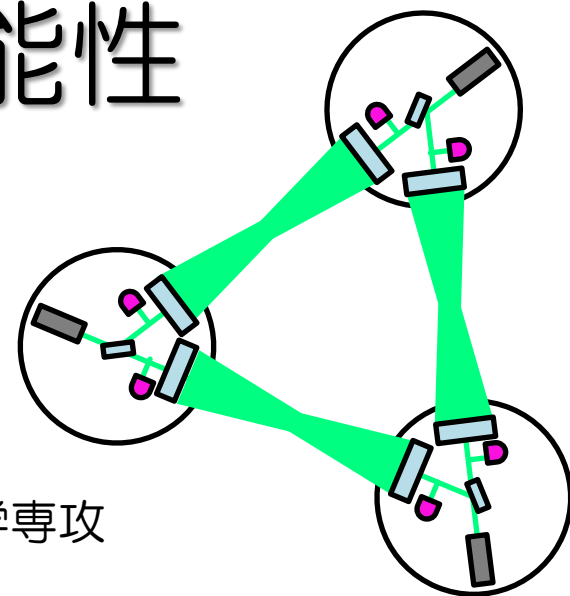


# SILVIAによる 重力波観測の可能性

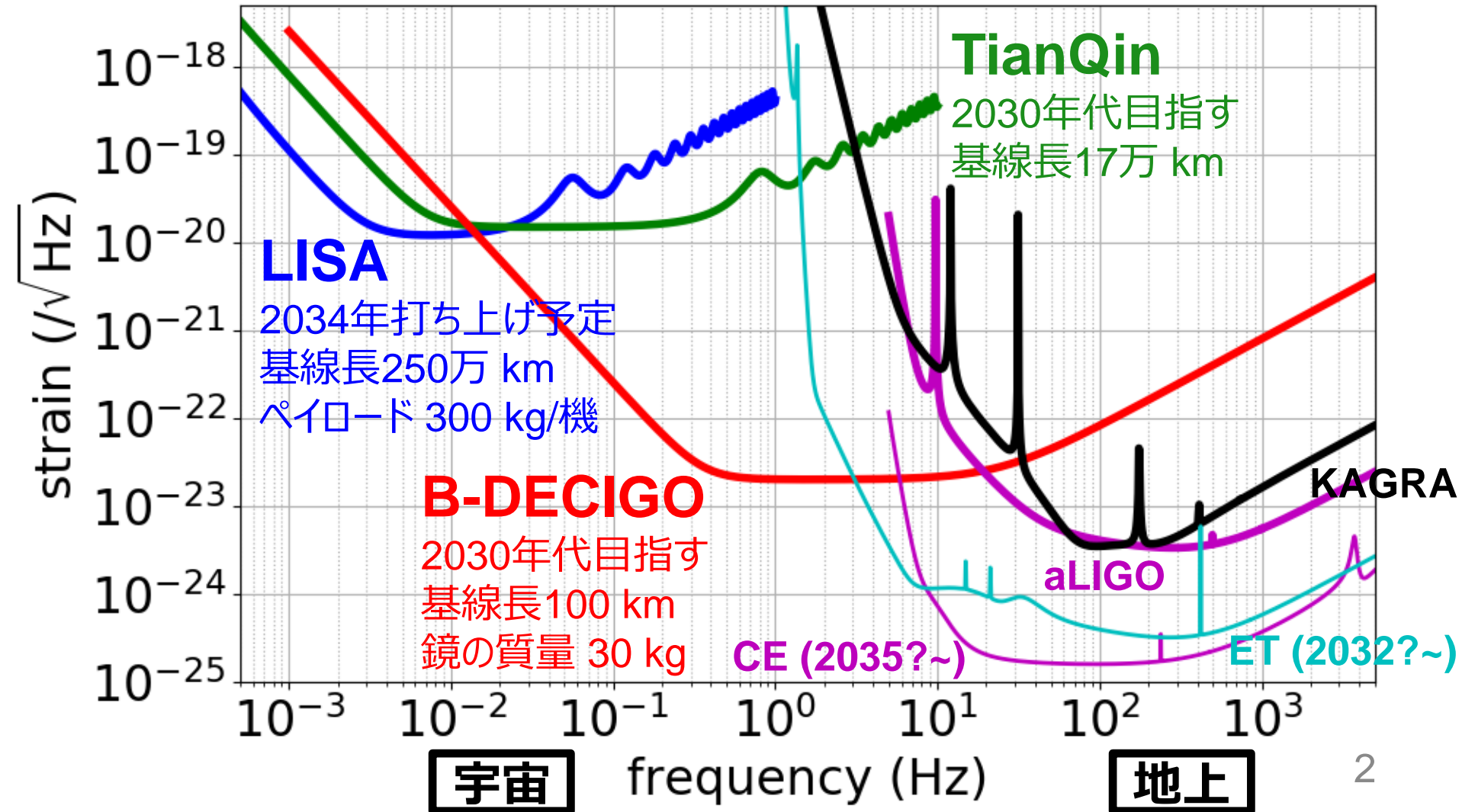
道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻



