

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 2 9 年度

受付番号 5 1 4

氏 名

平井遼介

(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： オックスフォード（国名： 英国）

2. 研究課題名（和文）※研究課題名は申請時のものと違わないように記載すること。

コンパクト連星形成に向けた大質量連星系中の超新星爆発及び共通外層状態の系統的研究3. 派遣期間：平成 2 9 年 1 1 月 1 日 ～ 令和 元 年 1 0 月 3 1 日

4. 受入機関名及び部局名

オックスフォード大学・物理学科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、英語で記入也可)**

(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。

本研究の所期の目的は、コンパクト連星形成シナリオの検証である。コンパクト連星とは中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体が互いを公転しあっているような連星のことであるが、2015 年以降に初検出された重力波の起源天体として非常に注目されている。その形成の際にはいくつかの避けて通れないプロセスがあり、本研究はその中でも 2 つのプロセスに注目している。

課題①：爆風衝突効果の系統的な研究

中性子星は太陽の約 8 倍以上の質量を持つ大質量星がその進化の最期に重力崩壊型超新星爆発を起こした末に残される残骸とされている。そのため、コンパクト連星を形成するためには 2 つの大質量星が連星を組んでいた段階があり、その後に片方の星が超新星を起こすという段階が必ず存在する。連星系内で超新星が起こるとその質量損失や中性子星キックと呼ばれる現象により連星が解体する可能性があることが知られている。超新星爆風が伴星に衝突することでその解体可能性等に影響を与える可能性もある。また力学的影響だけでなく、爆風が伴星表面に熱を注入することで超新星後の伴星の見た目が大きく変わる可能性も指摘されている。しかし、この影響はこれまでほとんど研究されてきていなかった。

私はオックスフォード大学に派遣されてからの最初の半年間、この「爆風衝突効果」に関する数々の数値シミュレーションを行った。具体的には、大質量星に超新星爆風が衝突する様子の流体数値シミュレーション及びその後の長期的な進化に関する恒星進化シミュレーションを行った。流体数値シミュレーションはさらに 2 段階に分けて行った (図 1)。

第一段階では超新星爆発の爆風の構造を探るため、球対称を仮定した1次元流体シミュレーションを4例行った。2種類の星に対して2種類の爆発エネルギーを仮定し、中心にエネルギーを注入するいわゆる”Thermal bomb”と呼ばれる手法で超新星爆発を再現する。エネルギーを注入することで中心から外向きに伝搬する衝撃波が形成され、やがて表面を突き破る。その後爆風はしばらくほぼ一様に自己相似的な膨張を示すことがわかった。つまり、ある時点での爆風の密度分布や速度分布を与えれば任意の他の時間での分布も自己相似性から計算できるのである。この性質を次の段階のシミュレーションに活用した。

第二段階では軸対称を仮定し、第一段階で得られた爆風が伴星に与える様子を2次元円筒座標上でシミュレーションした。この際、伴星の質量や年齢、主星と伴星の間の距離、使用する爆風モデルなどを様々に変え、広いパラメータ空間内で大規模な系統的調査を行った。先行研究でも似たようなシミュレーションは数例行われてきたが、伴星質量が3太陽質量程度と小さいものしか行われておらず、また伴星の構造も一通りしか扱っていない。そしてどの結果も伴星の構造に強く依存することはわかったものの、どう依存しているかまでは探れずに終わっている。今回の私の研究では伴星の年齢を変えた計算を行うことで構造依存性も探ることが一つの目的であった。星の構造が結果にどう影響を与えるかを物理的に理解することで任意の星への爆風衝突効果も理解することができはすである。

