

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

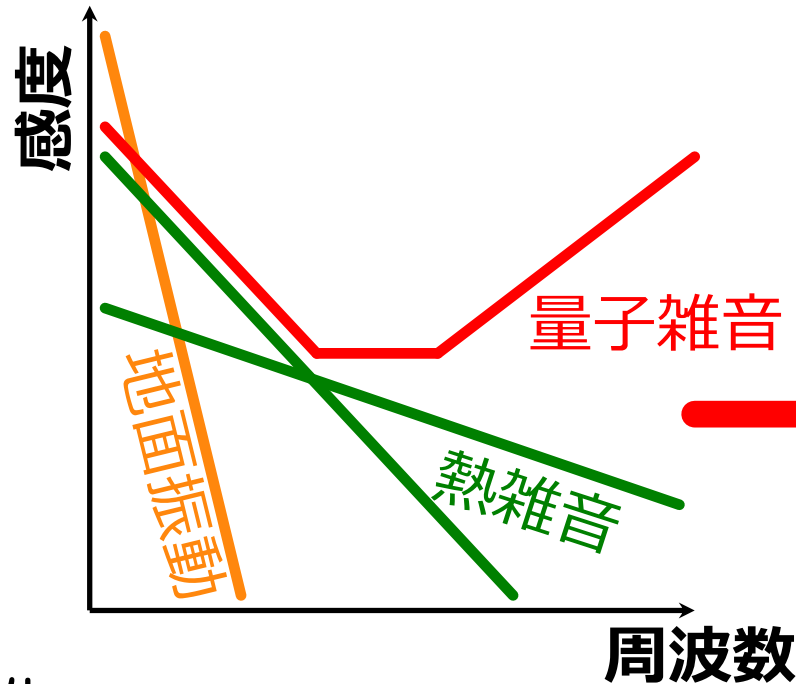
概要

- 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



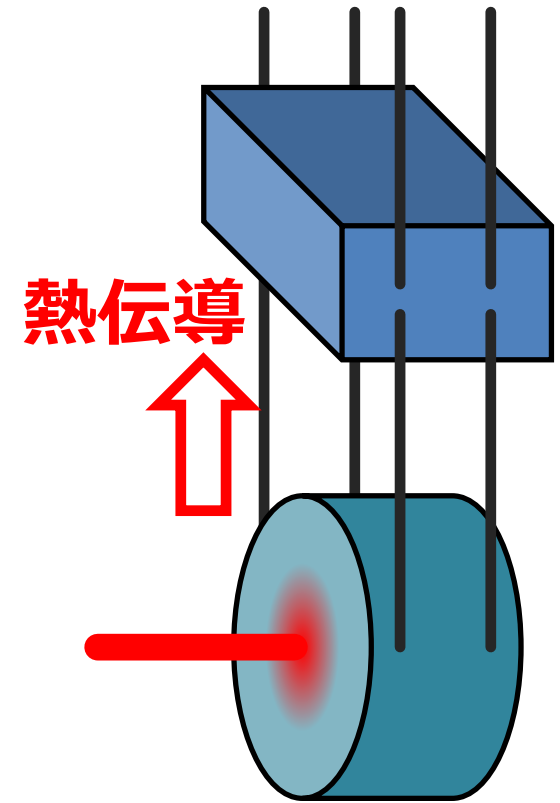
- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

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

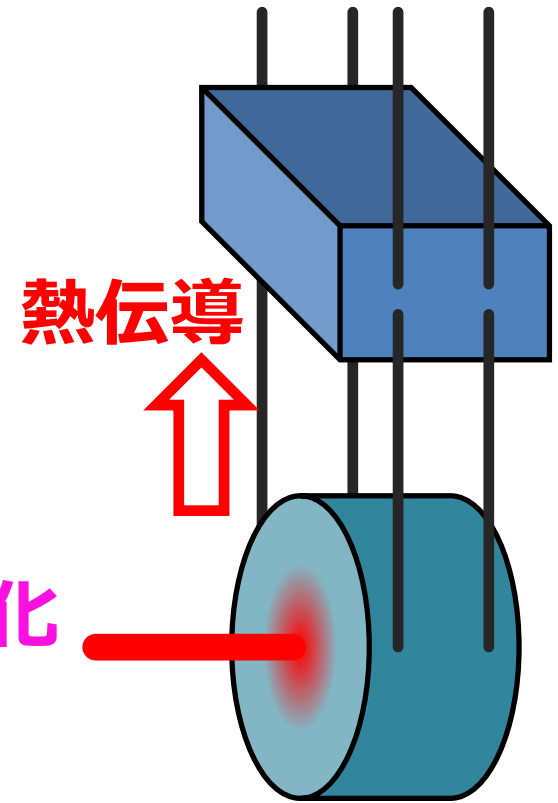
鏡を冷やす

冷却効率の悪化

鏡の熱吸収

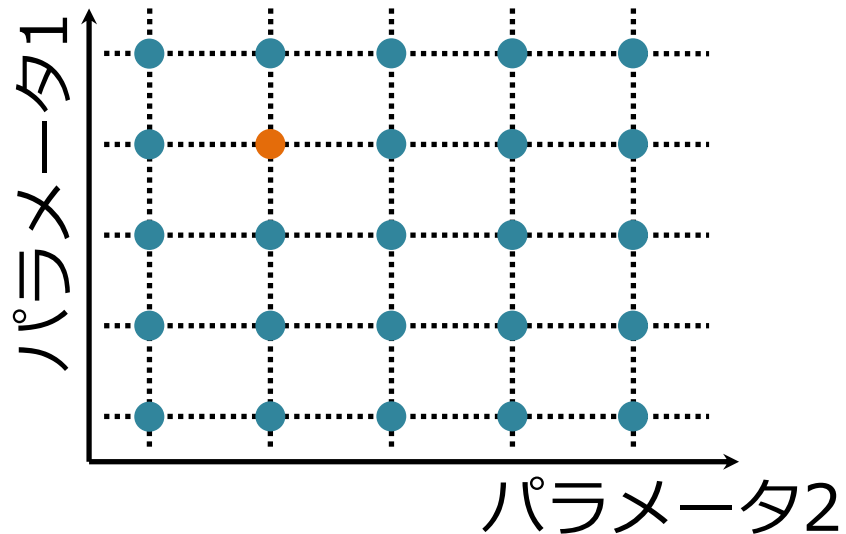
- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

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(ステップ幅)

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

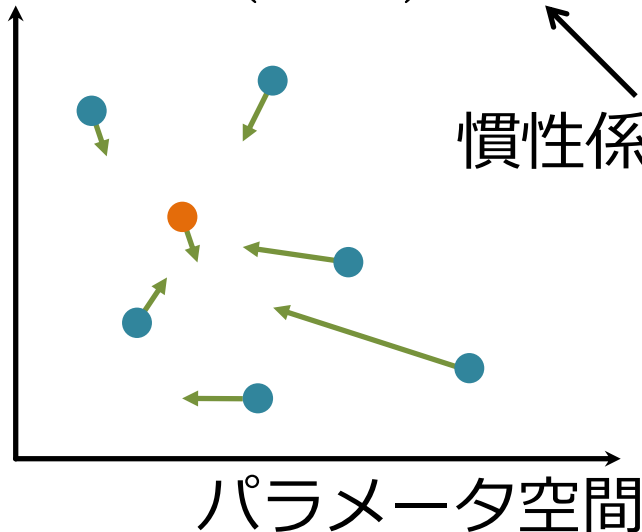
$$v_k(t+1) = wv_k(t) + c_1r_1(\hat{x}_k - x_k(t)) + c_2r_2(\hat{x}_g - x_k(t))$$

