

第二世代重力波望遠鏡の高感度化

道村唯太

東京大学 大学院理学系研究科 物理学専攻

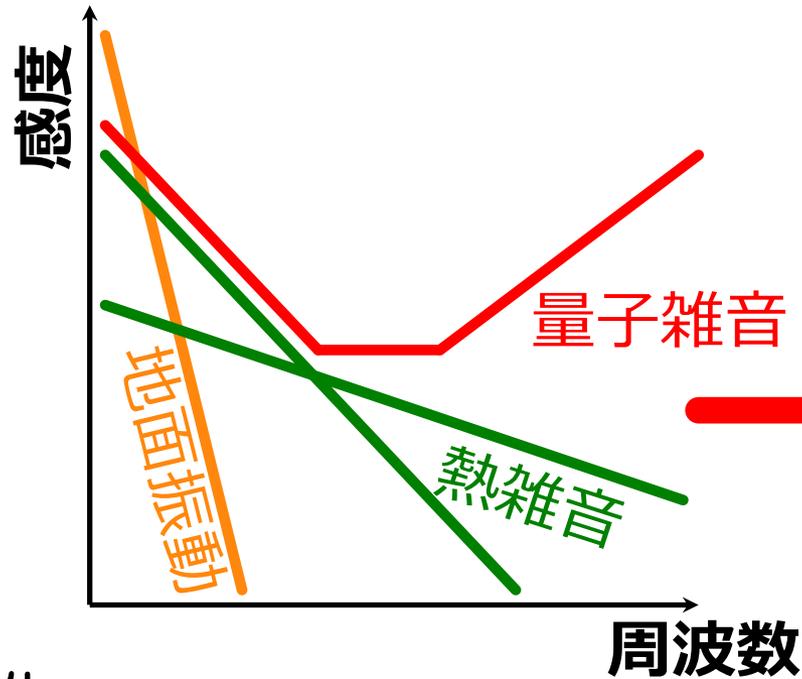
小森健太郎、榎本雄太郎、長野晃士、宗宮健太郎、
灰野禎一、端山和大、西澤篤志、武田紘樹

概要

- 次世代のレーザー干渉計型重力波検出器
鏡を**低温**に → 熱雑音低減
- 低温干渉計の感度設計
低温とレーザー光強度にトレードオフ
複数のパラメータの調整が必要
- **粒子群最適化**を用いた感度設計を初めて提案
- **KAGRA**に適用
既にある部品のパラメータの調整だけで
連星中性子星の検出数の**約25%向上**が可能
- 将来のより複雑な検出器設計に有用

常温干渉計の感度設計は単純

- 地面振動雑音を下げる
多段防振、地下建設
- 熱雑音を下げる
鏡を大きく
懸架ワイヤを
細く、長く



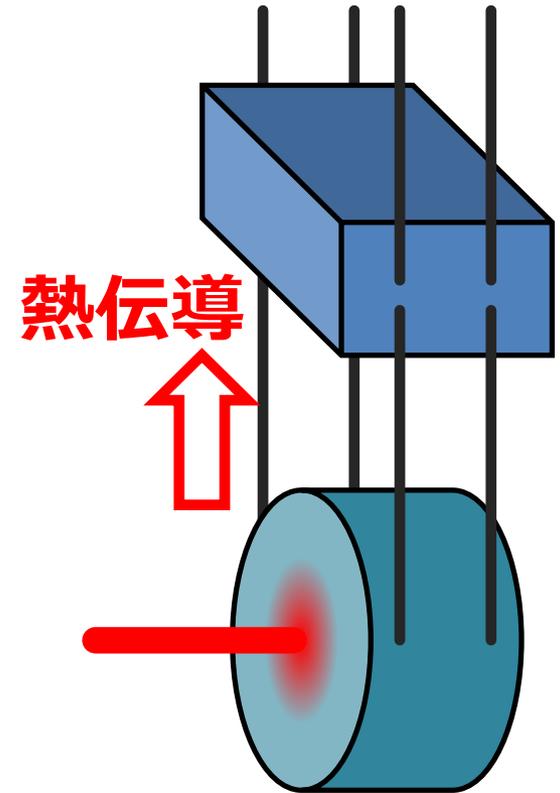
- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

低温干渉計の感度設計は複雑

- 地面振動雑音を下げる
多段防振、地下建設
- 熱雑音を下げる
鏡を大きく
懸架ワイヤを
細く、長く

鏡を冷やす

- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整



低温干渉計の感度設計は複雑

- 地面振動雑音を下げる
多段防振、地下建設
- 熱雑音を下げる
鏡を大きく
懸架ワイヤを
細く、長く

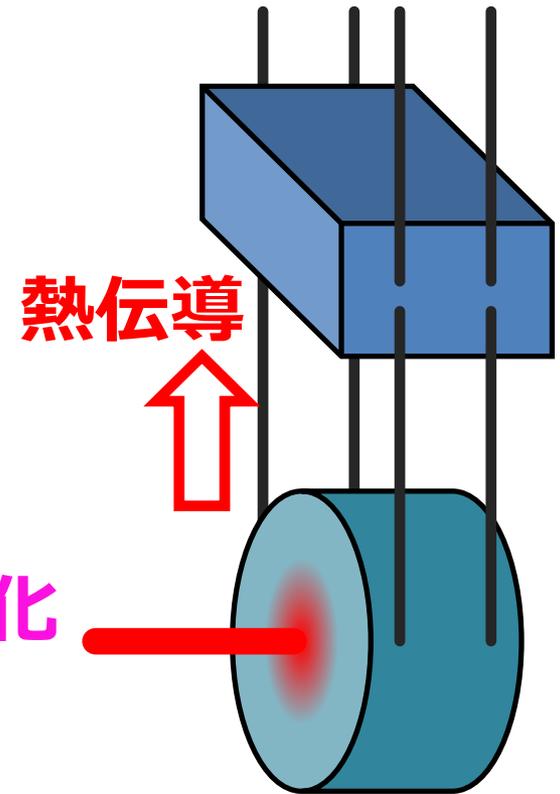
鏡を冷やす

冷却効率の悪化

鏡の熱吸収

- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

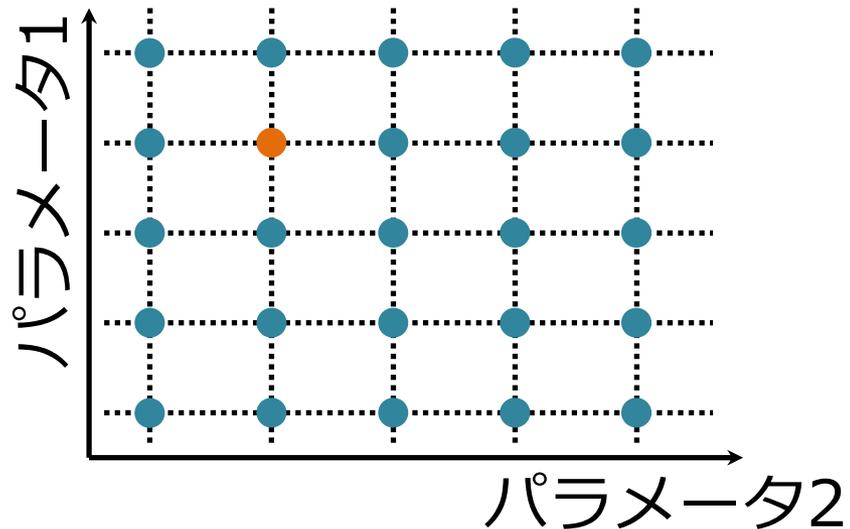
量子雑音と熱雑音を
独立に計算できない



従来の感度設計の問題点

- 従来の感度設計
設計者の**経験と勘**に基づいて、
パラメータを少しずつ変えながら調整
(グリッドに基づく最適化)
- 問題点
パラメータの数が増えると**指数関数的に**
グリッドの数が増える

- 将来のより複雑な
設計に従来手法を
使うのは
ほとんど不可能



そこで粒子群最適化

- 複数の**粒子**(パラメータセット)を用いて多次元空間における最適な位置を探索
- 粒子の位置と速度

$$x_k(t+1) = x_k(t) + v_k(t)$$

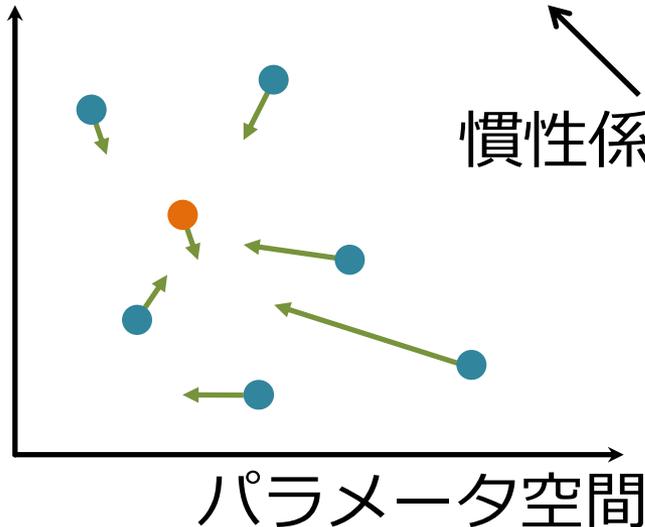
自分自身の
これまでで
最適な位置

粒子群全体の
これまでで
最適な位置

$$v_k(t+1) = wv_k(t) + c_1r_1(\hat{x}_k - x_k(t)) + c_2r_2(\hat{x}_g - x_k(t))$$

慣性係数 w (~ 1)

