

# 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

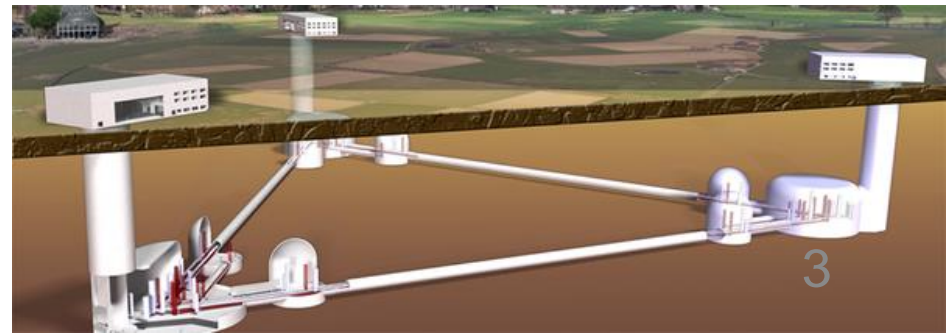
小森健太郎、西澤篤志、武田紘樹、長野晃士、榎本雄太郎、  
端山和大、宗宮健太郎、安東正樹、灰野禎一

# 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

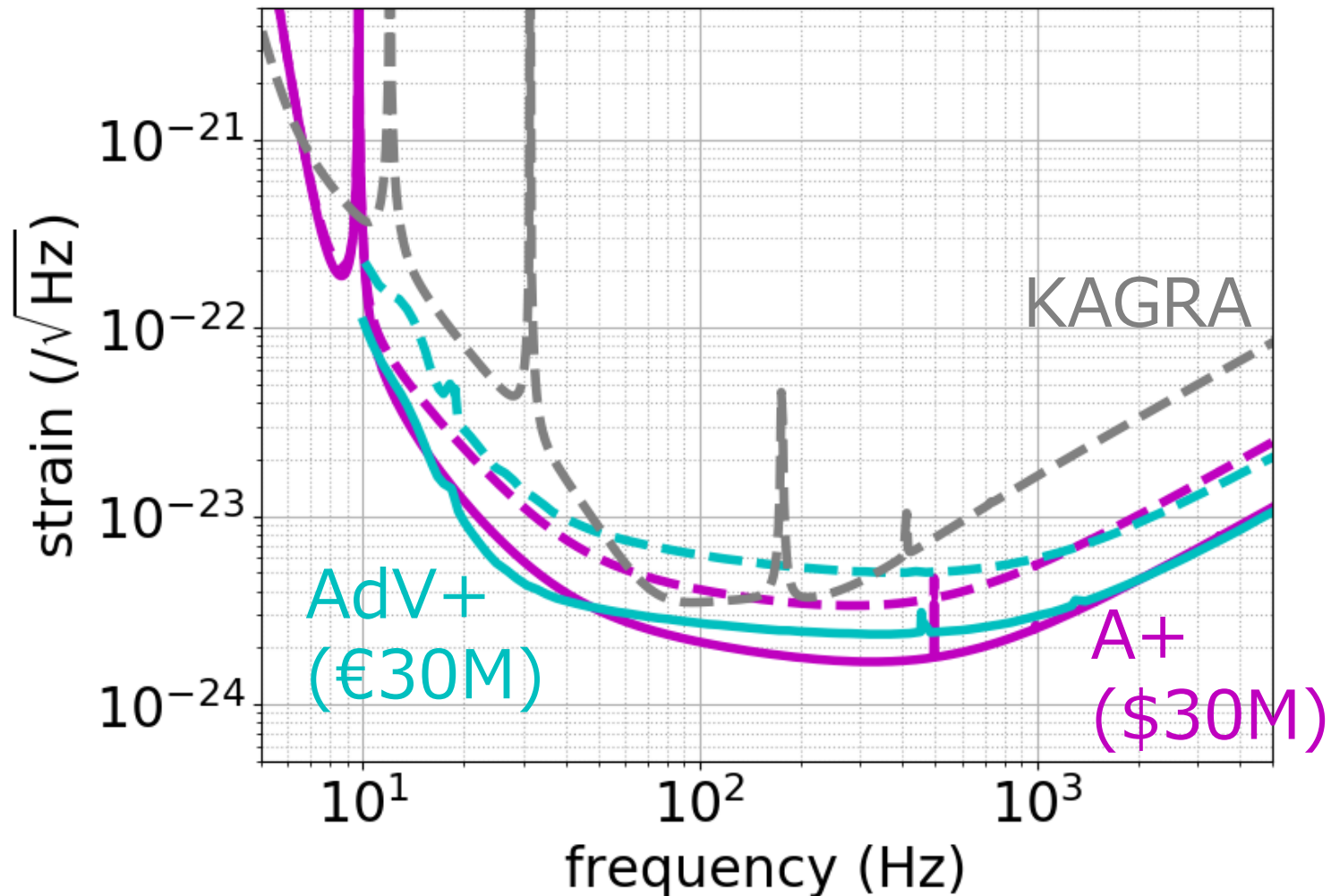
# 重力波物理学・天文学の今後

- 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？



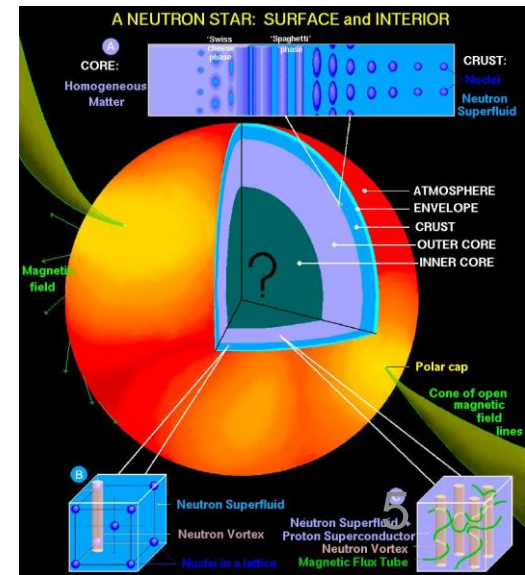
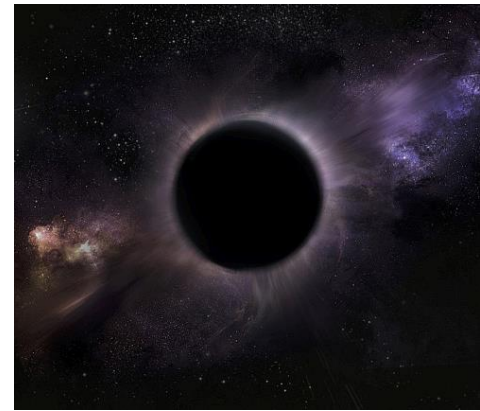
# A+やAdV+の状況