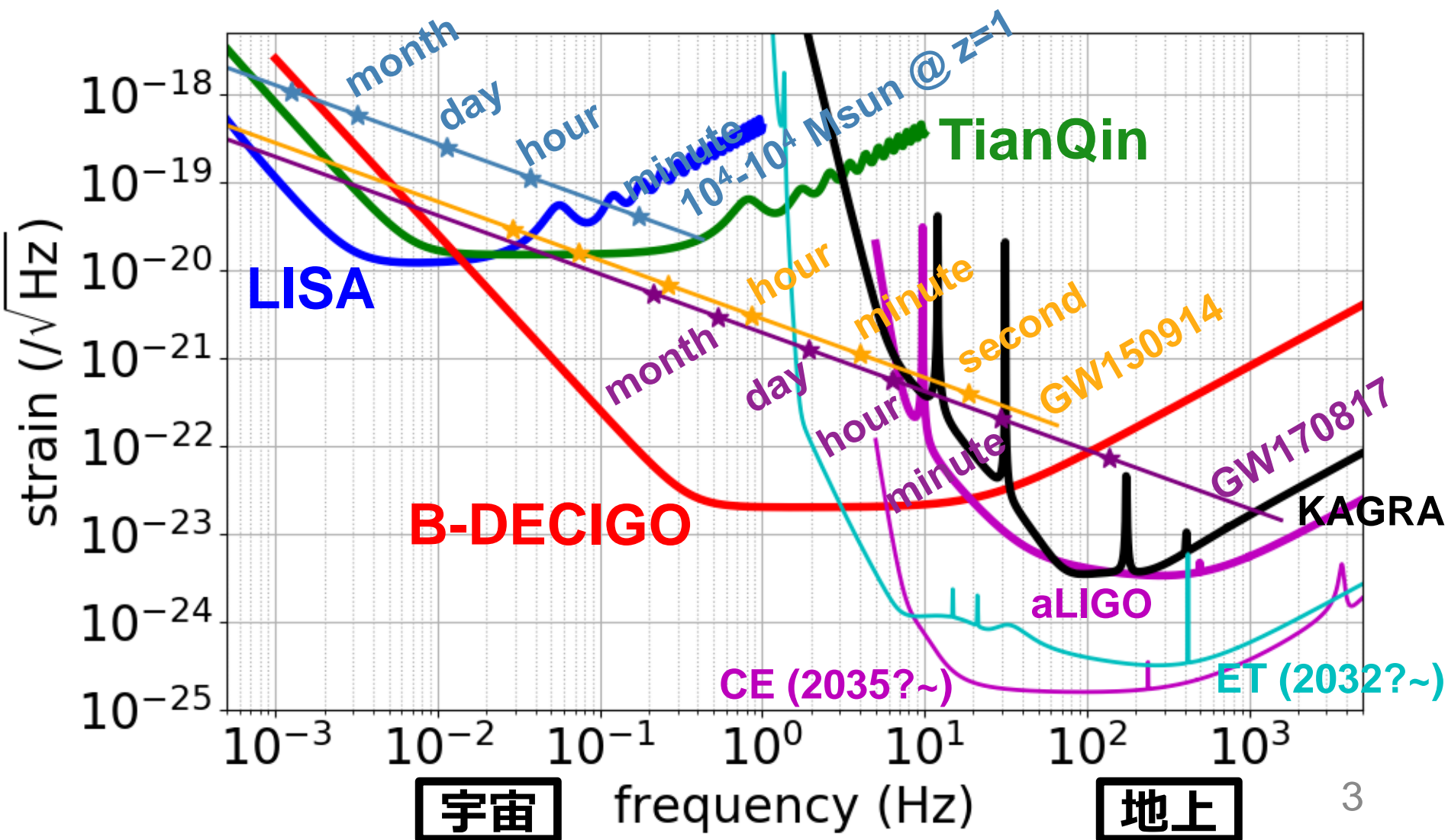
# 宇宙重力波望遠鏡

- 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？

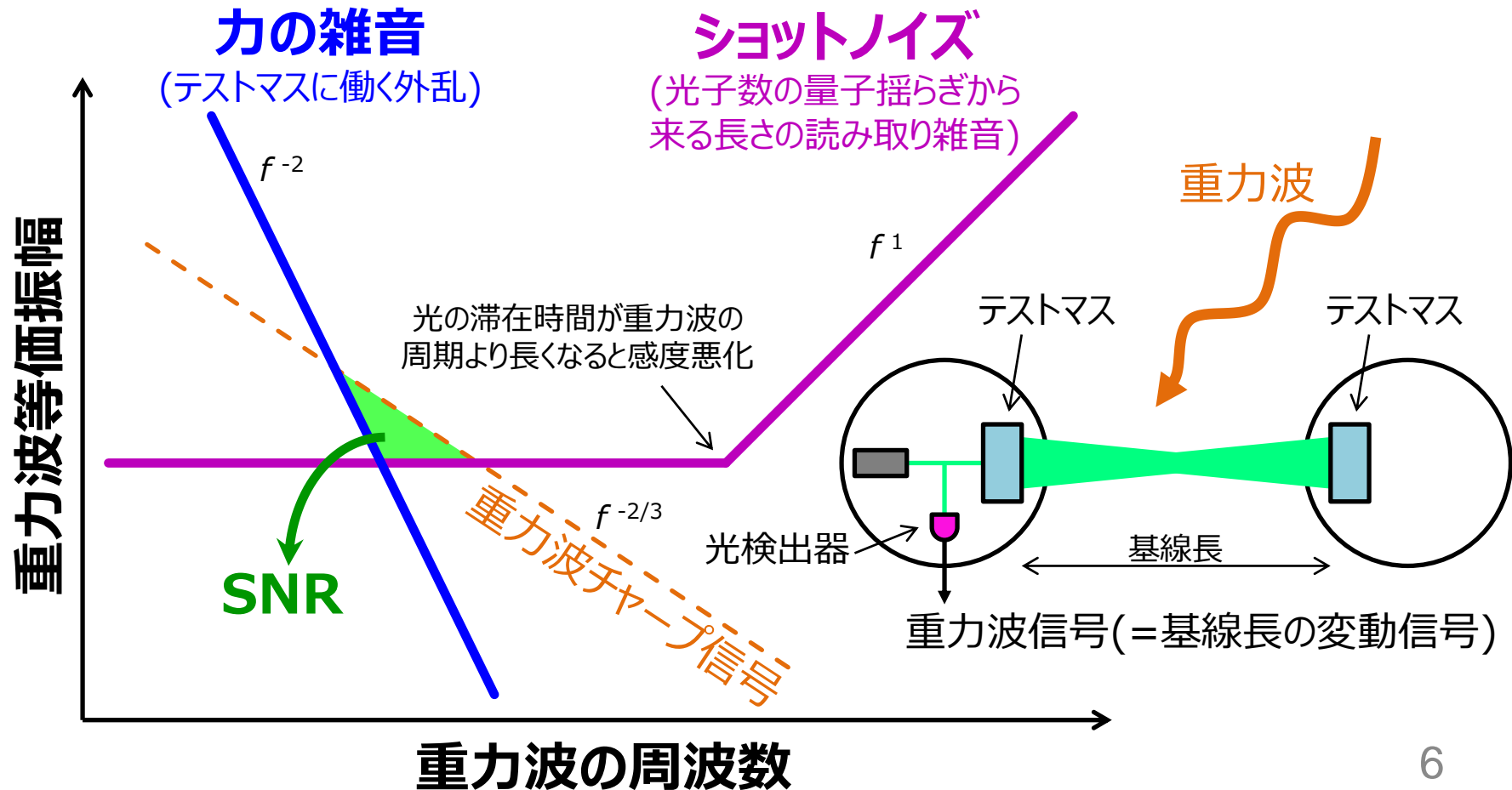
- 既存の計画は大型・中型計画  
時間がかかる。実証機が必要。
- JAXA 公募型小型計画規模を想定  
打ち上げ費込みで**150億円**以下  
イプシロンロケットによる打ち上げ  
2年に1度の公募、採択から6-7年程度  
→**2020年代**に打ち上げられる可能性
- LISAやTianQinよりも早く  
観測が開始できる可能性がある
- 特に**0.1-10 Hz帯**を狙えばLISAや  
LIGOとは質的に異なる観測が可能





