

低温重力波望遠鏡の感度最適化

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

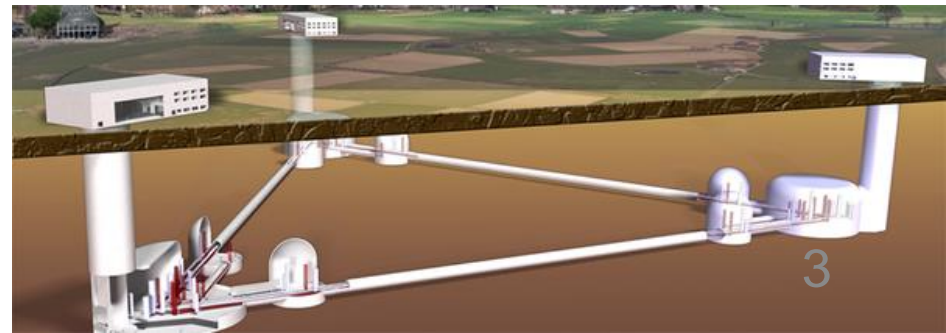
小森健太郎、西澤篤志、武田紘樹、長野晃士、榎本雄太郎、
端山和大、宗宮健太郎、安東正樹、灰野禎一

概要

- 低温重力波望遠鏡であるKAGRAの高感度化のための3つの方向性を提案
 - 広帯域高感度化
連星中性子星の検出レンジ
 - 低周波特化
中間質量ブラックホールの検出レンジ
 - 高周波特化
連星中性子星の方向決定精度
で最適化
Y. Michimura+, Phys. Rev. D 97, 122003 (2018)
- 予算規模や技術的成熟度、得られる物理を比較
- KAGRAが勝ちうる方向性を提案

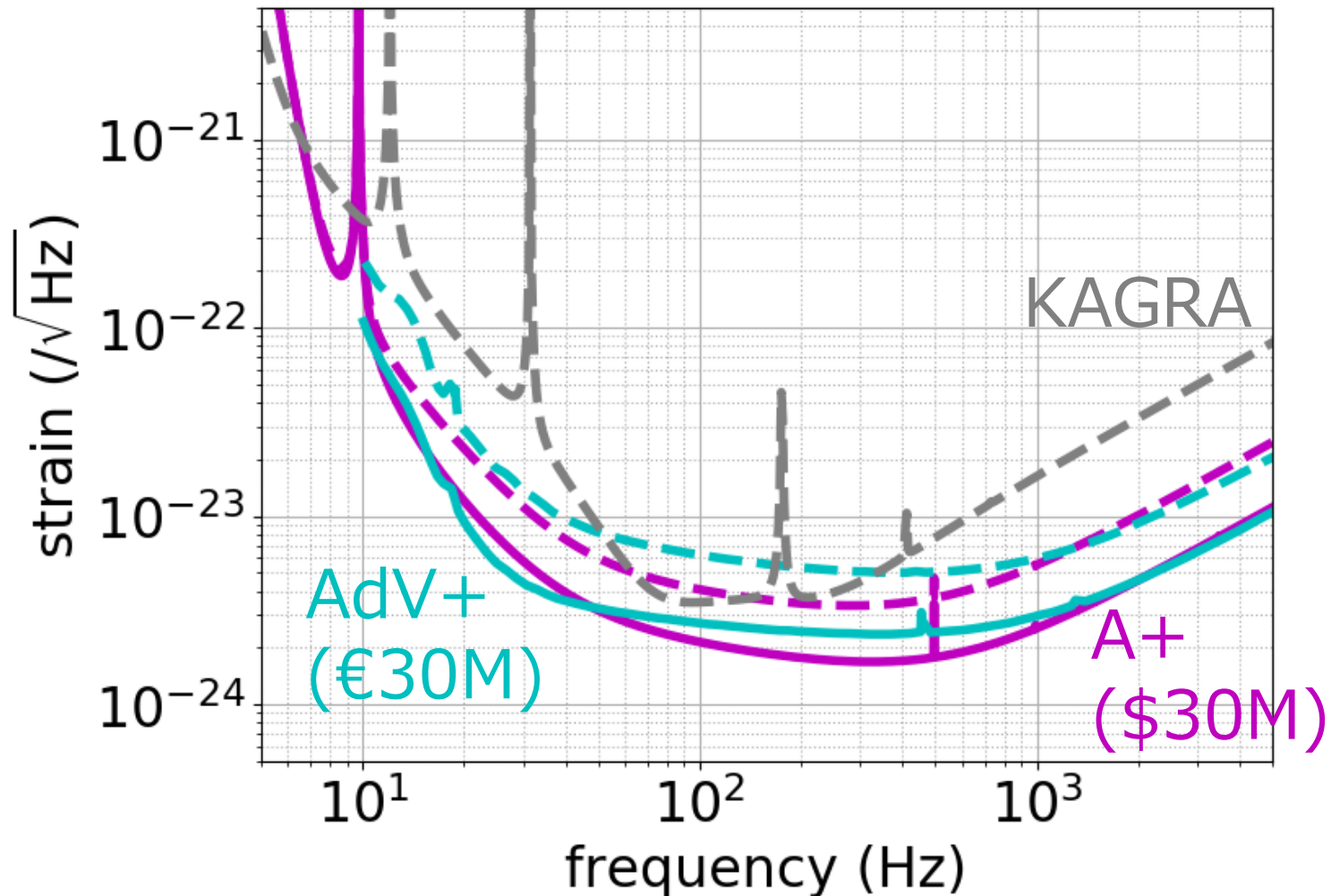
重力波物理学・天文学の今後

- 連星ブラックホール、連星中性子星の初検出
- さらなる高感度化でより高精度な観測
- アメリカ
 - A+ (Advanced LIGOの中規模改良、~2024)
 - Voyager (Advanced LIGOの低温化計画)
 - Cosmic Explorer (40km干渉計計画)
- ヨーロッパ
 - AdV+ (Advanced Virgoの中規模改良、~2024)
 - Einstein Telescope (10km低温・地下干渉計計画)
- では日本のKAGRAはどうしたら勝てるか？



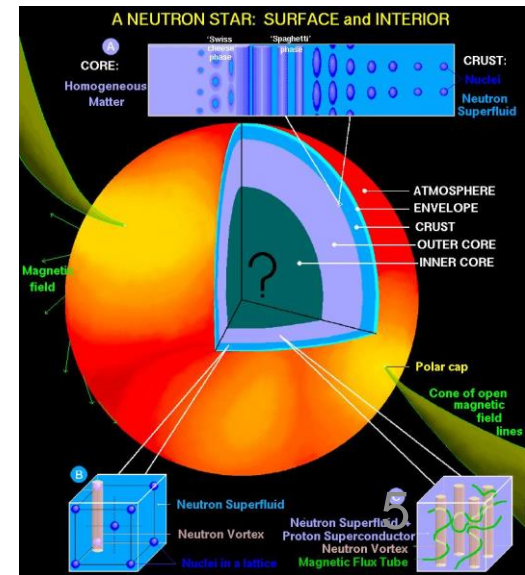
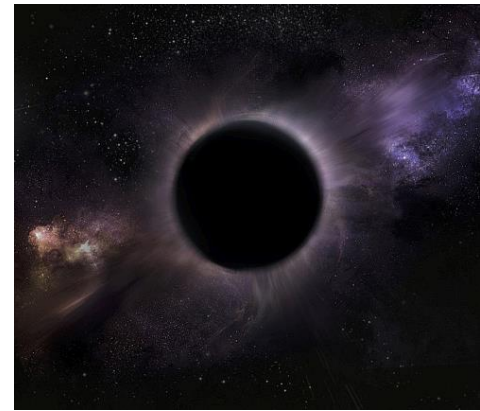
A+やAdV+の状況

- 設計が固められ、2024年に向け準備が進行中
- KAGRAも早急に将来計画をまとめる必要がある



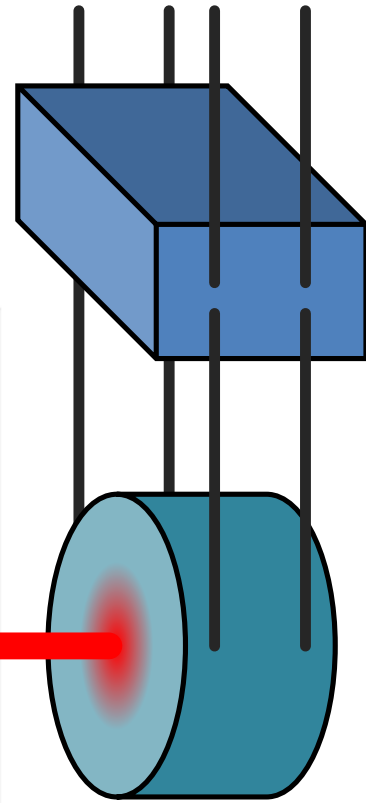
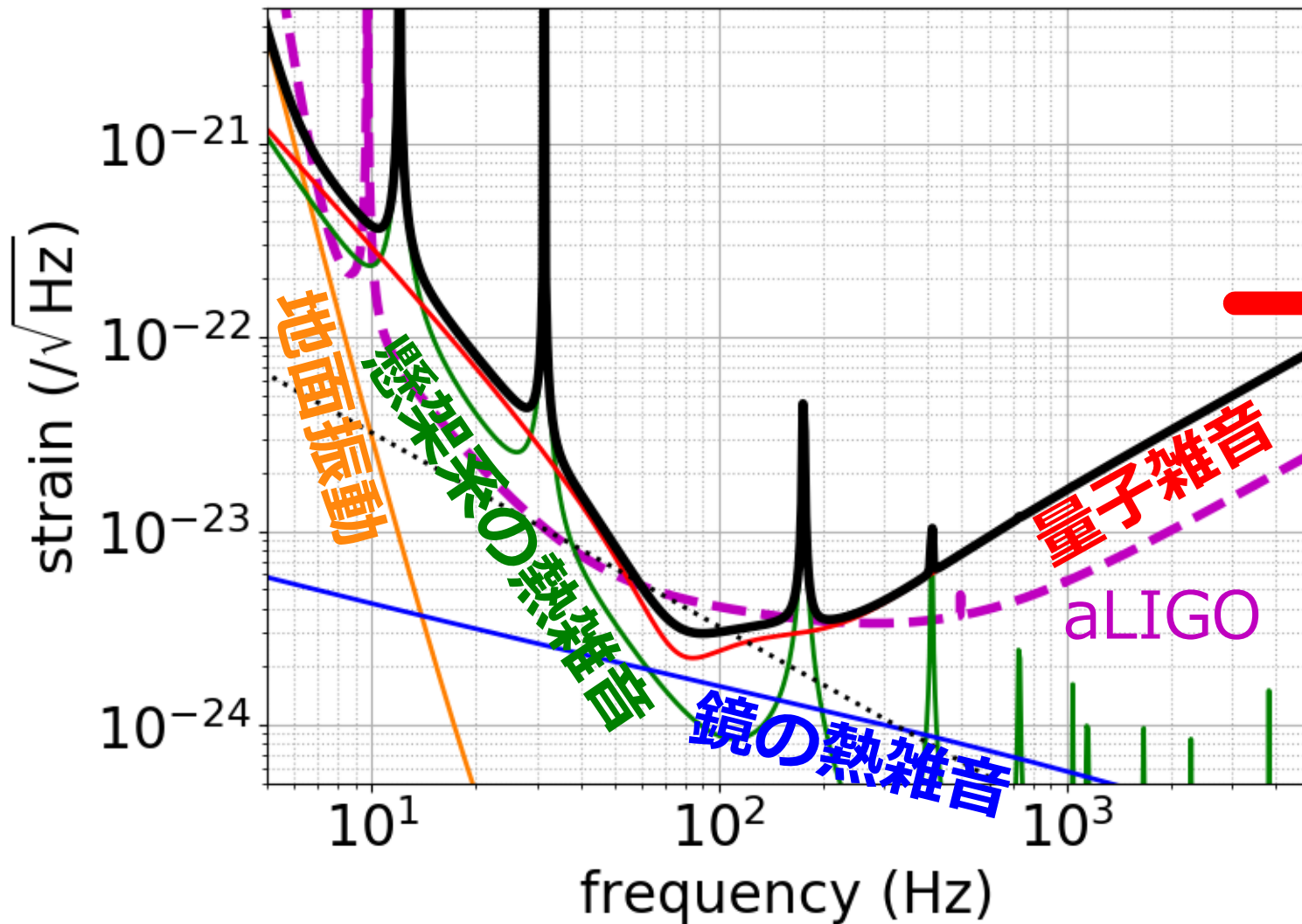
KAGRAのとり得る将来戦略