- 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



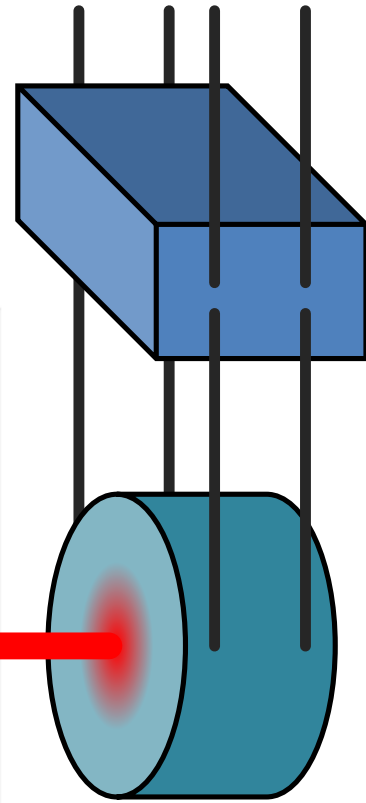
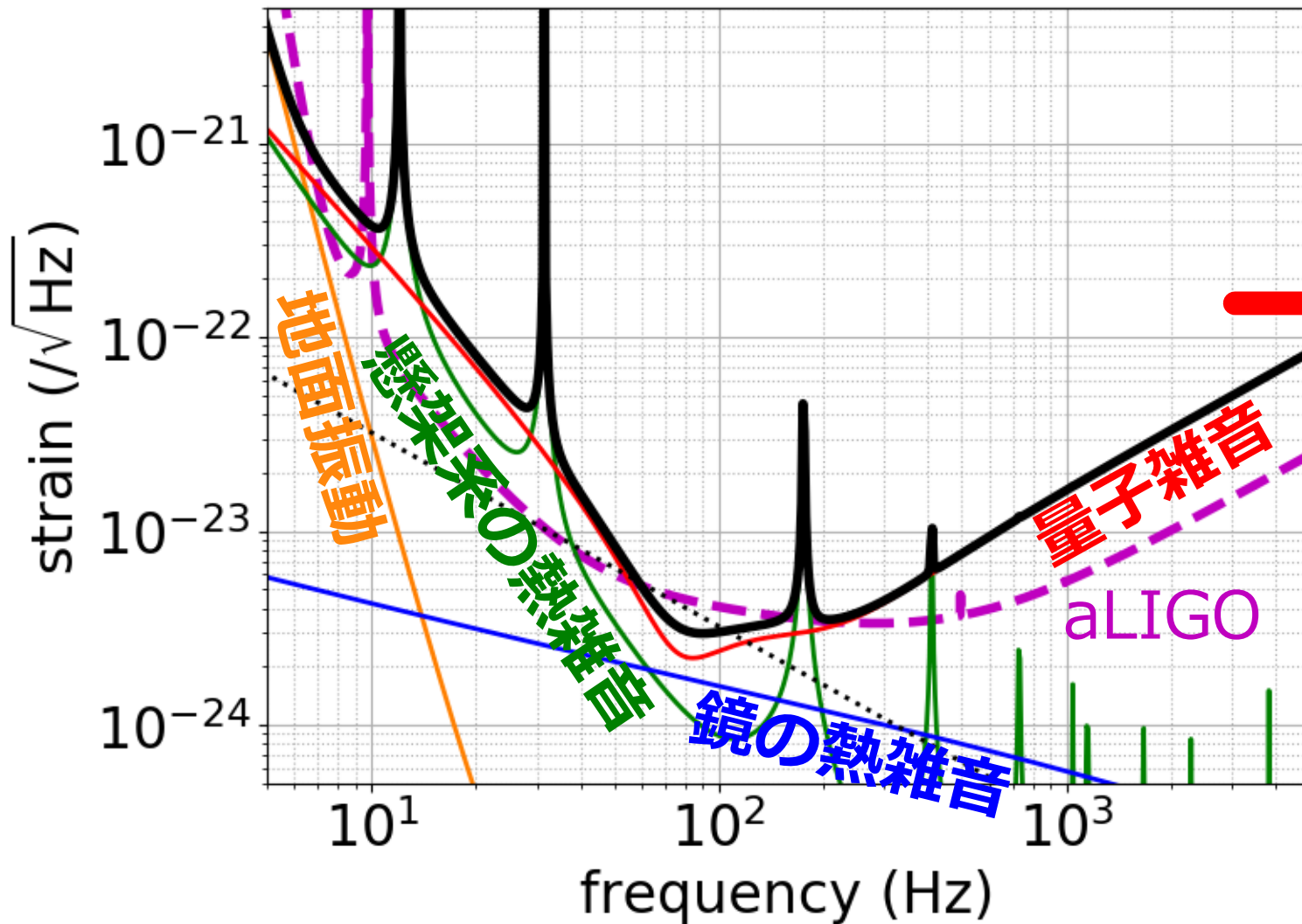
# KAGRAのとり得る将来戦略