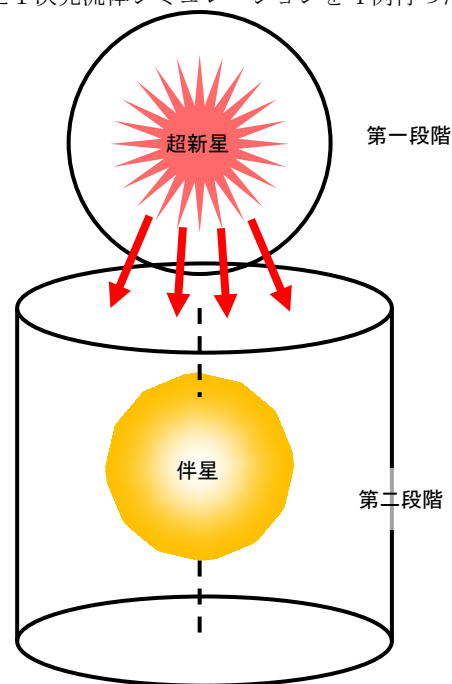


図 1 爆風衝突効果シミュレーションの手法模式図

このシミュレーションのスナップショットをいくつか図 2 に示してある。爆風が伴星に衝突し、弧状衝撃波が立つ様子が見られる。そして爆風が通り過ぎた後には伴星の表面が膨張を始めることがわかった。このようなシミュレーションを、パラメータを変えて約400通り行った。それぞれのモデルに対して伴星から剥ぎ取れた質量、伴星に与えられた運動量、降着した物質の質量などを調べた。そして、それらのパラメータ依存性を調べた。このこと自体は Ia 型超新星や一部の重力崩壊型超新星に関して先行研究でも調べられてきており、概ね似たような依存性が見られた。私はもう一歩踏み込んでこの結果を説明できるような解析的モデルの構築を目指した。解析的なアプローチは 1976 年に Wheeler らが行って以来ほとんどされてきておらず、またそのモデルは今回のシミュレーション結果とほとんど一致しないことがわかった。今回私は爆風による星の圧縮に目をつけ、それを含めた理論モデルを構築した。その結果、我々のモデルで伴星に与えられる運動量とそのパラメータ依存性を高い精度で説明することができた。これによって、今後どんな構造をもつ伴星モデルに対しても爆風が与える運動量を、シミュレーションを行わずに見積もることができる。

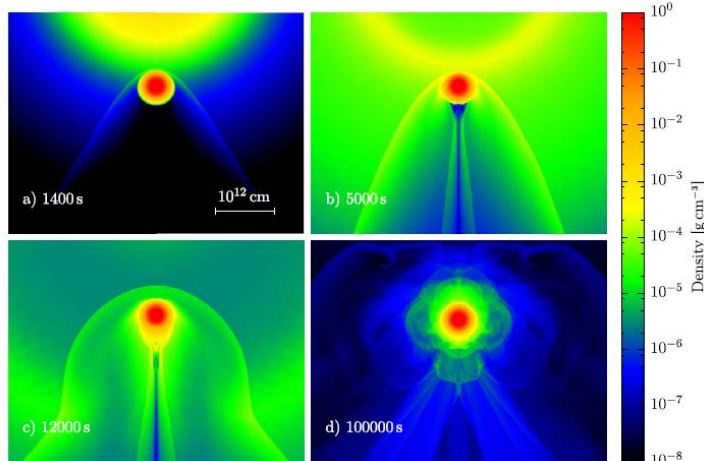


図 2 爆風衝突シミュレーションのスナップショット

上記結果を論文としてまとめて 5 月に The Astrophysical Journal に投稿し、7 月に受理された。そしてこの成果を 4 つのセミナー (Bonn 大学、Albert-Einstein Institute、Oxford 大学、Delaware 大学) 及び 2 つの研究会で発表した。また、この結果を含め自分の過去の研究を総括した解説記事を日本天文学会の天文月報に寄稿した。

また、具体的な観測例へ適用する研究も行った。Sheffield 大学の観測チームが行った SN2006jc の伴星の観測結果が通常の恒星モデルでは説明できないが爆風衝突効果によって膨張した星のモデルで良く再現できることがわかった。その観測結果及び理論的考察をまとめた論文を 10 月に Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 及び arXiv に投稿した。現在は爆風から伴星へのエネルギー注入による伴星膨張をもっと系統的に調べる研究も行っている。本研究で構築した理論モデルを様々な星の場合に適用し、超新星後の伴星の観測可能性を探っている。これは早稲田大学の小形美沙氏との共同で行っている。

