

様々な初期質量の大質量星から前兆ニュートリノに関する系統的な研究

加藤 ちなみ

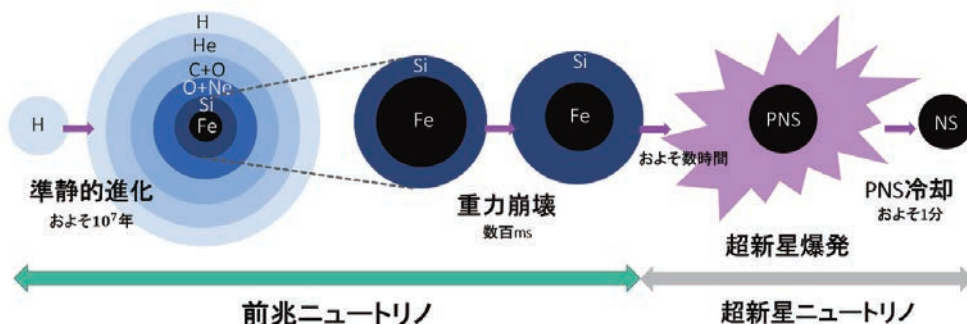
東北大学 大学院工学研究科

1. はじめに

宇宙に数多く存在する恒星は、生まれたときに持っている質量によって全く異なる進化をする。一番身近な恒星である太陽は炭素や酸素で構成される中心核をもつ**白色矮星**となって一生を終える。一方で、太陽の8倍以上の初期質量をもつ**大質量星**は鉄が主成分の核が形成した後、「**超新星爆発**」と呼ばれる大規模な爆発を起こす。現在、未だに爆発メカニズムや爆発前の親星の構造など多くの不明な点が残されている。爆発によって中心部で生成された重元素が散布されることで周囲の化学組成が変化するため、これらの解明は銀河や太陽系における化学進化の解明にもつながる。また、星内部は非常に高温・高密度(10^{14}g/cm^3 , 10^{12}K)になるため、超新星爆発自体が地球上では実証できない理論の実験場になりうる。そこで、本研究では大質量星・超新星爆発に残された未解明な点を「ニュートリノ観測」を用いて明かすことを目的としている。

2. 大質量星の進化と超新星爆発

恒星は水素ガスが集まることで誕生し、中心部で核融合反応を起こして進化とともに重元素を合成する。大質量星の場合は、水素→ヘリウム→炭素→ネオン→酸素→ケイ素の順に核融合反応を起こし、最終的に鉄が主成分の中心核が形成される。鉄は最も安定な原子核であるため核融合反応はこれ以上起こらず、代わりに吸熱の鉄の光分解反応や自由陽子による電子捕獲反応が起こる。これによって、星を支えていた中心部の圧力が減少し中心核が不安定化する(**重力崩壊**)。その後、重力崩壊によって中心密度は単調に増加していき原子核密度(10^{14}g/cm^3)に達すると、核力によって再び中心核が安定化する。これにより不安定部と安定部の境界に衝撃波が形成されて外側へと伝搬していく(**コアバウンス**)。この衝撃波が星の表面に達したときに超新星爆発が起きる。これらの一連の進化は第1図を参照していただきたい。



第1図：大質量星の進化と超新星爆発。

大質量星が誕生してから超新星爆発によって一生を終えるまでの一連の進化を表している。本研究では特に準

静的進化と重力崩壊に注目している。また、コアバウンスより前に放出されるニュートリノを前兆ニュートリノ、後に放出されるニュートリノを超新星ニュートリノと呼んでいる。ここで PNS は原始中性子星、NS は中性子星を意味している。

3. ニュートリノの役割とその観測の重要性

上で述べた大質量星の進化や超新星爆発のダイナミクスにおいて「ニュートリノ」が非常に重要な役割を担っている。ニュートリノは物質との反応確率が小さいため、爆発前の星の中心部で生成されても自由にそこから抜け出すことができ、中心部の冷却に大きく寄与している。また、超新星爆発に対しては衝撃波が星表面に到達するためにニュートリノによる加熱が必要不可欠であることが最近の数値計算によって示されている。つまり、これらのニュートリノを検出することで恒星進化や爆発メカニズムに対する重要な情報を得ることができる。実際に、1987年に起きた超新星爆発の際にカミオカンデなどの地上のニュートリノ観測装置で初めて超新星爆発由来のニュートリノを検出し、爆発メカニズムの理解が大きく進歩した。当時から30年が経過した現在ニュートリノ検出技術は大いに発展し、次の超新星爆発の際にはより多くの詳細な情報を得ることができると期待されている。そこで、次の観測から正確に情報を得るためにより現実的なニュートリノの理論予想が強く求められている。

