

重力崩壊型超新星爆発のブラックホール形成イベントにおけるニュートリノ放出量の評価手法の検討



東京理科大学
TOKYO UNIVERSITY OF SCIENCE

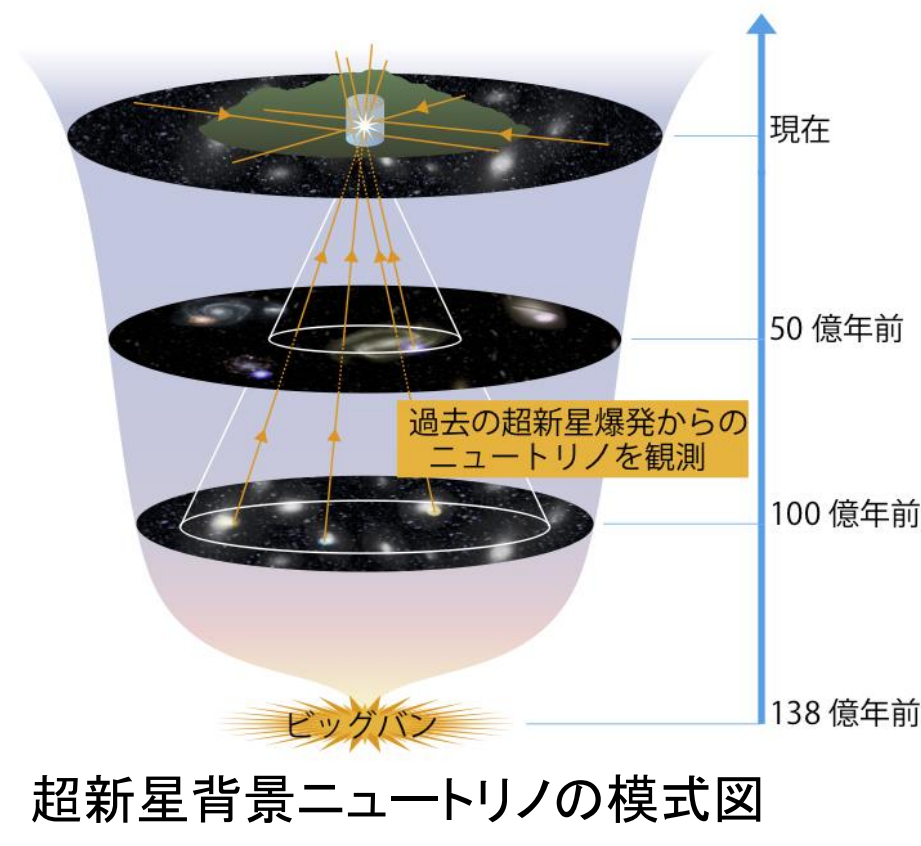
◎本間 卓磨, 中村 広貴, 加藤 ちなみ, 鈴木 英之(東京理科大学)

©Ute Kraus, 2004

1. 背景

◎超新星背景ニュートリノ

- 宇宙誕生以来、繰り返されてきた超新星爆発によって、宇宙全体に漂っているニュートリノ
- 現在SK-Gd実験によって観測が目標されている



観測できれば…

宇宙の星形成史を紐解く
カギになる!

⇒理論的な予測値を求めたい

研究が少なく
あまりわかっていない

中性子星形成イベント
由来のニュートリノ

ブラックホール形成イベント
由来のニュートリノ

◎研究目標

- 様々な星の重力崩壊をシミュレーションし、大質量星がブラックホールを形成する場合に放出するニュートリノエネルギーの総量を計算する。
- BH形成イベント由来の超新星背景ニュートリノの総量を評価するための有効な計算方式の構築を目指す。

究極的には
3 + 1 + 2 + 1
位置+エネルギー+伝播角+時間
⇒七次元Boltzmann方程式

$$E_\nu = \int_0^{t_{\text{BH}}} L_\nu [\text{erg/s}] \cdot dt$$

ブラックホール形成時刻 t_{BH} までの
ニュートリノ光度の積分値

⇒計算コストが非常に大きくなってしまふ

2. 手法

そのために…

◎Mueller method^[1]