- 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

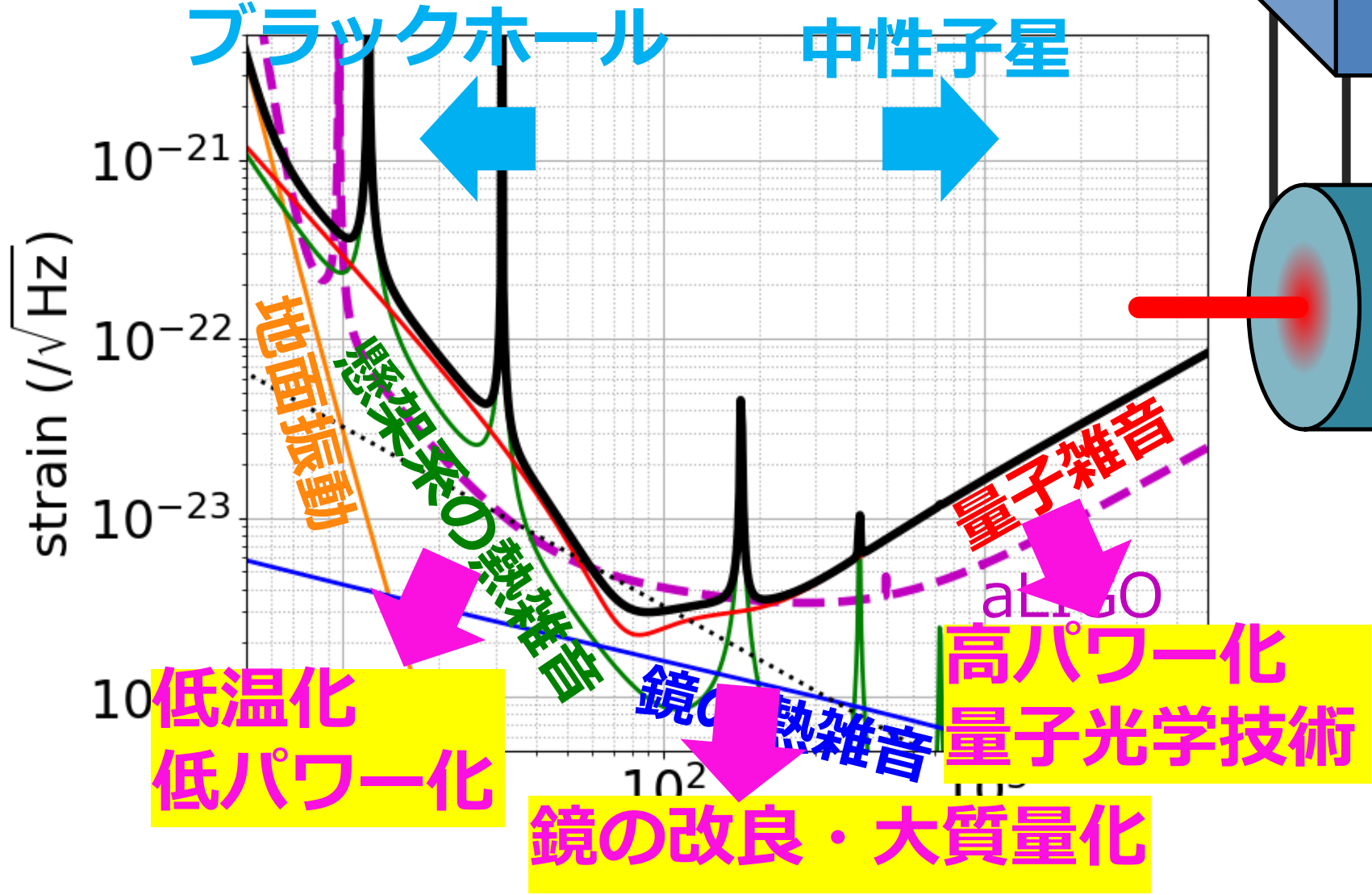
- 低温とレーザーの出力強度の兼ねあい





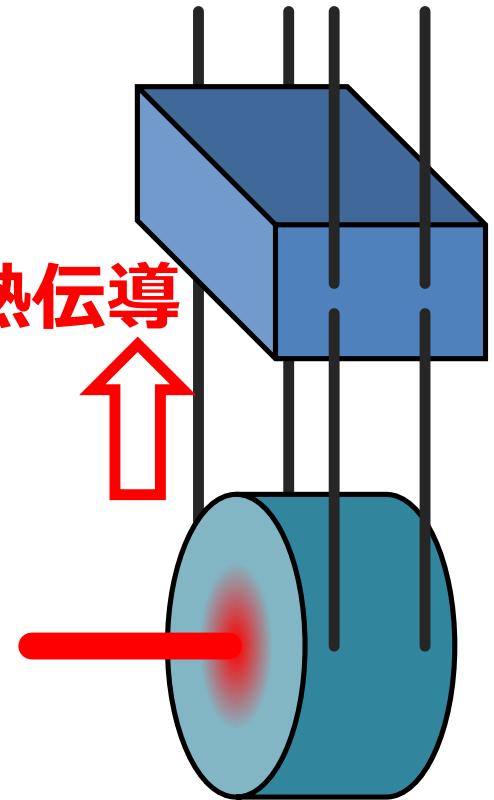
# KAGRAの設計感度

- 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

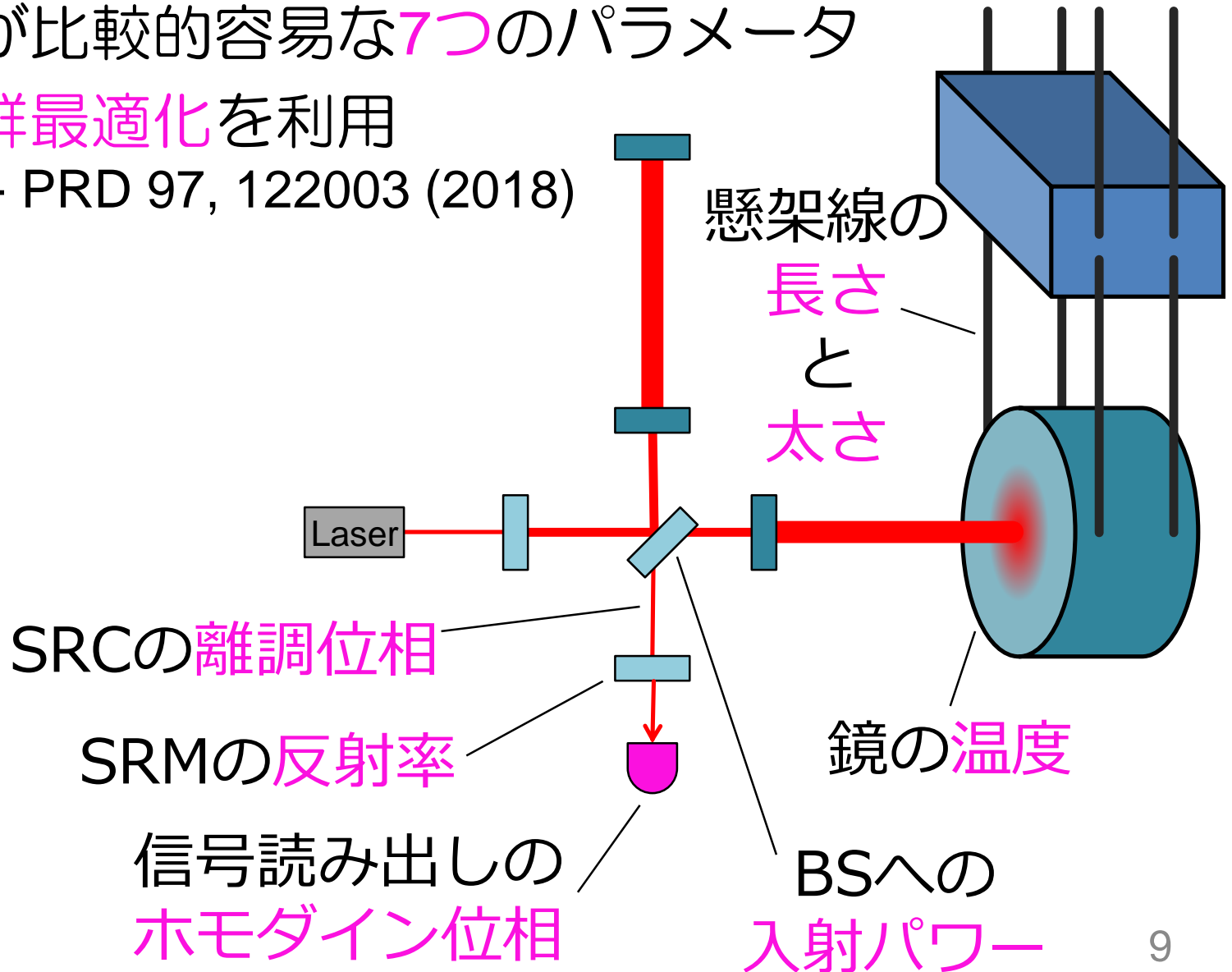
- 広帯域高感度化の場合
  - 周波数依存スキューニング導入
  - 鏡の質量を増やす
  - 1.4Msun連星NSの検出レンジ
- 低周波特化の場合
  - 低パワー化
  - 懸架を細く・長く
  - 100Msun連星BHの検出レンジ
- 高周波特化の場合
  - 高パワー化
  - 懸架を太く・短く
  - 連星中性子星の方向決定精度で最適化





# 最適化の手法

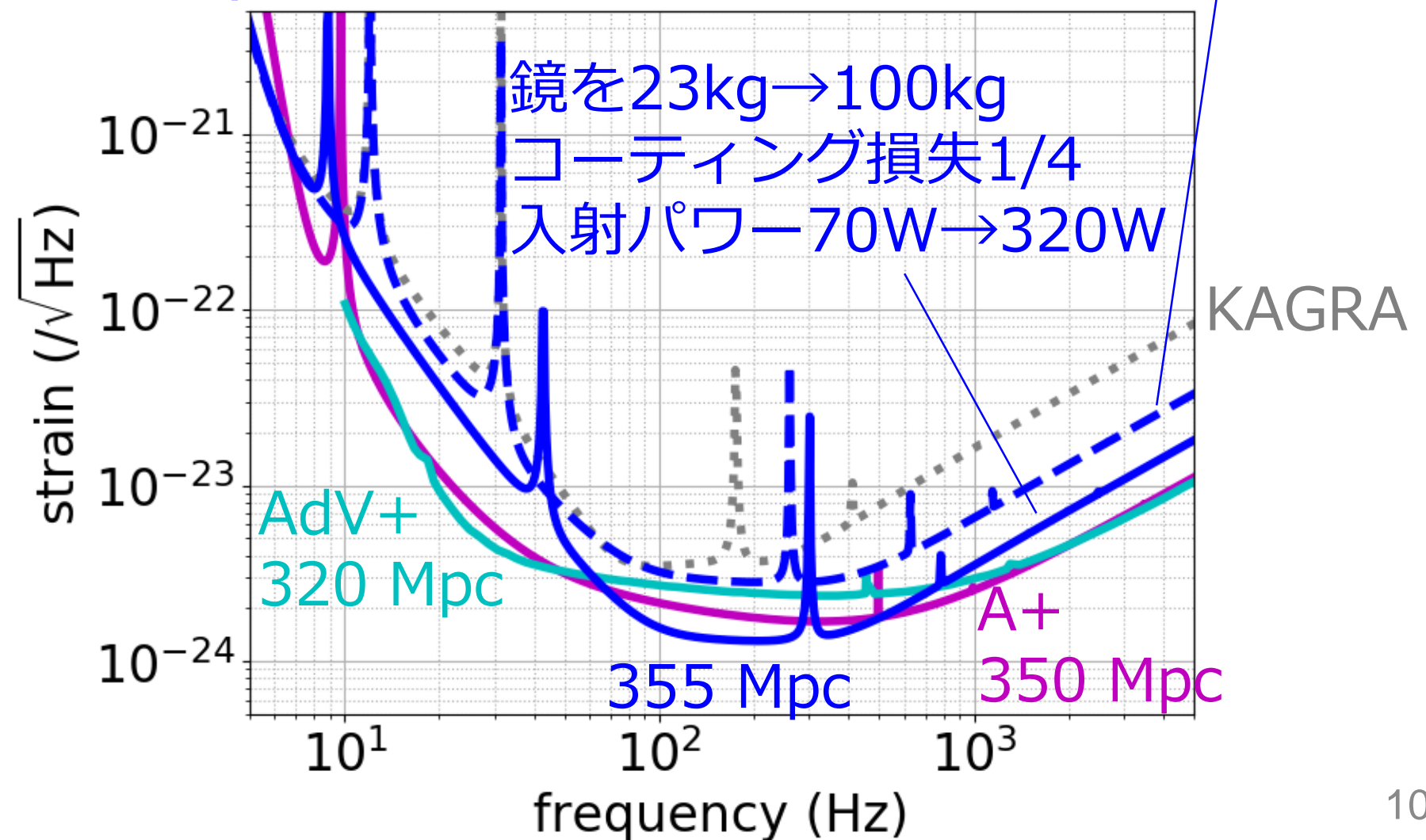
- 変更が比較的容易な7つのパラメータ
- 粒子群最適化を利用  
YM+ PRD 97, 122003 (2018)