大質量星の進化・超新星爆発から放出されるニュートリノは放出される段階によって**前兆ニュートリノ**と**超新星ニュートリノ**に分けられて研究が進められており(第1図)、本研究では特に前兆ニュートリノに注目する。前兆ニュートリノは実際に観測された超新星ニュートリノよりも放出数が少なく、エネルギーも低いいため検出が難しいとされてきた。しかし、近年の検出技術の発展により検出可能性がでてきた。前兆ニュートリノ検出の重要性は主に①恒星進化理論への制限②超新星爆発の予兆であり、特に重要なのは②である。超新星爆発は私たちの銀河では数百年に1回の非常にレアなイベントであり、また爆発自体はほんの一瞬の出来事であるため電磁波などの他の検出方法で超新星爆発を確実にとらえるためには事前に爆発を予知する必要がある。前兆ニュートリノは太陽系近傍の親星からであれば爆発の数日前から検出されることが最近の研究で分かっている。そのため前兆ニュートリノ検出は超新星爆発を確実にとらえるために欠かせない予兆となる。

4. 様々な初期質量の大質量星からの前兆ニュートリノ放出の系統的な調査

2019年度若手・女性利用課題として採択された課題においては、様々な異なる初期質量をもつ大質量星からの前兆ニュートリノ放出を系統的に計算し、初期質量や恒星中心部の物理量などとの相関関係の調査を行った。これまでの研究ではいくつかの典型的な初期質量をもった恒星からの前兆ニュートリノ放出に注目し、ニュートリノ検出器における前兆ニュートリノの観測可能性を議論してきた。しかし実際に太陽系近傍に存在する超新星爆発の候補天体は太陽の9倍-40倍以上の広い初期質量の範囲を持っている。また、恒星進化は初期質量に強く依存するため、より現実的な理論予想のためには前兆ニュートリノの初期質量依存性の調査が必要不可欠である。

今回用いた大質量星の初期質量は太陽質量の10倍~40倍までの23モデルである。これらを用いて以下のアウトラインにそって研究を行った。

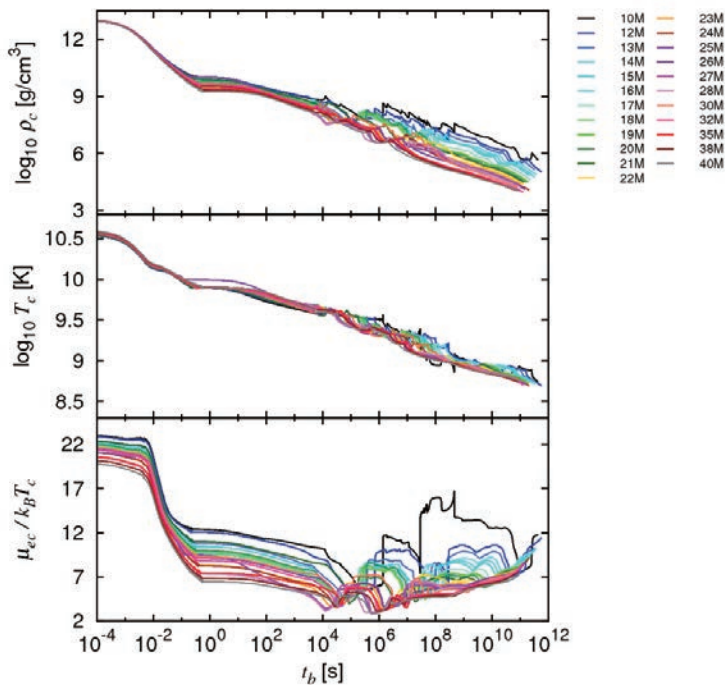
- ① 大質量星の準静的進化および重力崩壊段階の進化計算
- ② ①で得られた結果を用いたニュートリノ光度及びエネルギースペクトルの計算

③ 得られたニュートリノ光度と恒星進化において重要な物理量との相関調査

Reedbush スーパーコンピュータシステムにおいて計算を行ったのは、①の重力崩壊段階の進化計算である。重力崩壊段階中は2で述べた通り中心核が不安定になっているため、ダイナミカルな流体方程式を解く。また、中心部では密度が非常に高くなっているためニュートリノも物質と反応し熱化されるため、同時にニュートリノに対する Boltzmann 方程式を解く必要がある。実際に本研究ではMPI/OpenMPIの hybrid 並列化を用いたニュートリノ輻射流体計算コードを用いた。

得られた大質量星の中心密度・温度・縮退度の時間発展は第2図の通りであった。この図より同時刻において比較をするとわかることは以下の通りである。

- ① 準静的段階では常に軽い星ほど中心密度が高く、その特徴が重力崩壊段階で見られなくなる。
- ② 準静的段階では重い星ほど中心温度が高いが、重力崩壊直前からその特徴が見られなくなる。
- ③ どの段階においても軽い星ほど縮退度が高い(つまり、コンパクトな星である)。