係数 c (~ 1)
乱数 $r \in [0,1]$



自身と群の情報を用いて
ステップ幅を調整

粒子群最適化の特徴

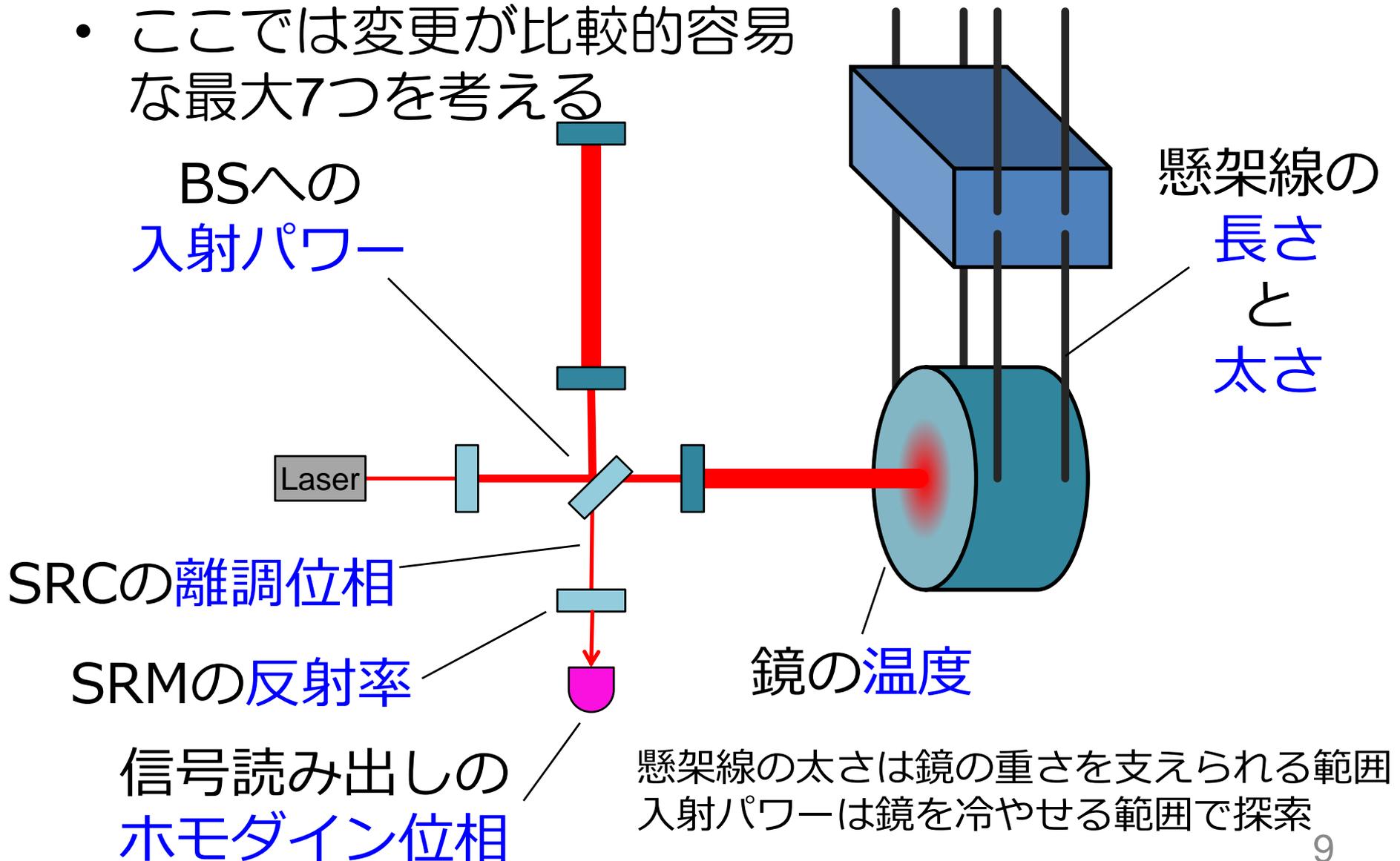
- 粒子群全体の情報を使うので、
多次元パラメータ空間を早く探索できる 😊
- 設計に必要な変数や事前情報が少ない
基本的に粒子数と反復の止め方だけ 😊
事前情報は探索範囲だけ
- 得られた解が局所解でない保証がない
どの確率的最適化手法でも同じ 😞
- 解付近での分布は直接的にはわからない
パラメータの誤差を与えない 😞

→ 検出器の感度設計には適している

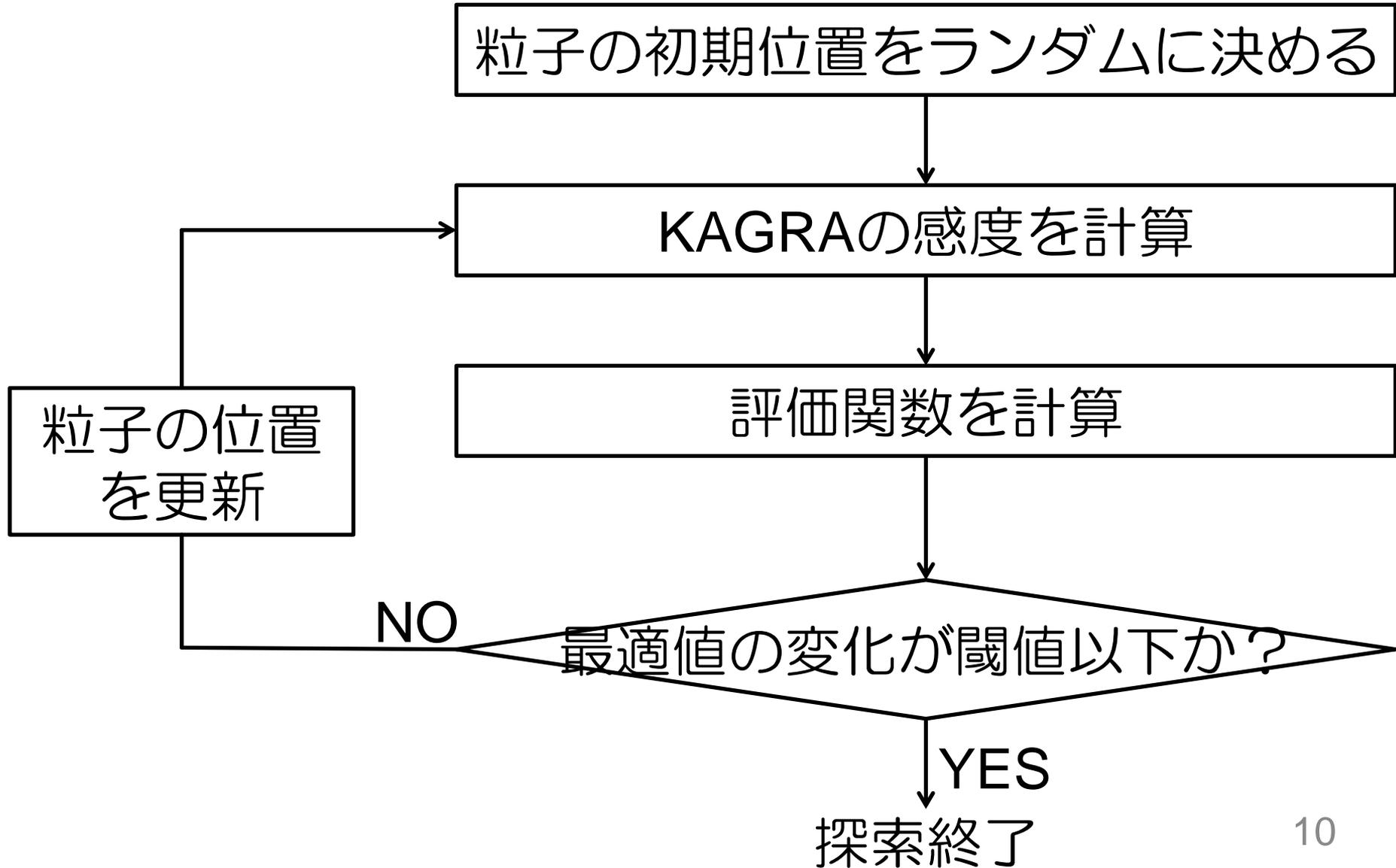
→ 低温重力波検出器KAGRAに適用する

最適化に用いるKAGRAパラメータ

- ここでは変更が比較的容易な最大7つを考える



最適化の流れ



最適化の流れ

粒子数は
収束性から決定

(30 or 100 or 500)

