

連星中性子星の合体と重力波の放射

新潟大学理学部 大原謙一

一般相対論の数値シミュレーションコードを用いて、連星中性子星の合体の数値シミュレーションを実行し、その際に放射される重力波について調べた。まず、シミュレーションコードに残っていたいくつかの不安定性を取り除くため、コードの改良を行った。特に、数値境界での重力波の反射を押さえるために、差分かの方法などを修正した。それでも数値境界が中心の星からかなり近くにある場合には問題が残ることが明らかになった。そこで、グリッドサイズを x, y, z 各方向に約 1.5 倍としてみたところ、問題がなくなった。さらに、時間発展方程式と楕円型方程式を解く部分のチューニングを進めて、計算時間の短縮に勤めた。これにより、グリッドサイズとして約 $500 \times 500 \times 250$ を使い、適切な計算時間でシミュレーションの実行が可能となった。具体的には、(1) 計量テンソルの時間発展方程式の数値解法に CIP 法を適用する。一般相対論的流体力学方程式の解法には、van Leer のスキーム+TVD 法を用いる。(2) 数値境界における境界条件として波動条件を適用するとともに、数値境界を十分外に持っていくことにより、数値境界における重力波の反射を押さえる。(3) 座標条件としては、時間座標に対して maximal slicing 条件、空間座標に対しては、pseudo-minimal distortion 条件を用いる。これらは、いずれも複雑な楕円型方程式を導くが、その解法には、Neumann 型の前処理付きの共役勾配法を用いる。(4) メトリックの発展方程式に必要な Ricci テンソルの計算では、pseudo-minimal distortion 条件を利用して空間メトリックの 2 階微分をうま処理することが、コードの安定性には非常に重要である。(5) 上記の方法はいずれも、ベクトル化、並列化が可能で、非常に効率良いプログラミングができる。

実際のシミュレーションは、デカルト座標で、 $475 \times 475 \times 238$ のグリッドサイズで行った。必要な CPU 時間は、1 つのパラメータセットあたり VPP5000 の 32 ノードを使い、約 100 時間であった。

maximal slicing 条件を用いると、放射される重力波の取り出しは単純ではなくなるが、そのためにケージ不変な重力波抽出法を用いた。ここでは、バックグラウンドとしてシュバルツシルド時空を仮定したが、十分良い精度で重力波を取り出すことができた。

$1.5M_{\odot}$ の二つの中性子星連星の合体の x - y 平面での密度分布の変化を図 1 に、また、その際に放射される重力波の波形を図 2 に示す。

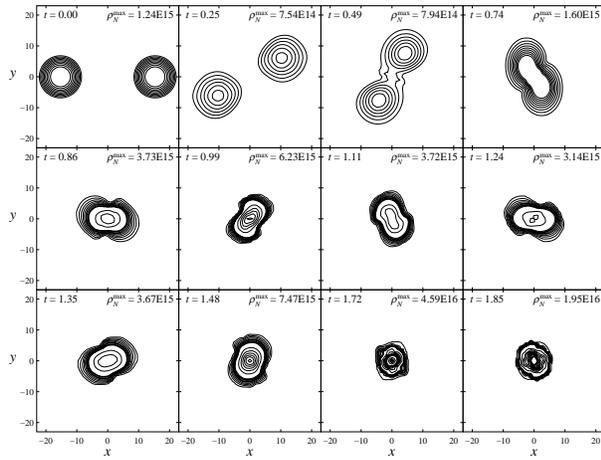


図 1: Density ρ_N on the x - y plane. Time t in units of milliseconds and the maximum of density ρ_N at each time are shown.

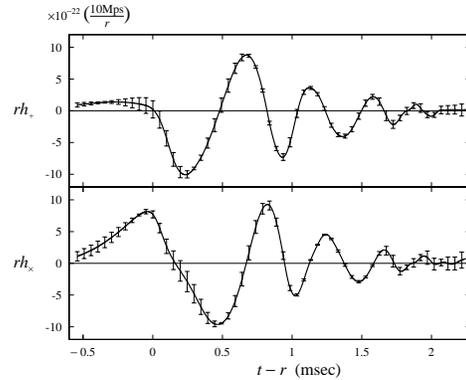


図 2: Wave forms $rh_{+,x}$ along z -axis as a function of $t-r$. The curves are averages of $rh_{+,x}$ estimated at $r = 110 \sim 200M_{\odot}$ and error bars denote 2σ .