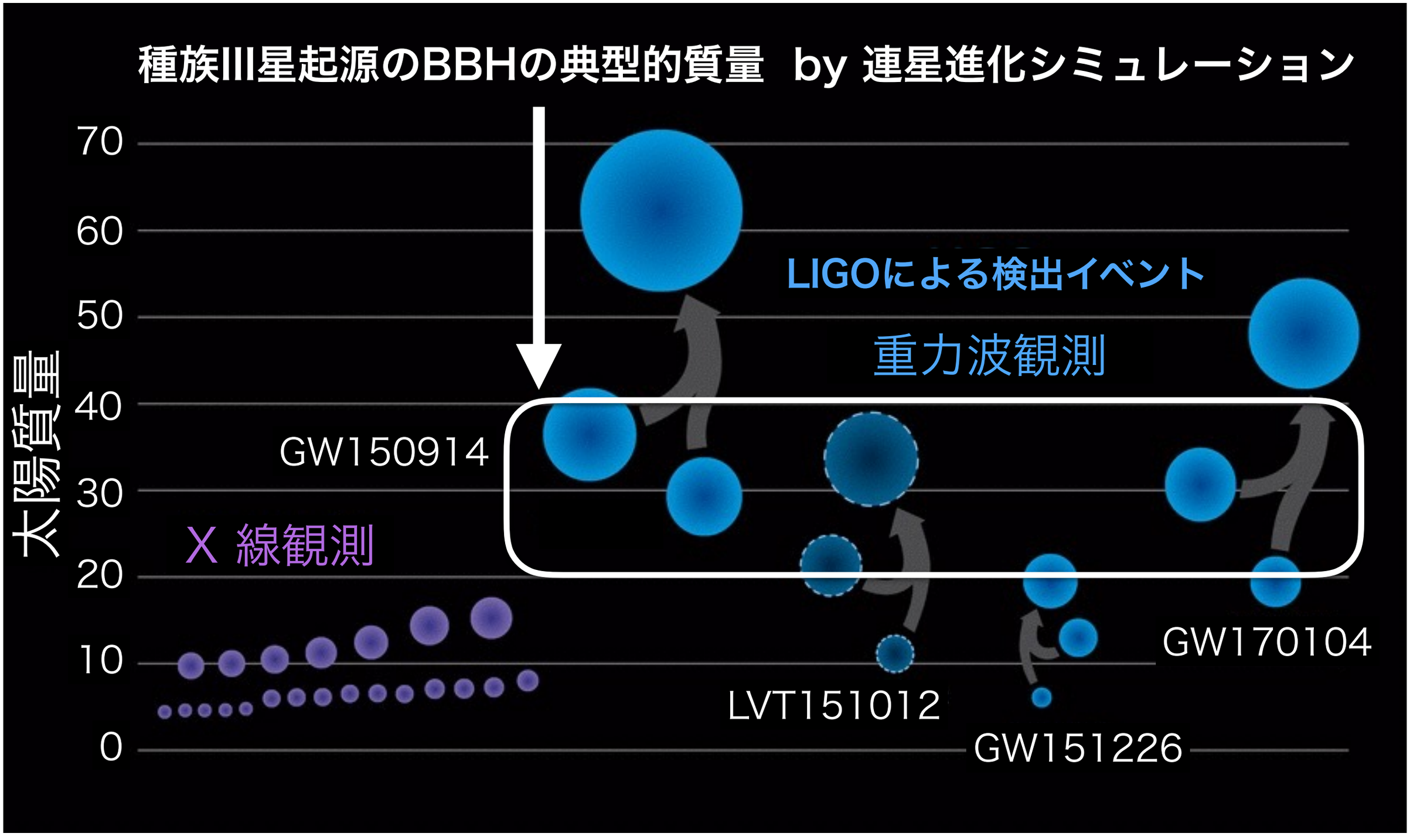
重力波観測による種族III星の存在の間接的証明方法の研究

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

$30M_{\odot}$ のブラックホールは種族III星起源か?