粒子の初期位置をランダムに決める

KAGRAの感度を計算

評価関数を計算

評価関数はまずは
連星中性子星レンジ

粒子の位置
を更新

NO

最適値の変化が閾値以下か？

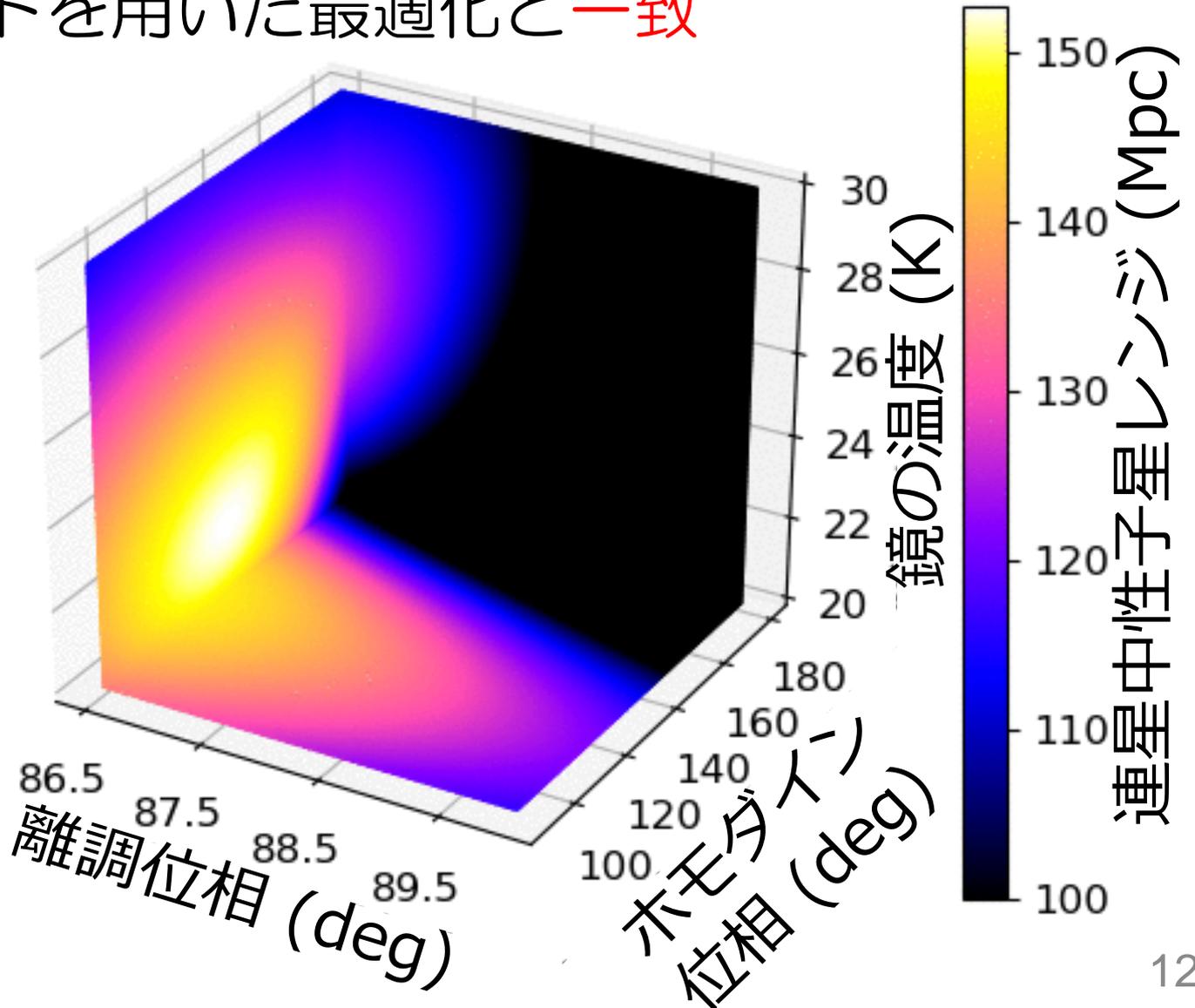
閾値は0.01 Mpc

YES

探索終了

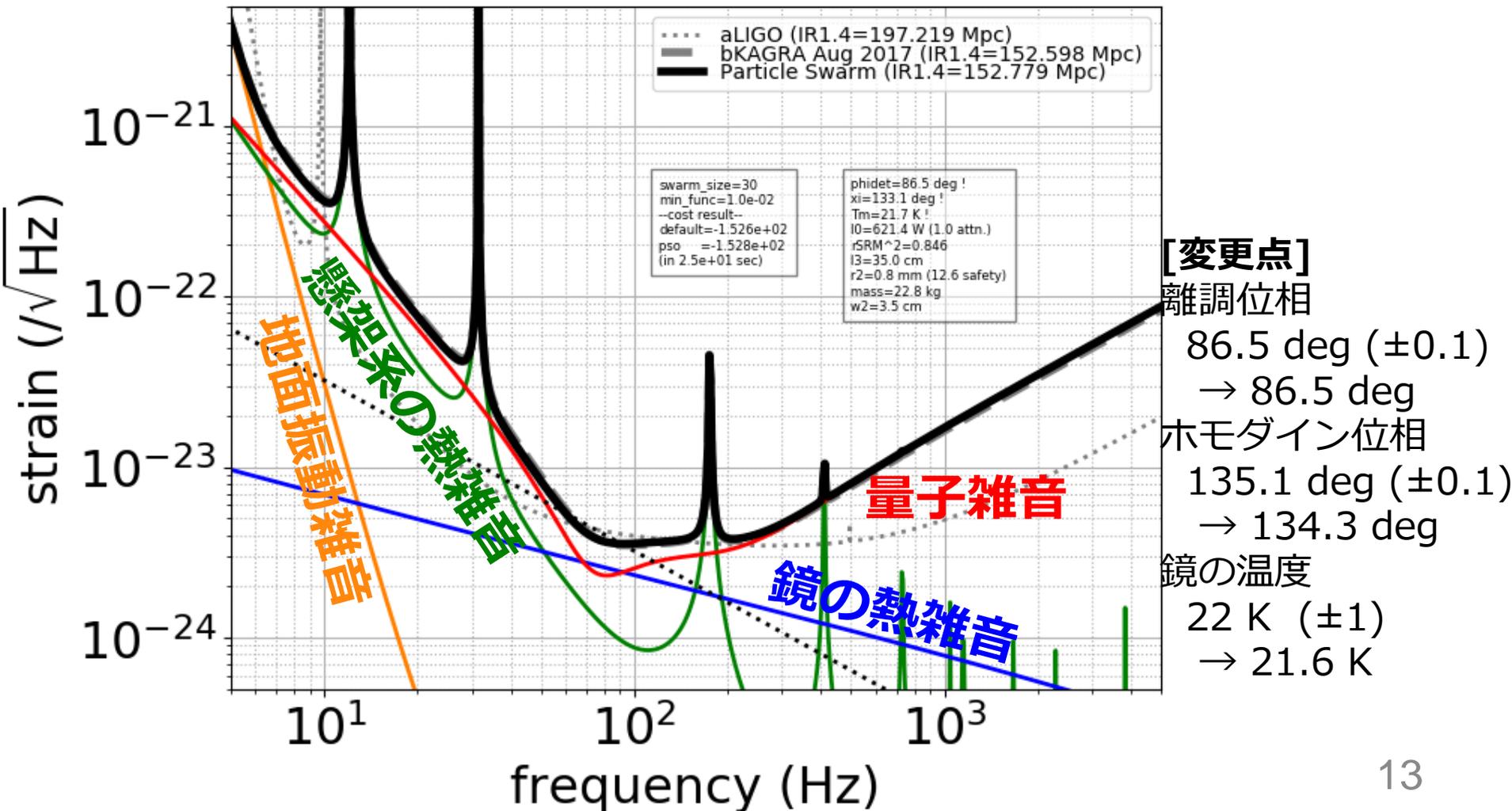
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- グリッドを用いた最適化と一致