# 広帯域高感度化で勝つ

周波数依存スキューニングのみ

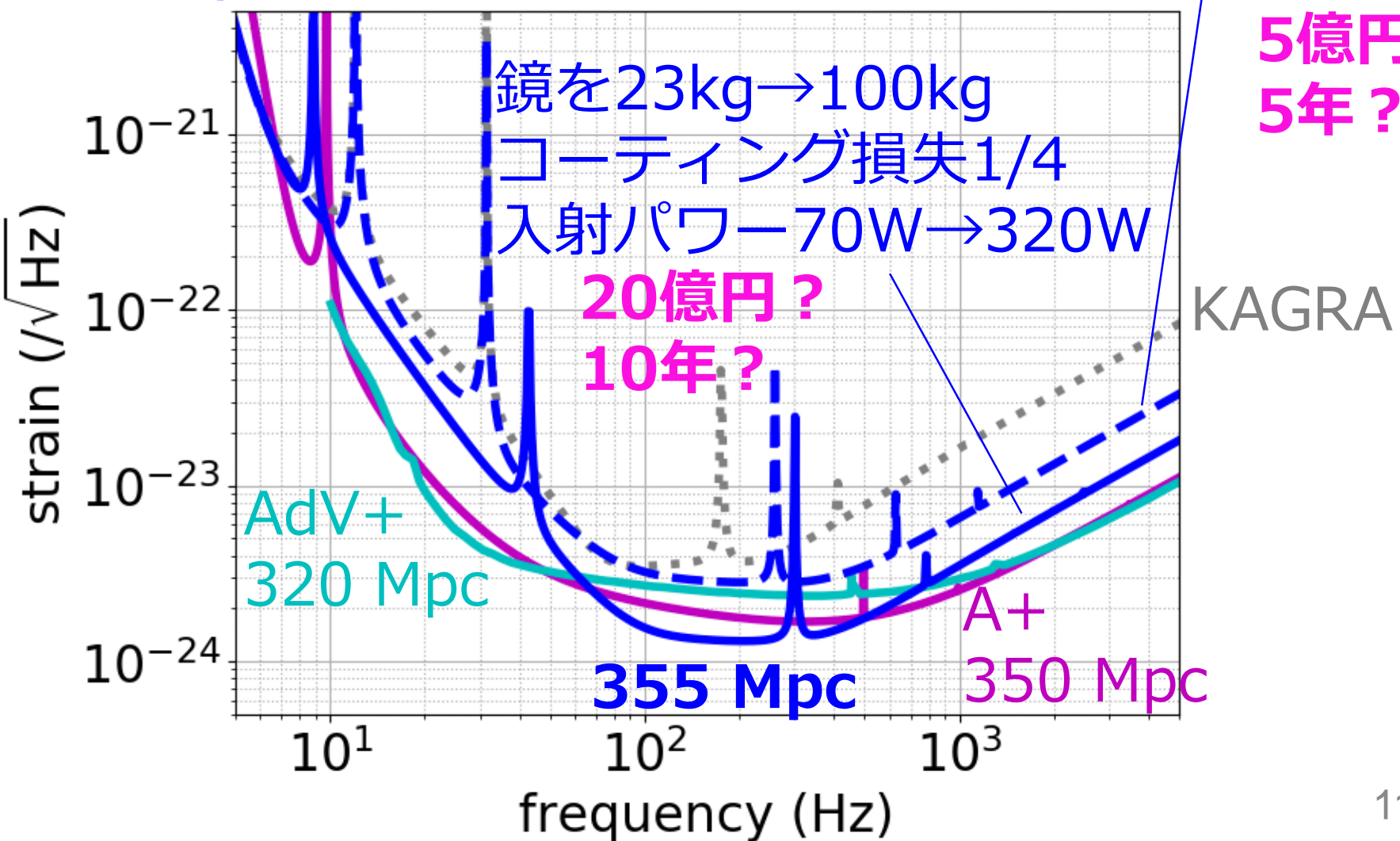
(10dBスキューニング, 100mフィルター共振器)