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

慣性係数 w (~ 1)

係数 c (~ 1)
乱数 $r \in [0,1]$



[Kennedy & Eberhart \(1995\)](#)

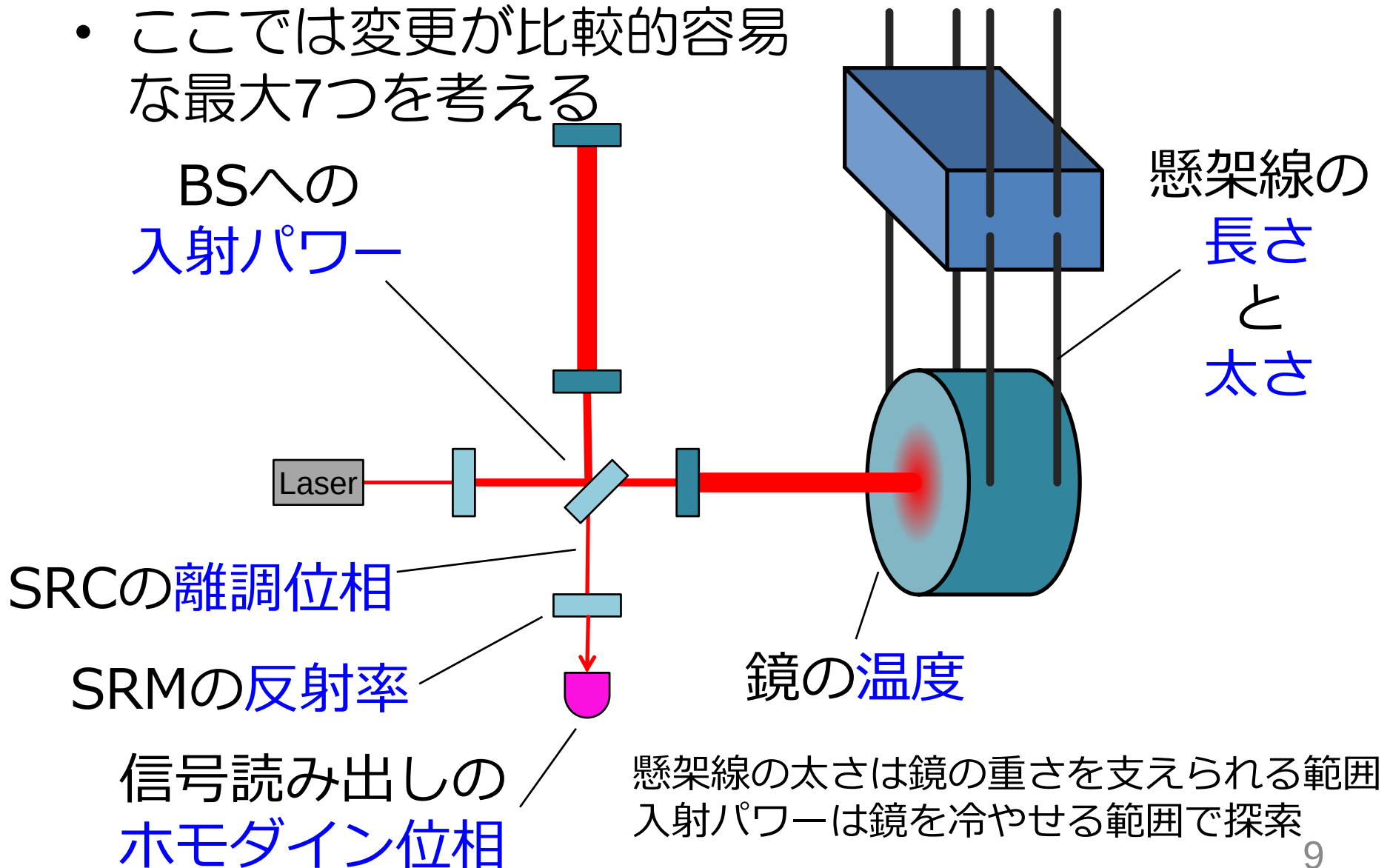
粒子群最適化の特徴

- 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 😞

