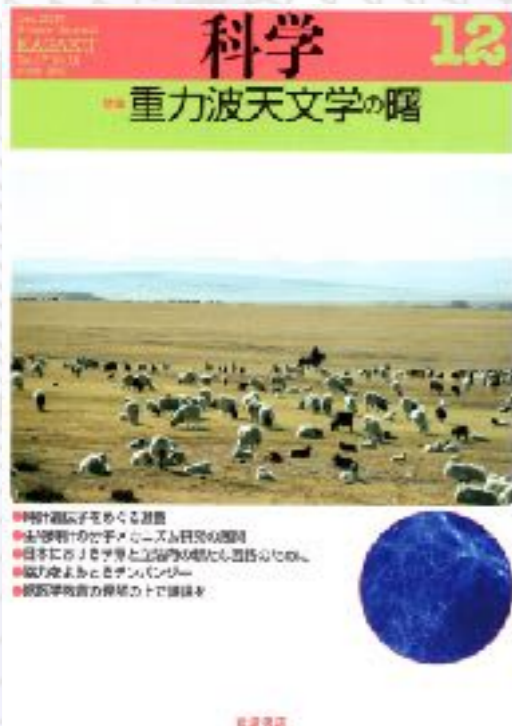
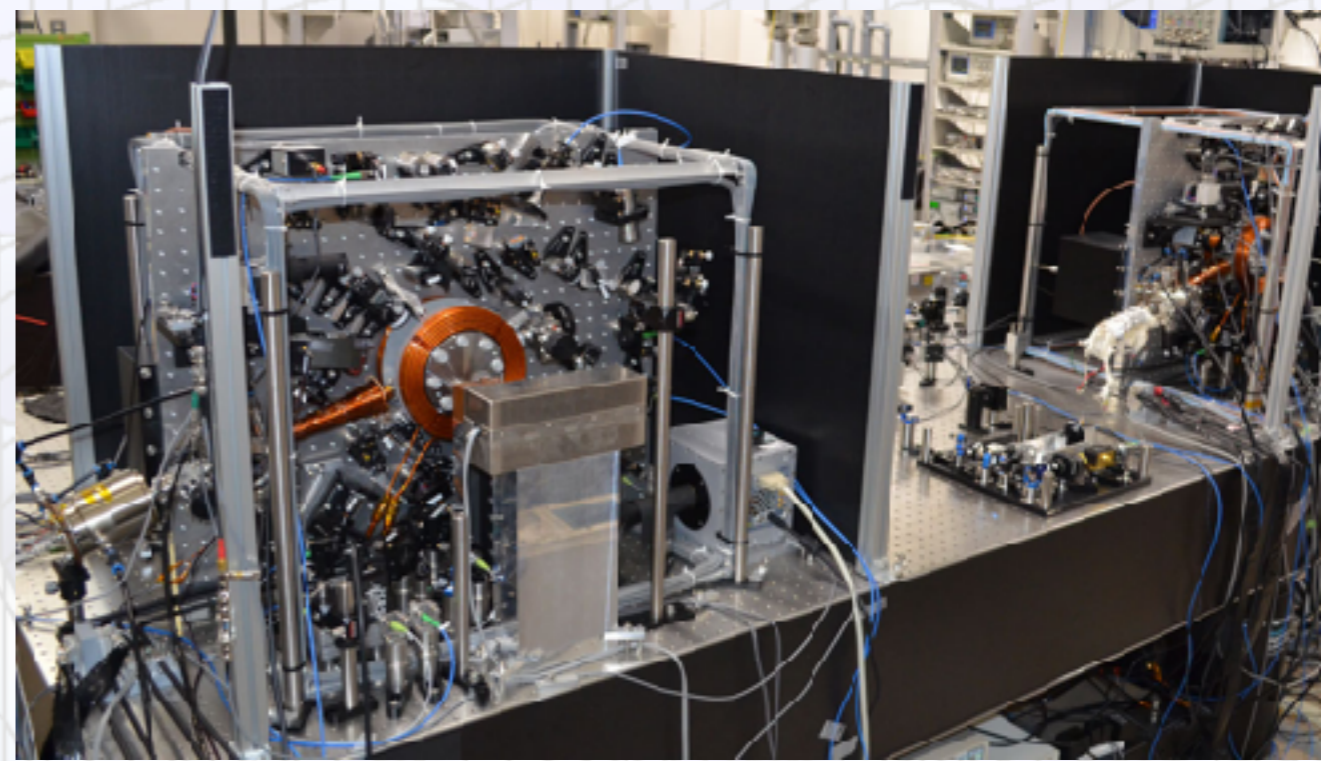
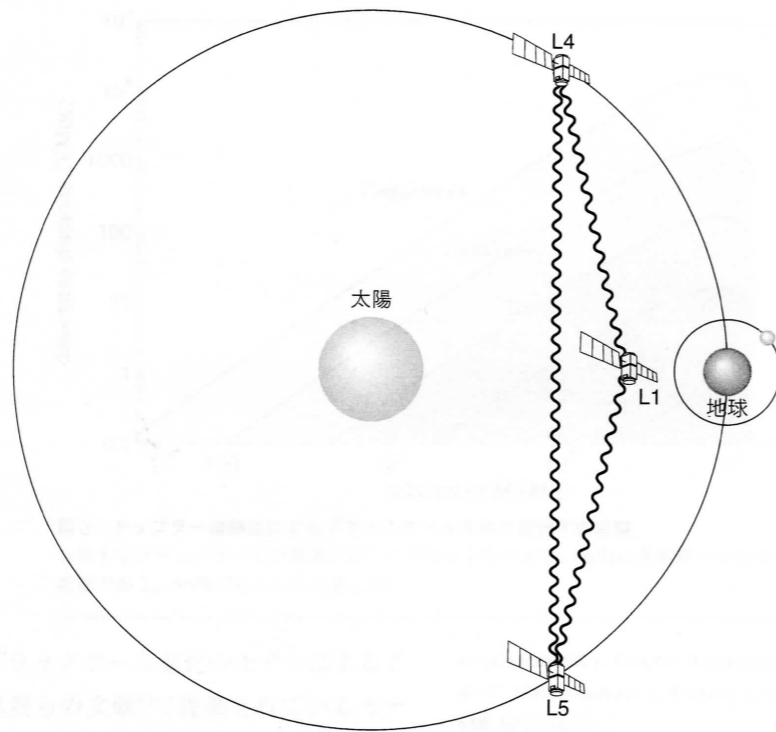


光格子時計を用いた重力波検出法の提案

真貝寿明（大阪工大/理研），玉川徹（理研），野田篤司（JAXA），
香取秀俊（東京大/理研），牧野淳一郎（神戸大/理研），戎崎俊一（理研）



- ◆ Cassini衛星のDoppler tracking精度は現在の技術で3桁改善可能
- ◆ “Cassini+++”, “Cassini++++” : 感度曲線, 観測可能距離 $D(\text{Mc})$
- ◆ 銀河中心SMBHのヒエラルキー的形形成シナリオでイベント数予測

2018/3/25 物理学会@東京理科大

1. Introduction : 光格子時計

“Optical Lattice Clock”

香取 (物理学会誌, 2002, p754)

原子をレーザーの定在波の腹に捕獲

多数原子の遷移周波数を読み取る

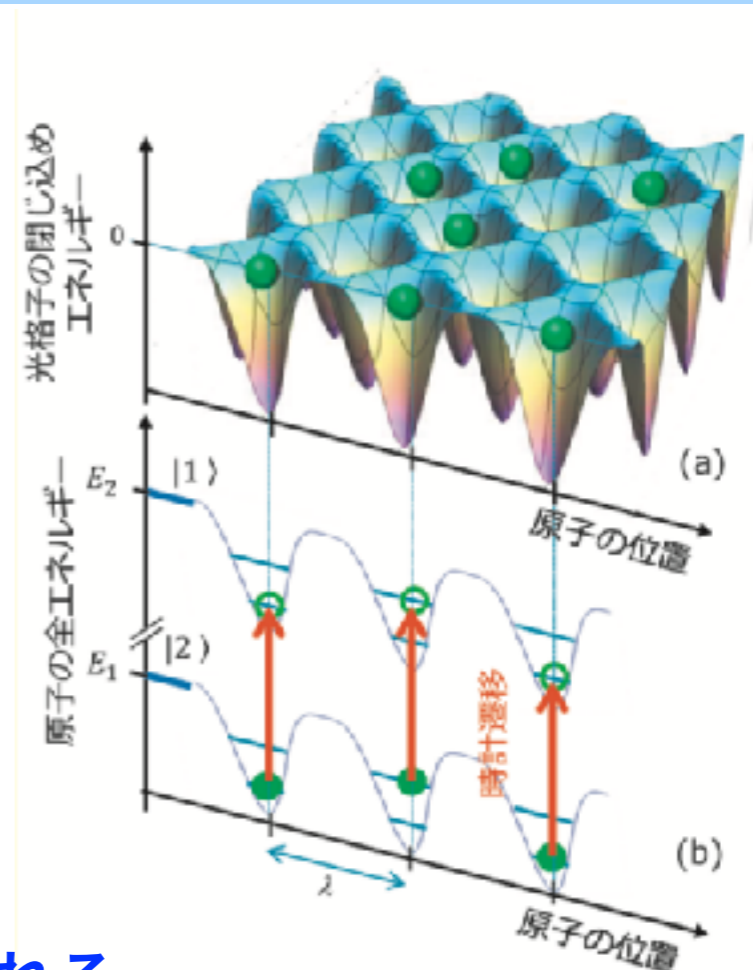
ドップラー効果 x

Cs原子時計 $\Delta t/t = 5 \times 10^{-16}$

光格子時計(2015) 10^{-18}

超分極と多重極効果を相殺する魔法周波数

光格子時計は $\Delta t/t = 10^{-19}$ を視野に入れる



物理学会誌, 2017, p84

LETTERS

PUBLISHED ONLINE: 15 AUGUST 2016 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2016.159

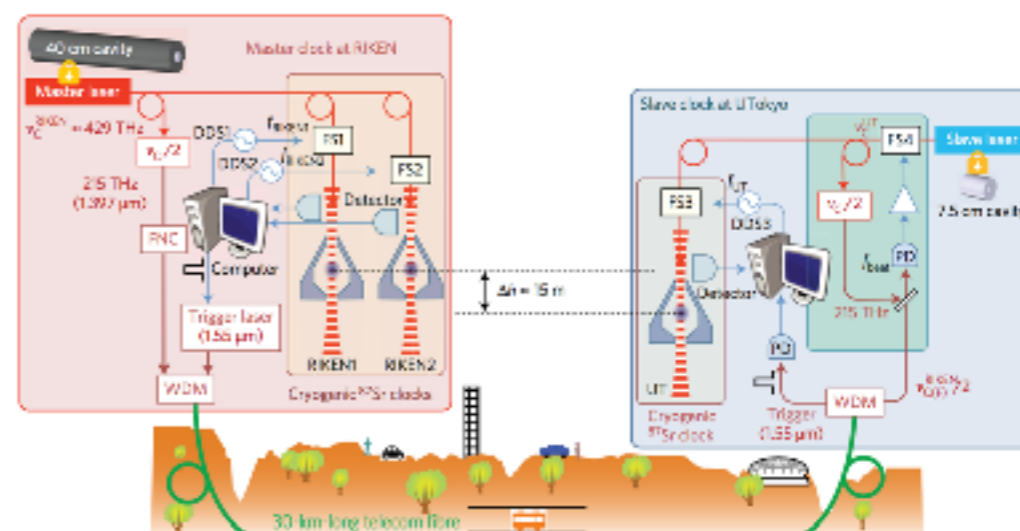
nature
photonics

Geopotential measurements with synchronously linked optical lattice clocks

Tetsushi Takano^{1,2}, Masao Takamoto^{2,3,4}, Ichiro Ushijima^{2,3,4}, Noriaki Ohmae^{1,2,3}, Tomoya Akatsuka^{2,3,4}, Atsushi Yamaguchi^{2,3,4}, Yuki Kuroishi^{5†}, Hiroshi Munekane⁵, Basara Miyahara⁵ and Hidetoshi Katori^{1,2,3,4*}

本郷と和光の高低差15mのポテンシャルによる

相対論的測地に成功 $\pm 5\text{cm}$



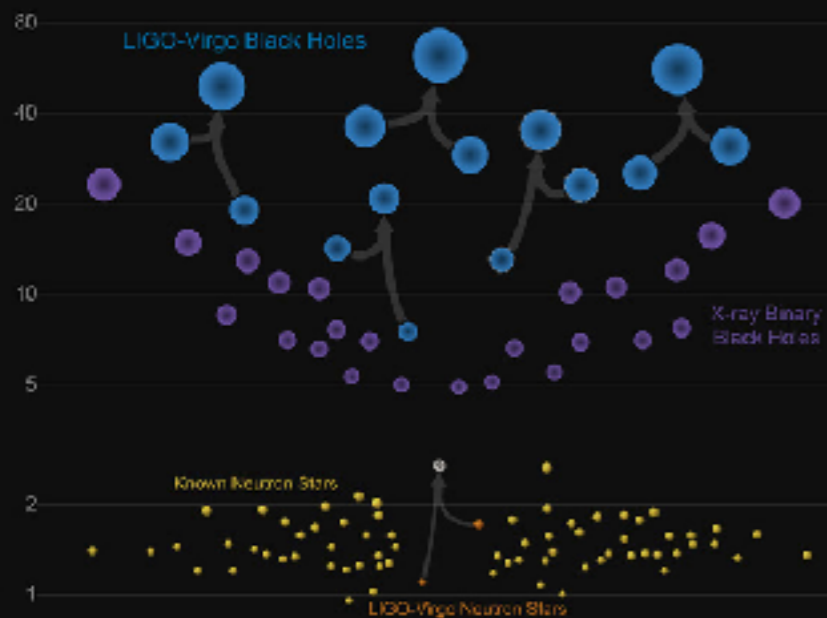
(1 cm高い $\Delta t/t = 1.1 \times 10^{-18}$)

1. Introduction : 重力波観測 List of GW events

GW event ↕	Detection time (UTC) ↕	Date published ↕	Location area ^[n 1] (deg ²) ↕	Luminosity distance (Mpc) ^[n 2] ↕	Energy radiated (c ² M _⊙) ^[n 3] ↕	Chirp mass (M _⊙) ^[n 4] ↕	Primary		Secondary		Remnant		Notes ↕	
							Type ↕	Mass (M _⊙) ↕	Type ↕	Mass (M _⊙) ↕	Type ↕	Mass (M _⊙) ↕		Spin ^[n 5] ↕
GW150914	2015-09-14 09:50:45	2016-02-11	600; mostly to the south	440 ⁺¹⁶⁰ ₋₁₈₀	3.0 ^{+0.6} _{-0.5}	28.2 ^{+1.8} _{-1.7}	BH ^[n 6]	35.4 ^{+5.0} _{-3.4}	BH ^[n 7]	29.8 ^{+3.3} _{-4.3}	BH	62.2 ^{+3.7} _{-3.4}	0.68 ^{+0.06} _{-0.06}	First GW detection; first BH merger observed; largest progenitor masses to date
LVT151012 (fr)	2015-10-12 09:54:43	2016-06-15	1600	1000 ⁺⁵⁰⁰ ₋₅₀₀	1.5 ^{+0.3} _{-0.4}	15.1 ^{+1.4} _{-1.1}	BH	23 ⁺¹⁸ ₋₆	BH	13 ⁺⁴ ₋₅	BH	35 ⁺¹⁴ ₋₄	0.66 ^{+0.09} _{-0.10}	Not significant enough to confirm (~13% chance of being noise)
GW151226	2015-12-26 03:38:53	2016-06-15	850	440 ⁺¹⁸⁰ ₋₁₉₀	1.0 ^{+0.1} _{-0.2}	8.9 ^{+0.3} _{-0.3}	BH	14.2 ^{+8.3} _{-3.7}	BH	7.5 ^{+2.3} _{-2.3}	BH	20.8 ^{+6.1} _{-1.7}	0.74 ^{+0.06} _{-0.06}	
GW170104	2017-01-04 10:11:58	2017-06-01	1200	880 ⁺⁴⁵⁰ ₋₃₉₀	2.0 ^{+0.6} _{-0.7}	21.1 ^{+2.4} _{-2.7}	BH	31.2 ^{+8.4} _{-8.0}	BH	19.4 ^{+5.9} _{-5.9}	BH	48.7 ^{+5.7} _{-4.6}	0.64 ^{+0.09} _{-0.20}	Farthest confirmed event to date
GW170608	2017-06-08 02:01:16	2017-11-16	520; to the north	340 ⁺¹⁴⁰ ₋₁₄₀	0.85 ^{+0.07} _{-0.17}	7.9 ^{+0.2} _{-0.2}	BH	12 ⁺⁷ ₋₂	BH	7 ⁺² ₋₂	BH	18.0 ^{+4.8} _{-0.9}	0.69 ^{+0.04} _{-0.05}	Smallest BH progenitor masses to date
GW170814	2017-08-14 10:30:43	2017-09-27	60; towards Eridanus	540 ⁺¹³⁰ ₋₂₁₀	2.7 ^{+0.4} _{-0.3}	24.1 ^{+1.4} _{-1.1}	BH	30.5 ^{+5.7} _{-3.0}	BH	25.3 ^{+2.8} _{-4.2}	BH	53.2 ^{+3.2} _{-2.5}	0.70 ^{+0.07} _{-0.05}	First detection by three observatories; first measurement of polarization
GW170817	2017-08-17 12:41:04	2017-10-16	28; NGC 4993	40 ⁺⁸ ₋₁₄	> 0.025	1.188 ^{+0.004} _{-0.002}	NS	1.36 - 1.60 ^[n 8]	NS	1.17 - 1.36 ^[n 9]	BH ^[n 10]	< 2.74 ^{+0.04} _{-0.01} ^[n 11]		First NS merger observed in GW; first detection of EM counterpart (GRB 170817A; AT 2017gfo); nearest event to date

