

km級宇宙レーザー干渉計による 重力波望遠鏡の可能性

道村唯太

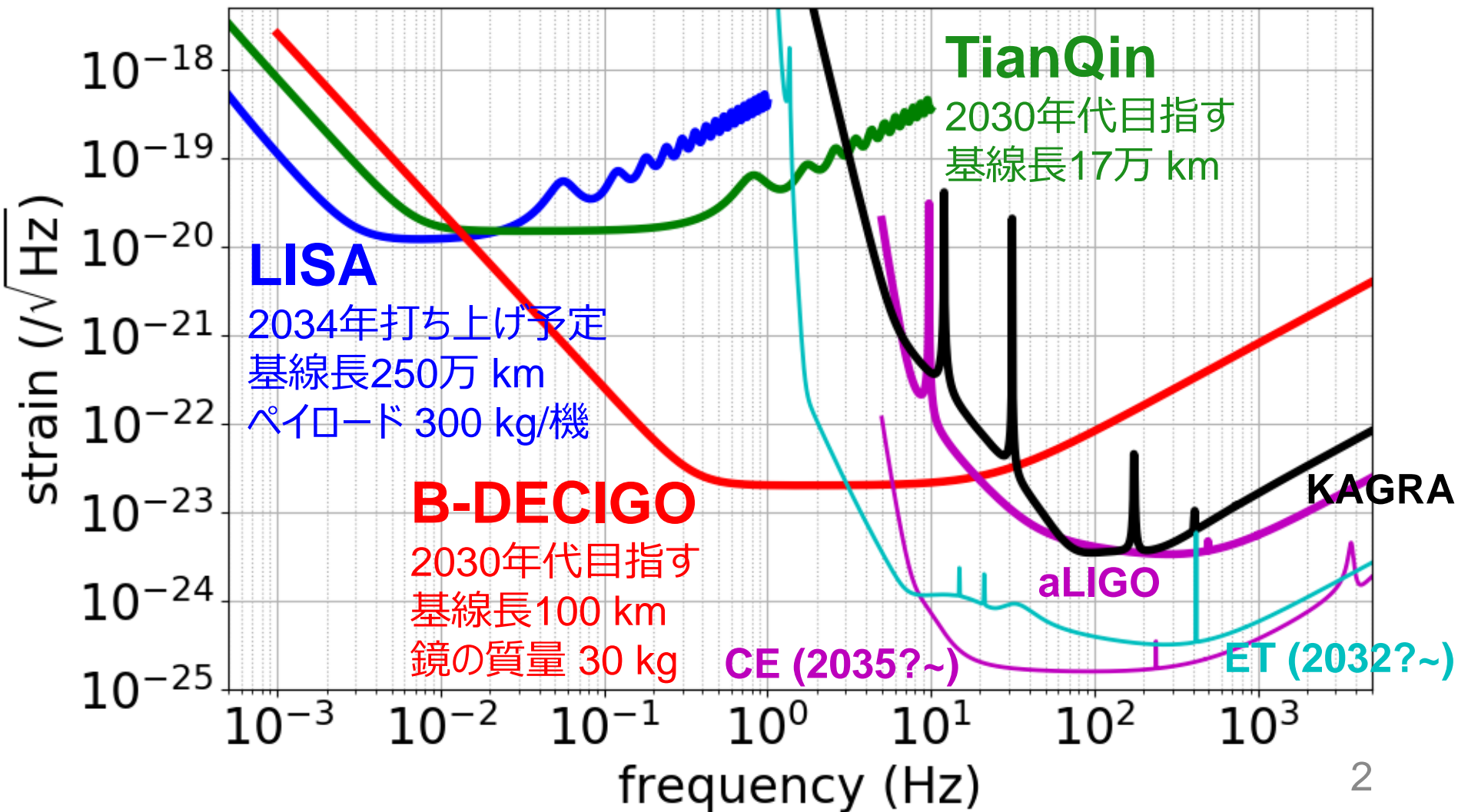
東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

