

第二世代重力波望遠鏡の高感度化

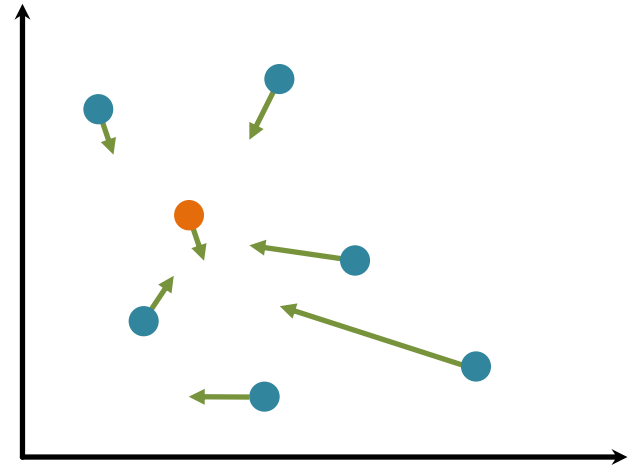
道村唯太

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

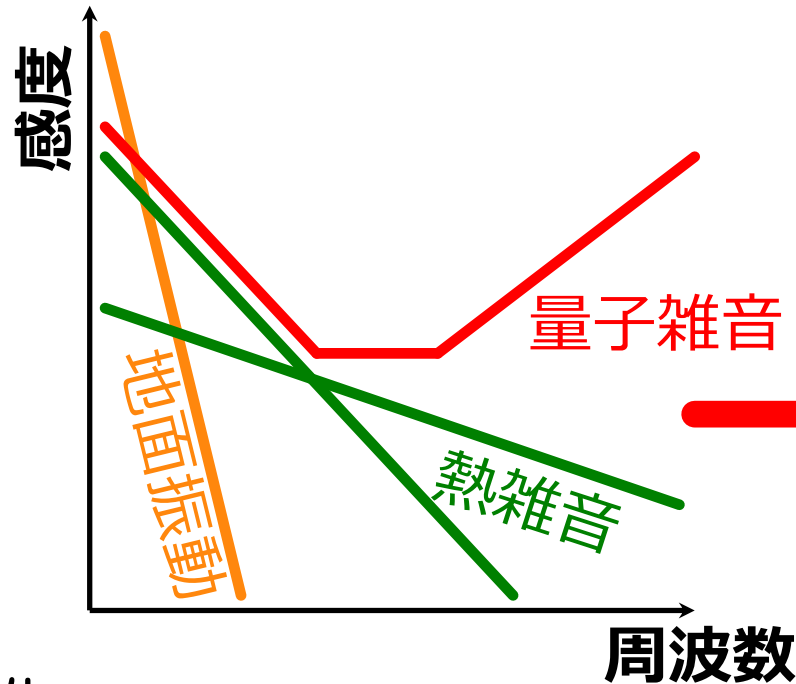
- 次世代のレーザー干渉計型重力波検出器
鏡を低温に → 熱雑音低減
- 低温干渉計の感度設計
低温とレーザー光強度にトレードオフ
複数のパラメータの調整が必要
- 粒子群最適化を用いた感度設計を初めて提案
- KAGRAに適用
既にある部品の
パラメータの調整だけで
連星中性子星の検出数の
約25%向上が可能
- 将来のより複雑な検出器設計に有用



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



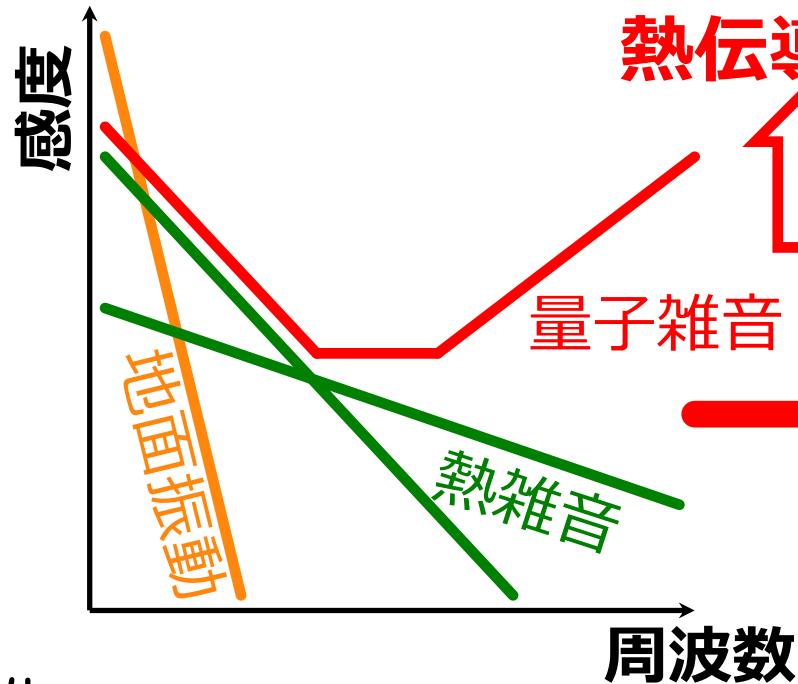
- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

低温干渉計の感度設計は複雑

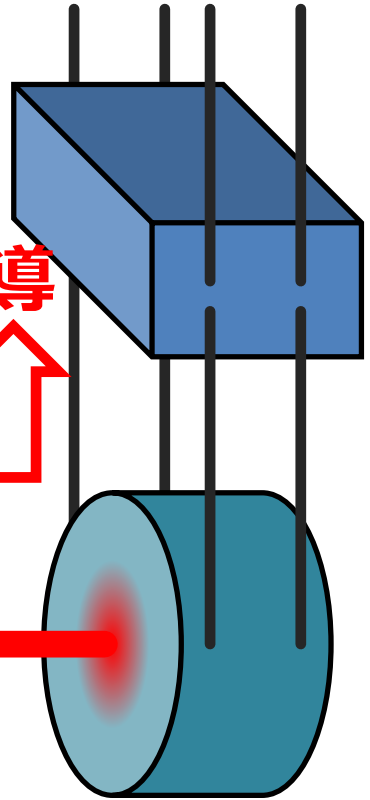
- 地面振動雑音を下げる
多段防振、地下建設

- 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

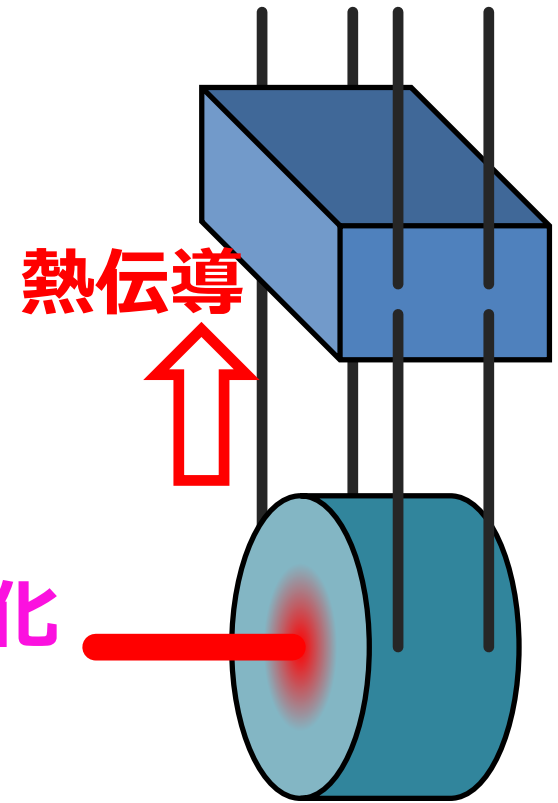
鏡を冷やす

冷却効率の悪化

鏡の熱吸収

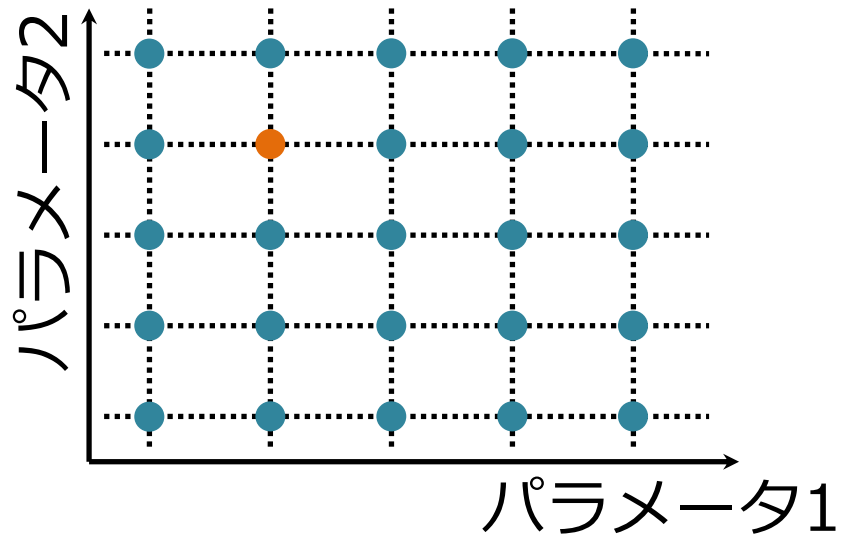
- 量子雑音を最適化
入射レーザー強度
シグナルリサイクリング共振器の調整

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
 - 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