# 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  $\omega$

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  $\lambda$

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

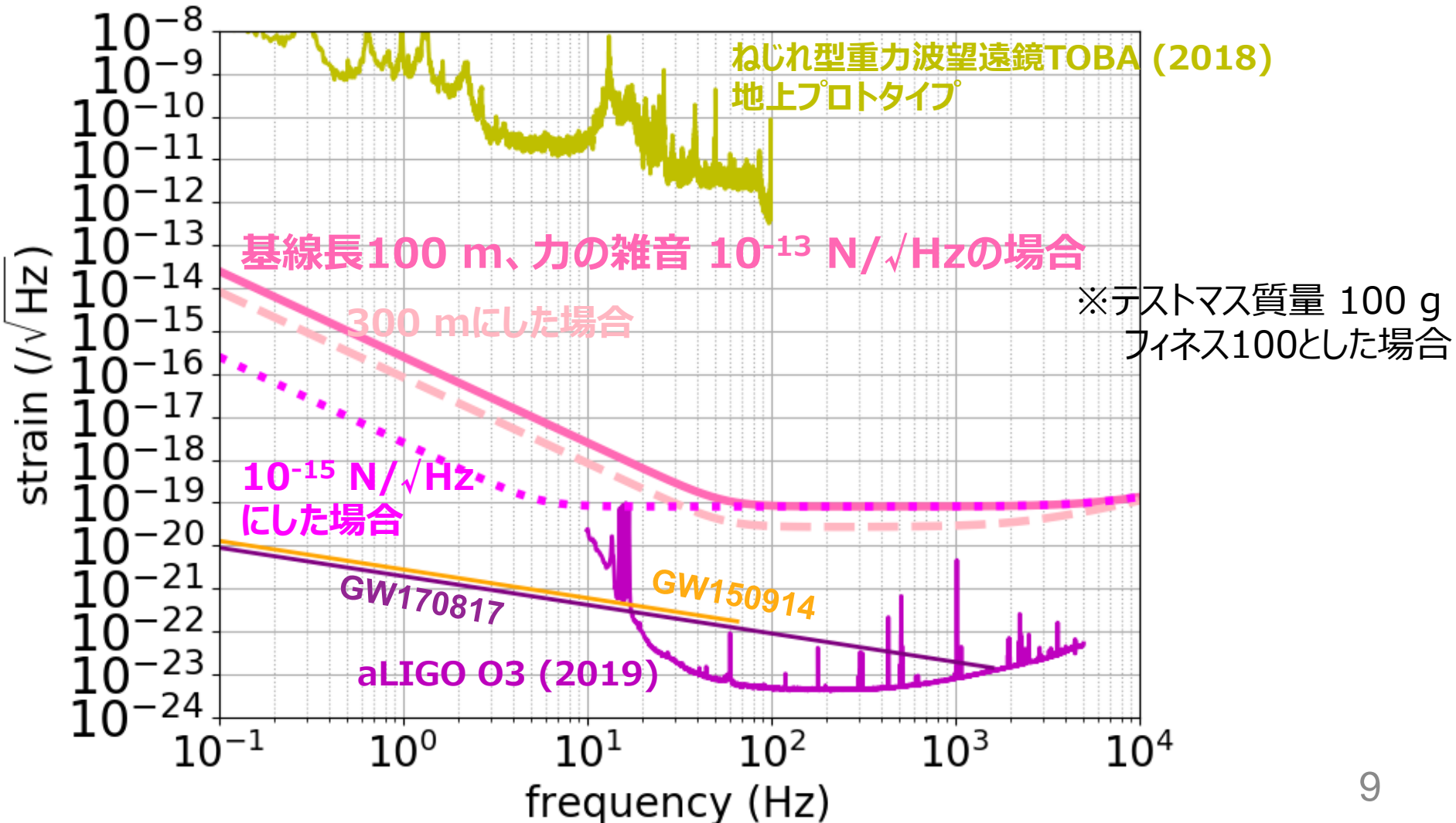
$$LF > 180 \text{ km}$$

- **kg級**のテストマス、**km級**の基線長が必須  
([前回のDECIGOワークショップ](#)では  $L=60 \text{ km}$ 、 $m=2 \text{ kg}$ 、 $F=10$ を提案)  
→ 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**



