

平成 31 年 4 月 19 日

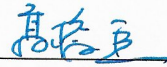
海外特別研究員最終報告書

独立行政法人 日本学術振興会 理事長 殿

採用年度 平成 29 年度

受付番号 122

氏 名 高橋 亘



(氏名は必ず自署すること)

海外特別研究員としての派遣期間を終了しましたので、下記のとおり報告いたします。

なお、下記及び別紙記載の内容については相違ありません。

記

1. 用務地（派遣先国名）用務地： ボン大学 （国名： ドイツ ）
2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと変わらないように記載すること。
連星進化計算で探る連星系由来突発天体の多様性の理解
3. 派遣期間：平成 29 年 4 月 1 日 ～ 平成 31 年 3 月 31 日
4. 受入機関名及び部局名
Argelander Institute for Astronomy, University of Bonn
5. 所期の目的の遂行状況及び成果…書式任意 **書式任意 (A4 判相当 3 ページ以上、英語で記入も可)**
(研究・調査実施状況及びその成果の発表・関係学会への参加状況等)
(注)「6. 研究発表」以降については様式 10-別紙 1～4 に記入の上、併せて提出すること。

1. 磁気回転星の恒星進化コード開発

派遣期間を通じてもっとも集中して行った研究が「磁気回転星の恒星進化」の理論研究である。磁場は、理論的には、恒星質量、金属量、自転運動に次ぐ、恒星進化に影響しうる第四のパラメータとして注目されてきた量であり、実際に様々な種類の恒星がその表面に強力な磁場を保持していることが観測で確認されてきたユビキタスな量でもある。しかしながら、これまで恒星内部に存在する磁場が恒星進化にどのように影響するのかについて、系統的な研究はまったくなされてこなかった。この問題の大きな理由は、その構造や時間進化を記述するための信頼できる方法が考案されてこなかったためである。私の中心的な研究課題は連星系における大質量星進化過程の解明であるが、その構成要素として単独星進化の理解が不可欠なのは当然であり、そのうえでこれまで本質的に理解が乏しかった分野として磁場による恒星進化への影響を解明することが重要だと考え、その研究を行うことにした。

理論計算に磁場の影響を含めるために必要なのは、恒星内部の磁場の構造進化を星が進化する長期のタイムスケールで追うことができるスキームの開発である。通常よく行われる磁気流体計算 (computational MHD) を用いた場合、磁気流体の流れのタイムスケールに注目してしまうために、ときに一億年以上にもなる恒星の進化過程をシミュレートするのは計算時間がまったく足りなくなってしまう。実は、このタイムスケール問題は磁場のない流体計算で星をシミュレートする際も同様に存在し、その場合には恒星内部の流れを無視し、「球対称の仮定をおいた恒星」の「平衡形状」を計算するというアイデアによって問題の解決が図られている。今回我々も、「恒星内部磁場の構造を単純化」し、平衡形状を持ちうる時間進化式を考案することで長期のタイムスケールで構造を変える磁場の描像を得、磁場を含んだ場合でもタイムスケールの問題を解決できる手法を考案した。

具体的な手法の要点は以下の3点である。

1. 磁場の構造を軸対称・磁気双極子の緯度方向依存性を持つと仮定し、二種類の半径依存性を持つ関数 $A(r)$ (ポロイダル磁場のベクトルポテンシャル成分) $B(r)$ (トロイダル磁場の成分) で記述できるようにした。
2. 平均場 MHD ダイナモ方程式に則り、三次元空間での時間進化の基礎方程式を定式化した。
3. Alfvén の定理を用いて、もともと三次元空間で定義された基礎方程式を一次元平均化した。

これらにより恒星進化の長期タイムスケールでの磁場発展を計算することが可能となった。実際、この定式化に基づき新規開発した磁気回転星恒星進化コードによるシミュレーションでは a) 磁力線フラックスが保存すること b) 乱流の存在領域では磁気散逸がおきることを確認することができた (図1)。

磁場が恒星進化に与える影響のなかでも重要視されているのが、磁気ストレスによる恒星内部の角運動量分配である。自転運動が恒星進化に与える影響については過去にさまざまな先行研究が行われており、特に自転運動が駆動する乱流が星内部の化学組成分布を変化させる影響が重要であることが知られてきた。一方で、現状の自転星進化理論には星震学に基づいた星内部の自転速度分布推定を再現できない問題があり、その問題の解決案として有力な案のひとつが磁気ストレスによる角運動量輸送なのである。これまでは星全体にわたって磁場の構造を記述できる手法が知られていなかったために、磁気ストレスの見積もりにも大きな不定性が伴っていた。その点で、我々の手法では磁場の構造進化を詳細に記述できるために、本質的により優れた磁気ストレスの評価が可能となった。

