

jh180021-NAJ

## 中間質量ブラックホールの理解に向けた星の衝突・破壊に関する研究

谷川 衝 (東京大学)

概要 中間質量ブラックホールは巨大ブラックホール形成過程を解く鍵であるはずだが、発見例が少ない。本研究では中間質量ブラックホール形成の素過程と発見方法について研究した。中間質量ブラックホールは高密度星団内での星の暴走的な合体によって形成されたと考えられている。しかし星の合体の基準は星の半径の合計よりも近い距離に星が近づいた時に合体させるという単純なものであった。そこで我々は流体シミュレーションを行い、流体力学を考慮した合体条件を求めた。中間質量ブラックホール探索の基礎理論として、中間質量ブラックホールに潮汐破壊されている白色矮星が爆発が期待されている。我々はそもそもこの爆発が起こるのかどうかを検証した。その結果、爆発が起こることを確認した。

### 1. 共同研究に関する情報

#### (1) 共同研究を実施した拠点名

東京大学総合文化研究科  
東京大学情報基盤センター

#### (2) 共同研究分野

□ 超大規模数値計算系応用分野

#### (3) 参加研究者の役割分担

谷川 衝 : Oak-forest PACSにおける計算の実行, 解析  
三木 洋平 : 計算コードのチューニング  
山内 俊典 : Reedbush, Tsubameにおける計算コードの開発, 実行, 解析

### 2. 研究の目的と意義

本研究は中間質量ブラックホールの理解に向けた星の衝突・破壊、また星の爆発に関する研究を目的としている。中間質量ブラックホールは100から1万太陽質量程度の質量を持ったブラックホールである。100太陽質量以下は星質量ブラックホール、10万太陽質量以上は巨大ブラックホールと呼ばれている。星質量ブラックホールはX線連星や重力波などでその存在が確認されており、大質量星の最後の姿であることがわかっている。一方、巨大ブラックホールは銀河中心に普遍的に存在することは確認されているが、

その形成過程は未解明である。この原因の1つは、中間質量ブラックホールがごく一部の例外を除いてほとんど見つかっていないからである。我々は、中間質量ブラックホール形成の素過程と、実際に中間質量ブラックホールが存在する場合に発見するための基礎を研究することである。

まず素過程の研究について述べる。中間質量ブラックホールの形成過程の有力なモデルとして、高密度星団中での星の暴走的な合体というものがある。これまで、この過程は、星の流体的な性質を無視して、質点として調べられてきた。具体的に述べると、星を重力相互作用するある程度の大きさを持った点としてモデル化し、星がその大きさほど近づいた場合には合体する、という比較的シンプルなモデルを用いていた。しかし、実際には星は流体であるので、星同士が近づいた場合は、星の振動や回転などによって星の運動エネルギーが散逸する。従って、2つの星がどれくらいの速度でどの程度近づいた場合に合体するのかを流体計算で調べる必要がある。素過程の研究についてはこの合体条件について調べた。

次に中間質量ブラックホールを発見する方法の基礎的な研究について述べる。中間質量ブラックホールに限らず、ブラックホールはそれ自体では光を発しないため、なんらかの過程で光を発しなければ我々には発見できない。一般にブラックホールを発見しようときに期待することは、ブラックホールの周りに物質があり、それらの

物質がブラックホールに落ち込むことで重力エネルギーを解放し、その落ち込みつつある物質自体が高温になり光を発するということである。もちろんこれでも中間質量ブラックホールを発見することはできるはずであるが、我々は別の方法でも中間質量ブラックホールを発見できるのではないかと考え、その過程を調べた。その過程というのは、白色矮星が中間質量ブラックホールに潮汐破壊されている最中に熱核爆発を起こすということである。白色矮星の熱核爆発はIa型超新星で知られるように、非常に明るい光を発する。そのため、もし本当に白色矮星が潮汐破壊中に熱核爆発を起こすのであれば、それは中間質量ブラックホールを探すのに良いプローブとなる。我々は本当に白色矮星が中間質量ブラックホールに潮汐破壊されているときに熱核爆発を起こすのかどうかについて注意深く研究した。