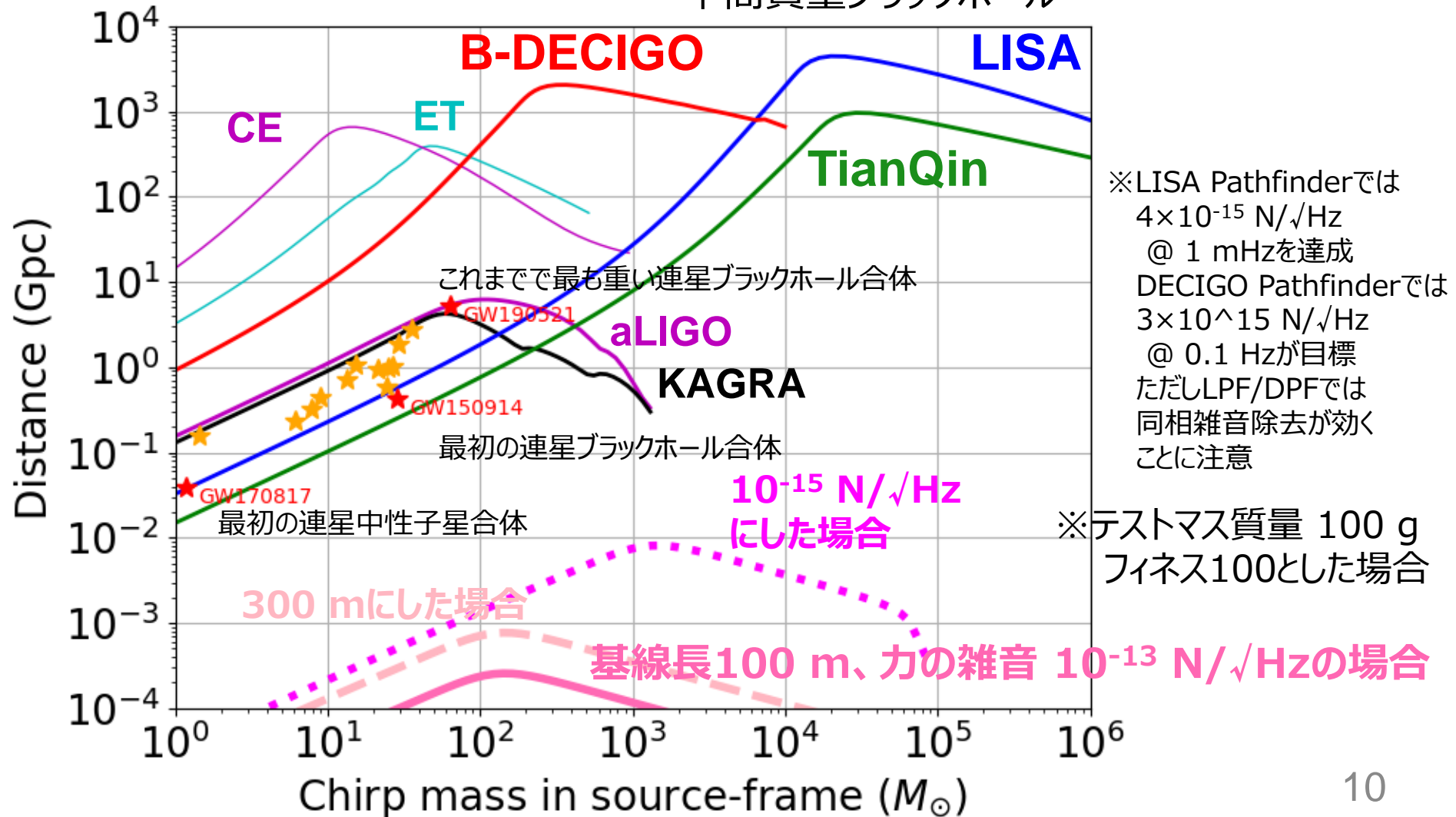
# 小型級で実現可能な感度

- 地上では実現できない低周波数帯での感度が可能