課題②：大質量連星の共通外層状態流体シミュレーション

連星進化を語る上で欠かせないのが共通外層状態と呼ばれる進化段階である。共通外層状態とは、連星内の片方の星が進化の終盤を迎え膨張した際に伴星を飲み込む現象である。飲み込まれた伴星は密度の高い外層中を公転するうちに角運動量を失いどんどん中心に向かって落ち込んでいく。連星軌道から失われた角運動量やエネルギーは外層に渡される。渡されたエネルギーが十分であれば外層は吹き飛ばされ、中心には主星のコアと伴星が互いを公転しているような連星が残される。しかもその軌道長半径は共通外層状態に陥る前よりはるかに小さくなる。このようにして軌道長半径を狭めた後に主星が超新星爆発を起こせば中性子星と伴星の近接連星を作れるはずである。

上記の通り共通外層状態に関する関心は大きいものの、その詳細な物理は全くと言っていいほど知られていない。特に伴星が飲み込まれた後に中心まで落ちて主星と合体してしまうのか、合体せずに外層を吹き飛ばせるのが最大の焦点であるが、未だにそれを決める条件が何なのかは理解されていない。モデルが提唱されてから30年以上経っても未だに理解が進んでいない理由の一つとして、ダイナミカルレンジが非常に大きいことが挙げられる。主星中心部の非常に密度が高いところから外層の密度が薄い部分までで約15桁以上の開きがある。また、共通外層状態は対称性のない3次元的な現象である。これらのことから流体シミュレーションを行うことは非常に困難になる。



図3 イータカリーナを取り巻く星雲 (© ESA/NASA)

詳細な比較が可能である。これにより恒星合体の物理が理解できれば、共通外層状態の物理の理解にもつながると考えている。

恒星合体がどのような星雲の形成につながるかを調べるため、恒星合体を再現するような多次元流体シミュレーションを行った。合体のプロセスは大きく2つの段階に分けることができる。2つの星の外層が合体し、その中をそれぞれの星のコアが公転する共通外層状態、そしてその後にコア同士が潮汐破壊等を起こして合体する段階である。共通外層状態は対称性がなく極めて3次元的な問題であるが、コア合体直後には軌道エネルギーの大半は熱化されすぐに軸対称化すると考えられる。そのため、今回は計算コストを劇的に抑えられる2.5次元シミュレーションを行った。まず、星に角運動量を注入することで高速回転させ、赤道上に膨張した外層を再現した(図4-1)。その中心部でコアが潮汐破壊されたと仮定し、コア連星が持つ角運動量及びエネルギーを瞬時に注入してエネルギー開放を再現する。このエネルギーは超新星のように外向きの衝撃波を生じさせ、密度の薄い極方向から順に表面を貫き爆発現象を起こす。この爆発では超新星のように星全体が壊されるのではなく、星全体の1~2割程度の物質のみが爆風として放出された。初期の段階では期待されていた通り、双極的な爆発を起こしていたが最終的には予想よりだいぶ球対称に近い爆発となった(図4-2)。サブプロジェクトとして、注入エネルギーと爆風質量の関係を1次元シミュレーションから系統的に調べた論文を2019年5月に発表した。

合体後の星は大量の熱を持ち込まれているため非熱平衡状態になっている。そのため表面輝度も高く、非常に強い恒星風を吹かすと考えられる。また高速回転しているためその恒星風も非球対称的に放出されている。爆風の内側からこの恒星風が吹き込まれることで爆風中心部は掃き集められ、殻状になる。これによりどのような星雲が形成されるかを調べるため、爆風の内側から恒星風を注入する流体シミュレーションを行った。その結果を現在観測されている星雲の形状と比較したところ非常に良く再現できていることがわかった(図4-3)。このシミュレーションにはいくつかの仮定やフリーパラメータが存在する。そのため、観測量と詳細に比較することで合体のパラメータに制限がかけられ、恒星合体・共通外層状態に関する理解が深まるはずである。