本研究の意義は次のようなものである。巨大ブラックホールは銀河の中心に普遍的に存在するもので、宇宙の構成要素として重要なものである。本研究はそのような宇宙の構造形成を探るための基礎研究として大変意義深いものである。

### 3. 当拠点公募型共同研究として実施した意義

中間質量ブラックホール形成の素過程を調べる研究の場合、様々なパラメータで星の衝突を調べる必要があった。パラメータには星の質量、星の近点距離、星の状態方程式、星の間の相対速度（今回は星の質量比は1としている）など多くのものがある。このような広いパラメータ空間を掃くには、大規模なジョブ並列が必要であった。そのため、大規模なジョブ並列のできる東京大学情報基盤センターのReedbushと東京工業大学のTSUBAMEは本研究にとって最適なスーパーコンピュータであった。

中間質量ブラックホールによる潮汐破壊中の白色矮星についての研究については、超高解像度の流体シミュレーションが必要であることが、Tanikawa et al. (2017, ApJ, 839, 81)によってすでに明らかになっていた。超高解像度の流体シミュレーションを実現するためにはJCAHPCのOak-forest PACSが必須であった。

### 4. 前年度までに得られた研究成果の概要

本課題は新規課題である。

### 5. 今年度の研究成果の詳細

まず中間質量ブラックホール形成の素過程を調べた研究から述べる。これらは主に後期において結果が出ている。高密度星団では星の衝突が広いパラメータ空間で起こることが予想されるため、大規模なジョブ並列の計算を行った。扱うパラメータは以下の4つで、星の質量、星の相対速度、星の状態方程式、星の近点距離である。星の質量比は1としている。一般には異なる質量の星が衝突するが、今回は簡単のためにこのようにした。

掃いたパラメータ空間は以下のようになっている。星の質量は1, 3, 10, 30, 100太陽質量とした。星の相対速度は2つの星が無限遠にいる場合に10km/s, 20km/sとした。これは高密度星団における典型的な値である。星の状態方程式は今回は簡単のために、 $\gamma$ が5/3と7/5のポリトロップ球とした。このままでは半径が決まらないので、星の半径は上の星の質量で太陽金属量のゼロ年齢主系列星の半径と同じとした。星の近点距離は二つの星の半径の合計の1倍から2倍の間で適宜調べた。

以下に結果を述べる。全体としては星が合体するのは、二つの星の半径の合計の1倍から2倍の距離を近点通過する場合であった。ただし星の質量、星の相対速度、星の状態方程式によってその距離は異なる。3つの傾向が見られた。1つ目は、星の質量が重いほど合体する近点距離は大きくなることである（合体しやすい）。これは星の軌道エネルギーに対する星の重力エネルギーが星の質量が大きくなるほど大きくなるからである。星の重力エネルギーが大きくなるほど、近点通過した場合に、星の軌道エネルギーを吸収しやすい。2つ目は、星の相対速度が小さいほど合体する近点距離は大きくなることである。これは散逸させるべき軌道エネルギーが小さくなるからである。3つ目は、 $\gamma$ の値は大きい（または状態方程式が硬い）ほど、合体する近点距離は大きくなることである。これは状態方程式が硬いと密度が小さくても星の自己重力を支えることができるため、実効的な星の半径が大きくなるためである。

星の合体の基準のほかにも合体して残った星（合体残骸）について詳しく調べた。まず合体残骸

は同じ質量の普通の星に比べて、半径が10倍以上大きいことが明らかとなった。これは合体によって発生した熱や2つの星が持っていた軌道角運動量が転化した星の自転角運動量のおかげである。合体残骸が10倍大きいということは、合体残骸と別の星の合体する確率が10倍大きくなるということを意味する（星の断面積が100倍になるので、100倍になると思われがちであるが、重力がほかの星を引き寄せる場合には半径の2乗ではなく1乗で合体率が增加する）。

また、激しい合体は、合体残骸に重力的に束縛されていない多くの物質を放出することがわかった。このような物質を合体噴出物と呼ぶ。合体噴出物は2つの星の合計質量の10%にも及ぶ。これほどの大質量が星間空間に撒き散らされるということは、何らかの形で星の合体を観測できる可能性がある。合体噴出物が観測できるかどうかを検討することは今後の課題の1つである。また合体噴出物はもともと星の外側にあったものであった。この合体噴出物が星団の元素組成にどのように影響するのかを考えることも重要である。これも今後の課題の1つである。