第2図: 様々な初期質量の大質量星の中心密度・温度・縮退度の時間発展。

今回用いた 23 個の大質量星モデルの中心密度(上)・中心温度(中)・縮退度(下)の時間発展を表している。横軸の時間はコアバウンスを基準に定義しており、炭素の核融合反応が始まるところまで遡っている。 $t > 0.1 - 1\text{s}$ が準静的段階、 $t < 0.1 - 1\text{s}$ が重力崩壊段階である。

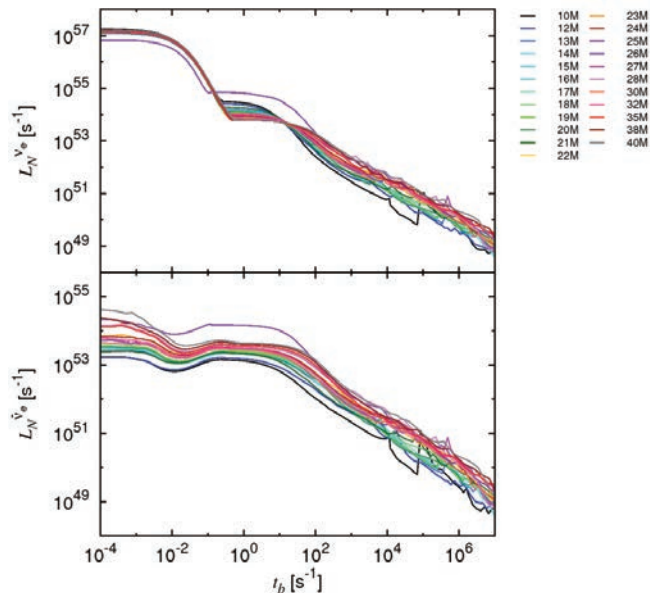
そして得られた準静的進化・重力崩壊段階の計算をもとに6種類のニュートリノ放出反応(自由陽子による電子捕獲・原子核による電子捕獲・原子核による陽電子捕獲・電子陽電子対消滅・ β^\pm 崩壊)からの電子型・反電子型ニュートリノ光度およびスペクトルを計算した。得られた結果は第3図である。初期質量による電子型及び反電子型ニュートリノ光度の違いは最大で10-80倍程度に達し、前兆ニュートリノ観測の理論予想において初期質量が非常に重要なファクターであ

ることがはっきり示された。また、この図からわかる光度の初期質量依存性は以下の通りである。

- ① 準静的段階における電子型ニュートリノは、進化初期では重い星ほど高い光度を持っているのに対し、 $t \sim 1$ s でその関係性が逆転している。一方で、重力崩壊段階の電子型ニュートリノは初期質量によらず同じ光度の時間発展をしている。
- ② 反電子型ニュートリノは進化段階によらず、重い星ほど高い光度を持っている。

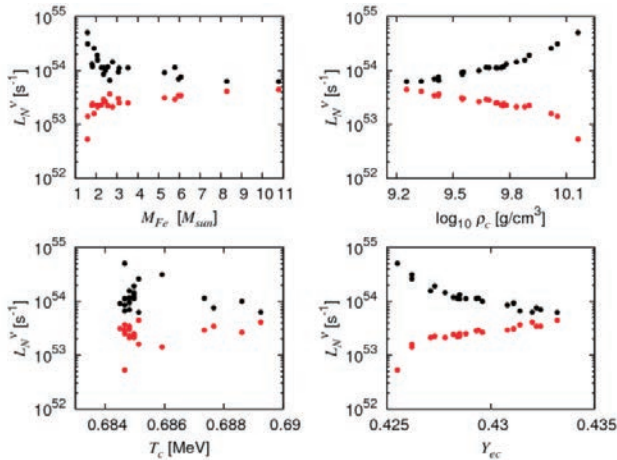
これらの結論は第2図で示した中心密度や温度などの特徴から理解することができる。電子型ニュートリノは原子核や自由陽子による電子捕獲反応によって支配的に放出されるため、密度・温度がどちらも高い状況でより多く放出される。一方で、反電子型ニュートリノに対しては β^- 崩壊による放出が支配的であり、温度が高く比較的密度が低い状況が好ましい。