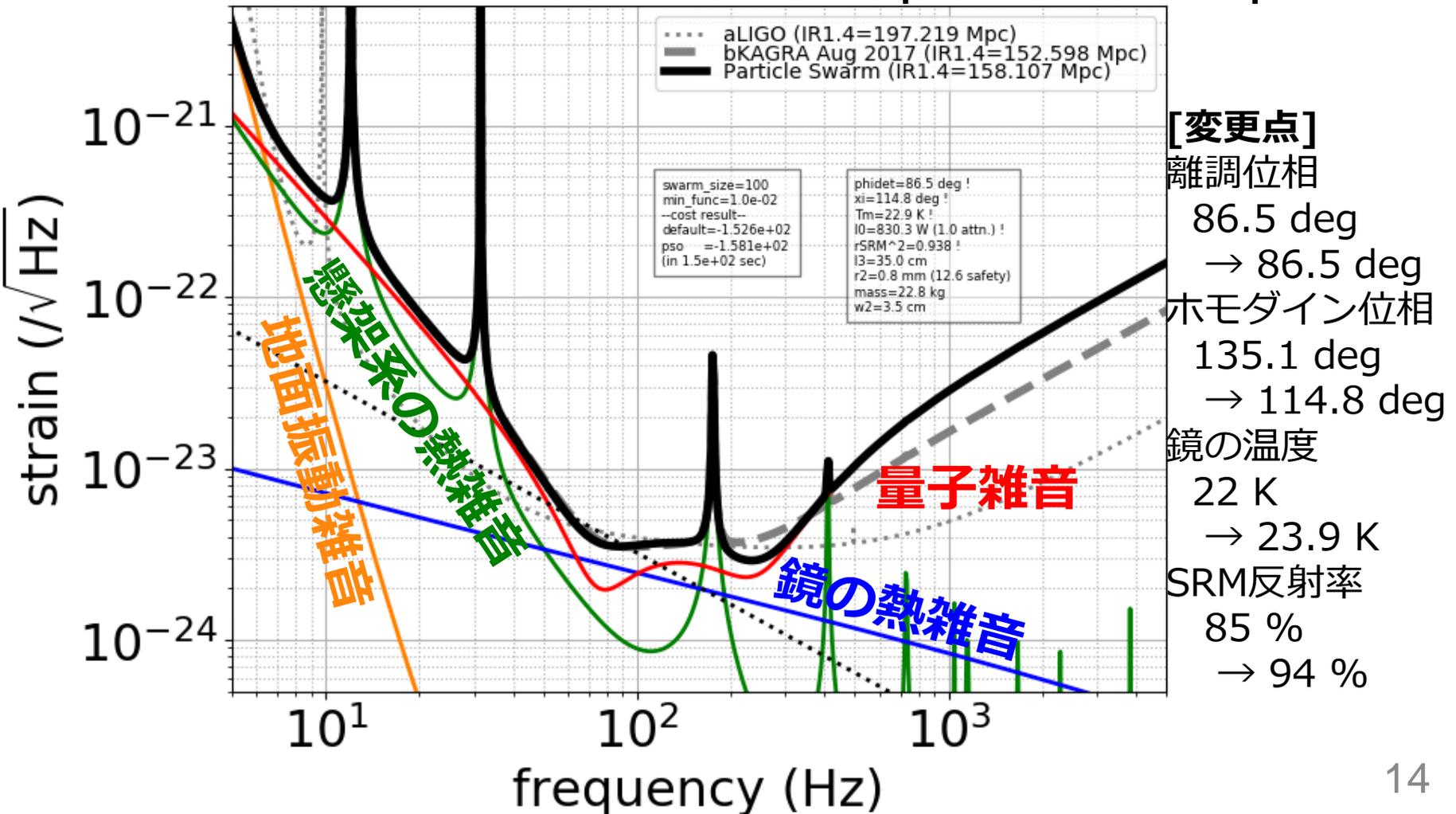
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- 3パラメータでグリッドで最適化された
現在の設計感度と一致



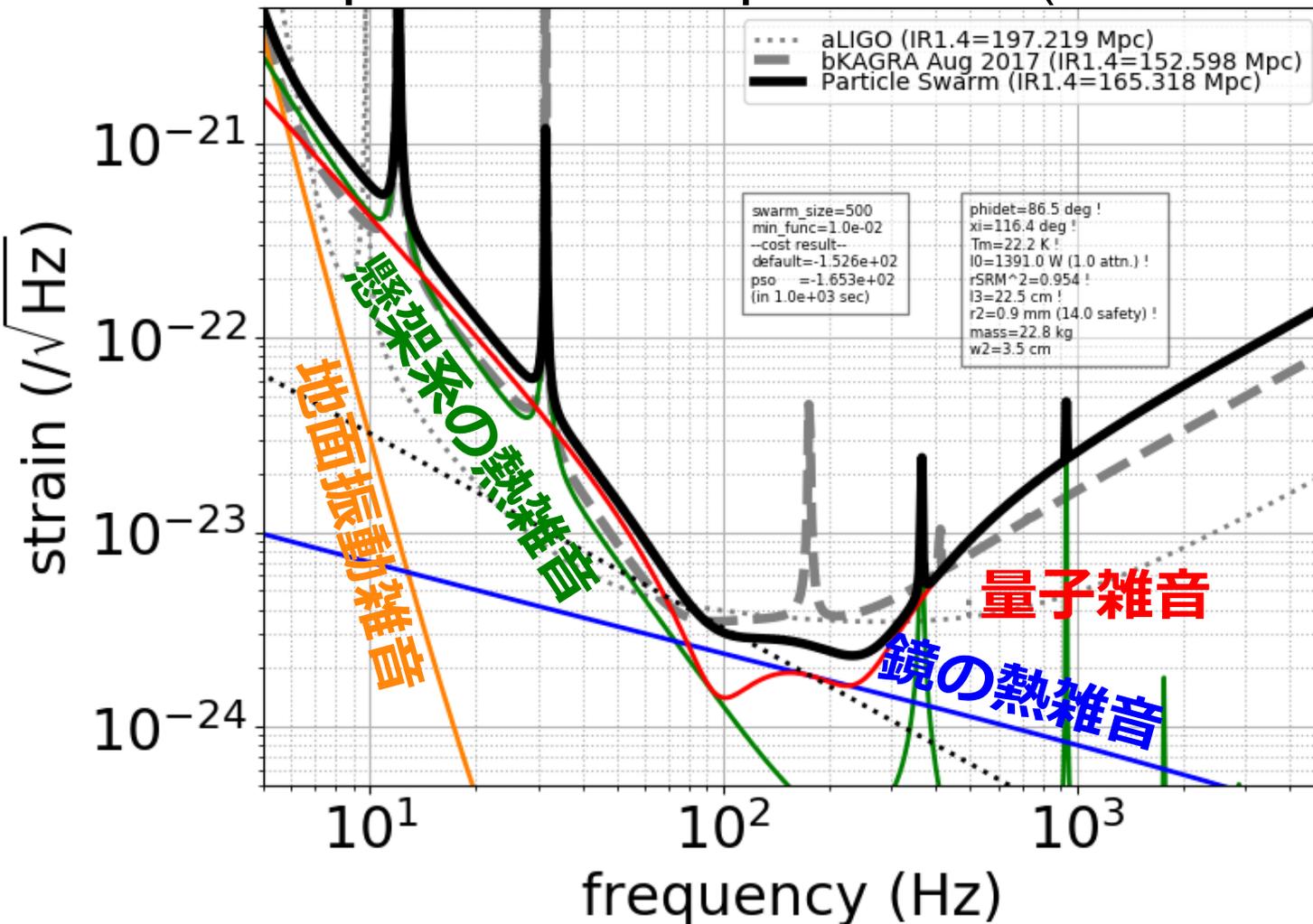
5パラメータで最適化(粒子数: 100)

- 入射パワーとシグナルリサイクリング調整だけで連星中性子星レンジが153 Mpcから158 Mpcに



7パラメータで最適化(粒子数: 500)

- 懸架ワイヤの変更で連星中性子星レンジが
153 Mpcから165 Mpcに向上 (検出数で約25%向上)