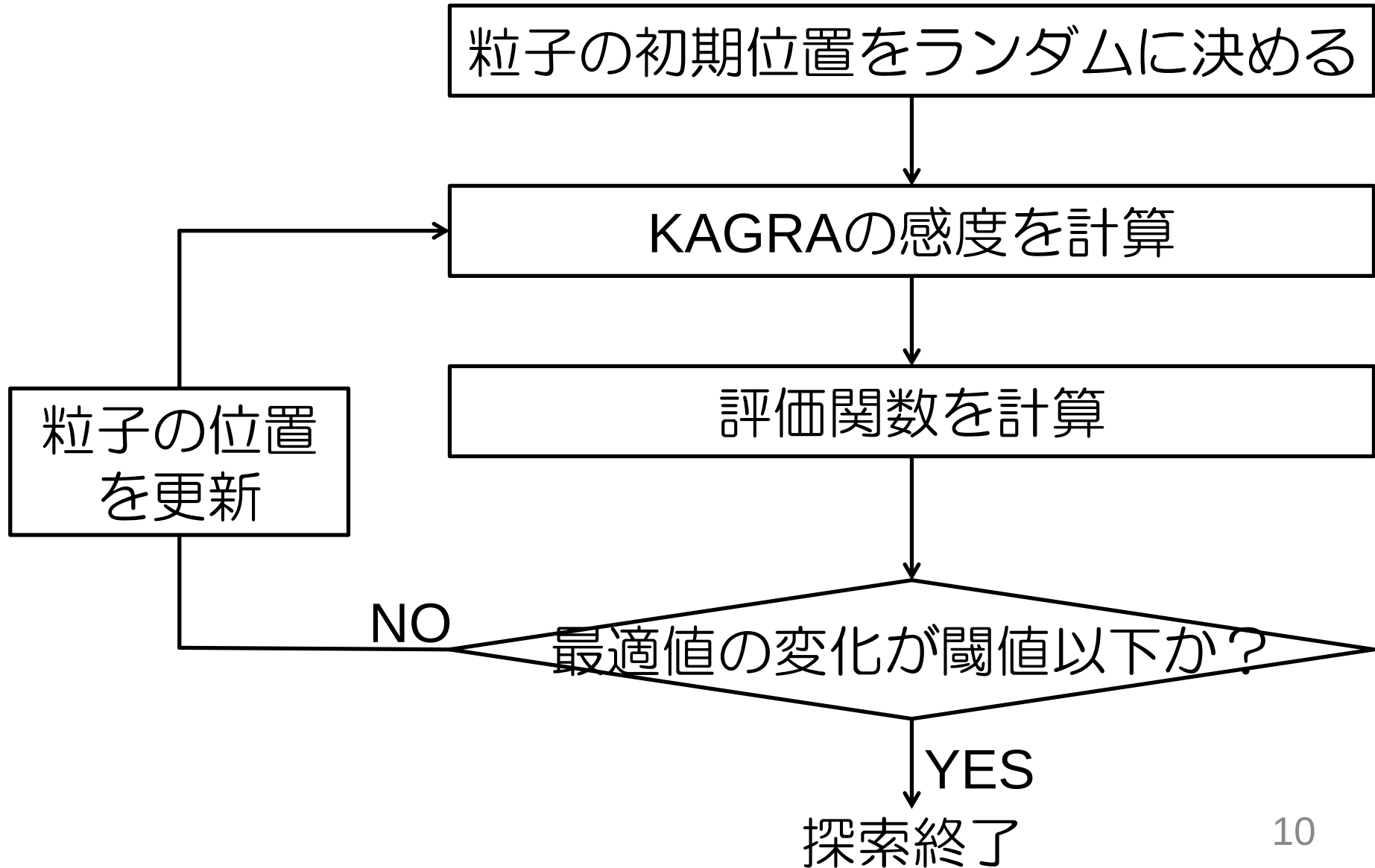
→ 検出器の感度設計には適している
→ 低温重力波検出器KAGRAに適用する

最適化に用いるKAGRAパラメータ

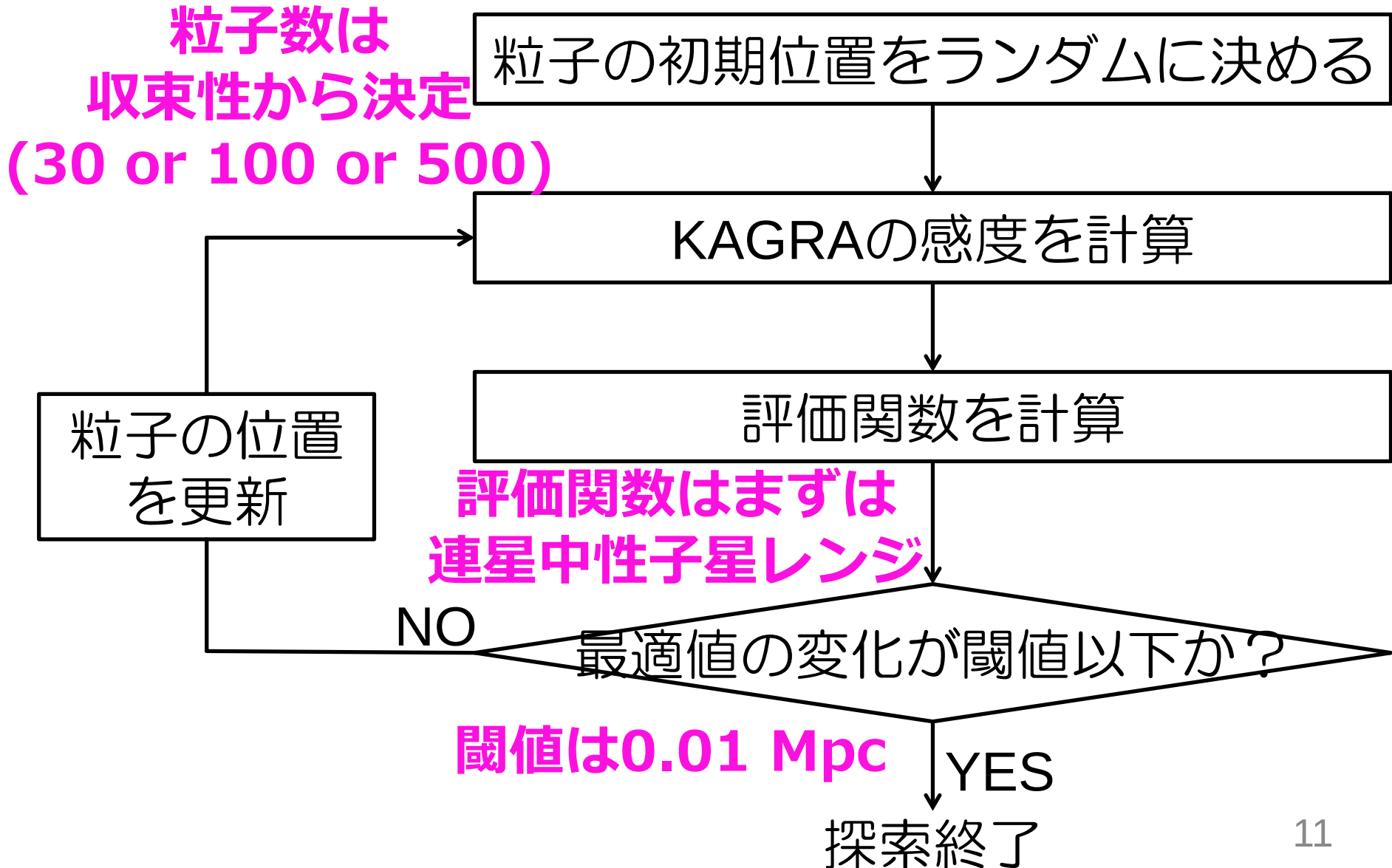
- ここでは変更が比較的容易な最大7つを考える



最適化の流れ

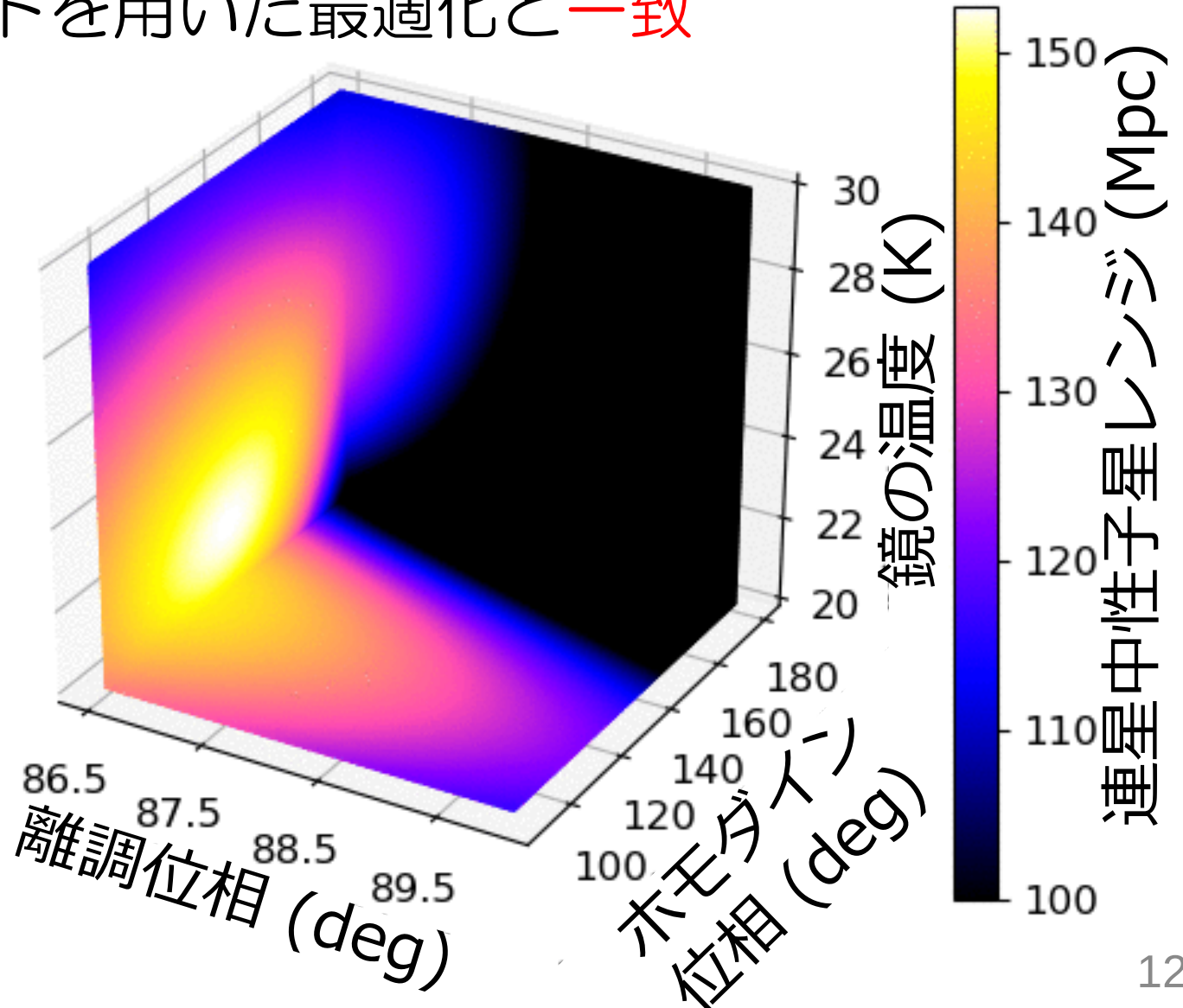


