

コンパクト天体の衝突・合体現象

久徳 浩太郎

2023年10月31日

1 重力波天文学と多粒子天文学

一般相対論が予言する「時空の歪みの波」である重力波は、大質量の物質が高速で運動したときに放射され、天文学においては従来の電磁波観測では見られなかった宇宙の新たな側面を探るための道具となる。ブラックホールや中性子星など大質量星が燃え尽きた後に残るいわゆる「コンパクト天体」は、太陽やそれ以上の質量を持ちながら半径が10 km程度と小さく、それらが成す連星は非常に近い軌道を速く動けるため強力な重力波源となる。事実、アメリカのLIGOを中心に2015年以降、ブラックホールや中性子星の連星が合体する際に放射される重力波が、多数検出されている [LVK Collaboration, arXiv:2111.03606]。中でも連星中性子星の合体 GW170817 では付随してガンマ線バーストやキロノヴァなどの電磁波放射も同時に検出され、多粒子天文学あるいはマルチメッセンジャー天文学の嚆矢となった [Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 119, 161101 (2017)]。

2 連星中性子星の合体

連星中性子星は、重力波の放射を通じてエネルギーを失うことにより連星間距離を縮め、いずれ合体に至る*1。合体後の運命は系の全質量など連星のパラメータに左右されるが、大質量の中性子星が過渡的に形成された後に、角運動量をさらに重力波で放出したり、あるいは流体的・磁気流体的相互作用によって中心部から外層に渡すことにより、最終的にはブラックホールに崩壊する場合が典型的と考えられている。合体後に残る天体は宇宙最大の爆発ガンマ線バースト（のうちショートと呼ばれるもの）を駆動すると期待されると同時に、合体時および合体後には次節で述べるように物質を外部に放出して r 過程元素の放射性崩壊に伴うキロノヴァを引き起こす。我々の身の回りに存在する元素の起源として、どのような天体現象で r 過程元素が合成されたかは広く注目されており、重力波を交えた多粒子天文学の観測的・理論的研究はその解明に大きな役割を負っている。

連星中性子星の合体は流体力学もさることながら一般相対論的な強重力を伴う現象であるため、定量的な理論研究には数値シミュレーションが必須である。Newton 重力で記述できる自己重力系の計算では Poisson 方程式 $\nabla^2\Phi = 4\pi G\rho$ を解いて重力ポテンシャルを用いるが、一般相対論を近似なしに扱う場合は Einstein 方程式 $G_{ab} = (8\pi G/c^4)T_{ab}$ を解く必要がある（記号の意味は省略する）、よく使われる定式化では多数の時間発展方程式を解くこととなる。このような数値計算手法は数値相対論と呼ばれ、近年では磁気流体やニュートリノ

*1 軌道離心率は重力波の放射によって速やかに失われるため、合体直前はほぼ円軌道と考えられる。

放射輸送も取り入れた計算が進み、現実的な質量放出の計算に活躍している。数値相対論の定式化のまとめとしては、例えば Kyutoku et al., *Living Rev. Relativity* 24, 5 (2021) の Appendixなどを参照されたい。

3 連星中性子星からの質量放出

連星中性子星が合体すると、力学的・流体力学的な相互作用や、また合体後に残された天体内での磁場やニュートリノなどが引き起こす活動性により、太陽質量の1%–10%程度の物質が系から放出されうる*2。この物質は元々の中性子星の性質を反映して陽子よりも中性子を多く含んでおり、膨張の間に金やプラチナ、レアアースなど中性子過剰な重い原子核、いわゆる r 過程元素へと合成される [例として Wanajo et al., *Astrophys. J. Lett.* 789, L39 (2014)]。これらはさらに合成されてから安定核に落ち着くまでの放射性崩壊で自らを加熱するため、赤外線や可視光で一週間ほど増光するキロノヴァを起こし、特に GW170817 に付随して AT 2017gfo が観測された [Abbott et al. *Astrophys. J. Lett.* 848, L12 (2017)]。

力学的質量放出は、星の衝突に付随する衝撃波に駆動される過程、連星間の潮汐相互作用に駆動される過程、の2種類に大きく分けられる [例として Hotokezaka et al., *Phys. Rev. D* 87, 024001 (2013)]。惑星科学における天体の衝突現象と類似性があるのは主に前者であろう。例えば天文学では、星表面の少し内側で爆発が起こったとき、星表面に対して斜めに伝播する衝撃波のブレイクアウト現象が、突発天体現象に関連してしばしば興味を集めている [Linial and Sari, *Phys. Fluids* 31, 097102 (2019)]。これらの研究の中では、Shoemaker-Levi 第9彗星の木星への衝突との類似性も指摘されている [Yalinewich and Matzner, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* 490, 312-318 (2019)]。惑星科学に比べると、天文学では精密観測や実験によって確固たる知見が得られる場合は極めて限定的であり、今後もこれらの話題を通じて天文学と惑星科学との協調が進むことを期待したい。

*2 正確な数値は連星のパラメータに依存し、この範囲に限られるわけではない。