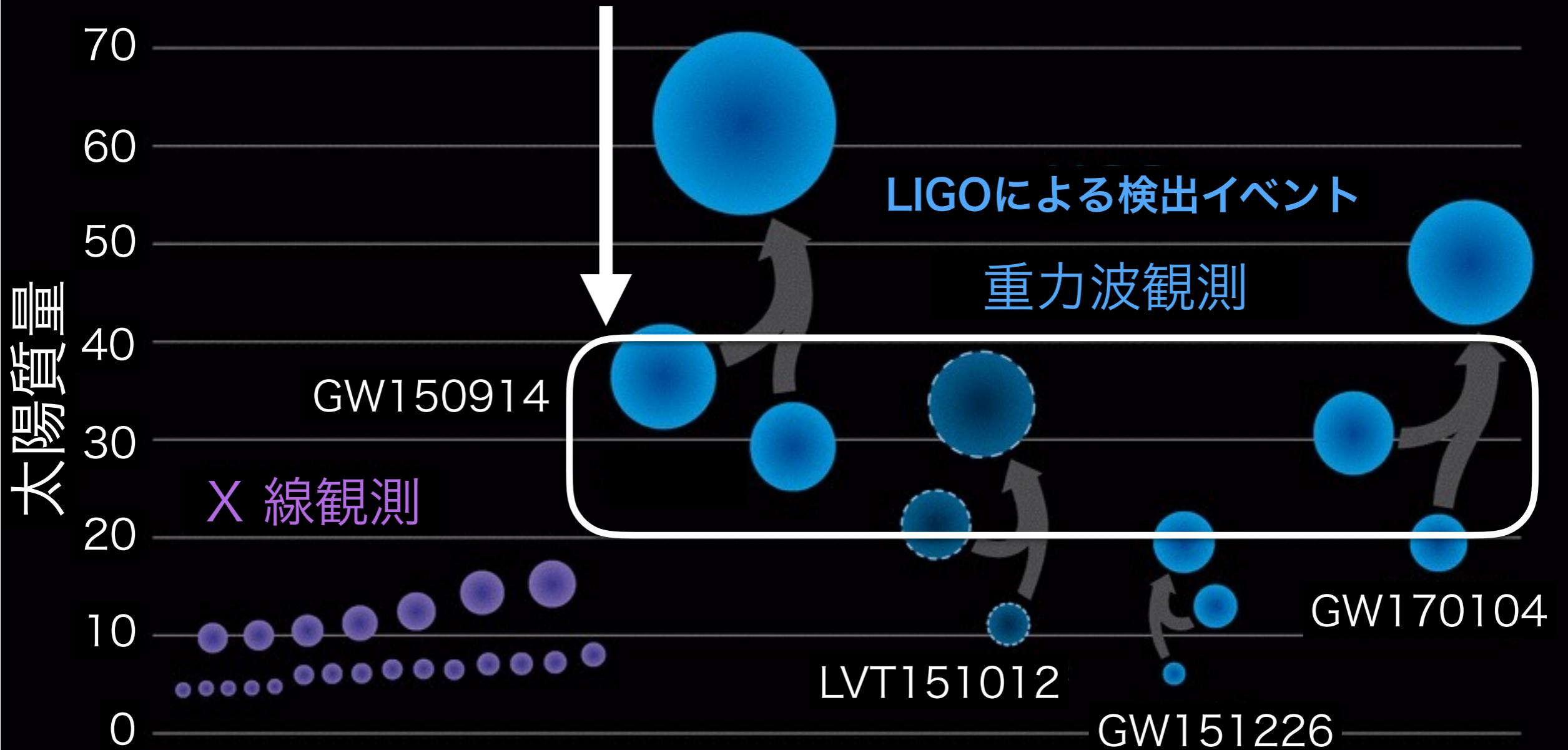


重力波観測による種族III星の存在の 間接的証明方法の研究

阪市大理、東大宇宙線^A、京大理^B
宮本晃伸、衣川智弥^A、中村卓史^B、神田展行
講演番号：15aU31-6

30M_☉ のブラックホールは種族III星起源か？

種族III星起源のBBHの典型的質量 by 連星進化シミュレーション



<https://www.ligo.caltech.edu/image/ligo20170601c> を改変

種族III星(初代星)の存在の間接的証明

種族 III 星：金属(H, He 以外の元素)を含まない、初代星