- 乱流などの多次元の効果や様々な不定性をパラメータとして組み込み、そのパラメータを精密な超新星計算の結果を再現するように調整する手法。
- 流体力学計算を行わず、親星の密度分布のデータのみで計算。
- 短時間で大量の親星を計算可能。
- ⇒中性子星ができるケースは精密計算との整合性◎
- ⇒ブラックホールが形成されるケースについては妥当性が確かめられていない

この妥当性を評価するためにもう少し真面目に計算する以下のコードを使用

◎GR1D^{[2][3]}

- 一次元(1 Dimension)一般相対論的(General Relativistic)流体力学シミュレーションコード。LeakageとM1の二つの近似手法を使うことができる。
- 相対論の効果を含めた流体力学計算により星の重力崩壊後の様々な物理量の時間発展を追うことができる。

• leakage(ニュートリノ滲み出し法)

- ニュートリノがフェルミディラック分布に従うと仮定
- ⇒Boltzmann方程式は解かない粗い近似

一部のモデルでBH形成まで
シミュレーションできた

• M1(モーメント法)

- ニュートリノ分布関数にモーメント方程式を導入
- ⇒Boltzmann方程式の角度成分を取り除いて解く

M1は収束性が悪く
BH形成までシミュレーション
できなかった

◎問題点の整理とその解決策

- Mueller methodのBH形成イベントの結果の評価の為にGR1Dを用いたが、GR1DではBHの形成まで追えない場合がある。
- ⇒ L_ν はM1の結果を使用したいが、 t_{BH} が不明
- ⇒leakageの結果を用いて外挿的にM1の t_{BH} を求める

$$E_\nu = \int_0^{t_{\text{BH}}} L_\nu \cdot dt$$

◎外挿手法について

1. ξ の定義

- シュバルツシルト半径 r_s

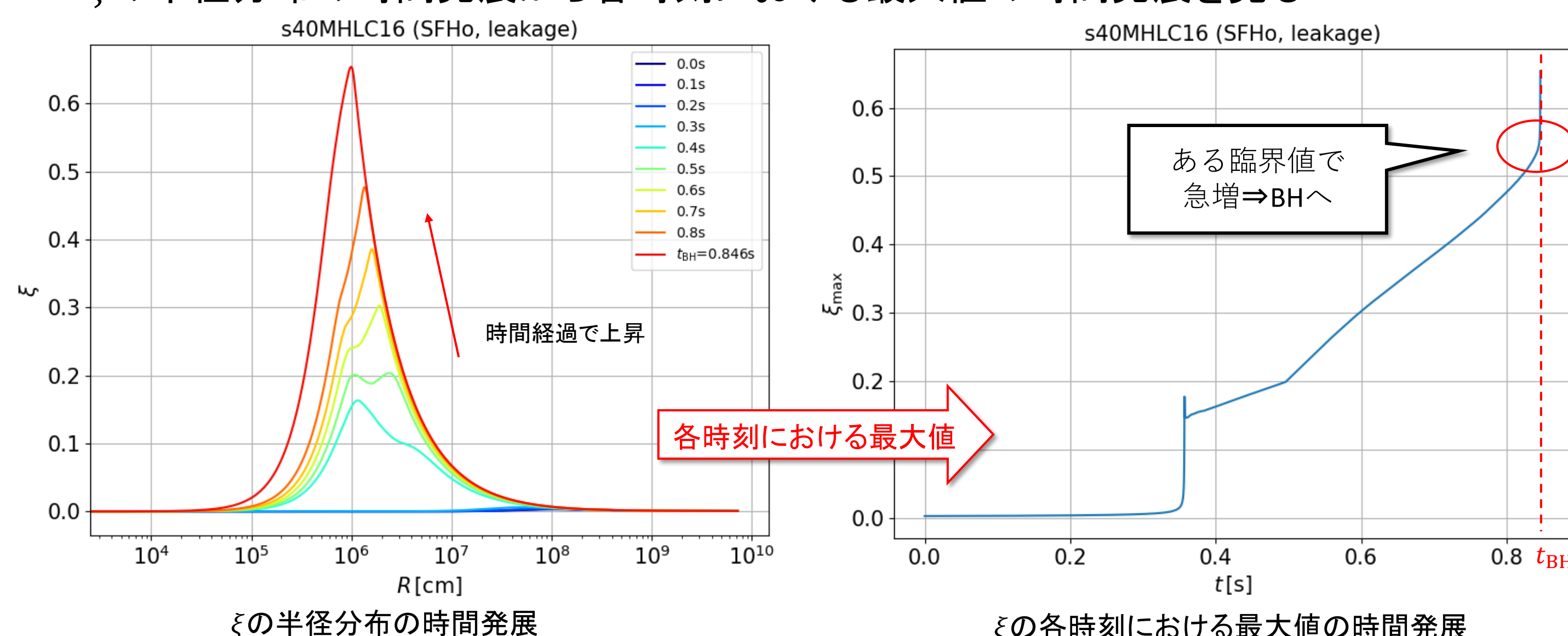
$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \Leftrightarrow M_{\text{BH}}(r) = \frac{c^2 r}{2G}$$