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

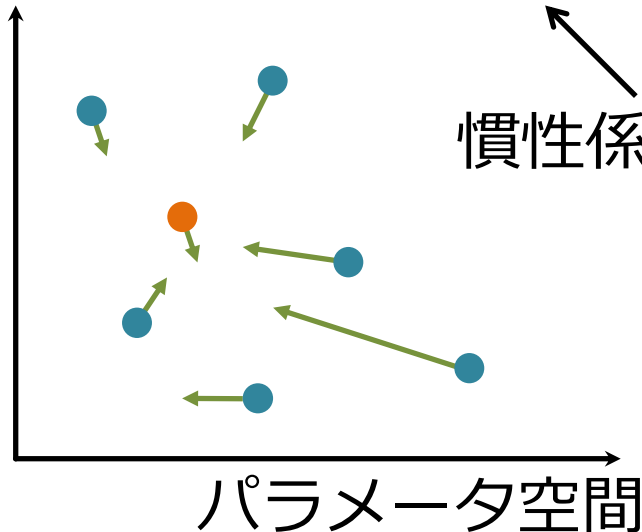
自分自身の
これまでで
最適な位置

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

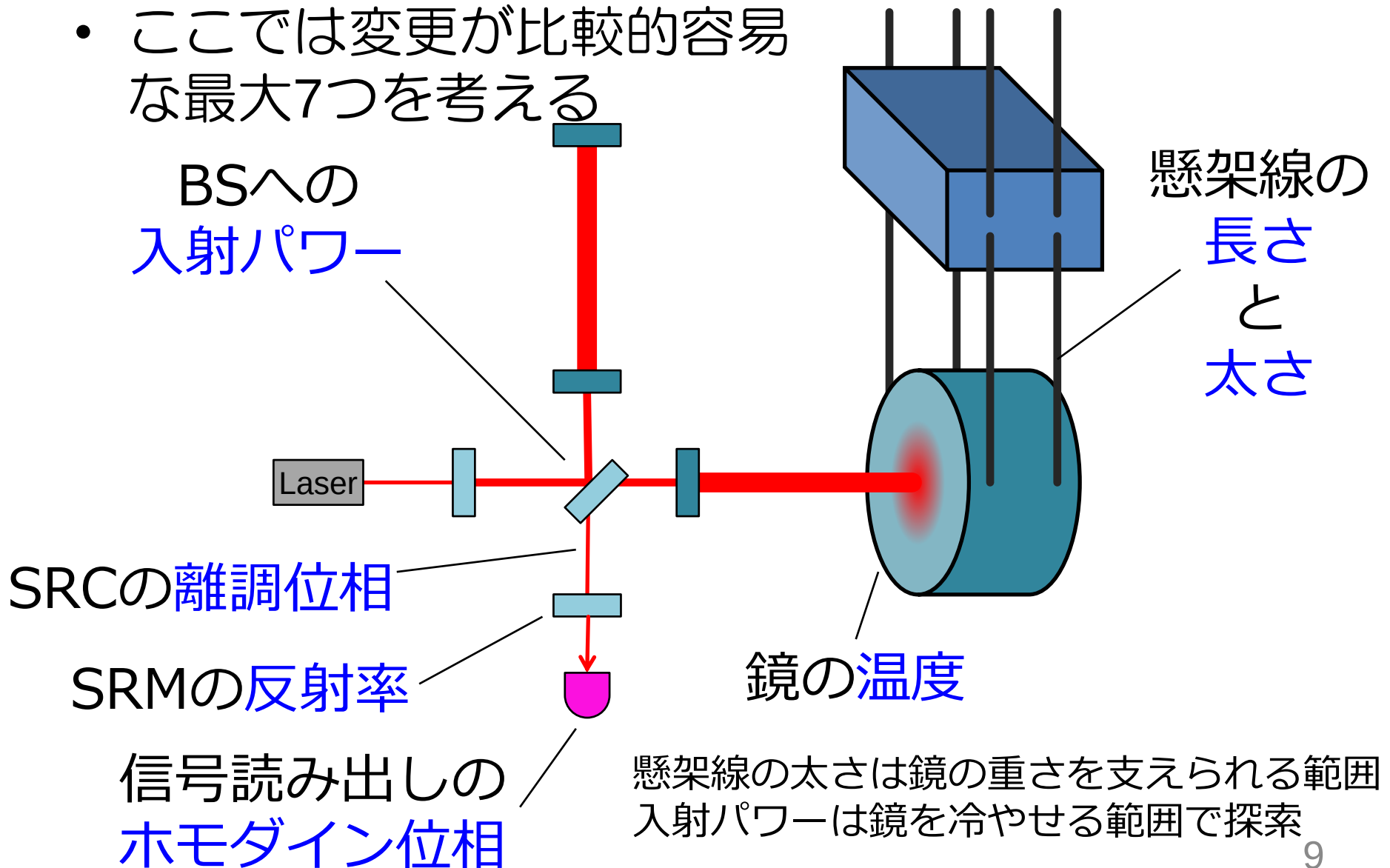
粒子群最適化の特徴

- 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

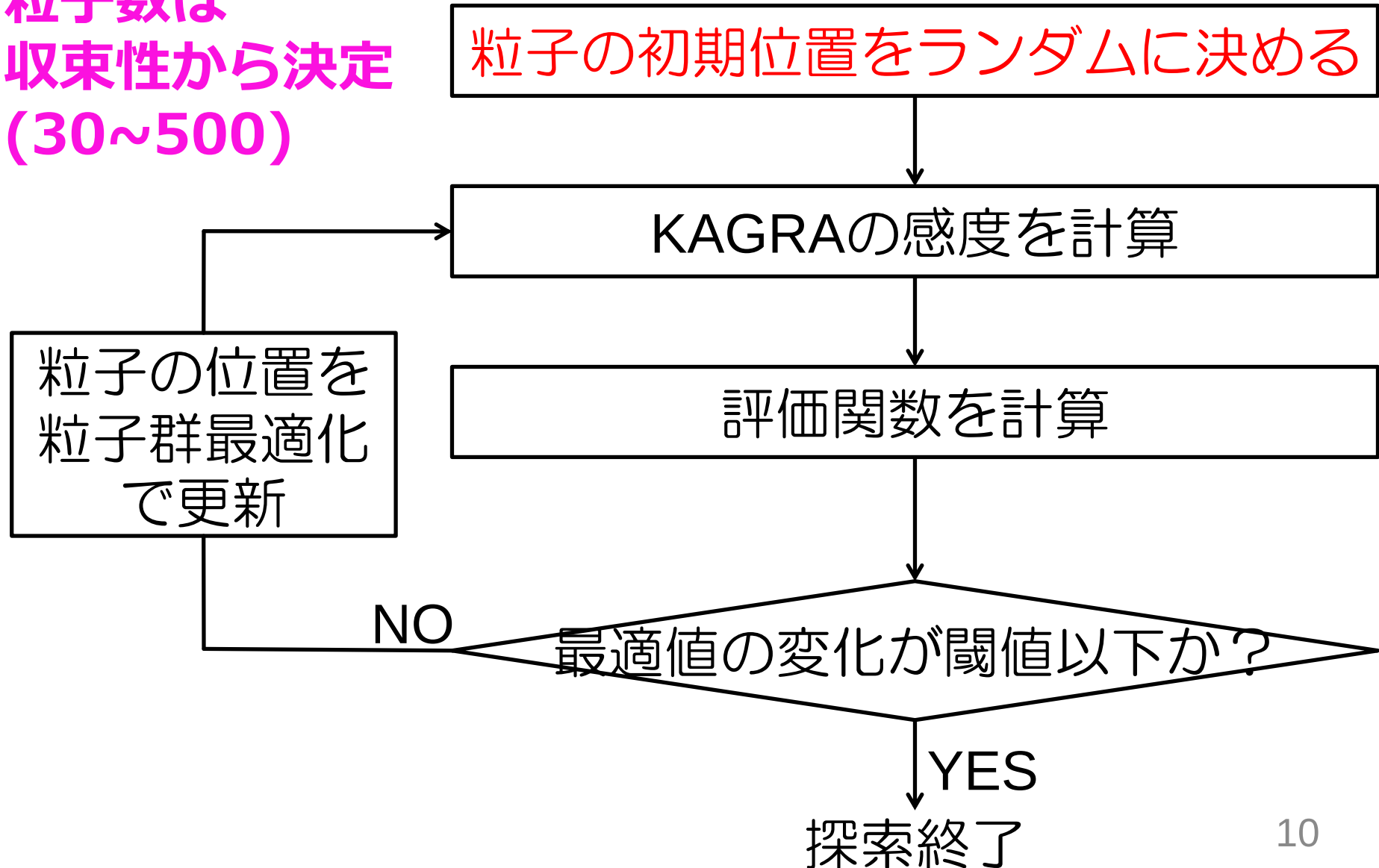
最適化に用いるKAGRAパラメータ

- ここでは変更が比較的容易な最大7つを考える

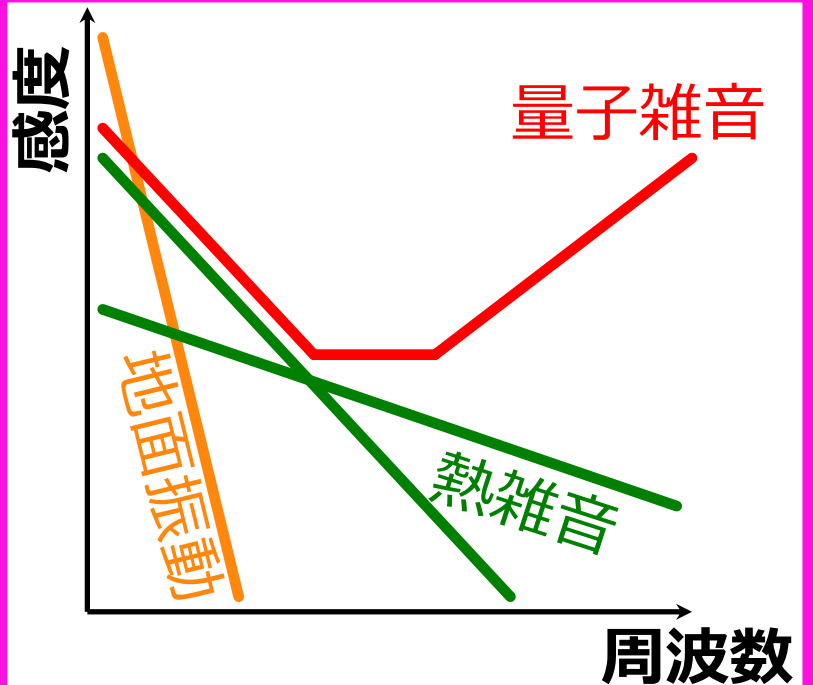


最適化の流れ

粒子数は
収束性から決定
(30~500)