Masses in the Stellar Graveyard

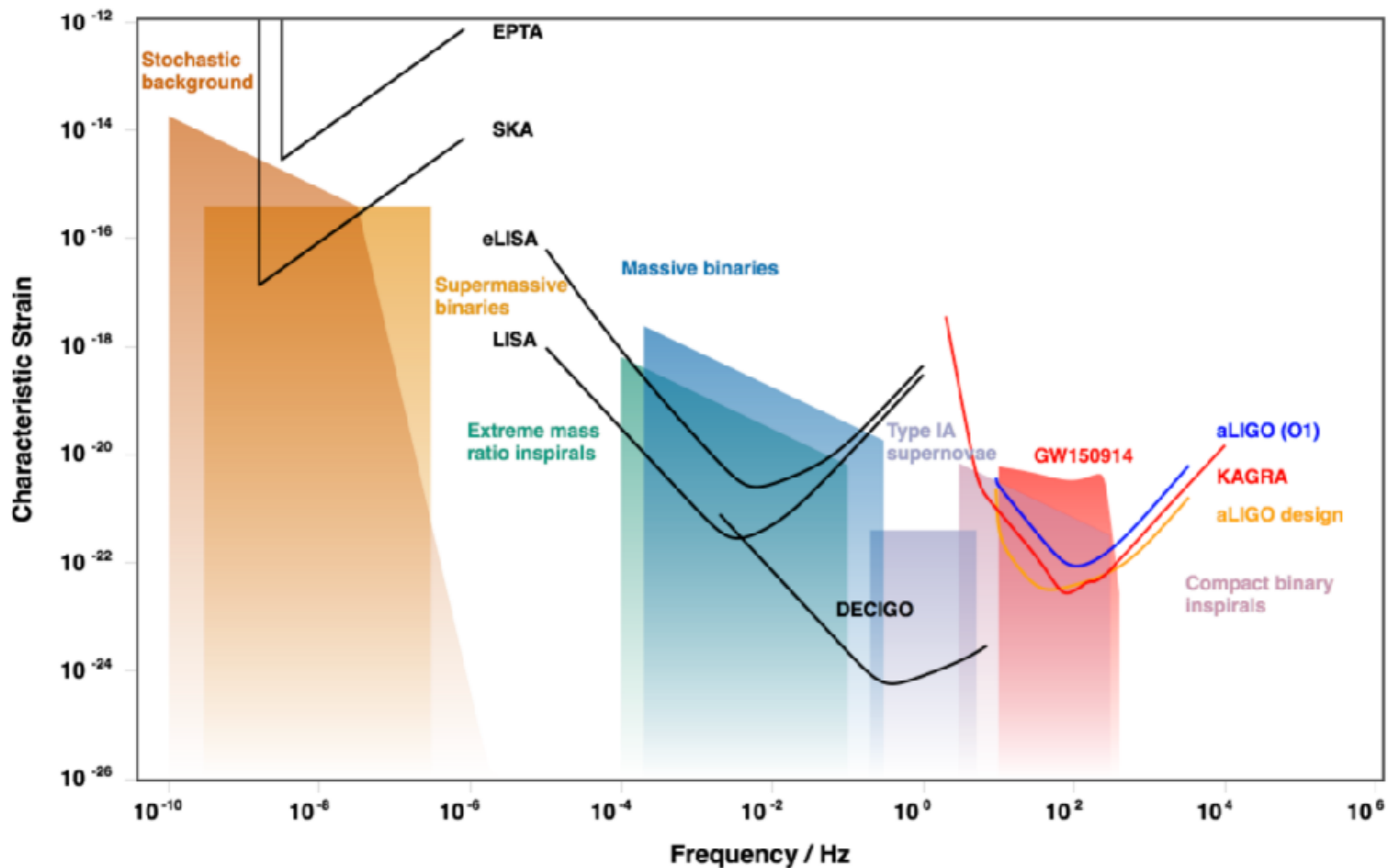
in Solar Masses



https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_gravitational_wave_observations
<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20171016a>

1. Introduction : 重力波観測

Gravitational Wave Detectors and Sources



$\lambda = 1 \text{ pc}$

2000 AU

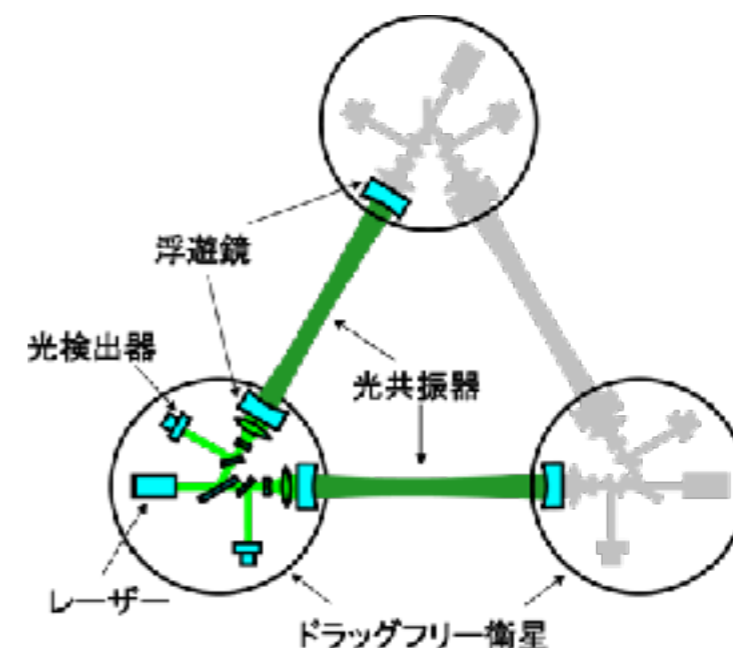
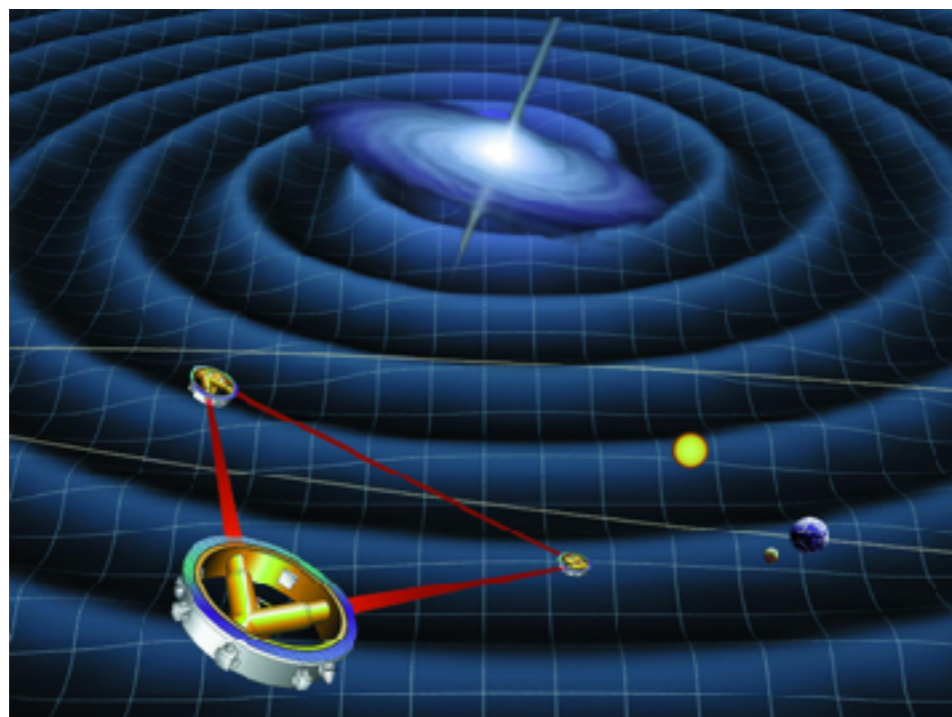
20 AU

0.2 AU

3000 km

1. Introduction : 重力波観測 宇宙空間での重力波観測計画

LISA (ESA/NASA)	B-DECIGO ⇒ DECIGO (日本)
Laser Interferometer Space Anntena	Deci-hertz Interferometer GW Observatory
mHz帯	0.1Hz帯
2030年打ち上げ予定	申請提案中
地球-太陽のL4に3機	地球周回軌道 2000km に3機 ⇒ 太陽周回
250万km	100 km ⇒ 1000 km
加速度noiseに強み	
光トランスポンダ	Fabry-Perot 干渉計
	Shot-noiseに強み
drag-free flight	drag-free flight
Doppler tracking with Laser beam	地上干渉計と同じ



2. Cassini土星探査機のドップラー追跡精度

Cassini 2001-2002 (Armstrong, LRR 2006)



Cassini(1997-2017)

Armstrong et al. ApJ, 599, 806 (2003)

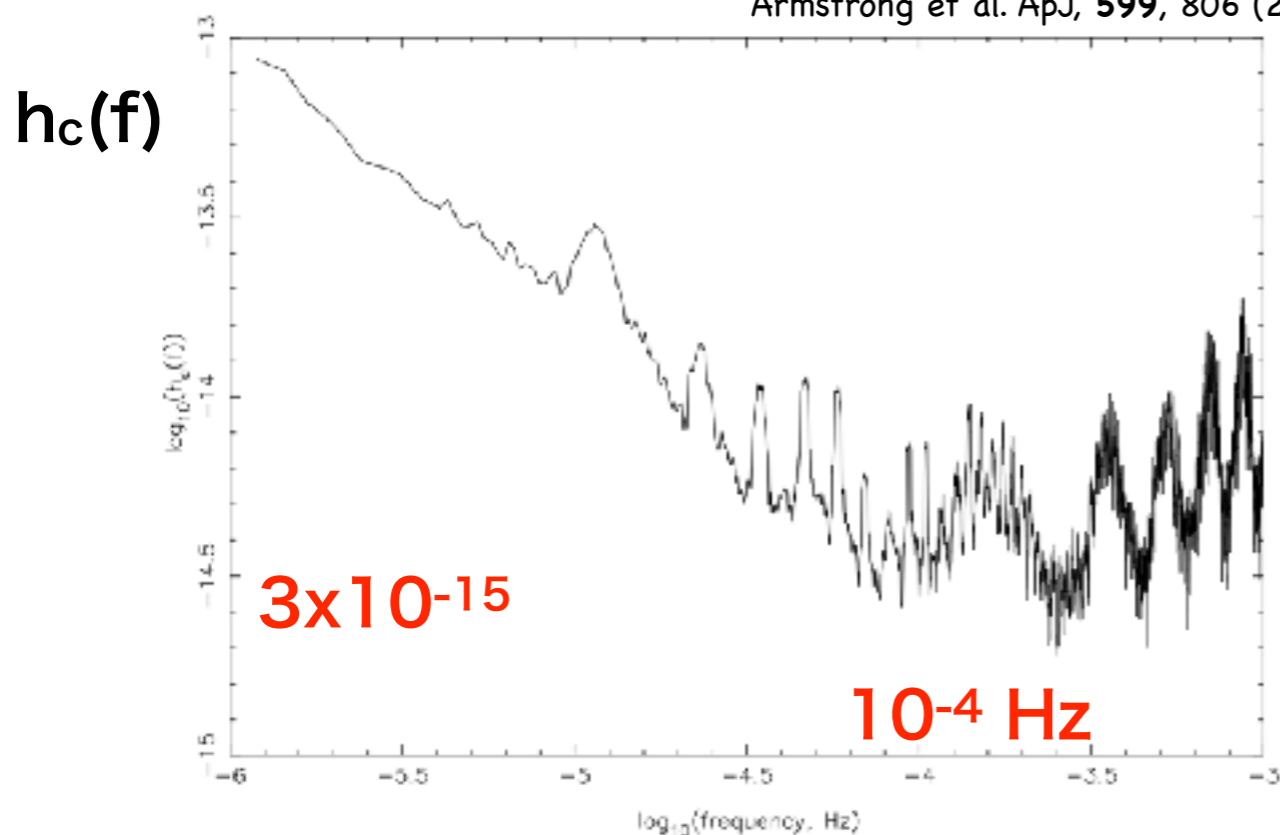
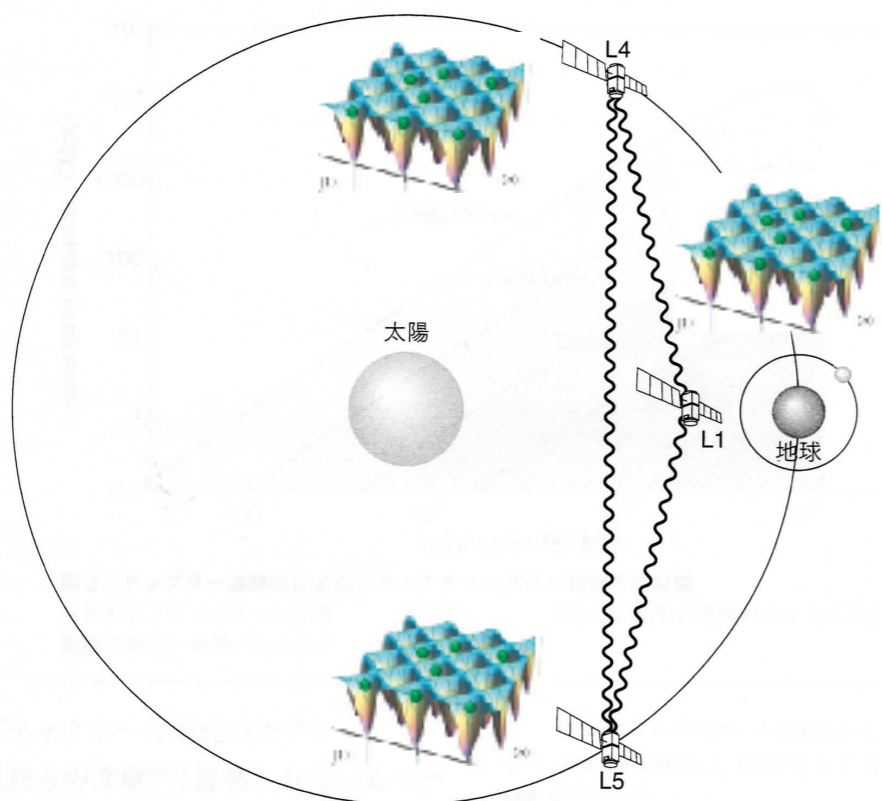


Table 4: Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

Noise source	Comment (σ_y at $\tau = 1000$ s)	Required improvement	
Frequency standard	currently FTS + distribution $\simeq 8 \times 10^{-16}$	$\simeq 8X$	原子時計の精度
Ground electronics	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	地球対流圏の影響
Tropospheric scintillation	currently $\simeq 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 10X$	プラズマの影響
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\simeq 10^{-16}$	$\simeq 1X$	太陽光輻射圧の影響
Spacecraft motion	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$	衛星制御
Antenna mechanical	currently $\simeq 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 20X$	

2. Cassini土星探査機のドップラー追跡精度 精度向上の提案（1）



▶ 3機の衛星間で光格子時計を比較する

要 小型化

電波で通信する場合

惑星間プラズマによる位相変化の影響を補正するために、
2つの周波数帯域を用いる (double tracking)

▶ 光で通信する場合

プラズマの影響が無視できる

要 要素技術開発

1.5億kmの基線長 ▶ 10^{-5} Hz

Table 4: Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

Noise source	Comment (σ_y at $\tau = 1000$ s)	Required improvement
Frequency standard	currently FTS + distribution $\simeq 8 \times 10^{-16}$	$\simeq 8X$
Ground electronics	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$
Tropospheric scintillation	currently $\simeq 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 10X$
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\simeq 10^{-16}$	$\simeq 1X$
Spacecraft motion	currently $\simeq 2 \times 10^{-16}$	$\simeq 2X$
Antenna mechanical	currently $\simeq 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\simeq 20X$