最適化の流れ



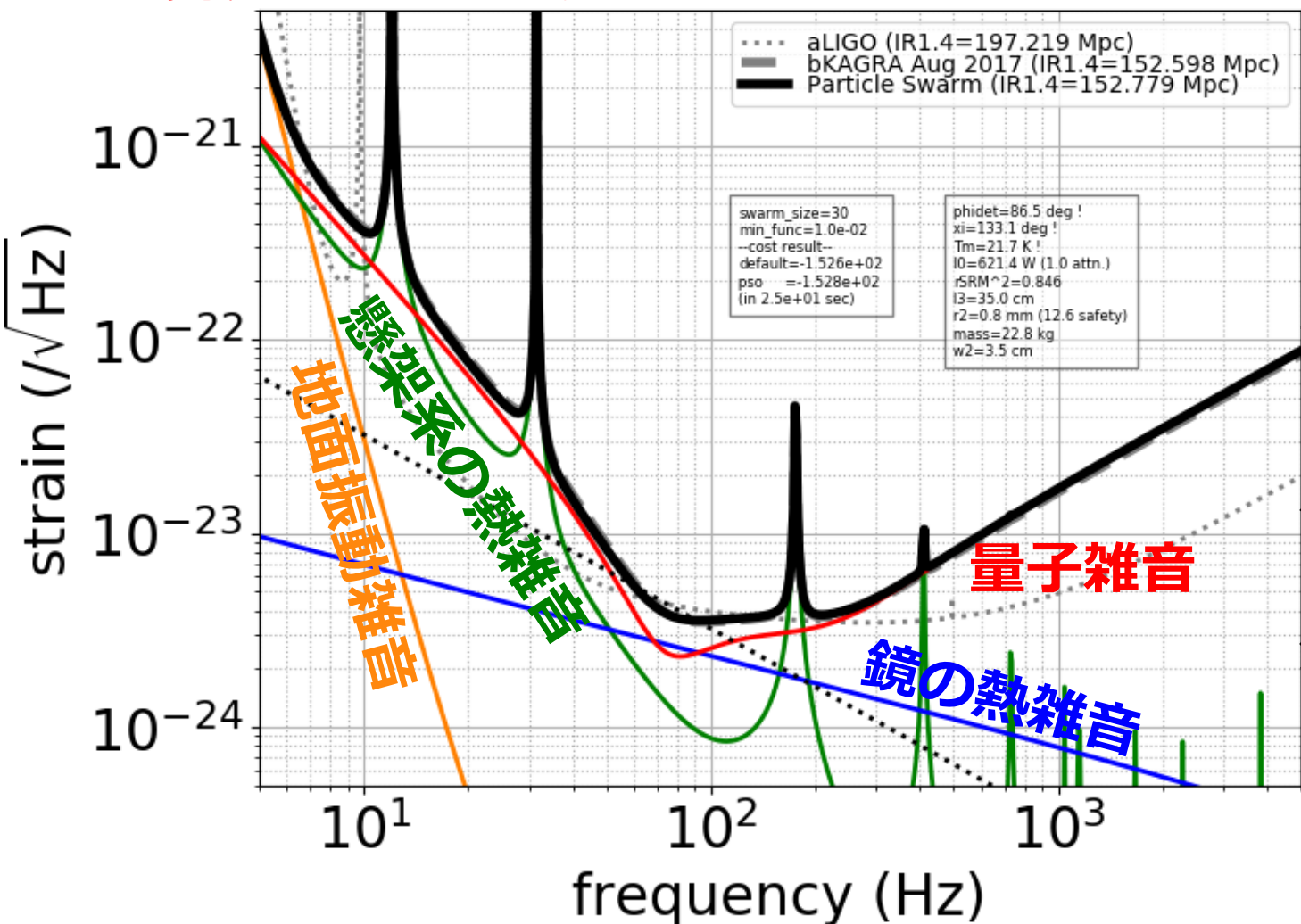
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- 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



[変更点]

離調位相

86.5 deg (± 0.1)

→ 86.5 deg

ホモサイン位相

135.1 deg (± 0.1)