「ある半径 r に内包される質量」と
「その半径のBHが持つ質量」の比

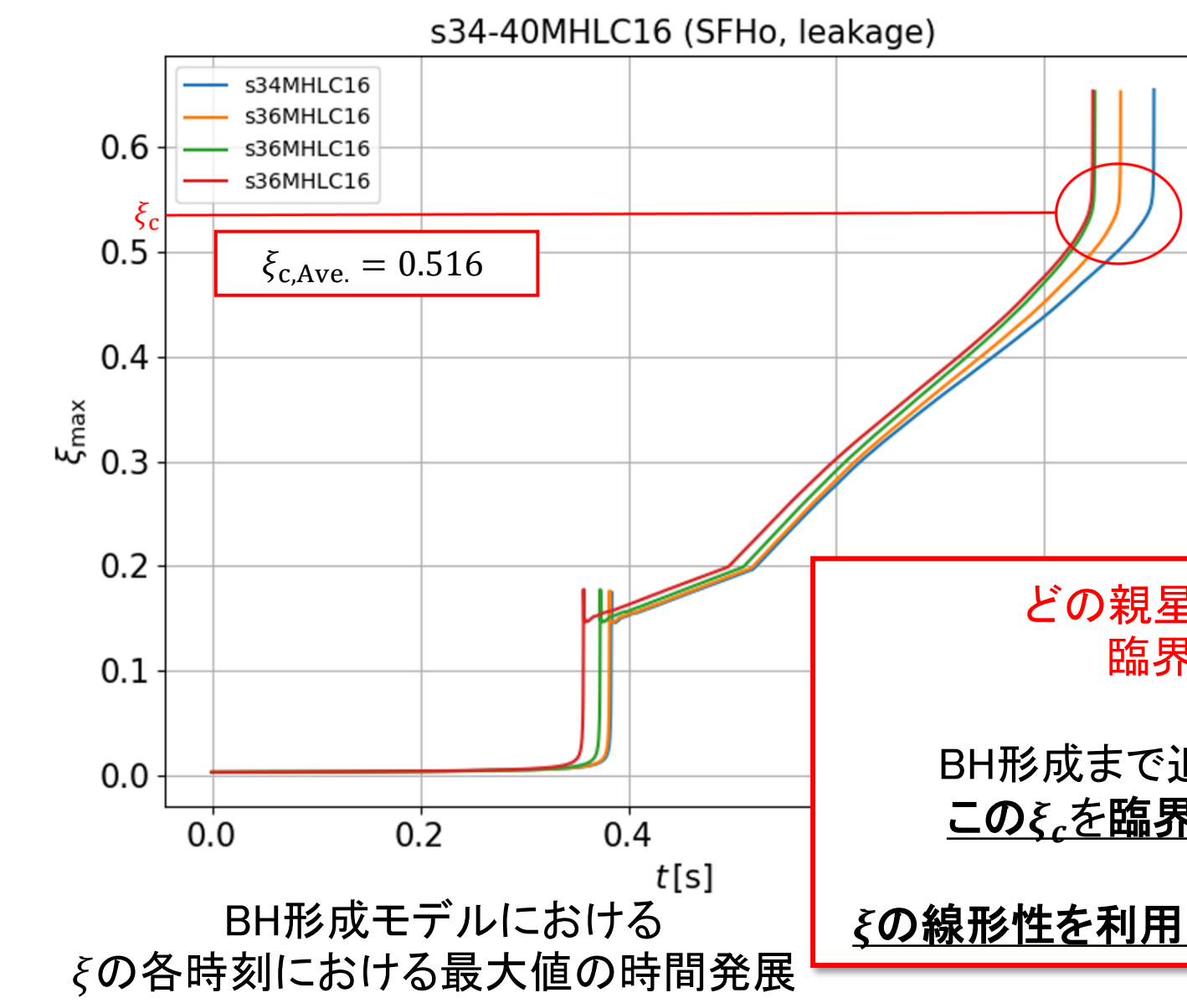
- ξ の定義

$$\xi(r) = \frac{M_{\text{GR1D}}(r)}{M_{\text{BH}}(r)} = \frac{2GM_{\text{GR1D}}(r)}{c^2 r}$$