- A+やAdV+のような**広帯域高感度化**を目指す
ネットワークでの検出数を増やして統計で稼ぐ
- 狭帯域アップグレードで同時の物理
低周波特化で
中間質量ブラックホール初検出
高周波特化で
中性子星の状態方程式決定など
- **低温・地下**干渉計の**技術実証機**
Einstein Telescopeなど
次世代干渉計への技術的貢献



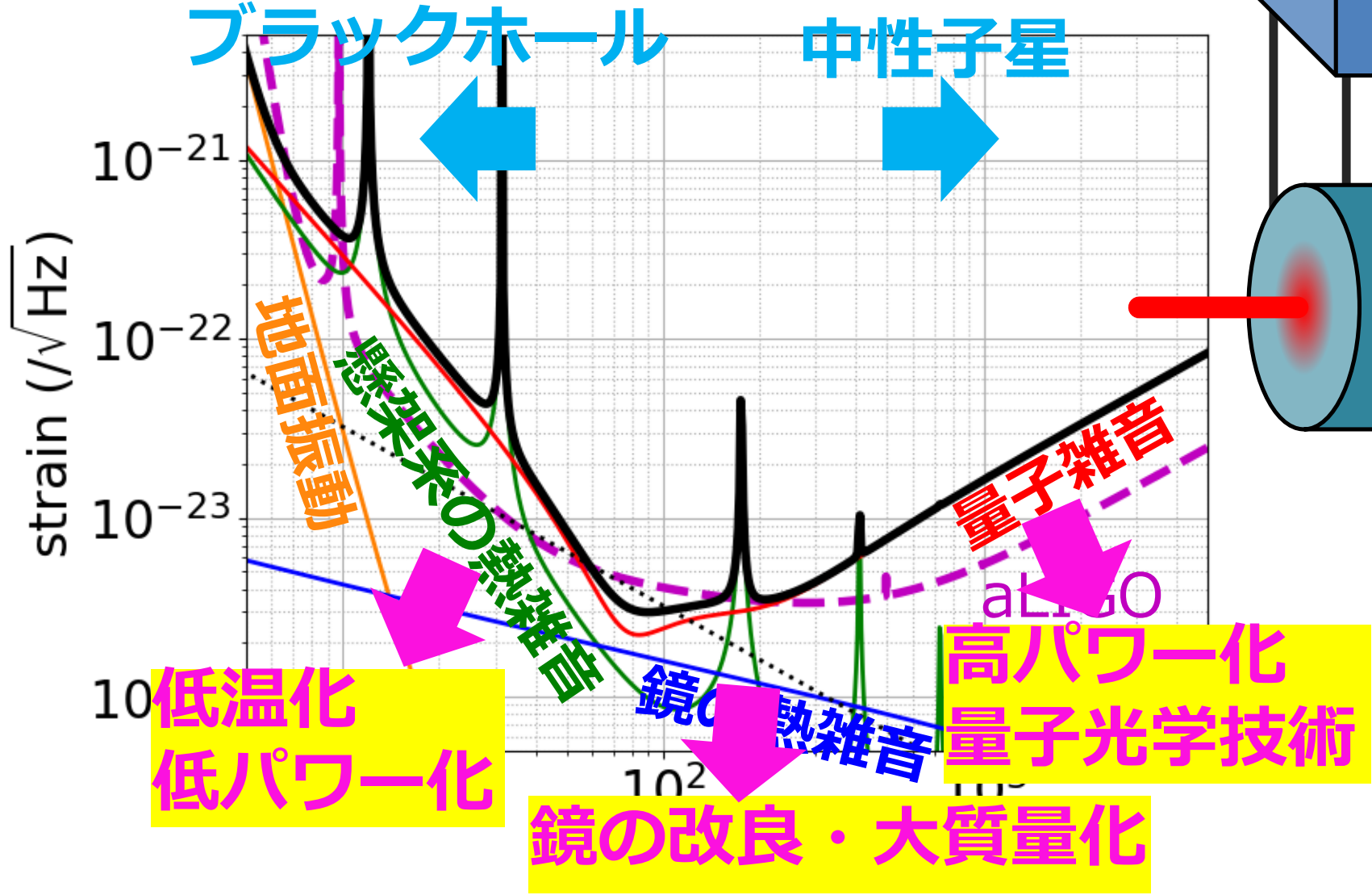
KAGRAの設計感度

- 低温とレーザーの出力強度のかねあい



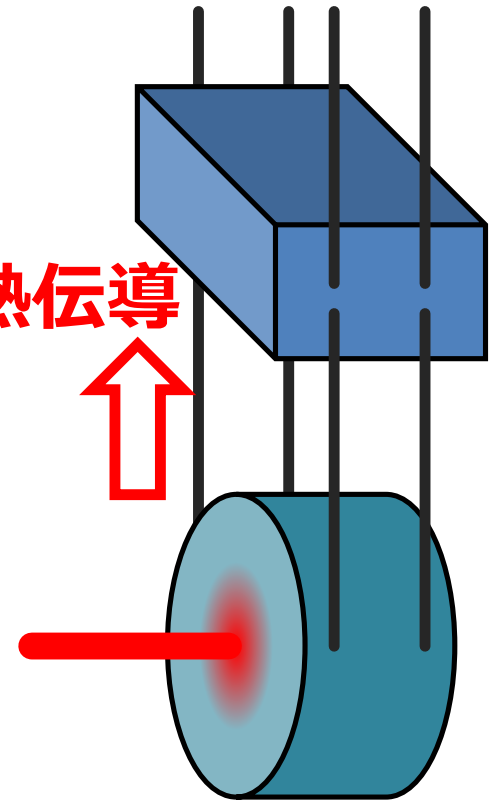
KAGRAの設計感度

- 低温とレーザーの出力強度のかねあい



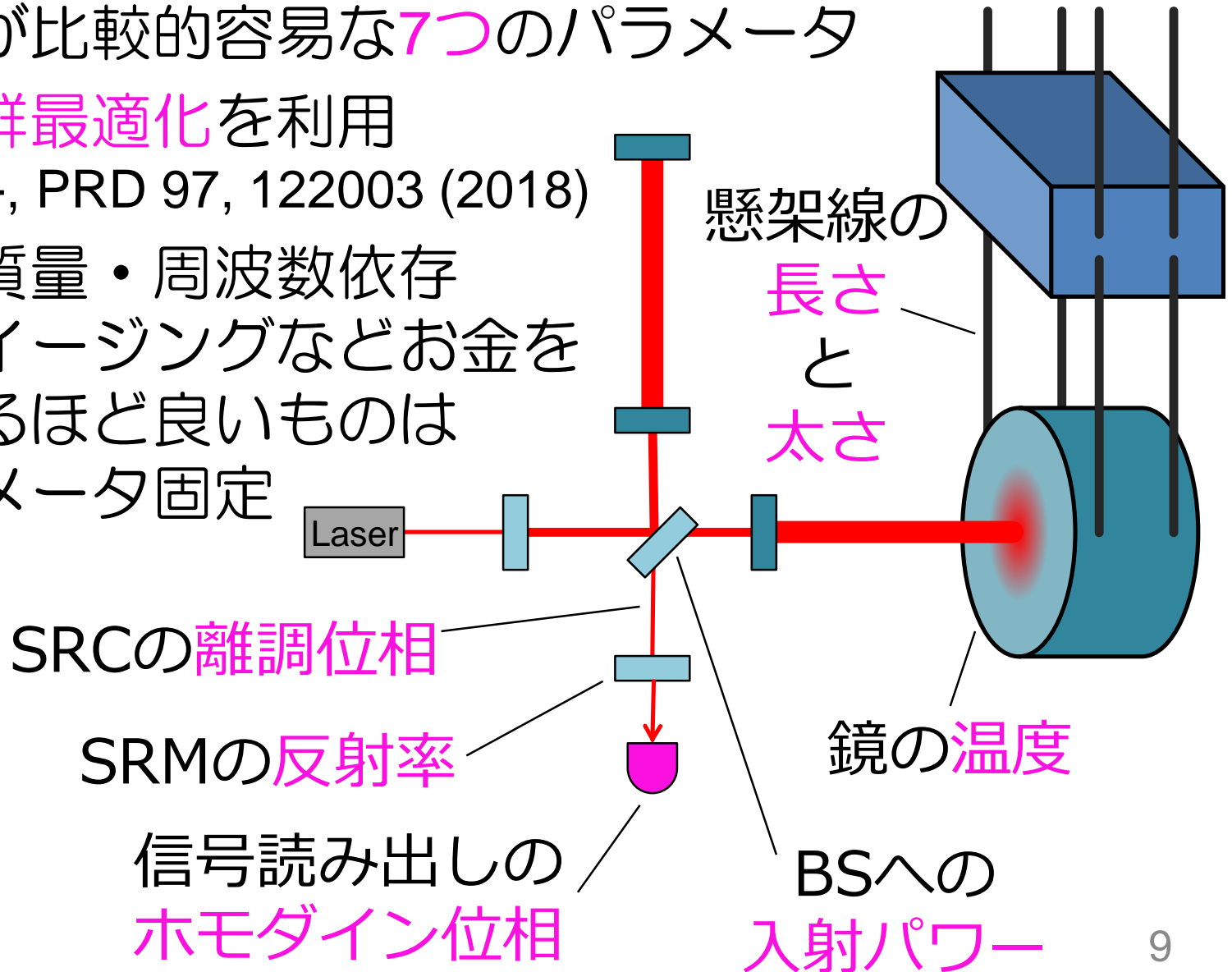
将来計画の設計方針

- 広帯域高感度化の場合
 - 周波数依存スキューニング導入
 - 鏡の質量を増やす
 - 1.4Msun連星NSの検出レンジ
- 低周波特化の場合
 - 低パワー化
 - 懸架を細く・長く
 - 100Msun連星BHの検出レンジ
- 高周波特化の場合
 - 高パワー化
 - 懸架を太く・短く
 - 連星中性子星の方向決定精度で最適化