まず我々は、MHD 近似のもとでは Lorentz 力が磁気ストレスに一致するという性質をもとに、角運動量保存を満たす

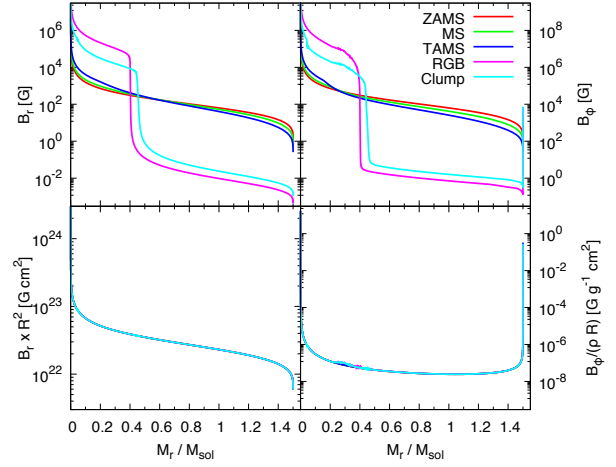


図 1: 太陽の 1.5 倍の質量をもつ恒星の進化に伴う半径方向の磁場 (左上) および経度方向の磁場 (右上) の散逸のない場合の分布変化。密度の変化に伴って磁場の強さはおおきく変化するが、それぞれ磁気フラックス (左下、右下) は一定値に保たれている。

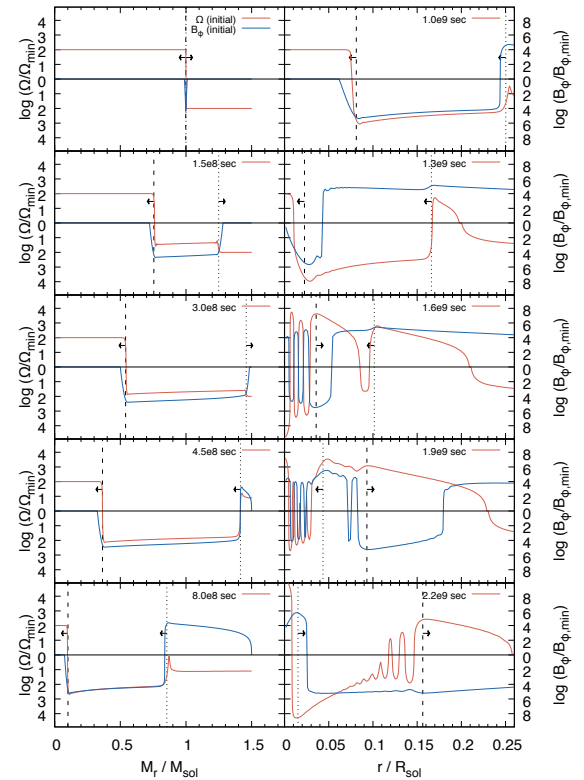


図 2: 恒星内部を伝播する磁気-回転波。

磁気ストレスによる角運動量輸送の一次元定式化を行った。そして、磁場進化の式とあわせてとくことにより、星内部を伝播する磁気-自転波の解が存在することを発見した（図2）。これは、これまで仮定されてきた「差動回転がある領域では磁気ストレスは差動回転の大きさに比例し、角運動量輸送は拡散的になる」という描像を否定するだけでなく、「角運動量をもつ波が星の内部で散逸しながら伝播することで強力な角運動量輸送を行う」という新しい描像をもたらす、画期的な発見である。さらに、磁気ストレスを含めた恒星進化計算によって、これまで再現例のなかった赤色巨星のコアの自転速度を説明できることまで示した。

これまでの成果をまとめると、

1. 実用的な恒星磁場の取り扱い手法を開発した。
2. 恒星内部を伝播する磁気-自転波の解を発見した。
3. 磁気回転恒星進化計算を行ない赤色巨星コアの自転速度を説明した。

となる。成果の発表は、いくつかの国際会議での口頭発表及び、現在執筆中の論文により行う。この磁気回転星計算は、従来行われてきたすべての恒星進化計算に適用可能であり、その応用例は非常に幅広い。私の中心的課題である連星系における大質量星進化過程に適用するために、まずは単独大質量星への応用を行うことを計画している。