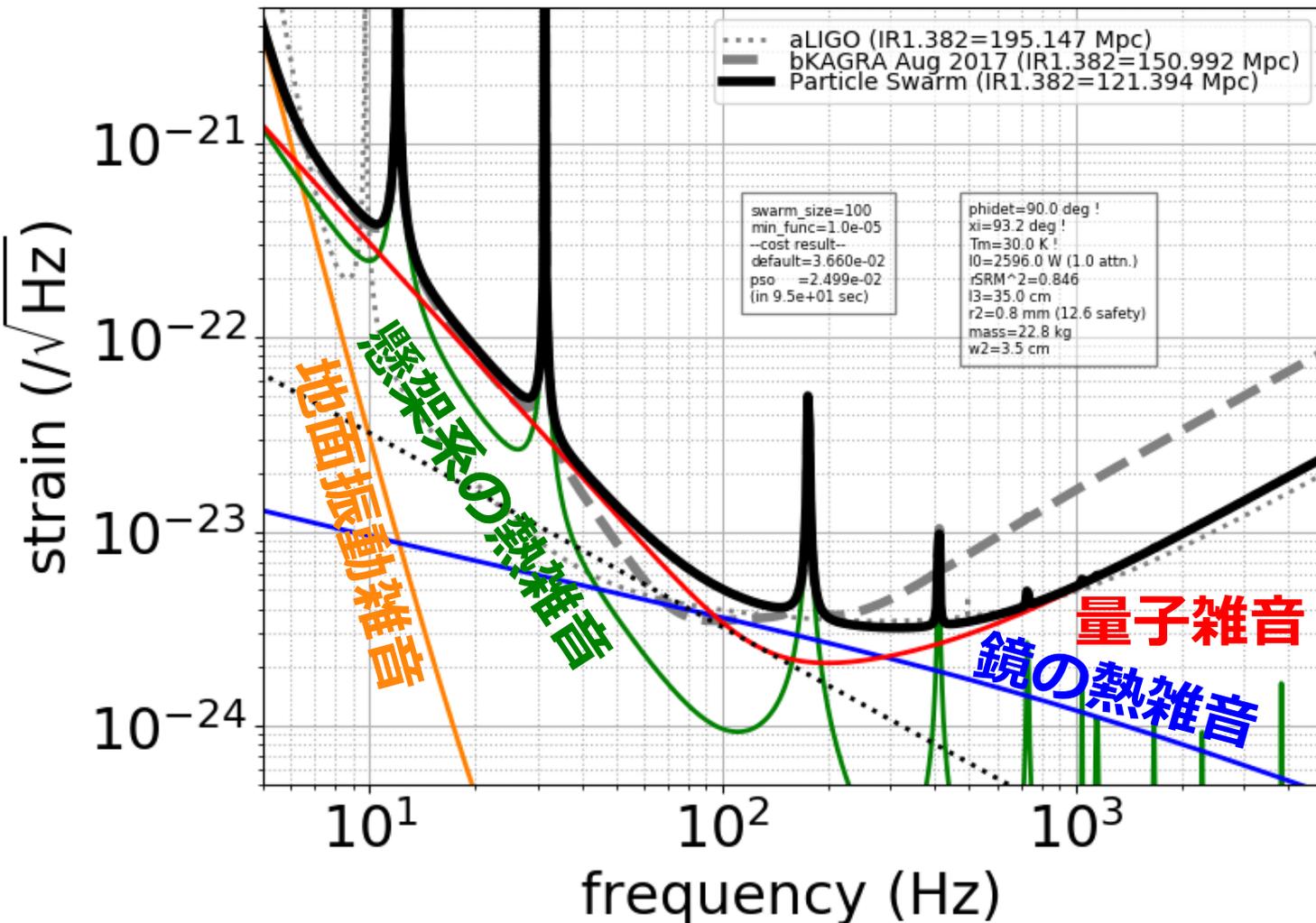


[大きな変更点]

- 入射パワー
600 W
→ 1400 W
- SRM反射率
85%
→ 95%
- 懸架ワイヤ
35 cm
→ 22.5 cm
- ϕ 1.6 mm
→ ϕ 1.8 mm

さらに応用: 方向決定に最適化

- GW170817の波源方向決定精度が約1.5倍向上
ただし検出数は半減



[変更点]

離調位相

86.5 deg (± 0.1)

→ 90.0 deg

ホモダイン位相

135.1 deg (± 0.1)

→ 93.2 deg

鏡の温度

22 K (± 1)

→ 30 K

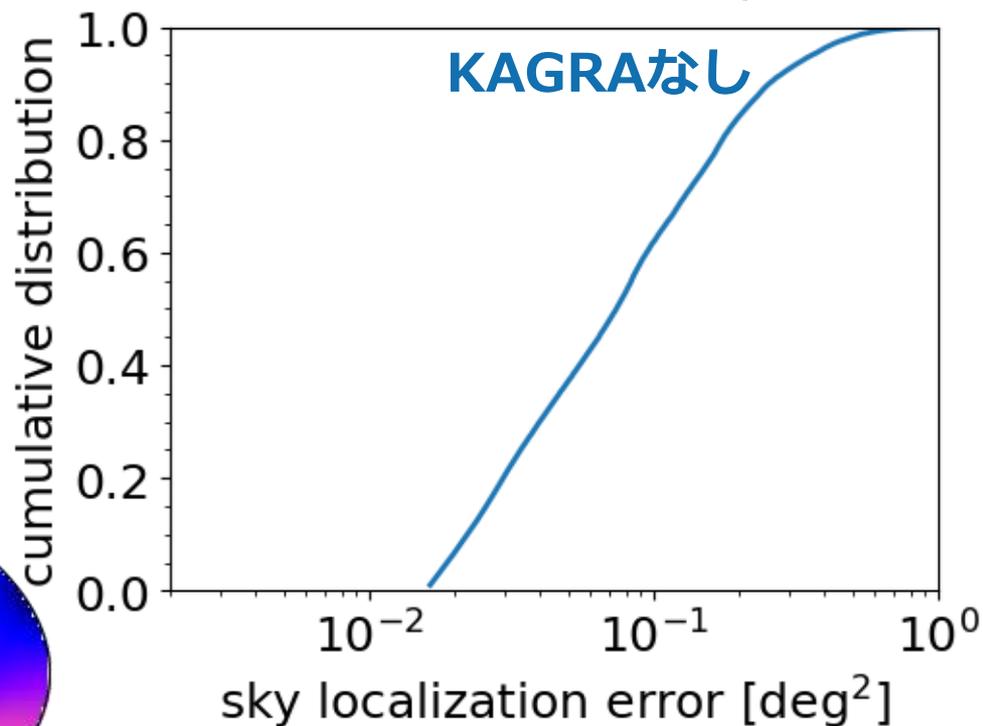
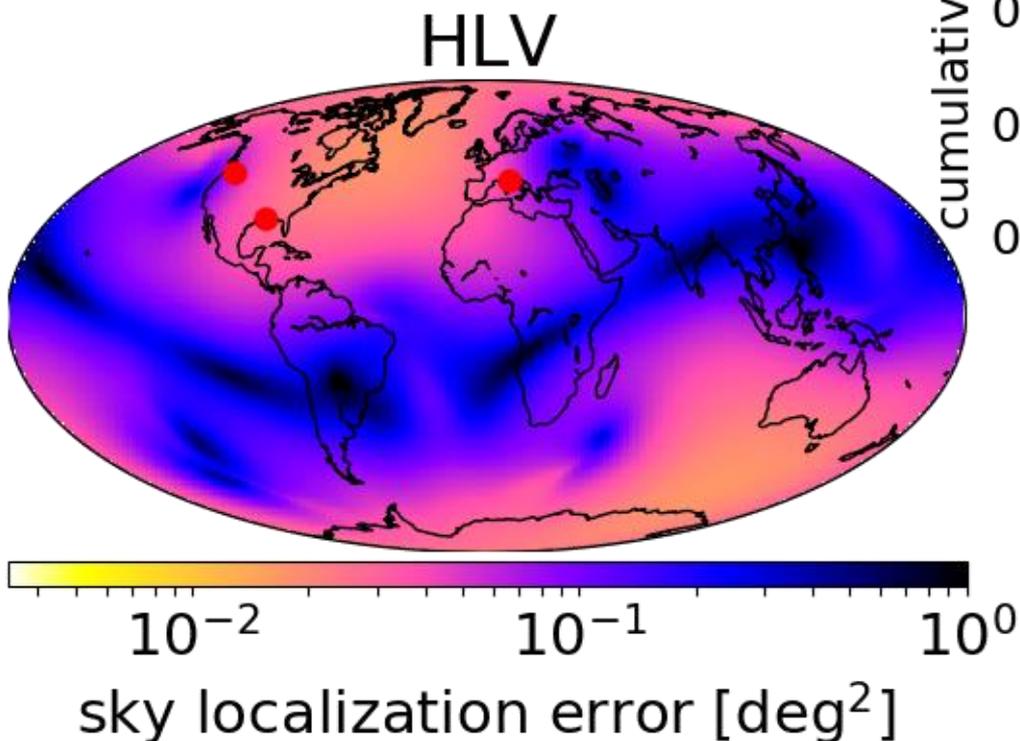
入射パワー