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

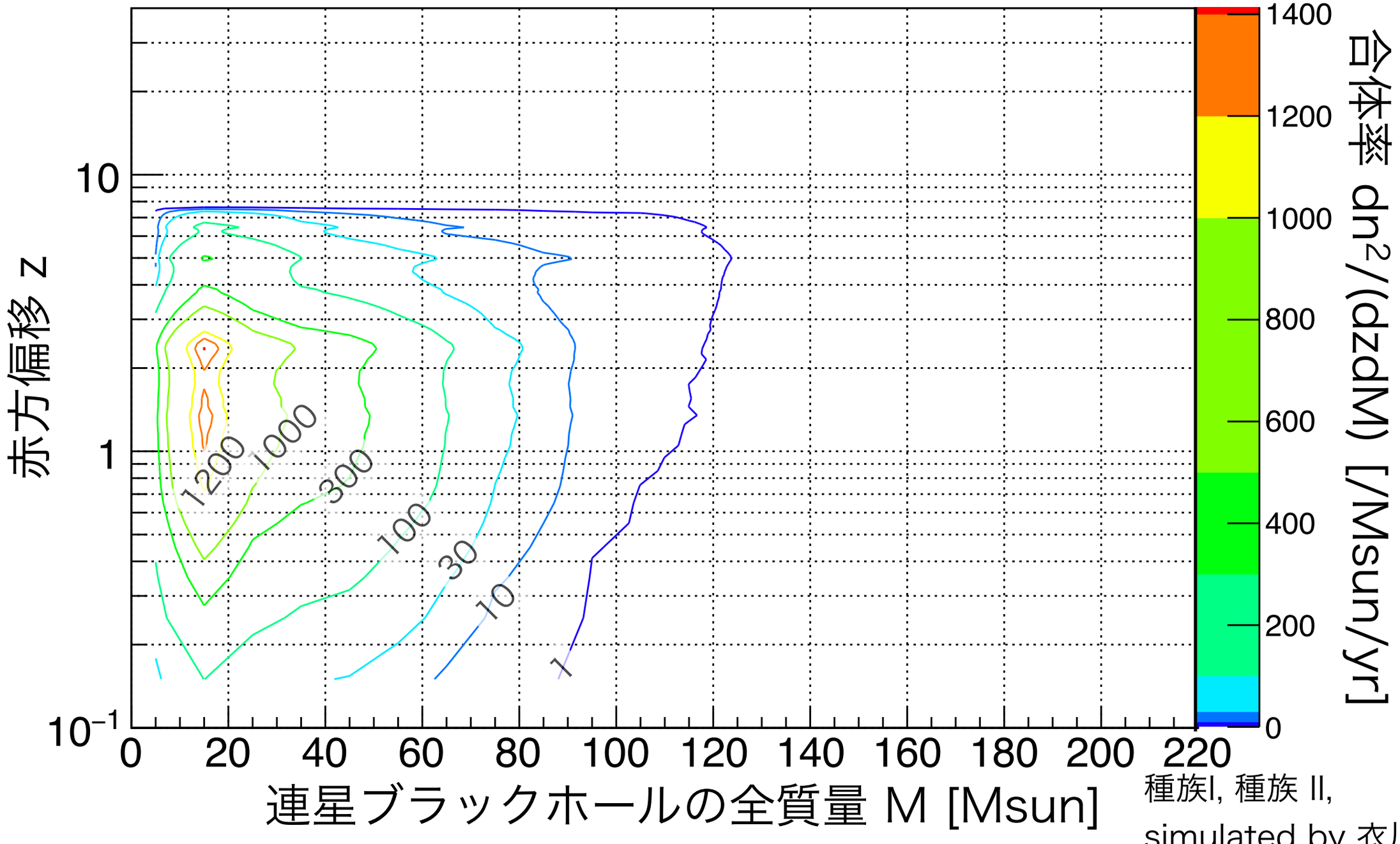
Kinugawa et al. 2014, MNRAS 442, 2963

-> 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）

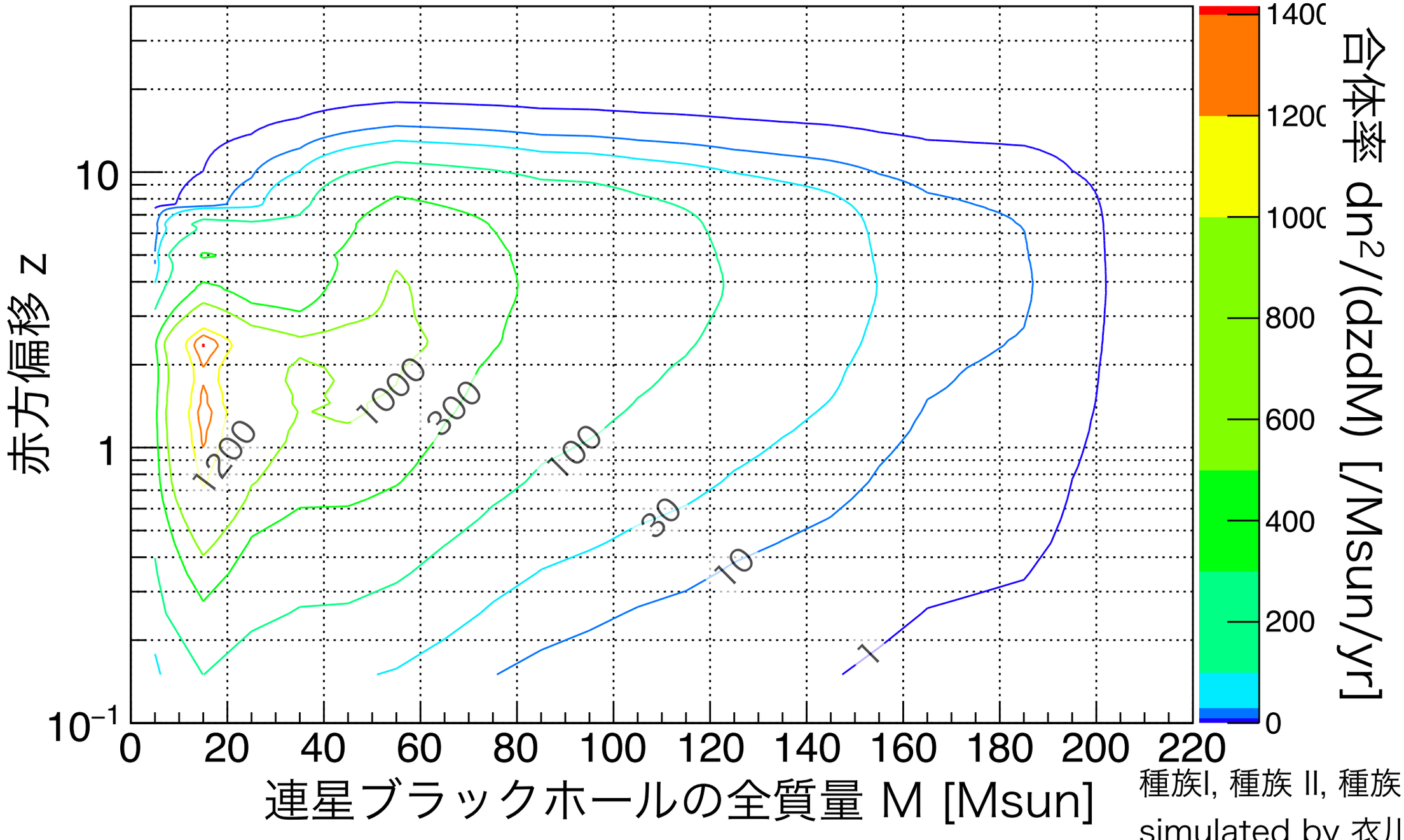
連星ブラックホール： **種族 I + 種族 II** $(Z \geq 0.0002)$



種族I, 種族 II,
simulated by 衣川さん

連星ブラックホールの分布（種族I+II+III）

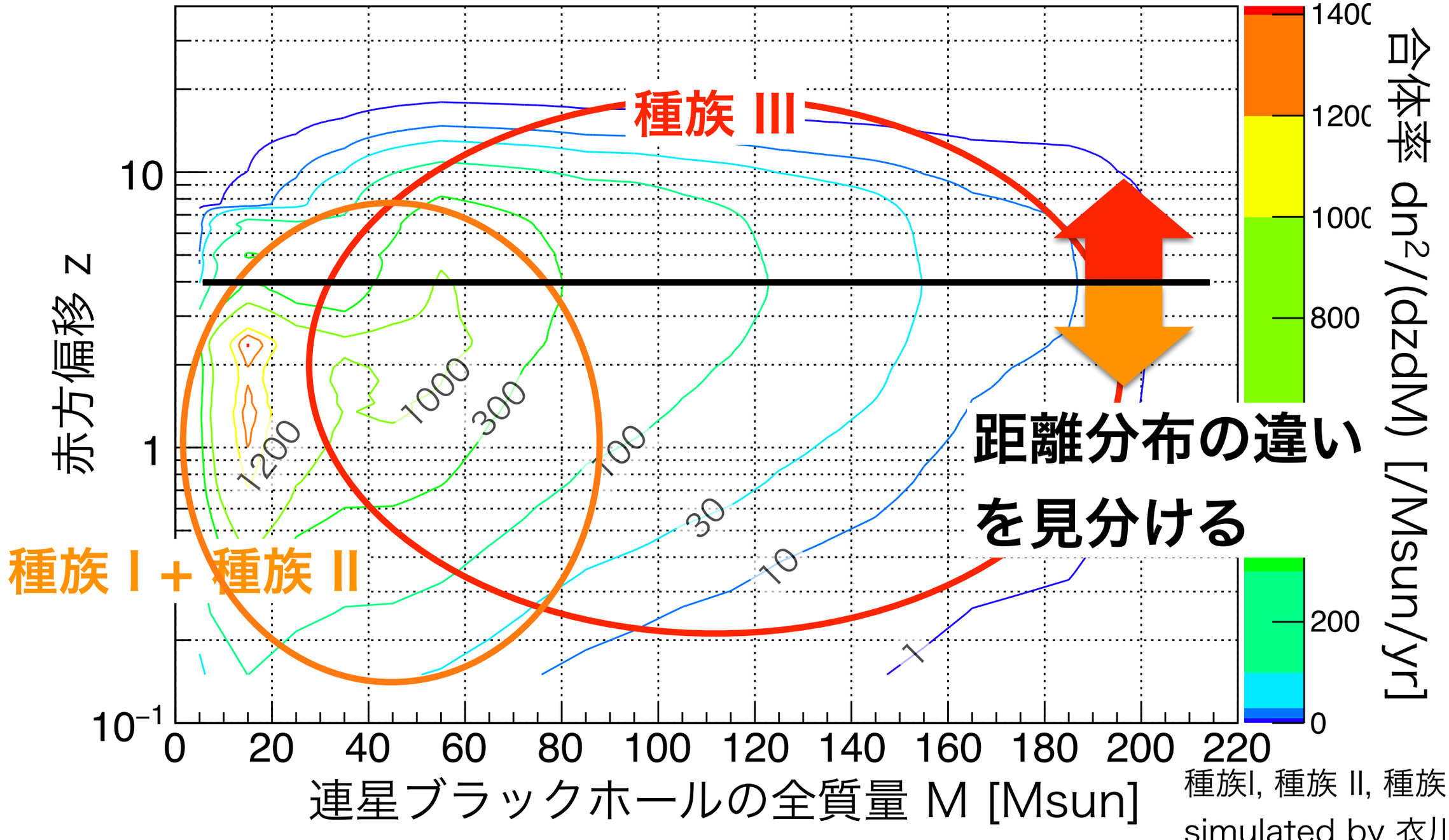
連星ブラックホール： **種族 I + 種族 II** $(Z \geq 0.0002)$ **+** **種族 III**