最適化の流れ



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

更新

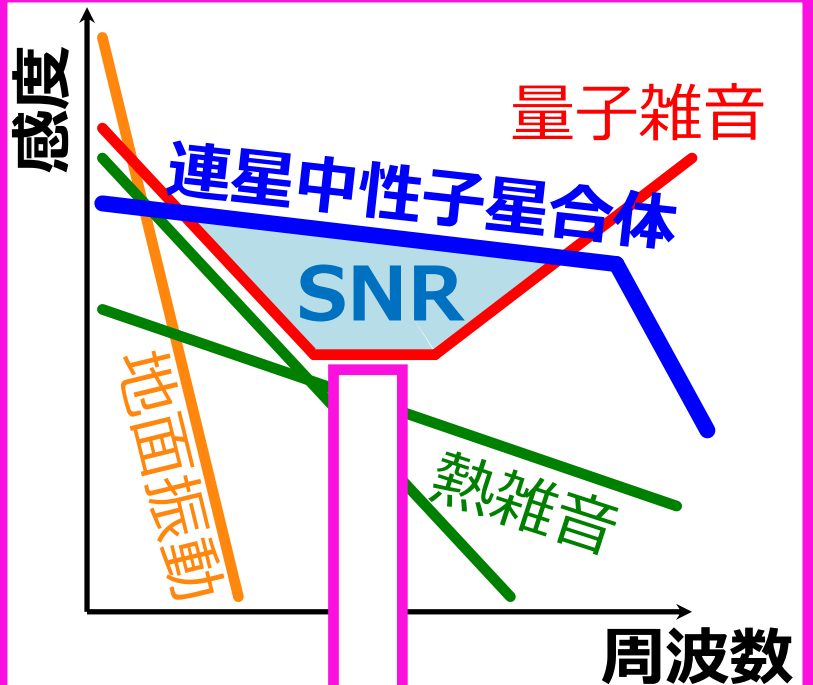
NO

最適値の変化が閾値以下か？

YES

探索終了

最適化の流れ



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

NO

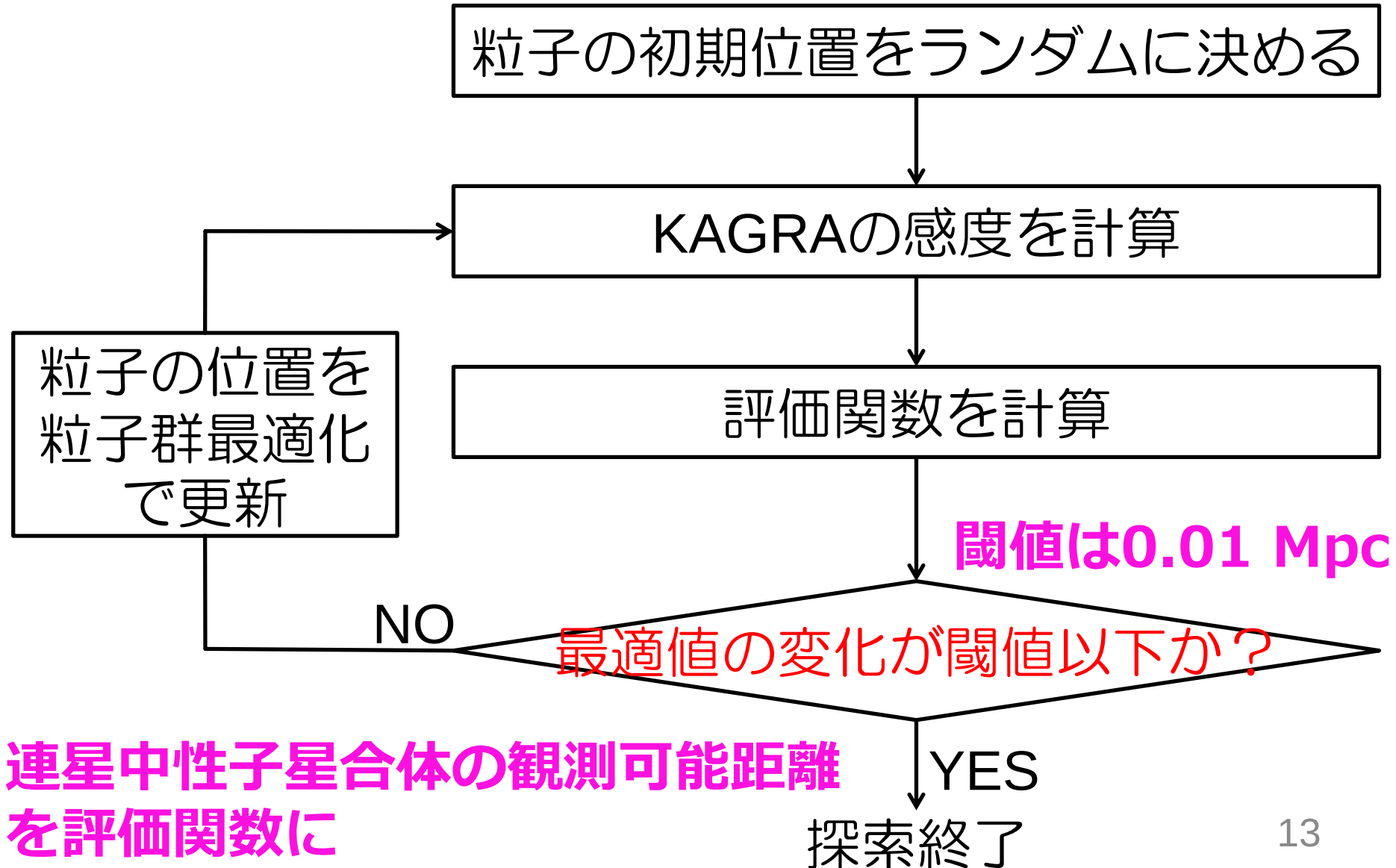
最適値の変化が閾値以下か？

YES

探索終了

連星中性子星合体の観測可能距離
を評価関数に

最適化の流れ



最適化の流れ

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

閾値は0.01 Mpc

NO

最適値の変化が閾値以下か？

YES

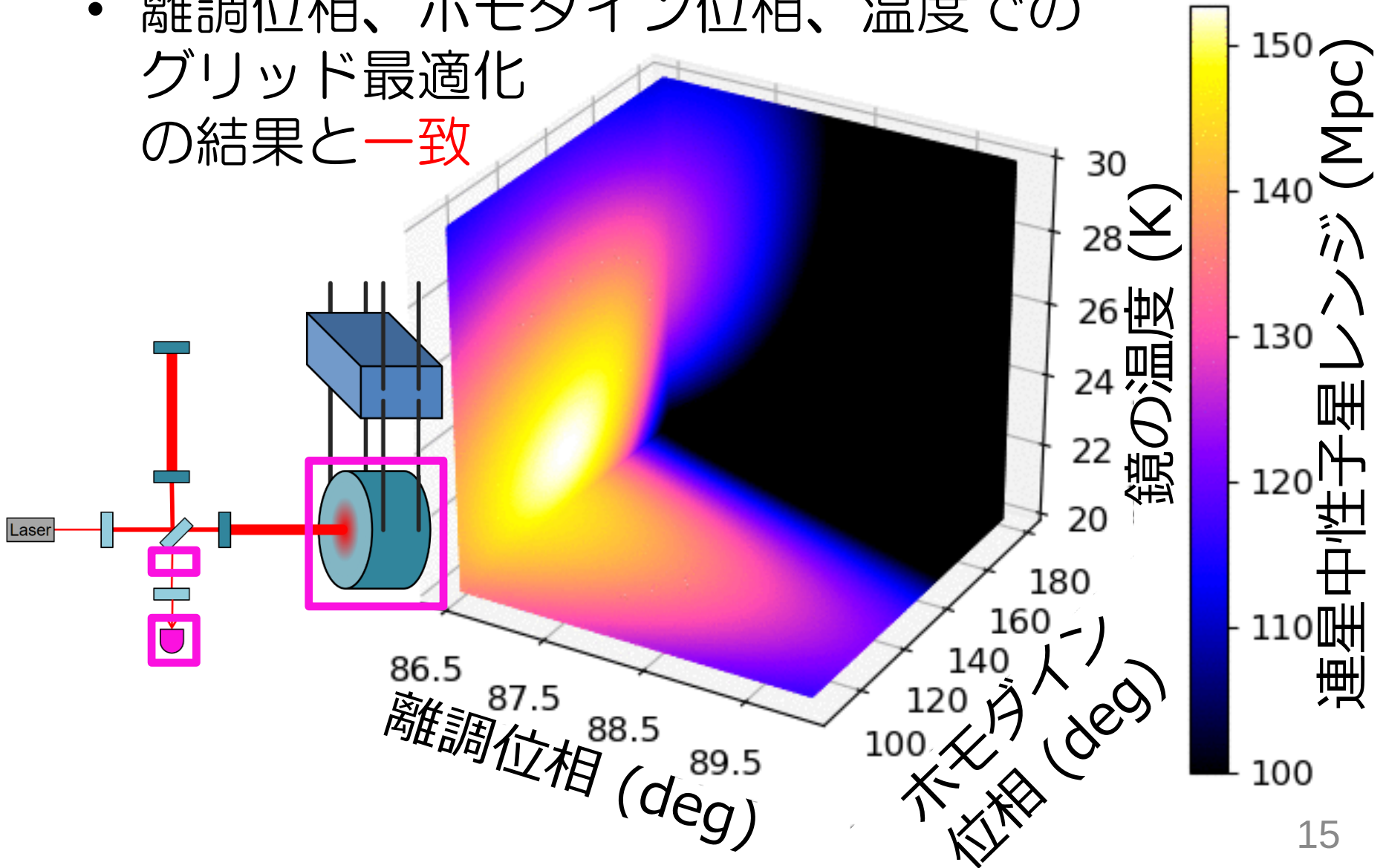
探索終了

粒子の位置を
粒子群最適化
で更新

連星中性子星合体の観測可能距離
を評価関数に

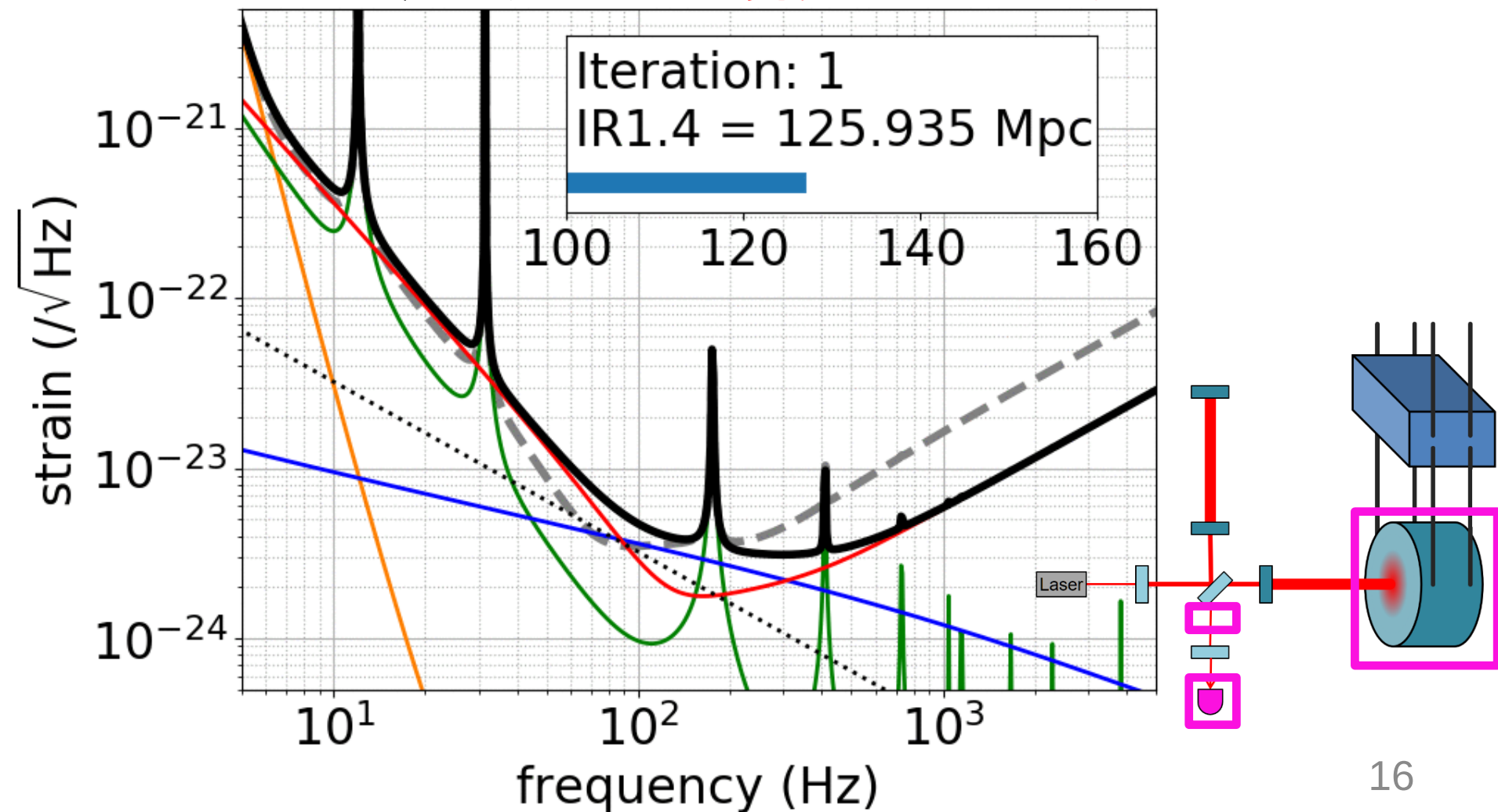
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- 離調位相、ホモダイン位相、温度での
グリッド最適化
の結果と一致



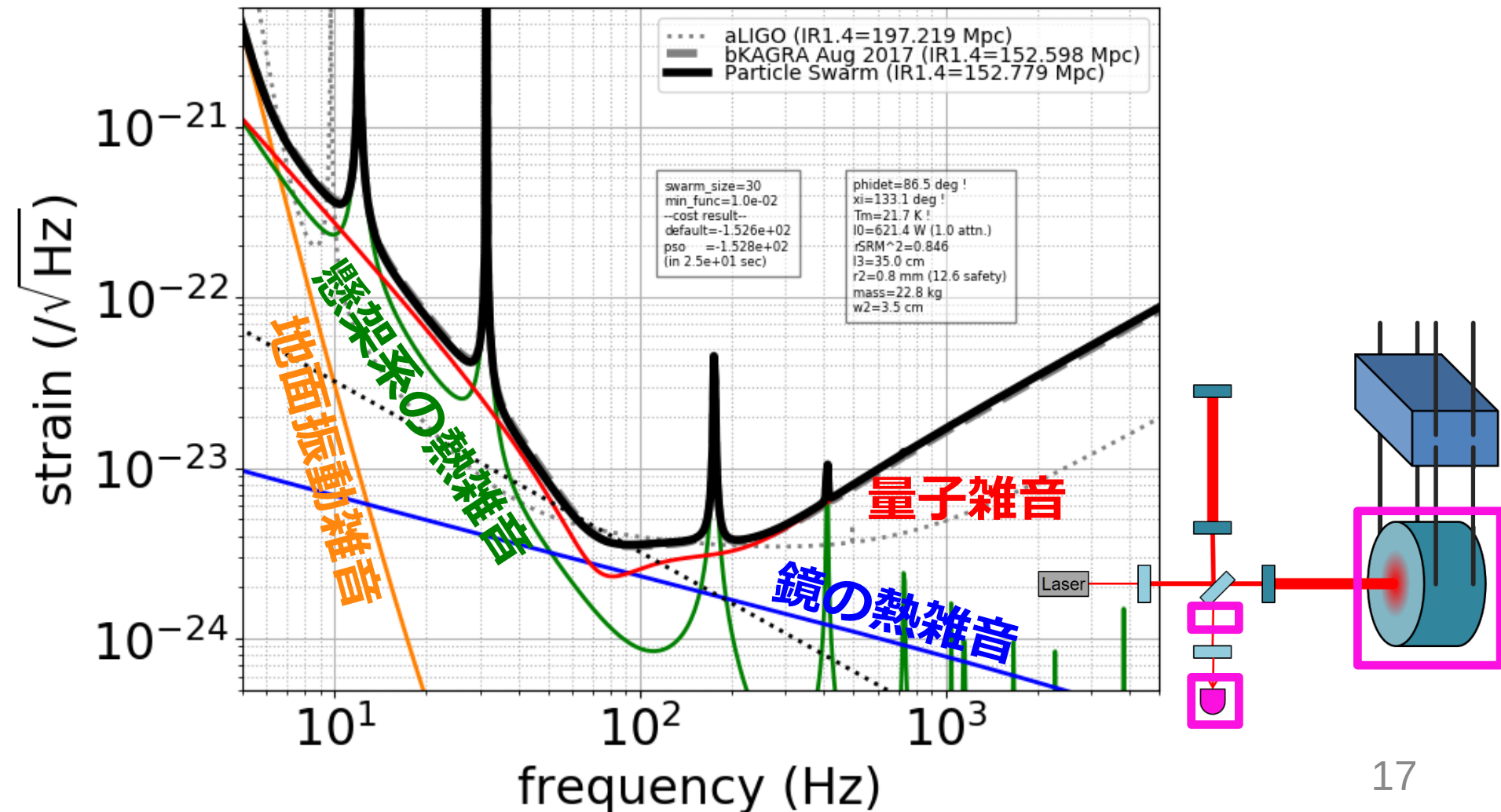
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- 離調位相、ホモダイン位相、温度で
グリッド最適化された**現在の設計感度と一致**



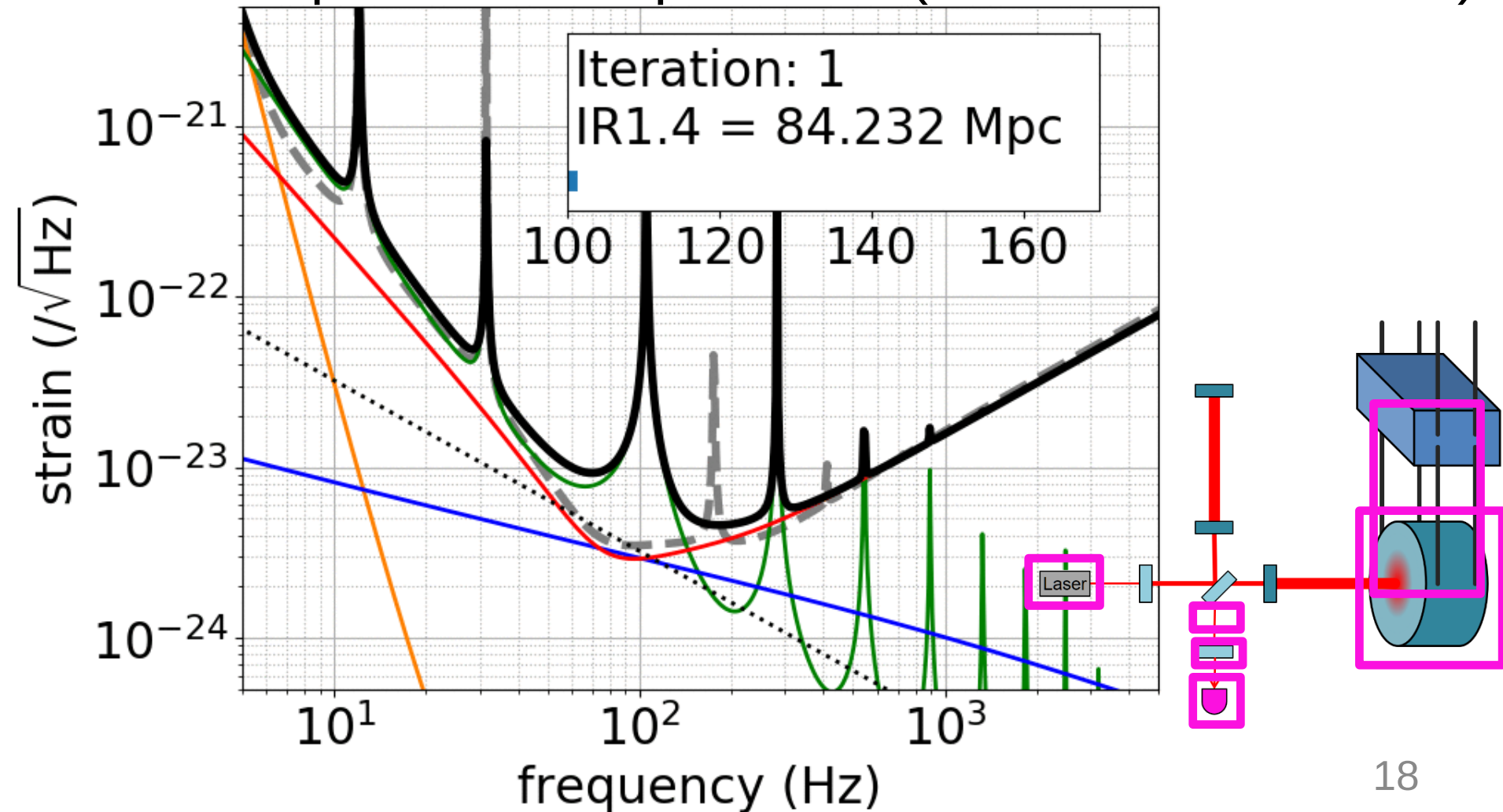
3パラメータで最適化(粒子数: 30)

- 離調位相、ホモサイン位相、温度で
グリッド最適化された**現在の設計感度と一致**



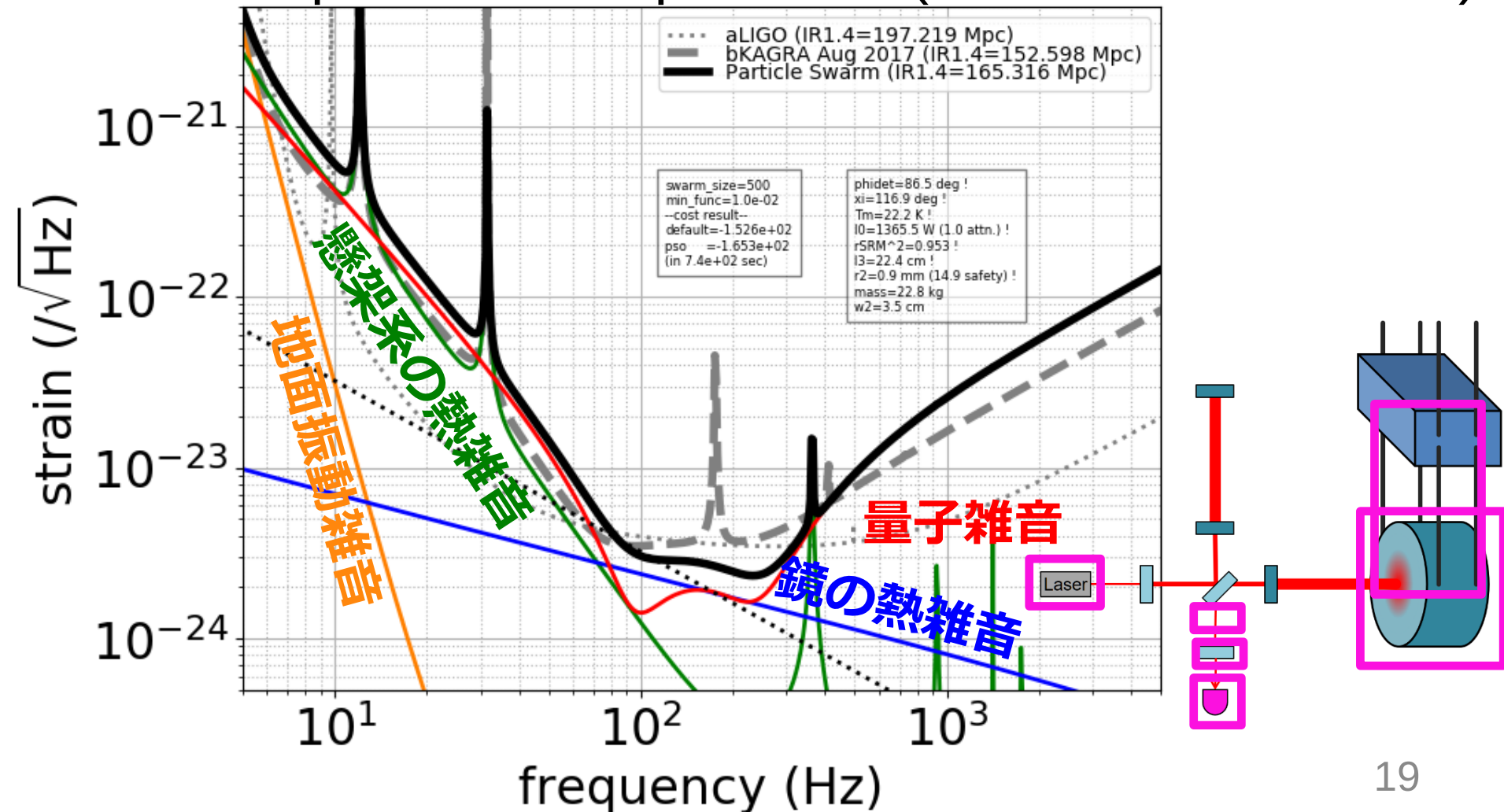
7パラメータで最適化(粒子数: 500)