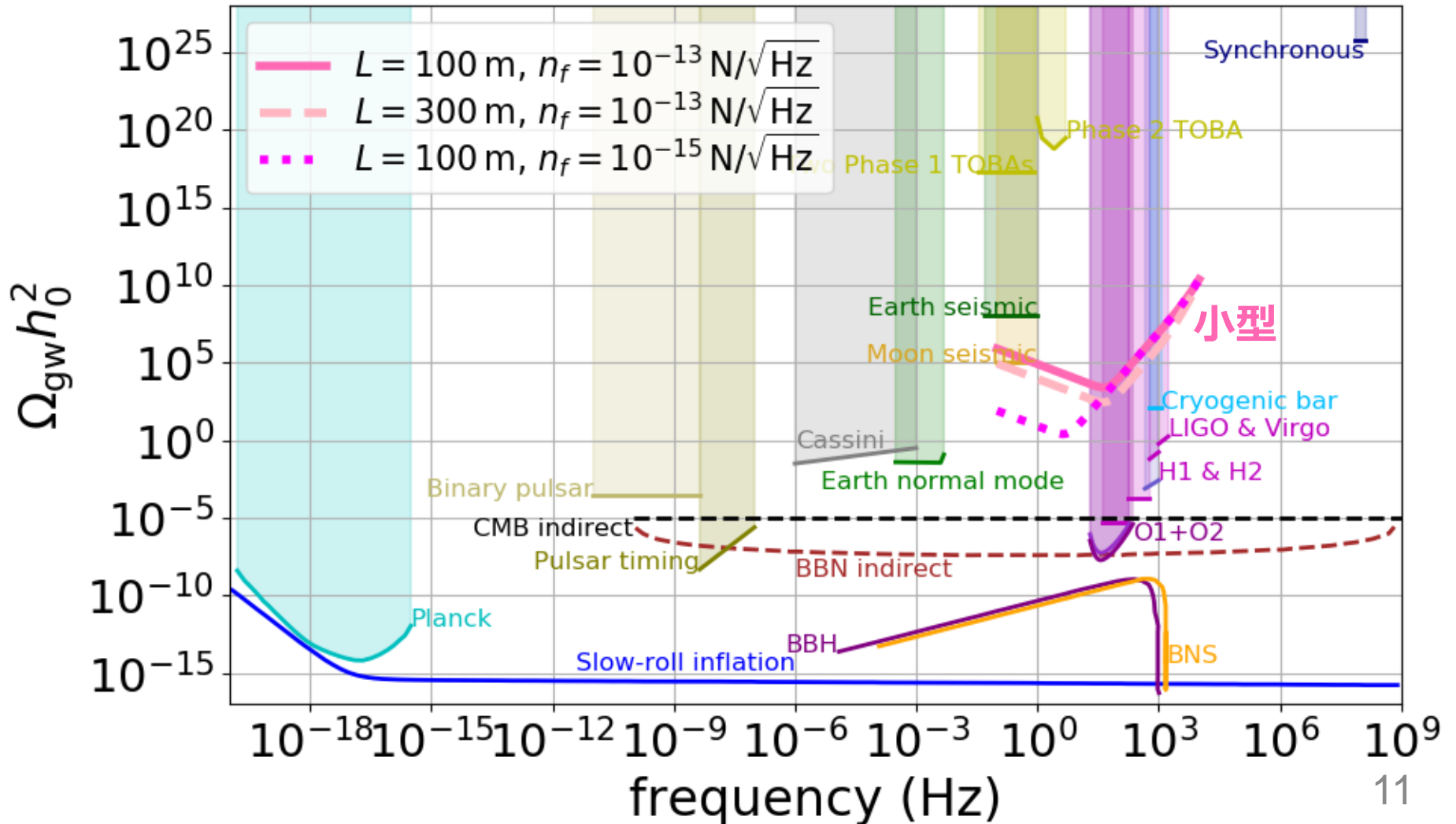
# 小型級で実現可能な観測レンジ

- 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