600 W

→ 2600 W

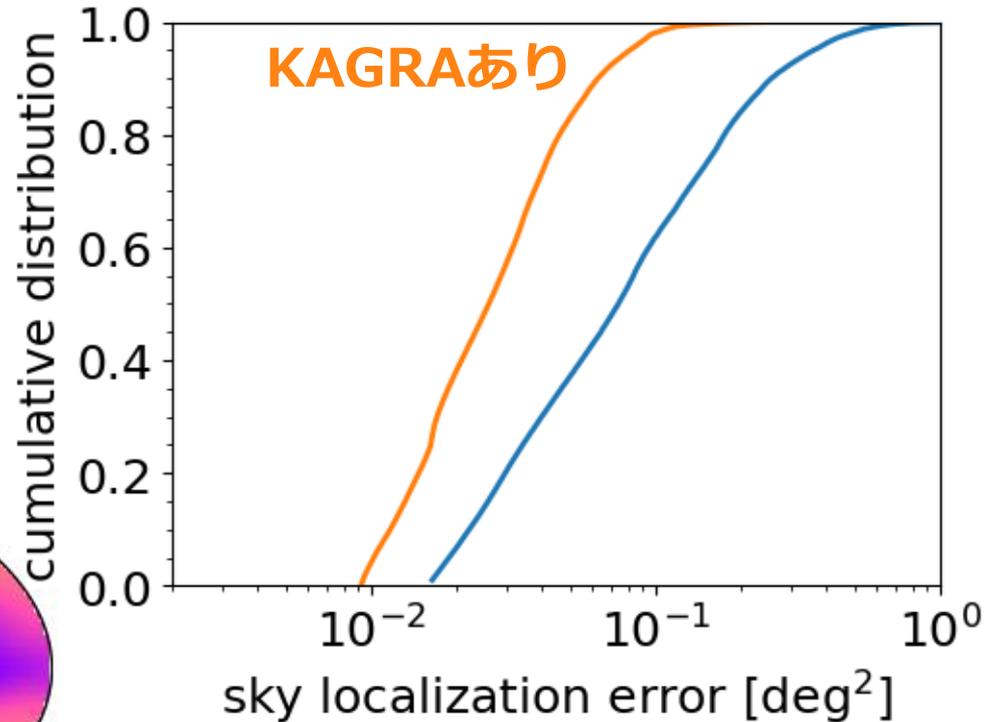
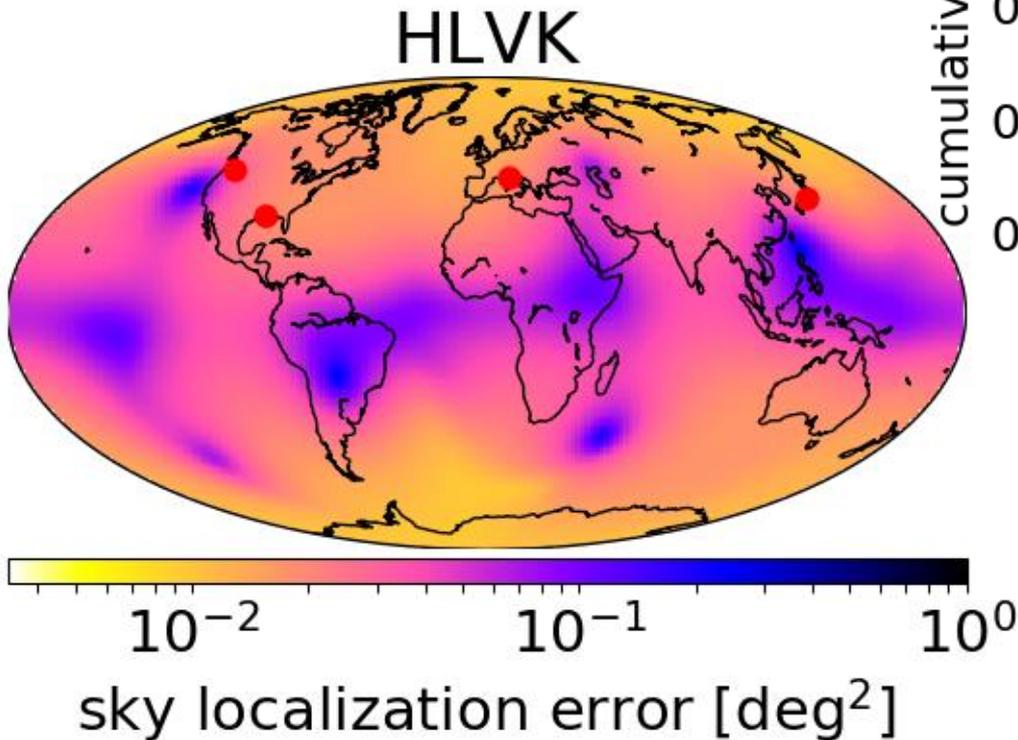
方向決定精度の向上

- KAGRAがない場合(aLIGO2台、AdV1台のみ)



方向決定精度の向上

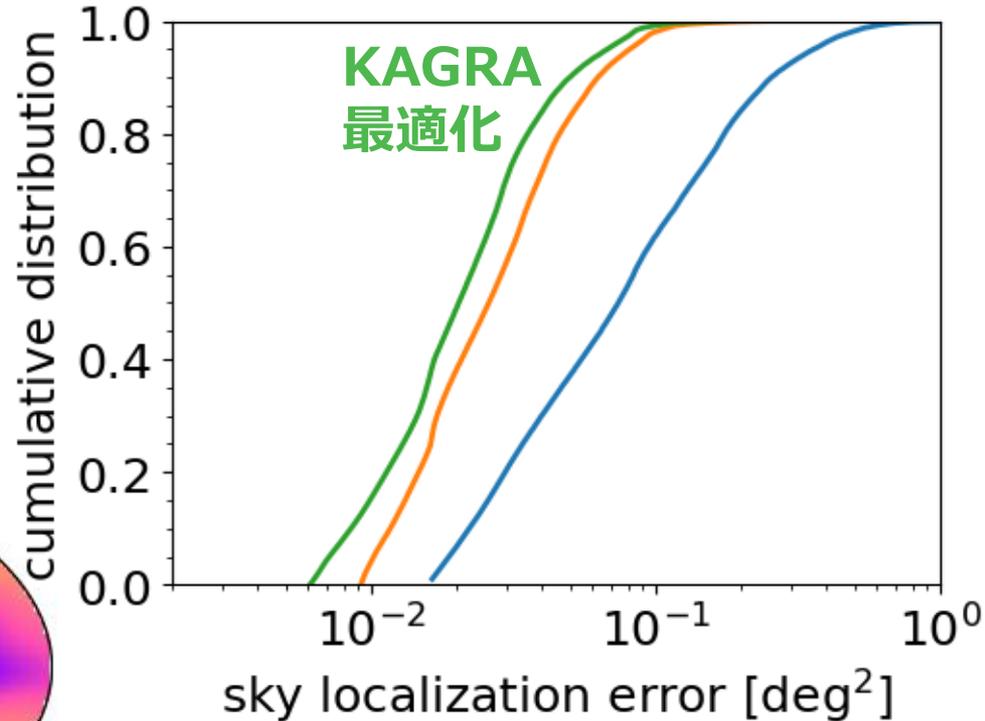
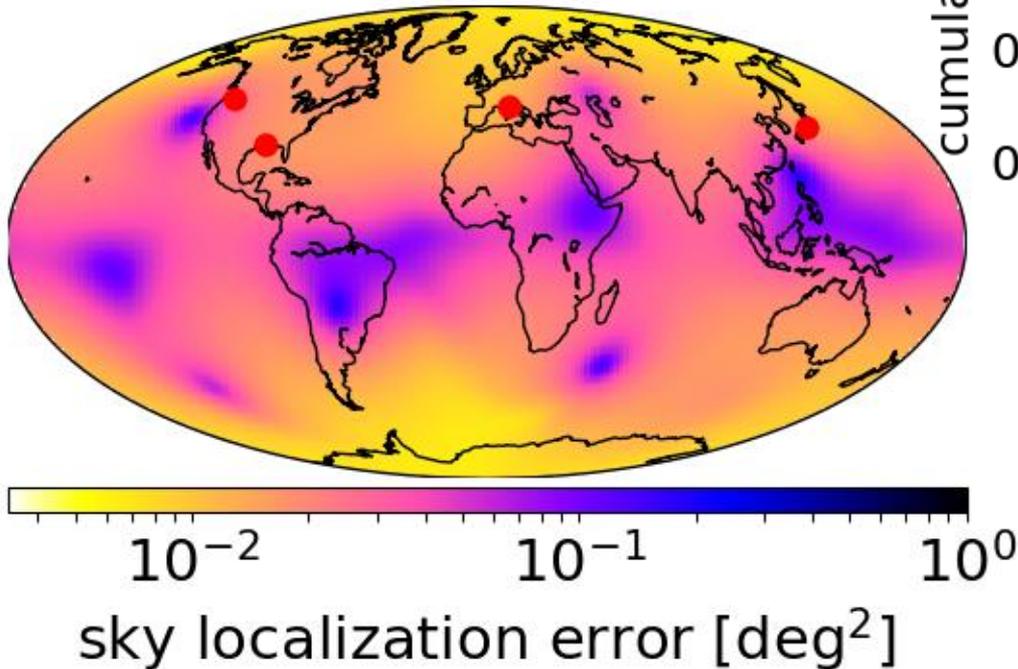
- 現在の設計感度のKAGRAが加わった場合