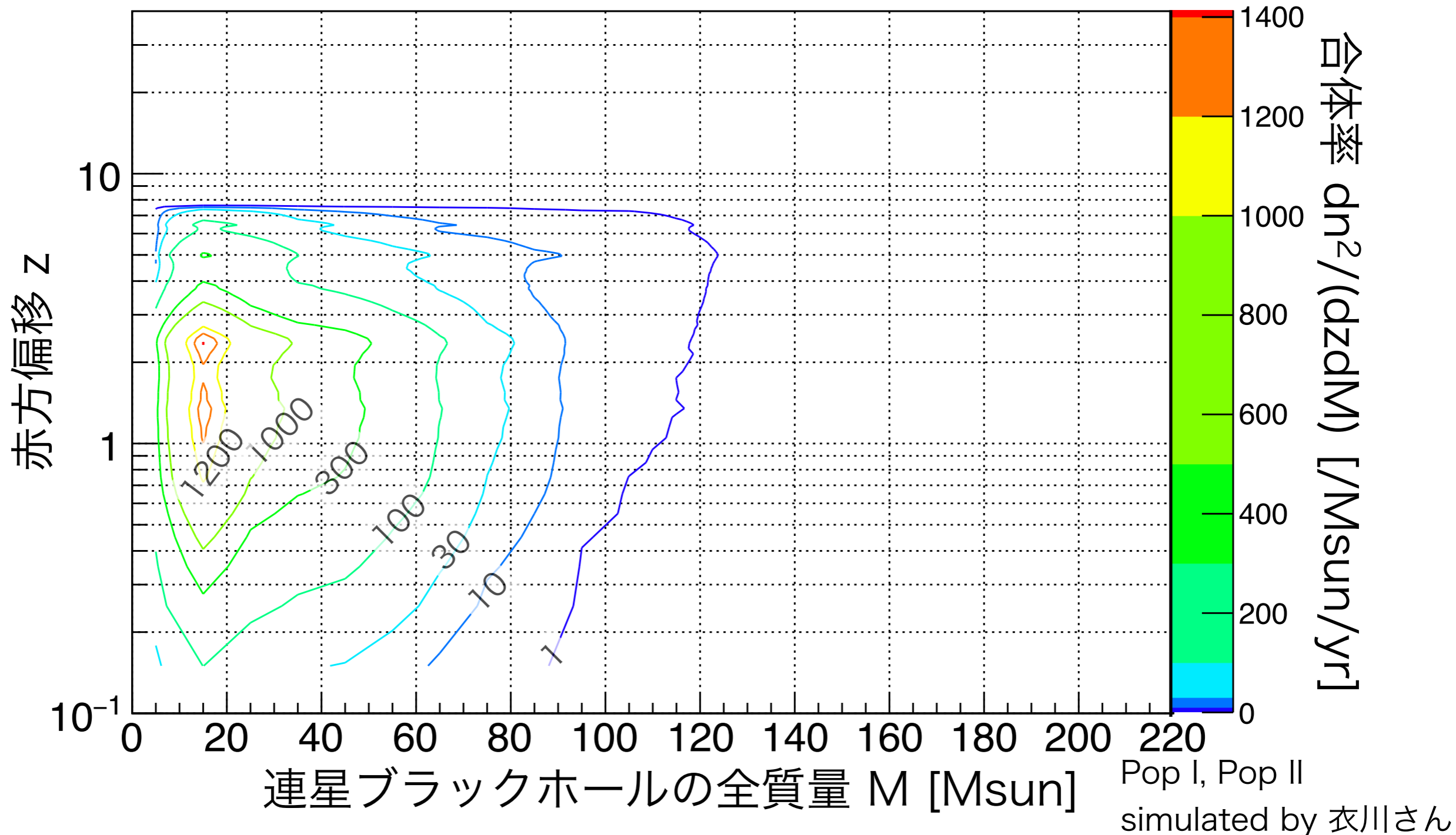
種族 III 星起源の連星ブラックホール：重力波で観測可能

Kinugawa et al. 2014, MNRAS 442, 2963

- > 重力波観測で宇宙の初期の情報を得ることができる
- > 重力波観測で種族III星の存在を間接的に証明できる

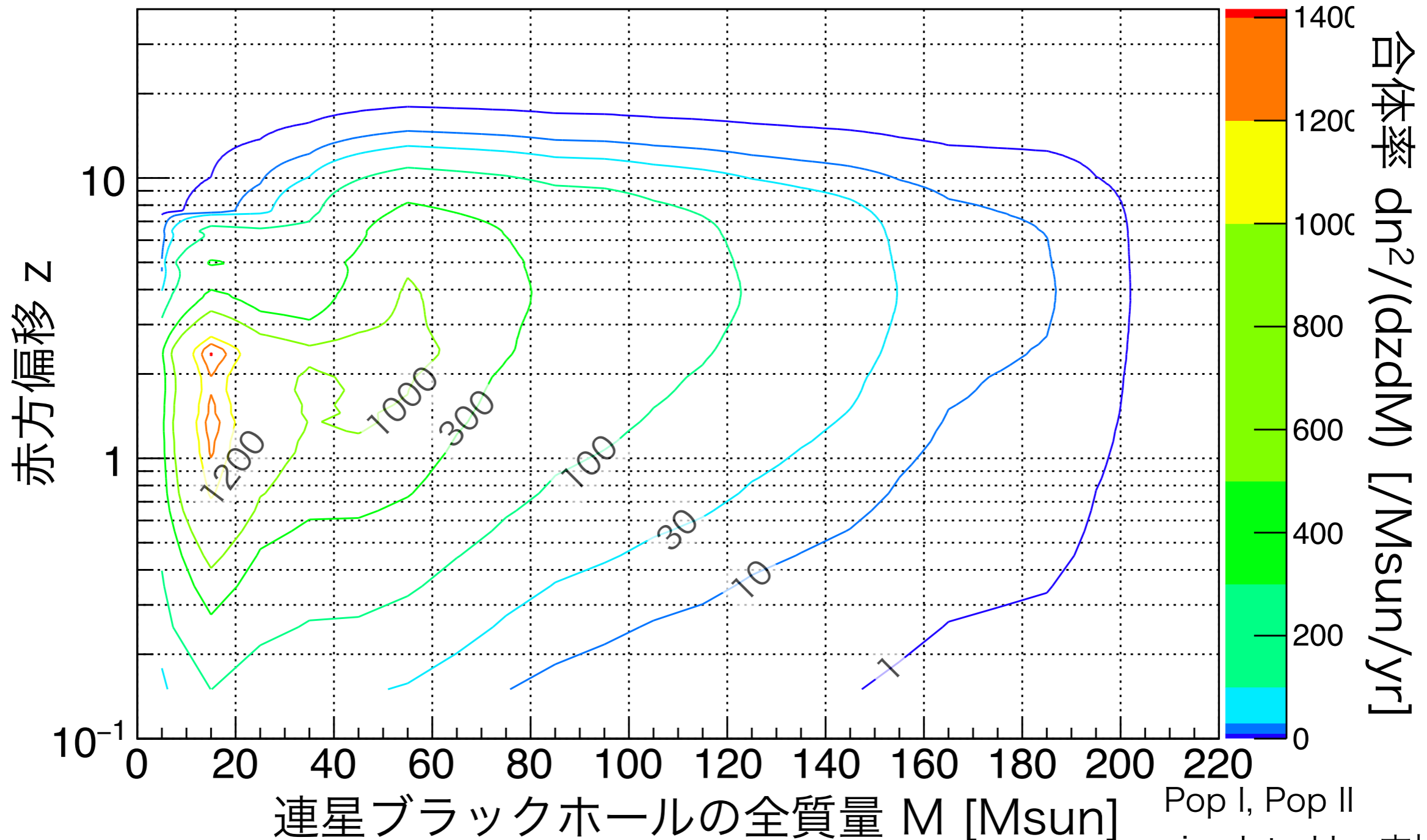
連星ブラックホールの分布 (種族I,II)

連星ブラックホール: 種族 I + 種族 II ($Z \geq 0.0002$)



連星ブラックホールの分布 (種族I,II,III)