# 広帯域高感度化で勝つ

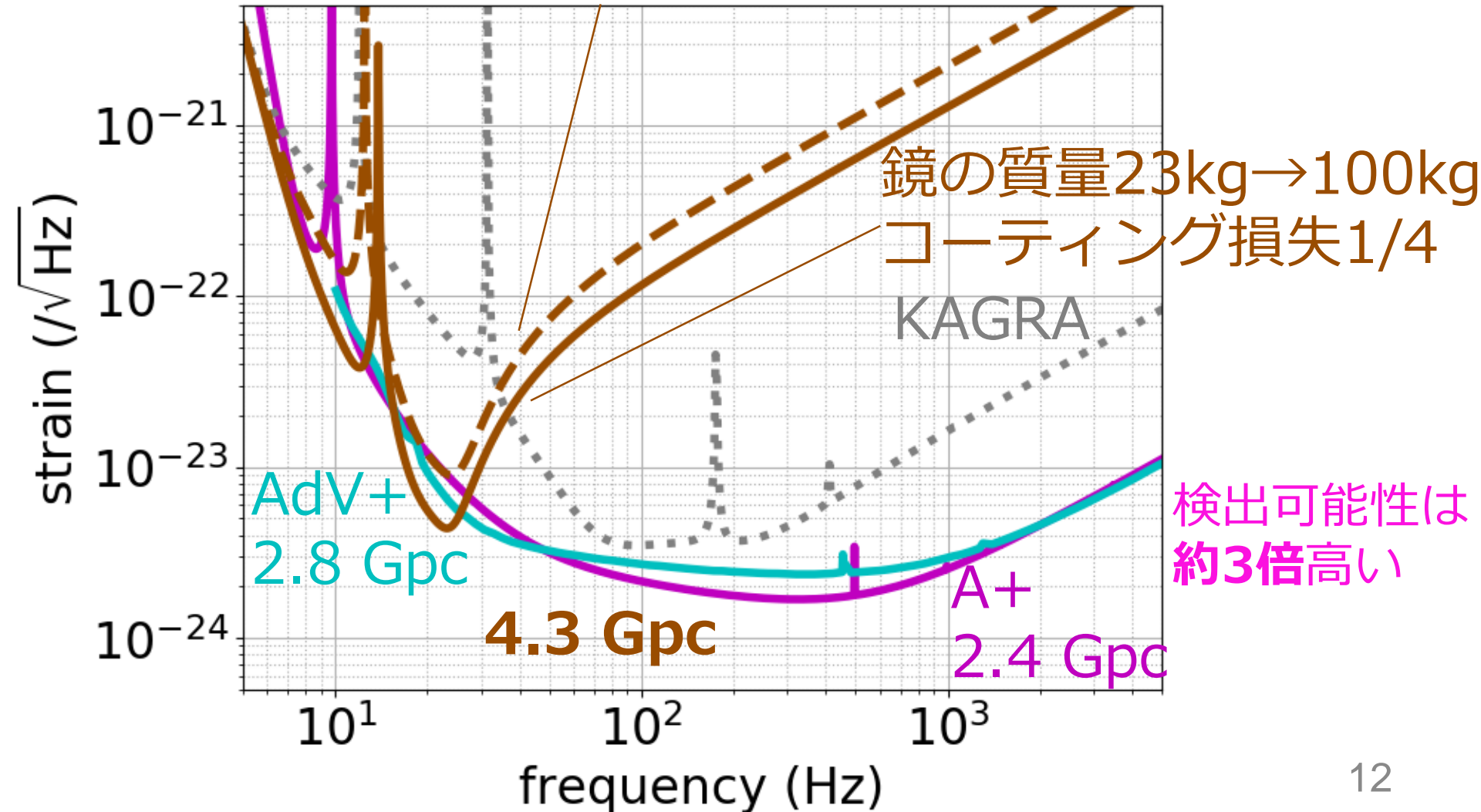
周波数依存スキューニングのみ

(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

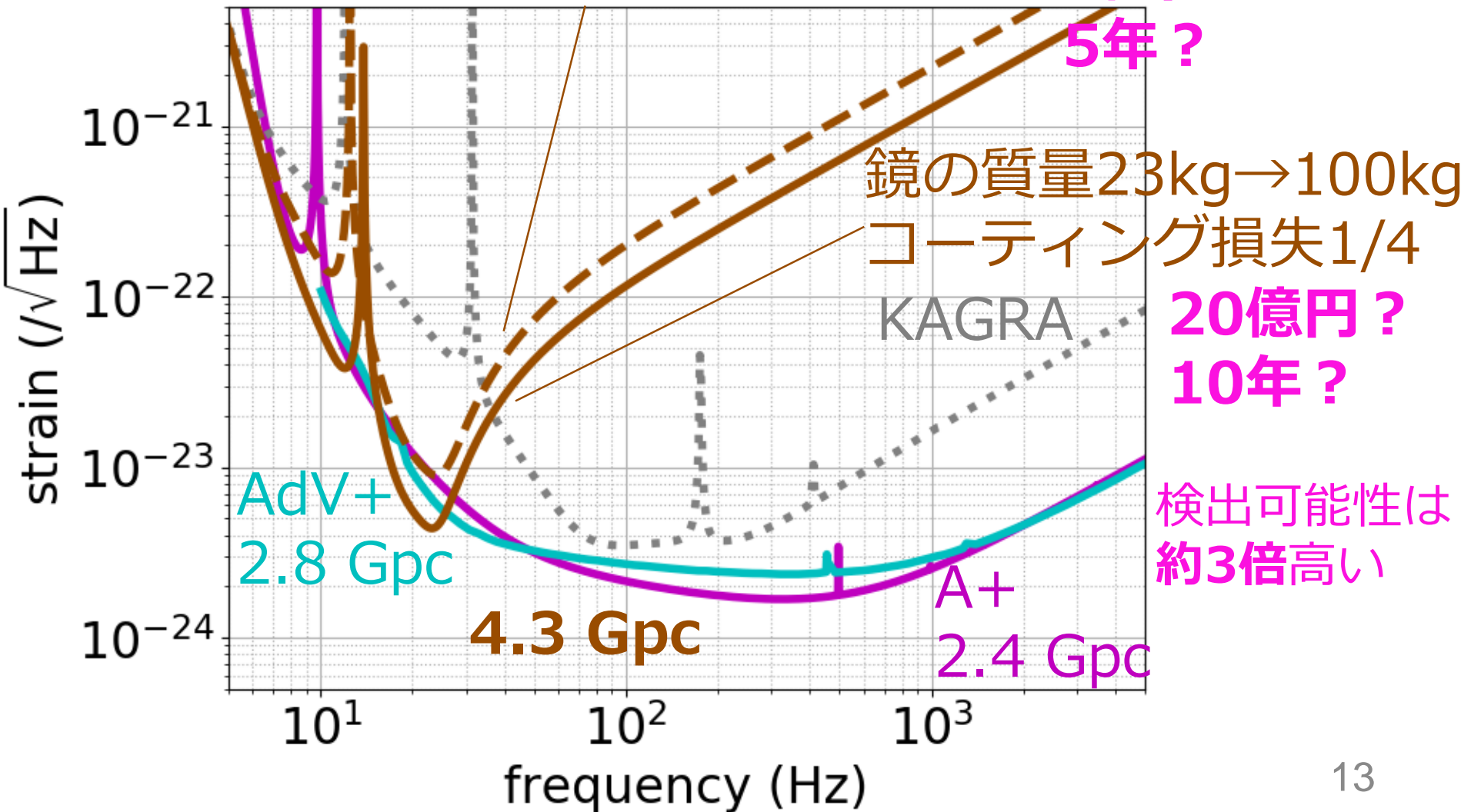


# 低周波特化で勝つ

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?

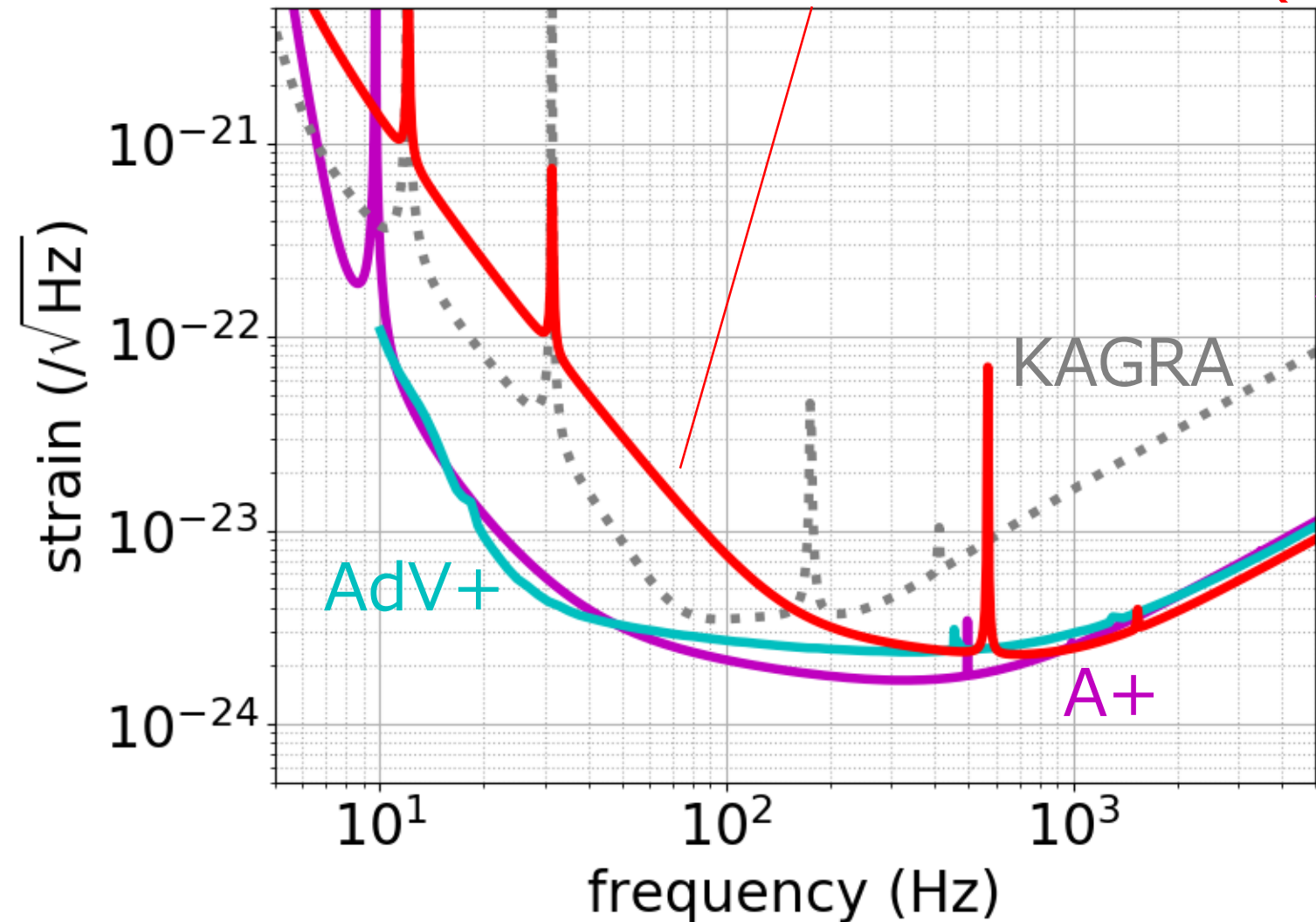
10年?