最適化の手法

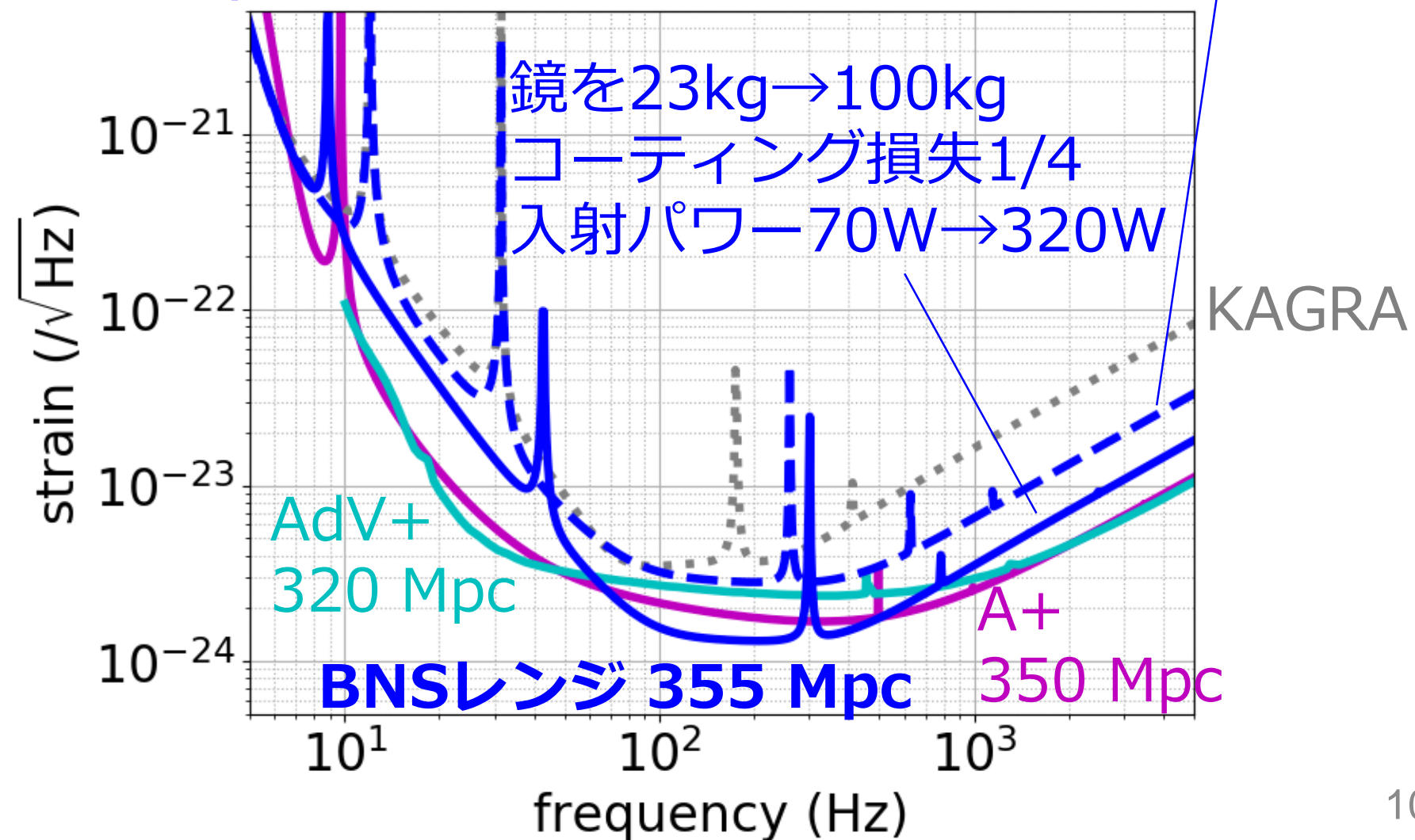
- 変更が比較的容易な7つのパラメータ
- 粒子群最適化を利用
YM+, PRD 97, 122003 (2018)
- 鏡の質量・周波数依存
スクイージングなどお金を
かけるほど良いものは
パラメータ固定



広帯域高感度化で勝つ

周波数依存スキューニングのみ

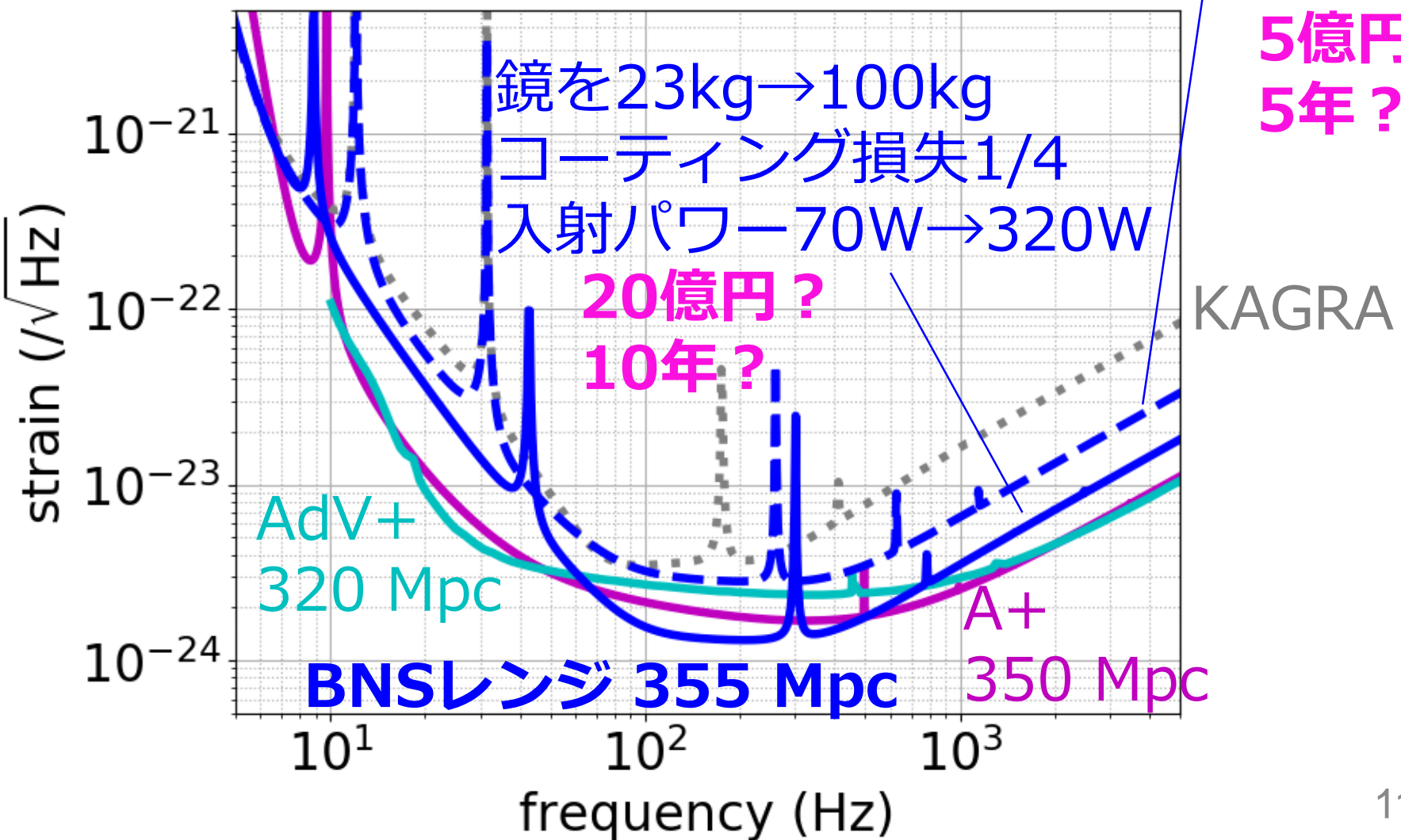
(10dBスキューニング, 100mフィルター共振器)



広帯域高感度化で勝つ

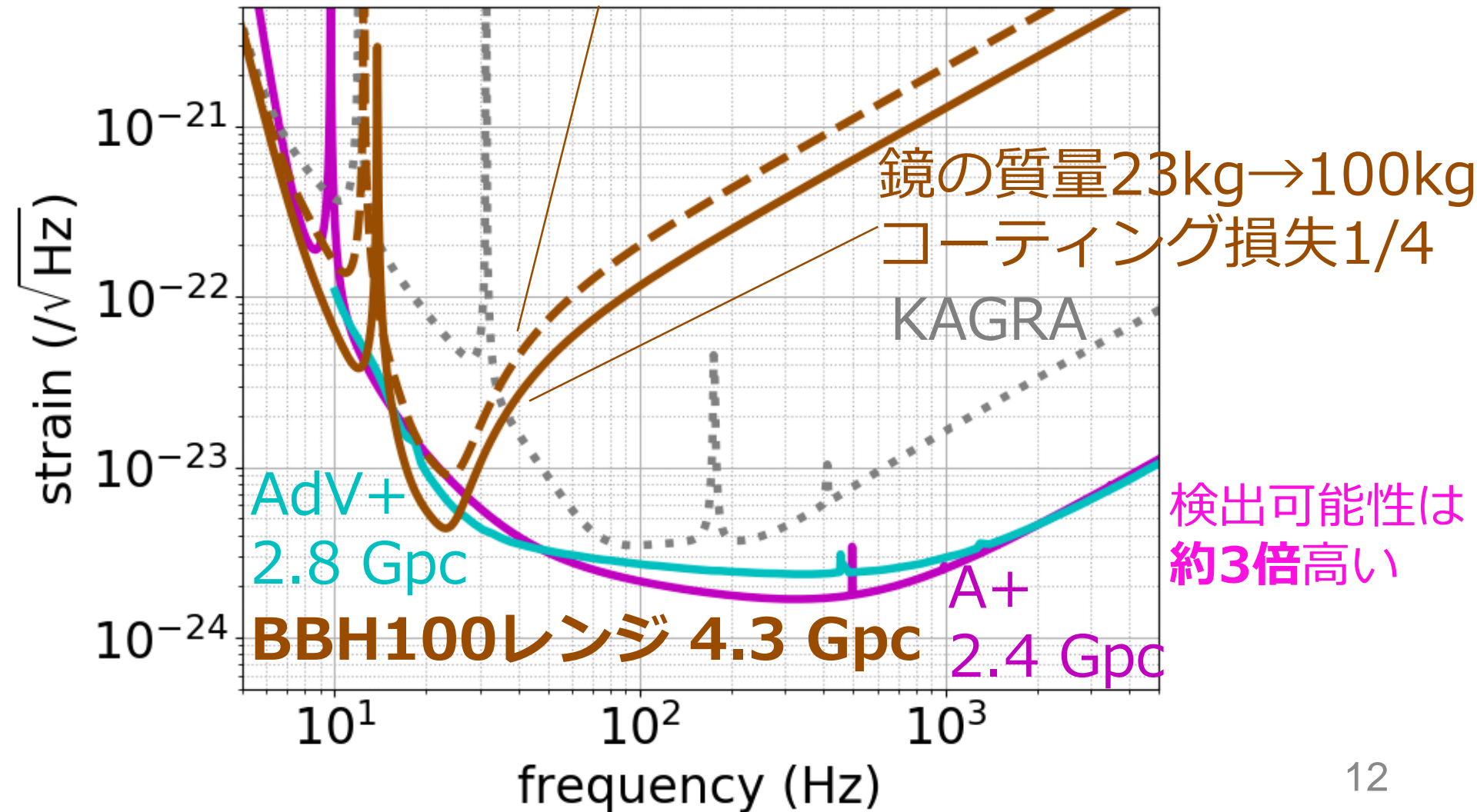
周波数依存スキューニングのみ

(10dBスキューニング, 100mフィルター共振器)