原子時計の精度

▶ 光格子時計

地球対流圏の影響

▶ 宇宙空間へ

宇宙プラズマの影響

▶ 光通信

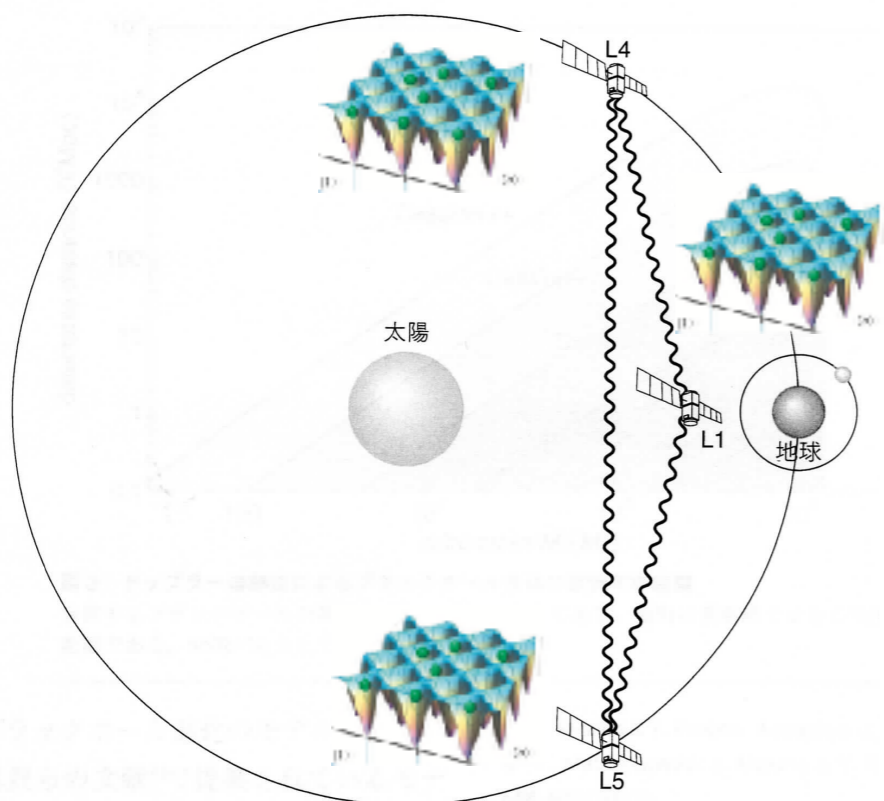
太陽光輻射圧の影響

▶ 日傘型独立

衛星制御

太陽電池

2. Cassini土星探査機のドップラー追跡精度 精度向上の提案 (2)



1.5億kmの基線長 ▶ 10^{-5} Hz

太陽光輻射圧 $F=P/c$

$P=1.3 \text{ kW/m}^2$

1000 kg, 10 m^2

生じる加速度

$a=5 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$

$\Delta P/P \cong 1/1000$

$\Delta a/a \cong 10^{-11}$

▶ 日傘型独立

$\Delta g/g \cong 10^{-12}$

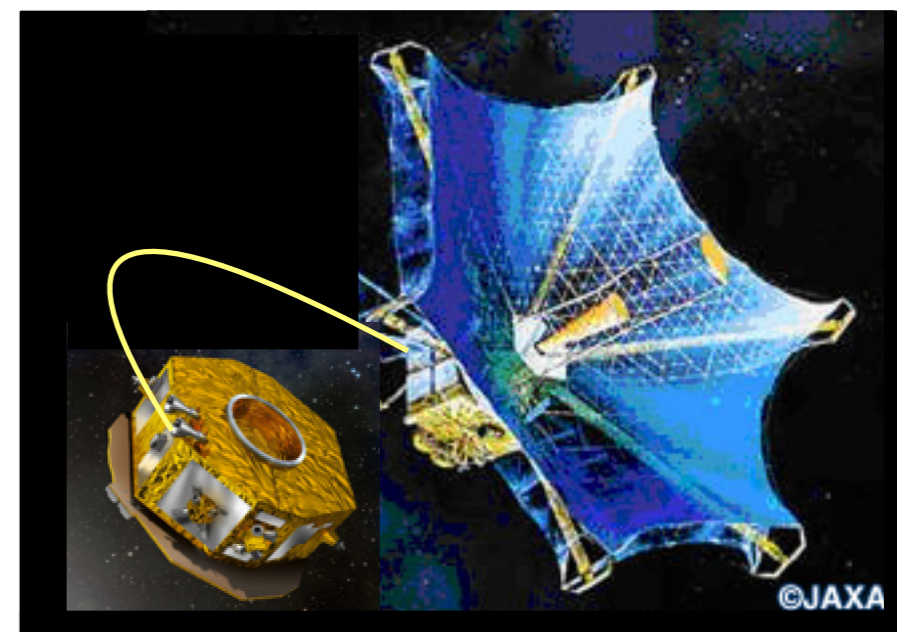
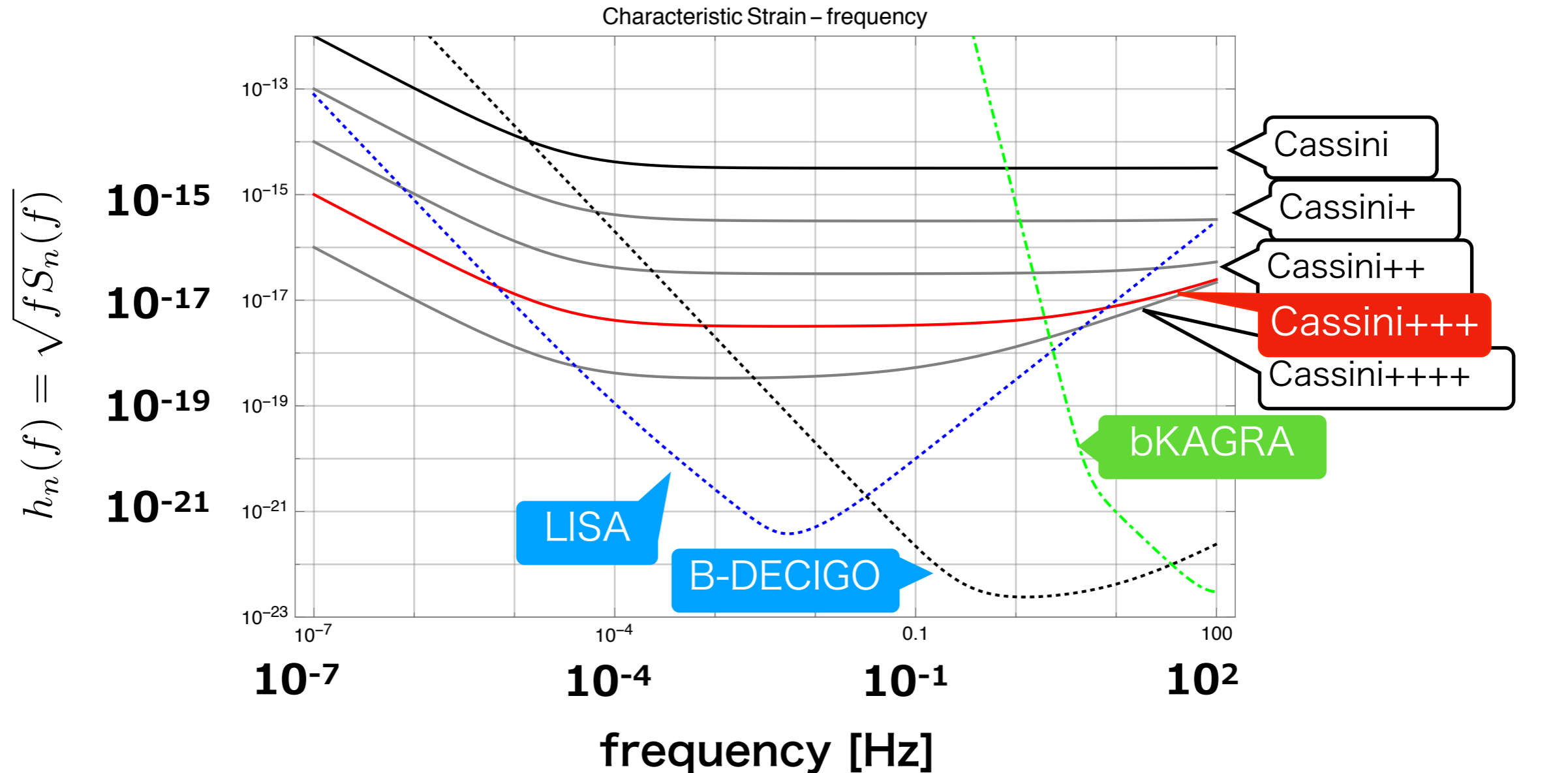


Table 4: Required improvement in subsystems to improve overall Doppler sensitivity by a factor of 10 relative to Cassini-era performance.

Noise source	Comment (σ_y at $\tau = 1000 \text{ s}$)	Required improvement	
Frequency standard	currently FTS + distribution $\cong 8 \times 10^{-16}$	$\cong 8X$	原子時計の精度 ▶ 光格子時計
Ground electronics	currently $\cong 2 \times 10^{-16}$	$\cong 2X$	地球対流圏の影響 ▶ 宇宙空間へ
Tropospheric scintillation	currently $\cong 10^{-15}$ under favorable conditions	$\cong 10X$	プラズマの影響
Plasma scintillation	Cassini-class radio system probably adequate for calibration to $\cong 10^{-16}$	$\cong 1X$	
Spacecraft motion	currently $\cong 2 \times 10^{-16}$	$\cong 2X$	太陽光輻射圧の影響 ▶ 日傘型独立
Antenna mechanical	currently $\cong 2 \times 10^{-15}$ under favorable conditions	$\cong 20X$	衛星制御 ▶ 太陽電池

2. Cassini土星探査機のドップラー追跡精度 精度向上の提案（3）

現行の技術で、Cassiniより3桁程度は上げられる！



← 感度下限値 f^{-1}
衛星制御擾乱

→ 感度下限値 $f^{2/3} + 10^{-18}$
光格子時計測定限界

3. 光格子時計を用いた重力波観測：(Kolkowitz+の論文)

PHYSICAL REVIEW D 94, 124043 (2016)

Gravitational wave detection with optical lattice atomic clocks

S. Kolkowitz,^{1,4} I. Pikovski,^{2,3} N. Langellier,² M. D. Lukin,^{2,4} R. L. Walsworth,^{2,4} and J. Ye^{1,4}

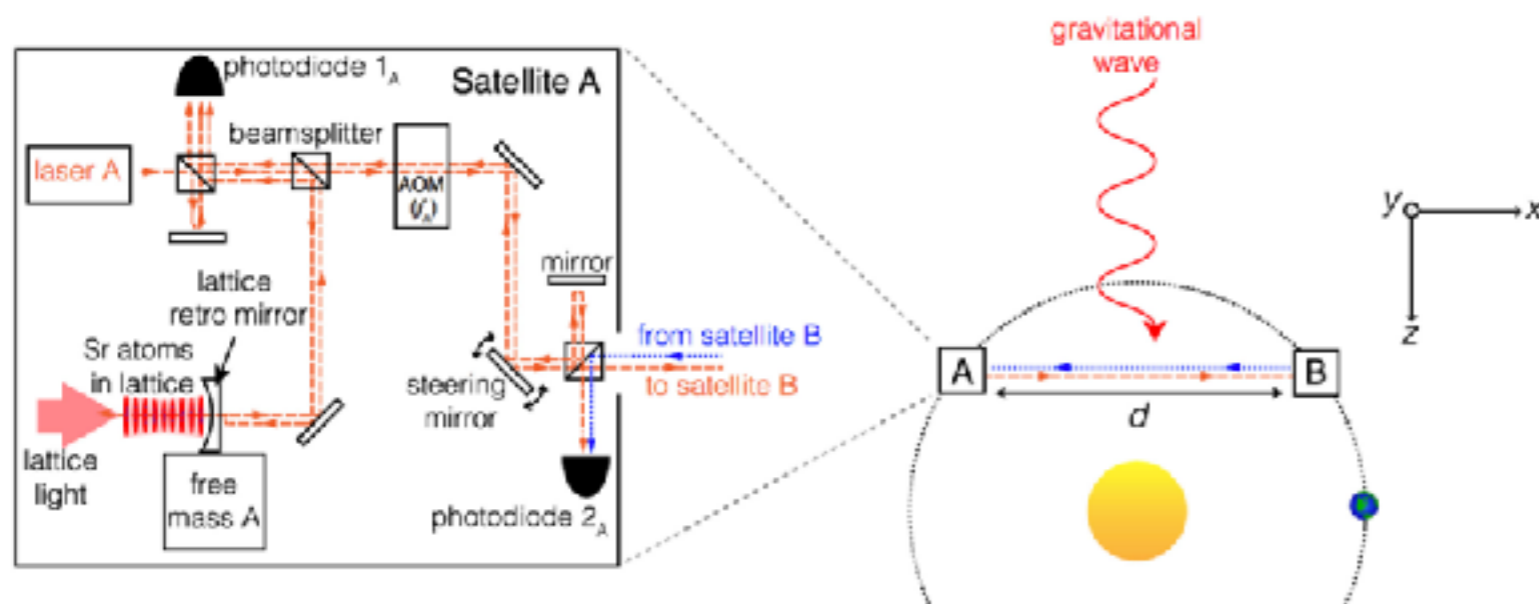
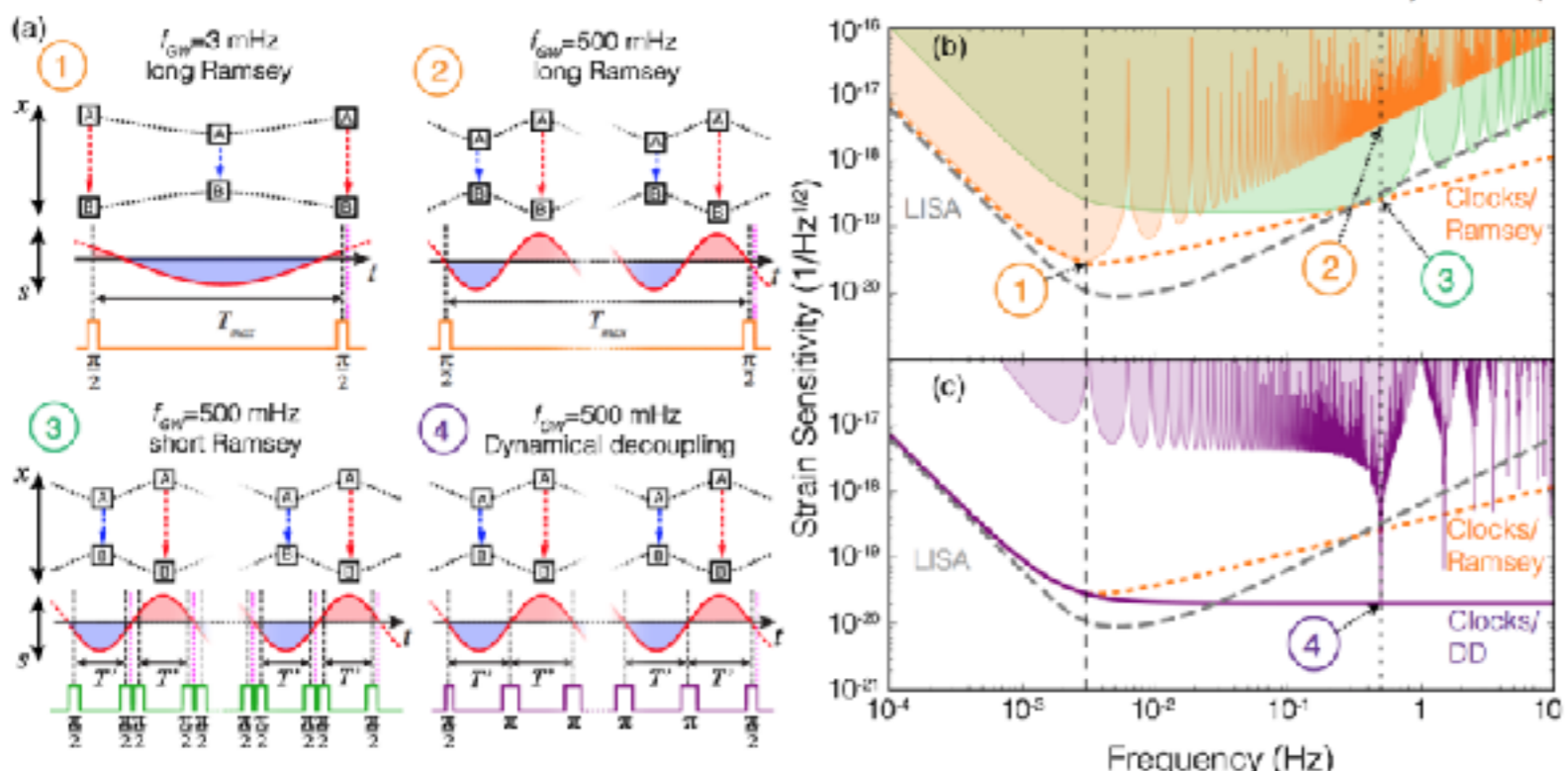


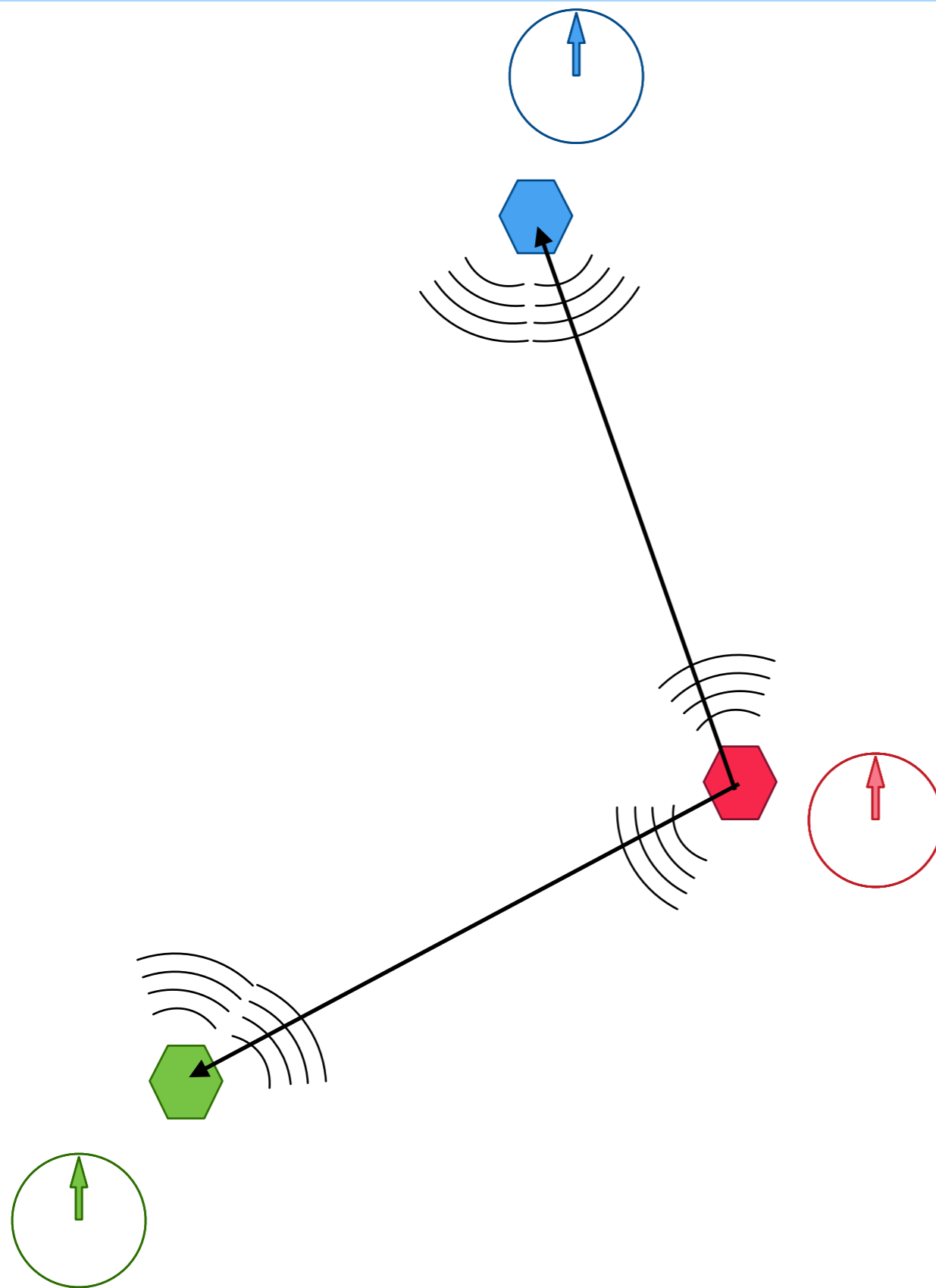
表1

Kolkowitz +
PRD94(2016)124043
3 mHz or 30 mHz -10 Hz
5000万km or 500万km
レーザーリンク 2機
光格子時計で周波数比較
drag-free flight
Doppler shift with Laser beam