種族I, 種族 II, 種族 III
simulated by 衣川さん

連星ブラックホールの分布（種族I+II+III）

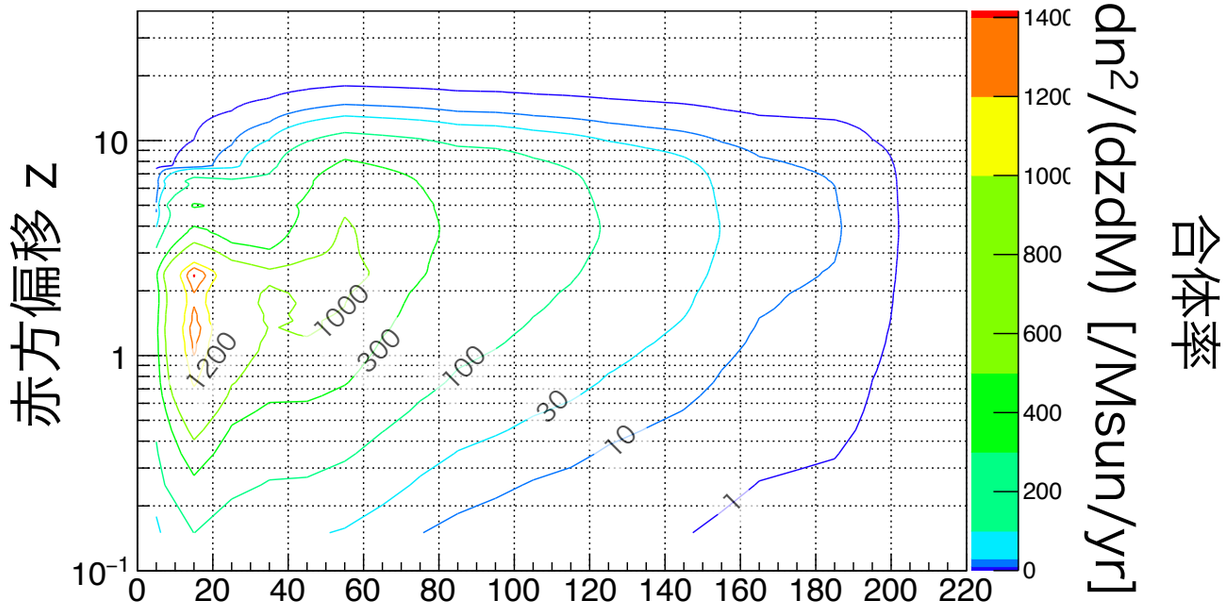
連星ブラックホール： **種族 I + 種族 II** $(Z \geq 0.0002)$ **+** **種族 III**



種族I, 種族 II, 種族 III
simulated by 衣川さん

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



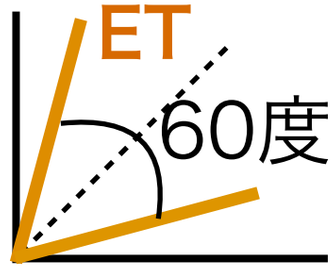
・連星は等方的分布(軌道面の向き、天球上の位置)