低周波特化で勝つ

低温懸架系改良, 高い離調位相(60deg)
入射パワー70W→0.5W

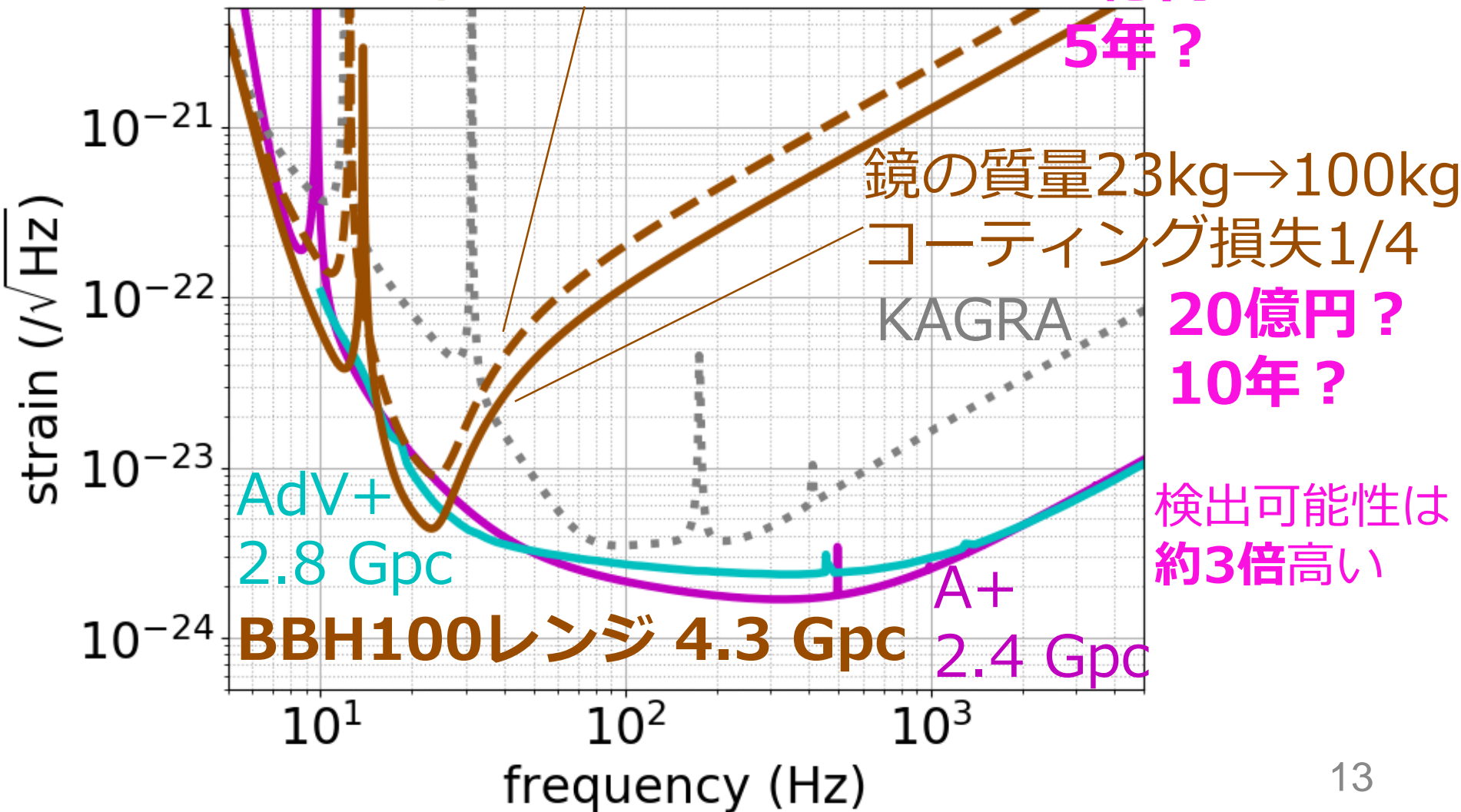


低周波特化で勝つ

低温懸架系改良, 高い離調位相(60deg)
入射パワー70W→0.5W

5億円?

5年?



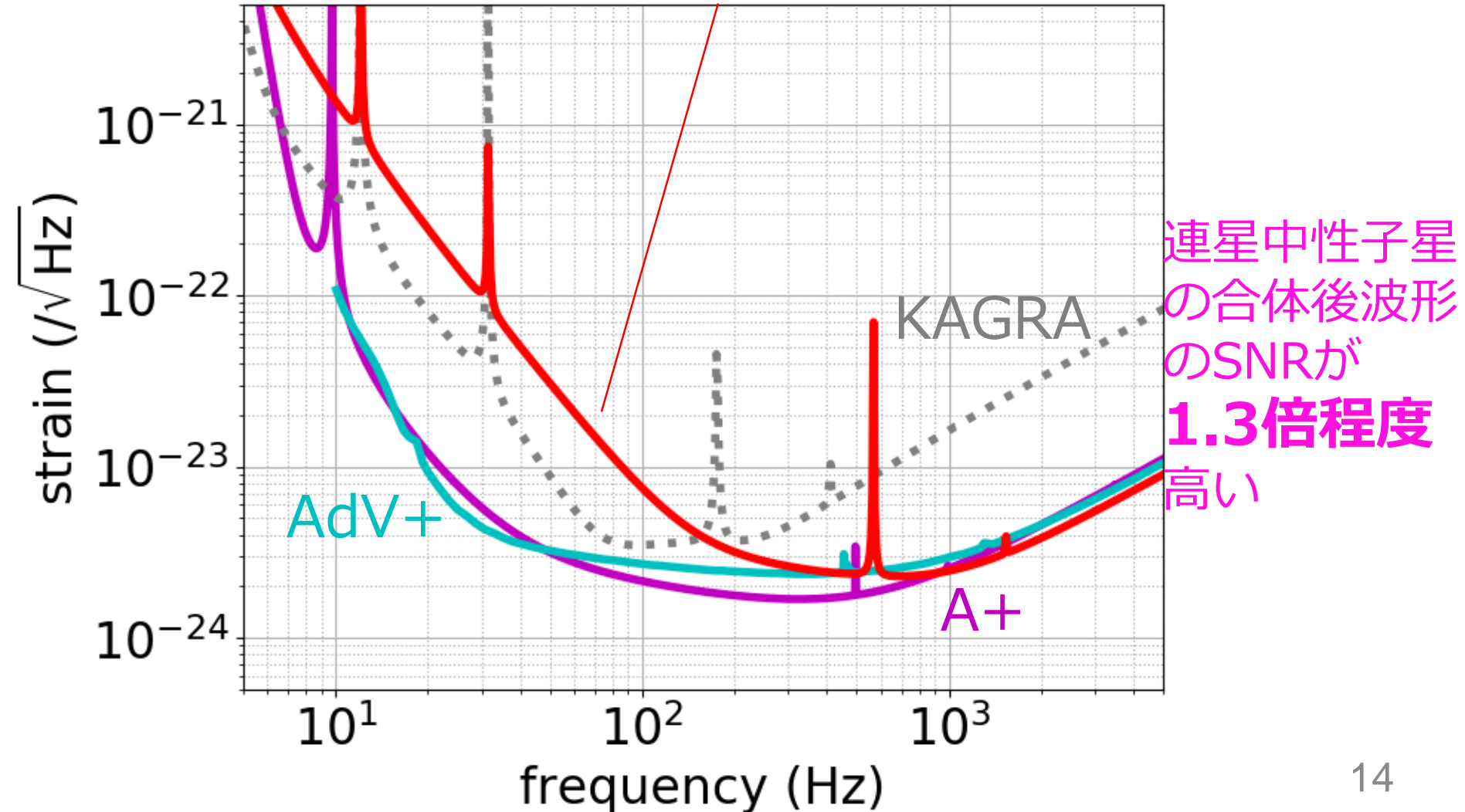
20億円?

10年?

高周波特化で勝つ

入射パワー70W→340W

10dBスクイーミング(4.4dB検出)



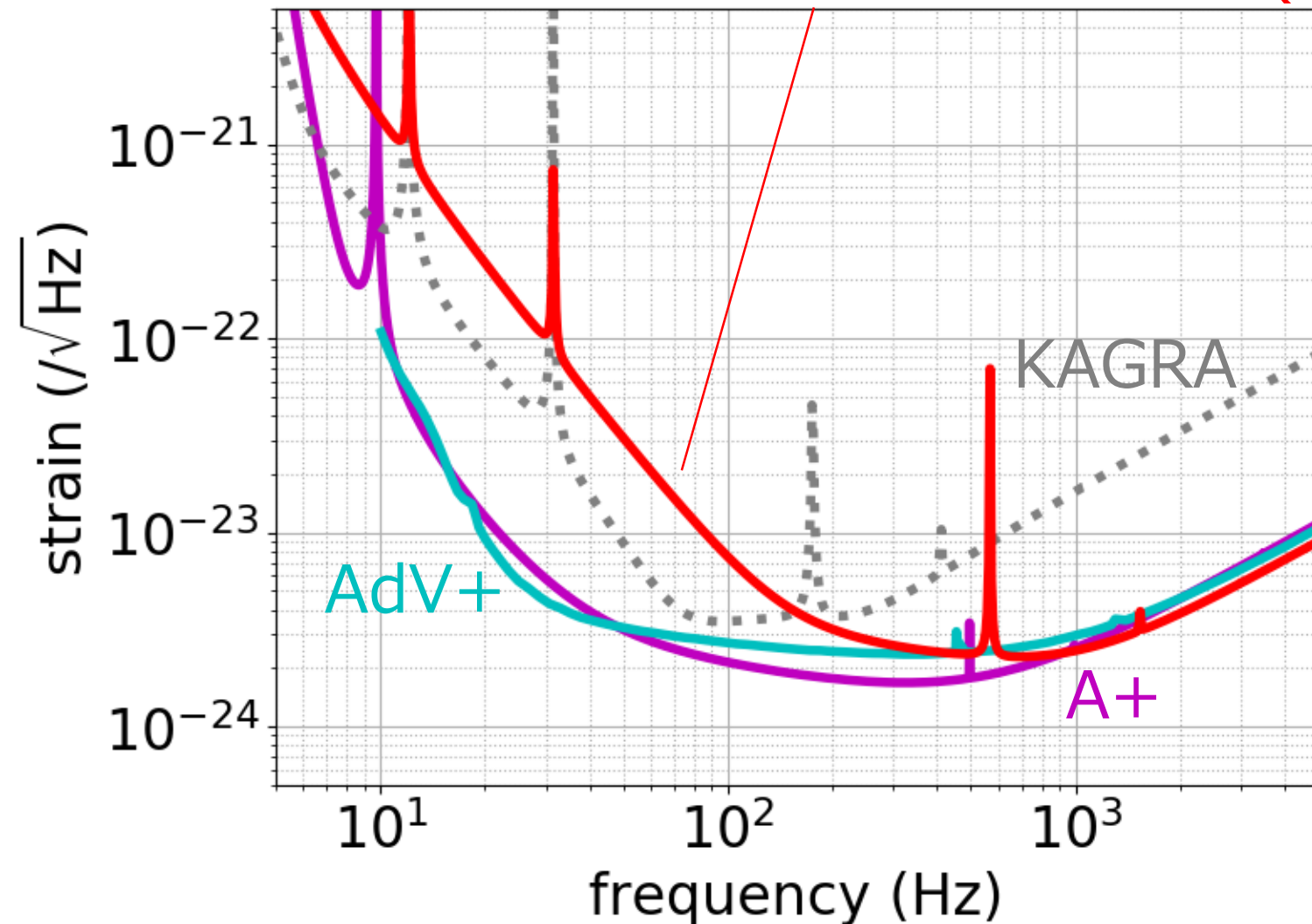
高周波特化で勝つ

入射パワー70W→340W

10dBスクイーミング(4.4dB検出)

5億円?

