

成果報告書

課題名：連星中性子星の合体の一般相対論的シミュレーション

グループ nms01、代表者 柴田 大

昨年度に完成させたアインシュタイン方程式と一般相対論的流体方程式のカップルした方程式系を解くコード、及び連星中性子星の合体の現実的初期条件を与えるコードを用いて、連星中性子星の合体の完全に一般相対論的かつ現実的シミュレーションを実行した。研究の初期段階でもあり、状態方程式は簡単のためにポリトロップ $P = K\rho^{1+1/n}$ を用いて初期条件を与え、その後の進化は $P = \rho\varepsilon/n$ の形を用いた。 (P, ρ, ε) は、圧力、静止質量密度、比内部エネルギー密度を表わす。) 中性子星の硬い状態方程式を近似的に与えるために、 $n = 2/3, 4/5, 1, 5/4$ とした。連星の2つの星の質量は等しいと仮定し、また速度場は渦度ゼロとした。中性子星の質量(またはコンパクトさ)を変えながらシミュレーションは各々の n に対して3, 4モデルほど実行し、合体直後にブラックホールが生じる条件、ブラックホールが形成した場合にはその周りにディスクが出来るか否か、重力波の波形の特徴などに着目して解析を行った。

シミュレーションは、Cartesian 座標を用いて実行し、また赤道面に対しての面对称性を仮定した。典型的なグリッド数は、 (x, y, z) に対して $(293, 293, 147)$ である。この場合のメモリーは約21ギガバイト、また典型的なシミュレーションは1モデル当り約10000タイムステップ、100CPU時間程度で終了する。割り当てられた時間は450CPU時間であったが、今年度はnaoscの空きの時間が多かったために、合計で10モデルほどのシミュレーションが実行できた。

得られた興味深い結果は以下のようである。

- 個々の中性子星の半径を R 、重力質量を M とすると、そのコンパクトさ GM/Rc^2 が約 $0.14 - 0.15$ 以下の中性子星同士が合体するとブラックホールにならずに、重い差動回転した中性子星が生じる。この閾値よりも重い場合はブラックホールが合体後ダイナミカルタイムスケールで生じる。またこの閾値は、我々が考えた範囲では状態方程式によってあまり変わらない。現実的な中性子星は、コンパクトさがおよそ $0.14 - 0.21$ の範囲にあると考えられるので、状態方程式が比較的硬く、コンパクトさが比較的小さい中性子星が合体した場合には、ブラックホールは瞬時には生じず、代わりに重い中性子星が形成するかもしれない。もっとも、このように重く差動回転する中性子星は、磁気双極子放射によって回転エネルギーを失ったり、またMagnetic brakingや磁気流体不安定性によって内側の角運動量を外側に輸送した結果、最終的にはブラックホールへと重力崩壊すると考えられる。しかしながら、このような散逸のタイムスケールはダイナミカルタイムスケールよりは十分に長いので、しばらくの間は中性子星の状態を保つ。
- 合体した後に中性子星が生じる場合には、その非軸対称振動によって準周期的な重力波が放出される。この重力波は、 $2 - 3\text{kHz}$ 辺りに特徴的なピークを作ると考えられる。
- 等質量の連星が合体してブラックホールが直接形成した場合には、その周りにディスクはほとんどできない。この結果は、状態方程式によらない。