→ 134.3 deg

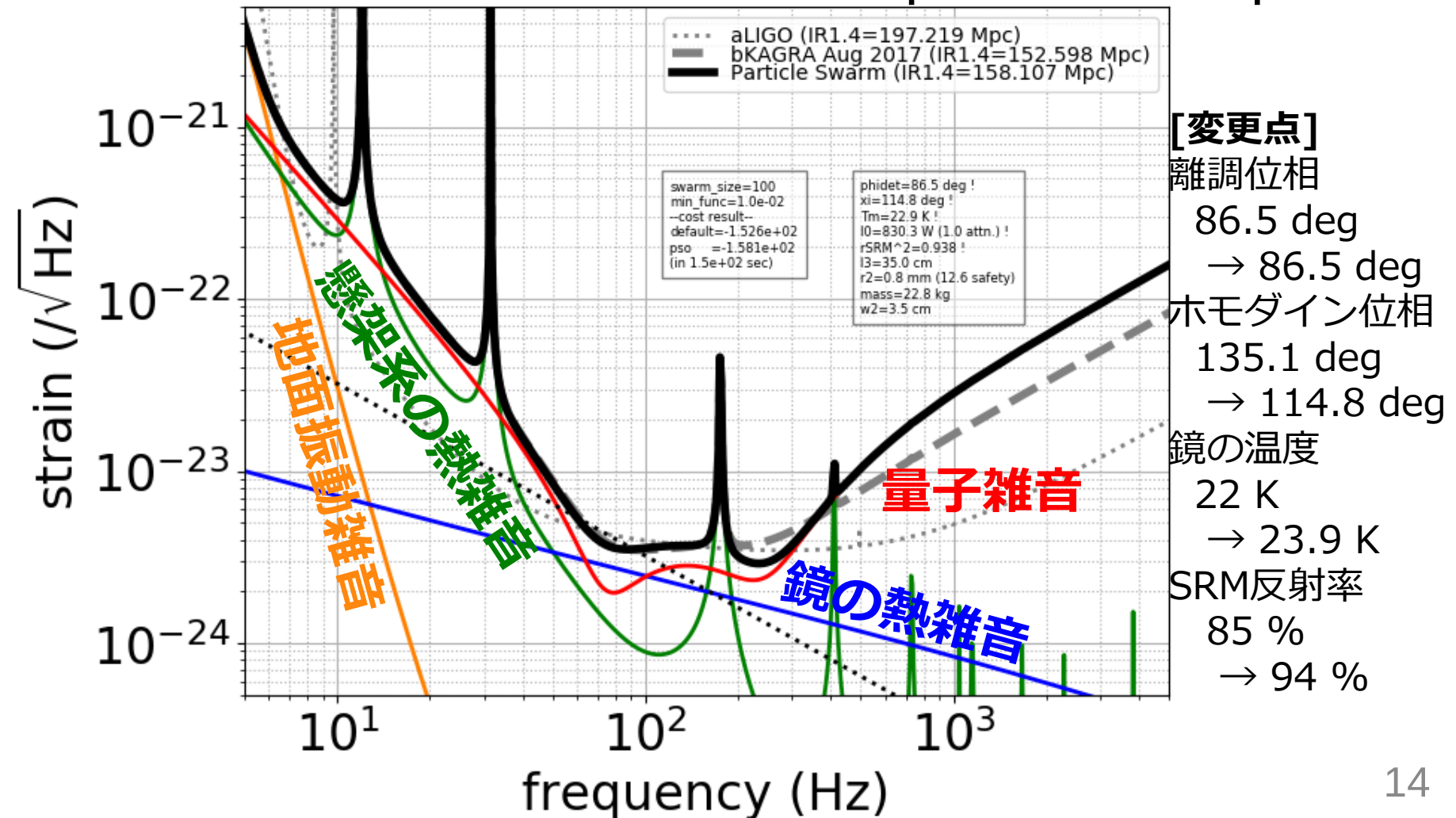
鏡の温度

22 K (± 1)

→ 21.6 K

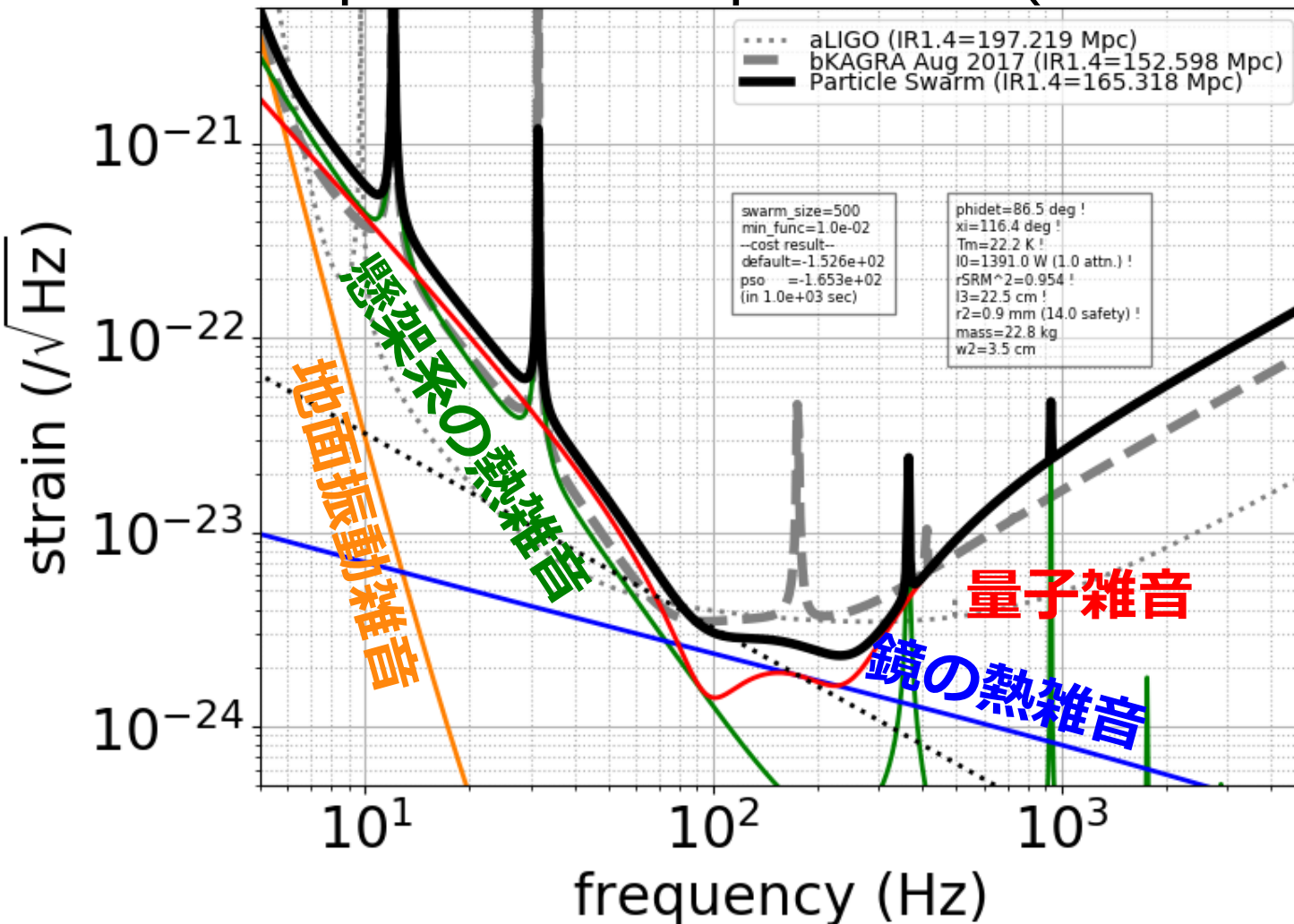
5パラメータで最適化(粒子数: 100)