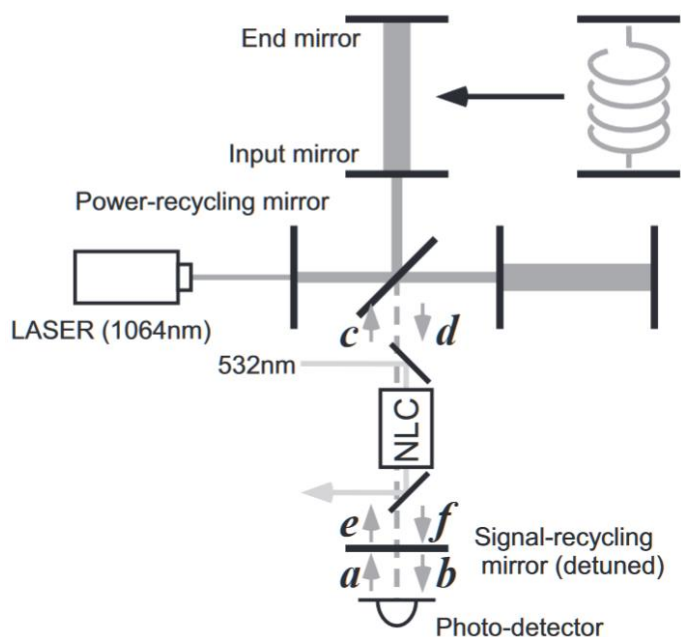
5年?



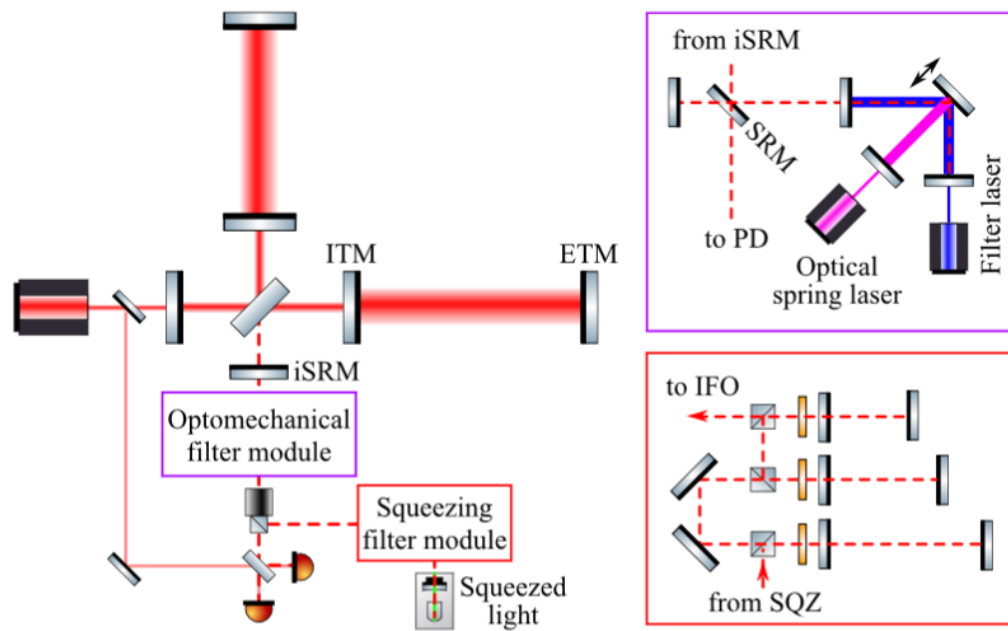
連星中性子星
の合体後波形
のSNRが
1.3倍程度
高い

さらなる高周波特化

- 高周波の感度改善には
 レーザーの高出力化
 スクイーミング
 しか方法がないが、これ以上は技術的に困難
- 量子光学的手法の提案はあるが未実証



K. Somiya+, Phys. Lett. A 380, 521 (2015)



H. Miao+, Phys. Rev. D 98, 044044 (2018)

性能の比較

	検出可能レンジ (Mpc)			BNS 方向決定 (deg ²)※
	BBH100	BBH30	BNS	
KAGRA	353	1095	153	0.183
広帯域高感度化	785	1956	355	0.100
低周波特化	4327	2285	177	0.479
高周波特化	117	315	123	0.114

※ GW170817的な
BNSの方向決定精度
の全天平均

- 連星中性子星(BNS)の検出レンジがよい
 ≒ 30Msun連星ブラックホール(BBH30)の
 リングダウン波形に対するSNRがよい
- 連星中性子星の方向決定精度がよい
 ≒ 中性子星の状態方程式を決めやすい

技術的成熟度の比較

- 広帯域高感度化

- 周波数依存スクリーニング 😊
- 100kgのサファイア鏡 😐



[E. Hirose [JGW-G1707484](#)]

- 低周波特化

- 高い離調位相での狭帯域化 😞
- 低周波の有象無象の雑音 😞

- 高周波特化の場合

- 400W級の高安定CWレーザー光源 😐
- 1MWを超える腕共振器内パワー 😞
- さらなる特化には量子光学技術必要 😞

将来の方向性まとめ

- コストがかかる or 成功確率が低い？

	広帯域 高感度化	低周波 特化	高周波 特化
予算規模 開発年数	勝つには ~20億円、 ~10年 😐	勝つには ~20億円、 ~10年 😐	~5億円、 ~5年で勝つ 可能性 😊
技術的 成熟度	高い 😊	狭帯域化は 難しい 😞	高パワーは 難しい 😞
独自の 物理	厳しいか？ 統計に貢献 😐	100Msun BH の検出可能性 (~3倍) 😐	中性子星の 物理に貢献 (~1.3倍) 😐

結論(私見)

- 低周波特化、高周波特化をしてもSNRで劇的には勝てない
- 低周波特化は技術的にも困難かつ運が必要
- 高周波特化は比較的小規模アップグレードで勝つ可能性があるが将来性は今のところ見込めない
- 中規模計画としては広帯域高感度化が着実
- まずはレーザーの高出力化 or 周波数依存スクィージングで5億円/5年規模のアップグレードをし、数十億円/10年かけて広帯域高感度化を目指すのがいいのではないか
- A+やAdV+に遅れないよう早急に将来計画を

補足

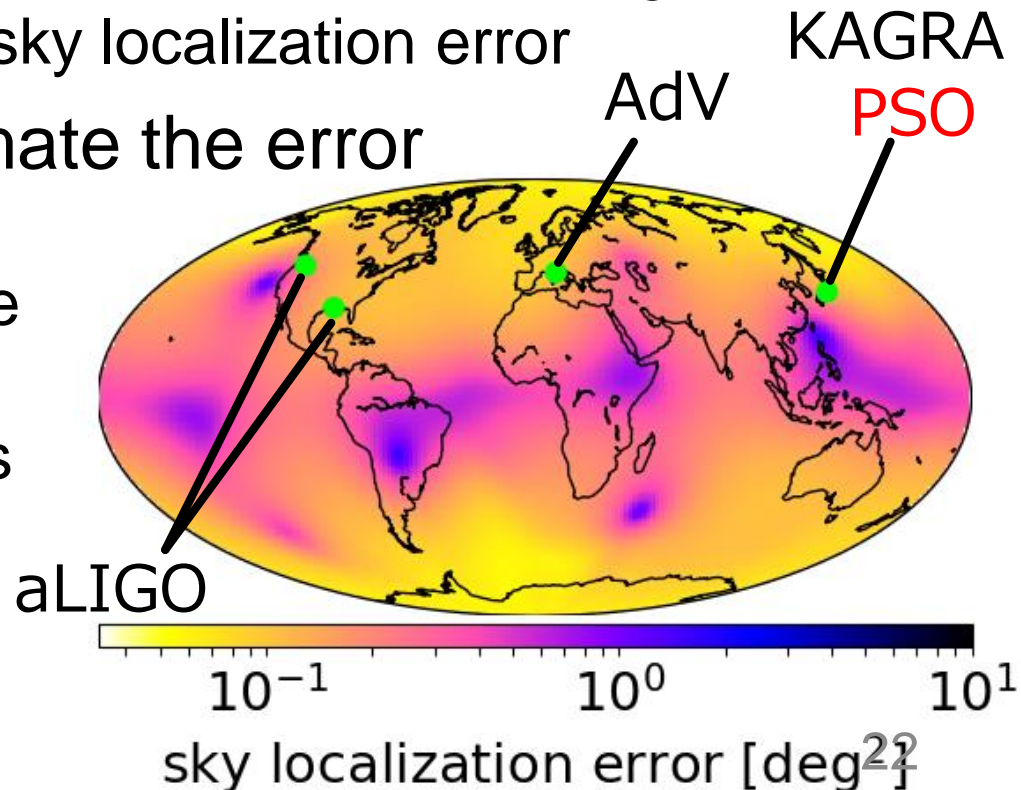
Sky Localization Optimization

- Cost function:
 - **sky localization** of **GW170817**-like binary
 - 1.25-1.5 Msun at 40 Mpc, inclination 28 deg
 - zero spins, no precession
 - **108 sets** of sky location and polarization angle to derive median of sky localization error