この研究をまとめると、以下ようになる。星の合体の基準を明らかにし、また合体残骸は普通の星よりも10倍以上合体しやすいということがわかった。合体噴出物の質量は全質量の10%に及ぶため、星の合体の痕跡を探することができる可能性がある。

次に中間質量ブラックホールによって潮汐破壊される白色矮星の研究について述べる。これらは主に前期の間に結果が出ている。この研究は以下の2つに分けることができる。1つは中間質量ブラックホールによる潮汐破壊中に白色矮星が熱核爆発できるかどうかを検証する研究、もう1つはこれまで考えていなかった新しい爆発メカニズムを考案した研究である。

まず1つめの研究について述べる。過去の研究はいずれも潮汐破壊中の白色矮星を十分に解像できる空間分解能を持っていないかったために、偽の爆発を起こしていた。この研究ではこの偽の爆発を避けるために、空間分解能にこだわった研究を行なった。

以下にその方法を述べる。3次元シミュレーションだけではどうしても空間分解能が足りないため、途中まで3次元シミュレーションを行い、途中で3次元シミュレーションの一部を抜き出

し、1次元シミュレーションにスイッチするという方法をとった。

3次元シミュレーションの初期条件は以下の通りである。初期条件には300太陽質量の中間質量ブラックホールと0.45太陽質量のヘリウム白色矮星を用意した。この白色矮星が放物線軌道で中間質量ブラックホールに近づくように軌道を設定した。近点距離は白色矮星がぎりぎり潮汐破壊される距離より7倍近いようにした。また3次元シミュレーションには核融合反応を考慮しないSPH法を用いた。この3次元シミュレーションにも大粒子数が必要となる。大粒子数にしなければ、1次元シミュレーションにスイッチする前に偽の爆発が始まってしまうからである。

白色矮星が最も中間質量ブラックホールに近づいたとき、白色矮星は軌道と垂直方向に圧縮される。この圧縮された部分のダイナミクスが白色矮星の爆発に重要であるため、この部分のみを抜き出し、1次元シミュレーションを行った。このシミュレーションは流体力学と核融合藩王を考慮している。

我々は3次元シミュレーションと1次元シミュレーションのどちらに対しても空間分解能に対する収束性をチェックし、このような状況で白色矮星は爆発するという結果を得た。結果自体は従来の研究と同じであるが、そのプロセスは異なっていた。従来の研究では、白色矮星が最も圧縮された時にその軌道面から爆発が始まるという結果が得られていた。しかし、実際に爆発が始まるのは最も圧縮されたときではなく、圧縮から跳ね返り、そこで発生した圧力波が白色矮星の表面に達して衝撃波となったときであった。従って爆発の開始は軌道面ではなく、軌道面から外れた白色矮星の表面となる。これは核融合によって発生した爆轟波が到達したときの密度が2つの研究で異なるため、生成される元素が異なってくる可能性がある。また、白色矮星の軌道面は1つであるが、白色矮星の表面は軌道面の上下2つにある。従って、発生した爆轟波は2つあり、その2つが衝突したときはさらなる核融合が起こるため、全く異なる元素が生成される可能性すらある。今後はこのような状況での元素合成を詳しく調べていく。

次に2つめの研究について述べる。これまで調べられていたのはヘリウムのみからなる白色矮星の潮汐破壊、または炭素と酸素のみからなる白色矮星であった。しかし炭素と酸素のみから

なる白色矮星はその表面に薄いヘリウム層をもつ。ヘリウムは炭素や酸素よりも核融合をしやすい。また先に述べたように爆発は白色矮星の表面から始まる。従って、炭素と酸素のみからなる白色矮星よりもヘリウムをまとった炭素と酸素からなる白色矮星のほうが爆発しやすいはずである。この研究ではこれを検証するシミュレーションを行った。

シミュレーション方法は1つ目の研究と同じである。ただし白色矮星はヘリウムをまとった炭素と酸素からなる白色矮星である。1つめの研究と同様に3次元シミュレーションでも高空間分解能が必要であるため、スーパーコンピュータが必要であったことを強調しておく。