長野晃士、伊藤琢博、和泉究、五十里哲、安東正樹



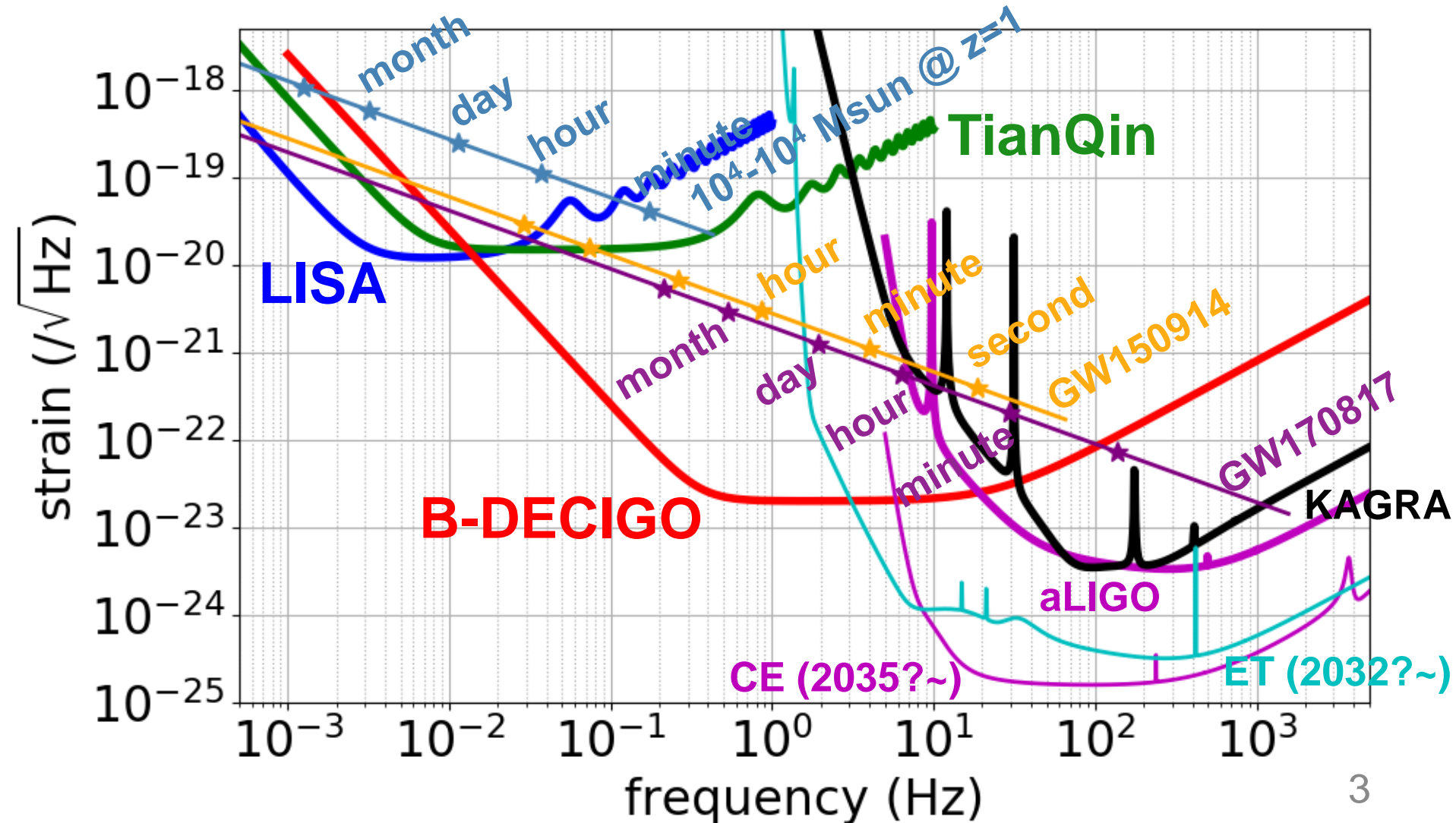
宇宙重力波望遠鏡は大きい

- 長期化、予算の肥大化、失敗できないミッション



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



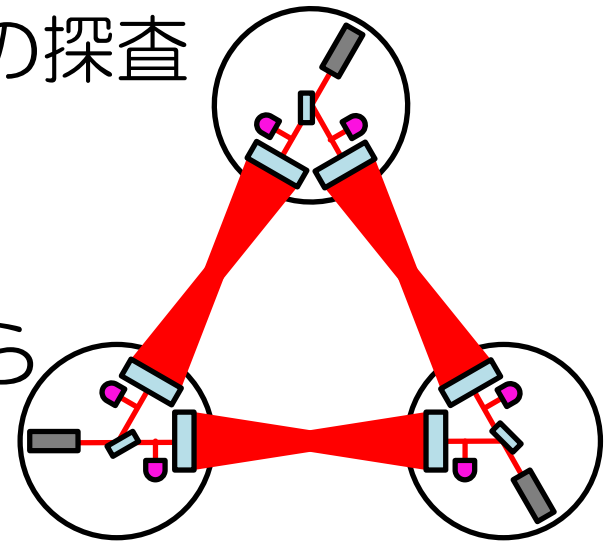
小型で宇宙重力波観測できないか？

- JAXA 公募型小型計画規模を目指す
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 Hz帯**を狙えばLISAや
LIGOとは質的に異なる観測が可能



成功基準

- ミニマムサクセス
高精度フォーメーションフライトの実証
- フルサクセス
重力波望遠鏡としての感度のend-to-end実証
宇宙での力の雑音の評価
- エクストラサクセス
中間質量ブラックホール連星の探査
多波長重力波観測の初実証
- 技術実証ミッションでありながら
宇宙での重力波初観測も可能



宇宙重力波望遠鏡の方式

- **Optical transponder**型 (LISA, TianQin, BBOなど)
LISA Pathfinder、GRACE-FOで一部技術実証済
長基線長が可能で力の雑音、変位雑音に強い
散射雑音を下げるにはレーザー高強度化、大型化必要
- **Fabry-Pérot**干渉計型 (DECIGO)
地上重力波望遠鏡と同様の方式
レーザー光強度が小さくてすむ
基線長の制御(フォーメーションフライト)が必要
- **Michelson**干渉計型 (TianGO)
レーザー高強度化ができればFP型と同等の性能
テストマスを増やさずに冗長性を持たせるのが困難
- **原子干渉計**、原子/光格子時計など
技術的に未成熟か？
→ 0.1Hz帯が狙える**Fabry-Perot干渉計型を採用**⁶

感度設計

- 連星中性子星合体GW170817を**合体の1ヶ月前**から観測したい

1. 力の雑音への要求値

$$h_f = \frac{n_f}{m\omega^2 L} < 3 \times 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}} (0.5 \text{ Hz} / f)^2$$

$$\rightarrow n_f < 4 \times 10^{-15} \text{ N} / \sqrt{\text{Hz}} \left(\frac{m}{2 \text{ kg}} \right) \left(\frac{L}{60 \text{ km}} \right)$$

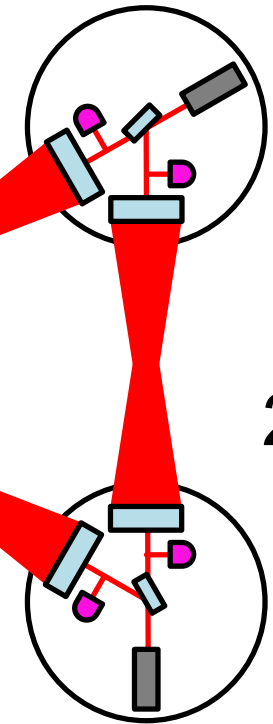
鏡の質量 基線長

2. 散射雑音からの要求値

$$h_{\text{shot}} = \frac{1}{2\pi L} \sqrt{\frac{hc\lambda}{2P} \frac{\pi}{2\mathcal{F}}} < 3 \times 10^{-21} / \sqrt{\text{Hz}}$$

$$\rightarrow \mathcal{F} > 3 \times \left(\frac{60 \text{ km}}{L} \right) \sqrt{\frac{10 \text{ mW}}{P_{\text{入射光強度}}}}$$