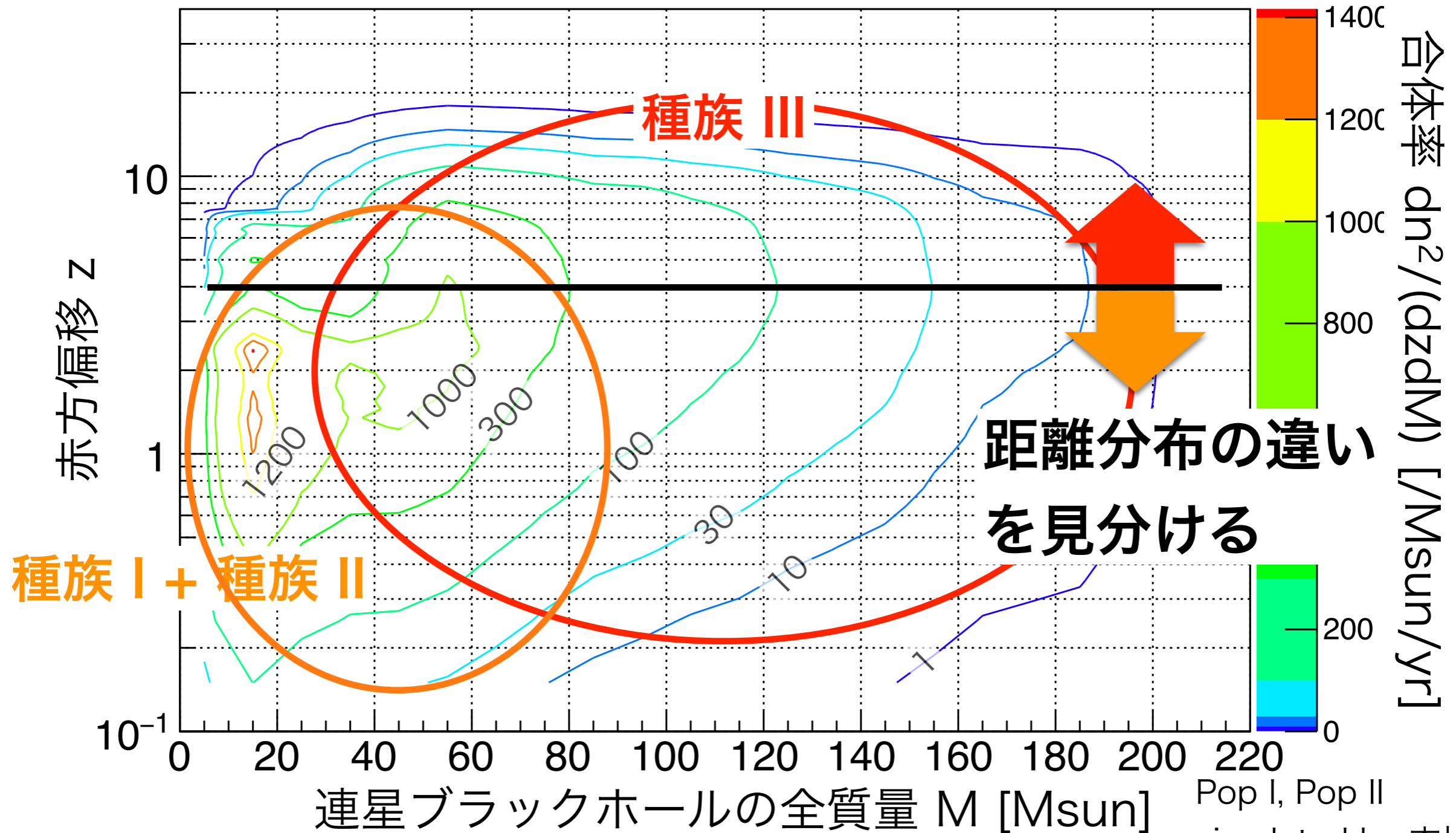
連星ブラックホール: **種族 I + 種族 II ($Z \geq 0.0002$)** + **種族 III**



Pop I, Pop II
simulated by 衣川さん

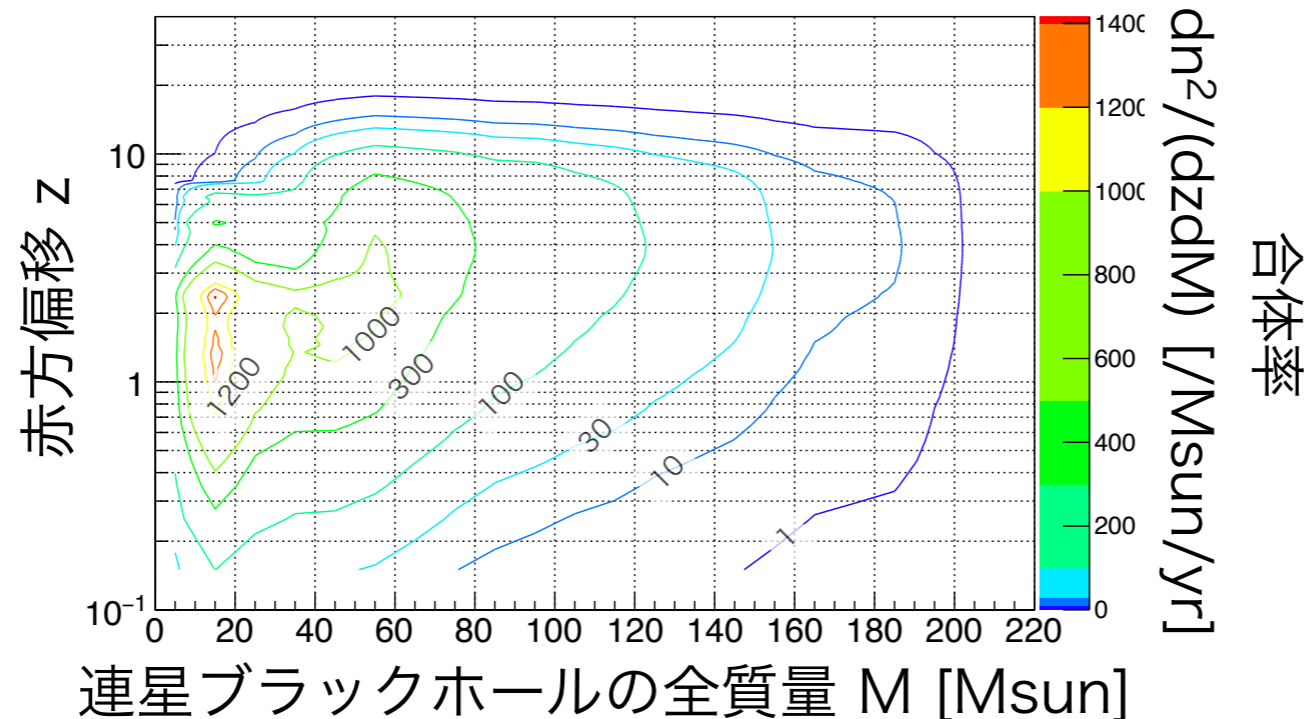
連星ブラックホールの分布 (種族I,II,III)