- 懸架ワイヤの変更など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)



7パラメータで最適化(粒子数: 500)

- 懸架ワイヤの変更など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)



さらに応用: 方向決定に最適化

- 評価関数: GW170817の波源方向決定精度
1.5 – 1.25 Msunの連星中性子星
距離: 40 Mpc ($z=0.009$)
スピンなし

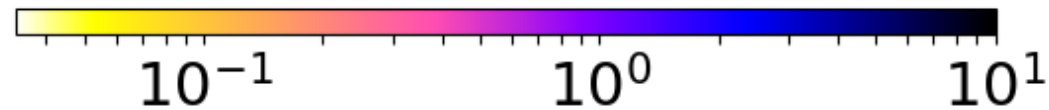
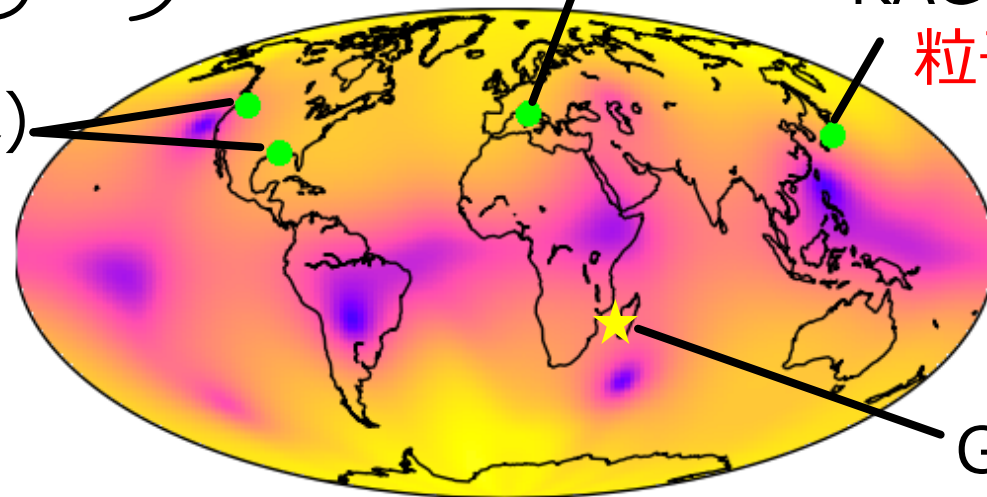
Fisher解析を利用

- 観測ネットワーク

Advanced LIGO(米)
設計感度

Advanced Virgo(伊)
設計感度

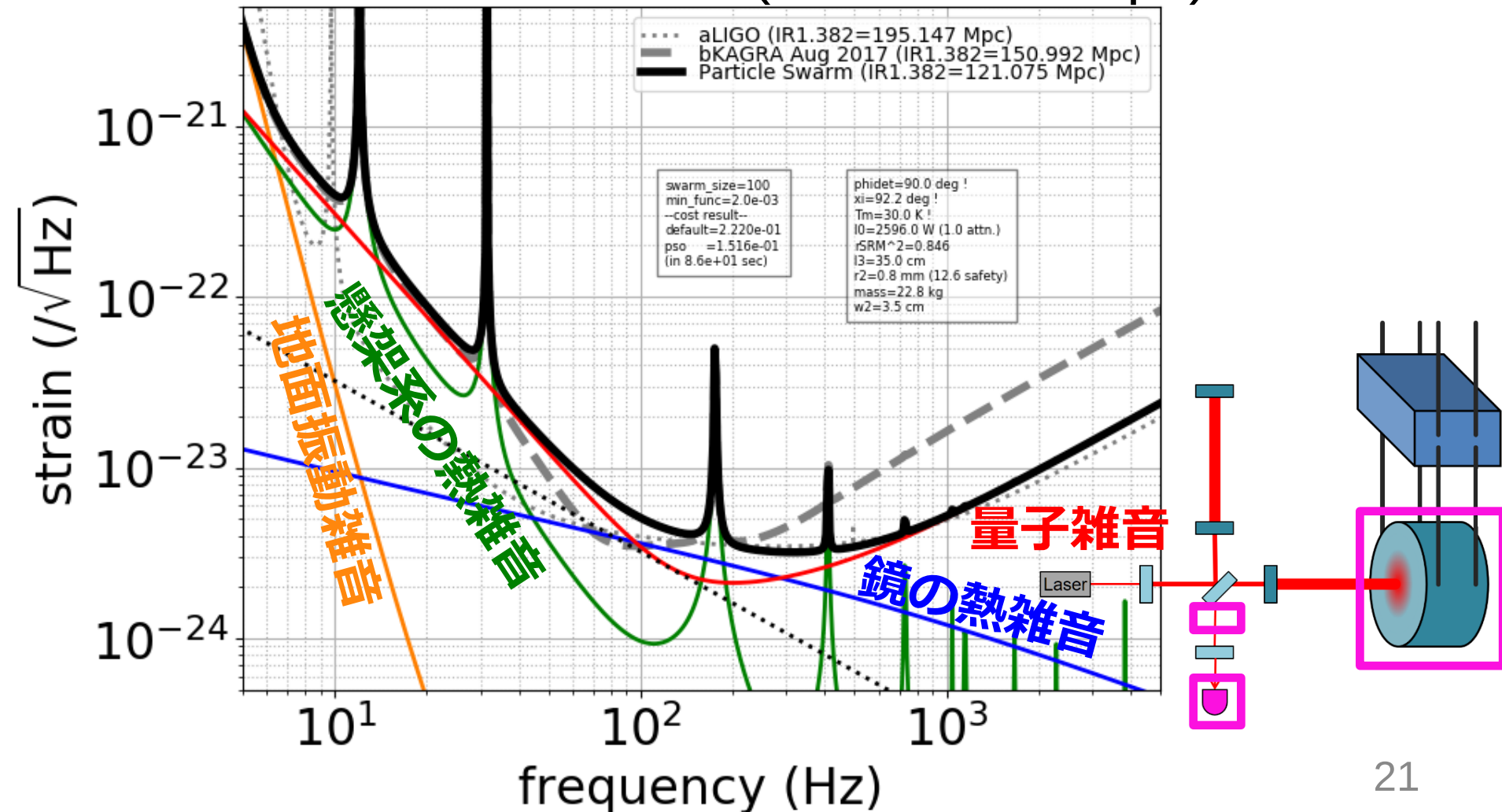
KAGRA(日)
粒子群最適化



sky localization error [deg^2]

3パラメータで方向決定に最適化

- 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 (レンジ 120 Mpc)



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	$500 \times (18 \pm 2)$ 回

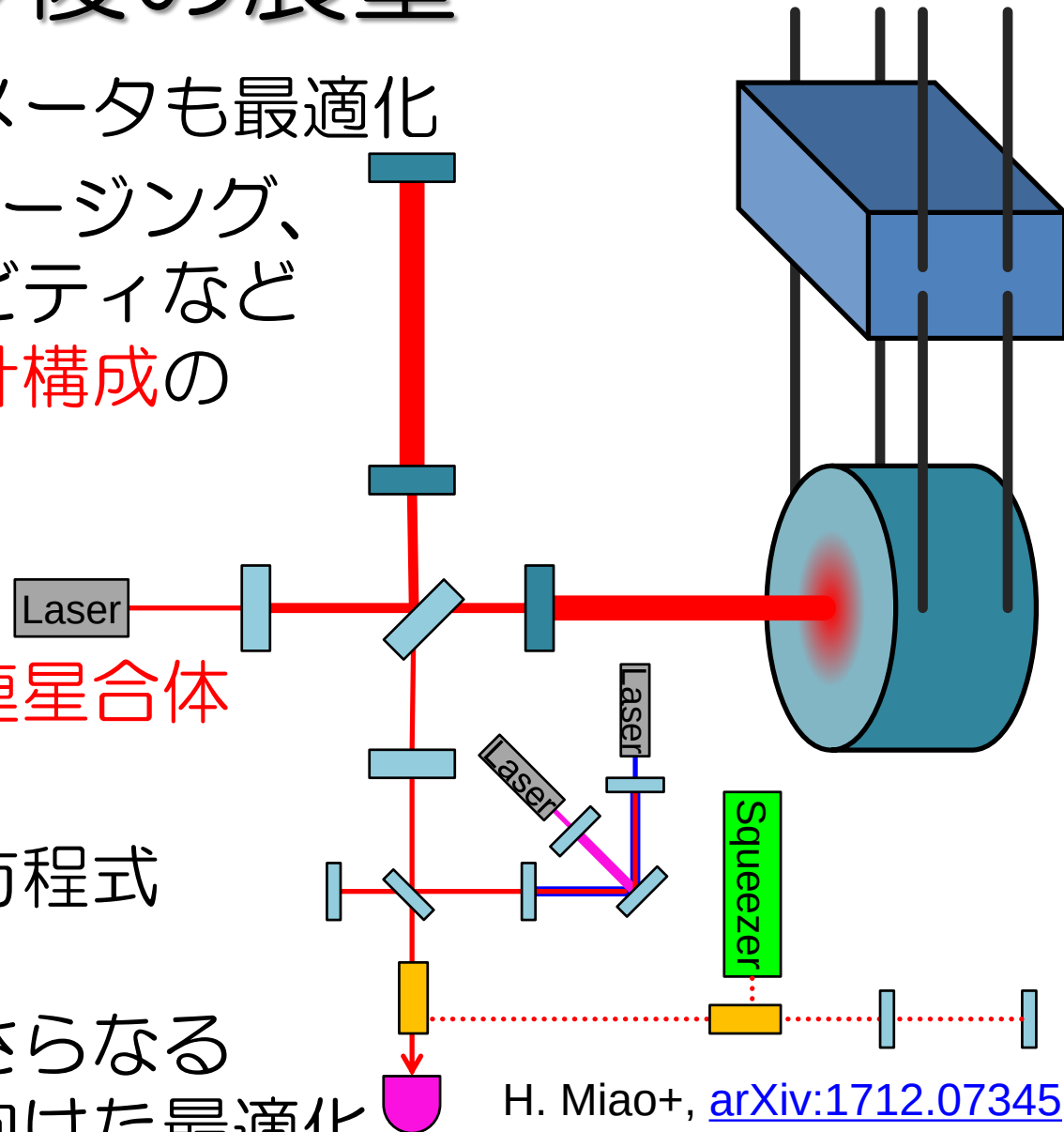
※連星中性子星レンジで0.1 Mpcの精度で最適化したい場合

- 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

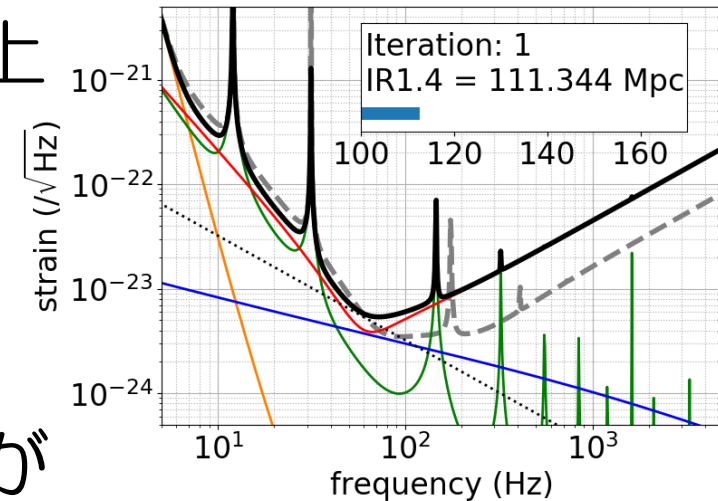
- ブラックホール連星合体
のリングダウン
- 中性子星の状態方程式
パラメータ決定
.....などなど、さらなる
重力波物理学に向けた最適化



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

まとめ

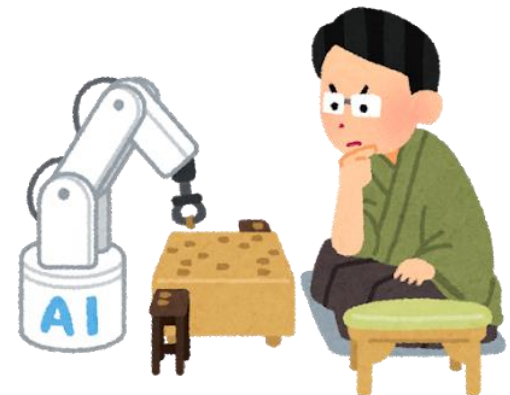
- 粒子群最適化を用いた
重力波検出器の感度設計を初実証
- KAGRAの既にある部品のパラメータ調整だけで
連星中性子星の検出数の約25%向上が可能
- 波源パラメータの決定精度向上
のための感度設計にも有用
- さらに多くのパラメータ調整が
必要となる将来の重力波検出器ではさらに有用
 - 低計算コスト
 - 設計者の事前知識に依存しにくい