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,干渉計1台

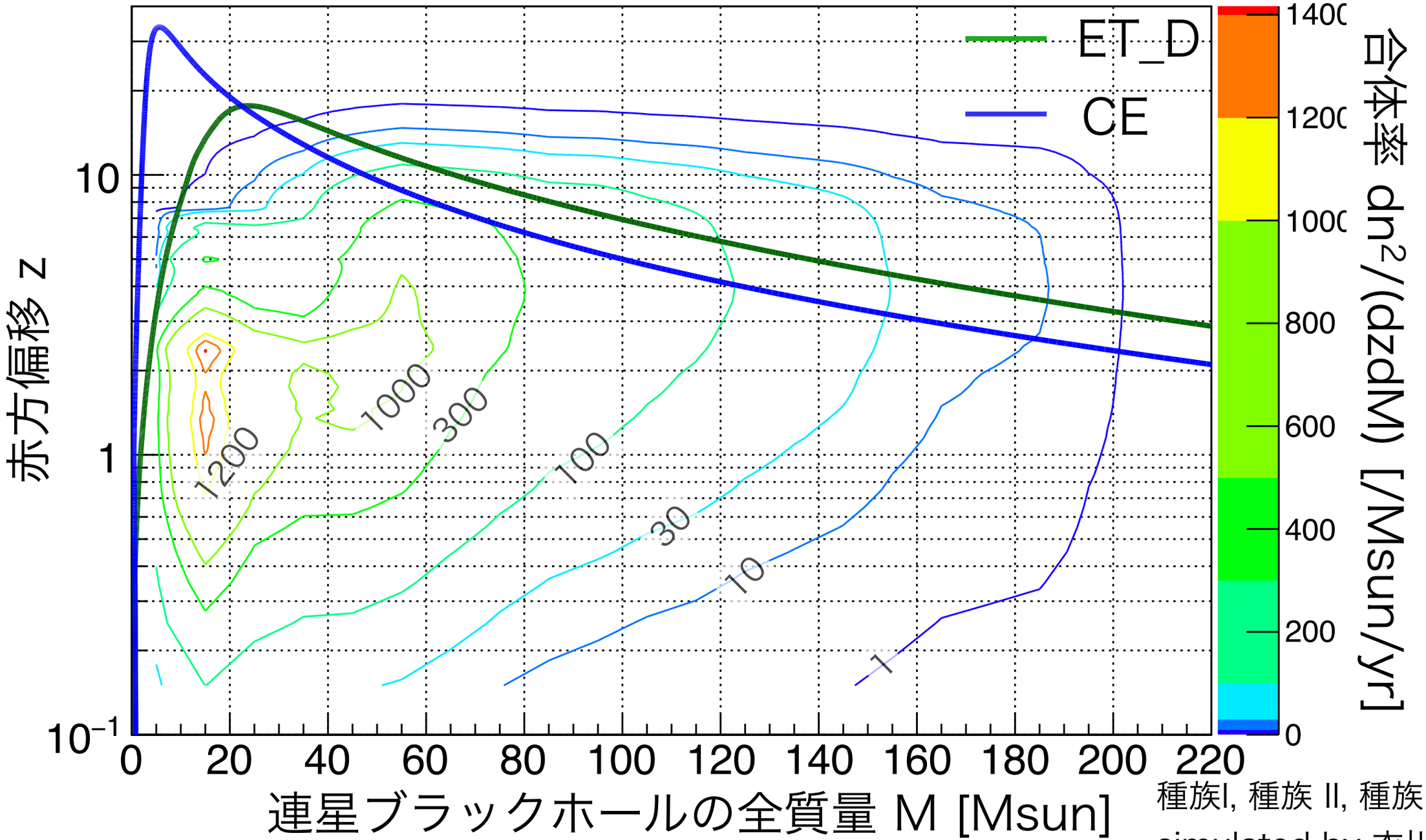
日(KAGRAの所) に **ET**と同等の感度を持った検出器, 同上



Virgo, KAGRAの腕の角の２等分線から両側に30度

ET, CEによる検出可能な領域

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



種族I, 種族 II, 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

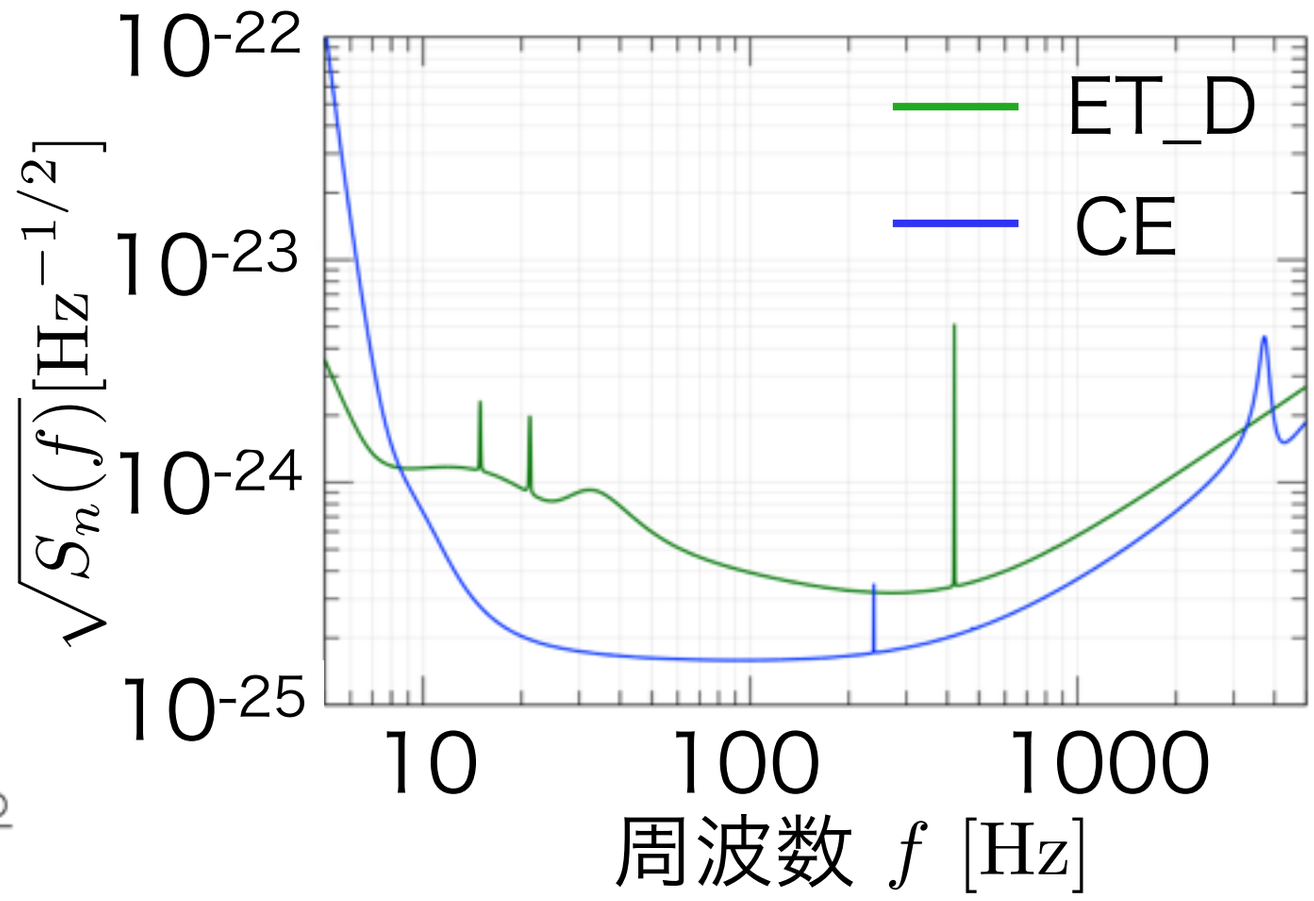
インスパイラル重力波波形は予期できるためマッチドフィルター
を仮定して計算

$$(\mathrm{S/N})^2 = \frac{5}{6}\frac{\pi^{-4/3}c^2 {\mathrm{T}_\odot}^{5/3}}{d_\mathrm{L}^2}\left(\frac{(1+z)M_c}{\mathrm{M}_\odot}\right)^{5/3} \times \int_{f_{\min}}^{f_{\mathrm{ISCO}}/(1+z)} df \frac{f^{-7/3}}{S_n(f)} \times \left(\frac{1+\cos^2\iota}{2}\right)^2 F_+^2 + \cos^2\iota F_\times^2$$

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_{ISCO}　　$\mathrm{T}_\odot = \frac{G\mathrm{M}_\odot}{c^3}$

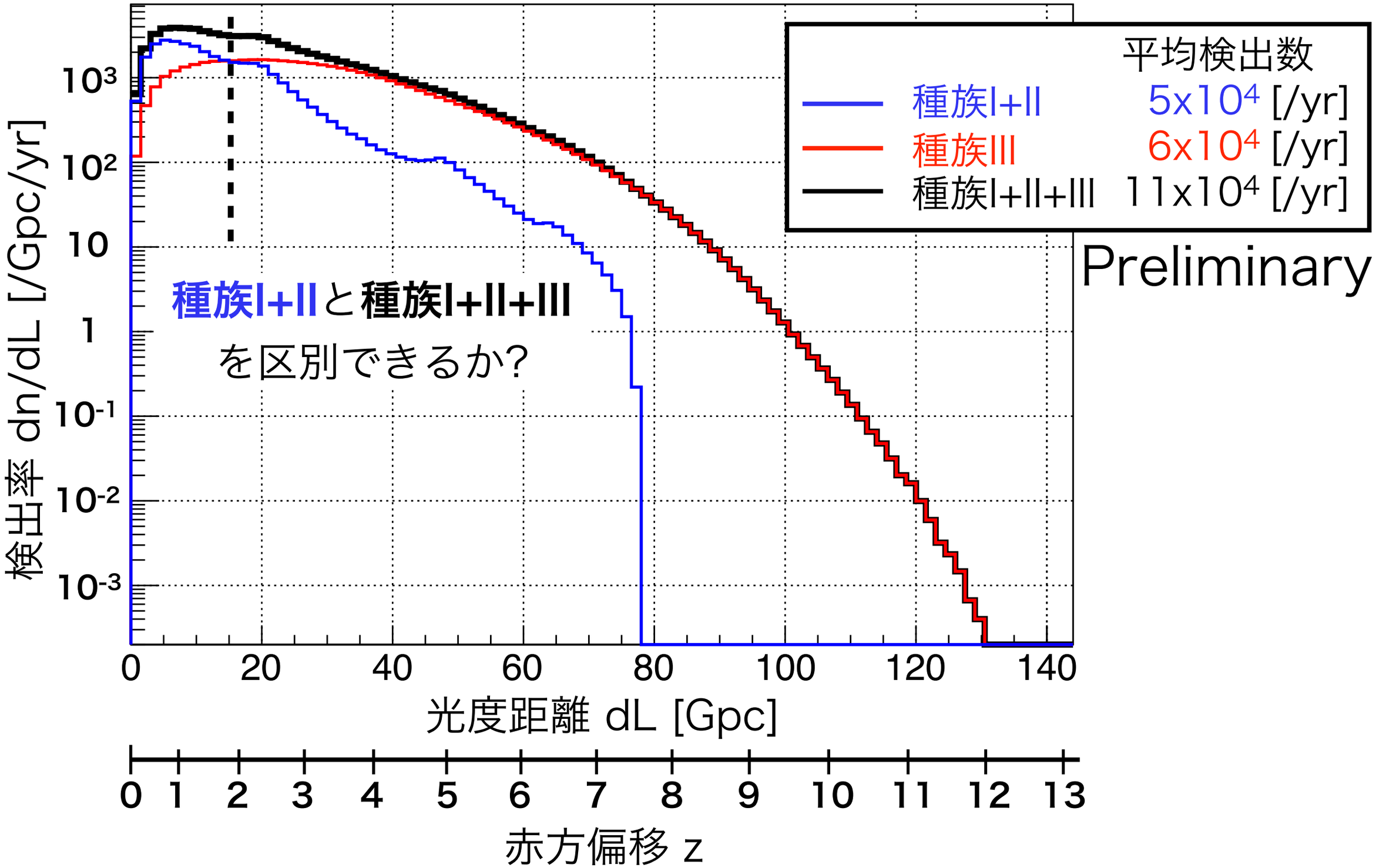


from http://iopscience.iop.org/article/10.1088/1361-6382/aa51f4/data

・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)： $\vec{d_{\rm L}}(n) = \{d_{\rm L1}, d_{\rm L2}, ..., d_{{\rm L}n}\}$