ファイネス



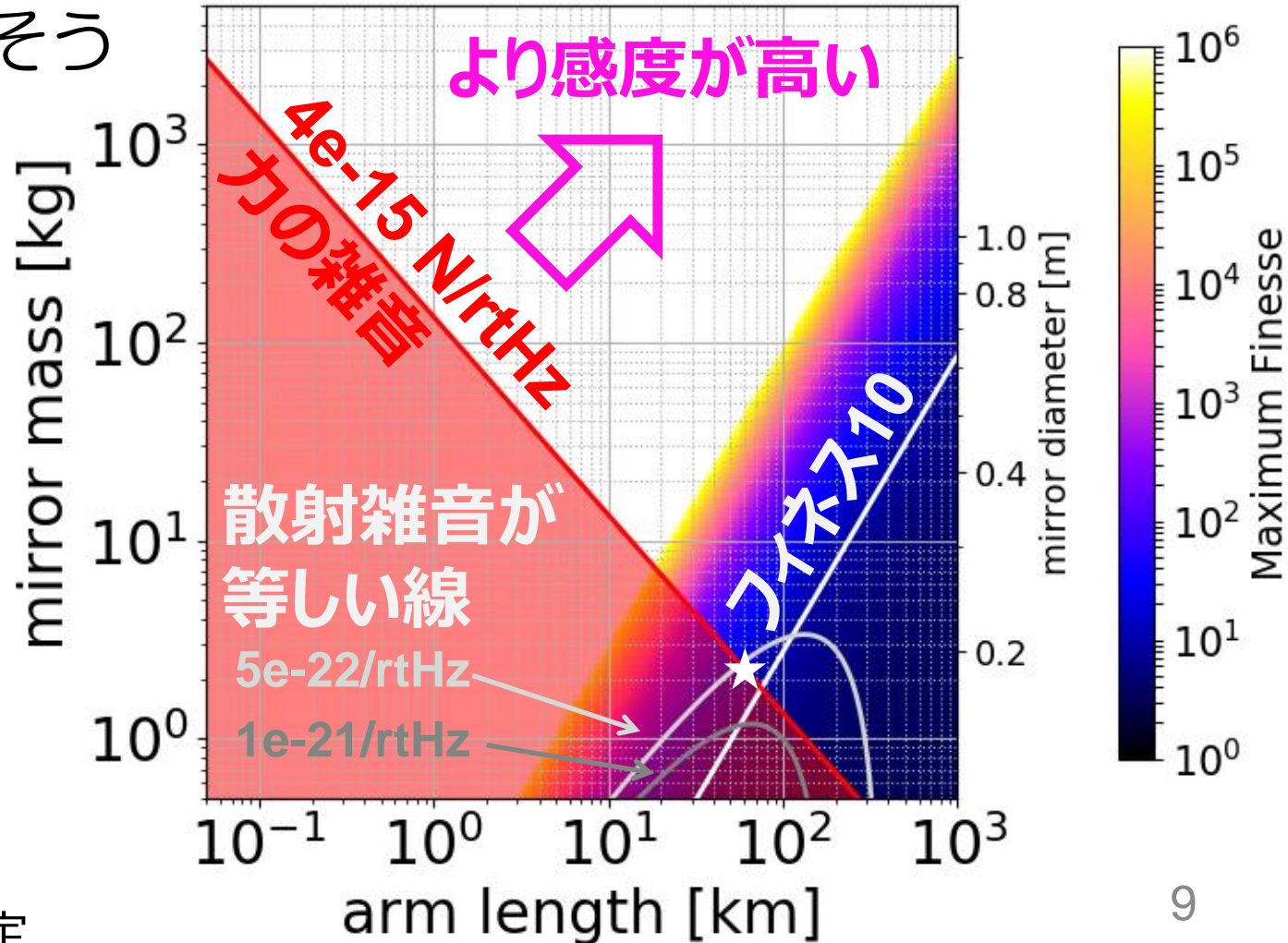
感度設計

- レーザー光強度は質量や消費電力を考慮し、**10 mW**とする
- フィネスが大きいほど散射雑音は小さい
($\mathcal{F} = \pi/2$ でMichelson干涉計と同等)
- 一方で、鏡の大きさと基線長から光共振器の**フィネス**の上限値がある
→ フィネスを上げて基線長を短くする
or
フィネスを下げて基線長を長くする
(どちらでも同じ散射雑音が実現可能)



鏡の大きさと基線長

- 力の雑音への要求値を $4e-15 \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$ とし、
基線長60 km、鏡の質量 2 kg、フィネス10とする
のが良さそう