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

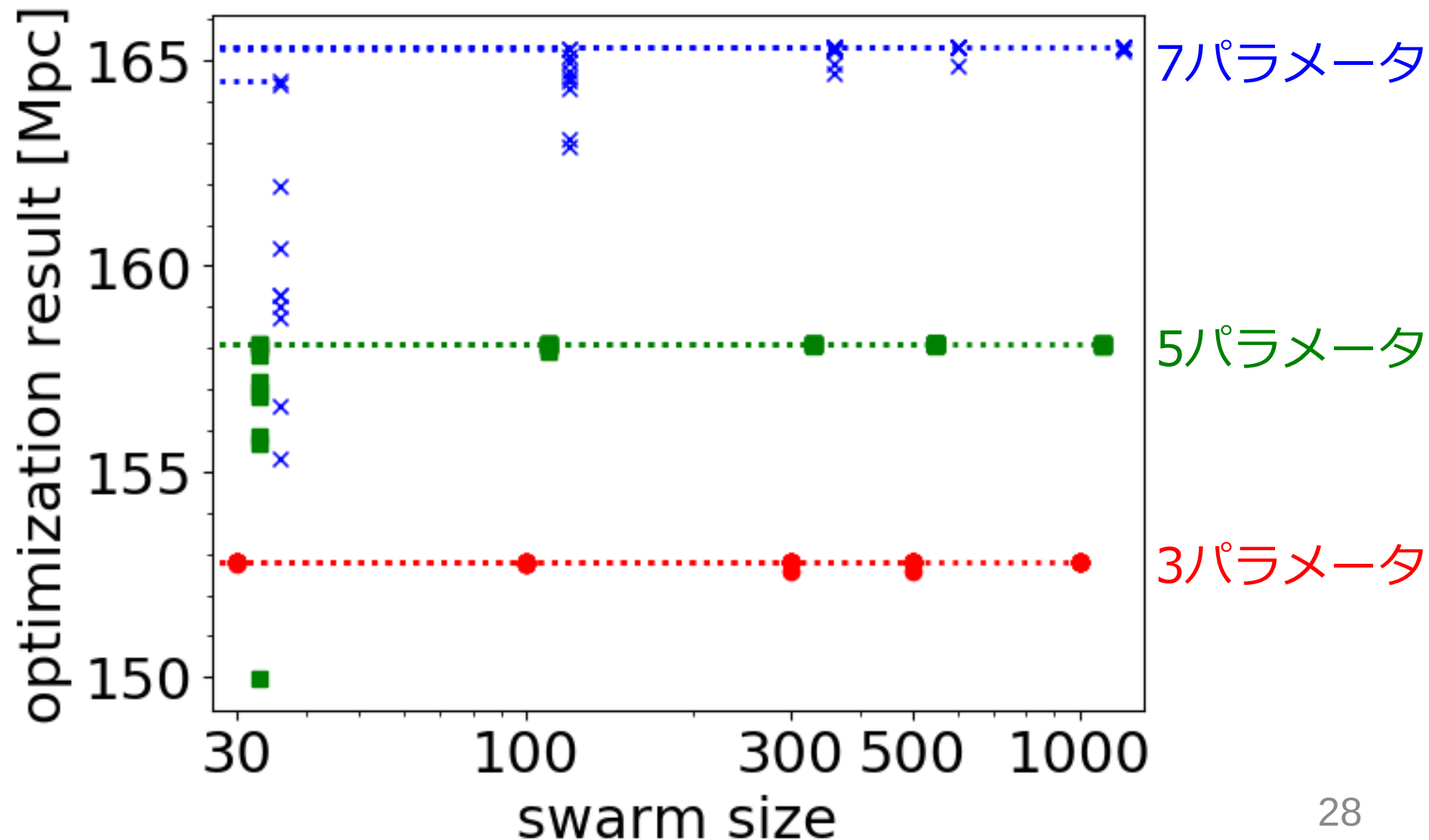
- 複数の独立な試行で粒子数を決定

パラ メータ 数	粒子数			
	30	100	300	500
3	390 $\pm$ 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	970 $\pm$ 70 回 2.9 Mpc 10%	2800 $\pm$ 700 回 0.79 Mpc 20%	6100 $\pm$ 1400 回 0.21 Mpc 80%	8900 $\pm$ 1100 回 0.14 Mpc 90%

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))

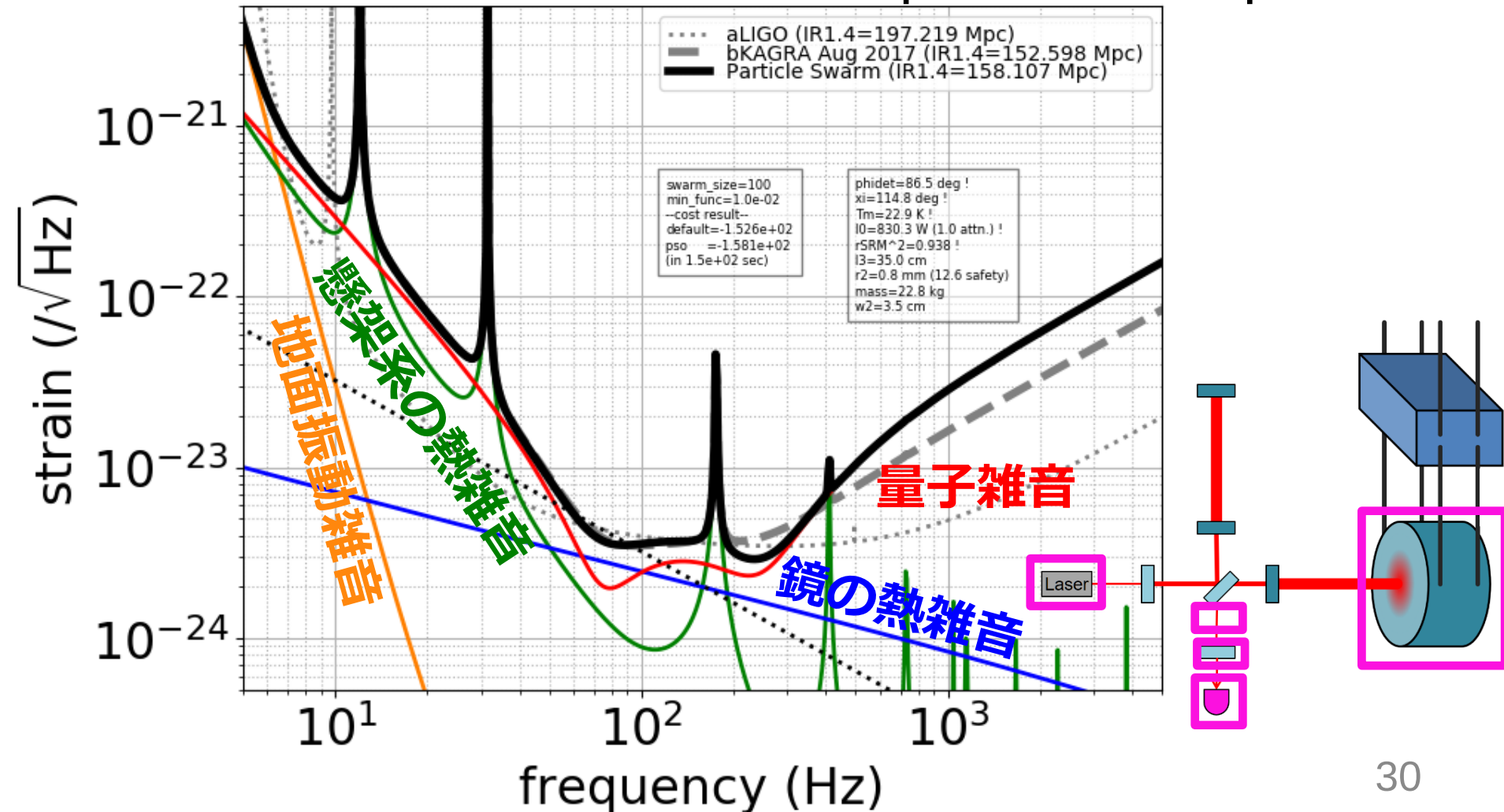


- 粒子が境界を出てしまったときの条件
if $x > x_{\max}$, $x = x_{\max}$; if $x < x_{\min}$, $x = x_{\min}$

連星中性子星レンズを
0.1 Mpc 変える変化量

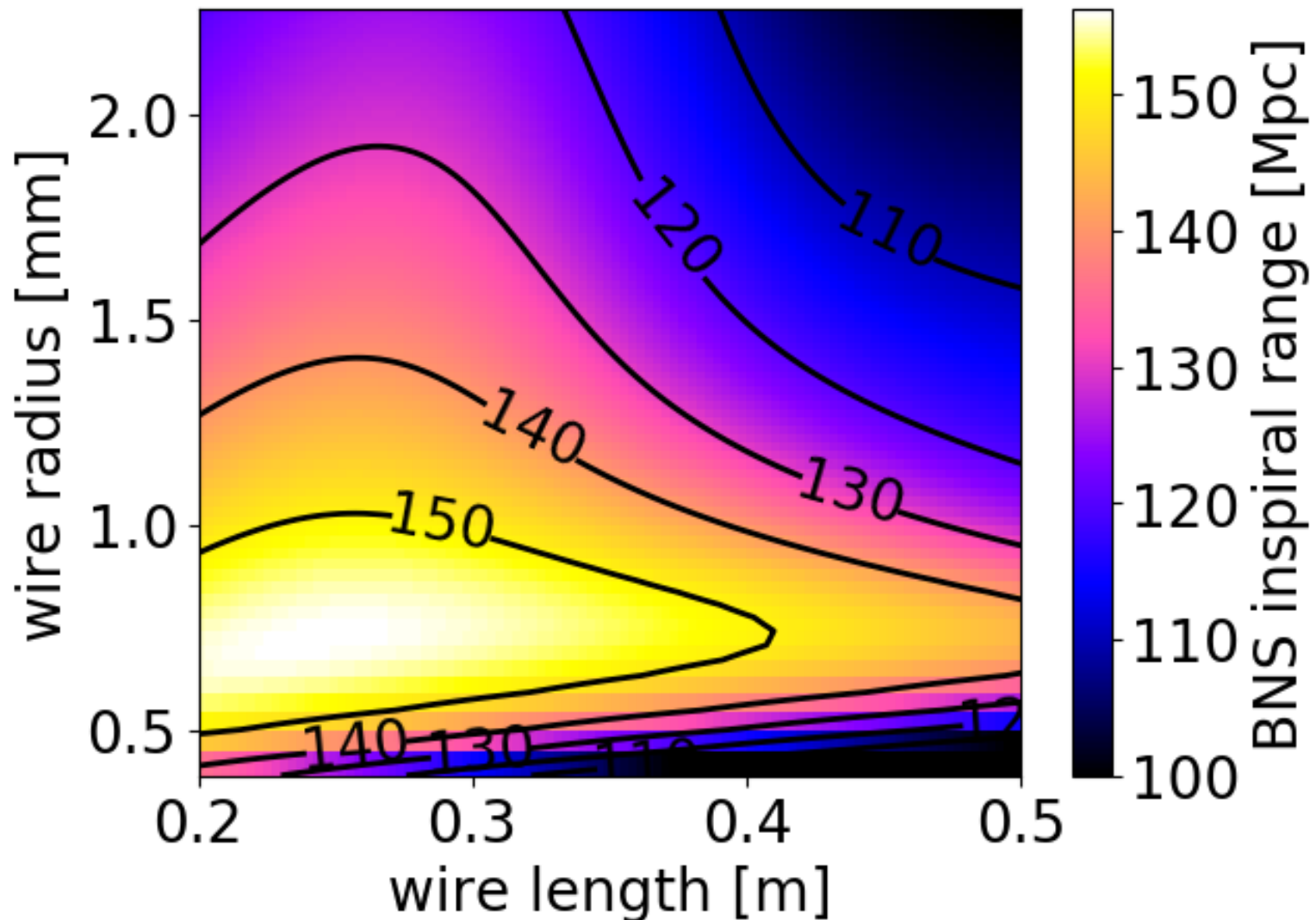
5パラメータで最適化(粒子数: 100)

- 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



ワイヤ長と直径

- 他のパラメータを固定すると25cm/ ϕ 1.4mmが最適

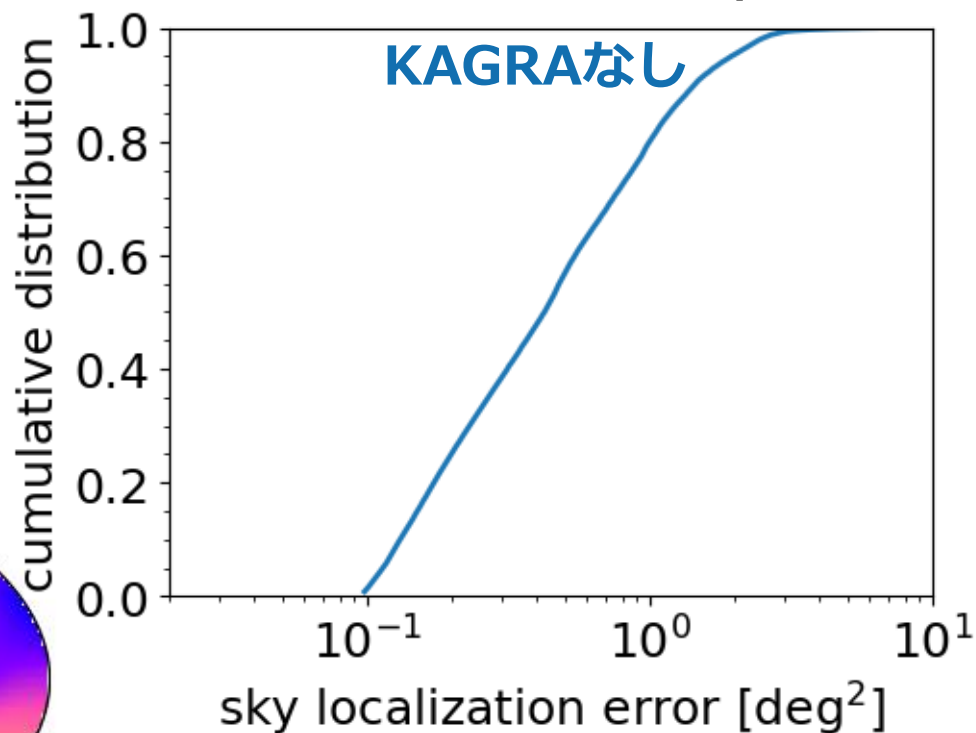
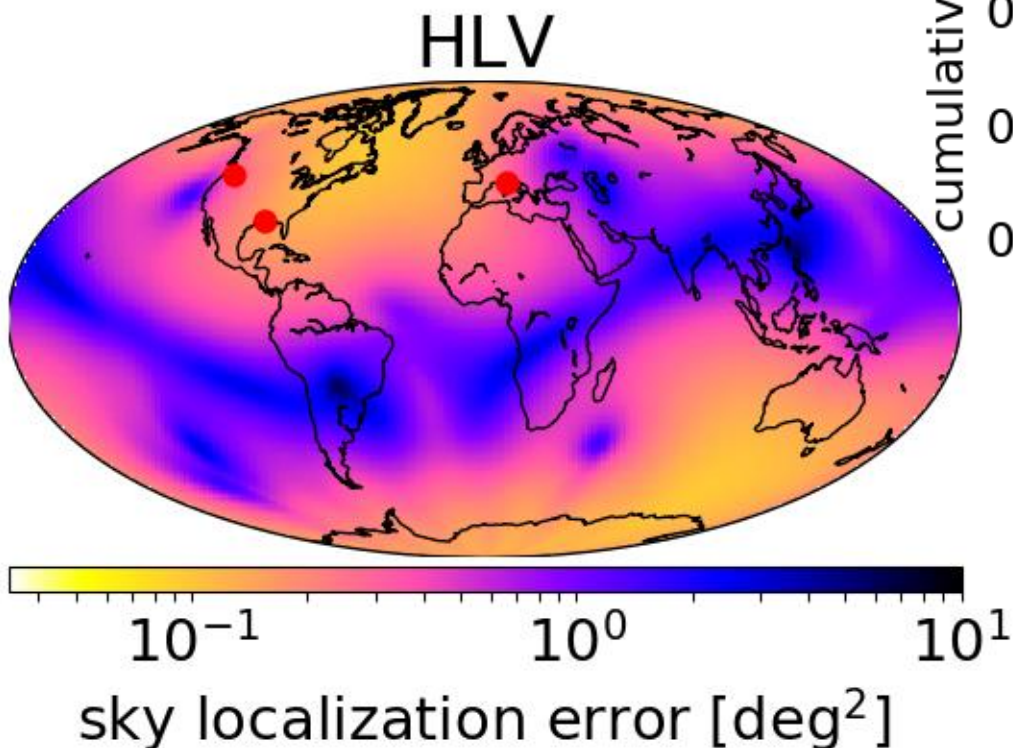