方向決定精度の向上

- 最適化されたKAGRAが加わった場合

HLVK+



方向決定精度はわずかに向上するが検出数は低下することに注意

計算コスト

- このラップトップで**O(100)秒**で最適化可能
- 感度計算と評価関数計算をする回数

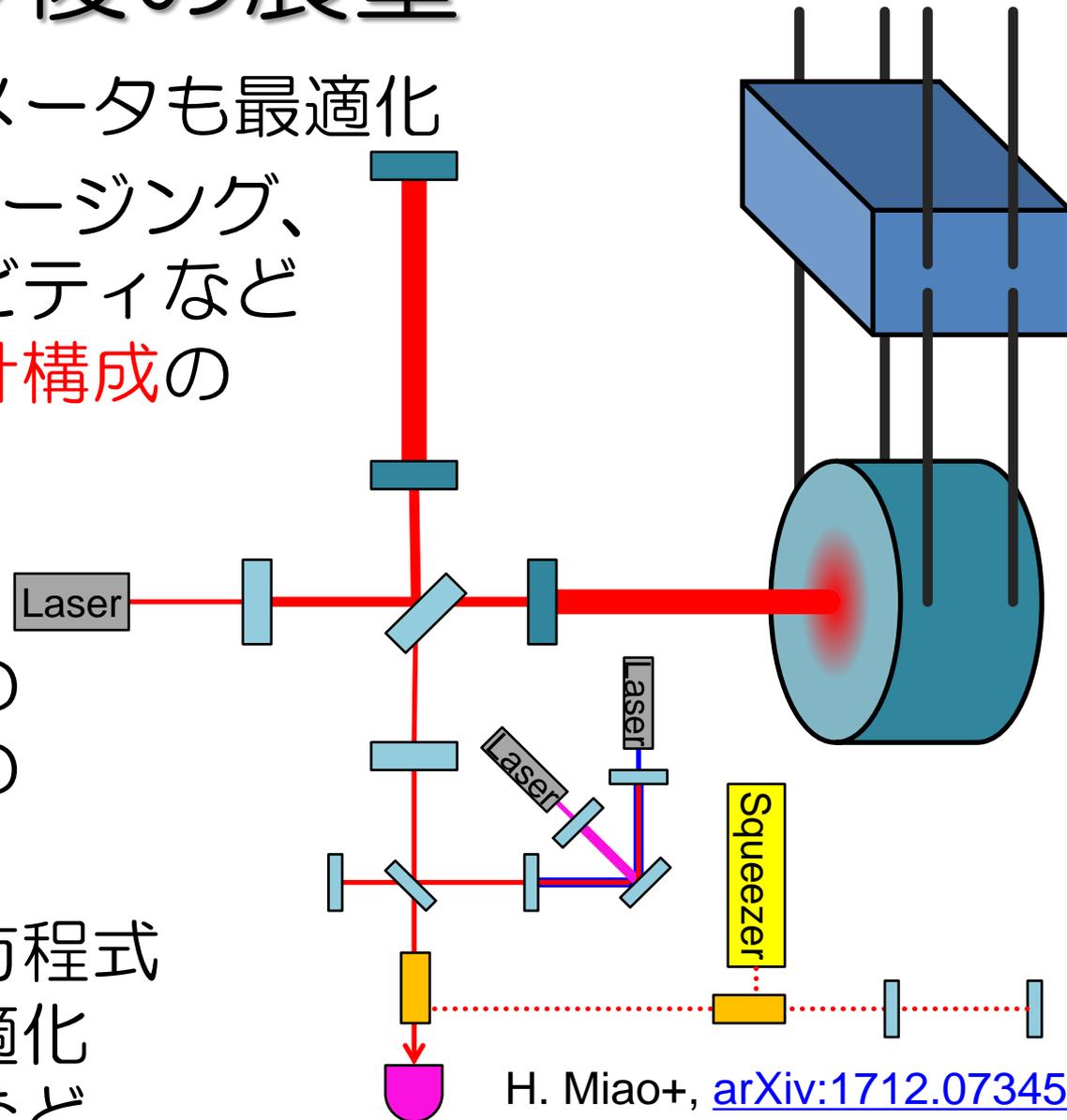
	グリッド最適化	粒子群最適化
3パラメータ	10^5 回	$30 \times (13 \pm 3)$ 回
5パラメータ	10^9 回	$100 \times (18 \pm 5)$ 回
7パラメータ	10^{15} 回	$500 \times (21 \pm 6)$ 回

※連星中性子星レンジで0.1 Mpcの精度で最適化したい場合

- 粒子群最適化ではパラメータの数が増えても計算コストが**指数関数的には増大しない**
- 従来のグリッドに基づく最適化に比べて、**多次元パラメータ**の場合に**有利**

今後の展望

- 中段マスのパラメータも最適化
- (共振器内)スクィージング、
フィルターキャビティなど
より複雑な干渉計構成の
最適化
- ブラックホールの
起源探査のための
最適化
- 中性子星の状態方程式
決定のための最適化
などなど.....



H. Miao+, [arXiv:1712.07345](https://arxiv.org/abs/1712.07345)

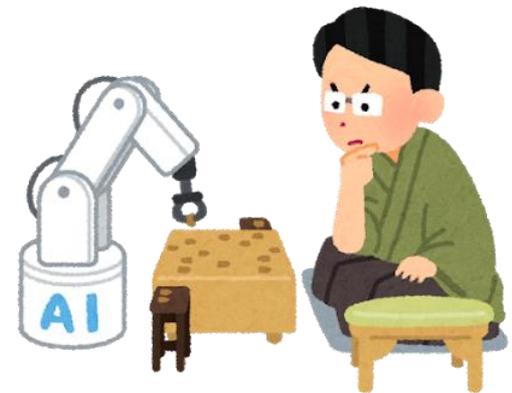
まとめ

- 粒子群最適化を用いた重力波検出器の感度設計を初実証
- KAGRAの既にある部品のパラメータ調整だけで連星中性子星の検出数の約25%向上が可能
- 波源パラメータの決定精度向上のための感度設計にも有用
- さらに多くのパラメータ調整が必要となる将来の重力波検出器ではさらに有用
 - 低計算コスト
 - 設計者の事前知識に依存しにくい

補足

他の最適化手法との比較

- 焼きなまし法(simulated annealing)
冷却スケジュールの調整が面倒
- 遺伝的アルゴリズム
アルゴリズム自体の設計が面倒
- マルコフ連鎖モンテカルロ法(MCMC)
時間がかかるので広い範囲を探索できない
与える事前分布に左右されるかもしれない
事後分布を与えるので、誤差を与えてくれる
- 機械学習
理論モデルができているなら
機械学習は不要