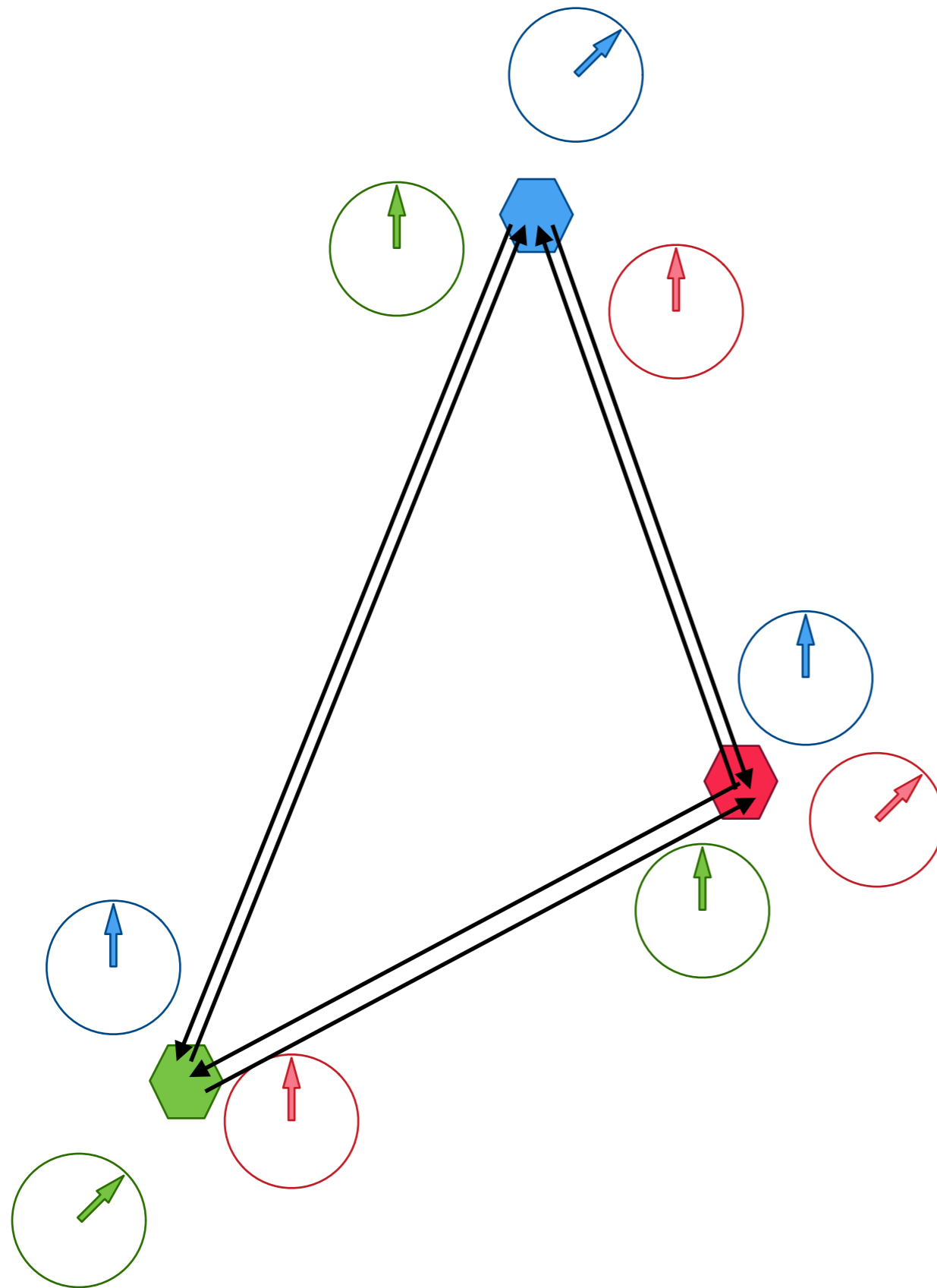
この他の光格子時計に言及した提案
 Loeb, Maoz, 1501.00996
 Vutha, New J. Phys. 17, 063030

3. 光格子時計を用いた重力波観測：検出原理



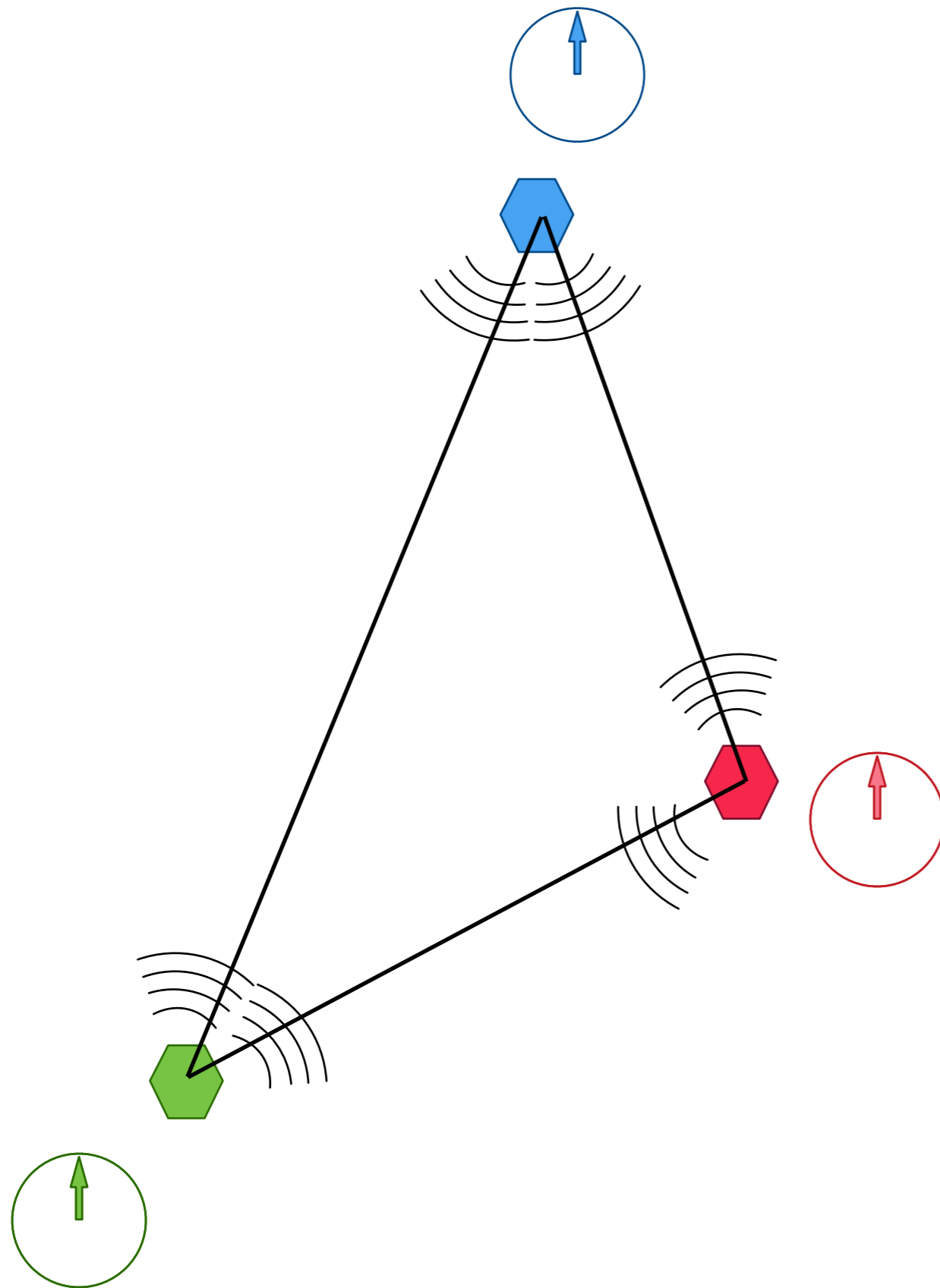
1. それぞれの衛星が正確な時計をもち、時刻を互いに向けて発信する。
2. 各衛星は、相手の信号を受信し、
方向・距離・移動速度
を知り、我々は全体配置を把握

3. 光格子時計を用いた重力波観測：検出原理



1. それぞれの衛星が正確な時計をもち、時刻を互いに向けて発信する。
2. 各衛星は、相手の信号を受信し、
方向・距離・移動速度
を知り、我々は全体配置を把握

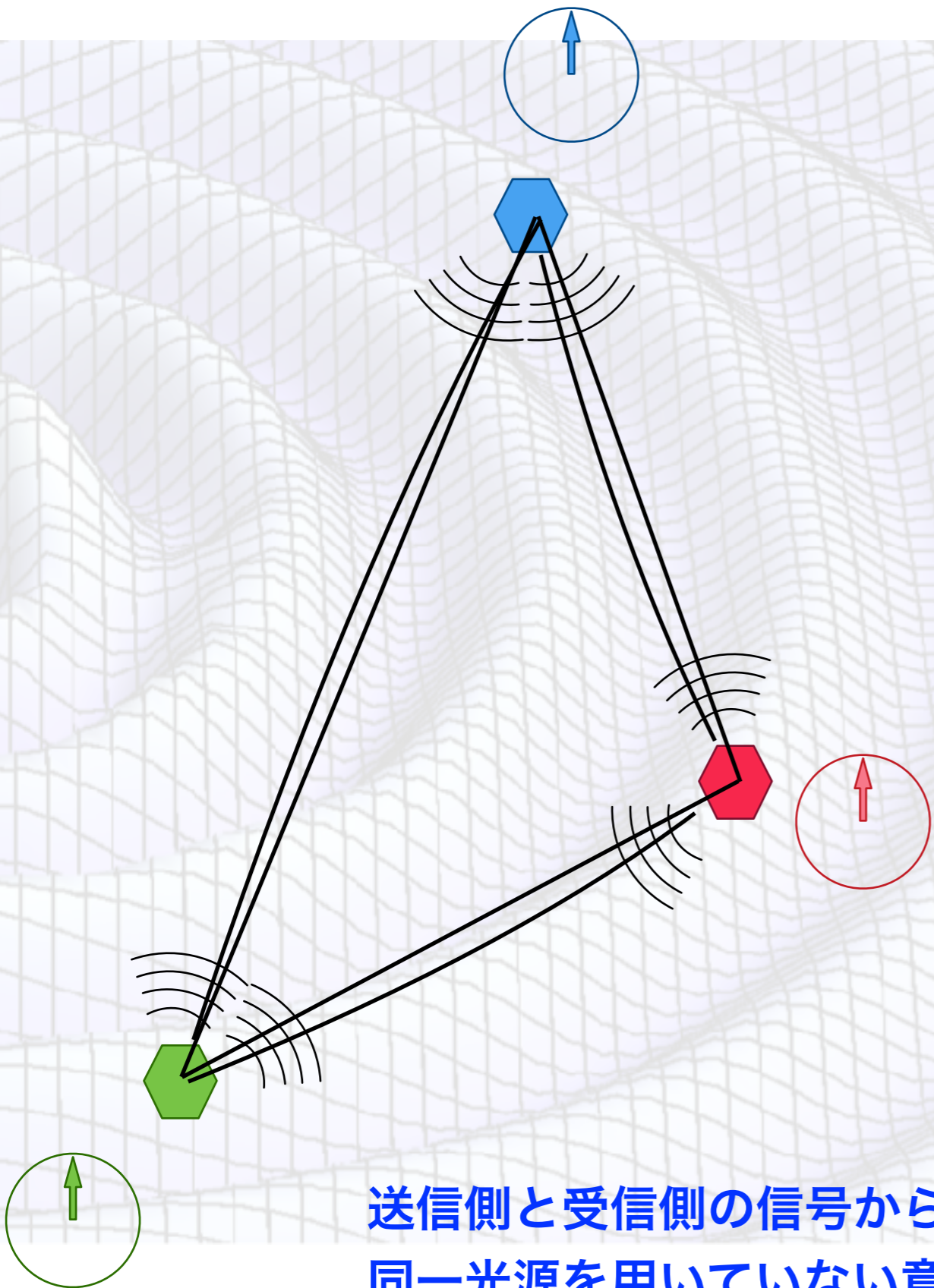
3. 光格子時計を用いた重力波観測：検出原理



1. それぞれの衛星が正確な時計をもち、時刻を互いに向けて発信する。
2. 各衛星は、相手の信号を受信し、
方向・距離・移動速度
を知り、我々は全体配置を把握

太陽ポテンシャルの影響ふくむ
惑星の影響は月・年単位

3. 光格子時計を用いた重力波観測：検出原理



送信側と受信側の信号から違いを読み取る意味では干渉効果を利用。
同一光源を用いていない意味では従来の干渉計ではない。

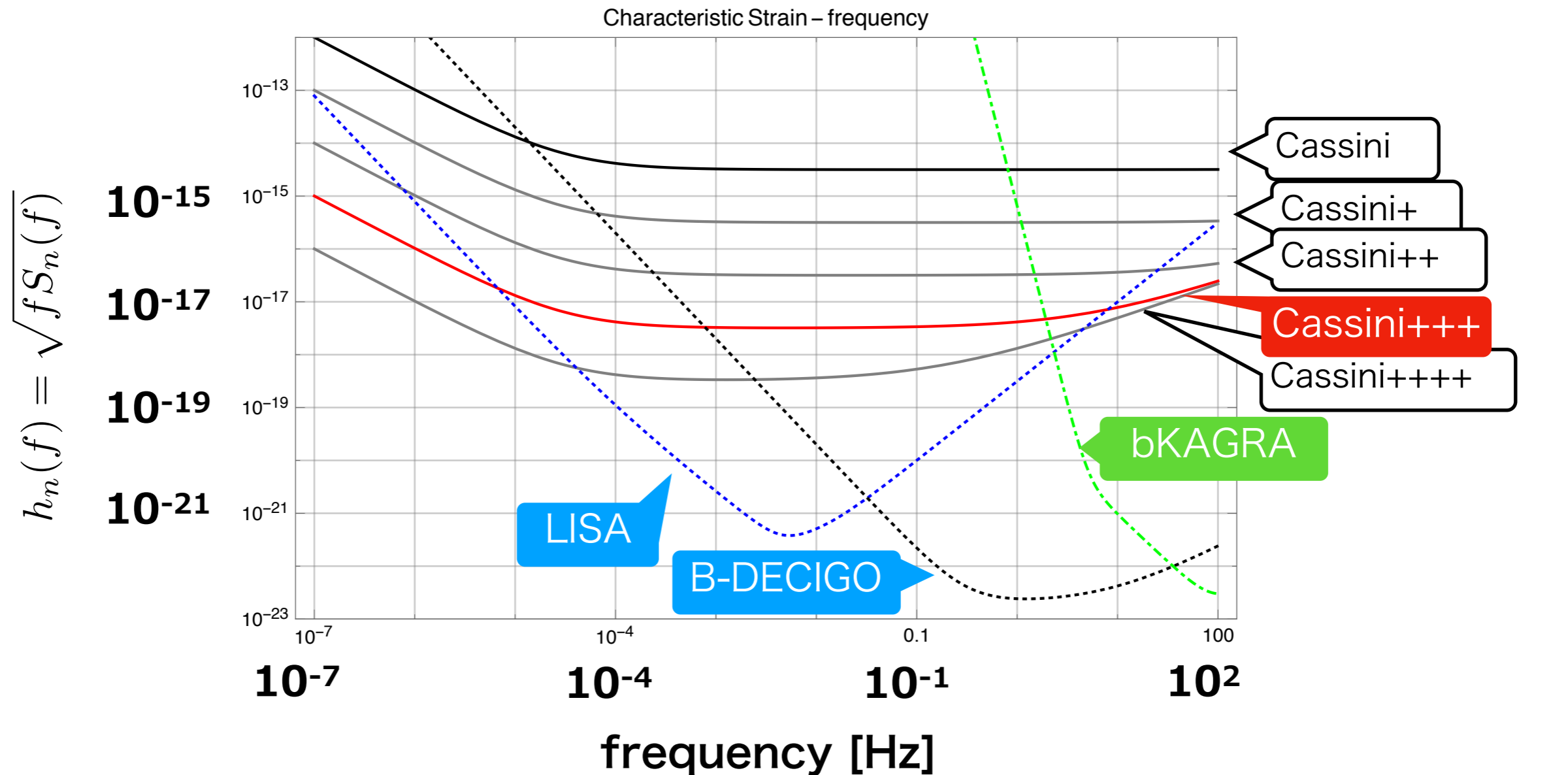
1. それぞれの衛星が正確な時計をもち、時刻を互いに向けて発信する。
2. 各衛星は、相手の信号を受信し、
方向・距離・移動速度
を知り、我々は全体配置を把握