連星ブラックホール: **種族 I + 種族 II ($Z \geq 0.0002$)** + **種族 III**



検出シミュレーション (分布、検出器)

- 赤方偏移, 質量(m_1, m_2) 分布 連星進化計算より



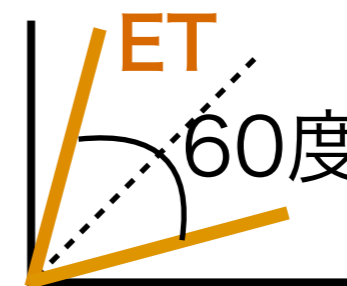
- 連星は等方的分布(軌道面の向き、天球上の位置)

第3世代検出器 (仮定) :

米(Hanford) にCosmic Explorer(CE) 40 km

欧(Virgoの所) にEinstein Telescope(ET) 10 km, 腕開角60度, 干涉計1台

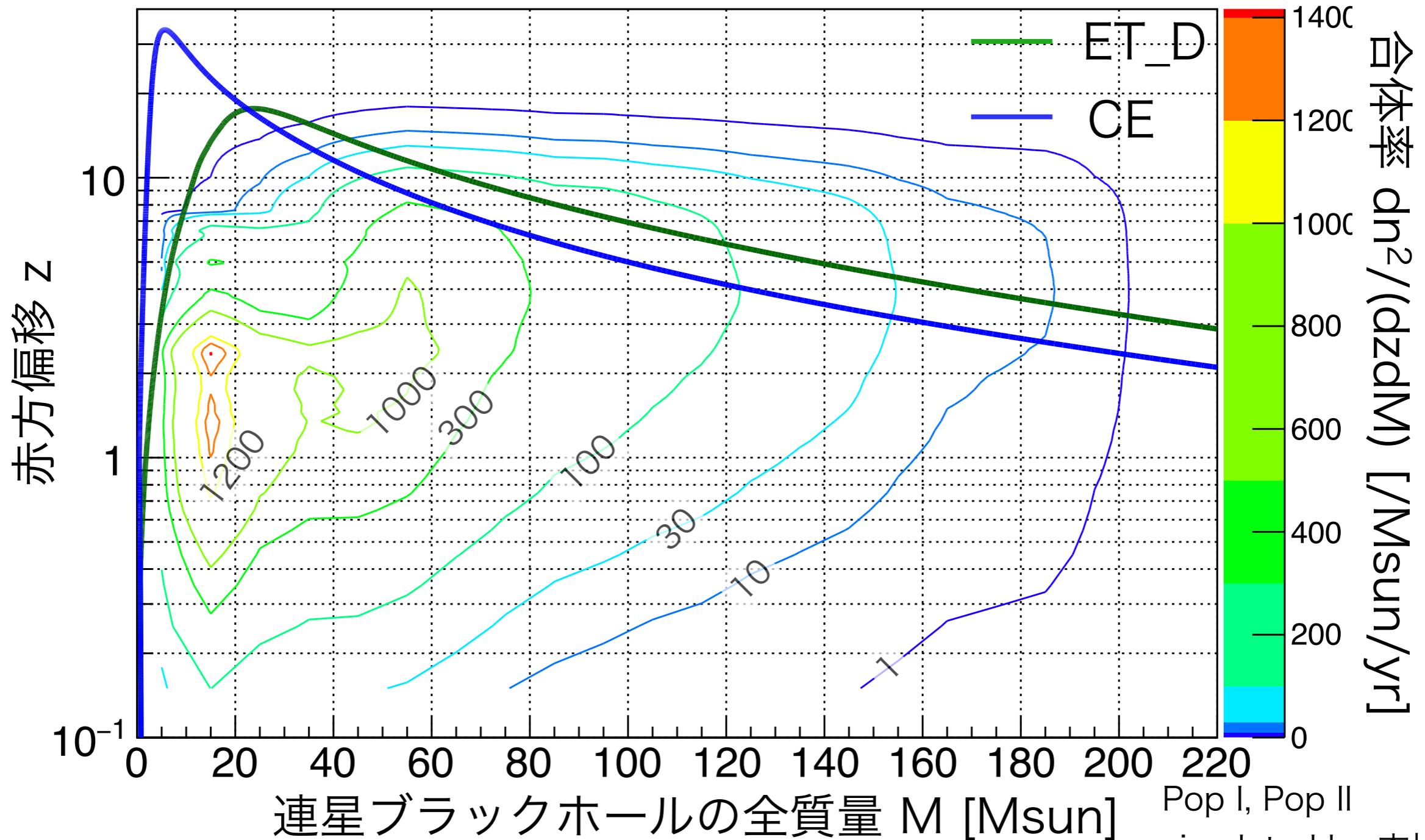
日(KAGRAの所) に ETと同等の感度を持った検出器, 同上



Virgo, KAGRAの
腕の角の2等分線
から両側に30度

連星ブラックホールの分布 (種族I,II,III)

