days	3	1	1
LAGRANGE ⁵³	Earth-Moon L3, L4, L5 points	0.66 Gm	27.3 days	3	3	5

Sensitivity Comparison

LISA: <https://perf-lisa.in2p3.fr/>

TianQin: [arXiv:1902.04423](https://arxiv.org/abs/1902.04423) (from Yi-Ming Hu)

B-DECIGO: [PTEP 2016, 093E01](https://arxiv.org/abs/1603.04917) (2016)

KAGRA: [PRD 97, 122003](https://arxiv.org/abs/1805.12110) (2018)

aLIGO: [LIGO-T1800044](https://arxiv.org/abs/1708.07248)

ET: [http://www.et-gw.eu/index.php/etdsdocument](https://arxiv.org/abs/1606.04674)

CE: [CQG 34, 044001](https://arxiv.org/abs/1708.07248) (2017)