どちらに判別されるか？

種族 I+II（種族IIIなし） $\theta^{\rm I+II}$

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

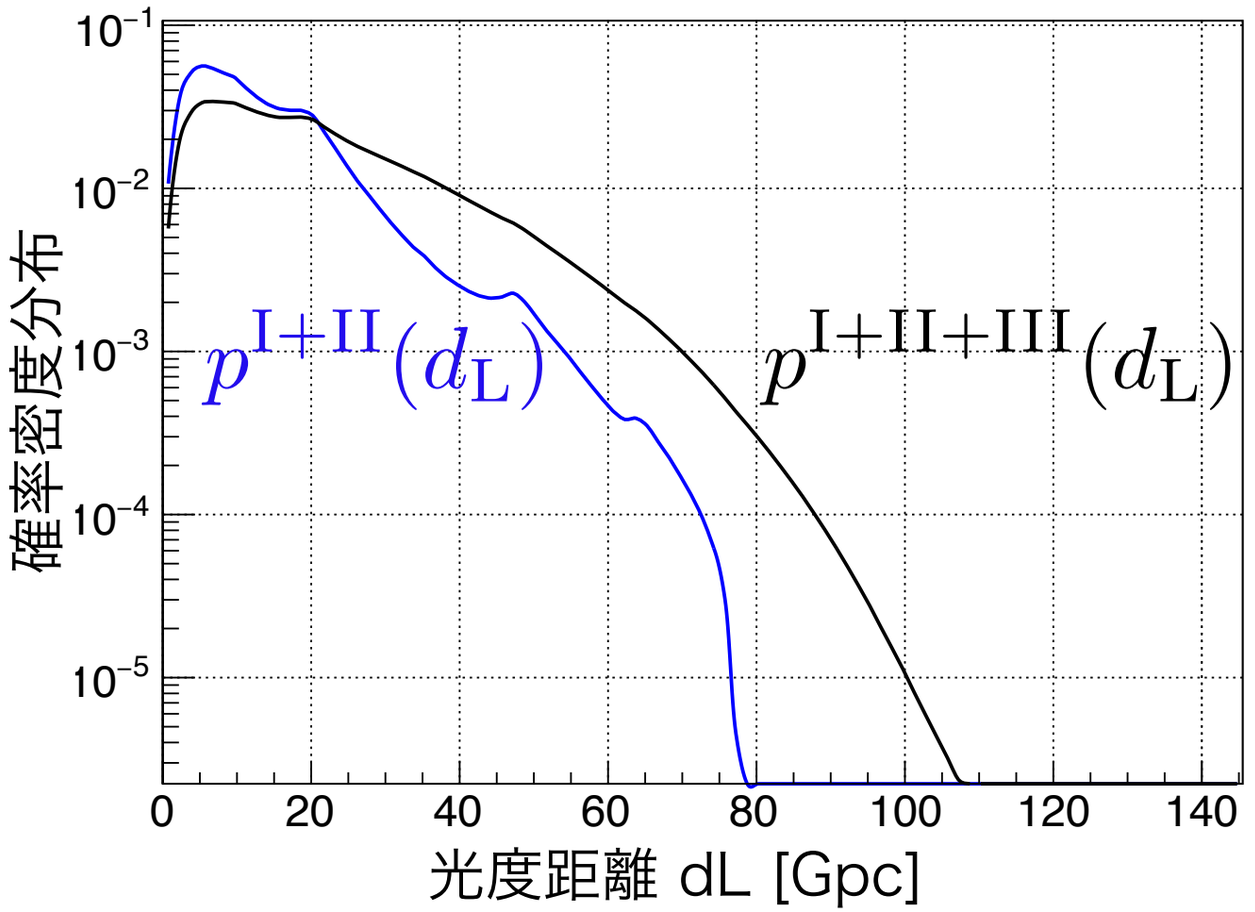
尤度の計算式

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

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

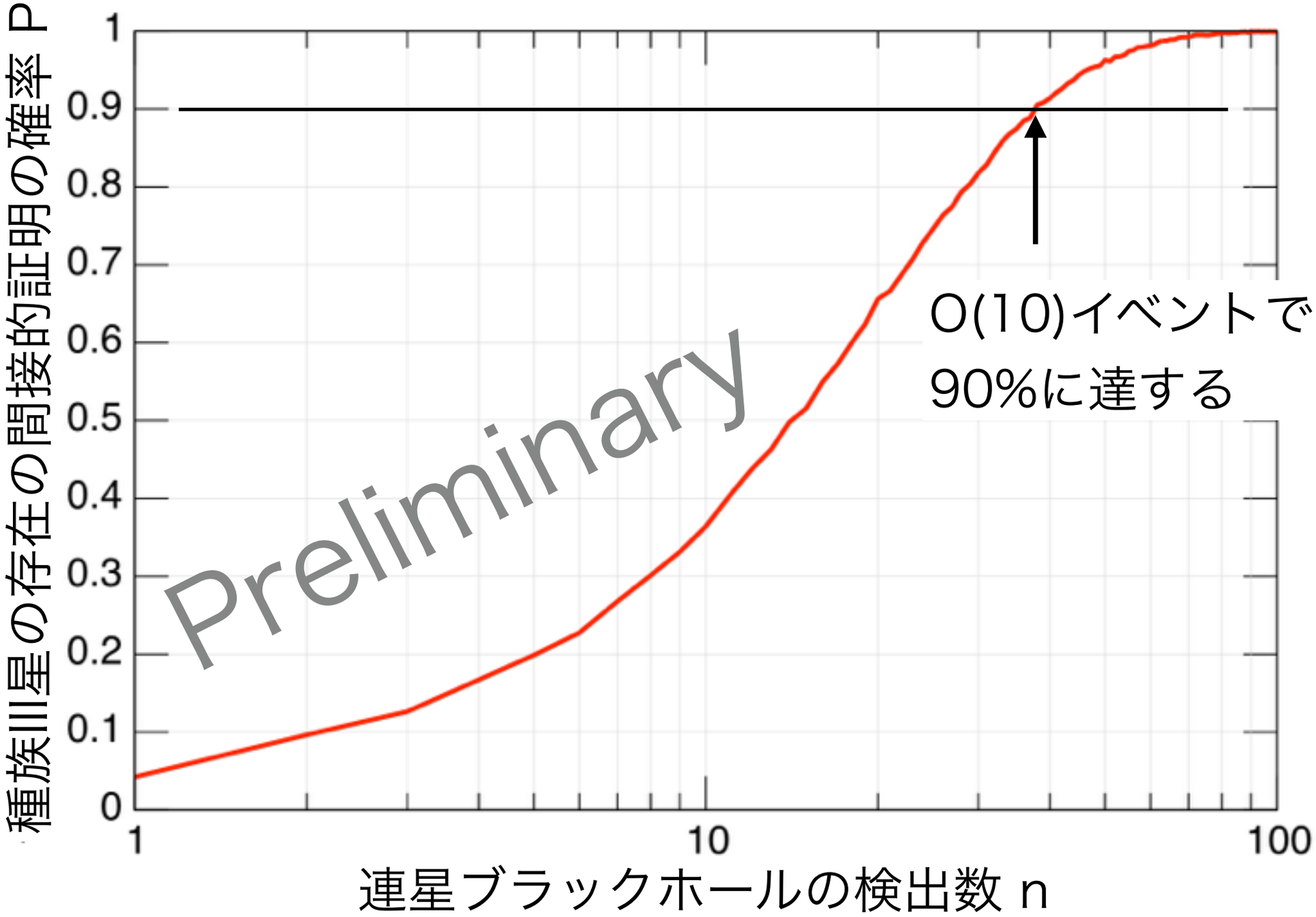
対数尤度比の計算式

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



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



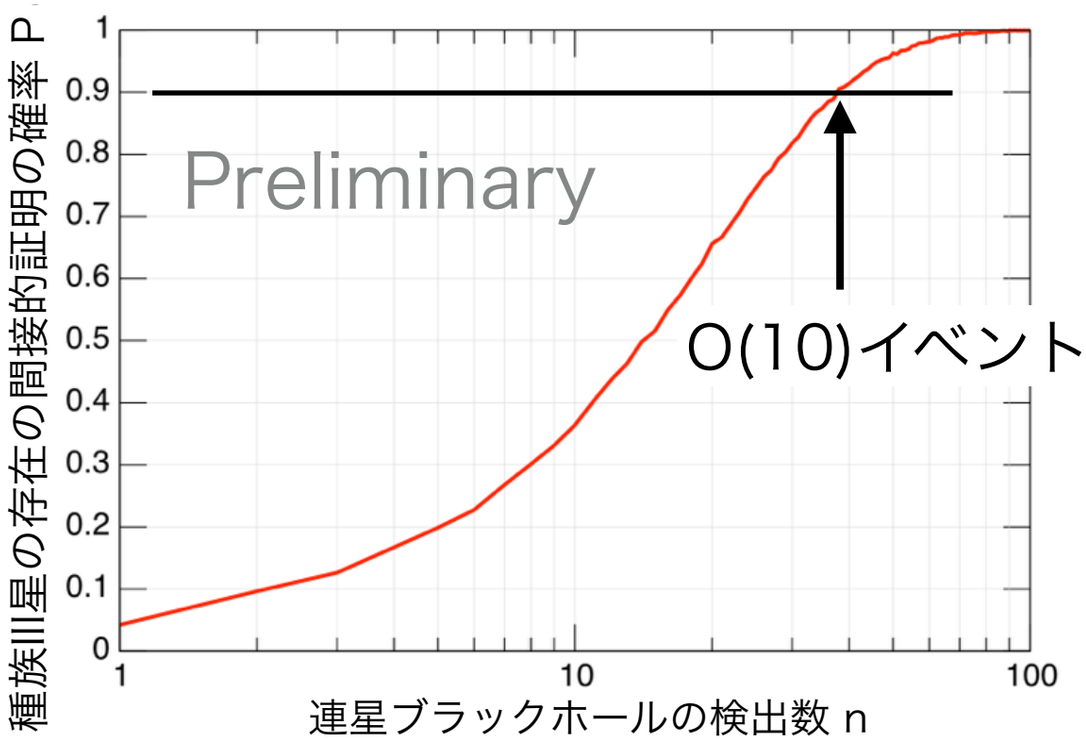
まとめ

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: $5x10^4$ [/yr]
種族III 星 起源連星ブラックホール: $6x10^4$ [/yr] Preliminary