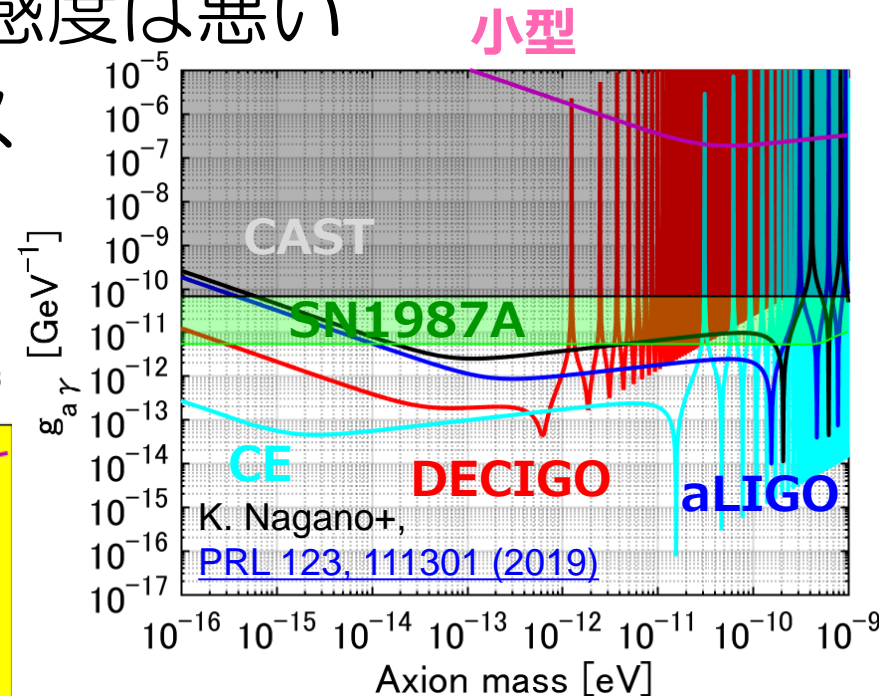
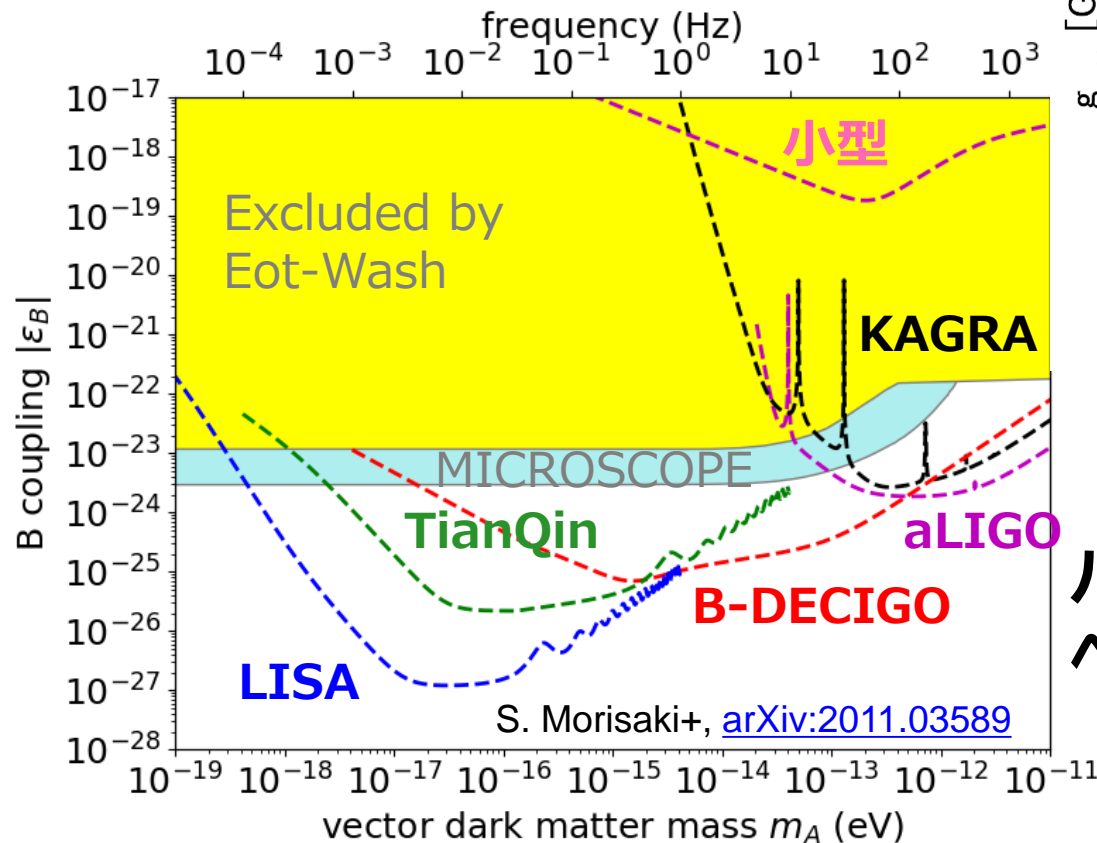
# 小型級による背景重力波探索