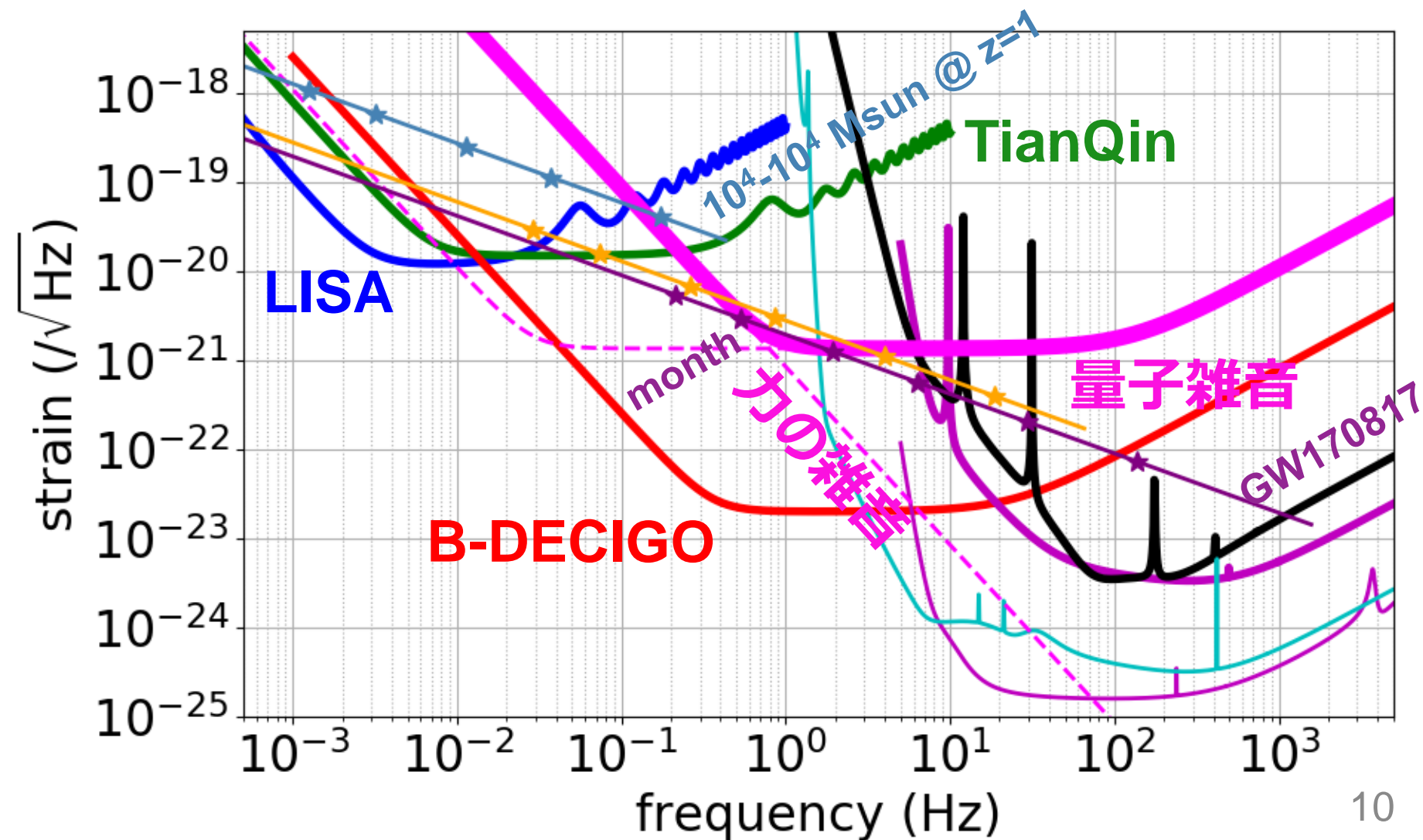


2 kg鏡は
直径18 cm

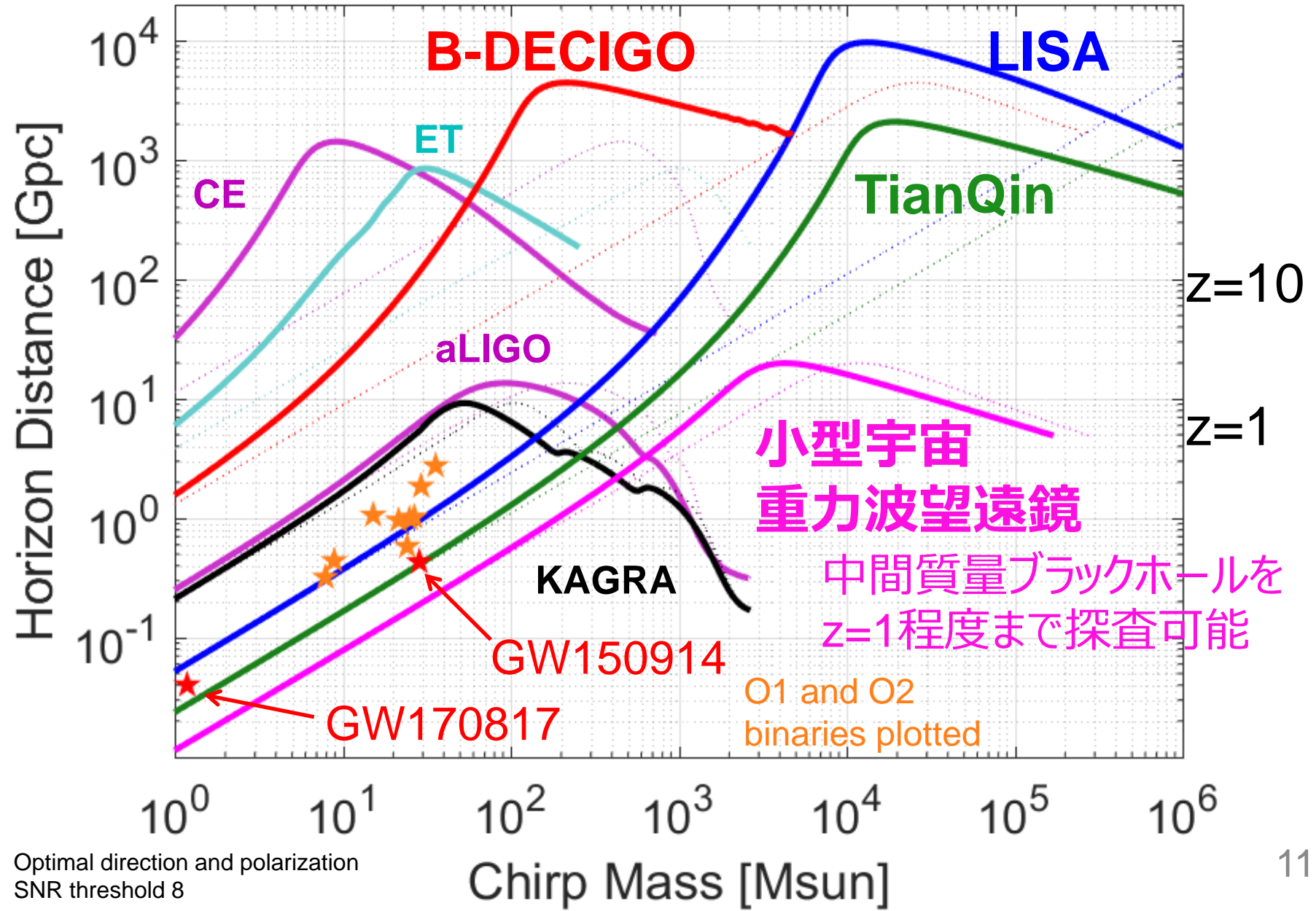
※フィネスの決定には
シリカ鏡
直径/厚さ 3
g-factor 0.3
波長515 nm を仮定

設計感度

- 連星中性子星合体を1ヶ月前にぎりぎり捉える



観測可能距離



得られる重力波サイエンス

- 中間質量ブラックホール連星の初の本格探査
48 イベント/年程度 (SNR 8以上, optimistic)
H. Shinkai+, [ApJ 835, 276 \(2017\)](#)

- 連星中性子星の合体時刻と場所の推定
1.4 Msun-1.4 Msun @ 40 Mpcの場合
合体の1週間前に

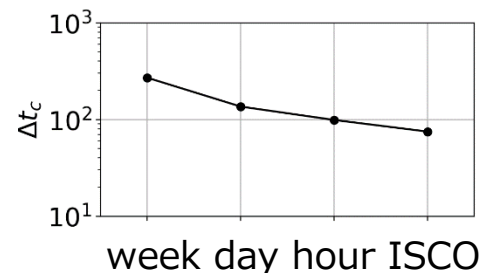
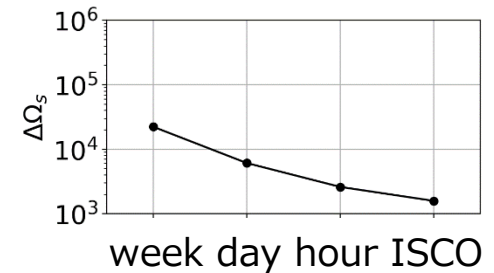
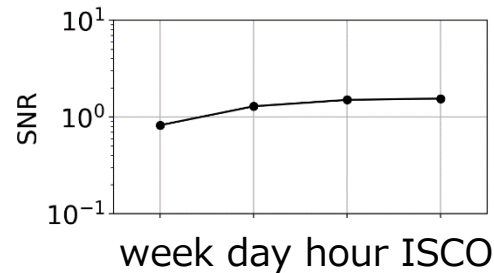
100秒程度、数千平方度の精度で推定可能

ただし

SNR 2程度

H. Takeda+,

[PRD 98,
022008 \(2018\)](#)

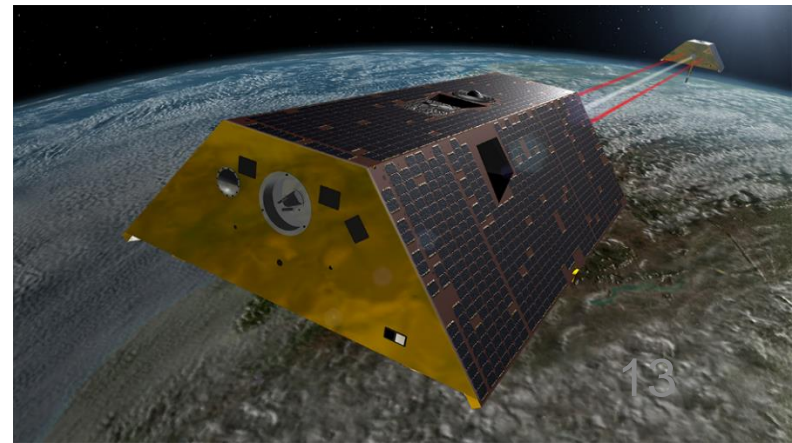
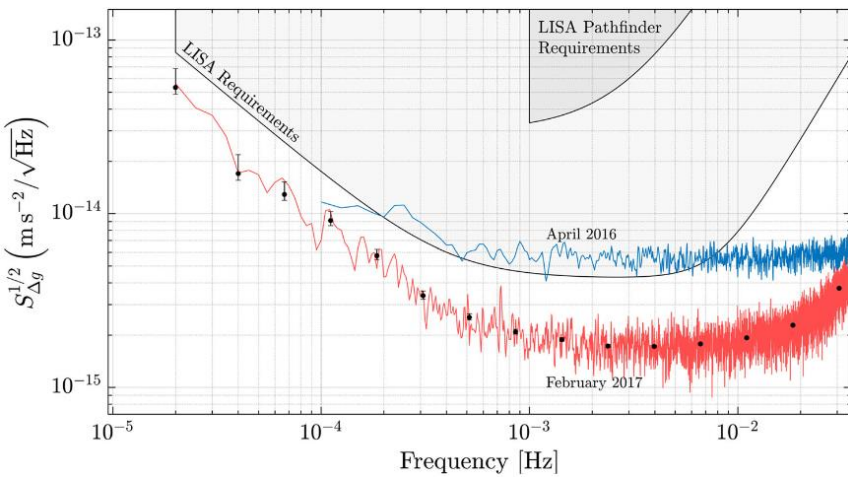


Observation from a
month before the
merger
Median over the angles

技術的実現可能性

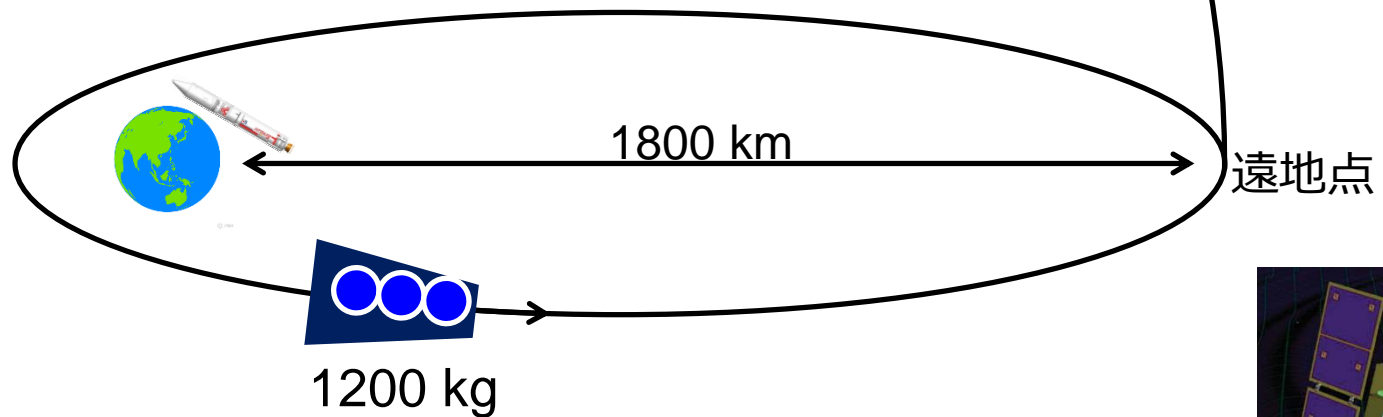
- **$4e-15 \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$** の力雑音 ($1e-6 \text{ Pa}$ の残留ガス雑音)
LISA Pathfinderが実証済み
[PRL 120, 061101 \(2018\)](#)
ちなみにDECIGO
要求値は
 $1e-16 \text{ N}/\sqrt{\text{Hz}}$
- **2 kg**の鏡とそのハウジング、真空槽
LISA Pathfinderと同等
- **60 km**の基線長
GRACE-FOが200kmのレーザー測距実証済み
リンクアキュイジションも難なく実証
Proof massは72 g

[PRL 123, 031101 \(2019\)](#)



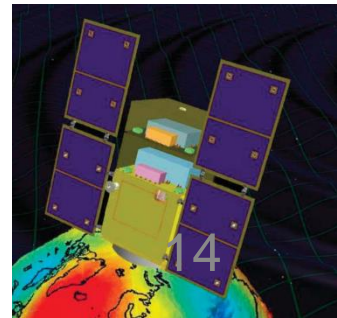
軌道と衛星質量

- 高度1800kmの地球周回軌道を想定
ミッション部質量は100 kg程度か
鏡 2 kg x 2
ハウジング 10 kg x 2
真空槽 10 kg x 2
光学系 10 kg
レーザー光源 2 kg
その他ドラッグフリー推進系など



円軌道投入時
衛星質量
350 kg/1機

- DPFを軽量化して3台打ち上げるイメージ



まとめ

- Febyry-Perot共振器タイプの小型宇宙重力波望遠鏡を提案
 - 鏡の質量 2 kg、基線長 60 km
 - フィネス 10、レーザー光強度 10 mW
- フォーメーションフライトの技術実証がミニマムサクセス
- 技術的実現可能性は高そう
- JAXA 公募型小型級でいけるかも？
- 中間質量ブラックホール連星合体を $z=1$ 程度まで観測可能 (年間数10イベント程度観測可能)
- 連星中性子星合体の合体時刻と方向を1週間前に100秒程度、数千平方度程度で推定可能

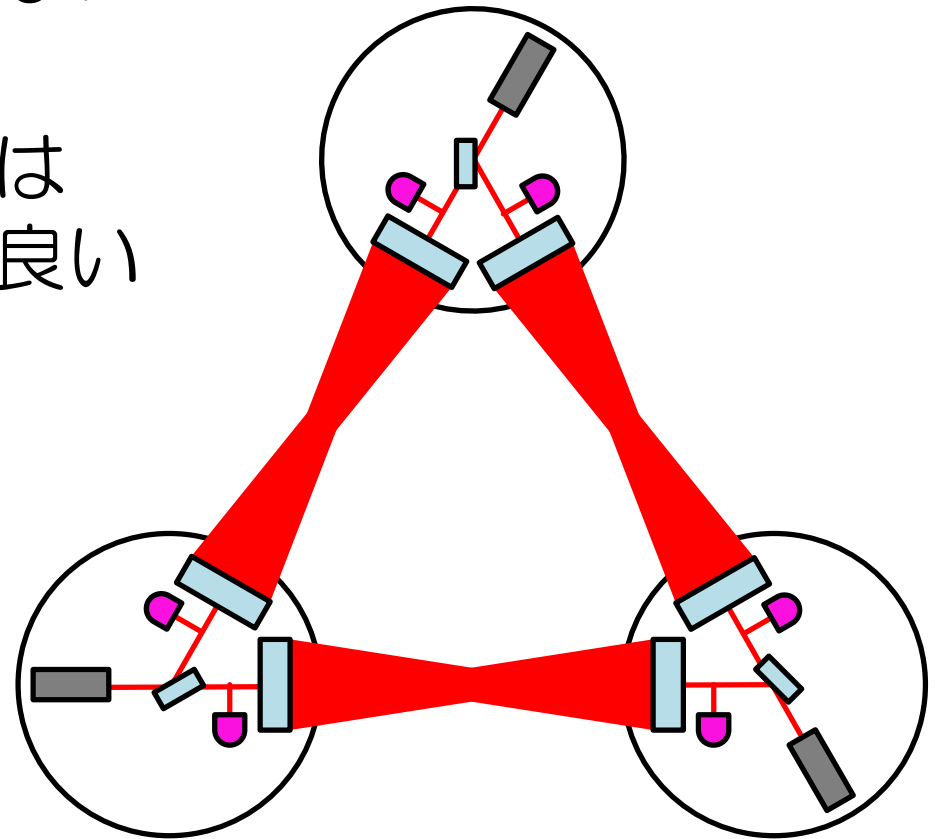
補助スライド

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

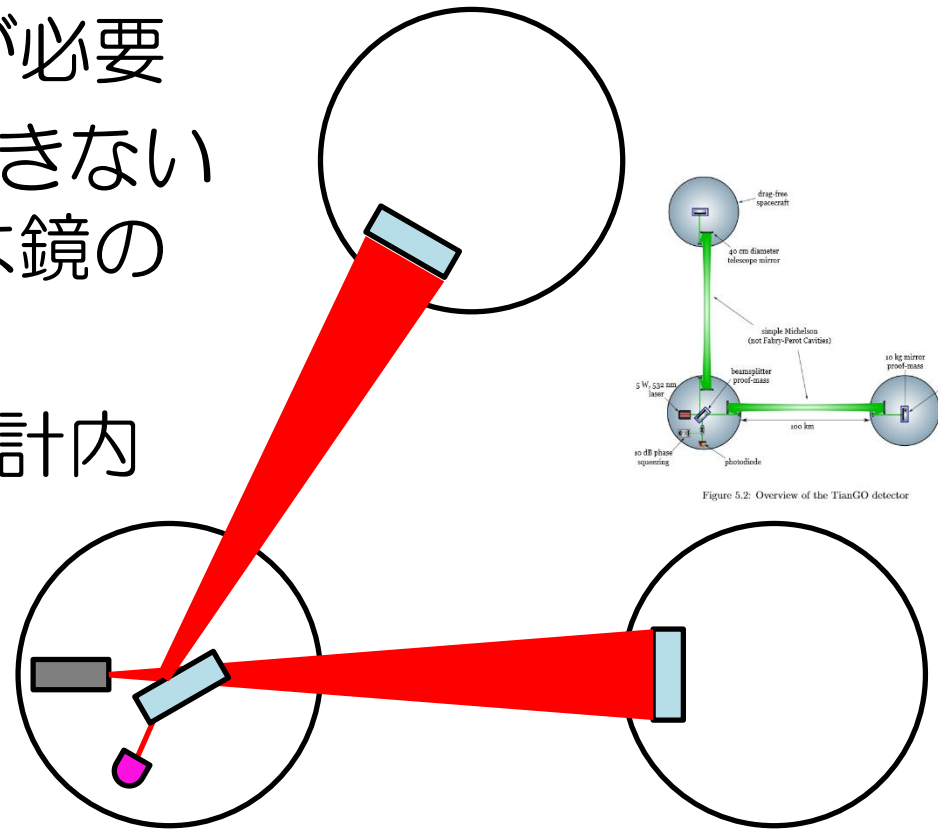


干渉計方式 (Michelson)

- 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

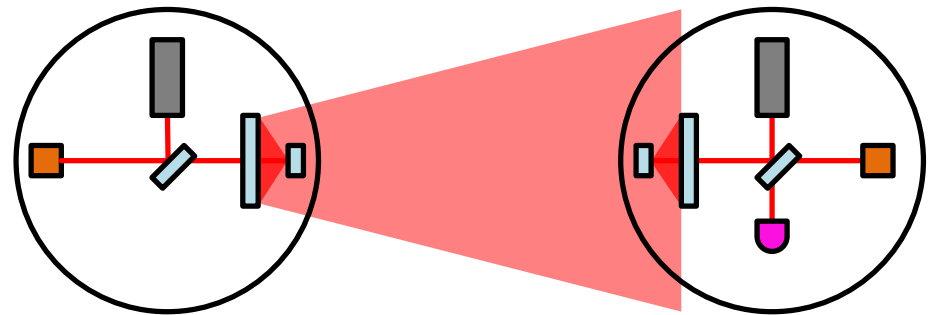
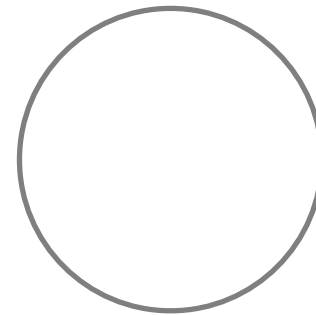
Michelson 1 W \Leftrightarrow FP 10 mW & Finesse 10

- 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](#)