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’と判別できる確率 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

対数尤度比の計算

検出イベント(検出数n)： $\vec{d_{\rm L}}(n) = \{d_{\rm L1}, d_{\rm L2}, ..., d_{{\rm L}n}\}$

どちらに判別されるか？

種族 I+II（種族IIIなし） $\theta^{\rm I+II}$

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

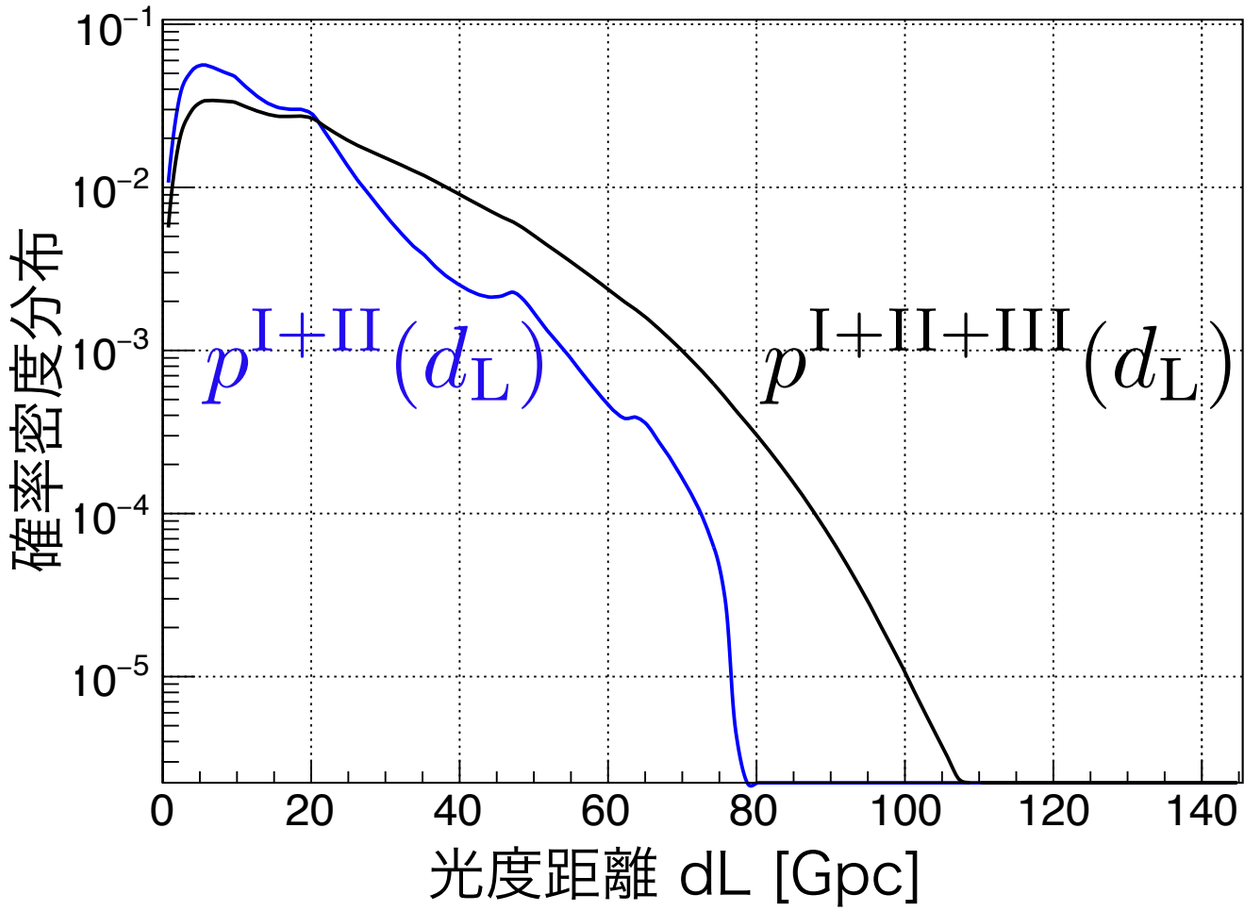
尤度の計算式

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

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

