

## Ia型超新星と高密度星団系の力学に関する数値研究

### Numerical studies of dense stellar clusters and type Ia supernovae

谷川 衝

東京大学総合文化研究科

#### 1. 研究目的

宇宙は静的なものではなく、ときに動的な挙動を示す。その代表例が超新星のような爆発現象であり、数日から数十日の間に何桁もの幅で明るさが増減する。このような爆発現象の解明は天文学における大きなテーマの一つである。本プロジェクトでは、そのような現象の1つであるIa型超新星と、高密度星団のような特殊な場所で起こりうる爆発現象に関する研究を行った。まずそれぞれの動機について記述する。

Ia型超新星は宇宙で最も明るくかつ頻繁に起こる爆発現象の1つである。Ia型超新星は宇宙の距離指標となっており、様々なタイプの爆発現象の中でも特に重要度が高い。それにもかかわらず、その親星は明らかになっていない。本プロジェクトでは、近年有望な親星モデルとなりつつあるDynamically Driven Double Degenerate Double Detonation (D6モデル)と呼ばれるモデルの検証を行なっている。過去のプロジェクトで行ったシミュレーションでは、D6モデルの爆発噴出物がIa型超新星から示唆されるものと大きく矛盾しないことを明らかにした。しかし、爆発噴出物の形状が非対称性を持つことには疑問が残った。Ia型超新星の超新星残骸は球対称に近い。一方、シミュレーションで得られた爆発噴出物が超新星残骸となった場合、Ia型超新星残骸のようになる球対称に近い形になるかどうか自明でない。本プロジェクトでは、過去のシミュレーションで得られた爆発噴出物の進化をさらに進めて超新星残骸まで追い、観測されるIa型超新星残骸と同様になるかどうかを確かめることとなった。

高密度星団のような天体では、恒星の衝突が頻繁に起こる。恒星の衝突では高密度星団の外では見られない現象であり、高密度星団特有の現象である。このような恒星の衝突が何度も起こると、中間質量ブラックホールと呼ばれる100から1万太陽質量程度のブラックホールの種となる超大質量星を形成しうる。さらに中間質量ブラックホールが形成された場合、中間質量ブラックホールがさらに周りの恒星を飲み込む過程で、大きな重力エネルギーを解放して、明るく輝く爆発現象が起こる。本プロジェクトでは、まずこのような爆発現象を起こしうる中間質量ブラックホールがどのような高密度星団において形成されるかについて研究した。

#### 2. 研究成果の内容

我々はTanikawa et al. (2018, ApJ, 868, 90)とTanikawa et al. (2019, ApJ, 885, 103)のシミュレーション結果を初期条件として、さらに1万年にわたる流体シミュレーションを行った(初期条件となったシミュレーション結果はOakforest-PACSによって得られた)。近傍にあるIa型超新星残骸であるティコの超新星残骸やケプラーの超新星残骸の年齢は500年程度なので、500年経った段階でのシミュレーション結果の特徴について記述する。その特徴は、初期条件における非対称性が残ったものであった。これはD6モデルが通常想定されているIa型超

新星残骸とは異なる特徴を持つことを示している。

我々は銀河中心のような高密度星団における恒星の衝突過程についてシミュレーションを行った。このシミュレーションにおいて、1万3千年の間に280回の恒星の衝突が起これり、それらがすべて1つの恒星に収束した。これは銀河中心において中間質量ブラックホールが形成されることが有望なことを示している。

### 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

Ia型超新星残骸のシミュレーションは、Ia型超新星シミュレーションのデータを初期条件としている。このシミュレーションには超高解像度が必要だったため、Oakforest-PACSのようなスーパーコンピュータが必要であった。

高密度星団の計算は多くの恒星を重力N体シミュレーションで追跡する必要がある。これにはCygnusのようにGPUを搭載したスーパーコンピュータが必要であった。

### 4. 今後の展望

Ia型超新星残骸の計算は、D6モデルが非対称な超新星残骸を生むことを強く示唆する。ただしこれは質量密度で見た場合である。実際の超新星残骸はX線によって観測されているため、X線光度に変換した場合にこの非対称性が残るかどうかは自明ではない。今後はX線の輻射輸送計算を行うことによって、D6モデルがIa型超新星モデルとして妥当かどうかを検証する。