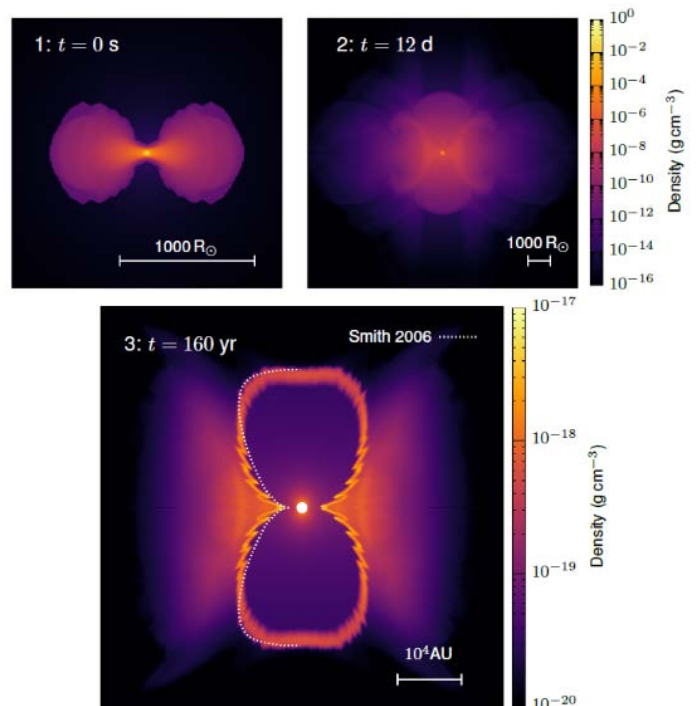


図4 恒星合体後の星雲形成シミュレーションのスナップショット

この結果を Bonn 大学の Norbert Langer 教授に報告したところ、イータカリーナに関する他の様々な観測事実を教えて頂いた。特に、人形星雲の外側に大量の物質が存在すること、そこから X 線が放出されていることから 1844 年の大爆発以前にも数百年おきに質量放出が起きていたことが恒星合体モデルにとって致命的な指摘であった。恒星合体は星の一生のうちで一度しか起きないため大爆発以前の質量放出は説明できない。

この問題を解決するため、私はイータカリーナの伴星の存在に着目した。イータカリーナ自身は現在連星であることが知られているため、もし大爆発が恒星合体によるものであるならばそれ以前は 3 体系だったはずである。不安定な 3 体系の進化により星同士が何度もニアミスをした末に合体に至ったのだとしたら、ニアミス時に質量放出を起こすことができたら過去の質量放出も説明がつく。このことを探るため、簡単な N 体シミュレーションを行った。まず様々な初期条件の下で階層的三体系の長時間進化を計算した。初期に安定だった系でも次第に不安定性が発達して合体に至り、その中でも合体前に数百年周期で星と星の間の距離が近づくものを探した。その結果、いくつかの初期条件の場合に上記の通りの進化を示すものが存在した。合体後の軌道を計算すると、観測される連星軌道と非常に近い場合もいくつかあり、このシナリオの妥当性を示すことができた。

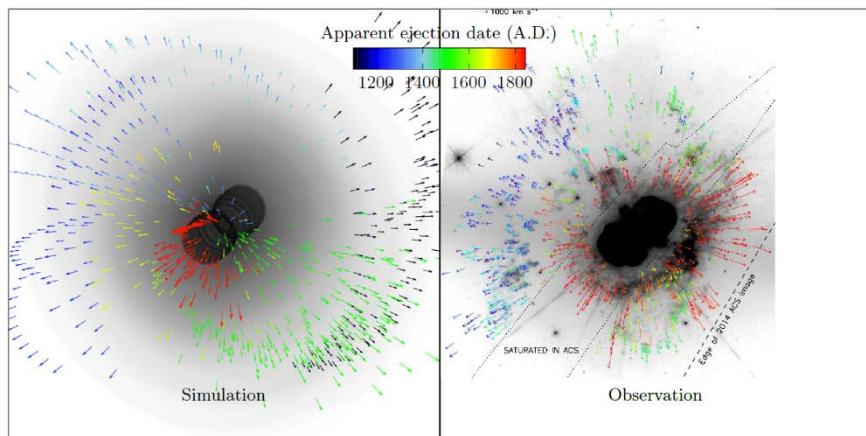


図 5 過去の質量放出による人形星雲周囲の物質分布

続いて、星同士の距離が十分に近づいたときに質量放出が起きるのか、起きた場合にどの方向に放出されるのかを調べた。具体的には連星系内の片方の星表面に試験粒子を設置し、伴星との重力相互作用によって試験粒子がどの方向に飛ばされるかをシミュレーションした。その結果、軌道離心率がある閾値を越えた場合に一部の表面粒子が約 90 度の開き角を持った一方向に飛ばされることが分かった。この結果を前述の 3 体進化計算と組み合わせることで現在人形星雲の外側にどのように物質が分布し