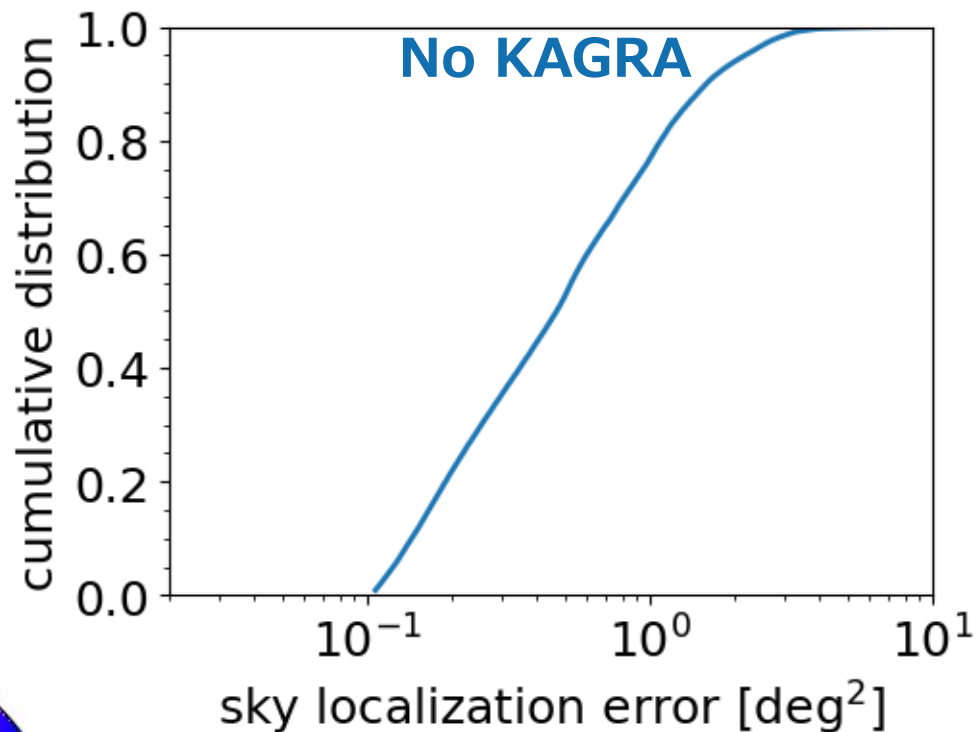
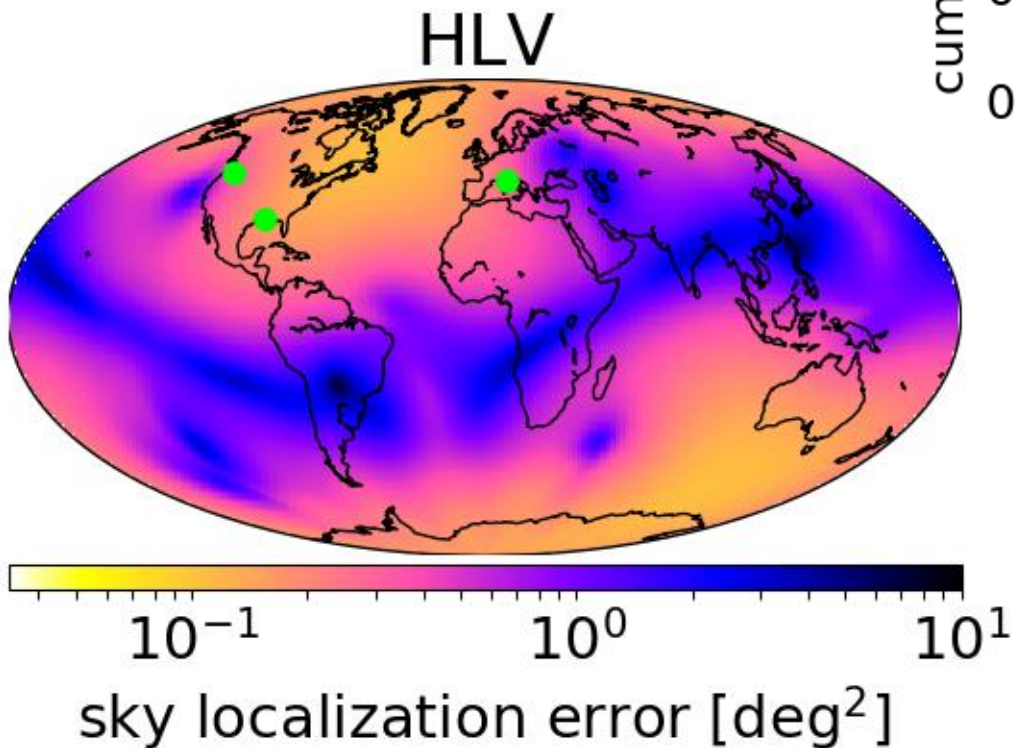
- **Fisher matrix** to estimate the error

- inspiral waveform to
 - 3.0 PN in amplitude
 - 3.5 PN in phase
- 11 binary parameters

- **HLVK** global network

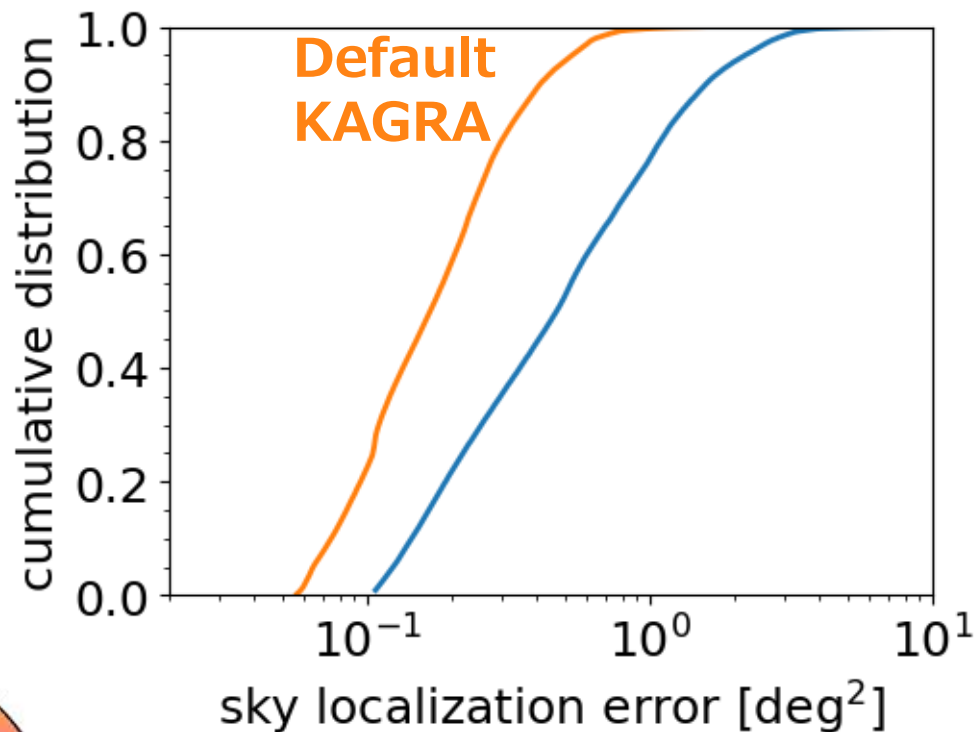
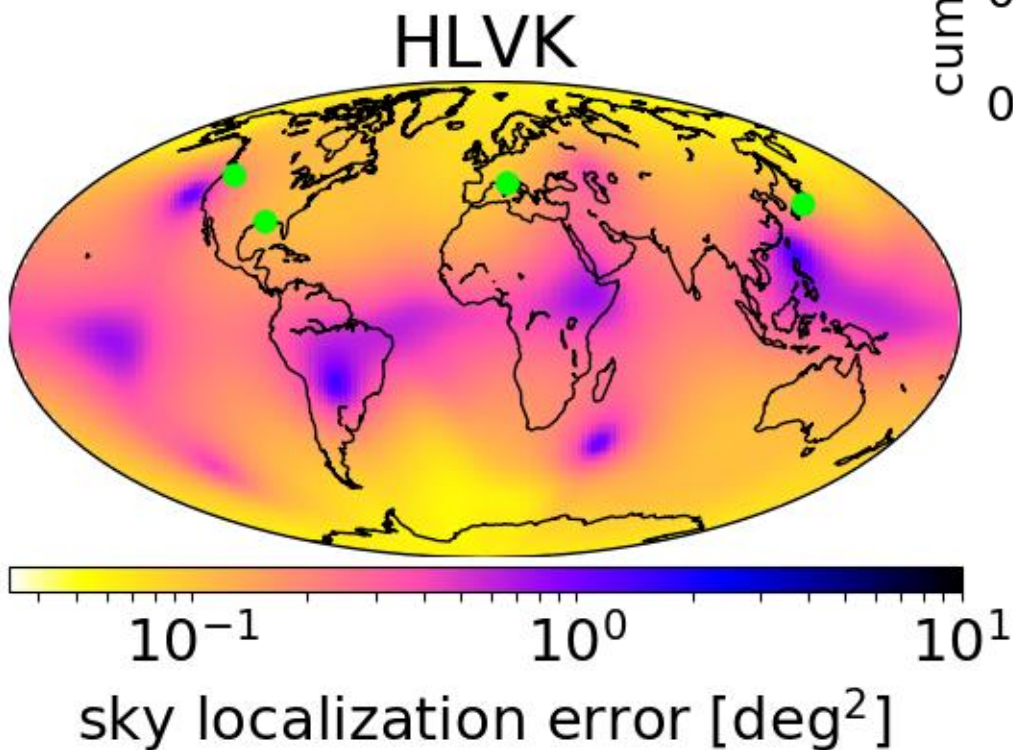


Sky Localization with HLV



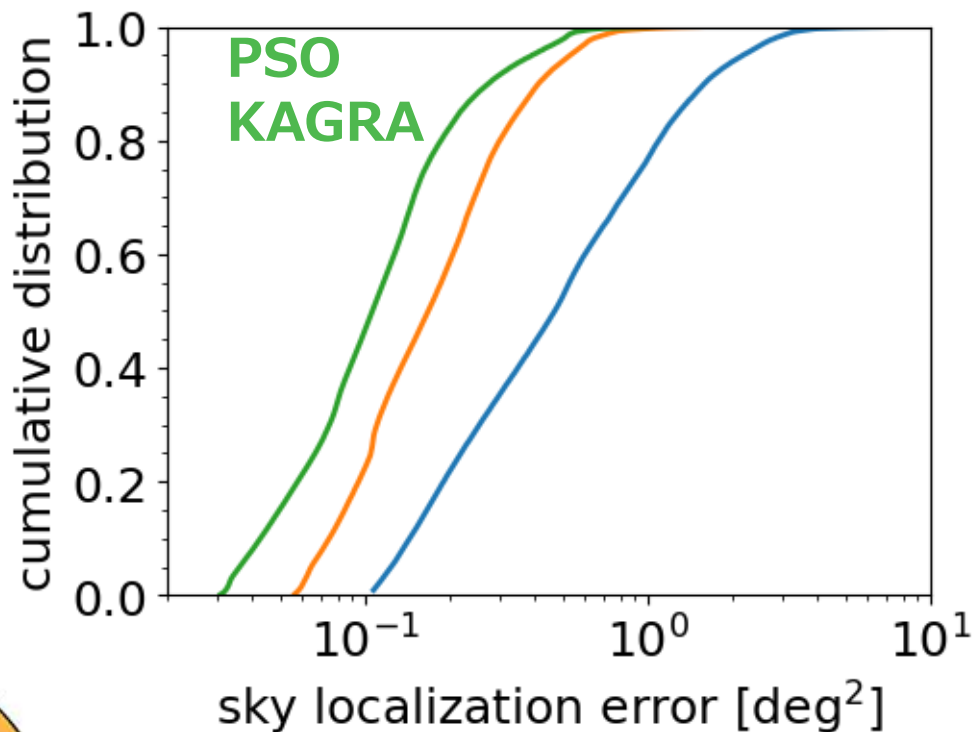
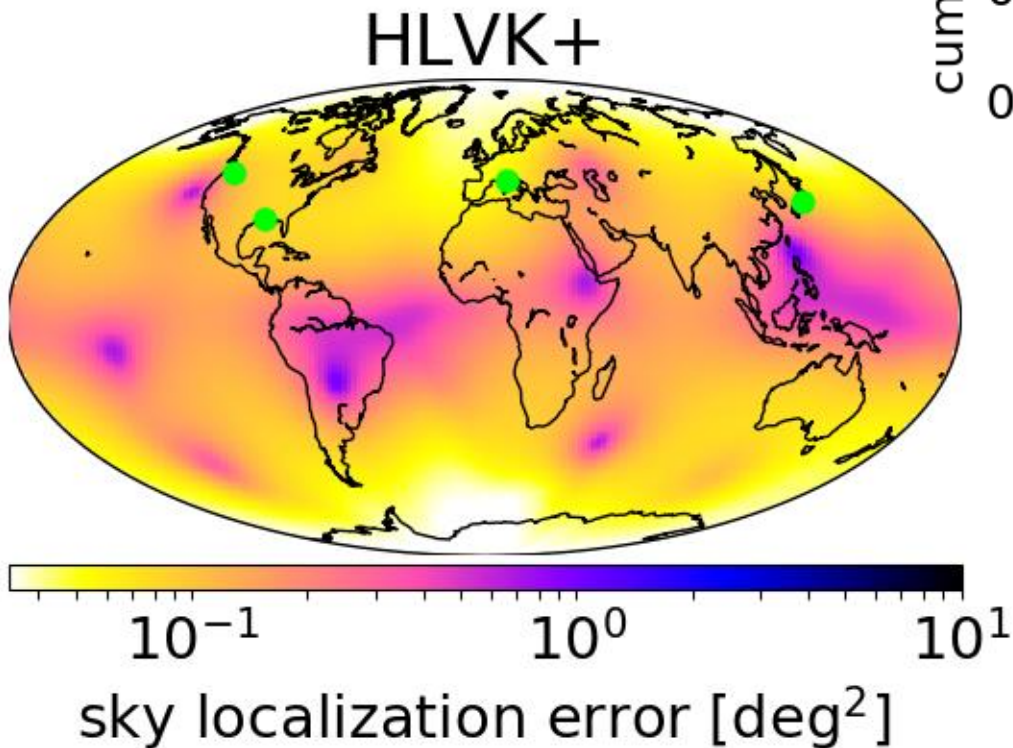
	median
HLV	0.472 deg ²
HLVK	
HLVK+	