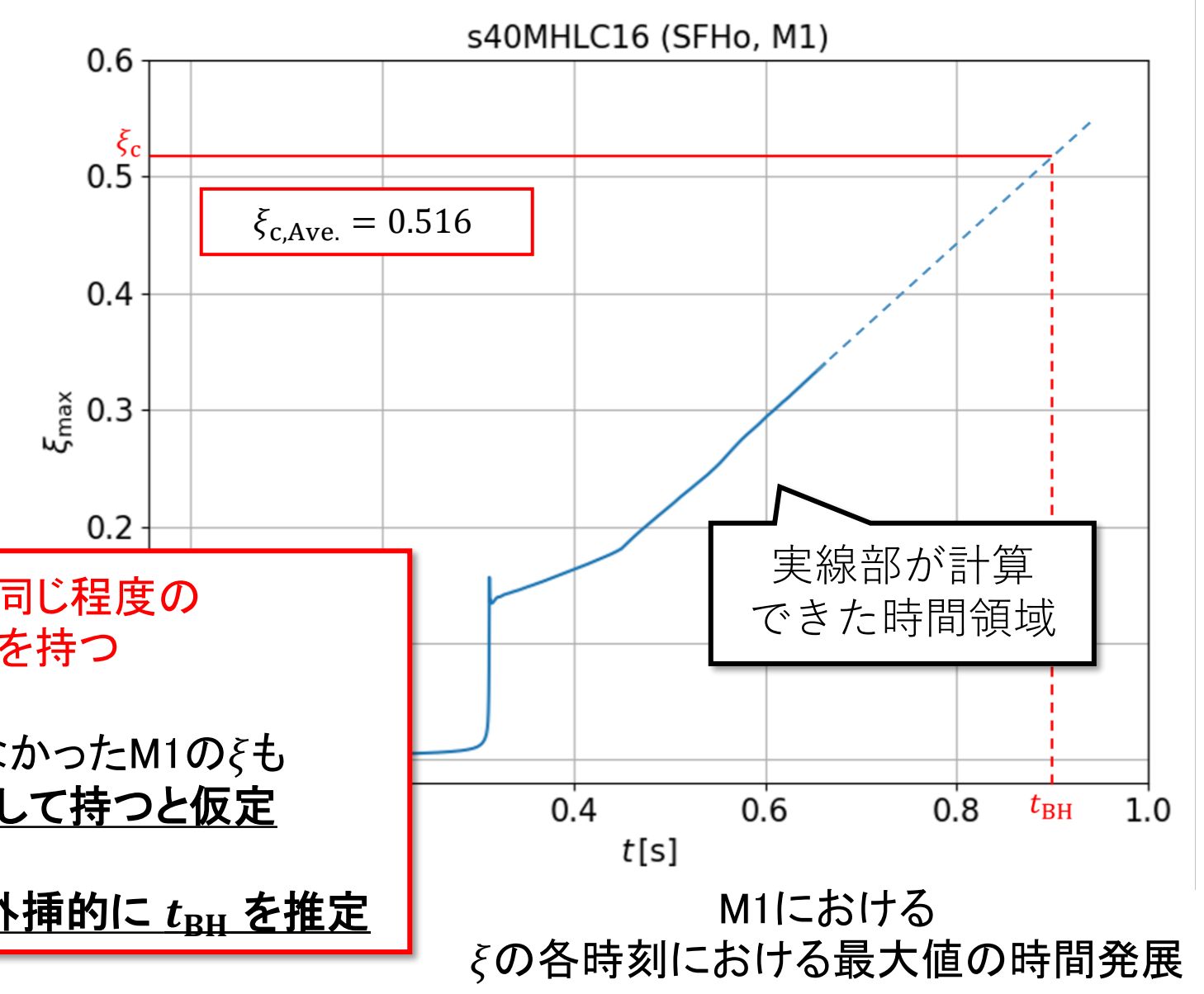
2. ξ の半径分布の時間発展から各時刻における最大値の時間発展を見る



3. 他のBH形成モデルから ξ_c の平均値を求める



4. ξ_c の平均値からM1の t_{BH} を推定する



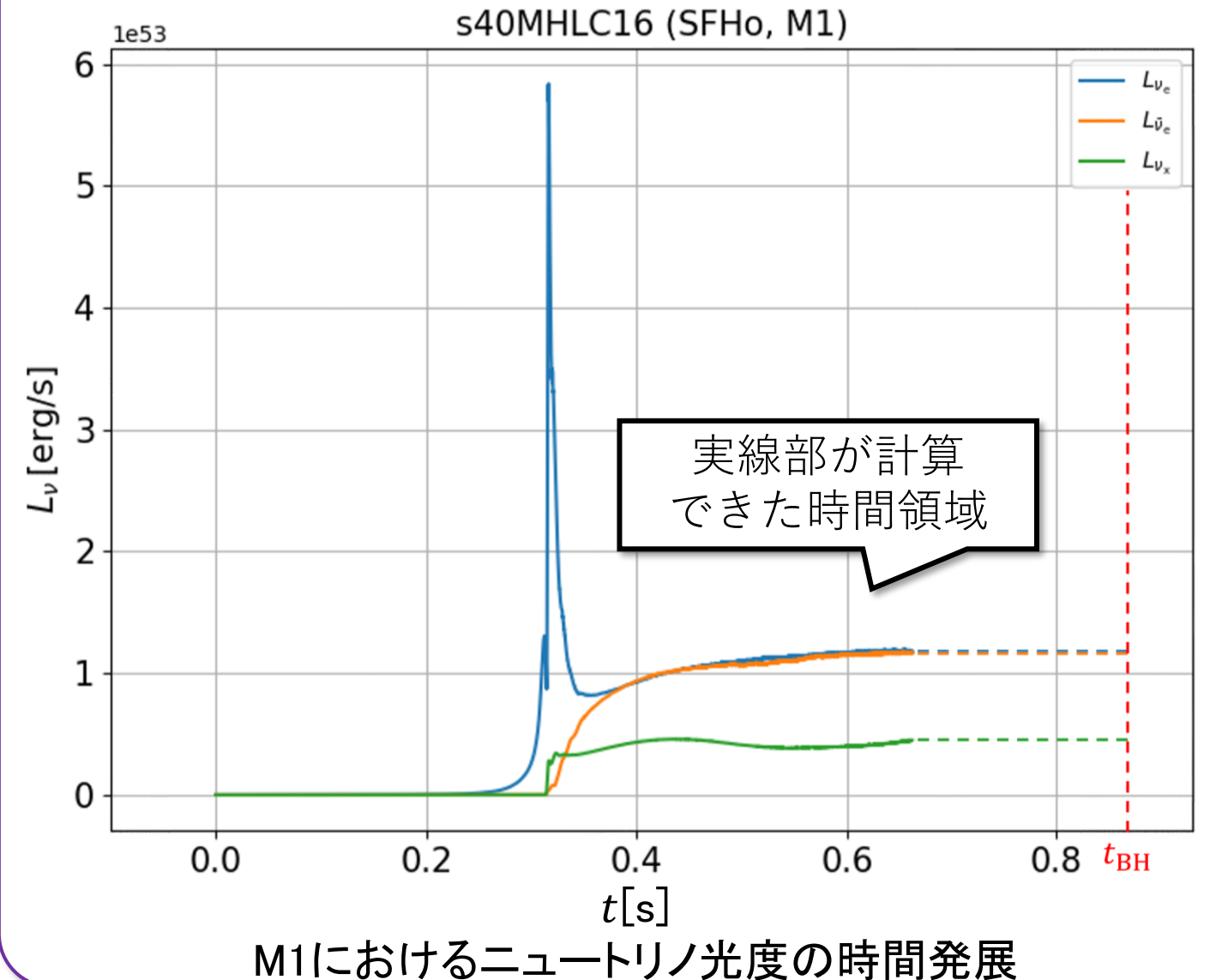
3. 結果・考察

◎本手法の妥当性の確認