- 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

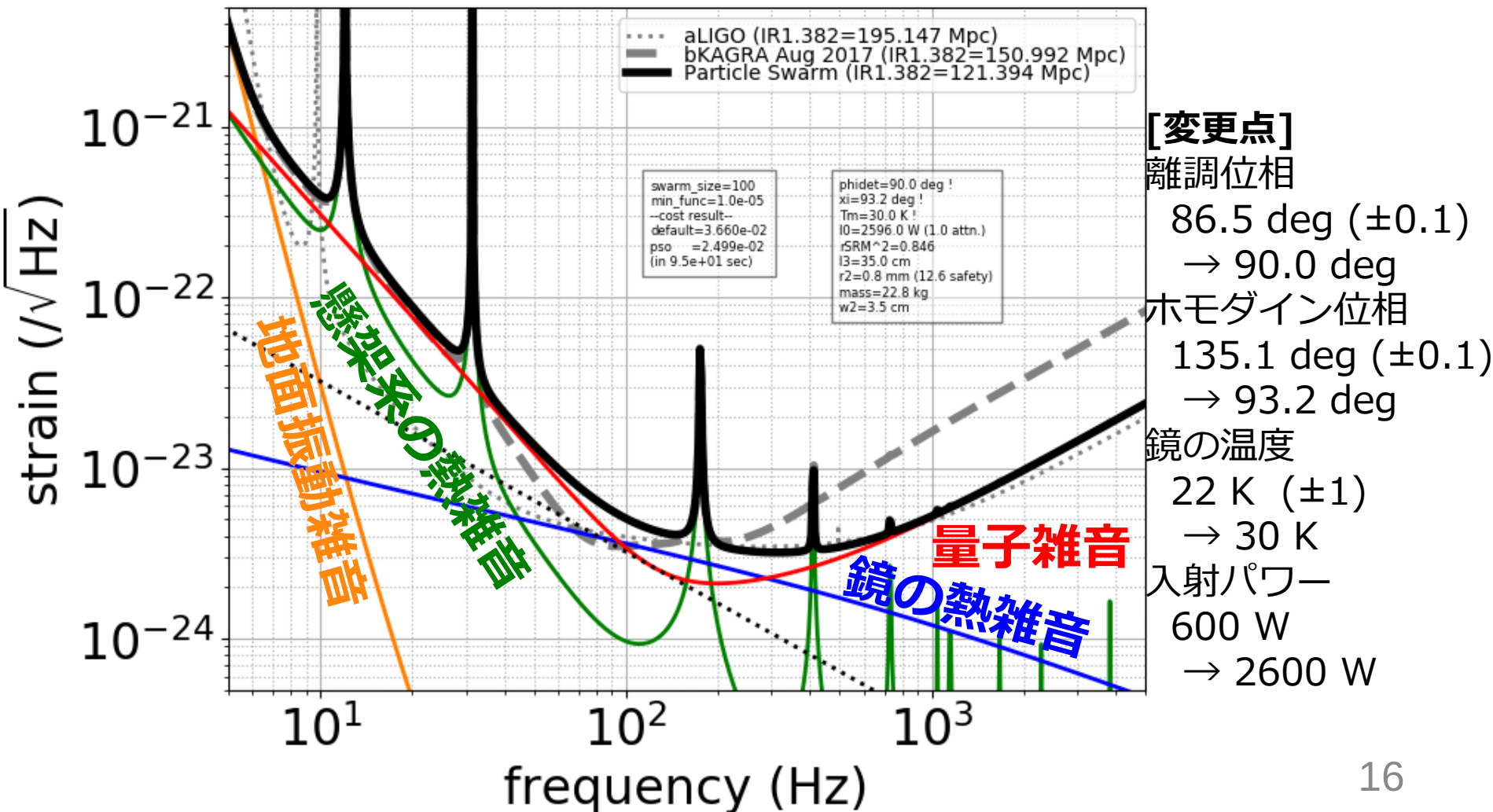
85%
→ 95%

懸架ワイヤ

35 cm
→ 22.5 cm
 $\phi 1.6$ mm
→ $\phi 1.8$ mm

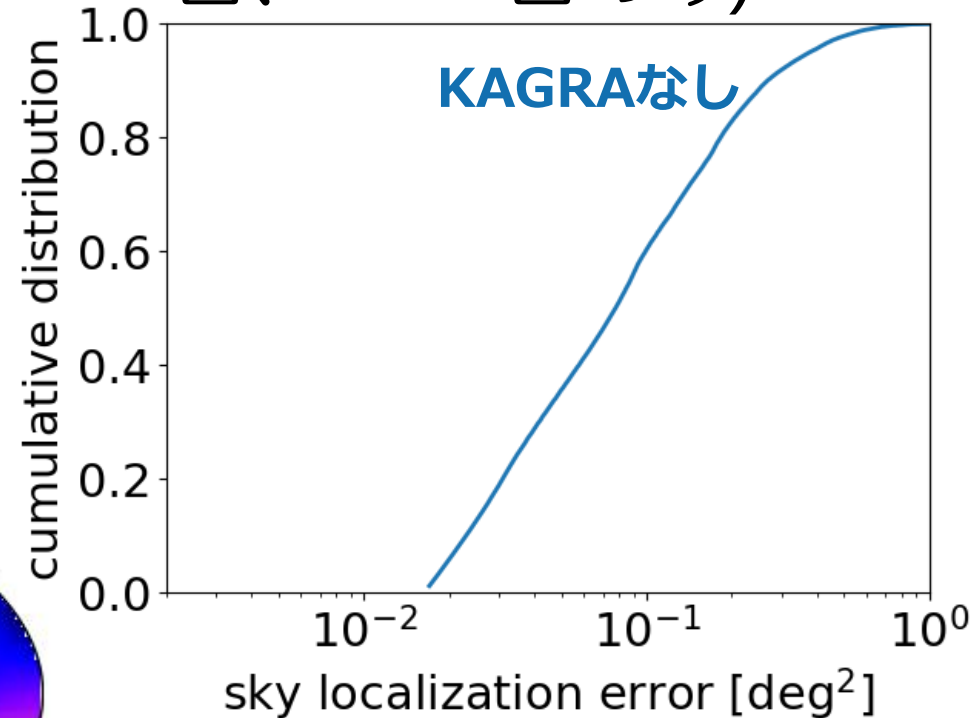
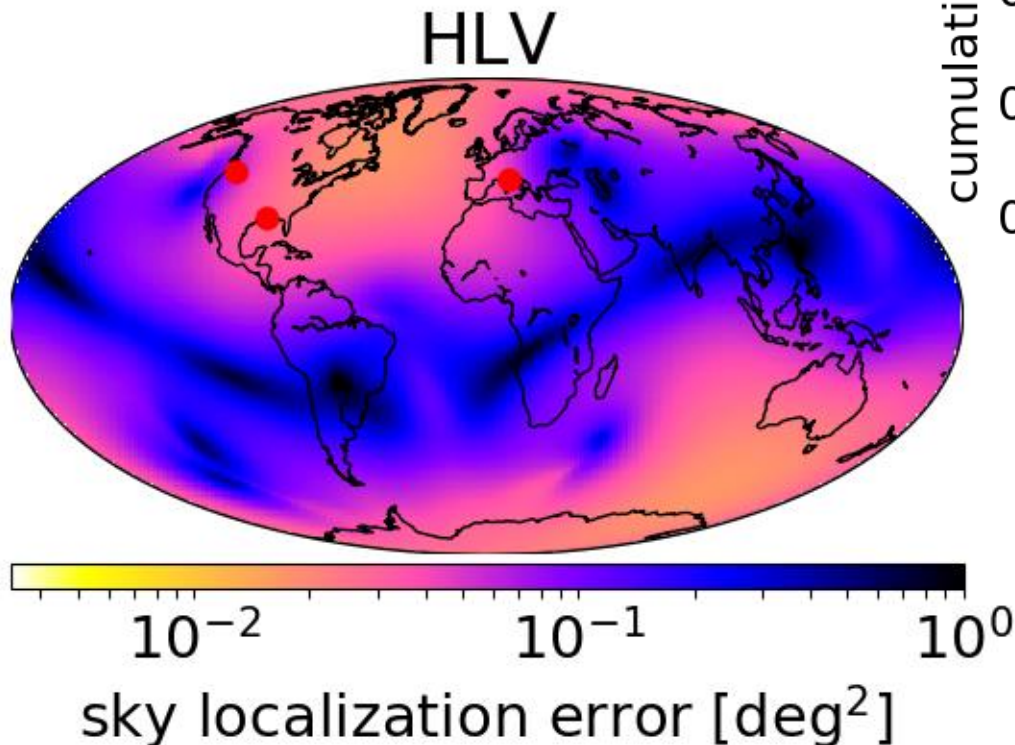
さらに応用: 方向決定に最適化