方向決定精度の計算

- Fisher解析を利用
波形はPhenomD (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
location: $(\theta_s, \phi_s) = (113.4^\circ, 40^\circ)$
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
 $f_{\text{ISCO}} = 1.6 \text{ kHz}$

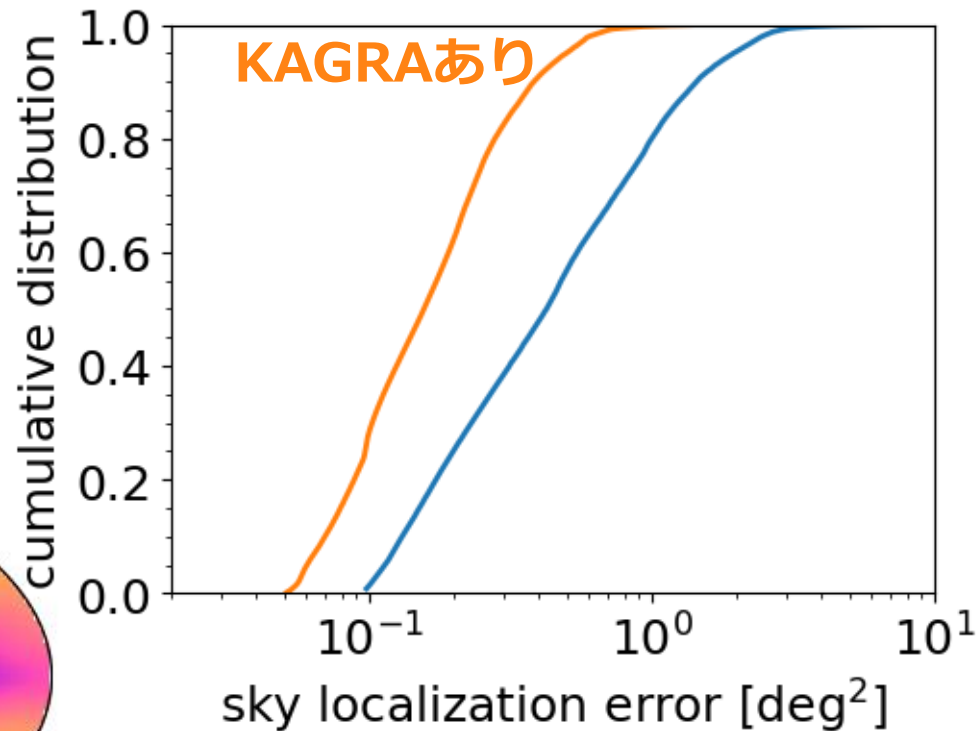
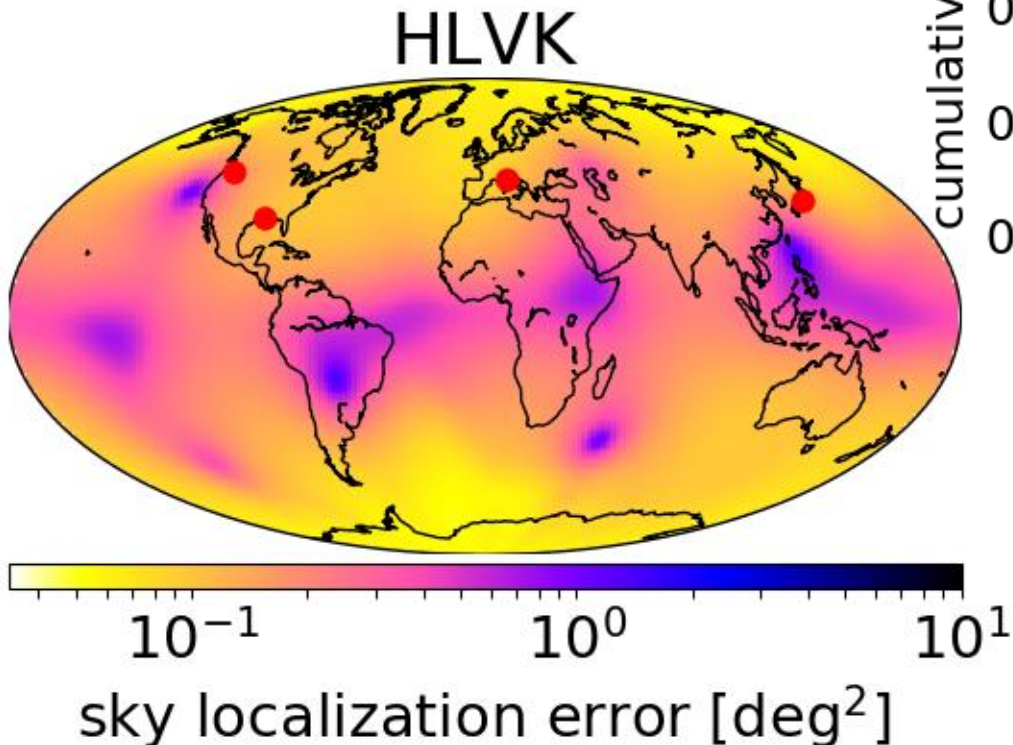
方向決定精度の向上

- KAGRAがない場合(aLIGO2台、AdV1台のみ)
全天の90%が
1.4 deg²以下



方向決定精度の向上

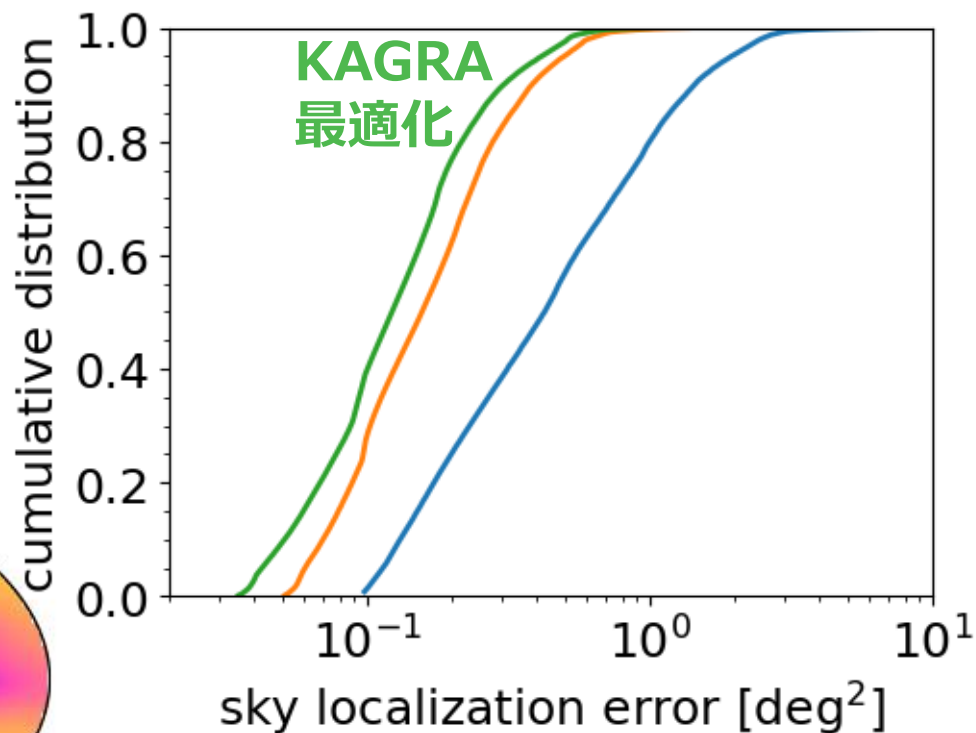
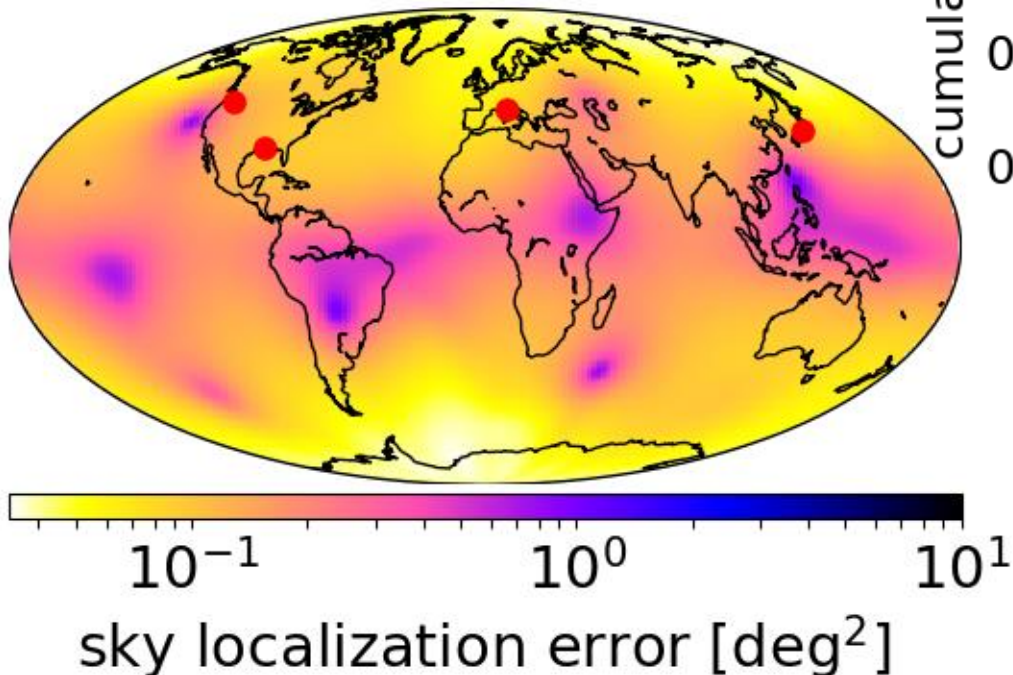
- 現在の設計感度のKAGRAが加わった場合
全天の90%が
0.38 deg²以下



方向決定精度の向上

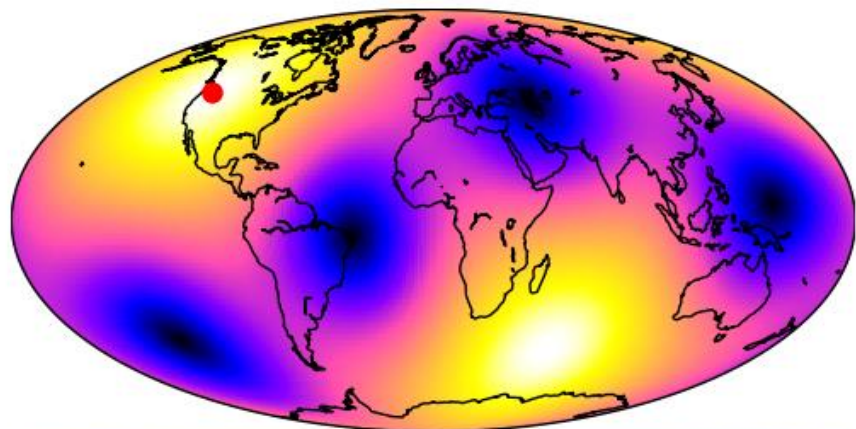
- 最適化されたKAGRAが加わった場合
全天の90%が
0.30 deg²以下