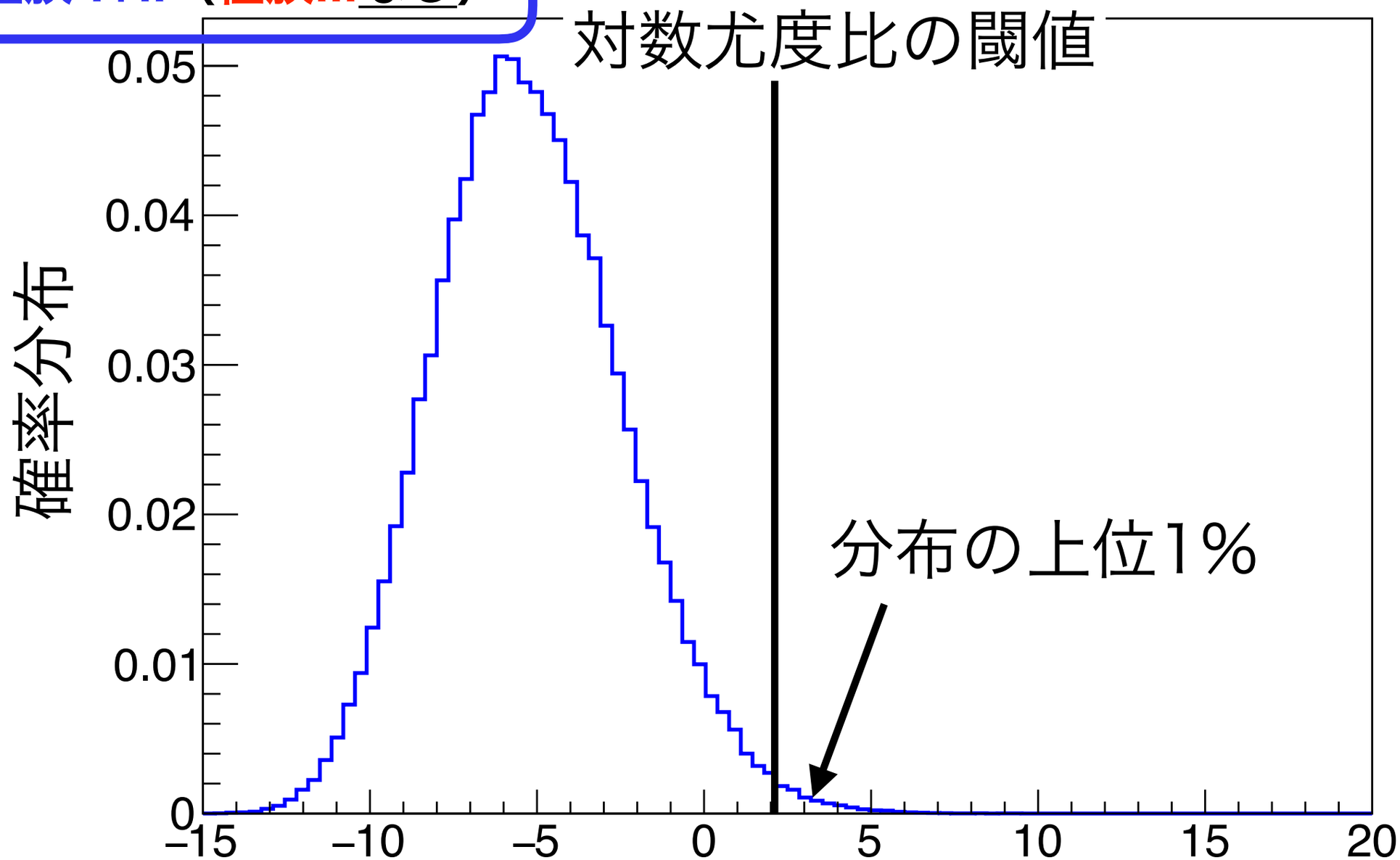
対数尤度比の計算式

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



対数尤度比の分布

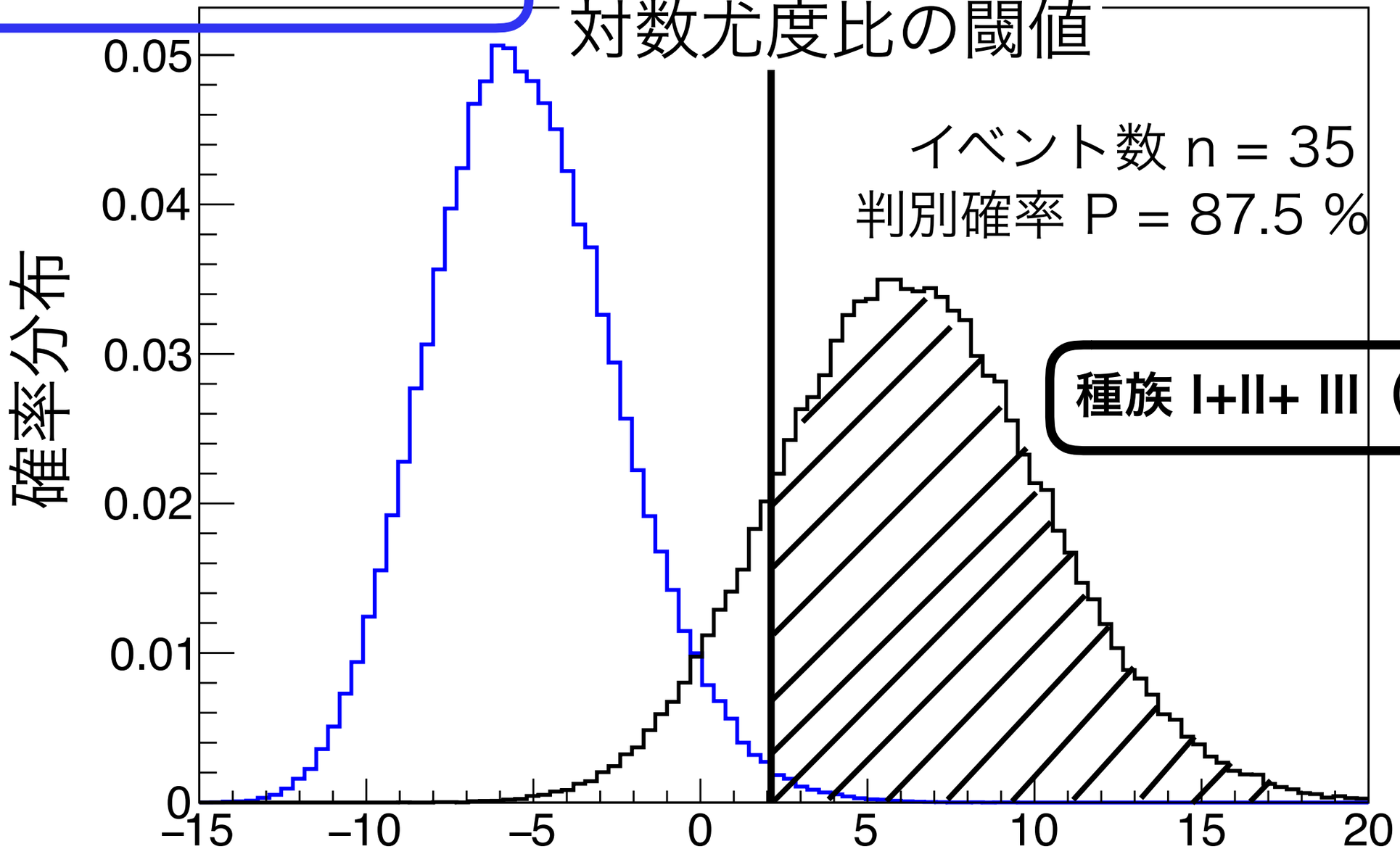
種族 I+II（種族IIIなし）



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

対数尤度比の分布

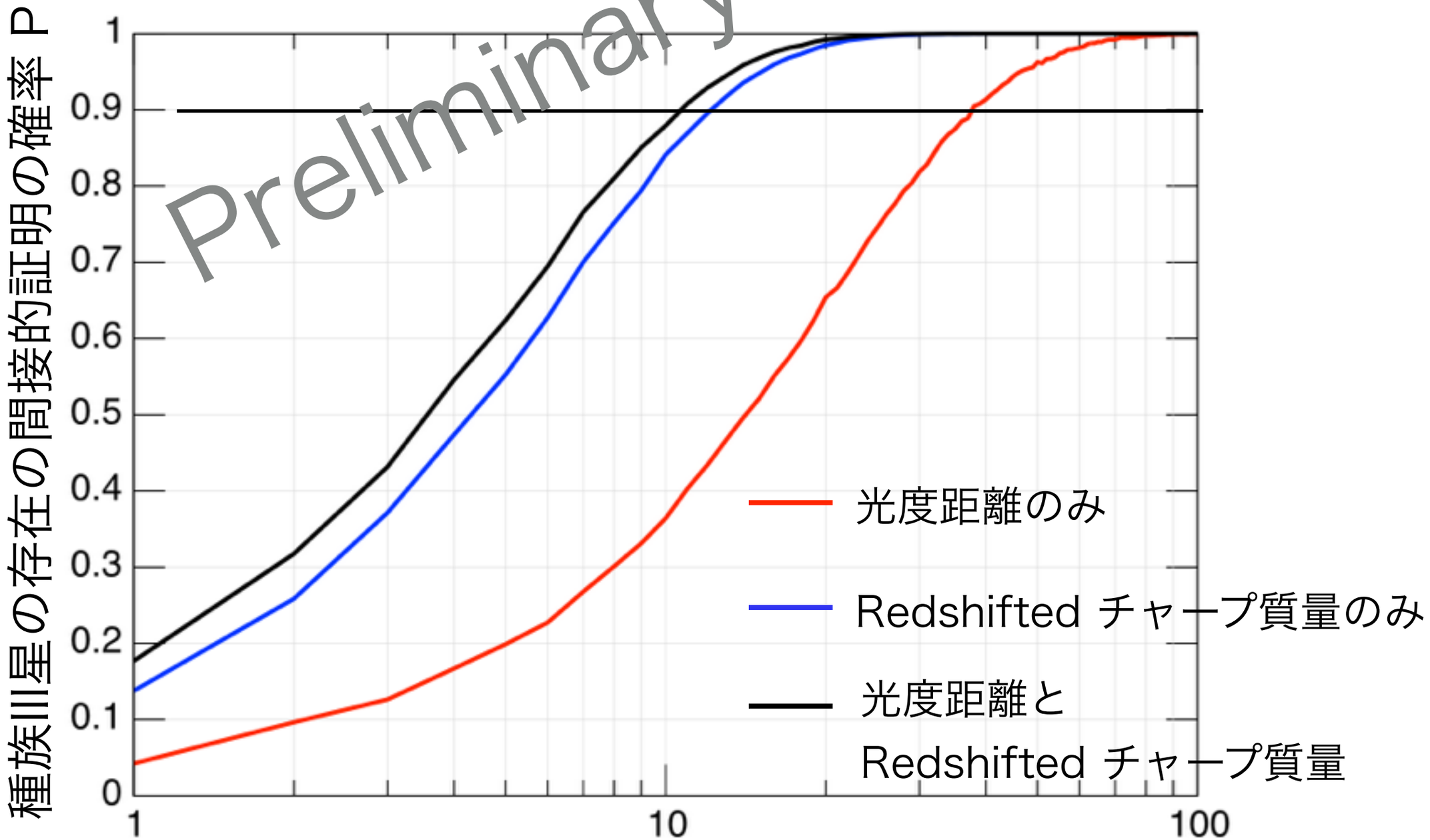
種族 I+II（種族IIIなし）



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

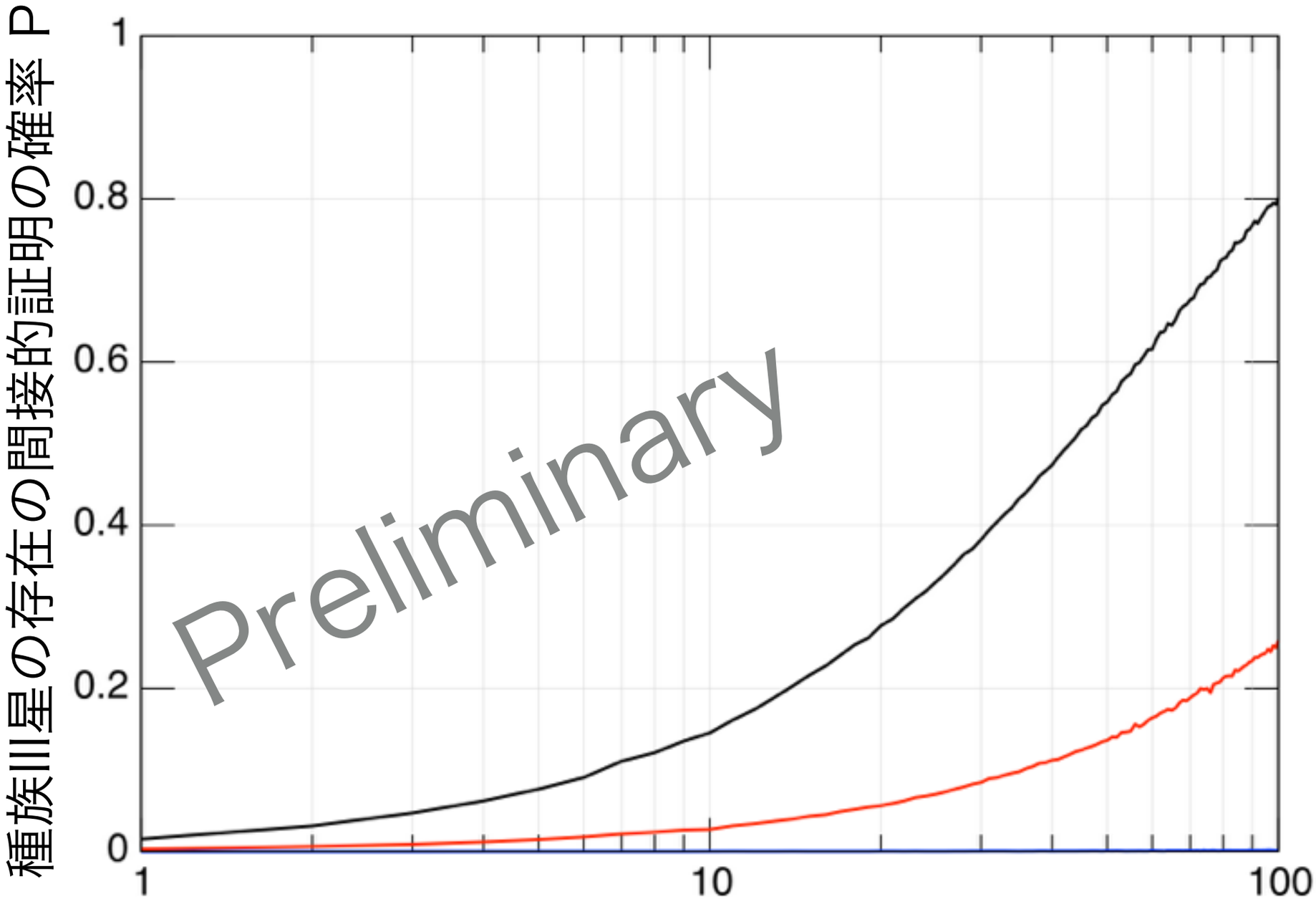
検出数に伴う判別確率Pの推移