# 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)



連星中性子星  
の合体後波形  
に対するSNが  
**1.3倍程度**  
高い

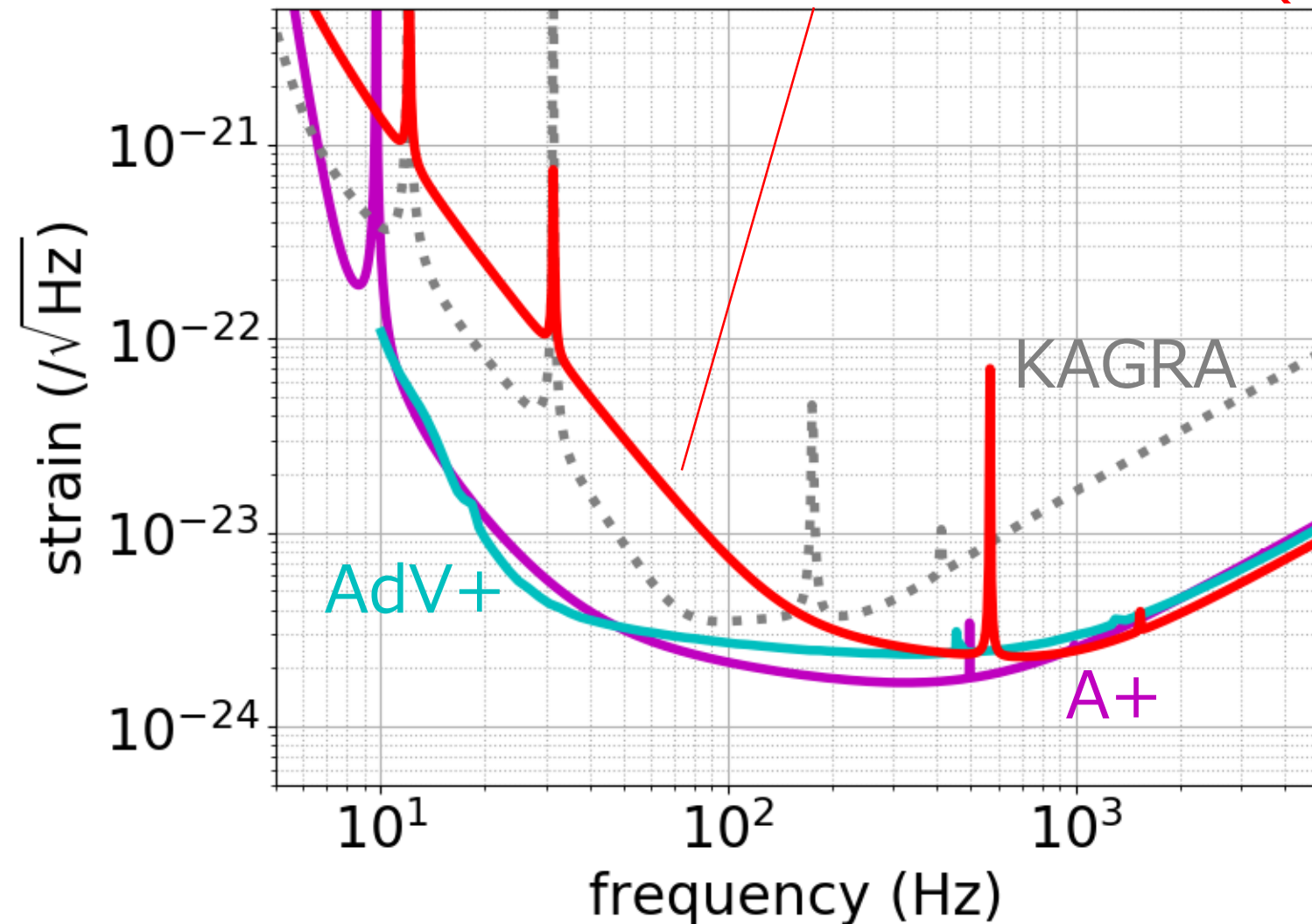
# 高周波特化で勝つ

入射パワー70W→340W

10dBスクイーミング(4.4dB検出)

5億円?

5年?

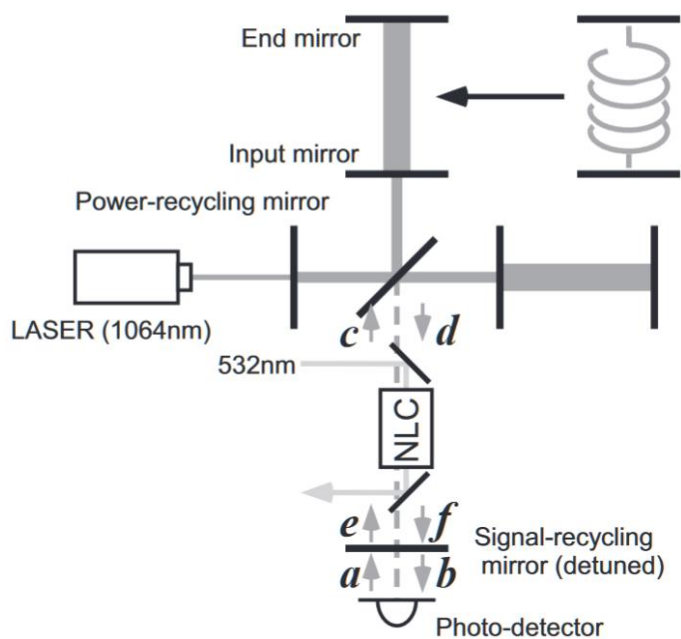


連星中性子星  
の合体後波形  
のSNRが  
**1.3倍程度**  
高い

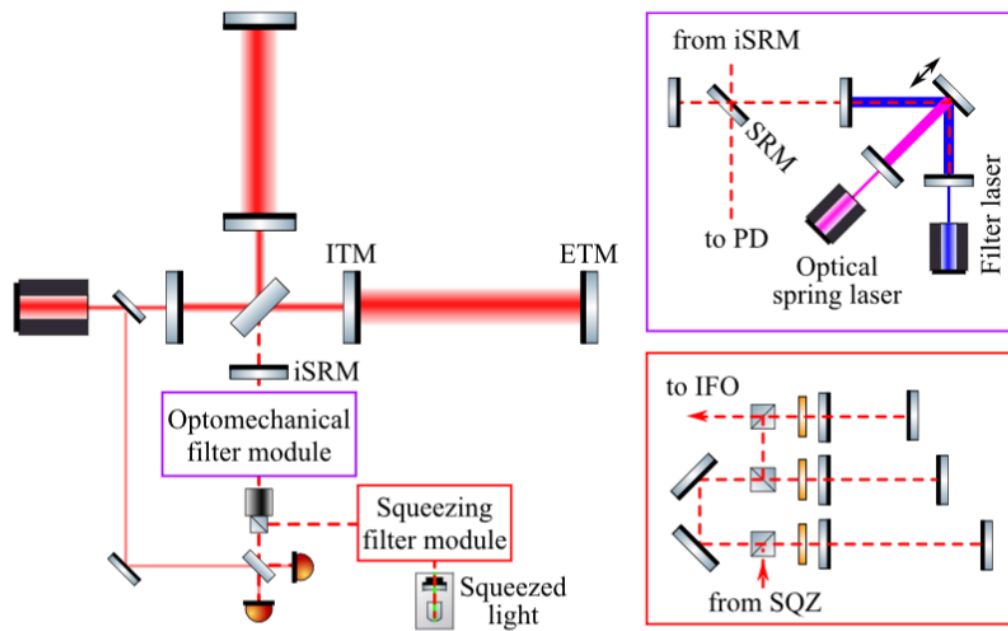


# さらなる高周波特化

- 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 <sup>2</sup> )
	BBH100	BBH30	BNS	
KAGRA	353	1095	153	0.183
広帯域高感度化	785	1956	<b>355</b>	<b>0.100</b>
低周波特化	<b>4327</b>	<b>2285</b>	177	0.479
高周波特化	117	315	123	0.114