Sky Localization with HLVK



	median
HLV	0.472 deg ²
HLVK	0.168 deg ²
HLVK+	

Sky Localization with HLVK+



	median
HLV	0.472 deg^2
HLVK	0.168 deg^2
HLVK+	0.107 deg^2

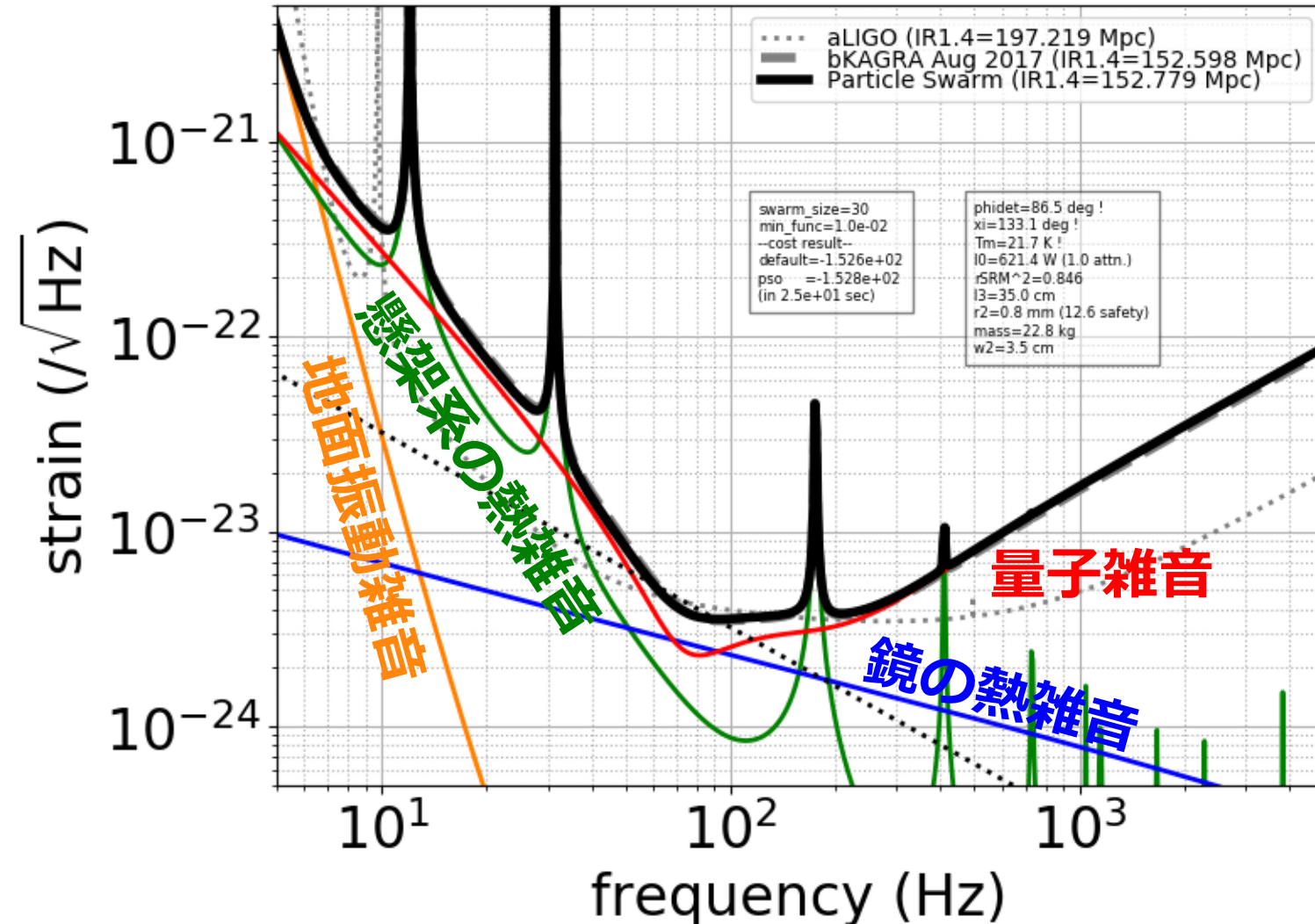
Money

- Detuning angle and homodyne angle can be retuned without additional cost
- Mirror temperature and input power can be retuned without additional cost if power at BS is less than ~ 1 kW (~ 100 W entering PRM)
- Change in SRM reflectivity require ~ 0.1 Million USD
- Change in wire parameters require ~ 0.01 Million USD/fiber
- Change in wire length additionally require test mass suspension design change at ~ 0.1 Million USD/mirror
- Change in the test mass require ~ 0.6 Million USD/mirror (more for heavier ones)

2G/2G+ Parameter Comparison

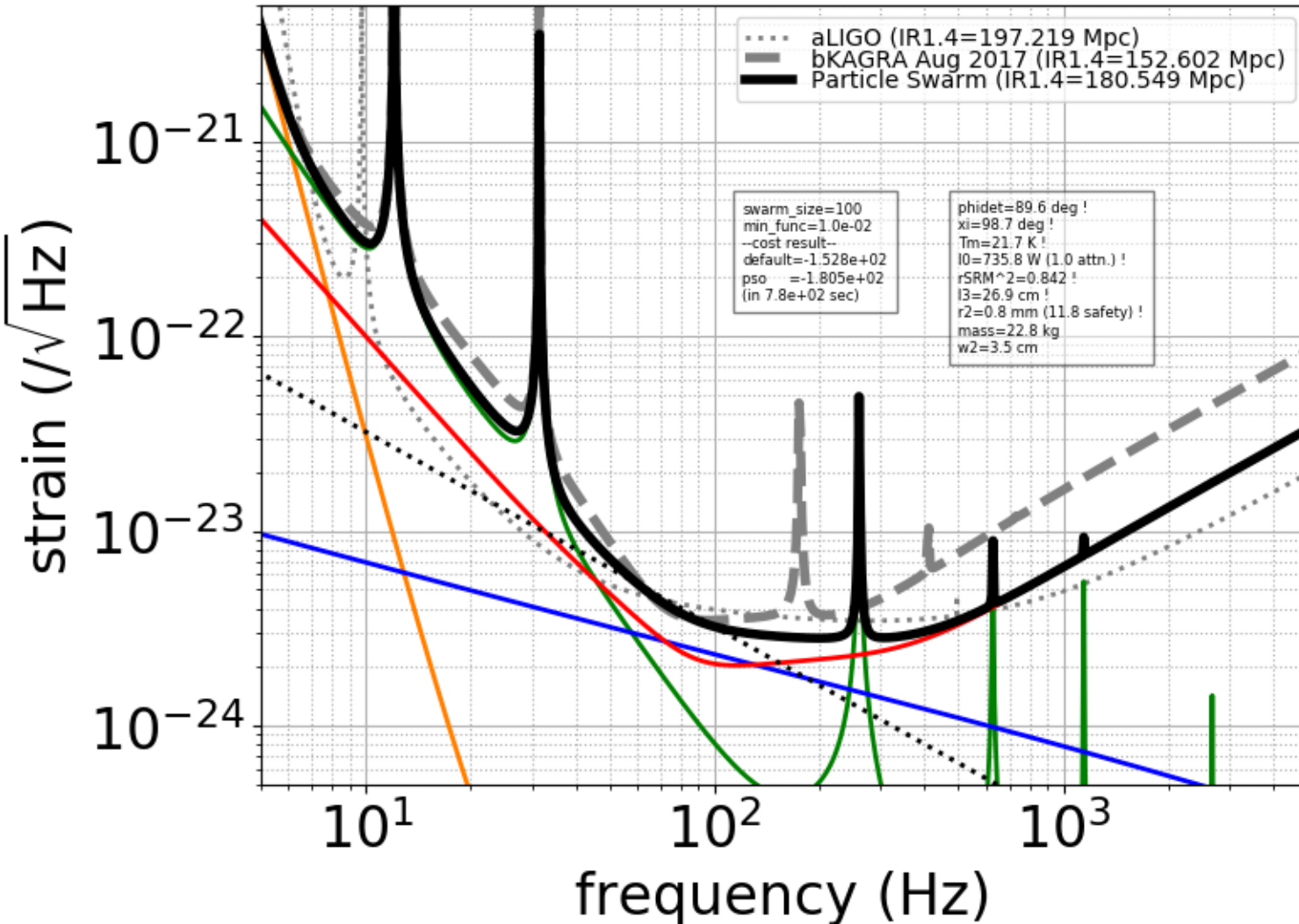
	KAGRA	AdVirgo	aLIGO	A+	Voyager
Arm length [km]	3	3	4	4	4
Mirror mass [kg]	23	42	40	80	200
Mirror material	Sapphire	Silica	Silica	Silica	Silicon
Mirror temp [K]	22	295	295	295	123
Sus fiber	35cm Sap.	70cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm SiO ₂	60cm Si
Fiber type	Fiber	Fiber	Fiber	Fiber	Ribbon
Input power [W]	67	125	125	125	140
Arm power [kW]	340	700	710	1150	3000
Wavelength [nm]	1064	1064	1064	1064	2000
Beam size [cm]	3.5 / 3.5	4.9 / 5.8	5.5 / 6.2	5.5 / 6.2	5.8 / 6.2
SQZ factor	0	0	0	6	8
F. C. length [m]	none	none	none	16	300