2. 電子捕獲型超新星爆発における燃焼波面伝播メカニズムの研究

進化の最終局面に重力崩壊をおこす超新星爆発を引き起こす恒星を大質量星とよぶが、そのなかでも最も軽い星が引き起こす超新星は電子捕獲型超新星爆発とよばれる。通常の重力崩壊型超新星の親星は鉄でできた中心コアを形成するが、電子捕獲型超新星の親星の場合は主に酸素とネオンでできたコアが形成される。酸素やネオンは鉄と比べて小さな結合エネルギーをもつ原子核であるため、重力崩壊をおこす直前には酸素-ネオンからより安定な鉄への相転移が起きるのだが、その際に巨大な熱が発生する。この熱がコアの温度を上げ、さらなる核反応を引き起こすので、電子捕獲型超新星爆発の直前にはコアの中心から外側にかけて伝播する燃焼波が発達する。

酸素-ネオンコアが爆発するまでの進化に対して、燃焼波面の伝播は非常に重要な効果をもつ。核反応による発熱でコアが膨張する一方で、燃焼後の鉄族組成では急速な電子捕獲反応がおき、電子密度の減少およびニュートリノ放射によるエネルギー減少が圧力を低下させる。前者の効果が卓越する場合、酸素-ネオンコアは熱核反応による爆発を起こすが、後者が卓越する場合には重力崩壊する。どちらの効果がより重要かを決定するには、核反応とその発熱、電子捕獲反応とニュートリノによる冷却効果を考慮した、詳細なシミュレーションが必要になる。

今回我々は、電子捕獲反応によって生じたニュートリノが周囲のコア物質と二次的に起こす反応に注目し、酸素-ネオンコアの崩壊直前から爆発するまでのシミュレーションを行った。これまでの研究では酸素-ネオンコアで生じるニュートリノ反応はその反応断面積が小さいことから見逃されてきたのだが、電子捕獲型超新星爆発の際の急速な電子捕獲反応によるニュートリノ光度は非常に大きく、中性子星と比べると非常に低密度な酸素-ネオンコアであってもニュートリノ反応が重要になる可能性があったためだ。シミュレーションの結果、従来の予測よりも10倍程度速い伝播速度が得られた。これはニュートリノ-電子散乱による発熱によって燃焼波面伝播が促進されたためであり、反応断面積が小さいといえどもニュートリノ反応を無視してはいけないことがわかった。計算の結果とその解析をまとめた論文は“The Evolution toward Electron Capture Supernovae: The Flame Propagation and the Pre-bounce Electron-Neutrino Radiation”, K. Takahashi et al., The Astrophysical Journal, 871(2019), 153 として出版された。現在はより後期のシミュレーションを行うことで、ニュートリノ反応を考慮することで超新星爆発自体にどのような影響がでるかを調査中である。

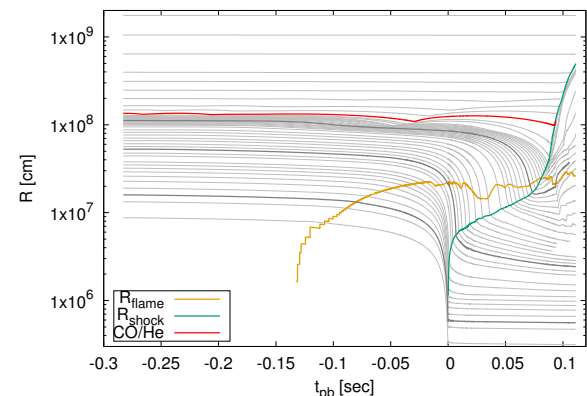


図3: 電子捕獲型超新星爆発における各質量素片の流跡線。計算開始後約0.3秒で酸素-ネオンコアは崩壊し中性子コアを形成するが、その過程でコアの内側では、酸素+ネオンの核燃焼を伴う燃焼波面が伝播していく（オレンジ線）。

3. ペア不安定型超新星爆発による元素合成の研究

太陽の約150-300倍の質量を持つ恒星は、電子陽電子対生成型超新星爆発という特異な超新星を起こすことが予想されている。そのような大質量星のコアは高エントロピーとなり、光子の一部が電子陽電子の対生成を起こすのに十分なエネルギーを持つことになる。対生成反応がおきると光子のエネルギーの一部は電子陽電子の質量に変換されるが、これにより圧力が低下する。この効果を考慮すると、高エントロピー物質は星を支えられないほど“柔らかく”なっているはずで、これにより星は重力崩壊をはじめめる。一方、この時点で大質量星コアを形成している酸素やネオンは鉄に変換される際に発熱するので、重力崩壊によって温度が上昇する結果核反応が促進され、急激なエネルギー注入がおきる。核反応による発熱によって星の崩壊は食い止められ、今度は逆に反転し、爆発がおきる。このような爆発を電子陽電子対生成型超新星爆発とよぶ。爆発メカニズムが特異なことに起因してその放出物も特異な化学組成を持つことが知られており、我々も質量域を網羅した系統的な元素合成計算をおこなってきた（Takahashi et al. 2018）。