連星ブラックホール: **種族 I + 種族 II ($Z \geq 0.0002$)** + **種族 III**



simulated by 衣川さん

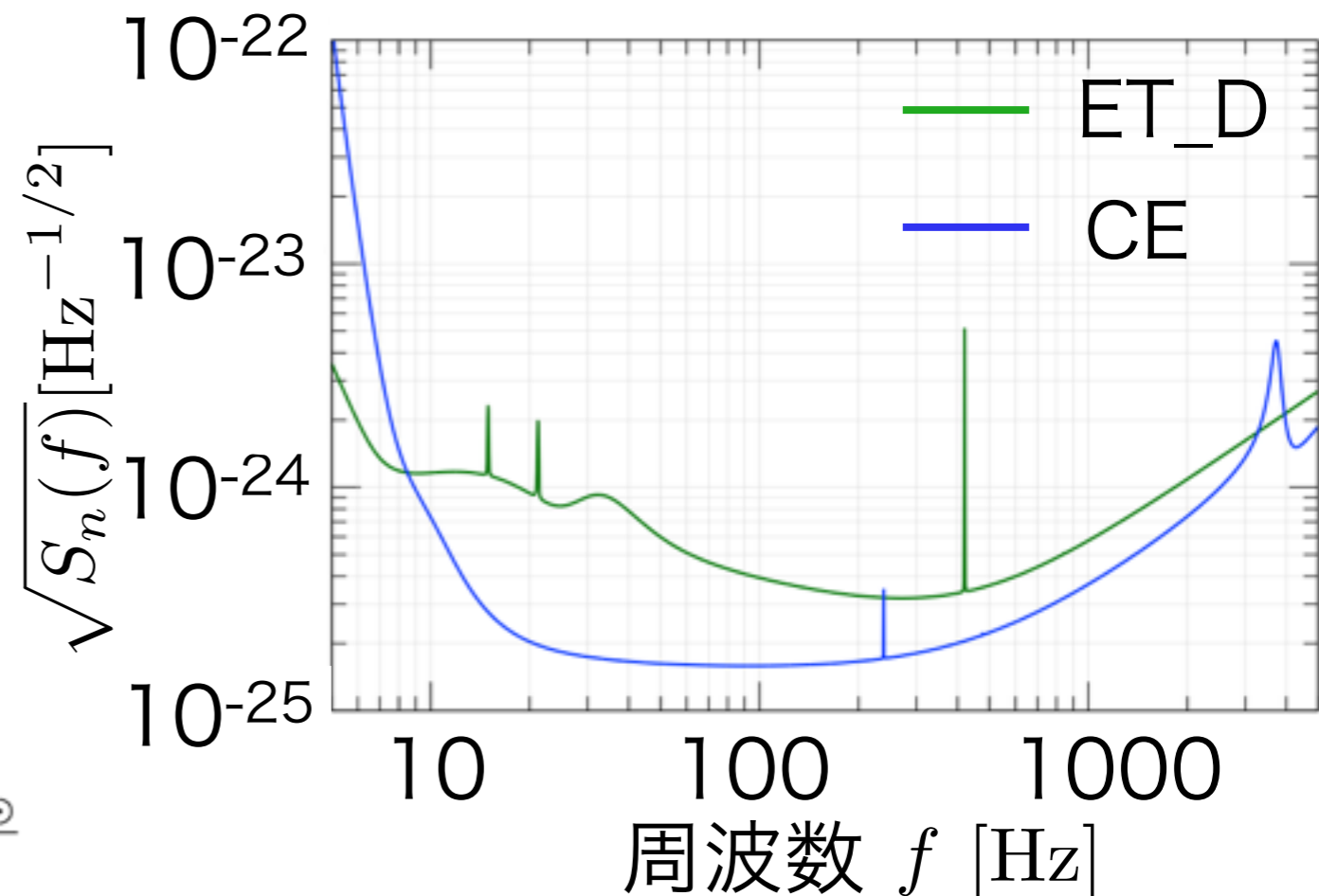
検出シミュレーション (信号雑音比)

・信号雑音比 S/N

インスパイラル重力波波形は予期できるためマッチドフィルターを仮定して計算

$$(S/N)^2 = \frac{5}{6} \frac{\pi^{-4/3} c^2 T_{\odot}^{5/3}}{d_L^2} \left(\frac{(1+z)M_c}{M_{\odot}} \right)^{5/3} \times \int_{f_{\min}}^{f_{\text{ISCO}}/(1+z)} df \frac{f^{-7/3}}{S_n(f)} \times \left(\frac{1 + \cos^2 \iota}{2} \right)^2 F_+^2 + \cos^2 \iota F_{\times}^2$$

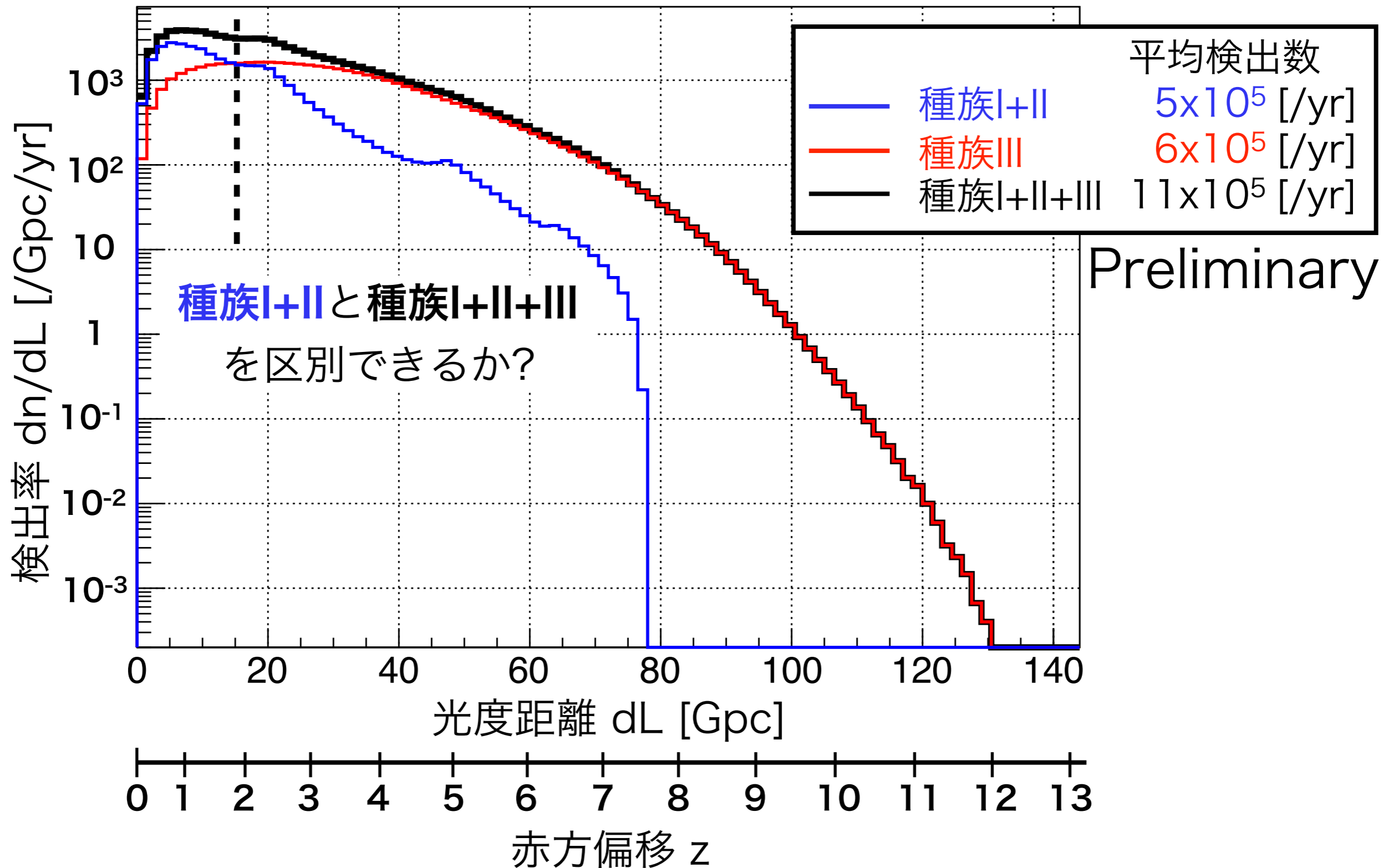
(チャープ質量: $M_c = (M_1 + M_2) \left(\frac{M_1 M_2}{(M_1 + M_2)^2} \right)^{3/5}$
 検出器のアンテナパターン: F_+, F_{\times}
 最内安定円軌道(ISCO)周波数: $f_{\text{ISCO}} \quad T_{\odot} = \frac{GM_{\odot}}{c^3}$