HLVK+

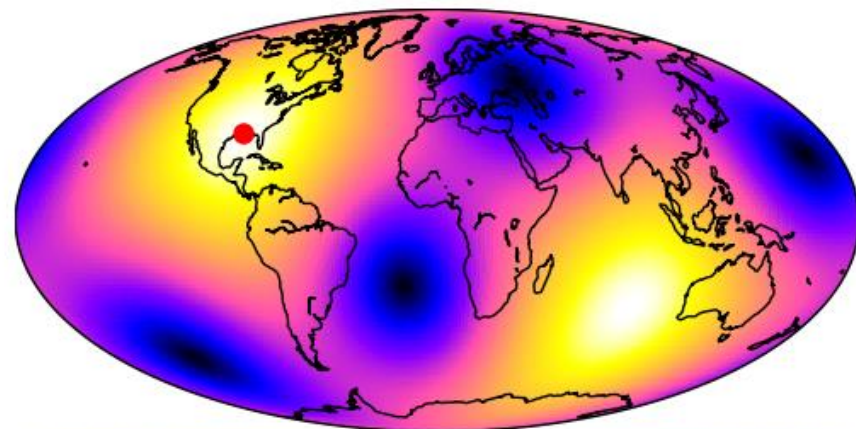


方向決定精度はわずかに
向上するが検出数は半減
することに注意

H Antenna Pattern L

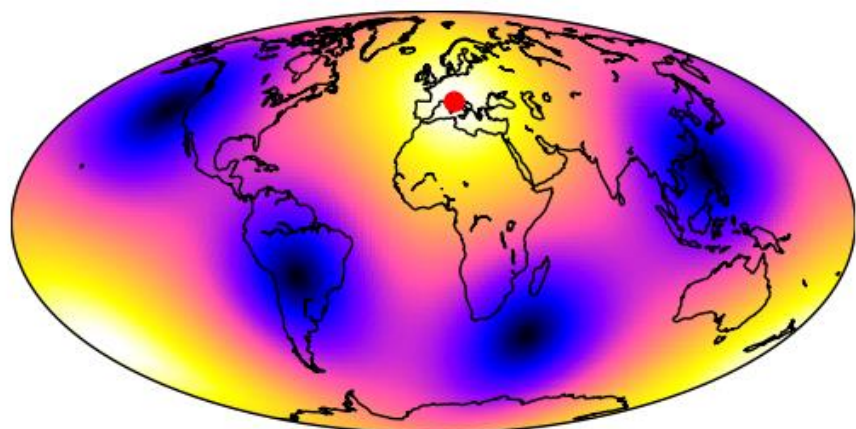


0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern



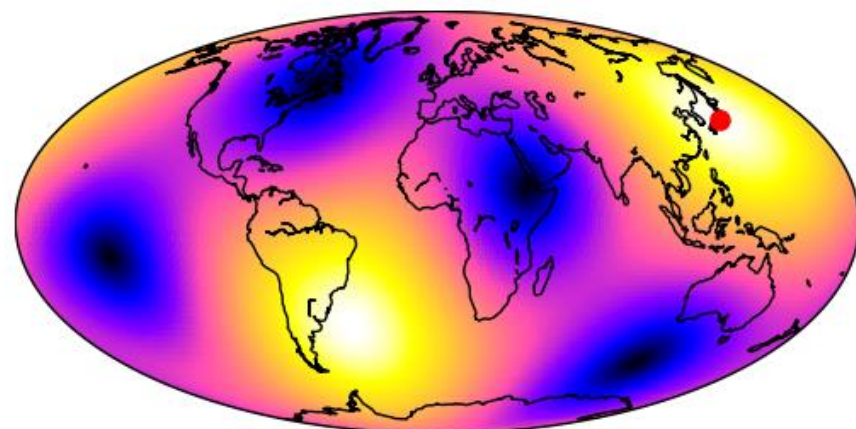
0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern

V



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern

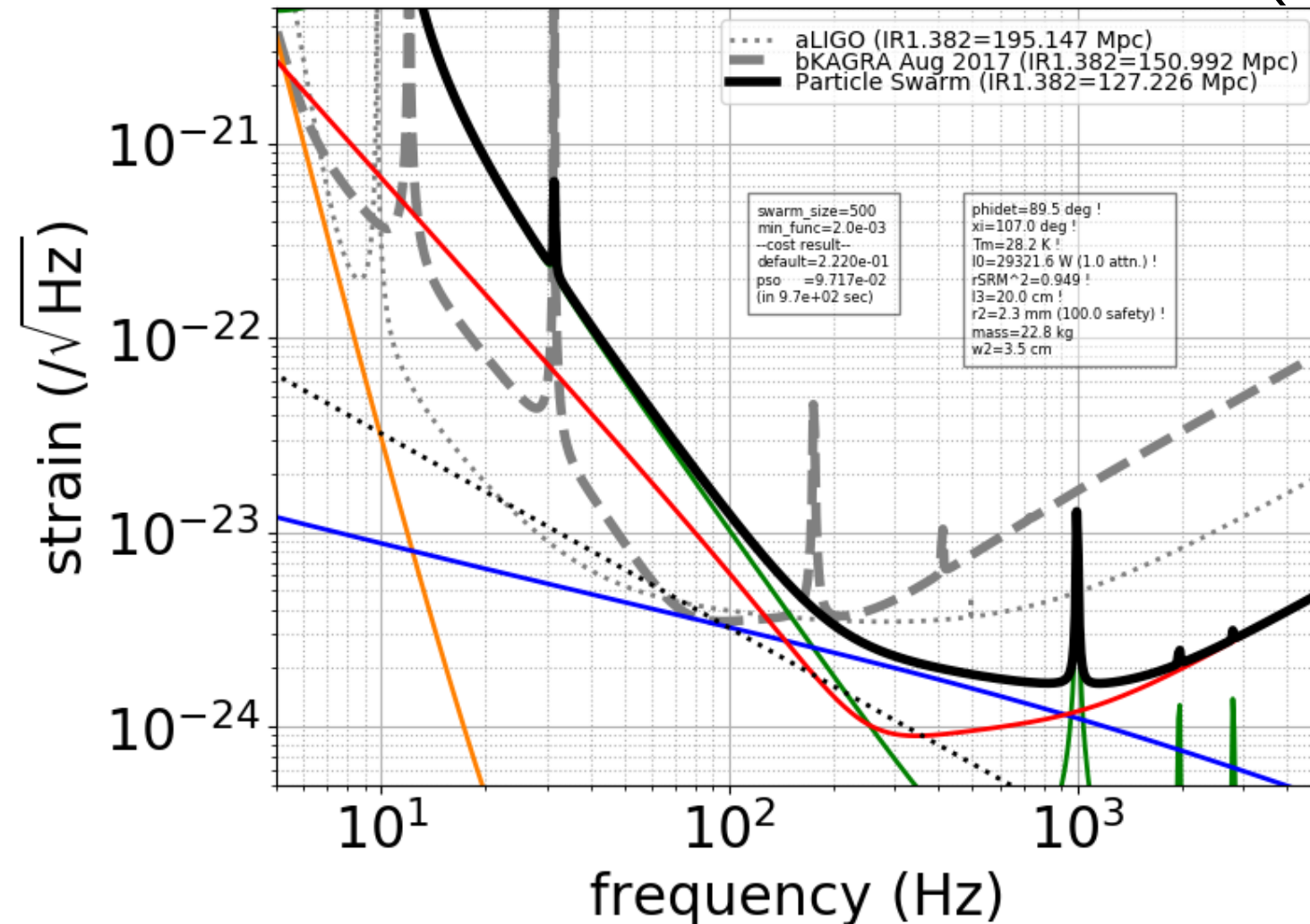
K



0.0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0
antenna pattern

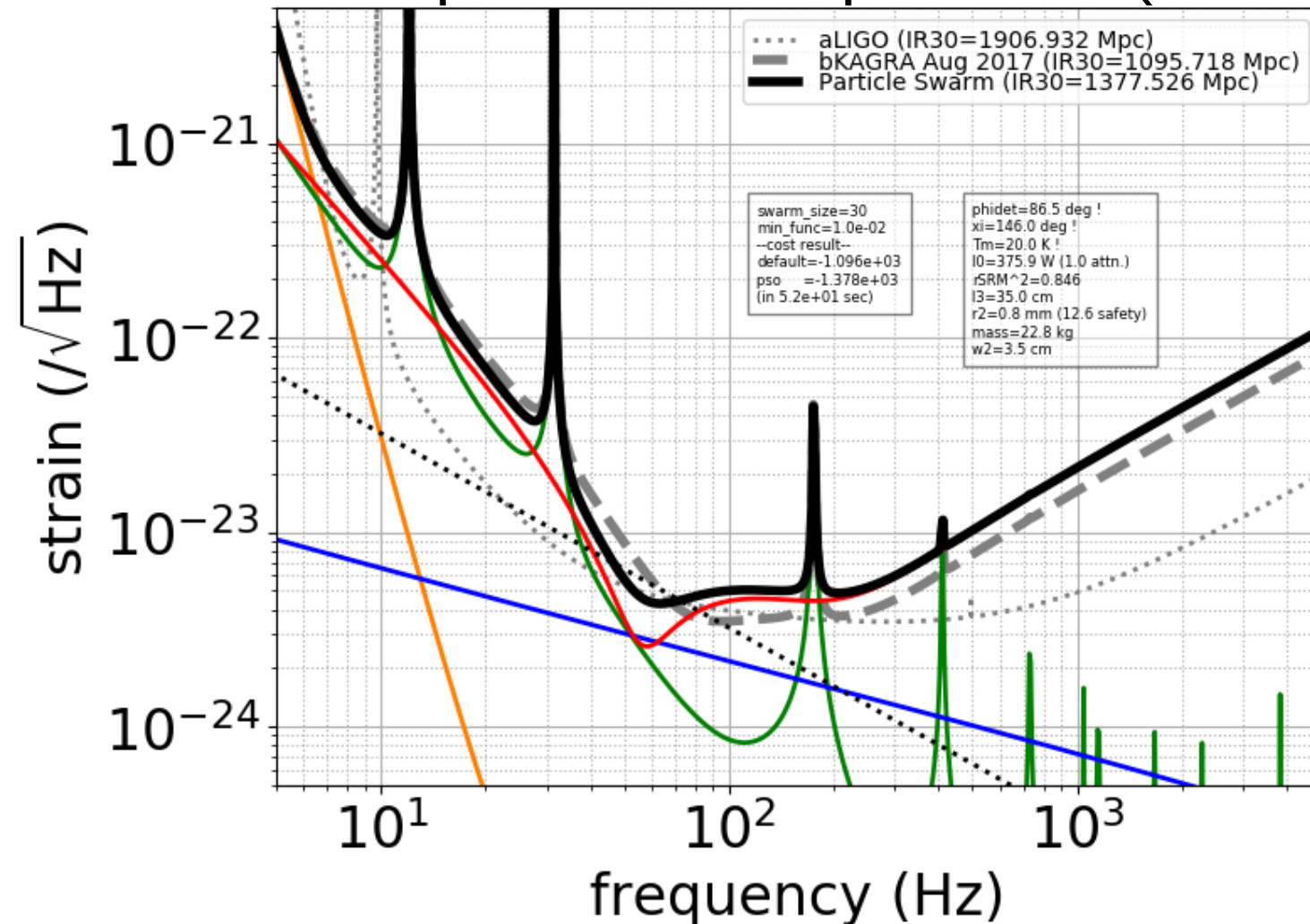
7パラメータでGW170817方向決定

- 懸架ワイヤを太く短く、高パワーで
決定精度**2.3倍**向上、検出数は**半減**(120 Mpc)



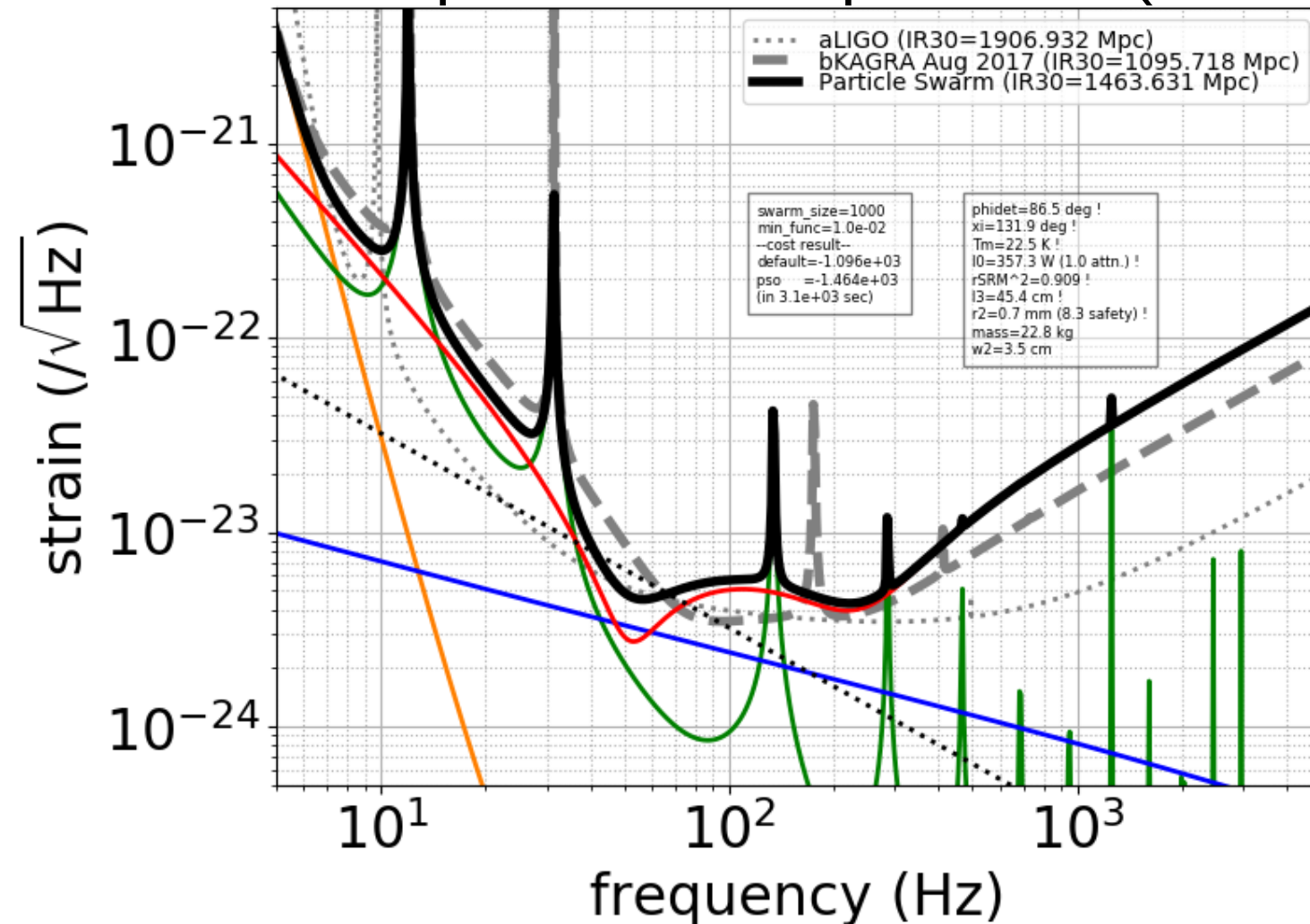
3パラメータでBBH30レンジ最適化

- 追加のコスト不要で
1.10 Gpcから1.37 Gpcに向上 (検出数**2.0倍**)