この手法で得られた t_{BH} と
より精密計算を行った先行研究との比較(右表)
異なる親星による振る舞いの違い
を再現しつつ近い値が得られた

先行研究^[4]との t_{BH} の比較

progenitor	EOS	Ref.	t_{BH} [ms]
s40WH07	SFHo	In this study. Ebinger et al.(2019)	660 ~620
s40WHW02	SFHo	In this study. Ebinger et al.(2019)	1683 ~1500



ニュートリノ光度が
この後も線形的に推移すると仮定
⇒外挿により求めた t_{BH} を用いて
ニュートリノ放出量の概算が可能に

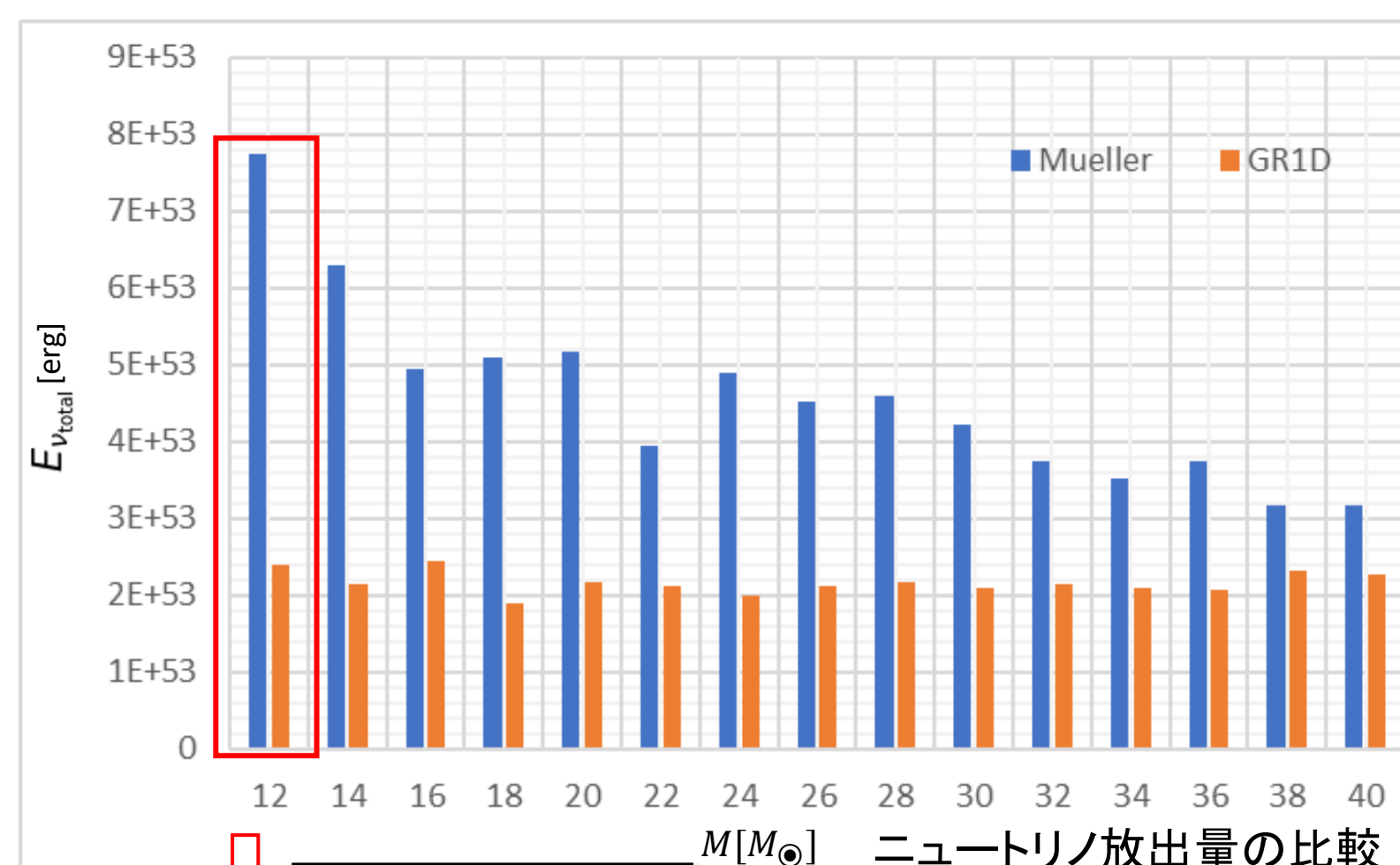
$$E_\nu = \int_0^{t_{\text{BH}}} L_\nu \cdot dt$$