- 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
  - 周波数依存スクィージング 😊
  - 100kgのサファイア鏡 😐
- 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) 😐

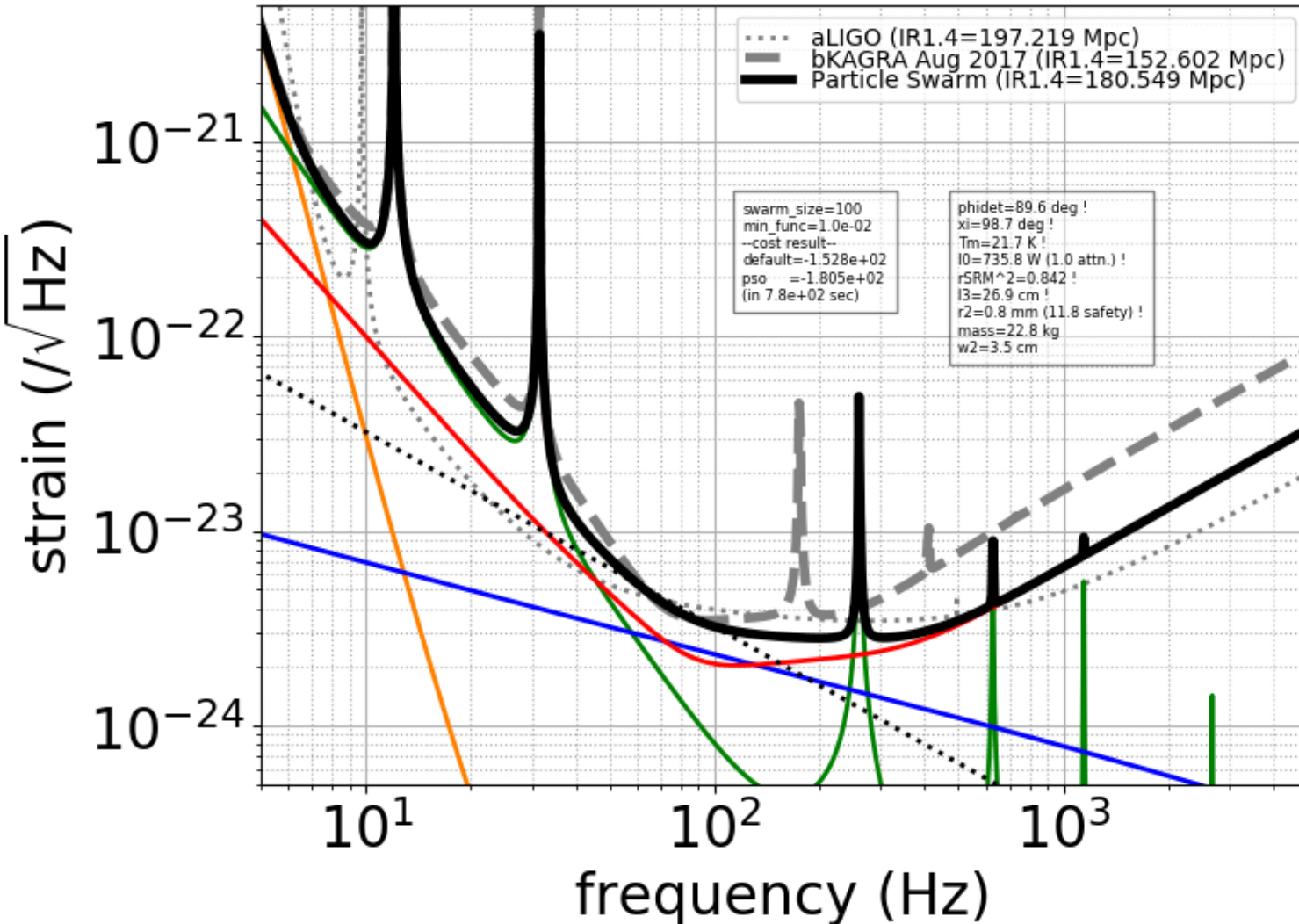
# 結論(私見)