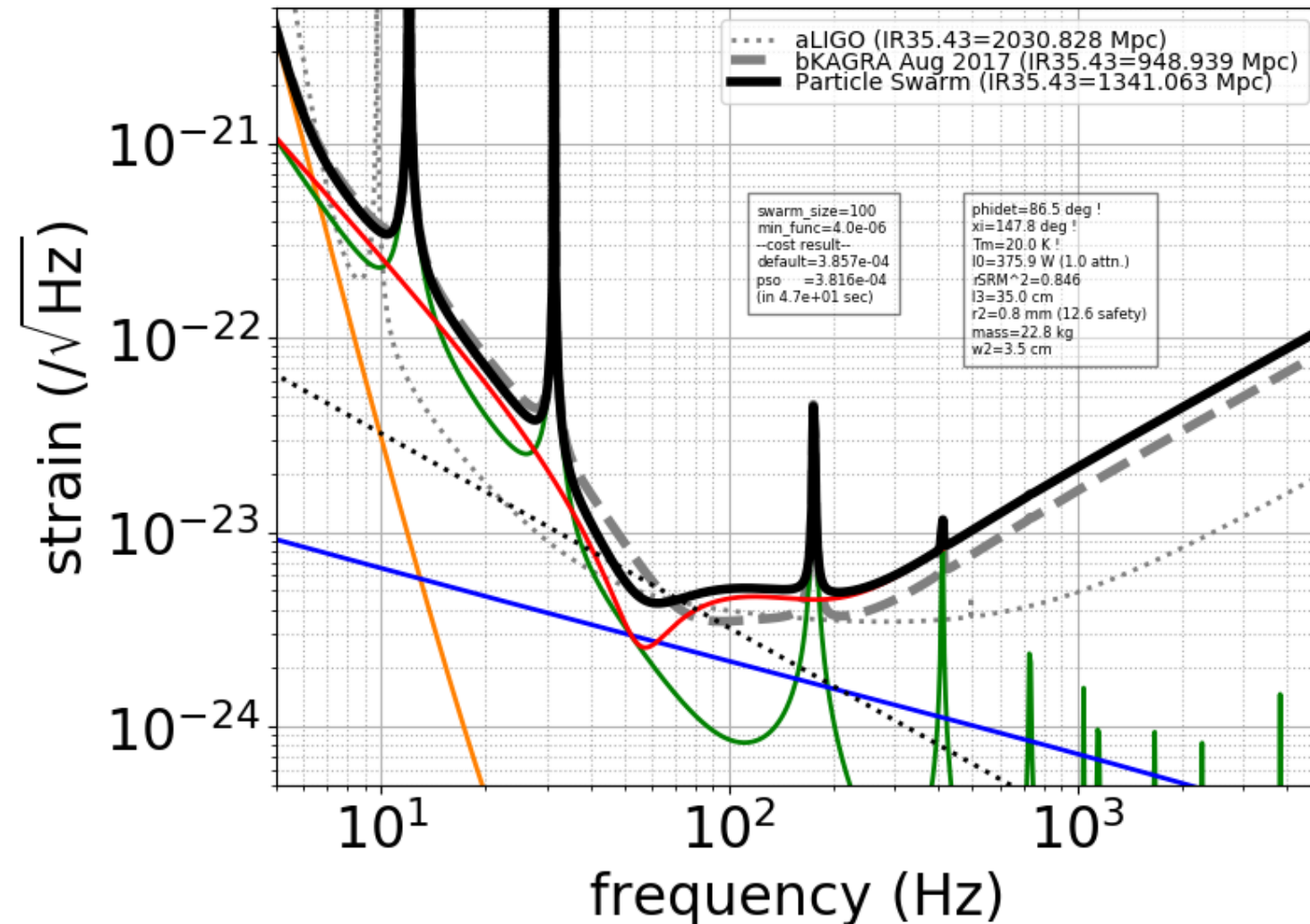
7パラメータでBBH30レンジ最適化

- 懸架ワイヤの変更(長く、細く)などで
1.10 Gpcから1.46 Gpcに向上 (検出数**2.4倍**)



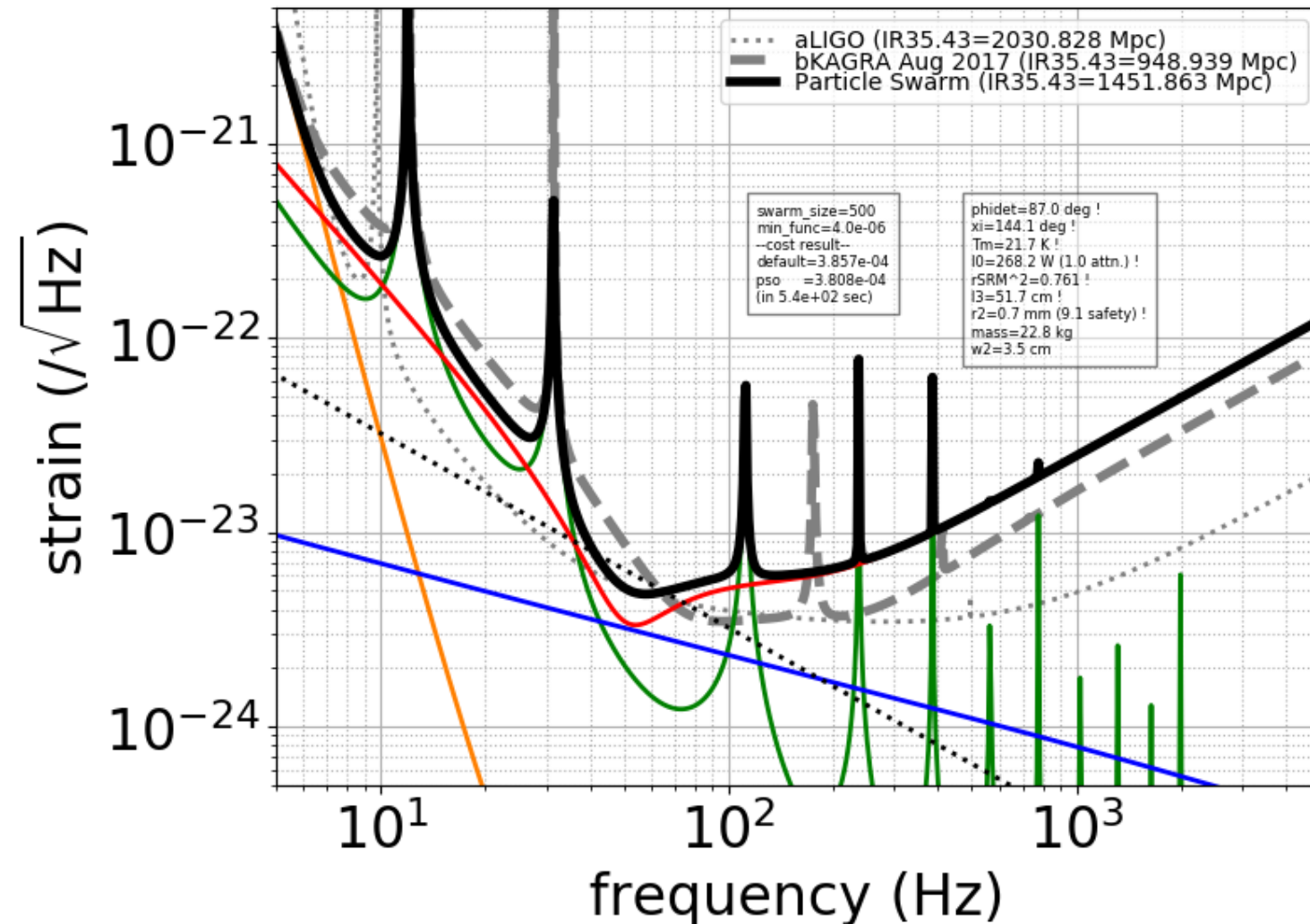
3パラメータでGW150914方向決定

- レンジ最適化と方向決定最適化はほとんど同じ
決定精度向上は**1%**程度



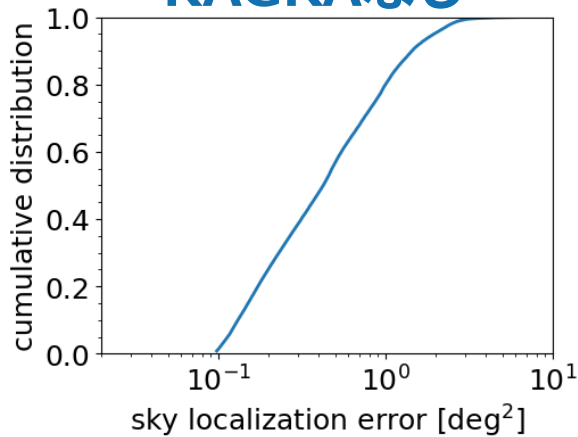
7パラメータでGW150914方向決定

- 懸架ワイヤの変更などしてももう少ししか方向決定精度は向上しない



O3だとBNS方向決定は1/3-1/4程度

KAGRAなし



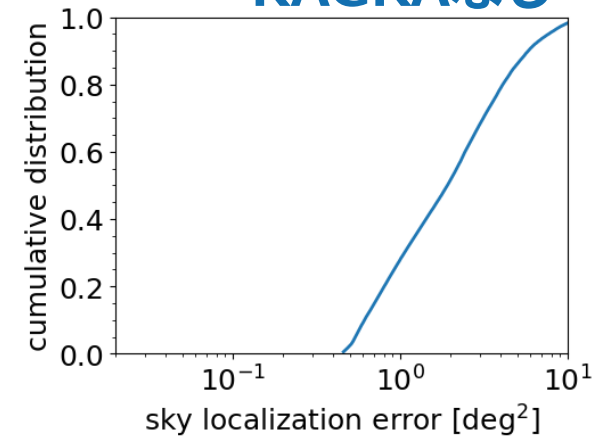
1.5-1.25 M_{sun}
40 Mpc ($z=0.009$)

HL: 120 Mpc

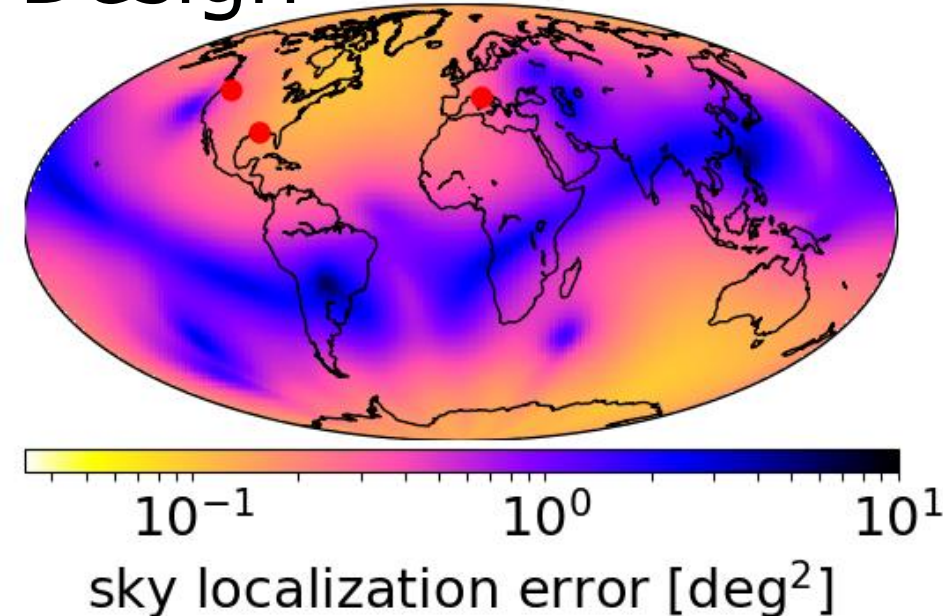
V: 60 Mpc

K: 40 Mpc を仮定

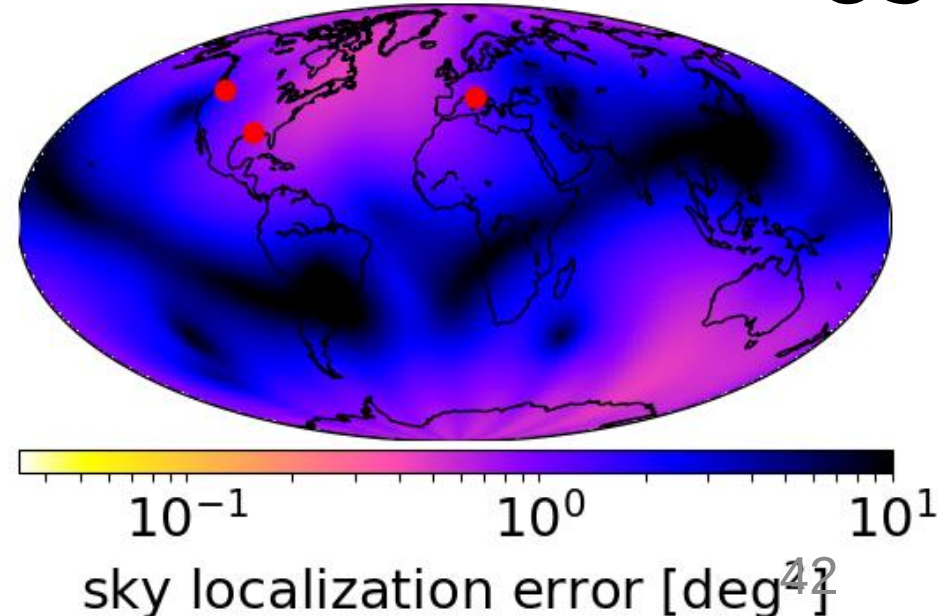
KAGRAなし



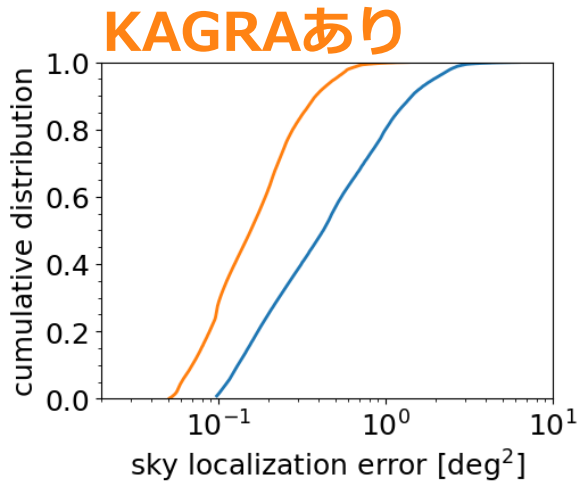
Design HLV



HLV O3



O3だとBNS方向決定は1/3-1/4程度

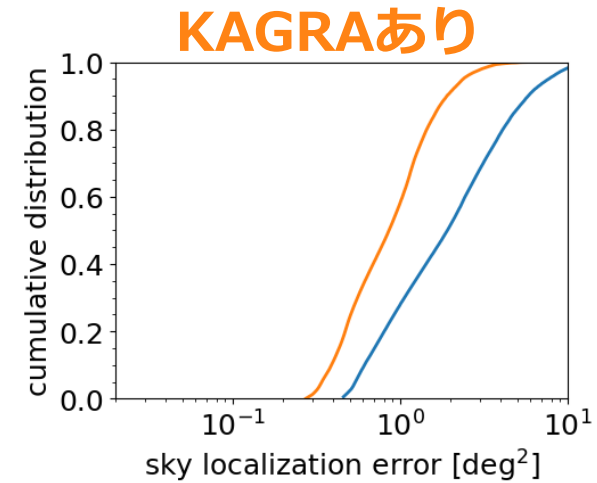


1.5-1.25 Msun
40 Mpc ($z=0.009$)

HL: 120 Mpc

V: 60 Mpc

K: 40 Mpc を仮定



Design HLVK

HLVK

O3