- 1-10 Hz帯では最高性能での背景重力波探索が可能



# ダークマター探索も(一応)可能

- ただし基線長が短いため感度は悪い
- (B-)DECIGOのサイエンスケースを増やす実証機



アクシオンDMとレーザー光の相互作用

※ 1年の観測を仮定

バリオン数に結合するベクトルDMと鏡の相互作用

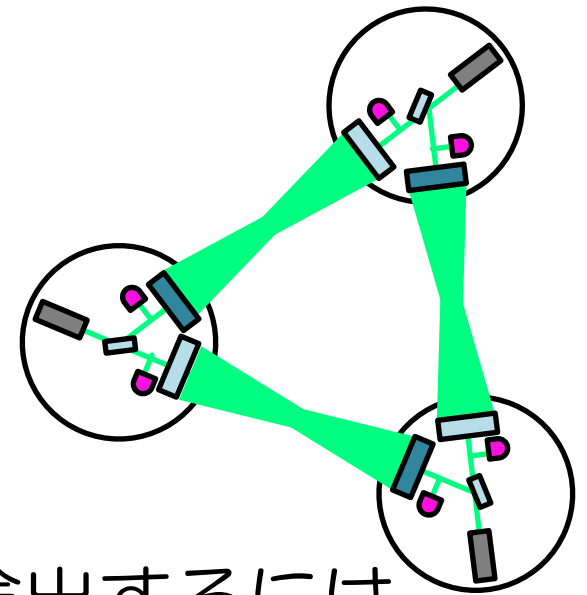
※ テストマスの材質を2種類使うことで感度を大幅(~7桁)に向上することも可能

YM+, PRD 102, 102001 (2020)

等価原理検証もできる?

# まとめ

- 地上重力波望遠鏡LIGOなどより  
低周波数帯の重力波観測のため  
には宇宙重力波望遠鏡が重要
- 宇宙重力波望遠鏡でこれまで  
見つかっている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
- ダークマター探索、等価原理検証も？



# 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 <b>Achieved</b> <a href="#">PRL 120, 061101 (2018)</a>	7e-15 N/rtHz <a href="#">CQG 33, 035010 (2016)</a>	1e-16 N/rtHz



# 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 (拡がりを小さくするため) [1064 nm for LISA]
  - 力の雑音  $<8e-16$  N/rtHz程度? [ $<8e-15$  N/rtHz for LISA]

# 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 <sup>2</sup> /Hz <sup>1/2</sup> ]	Laser metrology noise [pm/Hz <sup>1/2</sup> ]
<i>Solar-Orbit GW Mission Proposals</i>						
LISA <sup>9</sup>	Earthlike solar orbits with 20° lag	5 Gm	1 year	3	3	20
eLISA <sup>21</sup>	Earthlike solar orbits with 10° lag	1 Gm	1 year	3	3	12(10)
ASTROD-GW <sup>36-40</sup>	Near Sun-Earth L3, L4, L5 points	260 Gm	1 year	3	3	1000
Big Bang Observer <sup>45</sup>	Earthlike solar orbits	0.05 Gm	1 year	12	0.03	$1.4 \times 10^{-5}$
DECIGO <sup>44</sup>	Earthlike solar orbits	0.001 Gm	1 year	12	0.0004	$2 \times 10^{-6}$
ALIA <sup>47</sup>	Earthlike solar orbits	0.5 Gm	1 year	3	0.3	0.6
TAIJI (ALIA-descope) <sup>48</sup>	Earthlike solar orbits	3 Gm	1 year	3	3	5-8
Super-ASTROD <sup>42</sup>	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 <sup>54,55</sup>	0.6 Gm height orbit	1 Gm	53.2 days	6	3	5
gLISA/GEOGRAWI <sup>49-51</sup>	Geostationary orbit	0.073 Gm	24 h	3	3, 30	0.3, 10
GADFLI <sup>52</sup>	Geostationary orbit	0.073 Gm	24 h	3	0.3, 3, 30	1
TIANQIN <sup>19</sup>	0.057 Gm height orbit	0.11 Gm	44 h	3	1	1
ASTROD-EM <sup>43</sup>	Near Earth-Moon L3, L4, L5 points	0.66 Gm	27.3 days	3	1	1
LAGRANGE <sup>53</sup>	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/1702.00786)

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