高密度星団の計算は、非常に短時間に多くの恒星が衝突する可能性があることを示した。これは中間質量ブラックホールの種となり、さらにその中間質量ブラックホールは他の星を飲み込む過程で光り輝く可能性がある。今後はこのシミュレーションをさらに追跡して、中間質量ブラックホールが光り輝く現象がどの程度起これりうるかを調べていく。

### 5. 成果発表

#### (1) 学術論文

- “Can Population III stars be major origins of both merging binary black holes and extremely metal poor stars?”, Tanikawa A., Chiaki G., Kinugawa T., Suwa Y., Tominaga N. 2022, arXiv:2202.00230, PASJ accepted
- “Merger rate density of binary black holes through isolated Population I, II, III and extremely metal-poor binary star evolution”, Tanikawa A., Yoshida T., Kinugawa T., Trani A. A., Hosokawa T., Susa H., Omukai K. 2022, ApJ, 926, 83
- “Population III Binary Black Holes: Effects of Convective Overshooting on Formation of GW190521”, Tanikawa A., Kinugawa T., Yoshida T., Hijikawa K., Umeda H. 2021, MNRAS, 505, 2170
- “The double detonation of a double degenerate system, from type Ia supernova explosion to its supernova remnant”, Ferrand G., Tanikawa A., Warren D. C., Nagataki S., Safi-Harb S., Decourchelle A., 2022, arXiv:2202.04268, ApJ, accepted
- “Detectability of Black Hole Binaries with Gaia: Dependence on Binary Evolution Models”, Shikauchi M., Tanikawa A., Kawanaka N. 2022, ApJ, 928, 13
- “Compact Object Mergers in Hierarchical Triples from Low-Mass Young Star Clusters”, Trani A. A., Rastello S., Di Carlo U. N., Santoliquido F., Tanikawa A., Mapelli M. 2022, MNRAS, 511, 1362
- “The impact of primordial binary on the dynamical evolution of intermediate massive star clusters”, Wang L., Tanikawa A., Fujii M. S. 2022, MNRAS, 509, 4713
- “On the population III binary black hole mergers beyond the pair-instability mass gap”, Hijikawa K., Tanikawa A., Kinugawa T., Yoshida T., Umeda H. 2021, MNRAS letters, 505, 69

- “Impact of initial mass functions on the dynamical channel of gravitational wave sources”, Wang L., Fujii M. S., Tanikawa A. 2021, MNRAS, 504, 5778
- (2) 学会発表
- “Formation of merging binary black holes from isolated binary stars with all metallicities”, Genesis: Group A Area Workshop 2022, Jan. 24 2022, online
  - “Importance of Convective Overshoot for GW190521 formation from Population III binary stars”, Exploring the Black Hole Mass Gap, 16th Marcel Grossmann Meeting, Jul. 8 2021, Rome, Italy (online)
  - “孤立連星から形成される連星ブラックホールと初代星の重要性”, 初代星・初代銀河研究会2021, Feb. 16 2022, 東京(丸の内)
  - “全金属量の孤立連星から形成される連星ブラックホールの性質の数値研究”, 連星系変光星研究会, Jan. 30 2022, 鹿児島
  - “全金属量の孤立連星から形成される連星ブラックホールの性質の数値研究”, 理論懇シンポジウム, Dec. 24 2021, オンライン
  - “Rate density of tidal disruption events of white dwarfs in the local universe”, 日本天文学会2021年秋季年会, Sep. 15 2021, オンライン
  - “Binary black hole mergers”, J-Gem Kick-off workshop, Jul. 2 2021, オンライン
  - “Numerical study of the origin of merging binary black holes”, JpGU 2021: M-GI135 「計算科学が拓く宇宙の構造形成・進化から惑星表層環境変動まで」, Jun. 4 2021, オンライン
- (3) その他

使用計算機	使用計算機に○	配分リソース*	
		当初配分	追加配分
Cygnus	○	50,000	0
Oakforest-PACS	○	300,000	0
※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。			