続いて実際の観測から恒星内部の情報を引き出すために、電子型・反電子型ニュートリノ光度と恒星進化において重要な物理量との相関調査を行った。今回の解析では各モデルの重力崩壊開始時における鉄コアの質量(M_{Fe})、中心密度、中心温度、 Y_{ec} =中心電子数密度/中心バリオン数密度との相関に注目した。得られた結果は第4図であり、特に中心密度と光度、 Y_{ec} と光度に強い相関関係が見られた。これは光度の時間発展同様に支配的なニュートリノ放出過程から理解することができる。先日受理された私たちのグループの論文において、本来はローカルなニュートリノ放出数を空間積分して得られるニュートリノ光度を中心物理量(密度・温度・ Y_{ec})の関数としてみなし、簡易的に観測量であるニュートリノ光度を理解できることを示した。この論文では太陽質量の15倍の初期質量をもつモデルのみを用いていたが、この第4図はその解析を異なる初期質量の星に対しても拡張できる可能性を示唆しているおり、今後取り組むべき課題である。



第3図：電子型・反電子型ニュートリノ光度の時間発展。

今回用いた23個の大質量星モデルの電子型(上)、反電子型(下)のニュートリノ光度の時間発展を表している。横軸の時間はコアバウンスを基準に定義しており、炭素の核融合反応が始まるころまで遡っている。 $t > 0.1 - 1$ s が準静的段階、 $t < 0.1 - 1$ s が重力崩壊段階である。



第4図：電子型・反電子型ニュートリノ光度との相関関係。

重力崩壊開始時の電子型(黒)、反電子型(赤)のニュートリノ光度と恒星進化において重要な物理量との相関関係を表している。左上から順に鉄核の質量(M_{Fe})、中心密度、中心温度、 Y_{ec} =中心電子数密度/中心バリオン数密度を横軸に取っている。ただし、太陽質量の25倍の初期質量をもつモデルはこの図から除いている。

5. まとめと今後

本研究では超新星爆発メカニズムやその親星における未解明な点を前兆ニュートリノの観測から解き明かすことを最終的な目標としている。そのために恒星の持つ初期質量に対する前兆ニュートリノ光度の依存性を系統的に調査した。実際に恒星進化は初期質量に強く依存し、特に準静的段階において中心密度や温度、縮退度に違いが見られた。具体的に同時刻で比較すると軽い星ほど中心密度は常に高いのに対し、中心温度は重い星ほど高くなっている。これらの特徴はニュートリノ光度にもそのまま表れている。原子核および自由陽子による電子捕獲反応が電子型ニュートリノ放出において支配的であり、 $t > 10s$ では温度が高い重たい星で $t < 10s$ では密度が高い軽い星で電子型ニュートリノが多く放出されている。一方で、温度が高く密度が比較的低い状況が好ましい β^- 崩壊が支配的に放出する反電子型ニュートリノは、密度が低い重たい星で多く放出されることがわかった。どちらの光度も最大で10-80倍の違いが見られ、前兆ニュートリノ検出の予想において初期質量が重要なファクターであることが分かった。これをもとに実際の観測から恒星内部の情報を引き出すために重要となる光度と恒星物理量との相関調査を行った。そして、特に電子型・反電子型ニュートリノの光度と密度・ Y_{ec} に対して強い相関関係が見られた。今後は、ニュートリノ光度を中心密度・温度・ Y_{ec} の関数としてみなし、より相関が強い物理量の調査を継続して行っていく予定である。また、実際の近傍親星を想定した場合のニュートリノ検出数の見積もりについても行う予定である。

参考文献

- [1] 山田章一『超新星』, 日本評論社, 2016
- [2] Hirata, K., et al., “Observation of a Neutrino Burst from the Supernova SN1987A”, Physical Review Letters, Vol 58, No 14 (1987)
- [3] Odrzywolek, A., Misiaszek, M. and Kutschera M., “Detection possibility of the

- pair-annihilation neutrinos from the neutrino-cooled pre-supernova star” ,
Astroparticle Physics, Vol 21, Issue 3, pp.303 (2004)
- [4] Kato, C., et al., “Neutrino emissions in all flavors up to the pre-bounce of massive stars and the possibility of their detections” , The Astrophysical Journal, Vol. 848, pp. 48 (2017)
- [5] Nakamura, K., et al., “Multi-messenger signals of long-term core-collapse supernova simulations: synergetic observation strategies” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 461, Issue 3, pp.3296 (2016)
- [6] Yoshida, T., et al., “One-, Two-, and Three-dimensional Simulations of Oxygen Shell Burning Just Before the Core-Collapse of Massive Stars” , The Astrophysical Journal, Vol 881, pp.16 (2019)
- [7] Nagakura, H., Sumiyoshi, K. and Yamada, S., “Three-dimensional Boltzmann-Hydro code core-collapse in massive stars I. special relativistic treatments” , The Astrophysical Journal Supplement Series, Volume 214, pp.16 (2014)
- [8] Kato, C., Hirai, R. and Nagakura, H., “The sensitivity of presupernova neutrinos to stellar evolution models” , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Vol 496, Issue 3, pp.3961 (2020)