- 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



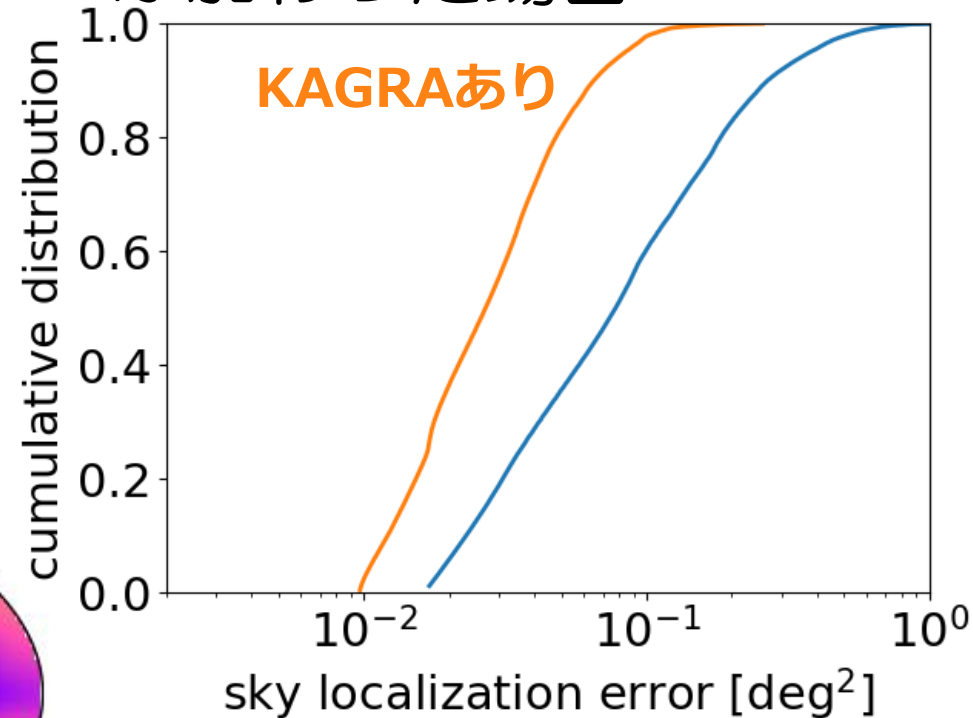
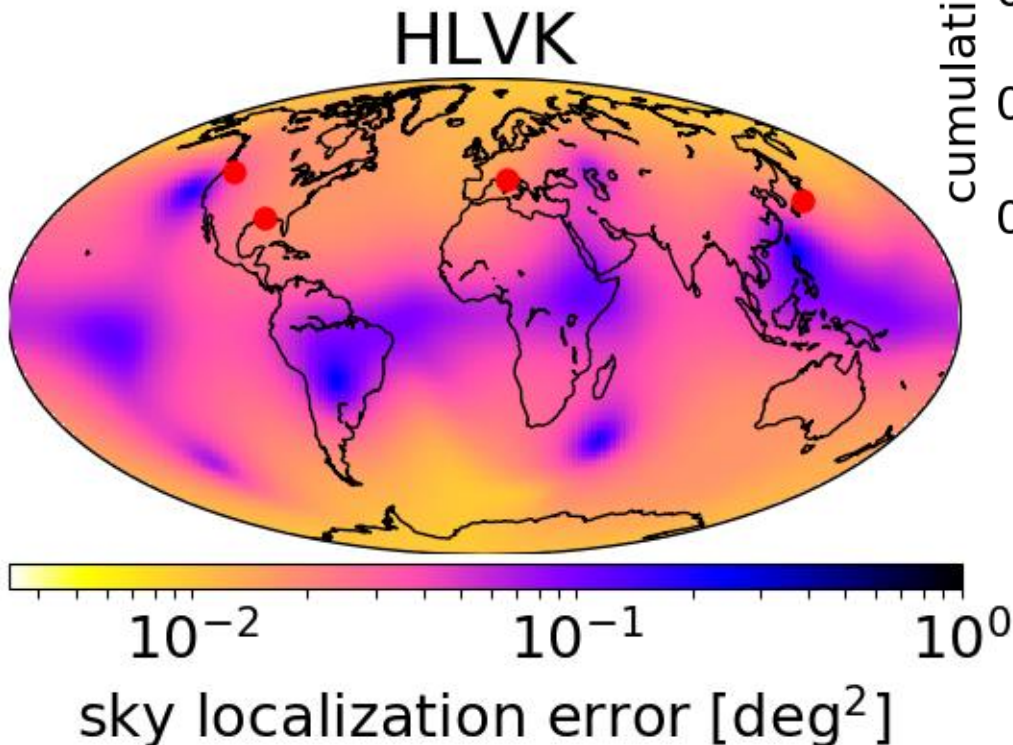
方向決定精度の向上

- KAGRAがない場合(aLIGO2台、AdV1台のみ)



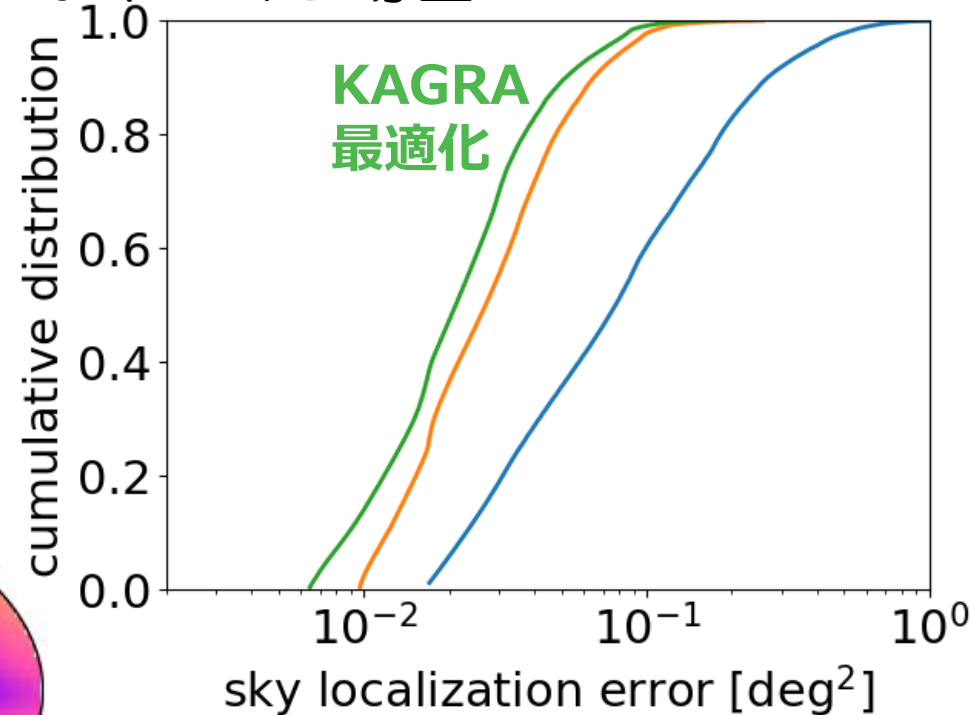
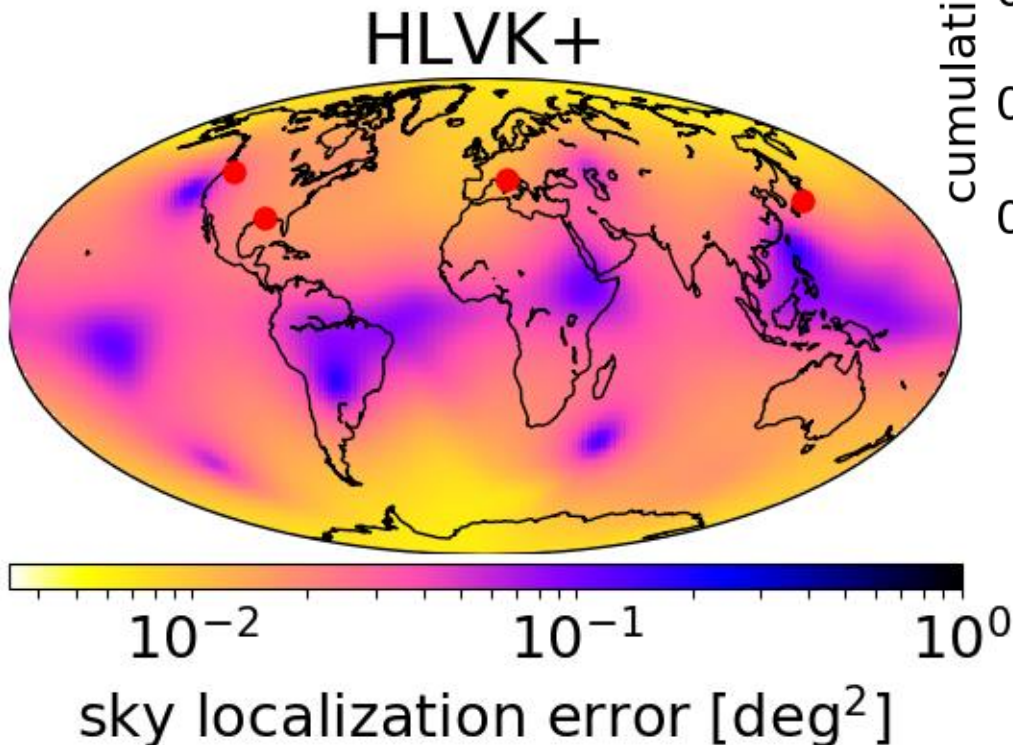
方向決定精度の向上