太陽ポテンシャルの影響ふくむ
惑星の影響は月・年単位
3. 重力波が通過すると、変位が生じる。

年に数十イベントであれば、
calibration も十分できる

2. Cassini土星探査機のドップラー追跡精度 精度向上の提案（3）

現行の技術で、Cassiniより3桁程度は上げられる！

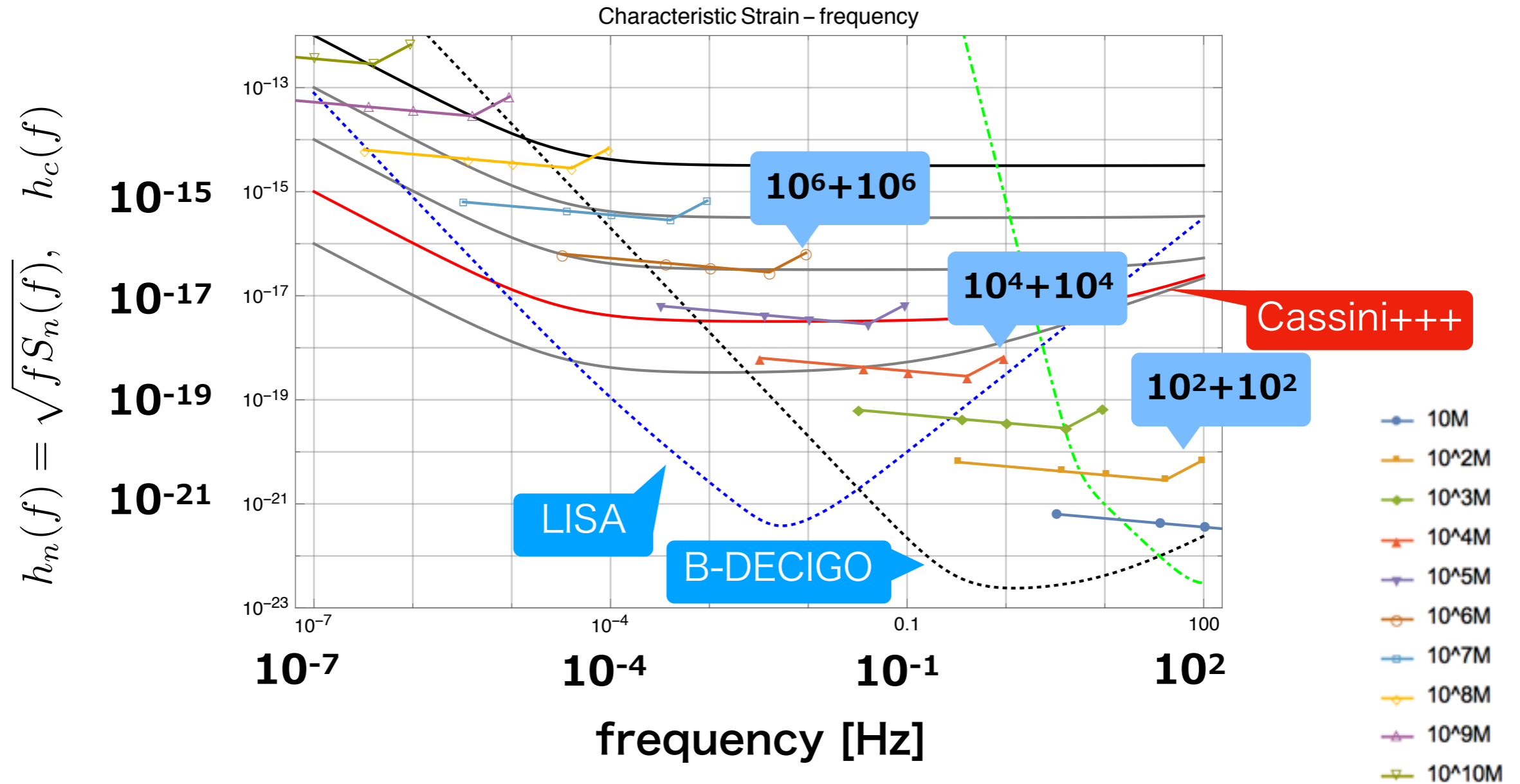


← 感度下限値 f^{-1}
衛星制御擾乱

→ 感度下限値 $f^{2/3} + 10^{-18}$
光格子時計測定限界

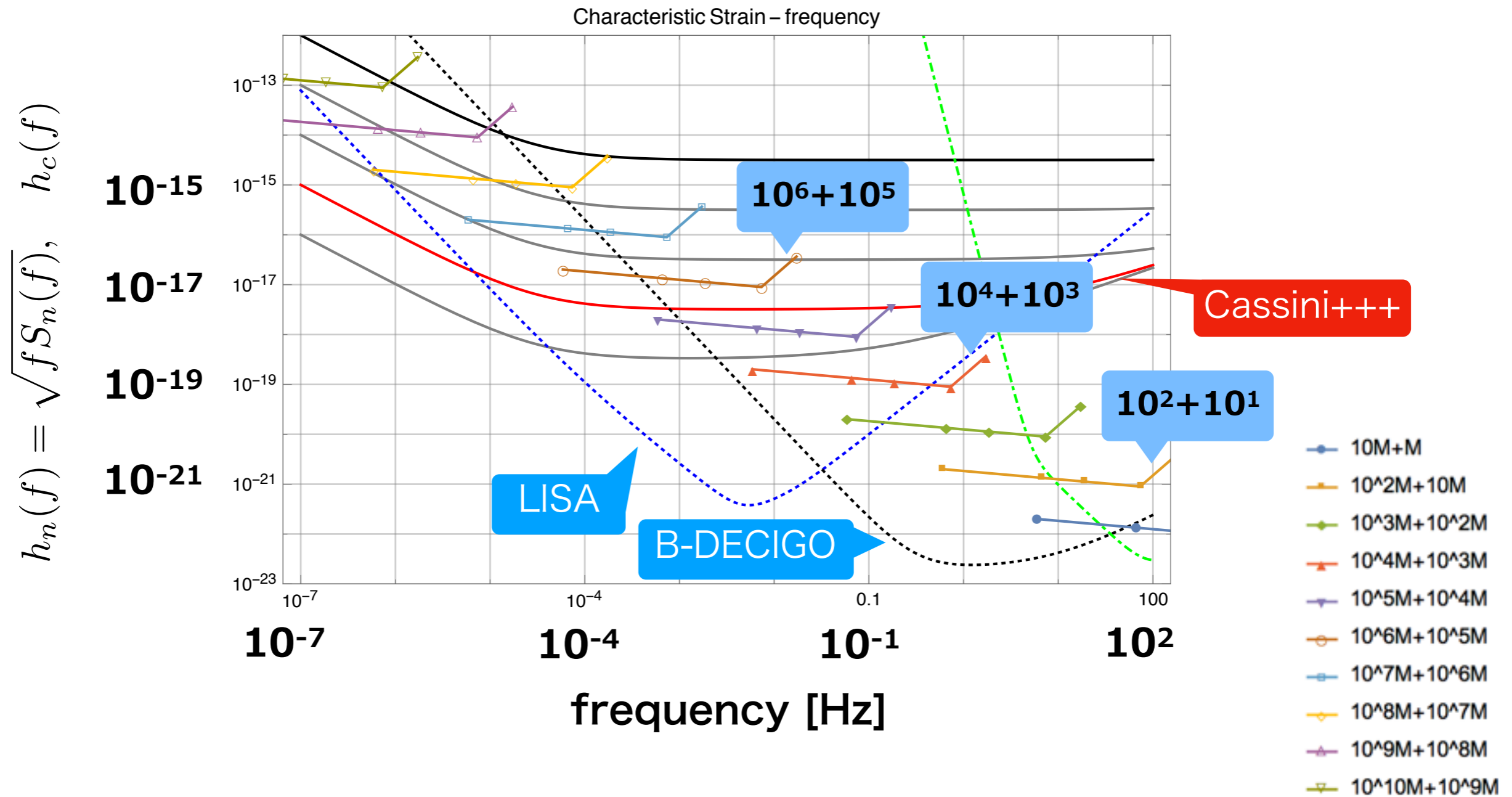
3. 光格子時計を用いた重力波観測：感度曲線+ターゲット重力波源

equal-mass Binary BH inspiral at 1 Gpc

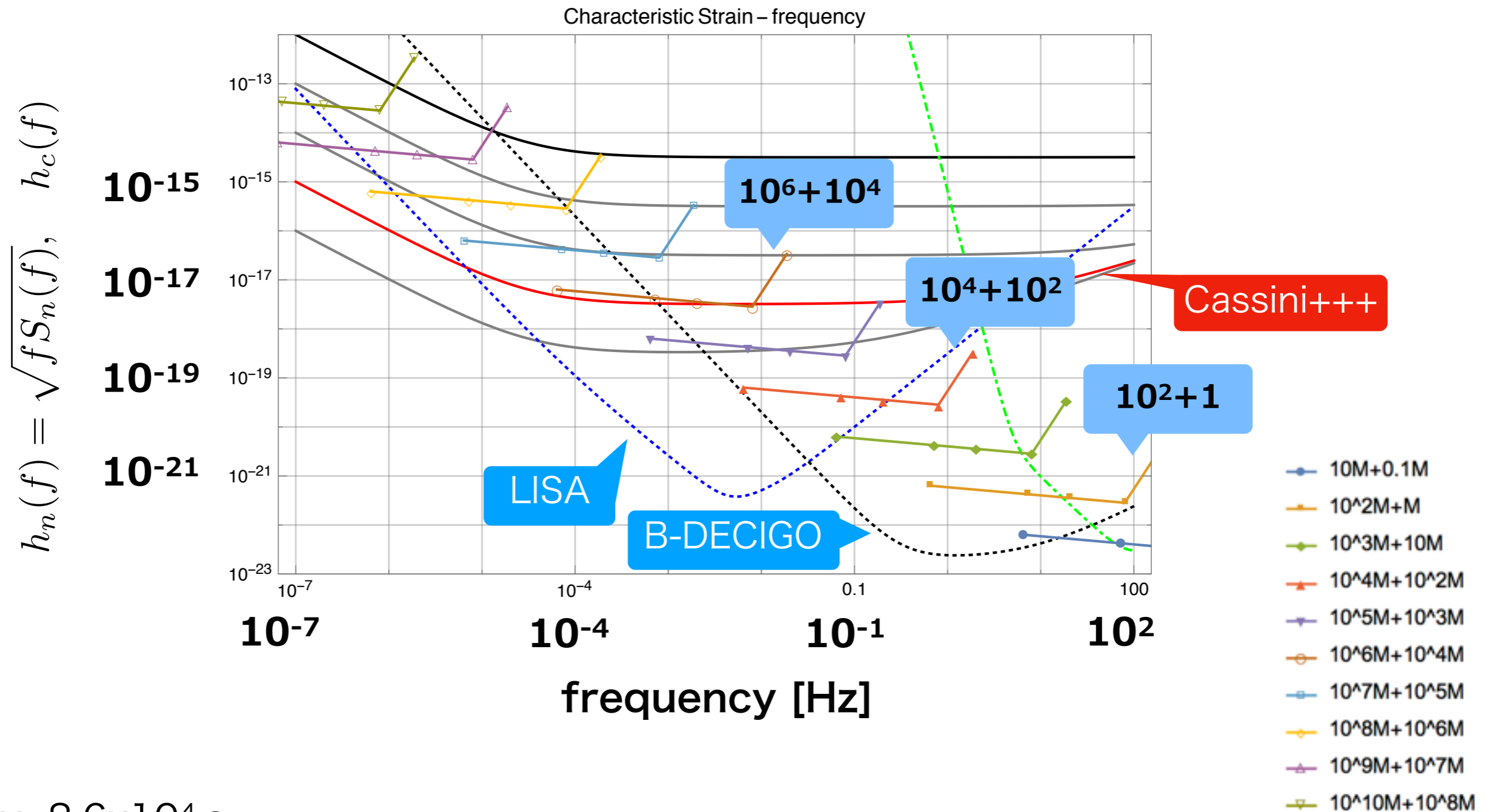


3. 光格子時計を用いた重力波観測：感度曲線+ターゲット重力波源

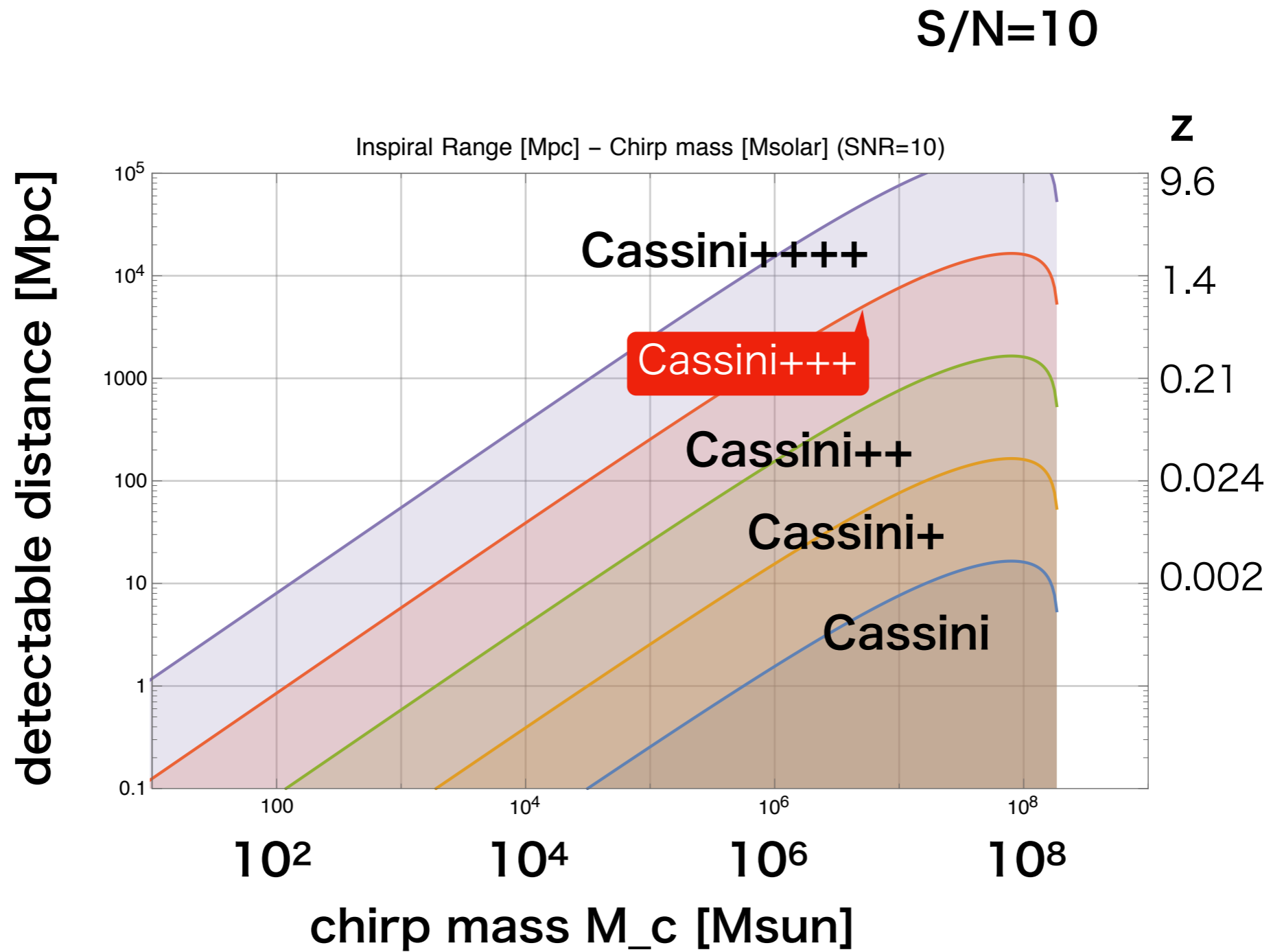
unequal-mass Binary BH inspiral at 1 Gpc 連星質量比 $q=0.1$



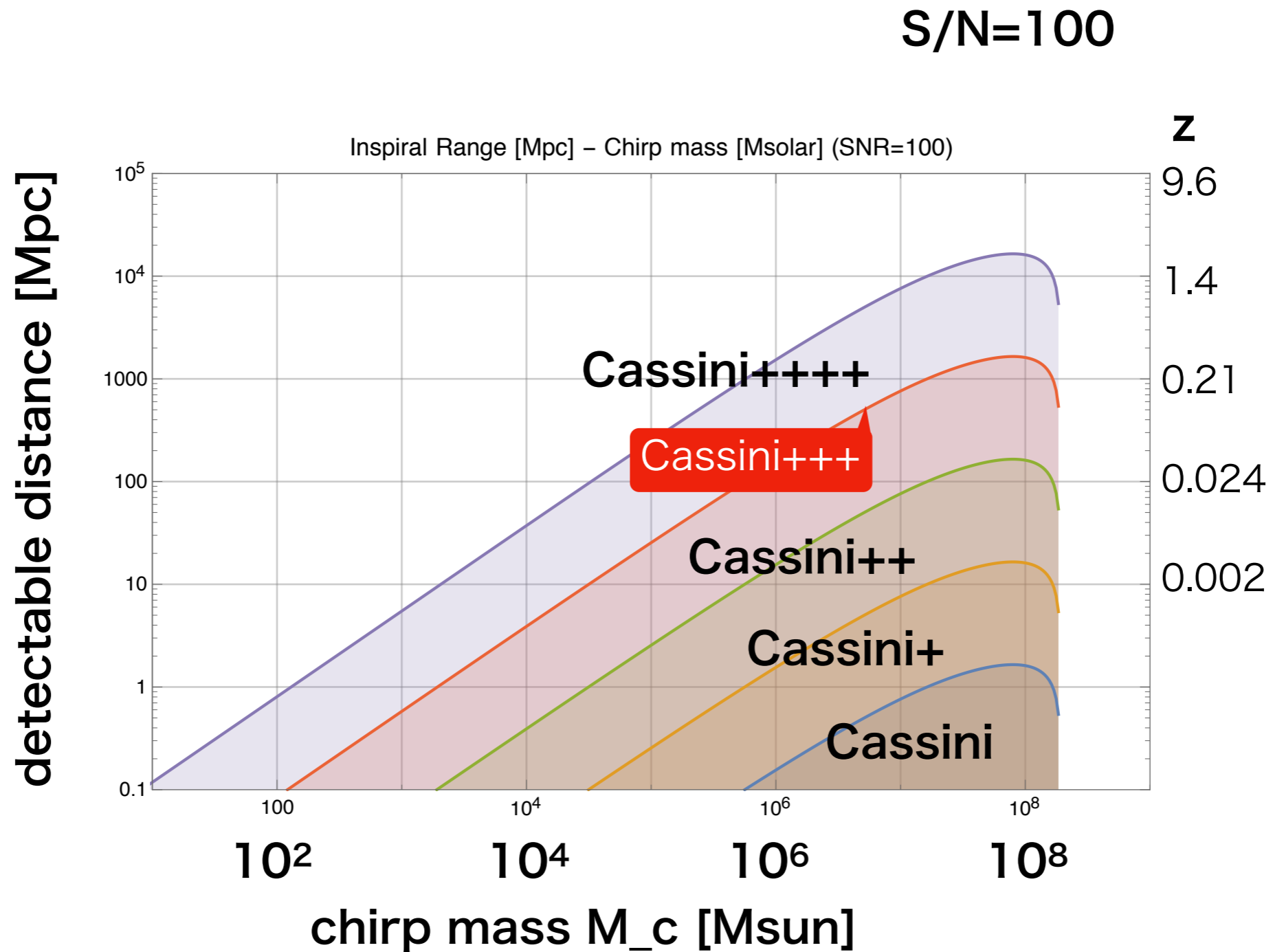
3. 光格子時計を用いた重力波観測：感度曲線+ターゲット重力波源

unequal-mass Binary BH inspiral at 1 Gpc
連星質量比 $q=0.01$ 1 day = 8.6×10^4 s1 month = 2.6×10^6 s

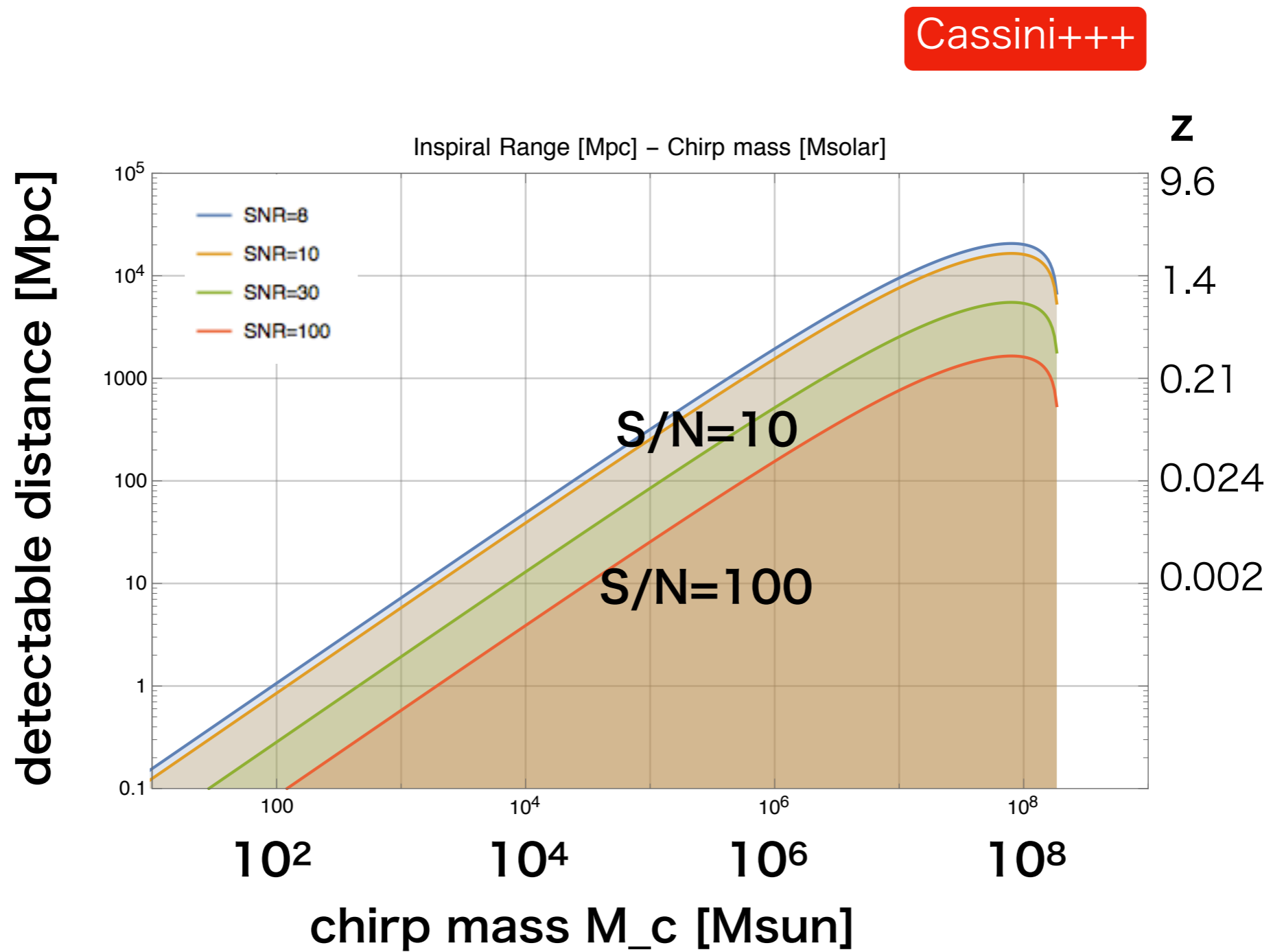
3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離



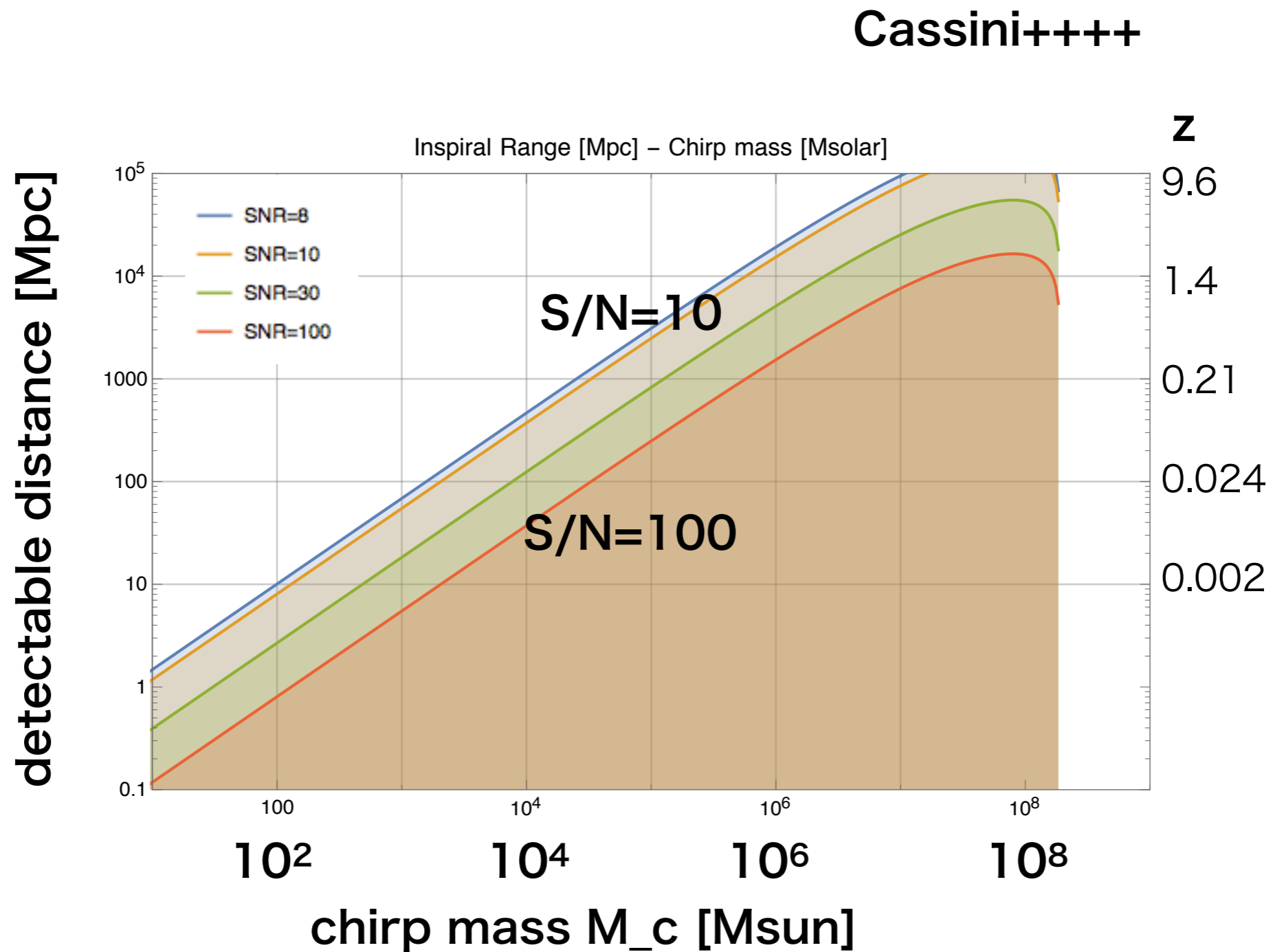
3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離



3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離



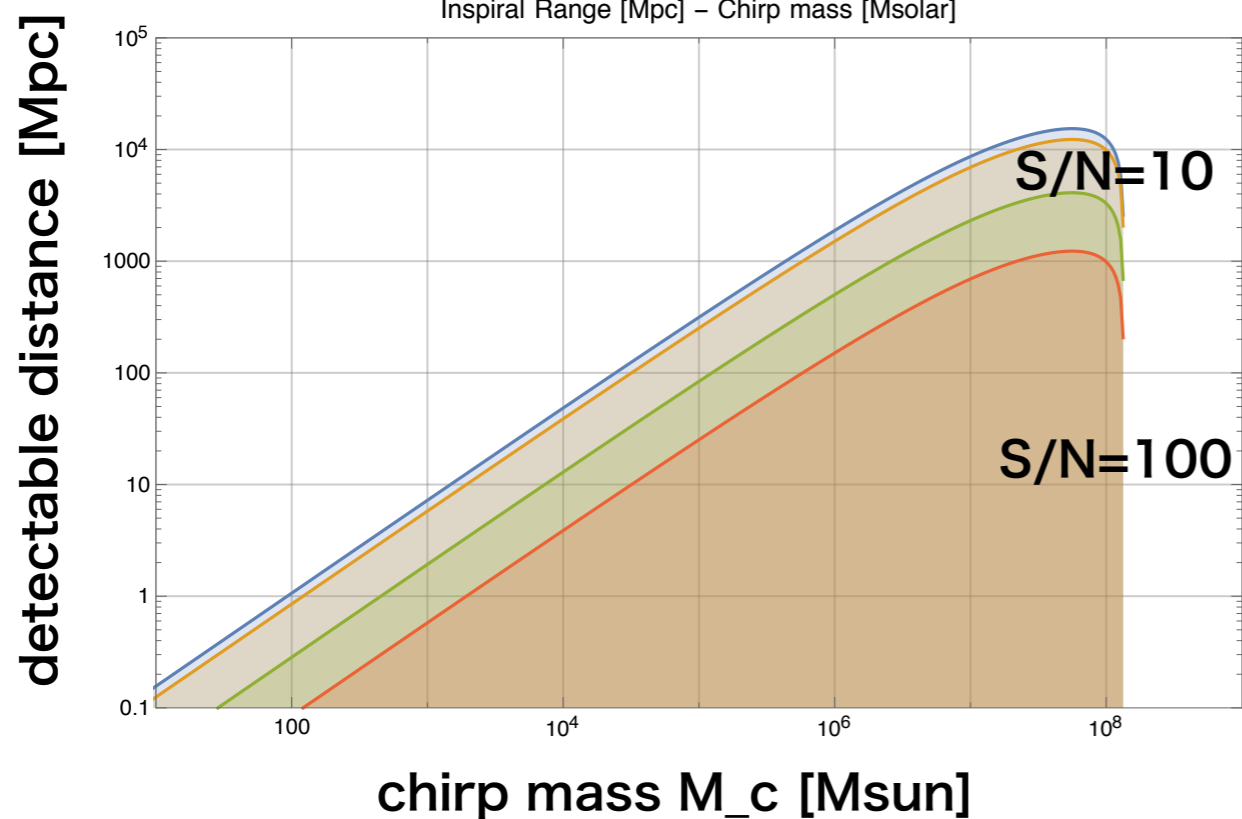
3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離



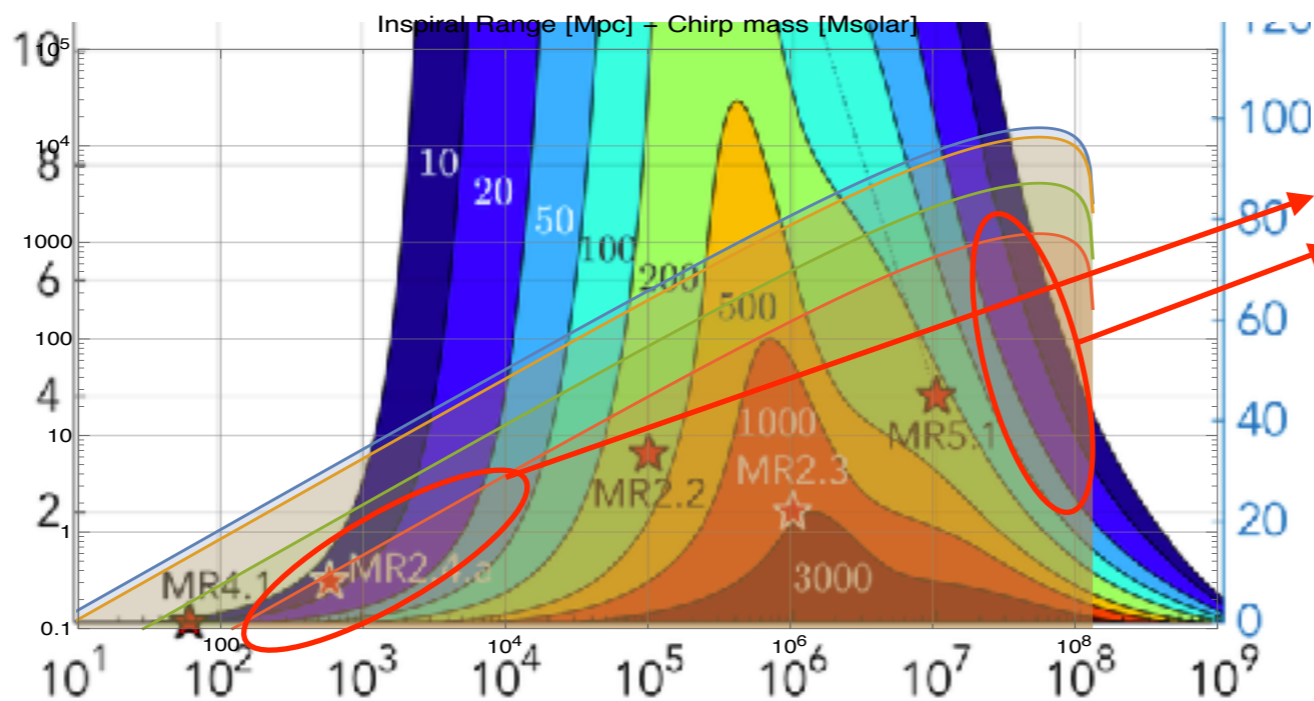
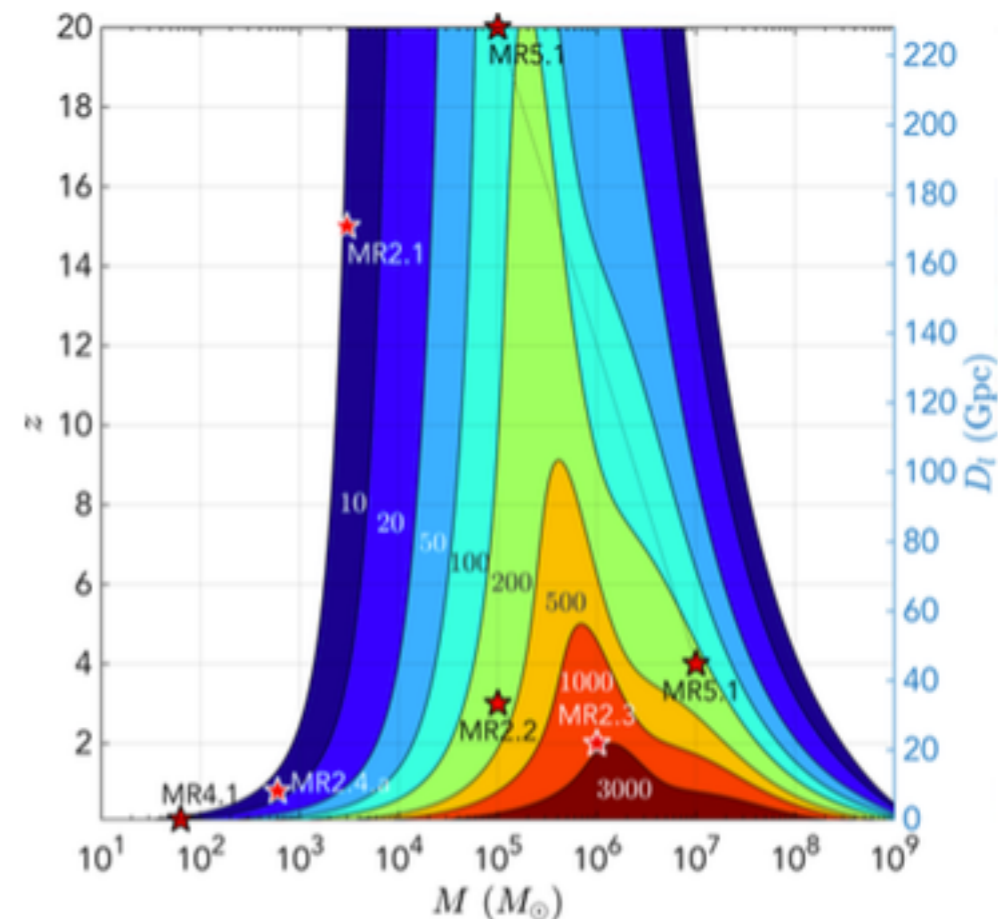
3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離 連星質量比 $q=0.2$

質量比 $q=0.2$

Cassini+++



LISA 1702.00786

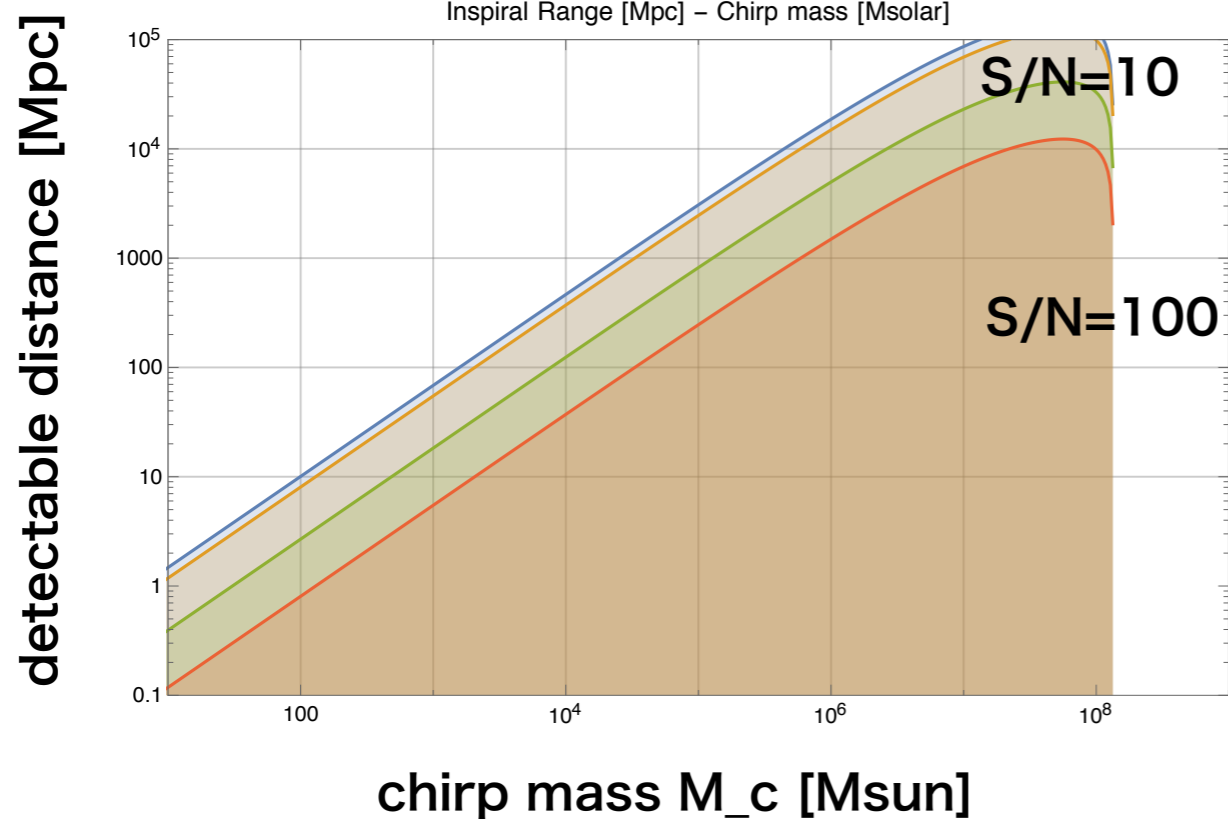


Cassini+++
の方が、LISAより感度よい

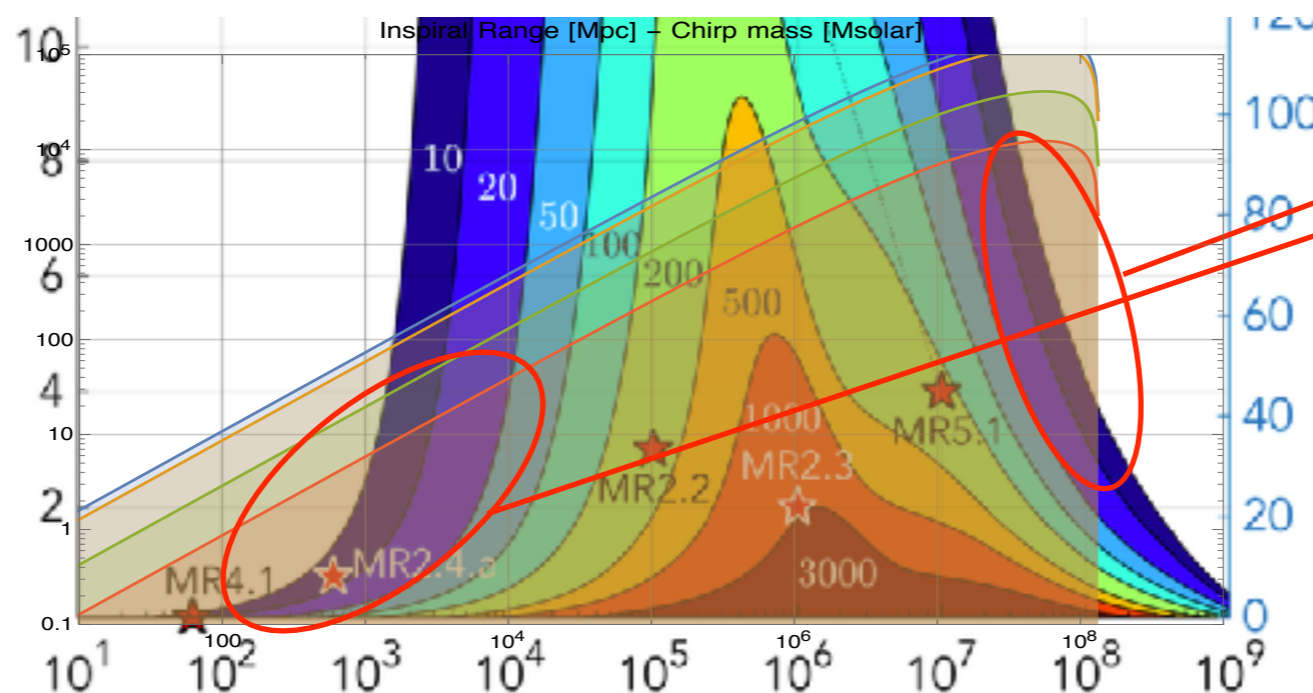
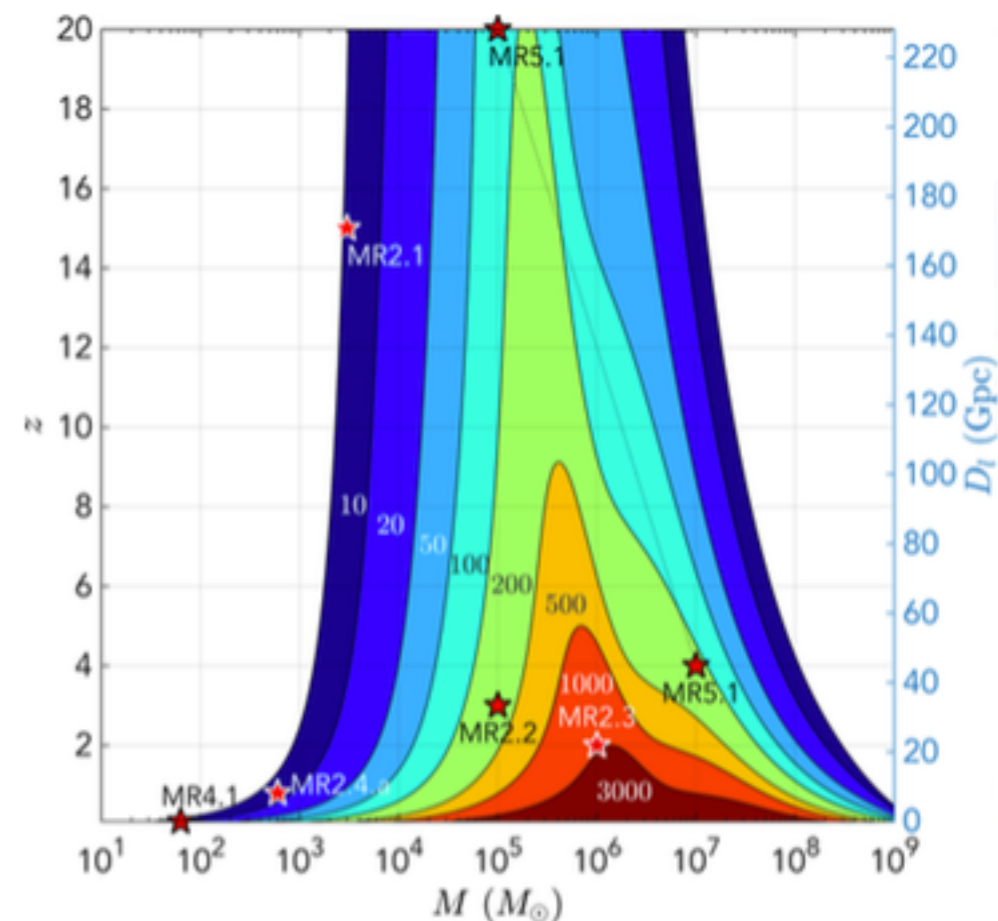
3. 光格子時計を用いた重力波観測：観測可能距離 連星質量比 $q=0.2$

質量比 $q=0.2$

Cassini++++



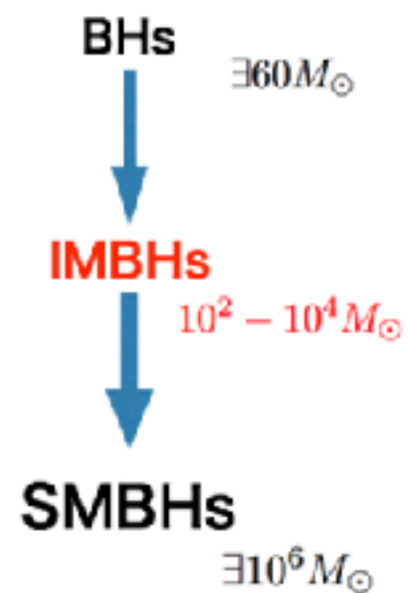
LISA 1702.00786



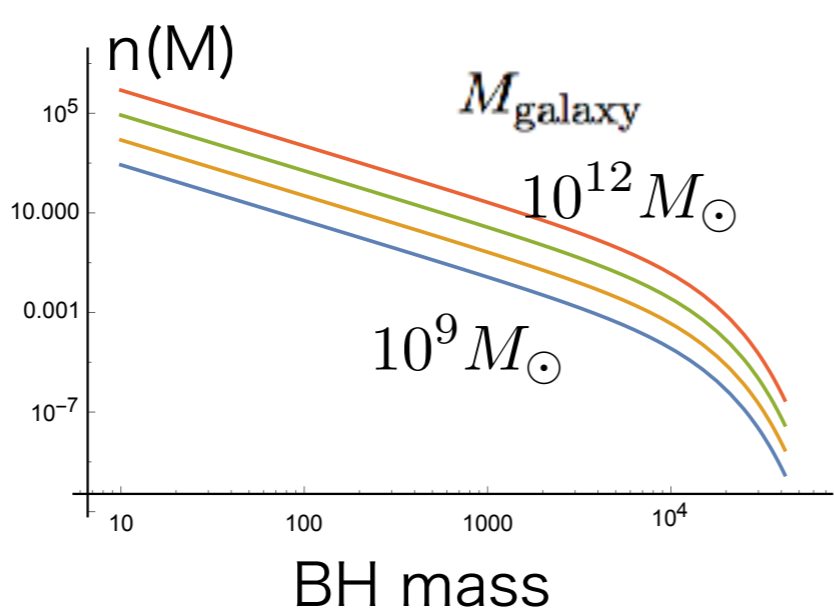
Cassini++++
の方が、LISAより感度よい

4. SMBHの形成モデル : IMBHs' hierarchical mergers

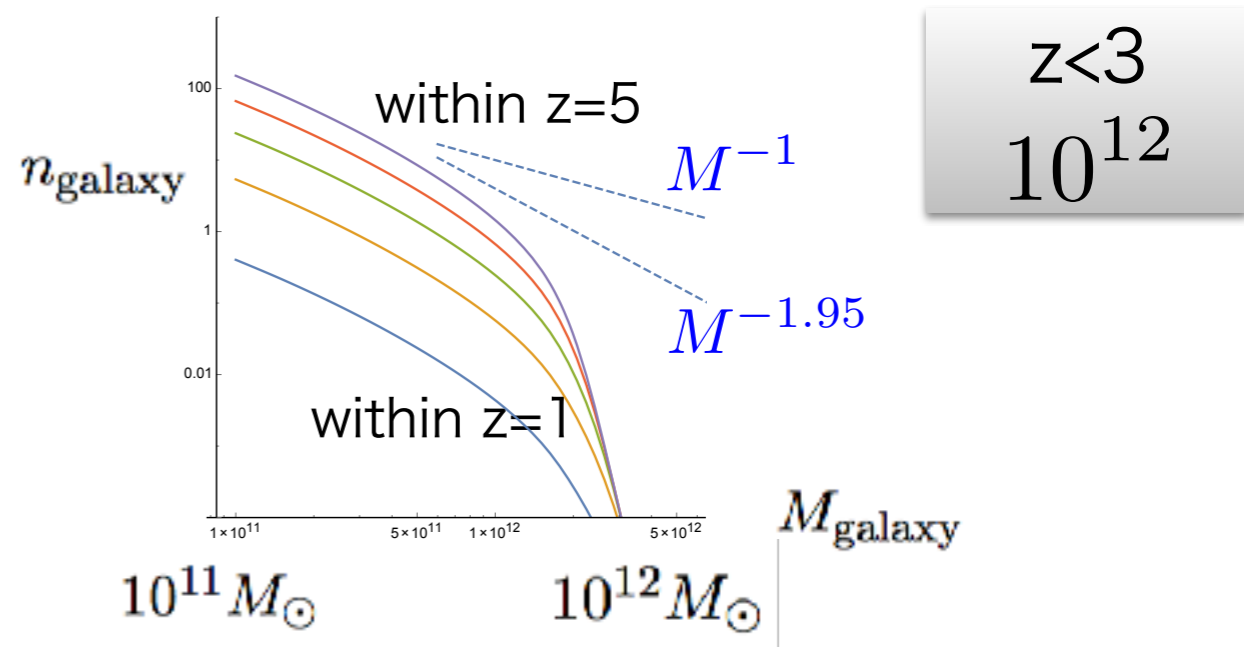
HS, Kanda, Ebisuzaki, ApJ, 835 (2017) 276 [arXiv:1610.09505]



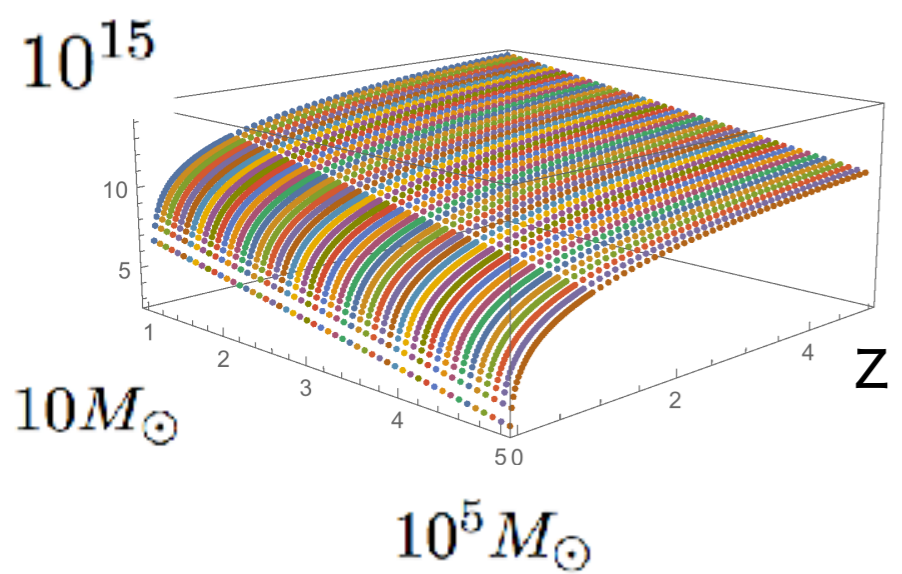
How many BHs in a Galaxy?



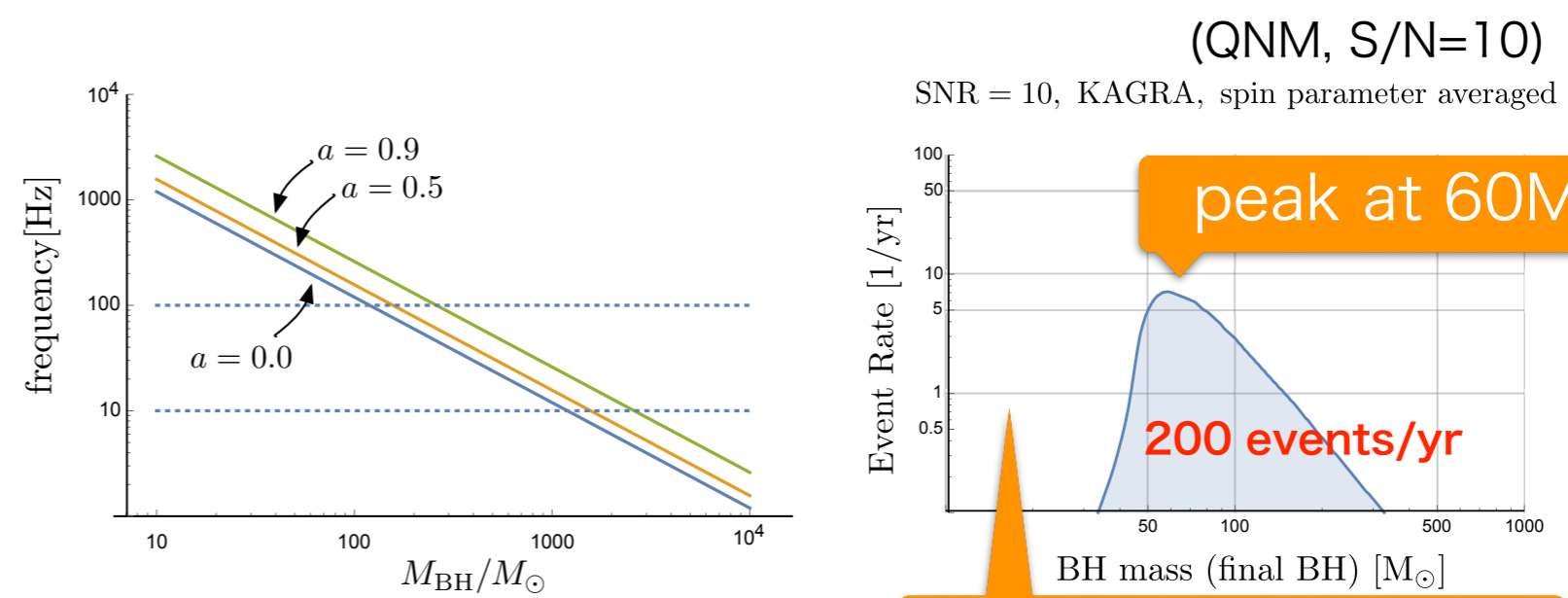
How many Galaxies in the Universe?



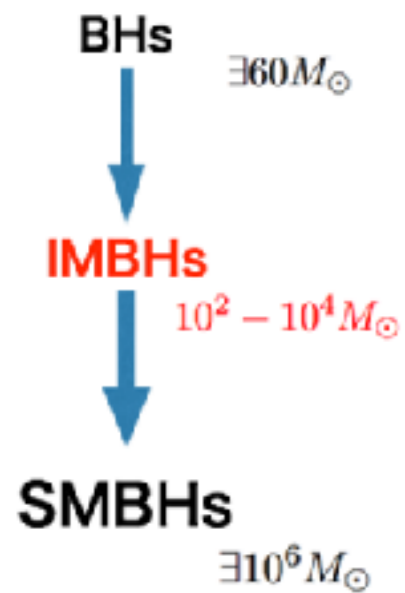
How many BH mergers in the Universe?



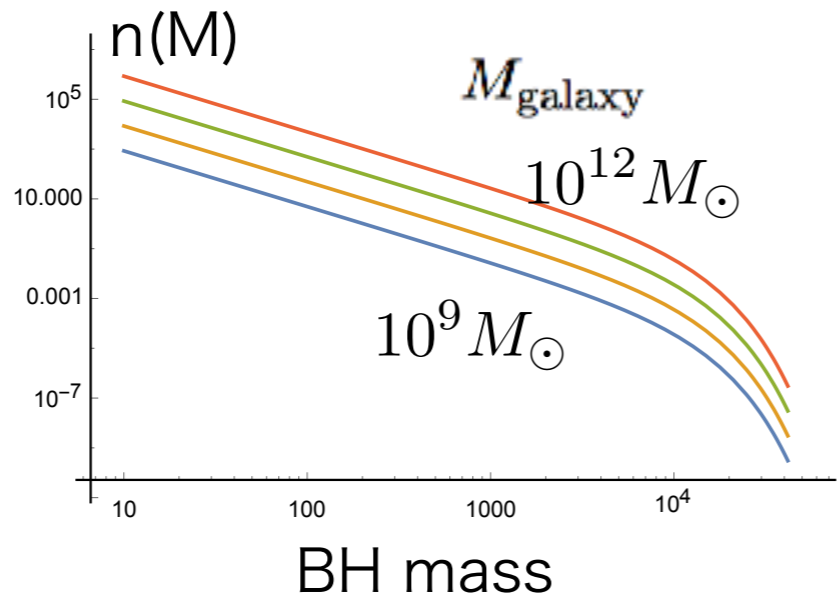
Event Rates at bKAGRA



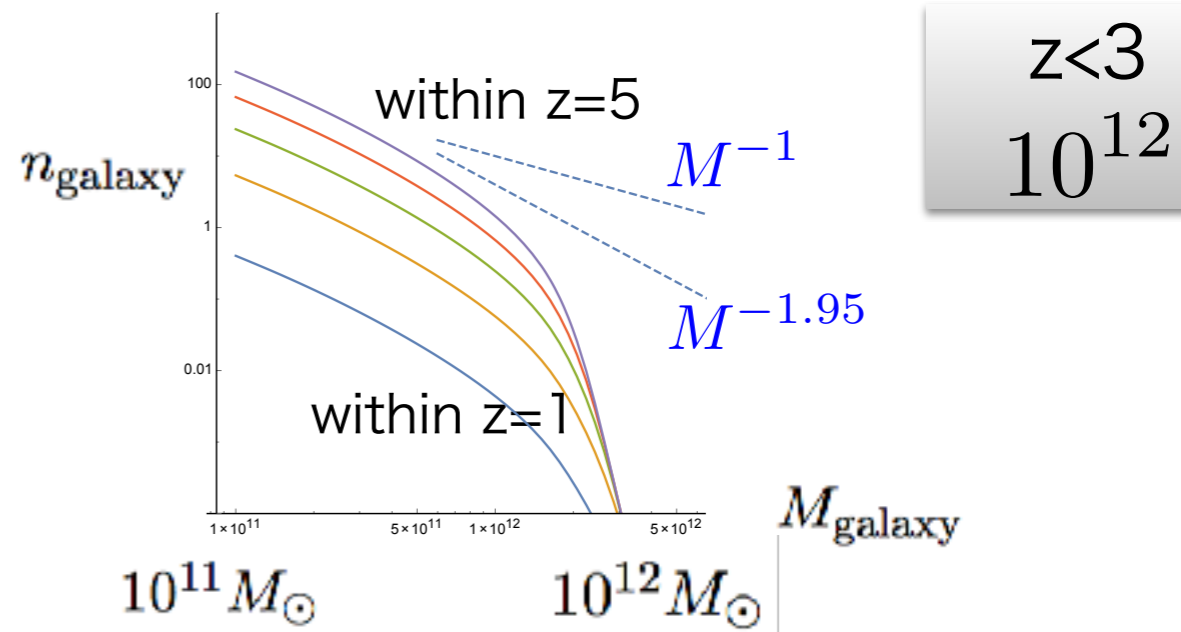
4. SMBHの形成モデル : IMBHs' hierarchical mergers



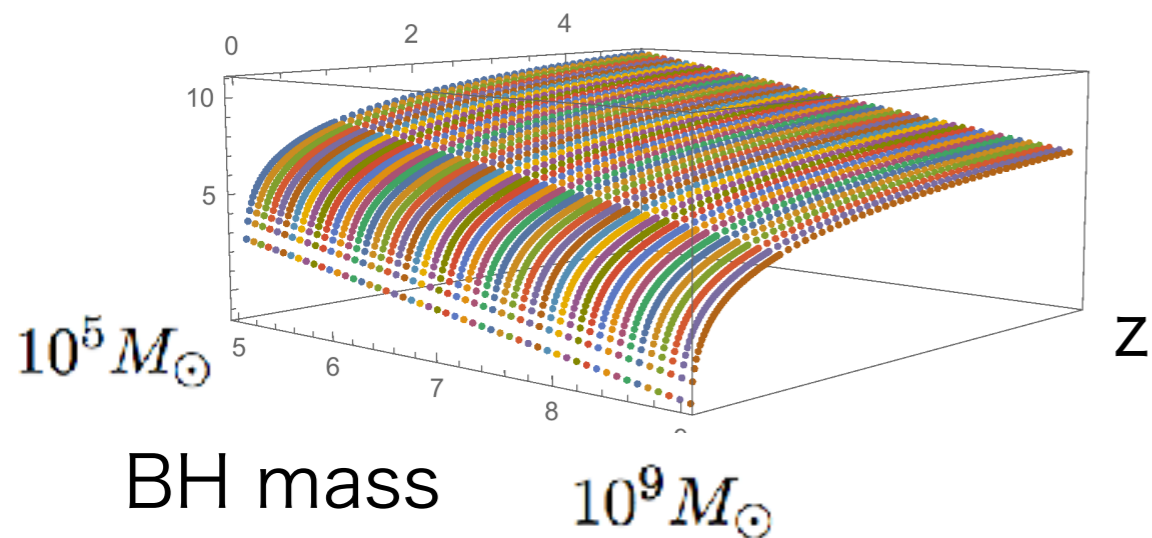
How many BHs in a Galaxy?



How many Galaxies in the Universe?

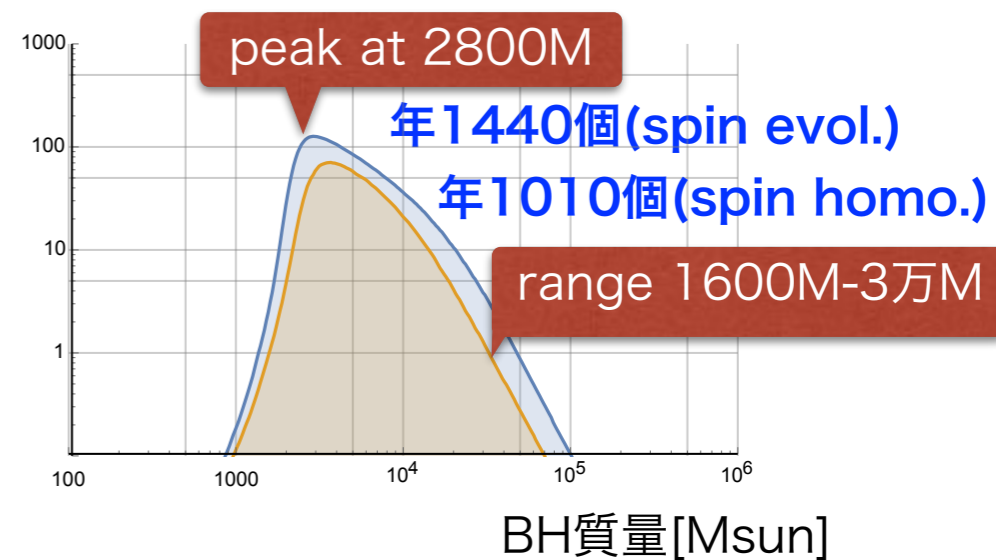


How many BH mergers in the Universe?



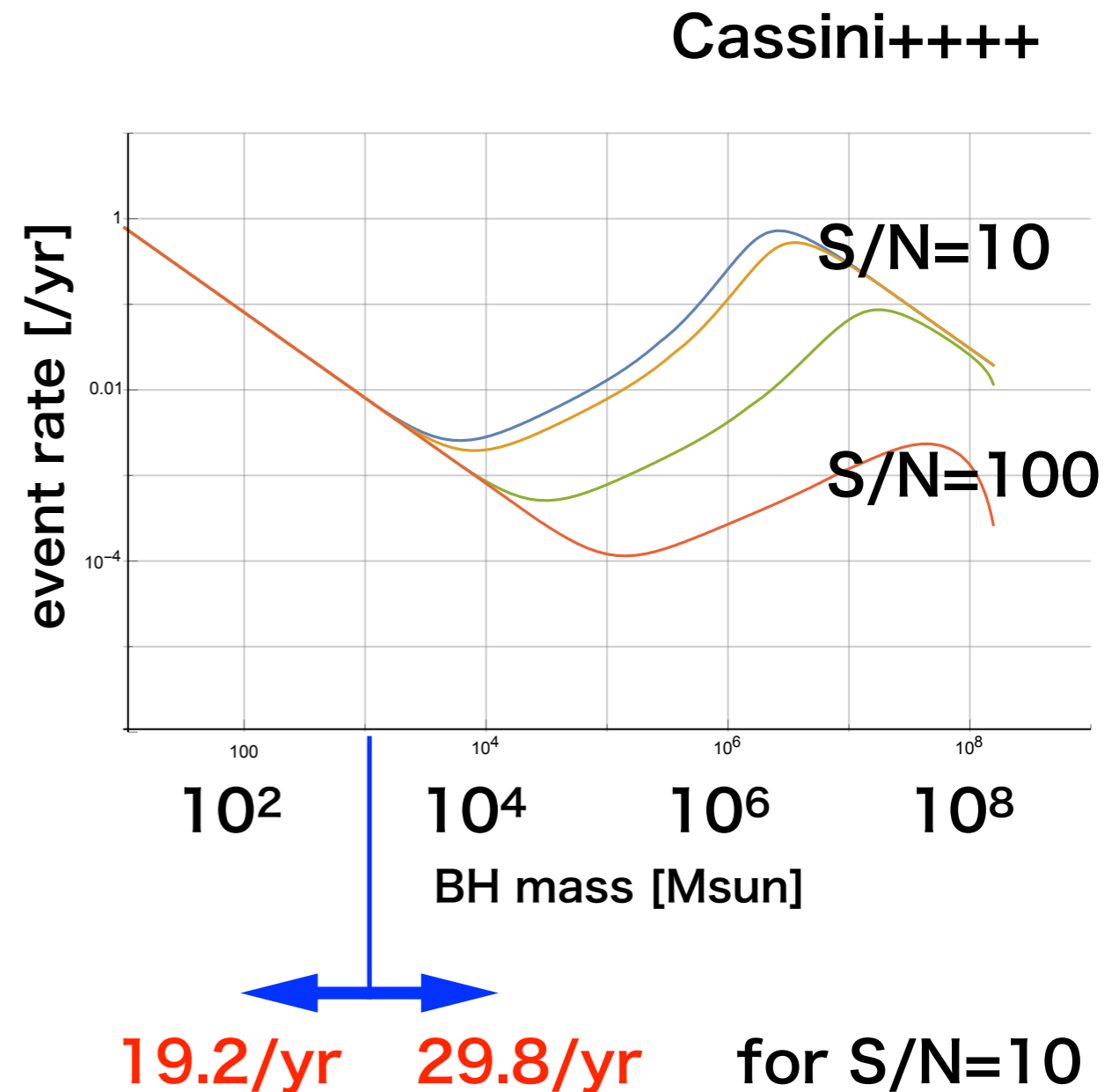
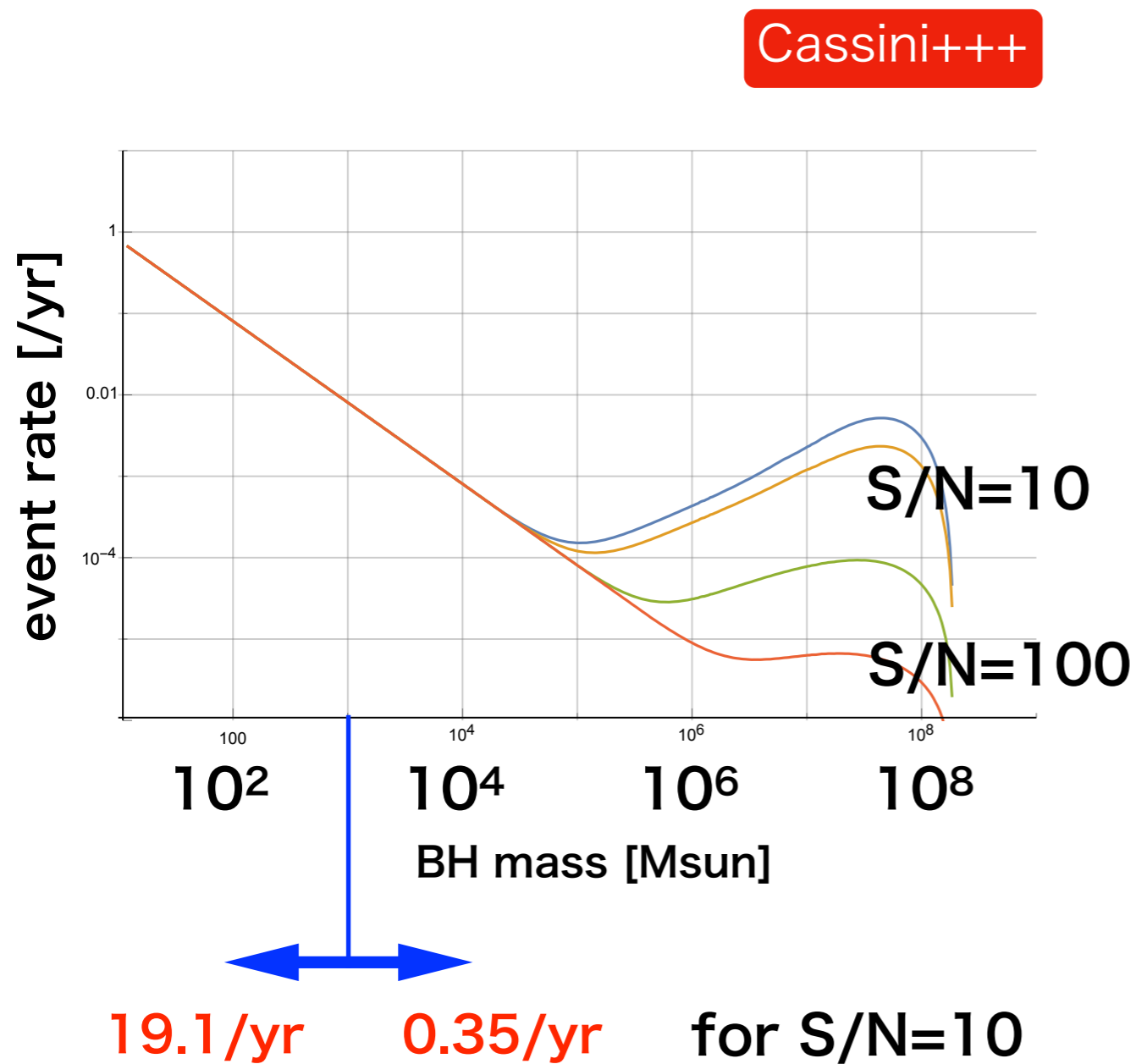
Event Rates at B-DECIGO

(QNM, S/N=30)



4. SMBHの形成モデル : IMBHs' hierarchical mergers

Event Rate



Summary

LISA (ESA/NASA)	B-DECIGO ⇒ DECIGO (日本)	Kolkowitz +	今回の提案
mHz帯	0.1Hz帯	3 mHz or 30 mHz -10 Hz	0.1 mHz —1 Hz
2030年打ち上げ予定	申請提案中		
地球—太陽のL4	地球周回 高度2000km ⇒太陽周回		太陽周回 L1-L4-L5
250万km	100 km ⇒ 1000 km	5000万km or 500万km	1 AU
		レーザーリンク	光or電磁波リンク
光トランスポンダ	Fabry-Perot 干渉計	光格子時計で周波数比較	光格子時計で時刻比較
drag-free flight	drag-free flight	drag-free flight	drag-free不要
Doppler 追跡法	地上干渉計と同じ	Doppler shift with Laser beam	Doppler 追跡法
加速度noiseに強み	Shot-noiseに強み		現在の技術レベルで実現可

★ CassiniのDoppler追跡 技術を3桁程度向上させることが可能

光格子時計, 3機とも宇宙空間, 日傘型太陽電池パネル分離

★ 3桁向上できれば, LISAよりも感度がよいレンジが出現

★ 3桁向上できれば, 年に20 eventのBH連星合体前のイベント予報が可

4桁向上できれば, 年に30 eventのSMBH連星インスパイラル

backup

原子時計を宇宙空間に設置する計画

The Space-Time Explorer and QUantum Equivalence Principle Space Test (STE-QUEST)

ESA, 2024年打ち上げ予定. 地球周回軌道にルビジウム同位体原子干渉計. 等価原理検証など.

Primary Atomic Reference Clock in Space (PARCS)

NASAが2008年にセシウム原子時計をISSに搭載しようとしたものだが, Bushの政策Vision for Space Exploration (VSE) により中止.

Galileo Global Navigation Satellite System

European GNSS Agency とESAが2019年完成目指して, 構築しているヨーロッパ発の非軍事GPS. 各衛星は, 水素レーザーとルビジウム原子時計を持つ.

Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)

ESAによる計画. ISSに, セシウム原子時計 (PHARAO) と水素レーザー (SHM) の2つの原子時計を設置するもの. 2018年に日本のHTVによって打ち上げ予定.

Deep Space Atomic Clock (DSAC)

NASA JPLが計画する, 水銀イオン原子時計を用いて, ナビゲーションの精度を高めようとする計画. 2018年, SpaceX Falcon で地球周回軌道に打ち上げ予定.

光格子時計を宇宙空間に設置する計画

space optical clock mission (SOC)

ESA. ISSに光格子時計を搭載して, 地球重力赤方偏移, 太陽重力, 等価原理検証を目指そうとするもの. 2010年からスタート. 10年後 (もうすぐ?) にISS搭載を目指す.