・信号雑音比閾値

第3世代検出器で3台同時に $S/N > 8.0$ の時検出

検出可能な連星の光度距離分布



対数尤度比の計算

検出イベント (検出数 n): $\vec{d}_L(n) = \{d_{L1}, d_{L2}, \dots, d_{Ln}\}$



種族 I+II (種族IIIなし) θ^{I+II}

種族 I+II+ III (種族IIIあり) $\theta^{I+II+III}$

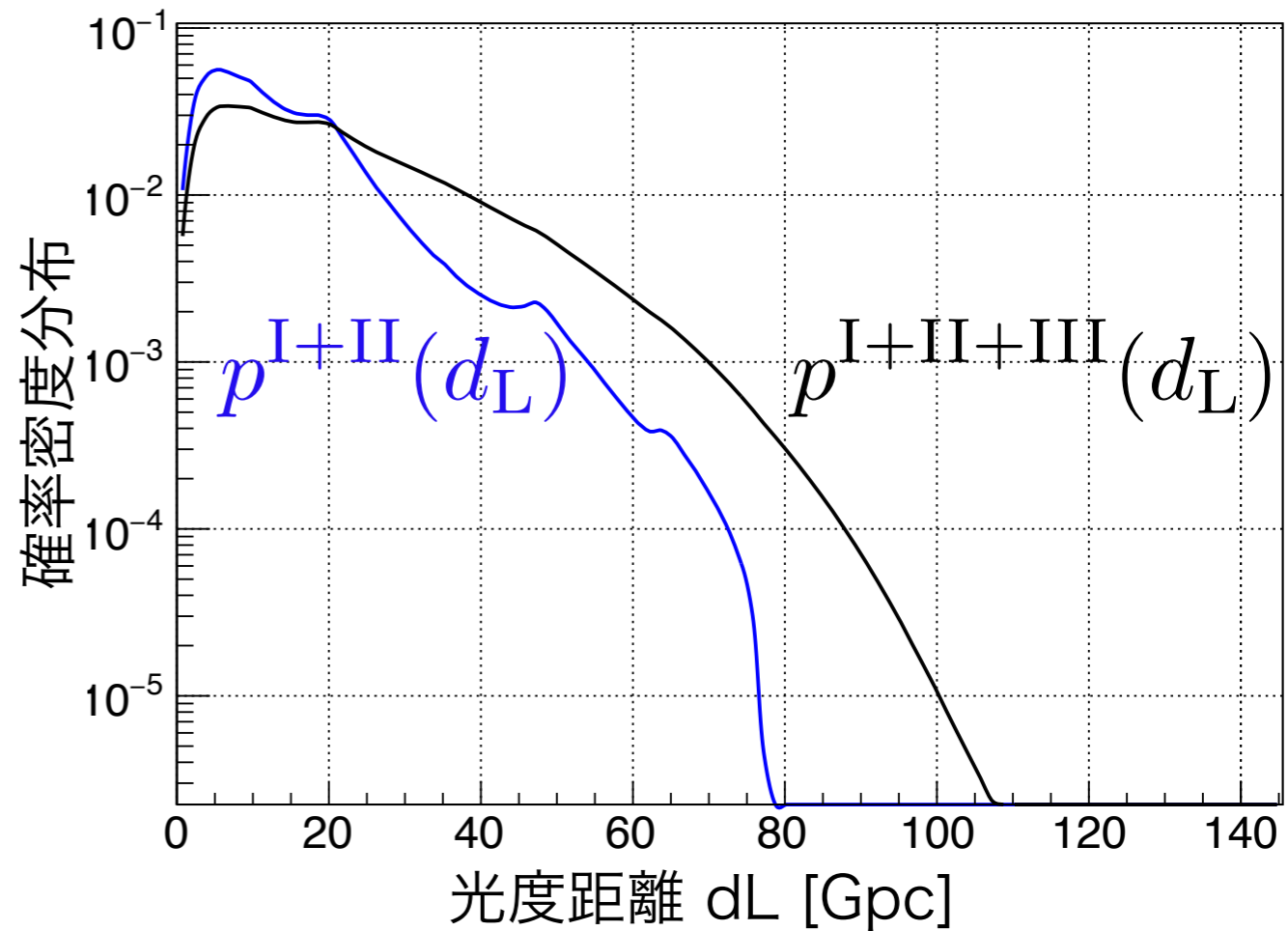
尤度の計算式

$$L(\vec{d}_L(n) | \theta^{I+II}) = \prod_{i=1}^n p^{I+II}(d_{Li})$$

$$L(\vec{d}_L(n) | \theta^{I+II+III}) = \prod_{i=1}^n p^{I+II+III}(d_{Li})$$