ているかを予言することができる。その一例を図 5 に示してあるが、定性的な特徴は非常に似通っている。

以上より、イータカリーナは不安定な大質量三重連星の進化の末、恒星合体を起こし爆発をしたというシナリオを構築した (図 6)。近年の観測により大質量星は大半が三重連星や四重連星を組んでいることが知られてきた。今回我々が構築したシナリオと同様の現象がイータカリーナに限らず多数起きていてもおかしくない。この研究により、共通外層状態及び恒星合体に関する理解が進んだだけでなく、三重連星が起こしうる様々な現象に目を向けることができた。本研究計画の所期の目的は達成できなかったが、当初の予定を大きく超える結果が得られ今後の自分の研究の幅を大きく広げることができた。上記結果をまとめた論文を既に 3 本分執筆済みであり、近日一斉に論文誌に投稿予定である。

Oxford 大学に派遣されてからの 2 年間で、私自身の大きな成長を感じている。研究に対する姿勢は英国と日本では異なるということを感じたこと、星に関する研究以外の宇宙物理学に広く触れる機会が増えたことなどが挙げられる。Oxford 大学では数多くのセミナーが開かれている他、自分も SPI-MAX という名前のセミナーを運営していた。これにより世界中のたくさんの研究者と交流する機会も劇的に増え、自分の名前を広く知ってもらえるようになった。また自分は帰国子女であるため以前から英語力は高いと自負していたが、四六時中英語しか話さない環境に漬かっていることで英語力も格段に上昇したと感じている。欧州に滞在したことで日本からは存在も知らなかったような小さな研究会にも多く足を運ぶことができた。聴講するただけに参加した研究会などでできた人脈などで共同研究につながった例もあり、海外学振の恩恵をフルに享受できたと感じている。私の人生にとってかけがえのない 2 年間で過ごさきっかけを与えてくださった日本学術振興会に大変感謝しています。

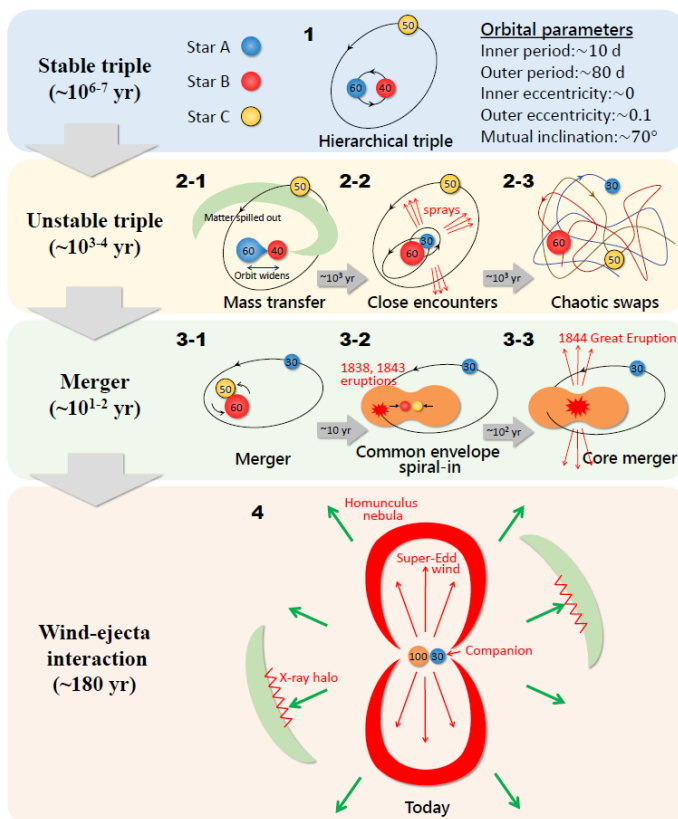


図 6 イータカリーナの恒星合体シナリオ