- 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



方向決定精度の向上は
検出数の低下に
比べてわずか

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

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

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 $\pm$ 80 回 0.012 Mpc 100%	940 $\pm$ 210 回 0.014 Mpc 100%	3000 $\pm$ 780 回 0.071 Mpc 90%	4100 $\pm$ 1300 回 0.067 Mpc 90%
5	940 $\pm$ 290 回 2.3 Mpc 30%	1800 $\pm$ 540 回 0.059 Mpc 90%	4400 $\pm$ 670 回 0.0094 Mpc 100%	7100 $\pm$ 680 回 0.002 Mpc 100%
7	1200 $\pm$ 90 回 4.3 Mpc 10%	3800 $\pm$ 800 回 2.8 Mpc 20%	7600 $\pm$ 2500 回 1.7 Mpc 50%	11000 $\pm$ 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)

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))



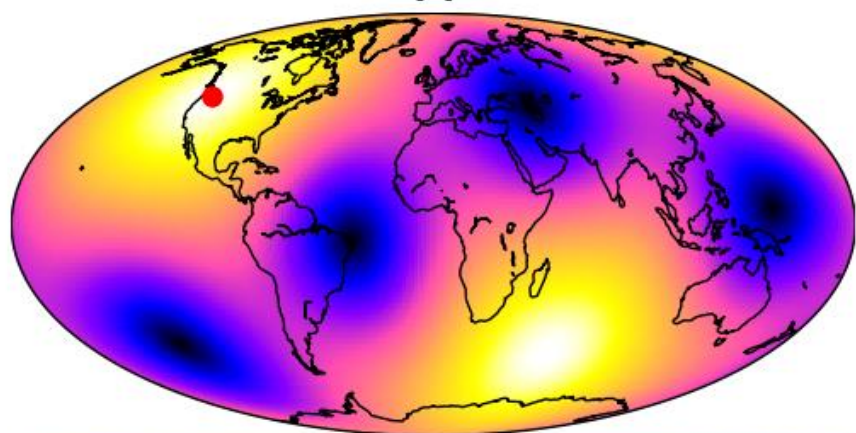
- 粒子が境界を出てしまったときの条件
if $x > x_{\max}$, $x = x_{\max}$; if $x < x_{\min}$, $x = x_{\min}$

連星中性子星レンズを
0.1 Mpc 変える変化量

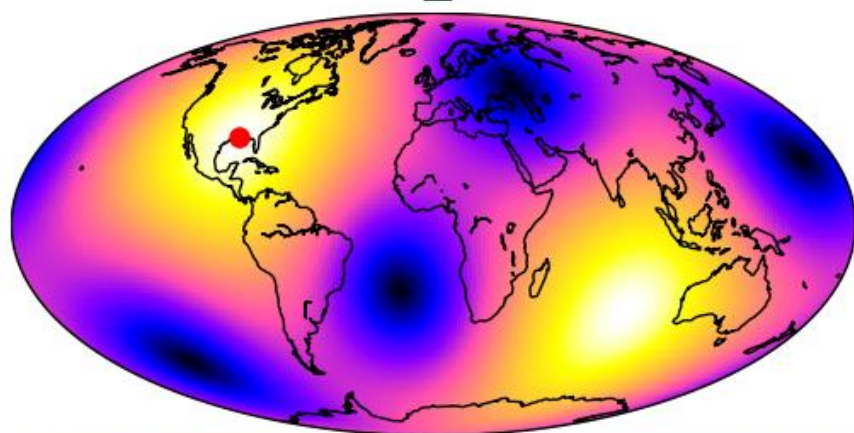
方向決定精度の計算

- 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: $m_t = 2.74 \text{ Msun}$
chirp mass: $m_c = 1.188 \text{ Msun}$
inclination angle: $\theta_i = 28 \text{ deg}$
polarization angle: $\psi_p = 0 \text{ deg}$
no spin

H Antenna Pattern L

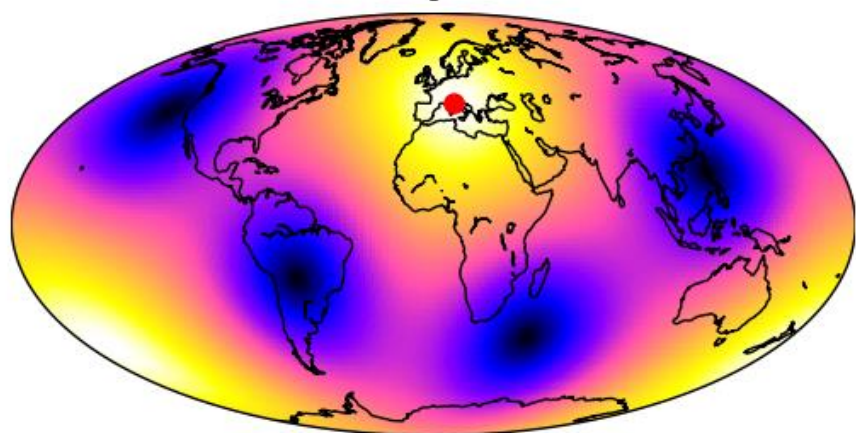


0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern



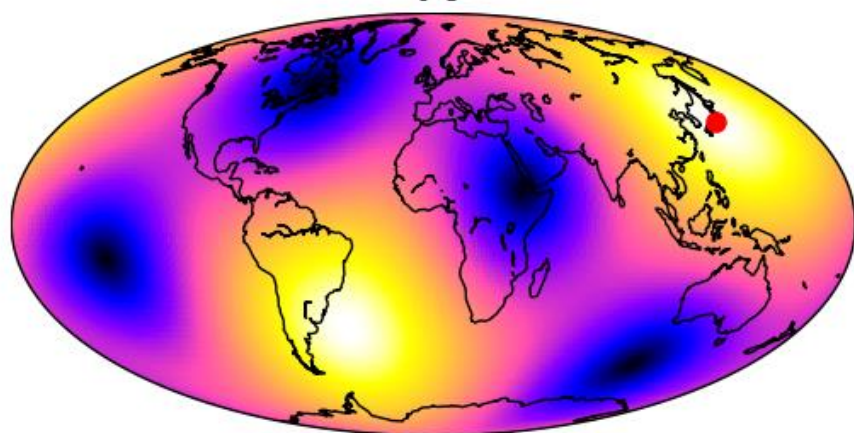
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern

V



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern

K



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern