

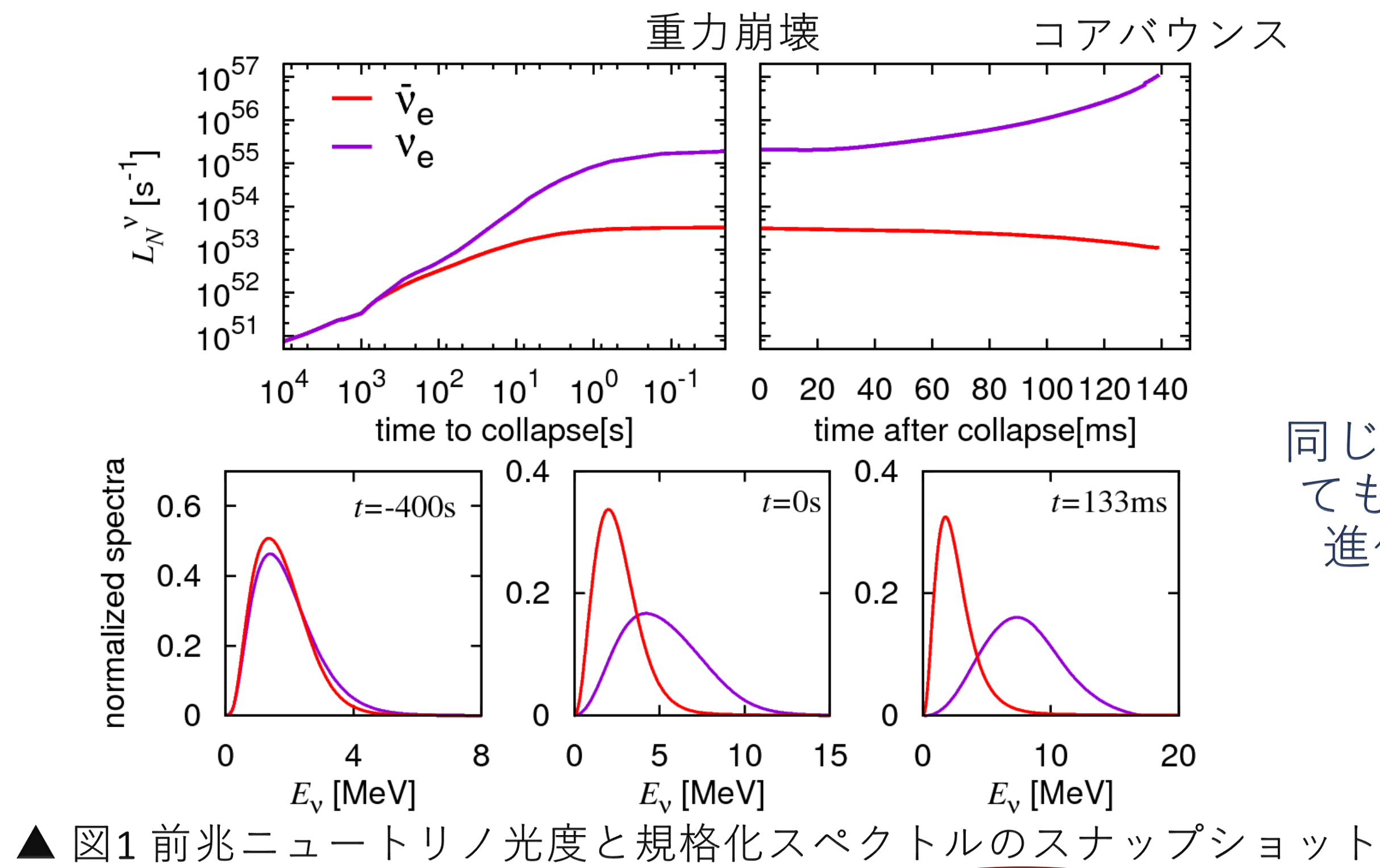
前兆ニュートリノ観測による恒星物理への制限

東北大学 航空宇宙工学専攻 加藤ちなみ

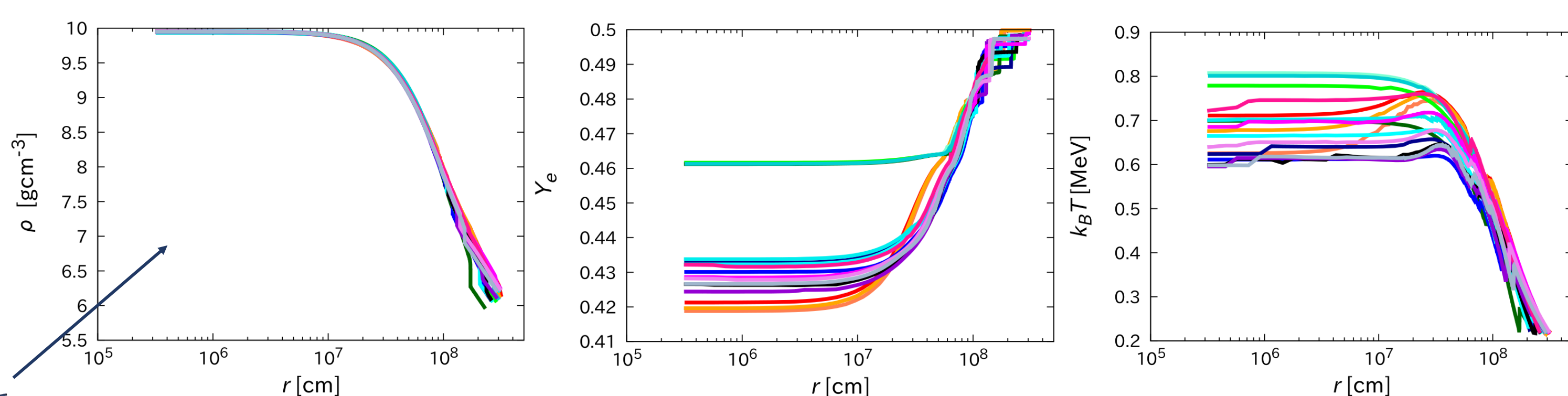
共同研究者：平井遼介(モナッシュ大学), 長倉洋樹(プリンストン大学)

研究概要

近年のニュートリノ観測技術の発展を受けて、ニュートリノ天文学の新しいターゲットである「前兆ニュートリノ」の観測が視野に入ってきた。前兆ニュートリノは重力崩壊型超新星爆発の親星から放出され、未だに残る恒星進化理論の謎を解明する有力な手段となりうるだけでなく、続く超新星爆発に対するアラートにもなりうる。これまでの研究では主に観測可能性を議論するにとどまっており、本研究では次のステップとして前兆ニュートリノ観測から恒星進化理論のどのような情報を引き出すことができるかについて具体的に議論する。



▲ 図1 前兆ニュートリノ光度と規格化スペクトルのスナップショット



▲ 図2 $15M_{\odot}$ の親星20モデルにおける物理量の半径分布
 $\rho_c = 10^{9.95} \text{g/cm}^3$ の時間スナップショット

計算条件: MESA
・親星質量: $15M_{\odot}$
・変化パラメーター
核種数 $N_{\text{nuc}} = 22, 79, 127, 160, 204$
質量座標の最大値 $\Delta M_{\text{max}} = 0.1, 0.05, 0.02, 0.01$

MESA

計算条件: 前兆ニュートリノ計算
・ニュートリノ反応
電子・陽電子対消滅
 $\beta^{\pm}$ 崩壊
原子核による電子捕獲
陽子による電子捕獲
・NSE組成: Togashi EOS

研究背景

✓ 前兆ニュートリノとは

前兆ニュートリノは超新星爆発前の親星から放出されるニュートリノであり、親星進化(特に後半)において重要な役割を担う。

✓ 前兆ニュートリノ観測の重要性

反応断面積が小さい前兆ニュートリノの観測は親星の中心部を直接観測する唯一の手段になりうる。また、続いて起こる爆発に対するアラートにもなり、爆発メカニズムの解明にも貢献する。

✓ 典型的特徴

典型的な $15M_{\odot}$ の親星から放出される前兆ニュートリノの放出数およびスペクトルは図1である。超新星ニュートリノより放出数も少なく、エネルギーも低い。

研究目的と方法

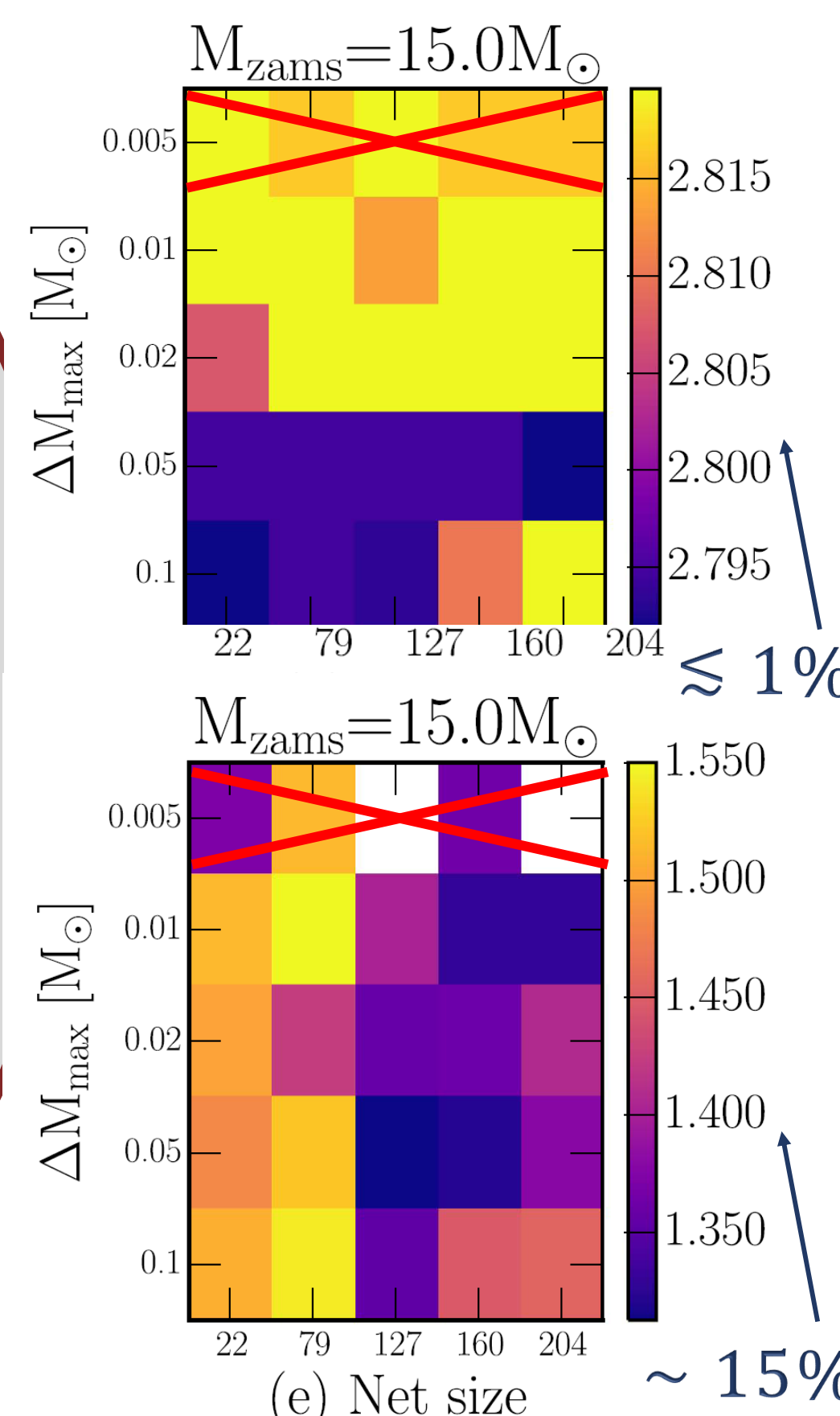
✓ 研究目的

観測からわかる恒星物理の調査

先行研究では前兆ニュートリノの観測可能性に関する議論が主になされてきた。本研究では、観測によって具体的に得られる恒星進化に関わる情報について議論する。

✓ 研究方法

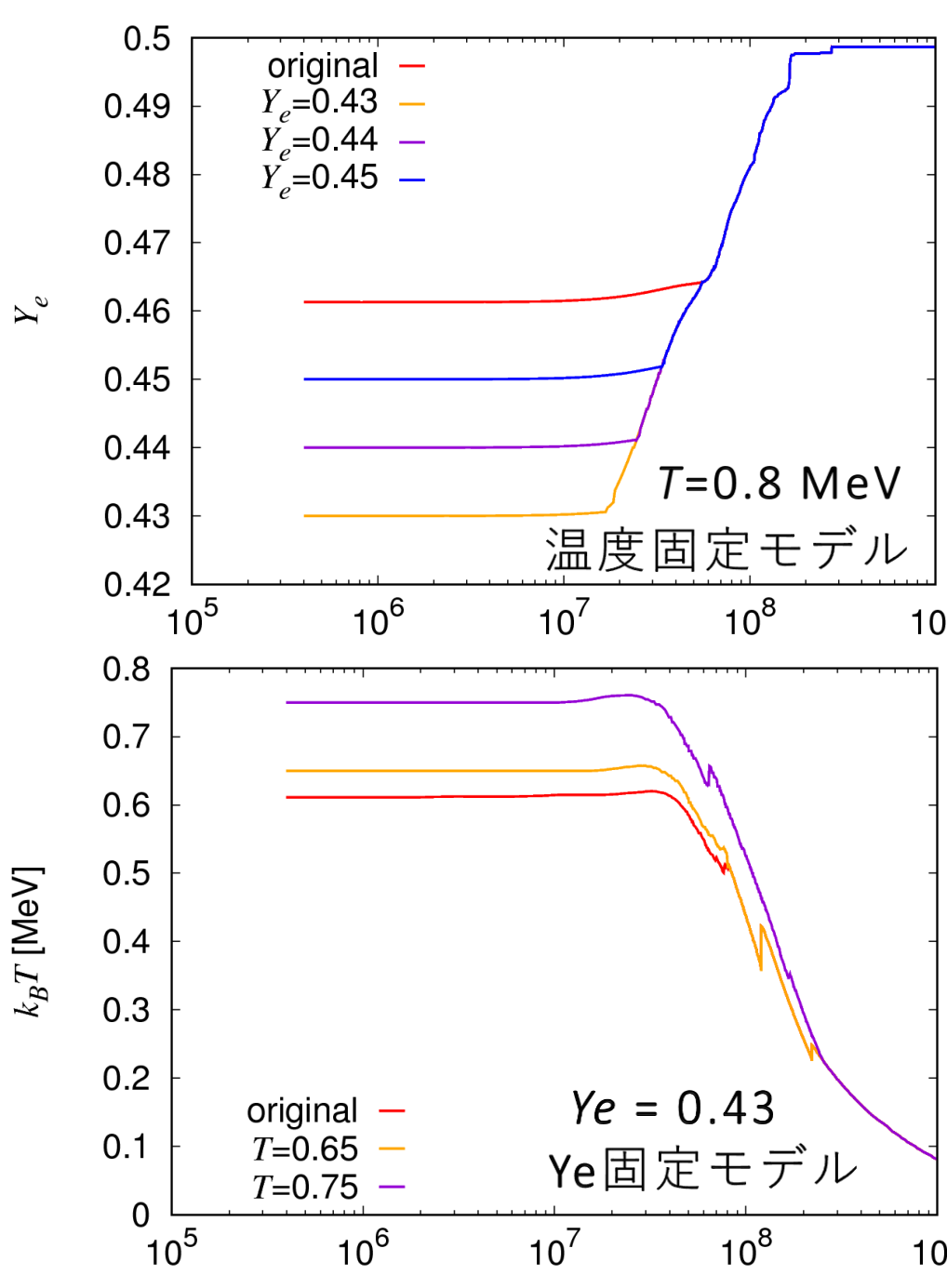
恒星進化コードMESAを用いて、核種数・質量座標の最大値が異なる $15M_{\odot}$ の親星の進化計算を行った(Farmer2016)。得られた20モデルに対して前兆ニュートリノ光度とスペクトルを計算し、その結果からニュートリノ放出や恒星進化の指標となる物理量との相関を調査し、観測から制限をつけることができる可能性のある物理量を調査した。



▲ 図3 Heコア質量(上)とFeコア質量(下) (Farmer 2016)

ニュートリノ光度と物理量の相関調査

20モデルの親星において同じ中心密度を持った時間に注目してニュートリノ光度と相関のある物理量($\mathbf{X}$ 参照)の調査を行った。結果として $\nu_e, \bar{\nu}_e$ どちらに対しても中心部の Y_e との間に強い相関があることが伺える(図4)。一方で、温度については上昇に伴って光度も概ね上昇しているように見えるが、多少のばらつきがみられた。また、 T と Y_e について片方の半径分布を人工的に変化した分布(図5)について同様の解析を行うと、どちらのモデルについてもこれまで得られた光度と Y_e との相関分布に矛盾しない結果が得られた。



▲ 図5 Y_e (上図)と温度(下図)の人工半径分布

スパースモデリングによる相関調査

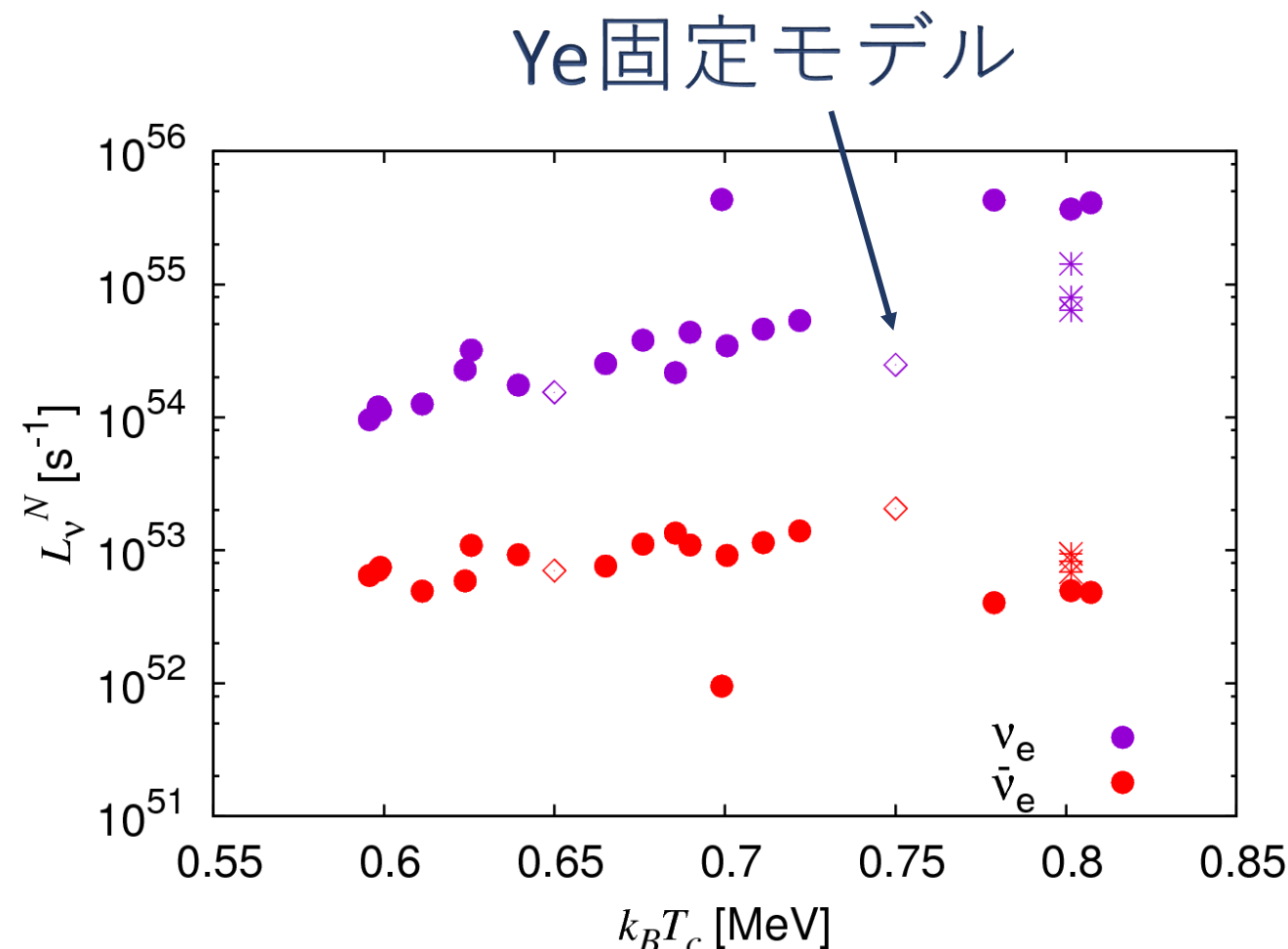
図4で得られた相関関係の強さをスパースモデリングを用いて評価した。まずある時刻のニュートリノ光度($\mathbf{Y}$)を物理量($\mathbf{X}$)の線形な関数で表す。それぞれの $\mathbf{X}$ に対する係数($\mathbf{a}$)が大きいほど相関が強いことを意味する。結果として、 $\nu_e, \bar{\nu}_e$ の光度が Y_e と一番強い相関を持っていることが再確認できた(図6)。また、 ν_e については正の相関、 $\bar{\nu}_e$ については負の相関が見られている。それぞれの放出には原子核による電子捕獲反応と β^- 崩壊が最も支配的であり、これらの計算に必要な原子核組成に Y_e が大きく関与していることが原因である。以上の結果より、ニュートリノ観測から中心部の Y_e について制限をつけることができる予想される。

スパースモデリングにおけるフィット関数

$$\mathbf{Y} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{X}$$

$$\mathbf{X} = (\rho_c, T_c, Y_{e,c}, \langle A \rangle, X_h, M_{\text{He}}, M_C, M_O, M_{\text{Si}}, M_{\text{Fe}})$$

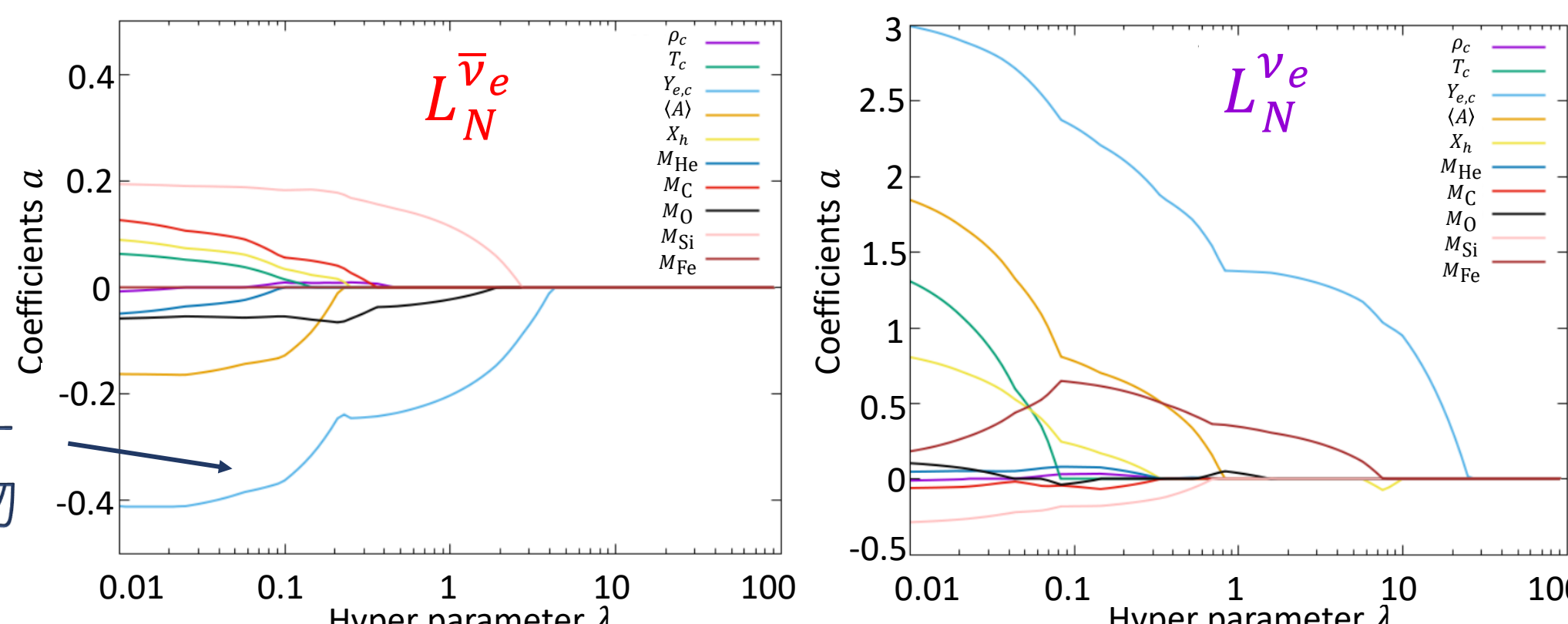
$$\mathbf{Y} = (L_N^{\nu_e}, L_N^{\bar{\nu}_e})$$



▲ 図4 ニュートリノ光度と温度(左図)と Y_e (右図)の相関

温度固定モデル
人工半径分布でも相関と矛盾していない

空間積分量であるニュートリノ光度と中心部の物理量に相関がある



▲ 図6 スパースモデリングによるニュートリノ光度との相関強さの調査

まとめと今後

本研究では、未だに多くの不定性が残る恒星進化に対して、前兆ニュートリノの観測からどのような制限をつけることができるのかについて、ニュートリノ光度と物理量の相関を用いて調査した。結果として $\nu_e, \bar{\nu}_e$ どちらに対しても中心部の Y_e との間に相関がみられたため、スパースモデリングを用いてその結果の確認を行った。これにより、実際の観測の際に制限を付けることができるのは Y_e ではないかと予想される。今後は同じ中心密度の時間だけでなく、様々な時間に対して同様の解析を行う予定である。