先行研究^{[5][6]}との t_{BH} , E_ν の比較

progenitor	EOS	Ref.	t_{BH} [ms]	$E_{\nu,\text{total}}$ [10^{53} erg]
s40WW95	HShen	In this study. Sumiyoshi et al.(2006) Fischer et al.(2009)	1222 1.34×10^3 1477	3.68 ~3.4 ~4.2
s40WW95	LS180	In this study. Sumiyoshi et al.(2006) Fischer et al.(2009)	667 5.6×10^2 436	1.83 ~1.5 ~1.5

異なるEOSによる定性的な振る舞いの違い
を再現できた

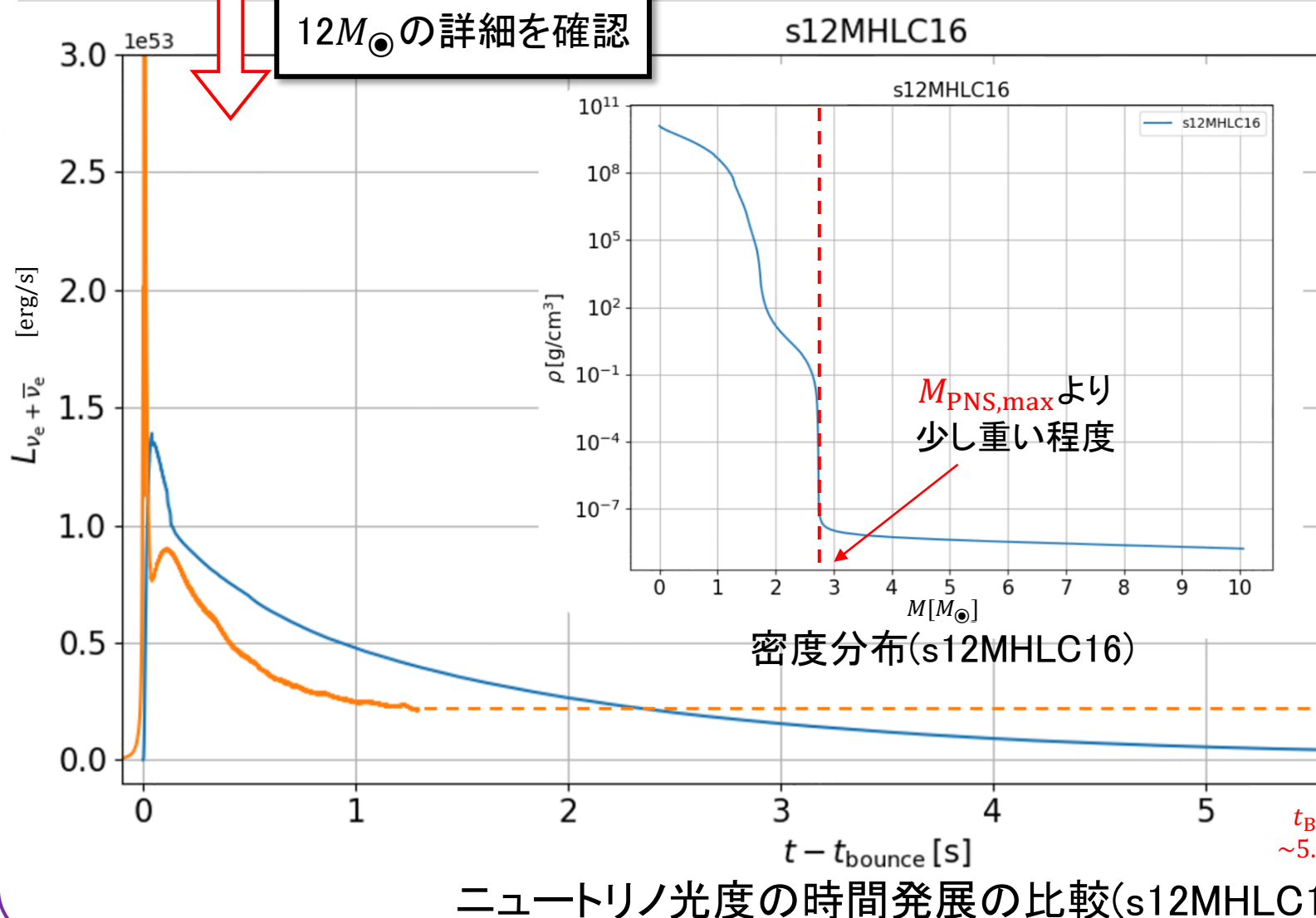
◎Mueller methodとの比較・評価(親星: $Z = Z_\odot, 12M_\odot \sim 40M_\odot$ のMHL16^[1])