結果は予想通りであり、同じ軌道を取っても、全質量の5%程度のヘリウムをまとった白色矮星は爆発し、ヘリウムを持っていない白色矮星は爆発しなかった。

我々はこの爆発メカニズムをtidal double detonationと命名した。ヘリウムと炭素を元にした2つの爆轟波がからむメカニズムがdouble detonationと呼ばれており、このdouble detonationが潮汐力で励起されるため、このように命名した。

tidal double detonationは潮汐破壊中の白色矮星の爆発の確率をあげるものである。今後はこの過程も考慮した爆発率を見積もっていく。

## 6. 今年度の進捗状況と今後の展望

中間質量ブラックホール形成の素過程を調べた研究についてはすでに結果が出揃っているため、これから論文を執筆するところである。

中間質量ブラックホールによって潮汐破壊される白色矮星の研究については、すでに論文として公開されている。今後は爆発を3次元シミュレーションによって追跡し、詳細な元素合成を調べる。また新しい爆発メカニズムを考慮した爆発率を求めて、中間質量ブラックホール探査の準備をしていく。

## 7. 研究成果リスト

### (1) 学術論文

- “Tidal double detonation: a new mechanism for the thermonuclear explosion of a white dwarf induced by a tidal disruption event”, Tanikawa A., 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical

Society, 475, 67

- “High-resolution hydrodynamic simulation of tidal detonation of a helium white dwarf by an intermediate mass black hole”, Tanikawa A. 2018, Astrophysical Journal, 858, 26
- “Tidal disruption of a white dwarf by a black hole: the diversity of nucleosynthesis, explosion energy, and the fate of debris streams”, Kawana K., Tanikawa A., Yoshida N. 2018, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 477, 3449
- “Fortran interface layer of the framework for developing particle simulator FDPS”, Namekata D., Iwasawa M., Nitadori K., Tanikawa A., Muranushi T., Wang L., Hosono N., Nomura K., Makino J. 2018, Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, 70
- “Three-Dimensional Simulation of Double-Detonations in the Double-Degenerate Model for Type Ia Supernovae and Interaction of Ejecta with a Surviving White Dwarf Companion”, Tanikawa A., Nomoto K., Nakasato N. 2018, Astrophysical Journal, 868, 90

### (2) 国際会議プロシーディングス

### (3) 国際会議発表

- “Numerical Study of Thermonuclear Explosion of White Dwarfs Induced by Tidal Disruption Events”, Tanikawa A., 15th Marcel Grossmann Meeting, Jul. 6 2018, Roma, Italy
- “Tidal disruption events of white dwarfs: a clue to search for intermediate mass black holes”, Tanikawa A., 21st European White Dwarf Workshop, Jul. 24 2018, Austin, Texas, USA
- “Numerical Study of White Dwarf Thermonuclear Explosions induced by tidal Disruption Events”, Tanikawa A., The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Oct. 22 2018, Tainan, Taiwan
- “Large-scale parameter search of stellar merger simulations for refinement of intermediate mass black holes formation model”, Yamauchi T., The 8th East Asian Numerical Astrophysics Meeting, Oct. 22 2018, Tainan, Taiwan
- “Three-dimensional simulations of double detonations in double-degenerate systems for type Ia supernovae”, Tanikawa A., 10th DTA symposium “Stellar deaths and their diversity”, Jan. 21 2019, Mitaka, Japan

### (4) 国内会議発表

- “中間質量ブラックホールによる白色矮星の潮汐破壊と熱核爆発”, 谷川衝, 高エネルギー宇

宇宙物理学研究会2018, 2018年9月5日, 東京

- “中間質量ブラックホール形成モデルの精緻化に向けた恒星合体計算”, 山内俊典, 日本天文学会2018年秋季年会, 2018年9月21日, 兵庫県立大学, 姫路
- “連星白色矮星でのダブルデトネーションの3次元流体計算とIa型超新星”, 谷川衝, 日本天文学会2019年春季年会, 2019年3月16日, 法政大学, 小金井

(5) その他（特許, プレス発表, 著書等）