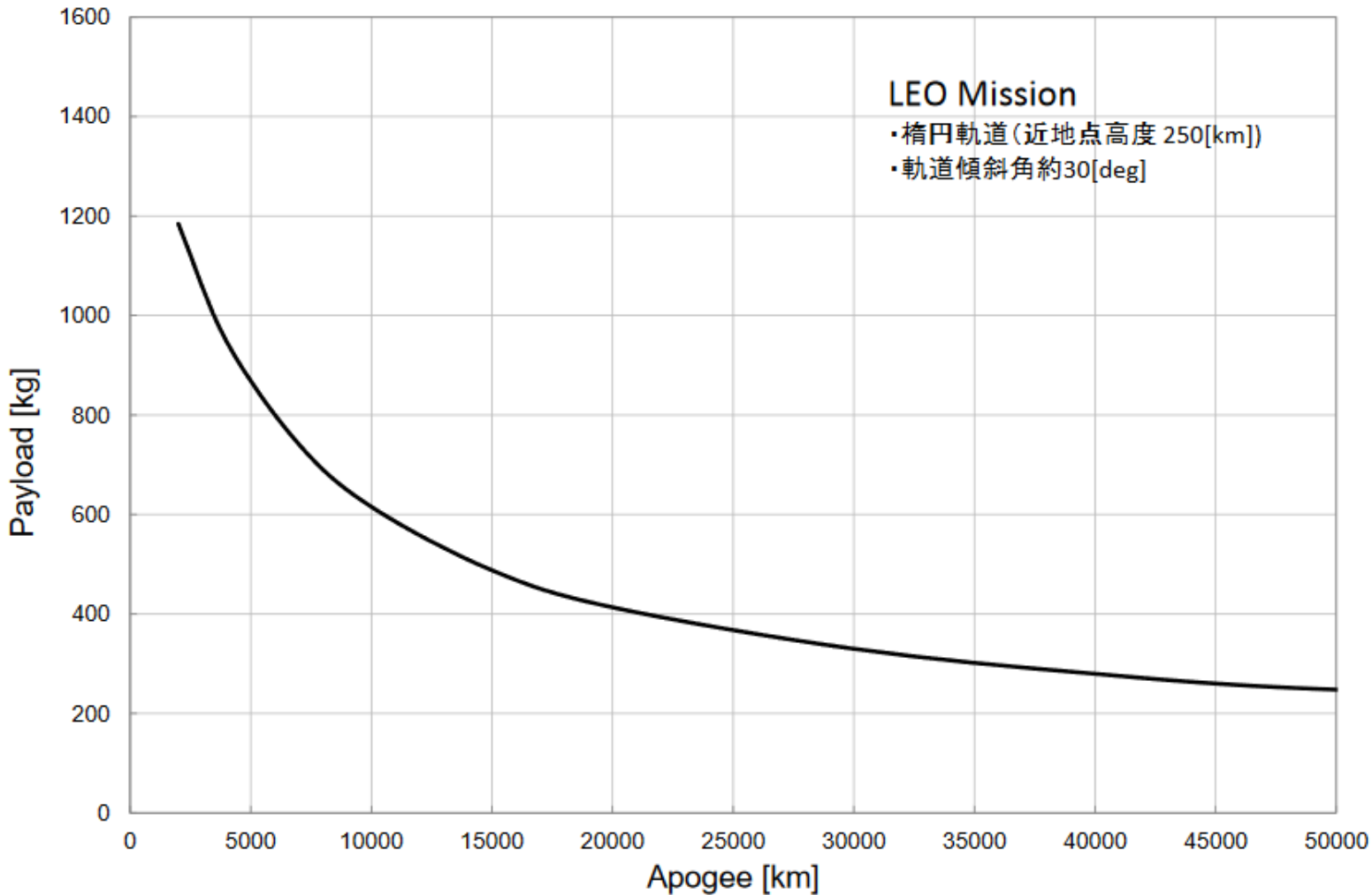


図 3-13 打ち上げ能力(基本形態)

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)

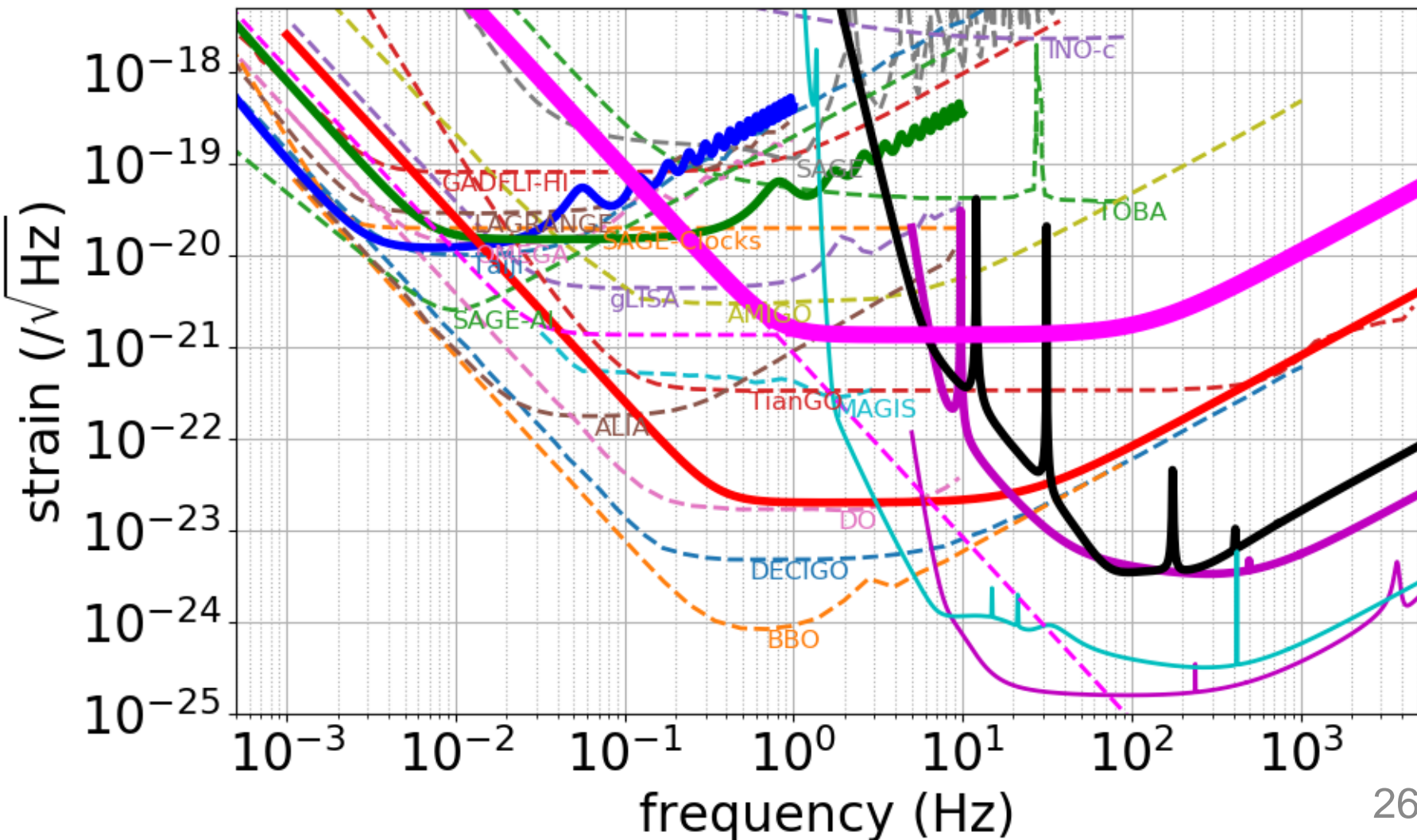
B-DECIGO: [PTEP 2016, 093E01](https://arxiv.org/abs/1603.04917) (2016)

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

aLIGO: [LIGO-T1800044](https://arxiv.org/abs/1701.06867)

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)



Some More References

- Gravitational Wave Observatory Designer
<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0264-9381/32/9/095004>
- TianGO
<https://search.proquest.com/openview/06d97b7a49549e276e0509b3fee08d4c/>

暗黒物質の探索も可能

- 偏光回転を用いたアクシオン暗黒物質の探索
K. Nagano, T. Fujita, YM, I. Obata, [arXiv:1903.02017](https://arxiv.org/abs/1903.02017)
- B-Lに結合するベクトル場の探索
A. Pierce+, [PRL 121, 061102 \(2018\)](https://arxiv.org/abs/1806.06110)