• Mueller methodで調整したパラメータ

- $M_{\text{PNS,max}}$
…原始中性子星の最大質量
⇒重力崩壊後降着する物質がこの質量を超えると星は潰れてブラックホールになるとしている。
 - $X = 4E_{\nu_e}/(E_{\nu_e} + E_{\nu_\mu})$
…電子型(反)ニュートリノとそれ以外のニュートリノの比
⇒Mueller methodでは電子型のみ計算し、他のニュートリノはそのX倍放出されるとして総量を計算する。
- ⇒GR1Dの結果を基に決定
⇒これらを変えることでEOSを変えて計算したことを再現したい

全体的にMueller methodの方が値が大きい
特に低質量側で大きな乖離



- Mueller methodは t_{BH} が非常に長い結果に
⇒親星の密度分布を確認
⇒コアの質量は $M_{\text{PNS,max}}$ より少し重い程度
⇒ $M_{\text{PNS,max}}$ 程度の質量が降着するのに時間がかかり、 t_{BH} と $E_{\nu,\text{total}}$ の値もその分大きくなる
- 一方で低質量側のGR1Dの外挿手法に問題がある可能性も有

- 大質量側
✓GR1Dの結果に合うようにMueller methodのパラメータを調整する必要有
- 低質量側
✓Mueller methodのBH判定条件およびGR1Dの外挿手法に改善の余地有
✓またそもそもNSになるとした場合、低質量側は考えなくても良い?

4. 結論・今後の展望

◎結論

- 本研究ではBH形成イベント由来のニュートリノ放出量に着目し、GR1DのleakageとM1の手法で大質量星のコア崩壊後の時間発展をシミュレーションした。
- BH形成開始まで計算出来たleakageの結果からM1でのBH形成時刻を見積もり、ニュートリノ放出量を概算する手法を考案した。
- その結果より40 M_\odot の親星について精密計算を行った先行研究の結果に近い値を得られた。
- 一方Mueller methodとの比較では、特に低質量側で大きな乖離が見られた。
- Mueller methodのBH判定条件およびGR1Dの低質量側の ξ の外挿方法に改良の余地があることが分かった。

◎今後の展望

- 低質量星は以上の改良を施し、大質量星はMueller methodの他のパラメータを吟味し調整することで、BH形成イベント由来の超新星背景ニュートリノの見積りに有効な計算モデルの構築を目指す。

[参考文献]

- B. Mueller et al., *MNRAS*, vol.460, pp.742–764, 2016.
- E. O’ Connor, and C. D. Ott. *Class. Quant. Grav.*, vol.27, no.114103, 2010.
- E. O’ Connor, *ApJ*, vol.219, pp.24–44, 2015. [4] K. Ebinger et al., *ApJ*, vol.870, no.1, 2019.
- K. Sumiyoshi et al., *Phys. Rev. Lett.*, vol.97, no.091101, 2006.
- T. Fischer et al., *A&A*, vol.499, no.1, pp.1–15, 2009.