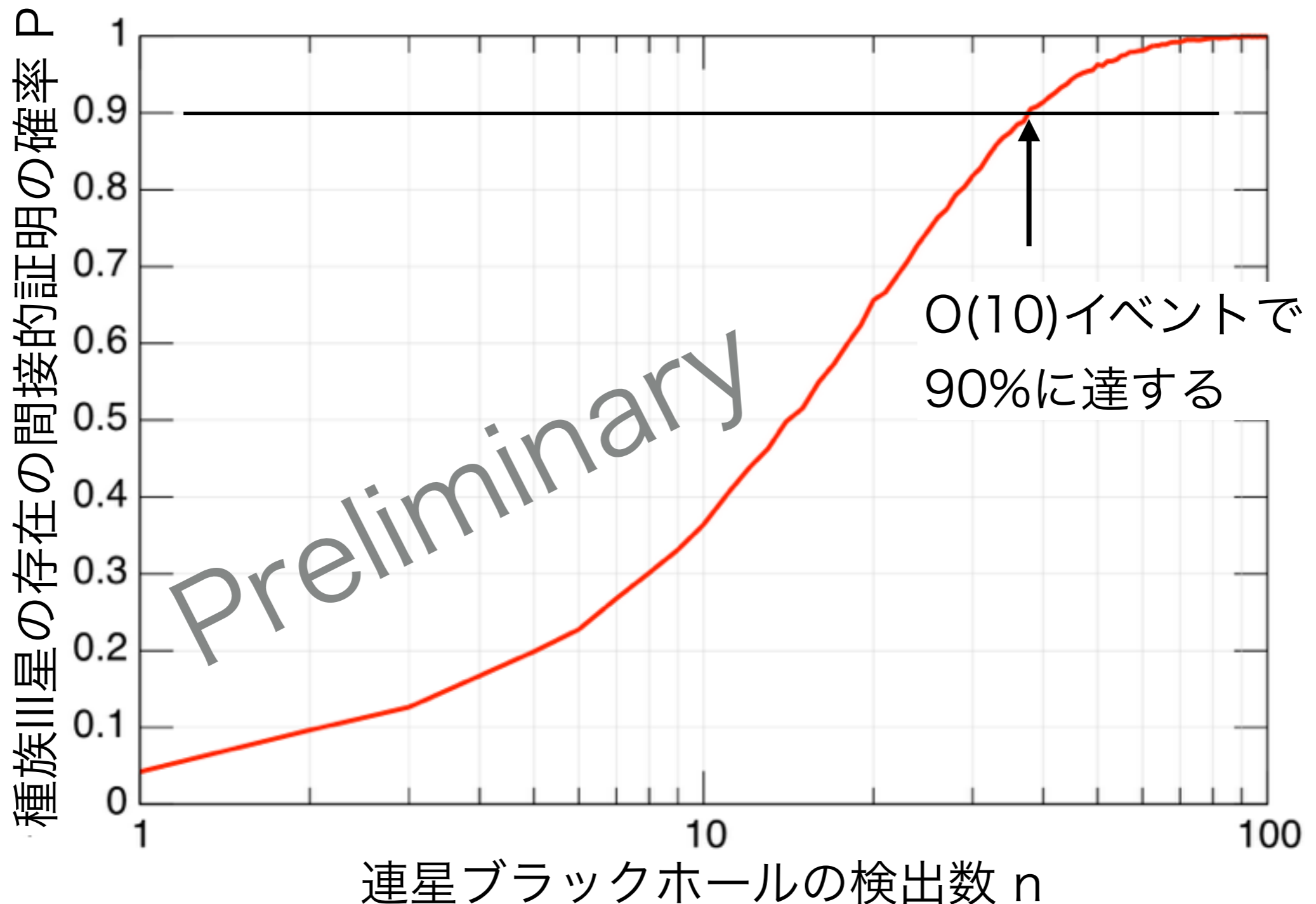
対数尤度比の計算式

$$\ln \Lambda(\vec{d}_L(n)) = \ln \left[\frac{L(\vec{d}_L(n) | \theta^{I+II+III})}{L(\vec{d}_L(n) | \theta^{I+II})} \right]$$



検出数に伴う判別確率Pの推移

‘種族IIIあり’の場合に ‘種族IIIあり’ と正しく判別できる確率 P



まとめ

第3世代重力波検出器を想定して、重力波検出シミュレーションをおこなった。
イベントレート

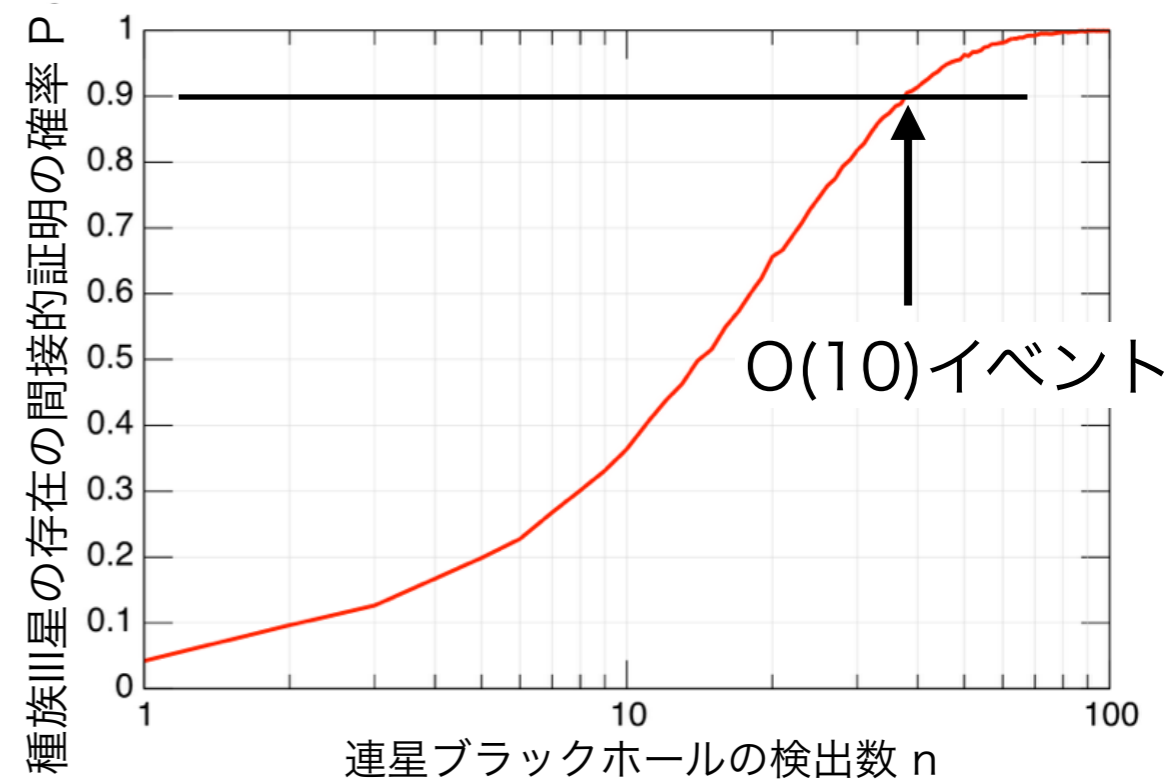
種族I+II星 起源連星ブラックホール: 5×10^4 [/yr]