PSOの設計: 粒子数と収束性

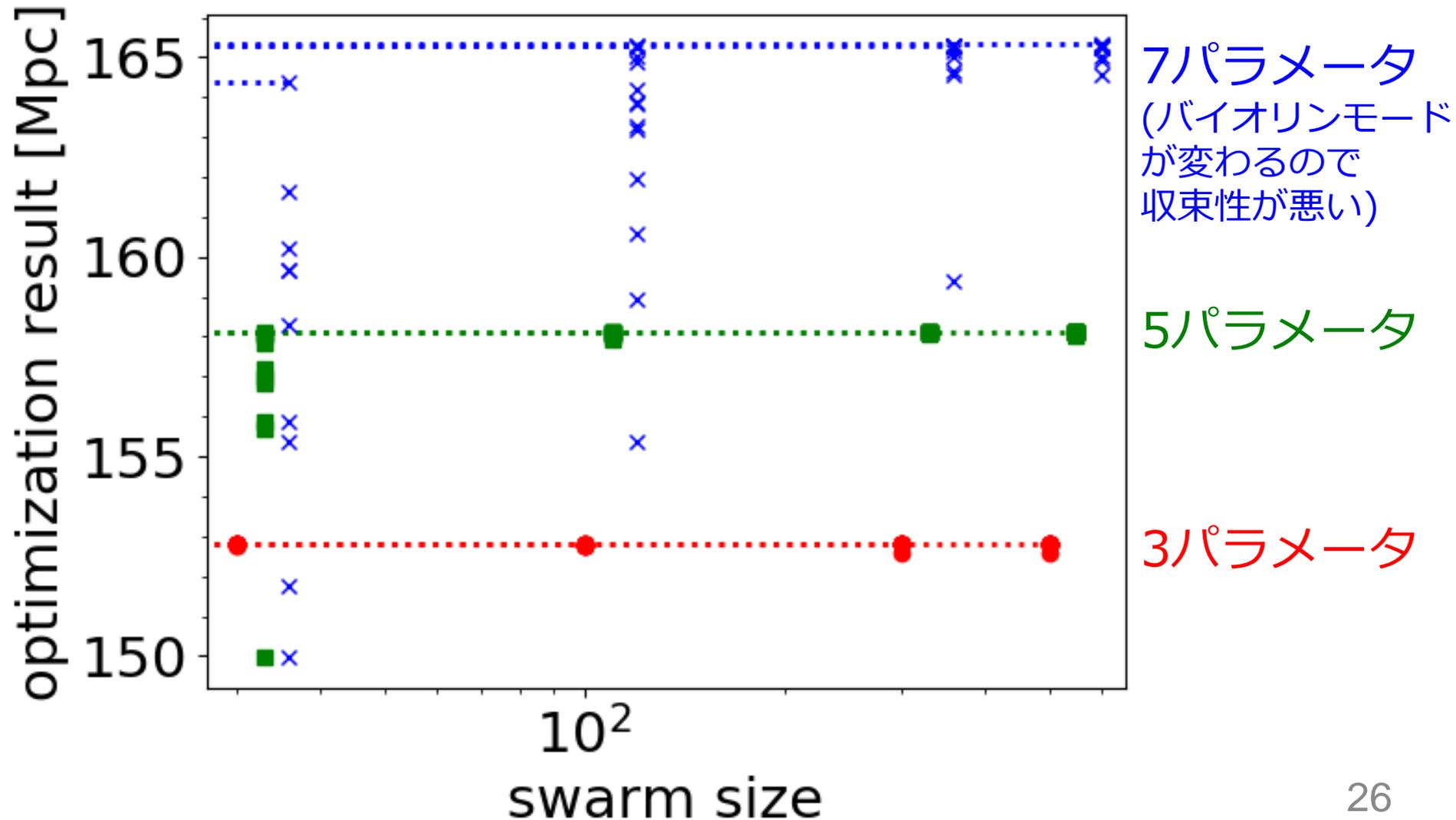
- 複数の独立な試行で粒子数を決定

パラメータ数	粒子数			
	30	100	300	500
3	390 ± 80 回 0.012 Mpc 100%	940 ± 210 回 0.014 Mpc 100%	3000 ± 780 回 0.071 Mpc 90%	4100 ± 1300 回 0.067 Mpc 90%
5	940 ± 290 回 2.3 Mpc 30%	1800 ± 540 回 0.059 Mpc 90%	4400 ± 670 回 0.0094 Mpc 100%	7100 ± 680 回 0.002 Mpc 100%
7	1200 ± 90 回 4.3 Mpc 10%	3800 ± 800 回 2.8 Mpc 20%	7600 ± 2500 回 1.7 Mpc 50%	11000 ± 2900 回 0.23 Mpc 70%

評価関数の計算回数と得られた解の標準偏差、
最大値からのずれが0.1 Mpc以下になる割合
(10回の独立なPSO試行から評価)

PSOの設計: 粒子数と収束性

- 複数の独立な試行で粒子数を決定



干渉計パラメータの探索範囲

	Lower bound	Upper bound	KAGRA Default	Precision
Detuning angle [deg]	86.5 (or 60) *	90	86.5	0.1
Homodyne angle [deg]	90	180	135.1	3
Mirror temperature [K]	20	30	22	0.09
Power attenuation	0.01	1	1	0.02
SRM reflectivity	0.6	1	0.92 (85%)	6e-4
Wire length [cm]	20	100	35	0.02
Wire safety factor	3	100	12.57 (0.8 mm)	0.07
Mirror mass [kg]	22.8	100	22.8	0.04

* シグナルリサイクリング共振器の非線形性を考えると
最大の離調位相は 3.5 deg (Aso+ CQG 29, 124008 (2012))



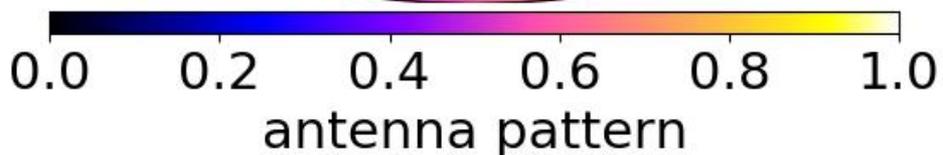
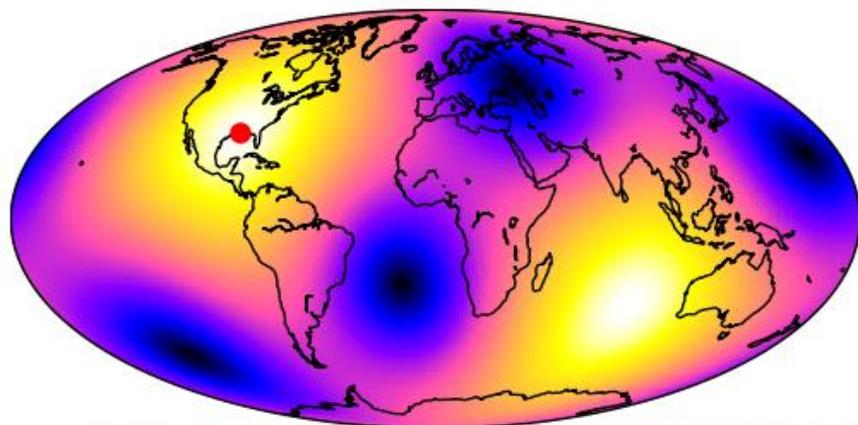
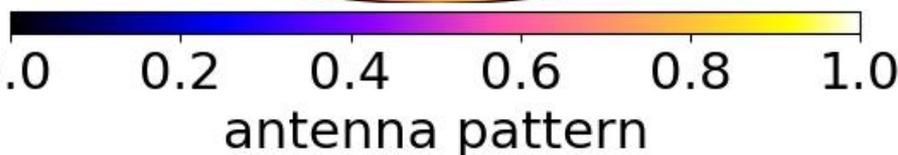
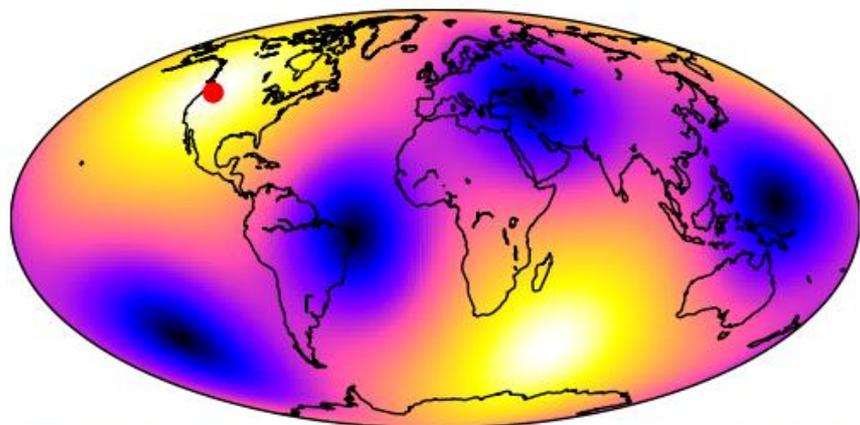
- 粒子が境界を出てしまったときの条件
if $x > x_{max}$, $x = x_{max}$; if $x < x_{min}$, $x = x_{min}$

連星中性子星レンジを
0.1 Mpc 変える変化量

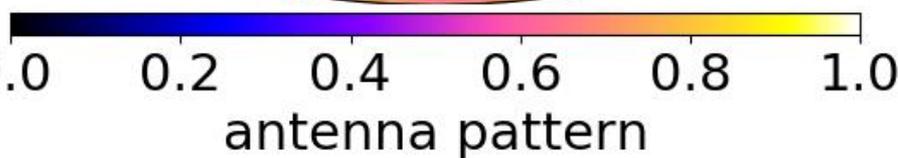
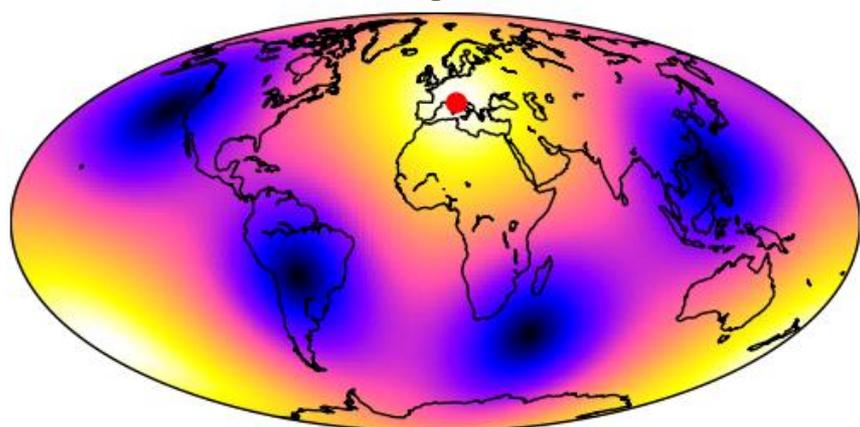
方向決定精度の計算

- Fisher解析を利用
下記の波形(インスパイラルのみ)
Khan+, [PRD 93 044007 \(2016\)](#)
- 観測ネットワークは下記を仮定
aLIGO (Hanford, Livingston) デザイン感度
AdV デザイン感度 ([LIGO-T1500293](#))
- 波源としてはGW170817的なものを仮定
redshift: $z = 0.009$ (~40 Mpc)
total mass: $m_t = 2.74 M_{\text{sun}}$
chirp mass: $m_c = 1.188 M_{\text{sun}}$
inclination angle: $\theta_i = 28$ deg
polarization angle: $\psi_p = 0$ deg
no spin

H Antenna Pattern L



V



K