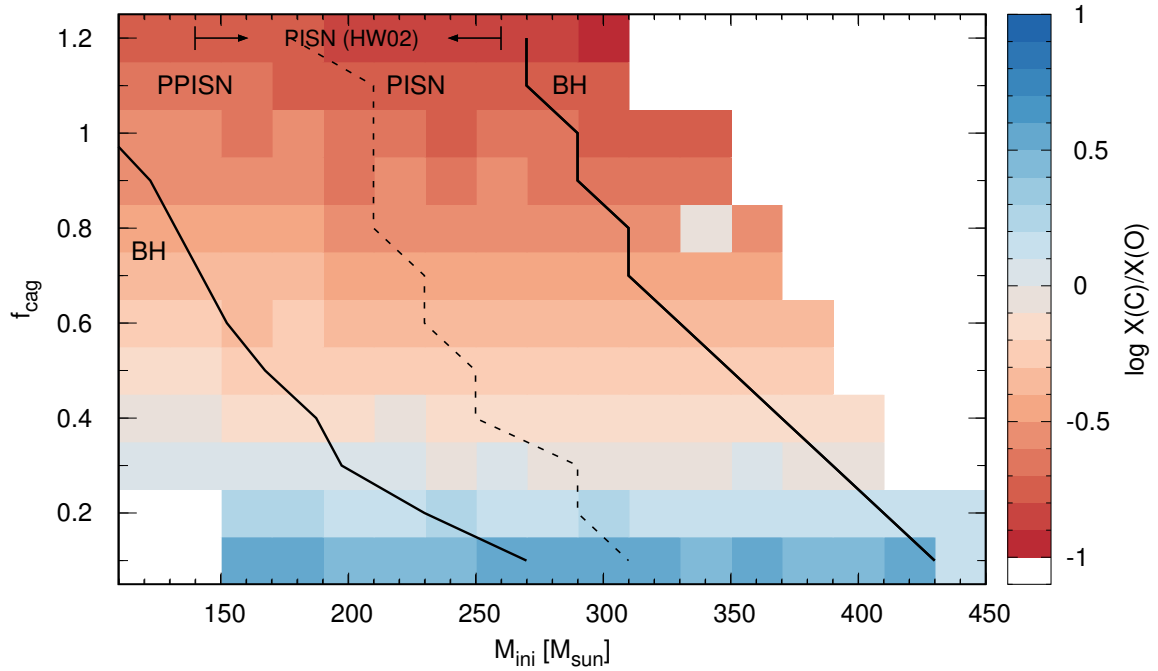


図 4: 進化の最終局面を、星質量（横軸）と炭素のアルファ捕獲反応率（縦軸）で分類した相図。色の違いは炭素燃焼期におけるコア内の炭素酸素比。左下および右下の領域は重力崩壊のちブラックホールが形成される領域。点線の右側に対生成型超新星となる領域が存在し、反応率が小さいほど必要な質量が大きくなっている。

メカニズムが単純なことから理論的な存在予測が信頼されてきた一方で、対生成型超新星爆発の観測的な実証は行われていない。爆発そのものの確かな観測例がなく、また特異な元素組成を示す金属欠乏星がみつからないなどの問題がある。我々は、これまで穴がないと考えられていた爆発メカニズムを再考することで、太陽の約 150-300 倍の質量を持つ大質量星にも対生成不安定をおこさない場合がある可能性を見出した。

注目したのは、炭素燃焼期における対流層生成の有無である。通常、対生成不安定を起こすような大質量星は、炭素燃焼を起こしてもその発熱がニュートリノ冷却率に及ばず対流層を発達させることがない。我々の発見は、もし仮に炭素燃焼中对流が発達することがあれば、それが星を安定化させ対生成不安定による崩壊が防がれるということだ。炭素燃焼中の対流発達例えば、これまでの想定よりもコア内の炭素量が多い場合におき、これを不定性の大きい炭素によるアルファ捕獲反応率に仮託することで、対生成不安定崩壊を避ける進化プロセスをシミュレーション上で再現した。仮にこのプロセスが実際の星でも起きていたとすると対生成型超新星に必要な質量域はさらに大きなものとなり、未だ観測されていないという珍しさを説明するかもしれない（図 4）。この成果は “The Low Detection Rate of Pair-instability Supernovae and the Effect of the Core Carbon Fraction”, K. Takahashi, the Astrophysical Journal, 863(2018), 153 にて出版され、また同内容の発表を国際会議 Nuclei in the Cosmos 2018 および General Assembly of the International Astronomical Union で行なった。