- 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と

補足

# 広帯域高感度化 Phase1

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

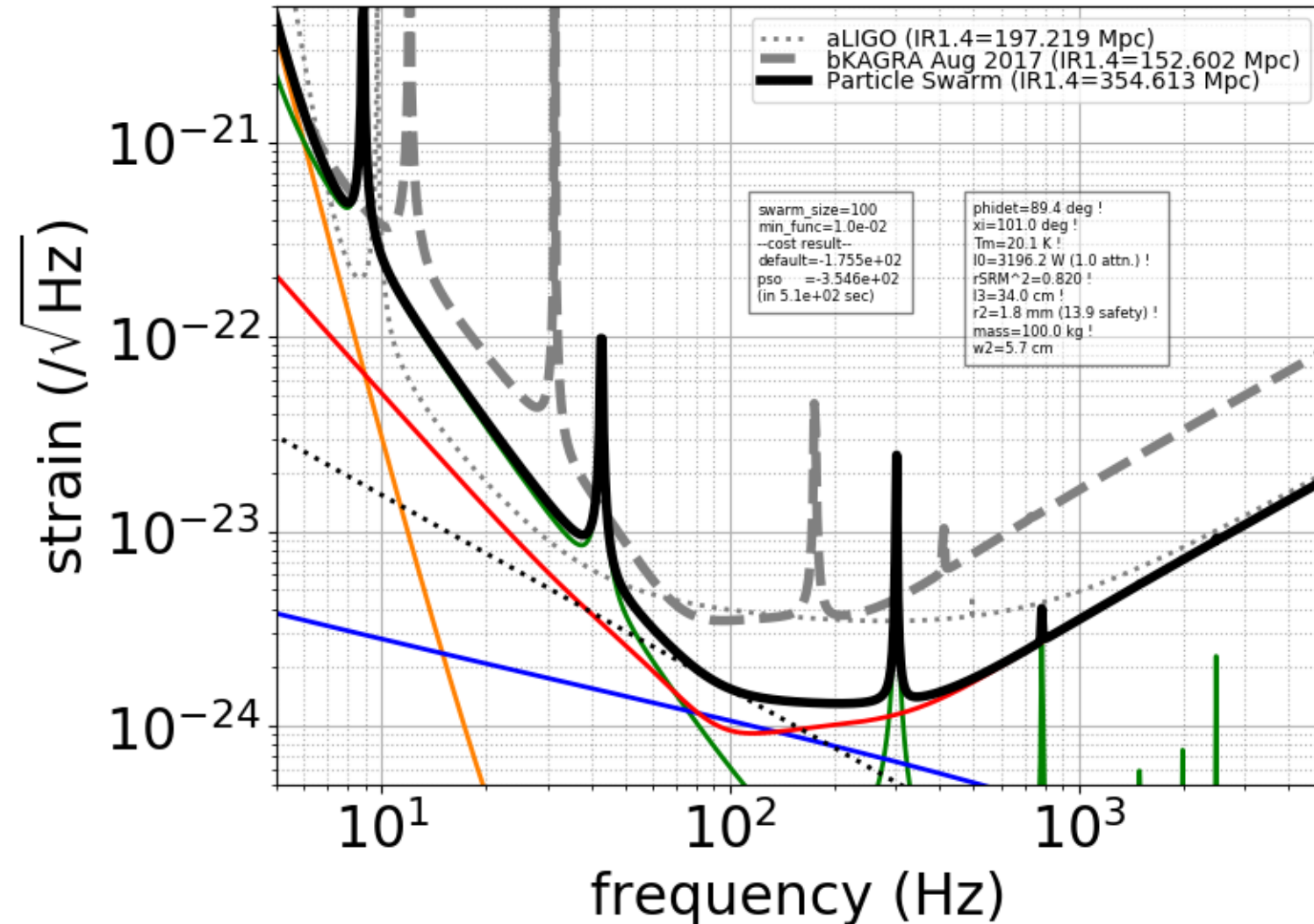




# 広帯域高感度化 Phase2

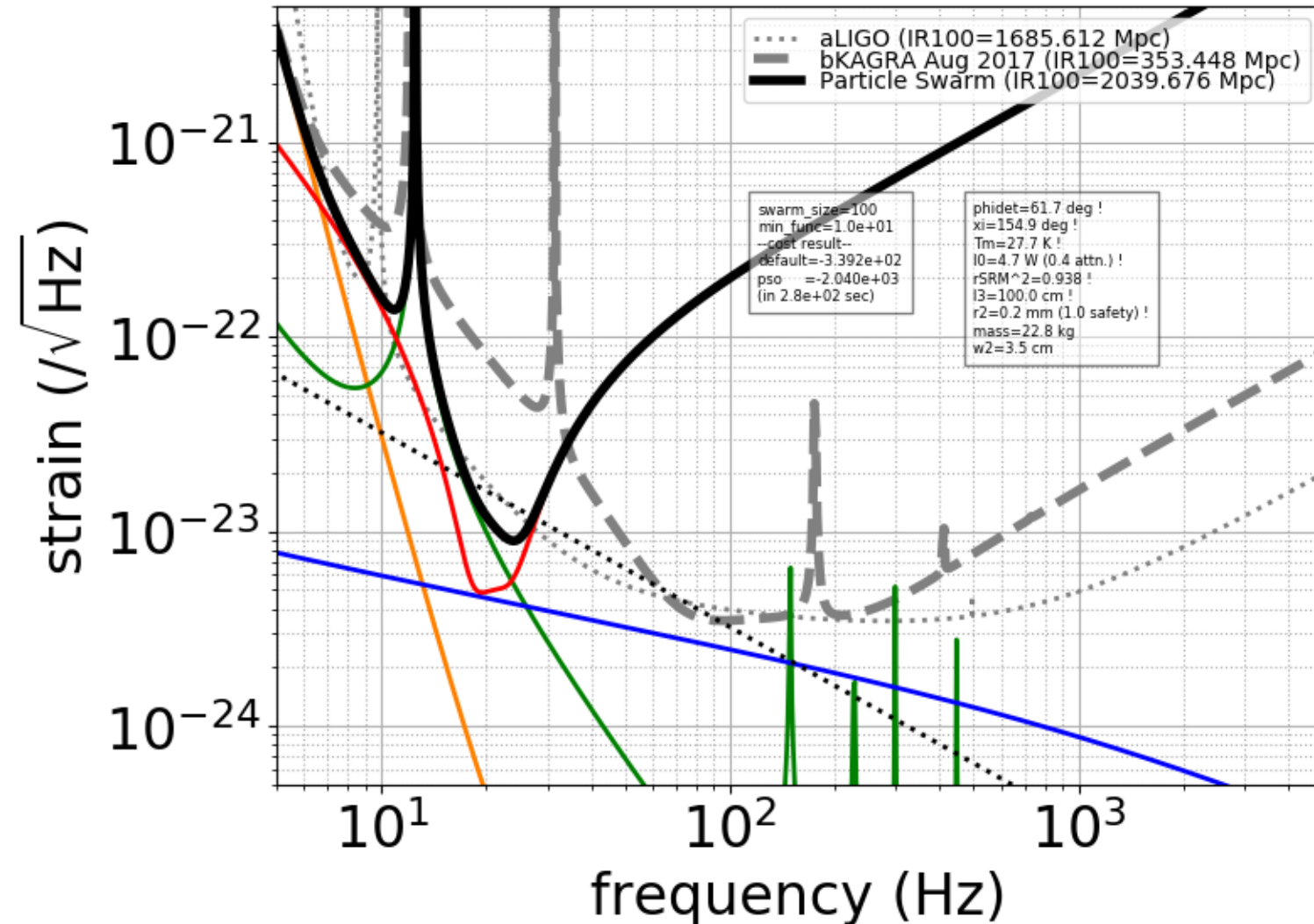
320 W input, 100 kg, 34 cm susp.

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



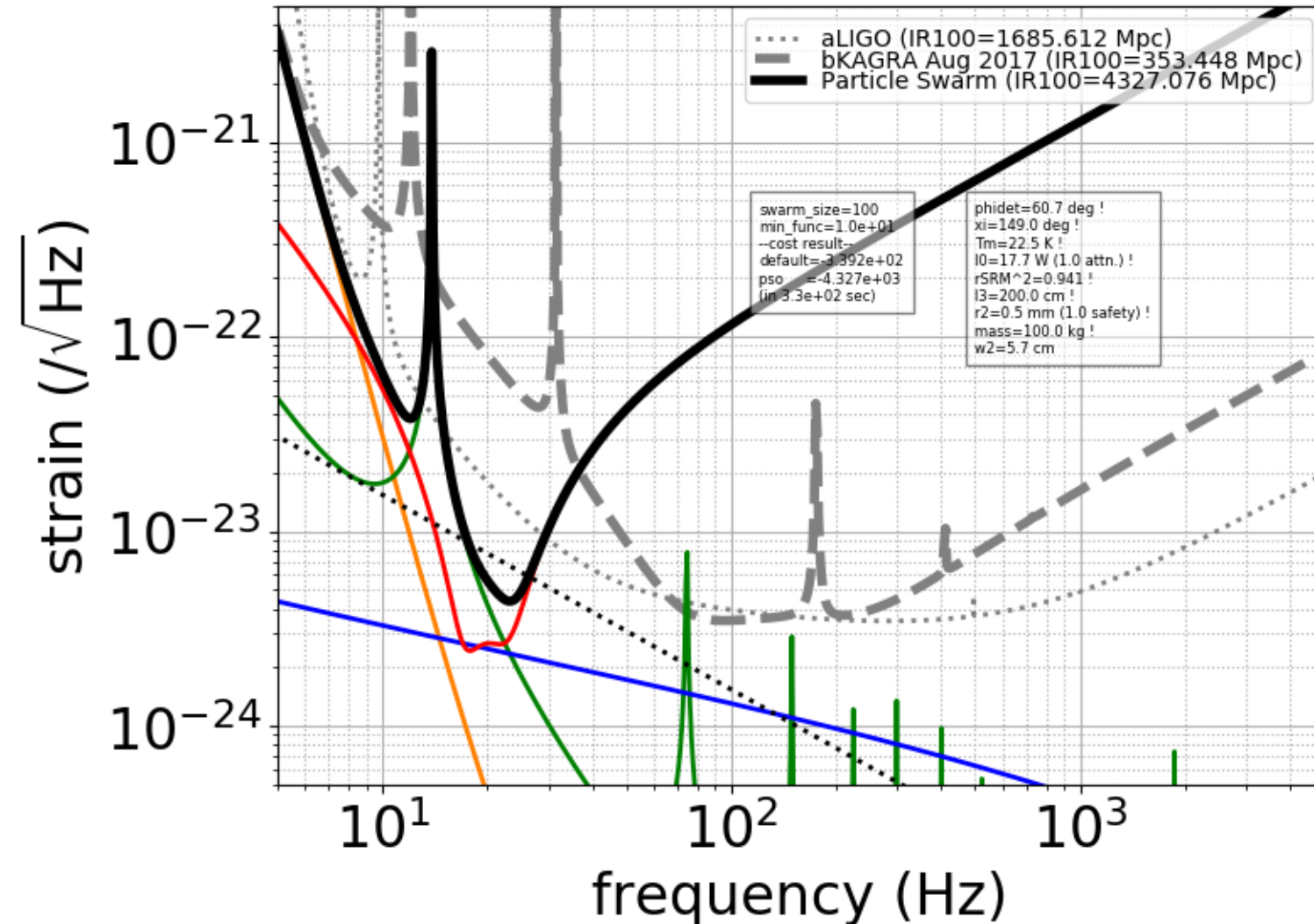
# 低周波特化 Phase 1

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