現在のKAGRAの設計感度



広帯域高感度化 Phase1

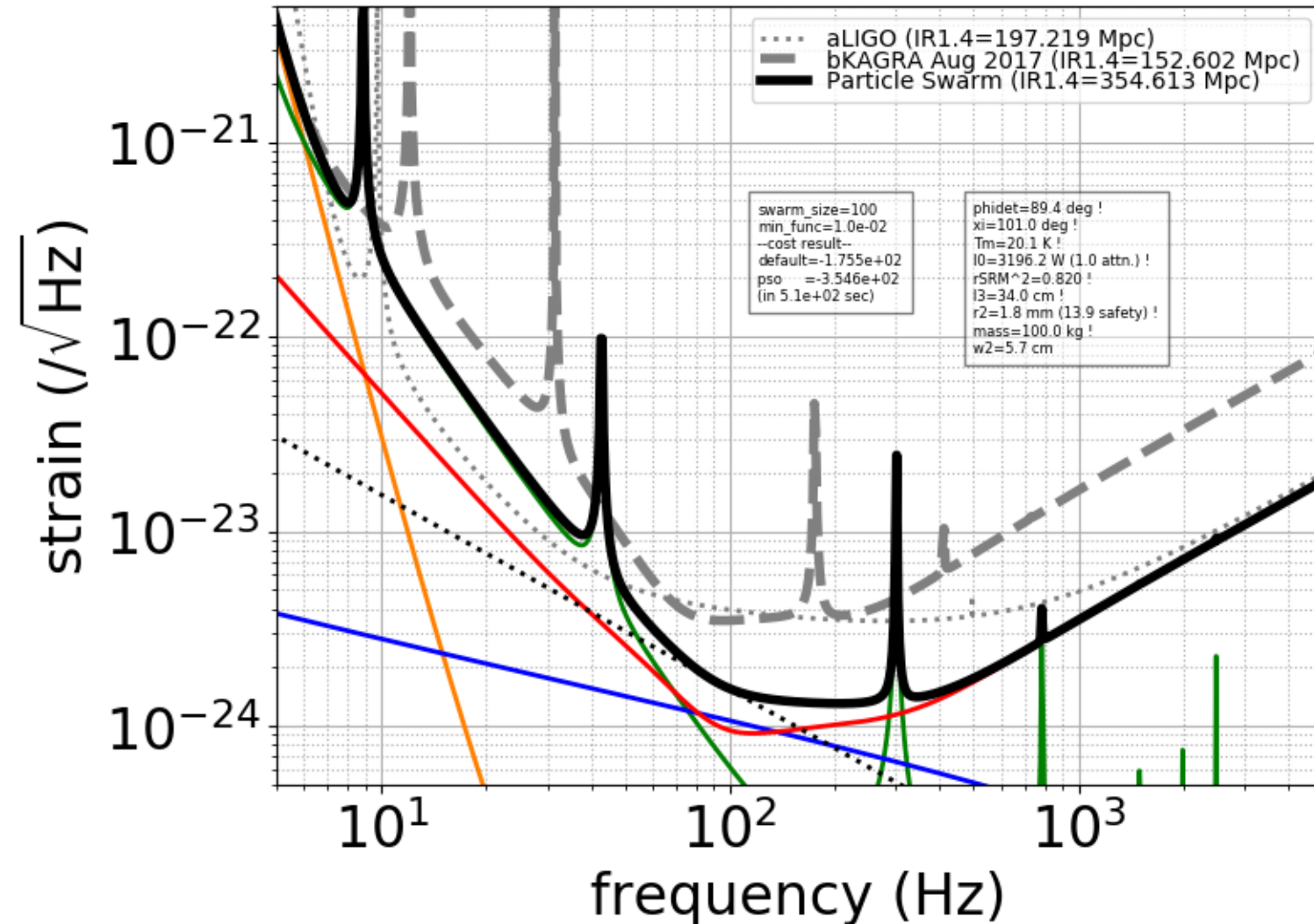
73 W input, 23 kg, 27 cm susp.
10dB input SQZ, 100m FC



広帯域高感度化 Phase2

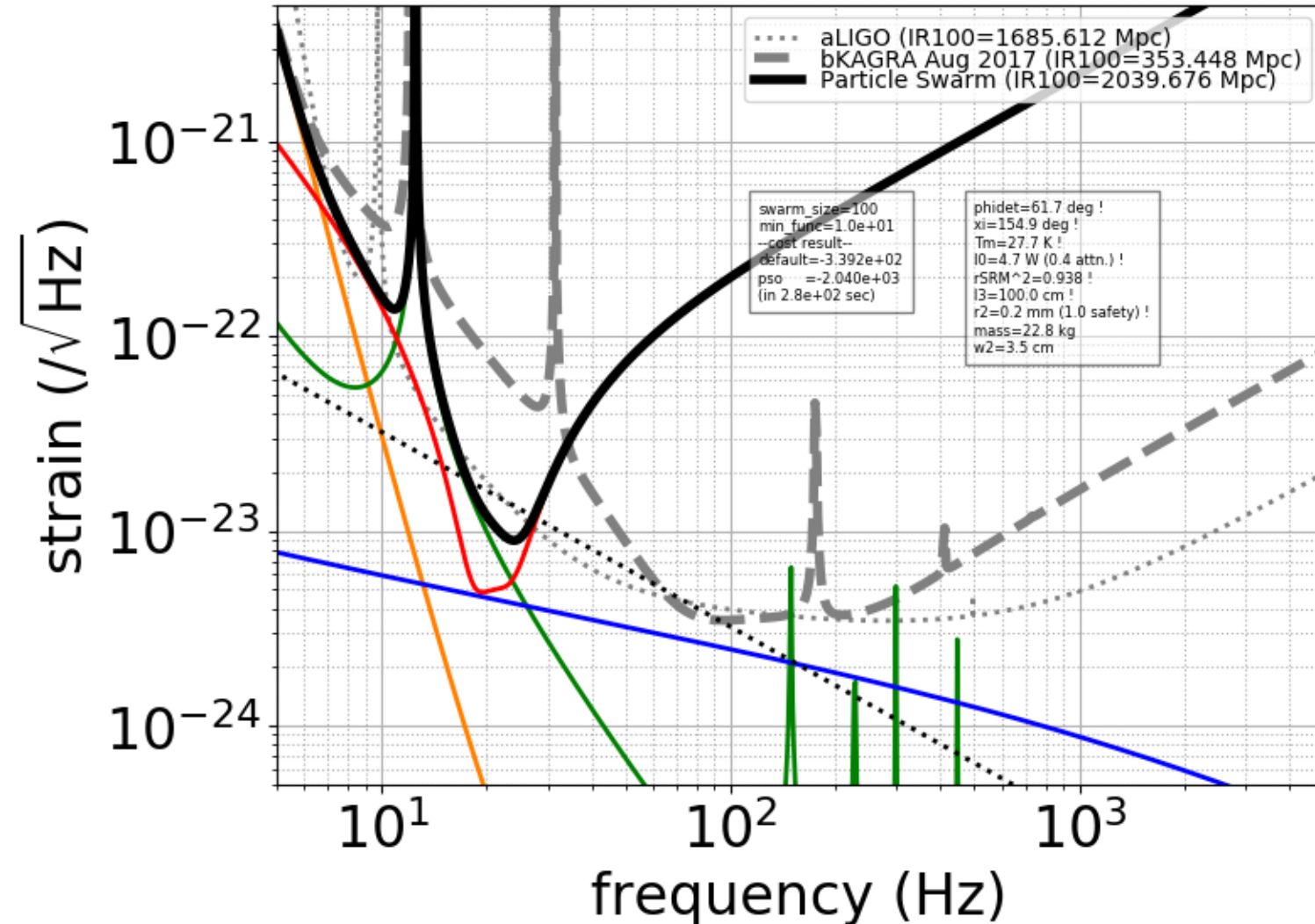
320 W input, 100 kg, 34 cm susp.

10dB input SQZ, 100m FC, coating loss 1/4



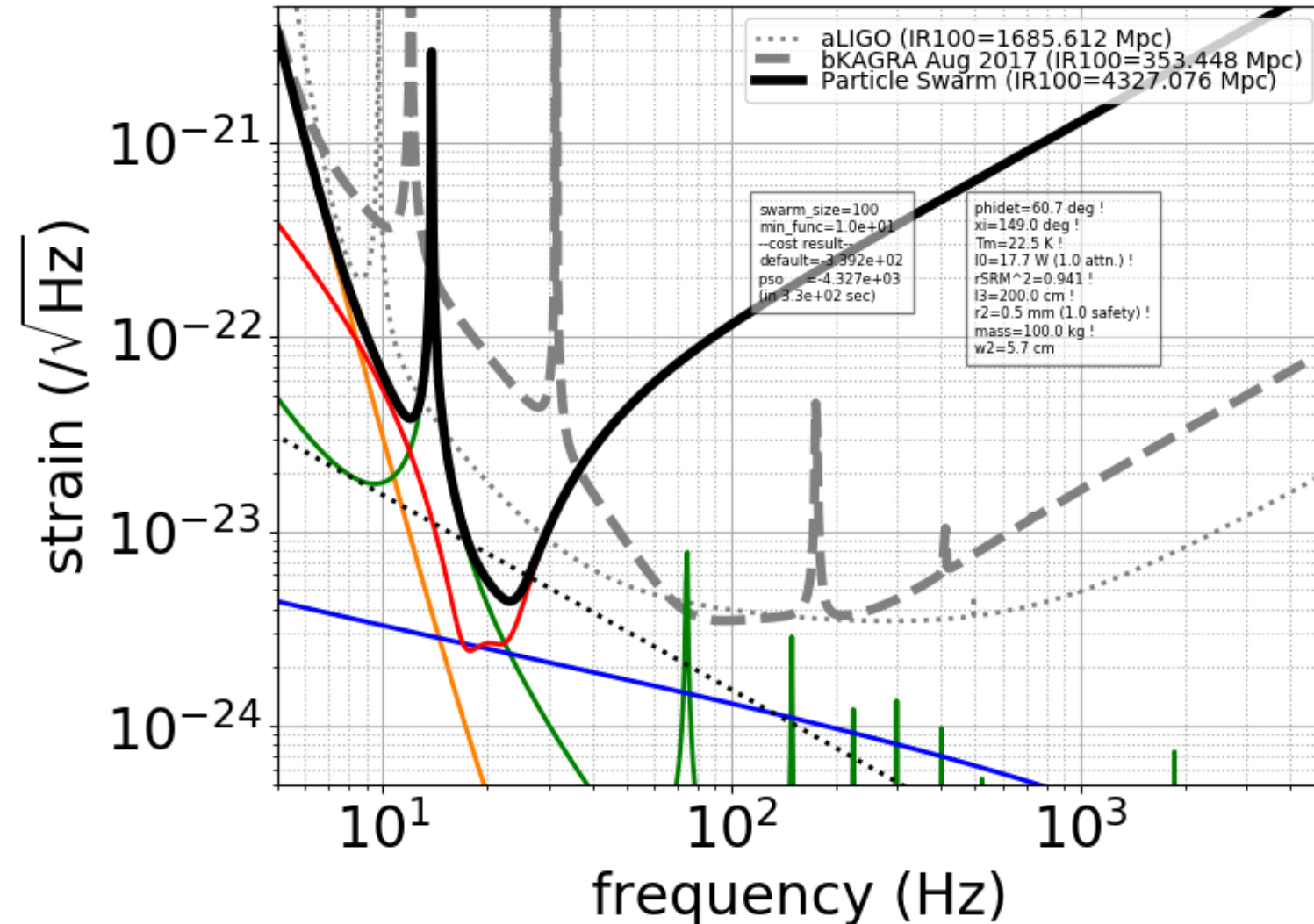
低周波特化 Phase 1

0.5 W input, 23 kg, 100 cm susp.



低周波特化 Phase 2

1.7 W input, 100 kg, 200 cm susp.
coating loss 1/4



高周波特化 Phase 1

340 W input, 23 kg, 20 cm susp.
10 dB input SQZ