‘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



検出数に伴う判別確率Pの推移

明らかに‘種族IIIあり’と判別できる確率 P



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 dLには
フィッシャー行列に基づいて誤差をつけた

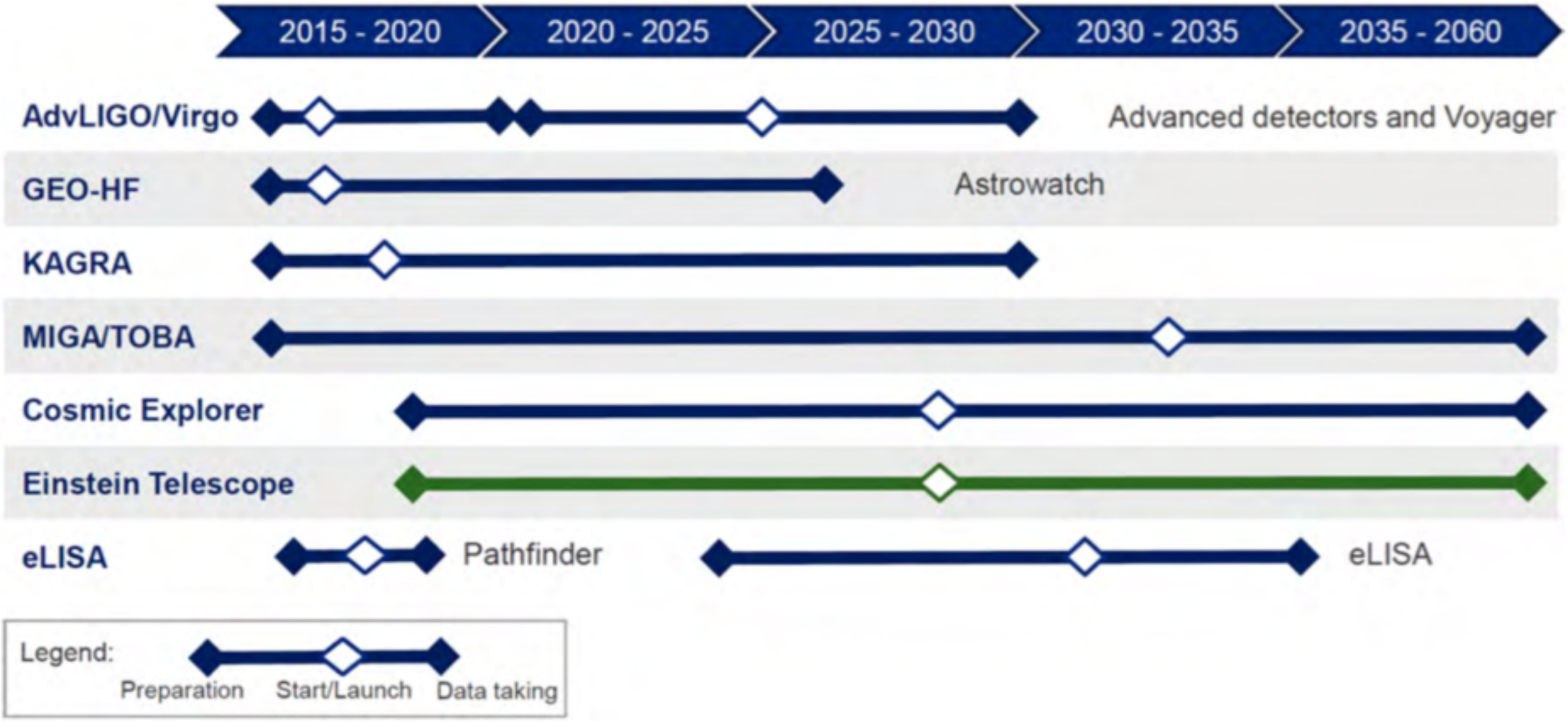
$$\frac{\Delta d_{\rm L}}{d_{\rm L}} \simeq \frac{1}{\sum_i ({\rm S/N})_i}$$

$({\rm S/N})_i$ ：各検出器の信号雑音比

$\dfrac{\Delta d_{\rm L}}{d_{\rm L}}$ が

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

観測ロードマップ



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