種族III星 起源連星ブラックホール: 6×10^4 [/yr]

連星進化計算から得られる連星ブラックホールの**光度距離分布**を尤度関数として、**尤度解析**をすることにより種族III起源連星ブラックホールが存在するときに
‘ある’と判定できる確率 P を計算した。

検出数 n が **O(10)** あれば**種族III星**の存在を
判別できる確率が**90%**に達する。

第3世代重力波検出器が稼働を始めると、
すぐに**種族III星**の存在や**宇宙の初期**に
関する情報を得ることが可能となるだろう。





バックアップ

光度距離の推定誤差

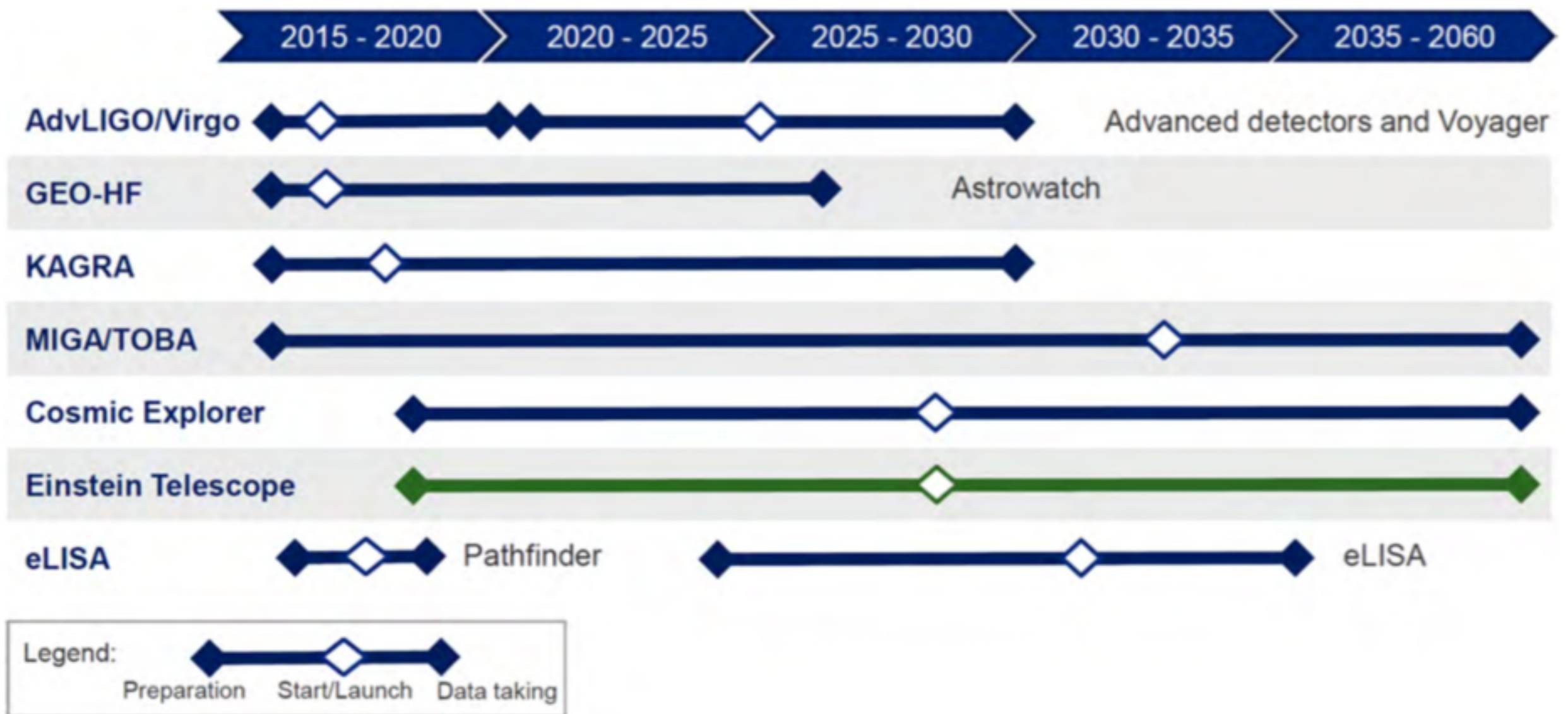
検出シミュレーションにおいて
検出した連星の光度距離 d_L には
フィッシャー行列に基づいて誤差をつけた

$$\frac{\Delta d_L}{d_L} \simeq \frac{1}{\sum_i (S/N)_i} \quad (S/N)_i : \text{各検出器の信号雑音比}$$

$$\frac{\Delta d_L}{d_L} \text{ が}$$

平均ゼロ、標準偏差 $\frac{1}{\sum_i (S/N)_i}$ に従うとした

観測ロードマップ



<https://www.knaw.nl/shared/resources/adviezen/bestanden/KNAWAgendaEinsteinTelescope.pdf>