た2つの中性子星が平衡状態にあり，それが重力波を出しながら互いに合体していく様子を物質密度の等高線と物質が運動する速度ベクトルによって示したものである．実際の計算は3次元で行っているが，ここでは x-y 平面での断面だけを示した．図2は，この時に放射される重力波を z 軸上で 10 Mpc のところから観測したときの波形である．振動数 f は約 7 kHz で最大振幅 h が 5×10^{-21} 程度になっている．我々の最終目標である $h\sim10^{-21}$ の重力波観測装置によって，このような連星中性子星の合体が約 50 Mpc のところで起こったとしても観測可能であることを示している．

参考文献

1) D. C. Backer and S. R. Kulkarni, *Physics Today*, **43** (1990), No. 3, 26.
2) J. P. A. Clarke, E. P. J. van den Heuvel and W. Sutantyo, *Astron. Astrophys.*, **72** (1978), 120.
3) T. Nakamura and M. Fukugita, *Astrophys. J.*, **337** (1989), 466.
4) T. Nakamura and K. Oohara, *Prog. Theor. Phys.*, **82** (1989), 1066.

原始中性子星の重力崩壊・分裂及び合体過程

観 山 正 見*

重力波観測の準備で重要な点の一つに，種々の重力波放出可能な天体現象においてどの程度の重力波の放出が可能か理論的に見積もっておくことがある．従来までの研究から，強い重力波放出源としては，強い重力場内での動的過程であることはもちろんであるが，非軸対称的過程が有力な放出源として期待される．そこで，我々はその一つの過程として，回転を伴う超新星爆発コアの進化を取り上げ，そのコアが重力収縮して中性子星を形成する過程を調べることを計画した．星の進化自体においては，回転の効果は余り効かなくても，コアの重力収縮によって回転の効果を無視できない場合がある．

以前 Ruffini と Wheeler は中性子星形成のシナリオとして，回転を伴った原始中性子星が (1) 重力収縮して，(2) 薄い円盤状となり，(3) 重力不安定性のため分裂して数個の分裂片に分かれ，(4) 重力波を放出することで角運動量を失い合体する（図1に概念図を示した）モデルを提唱した．最後に一個の中性子星を形成するのである．もしこの様な過程が起こるのであれば，分裂・合体時に重力波の大量放出が期待される．そこで，我々は3次元の数値流体計算を実行することで回転を伴った原始中性子星の重力崩壊過程を追求した．計算はニュートニアンの重力を仮定して SPH 法（広がりを持つ粒子法）を使い，計算結果から Landau-Lifshitz 公式によって重力波放出量を算定することとした．

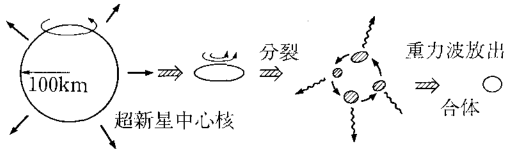

図 1 Ruffini と Wheeler の中性子星形成シナリオ

状態方程式としては，最初の試みである点を考慮して簡単に核密度以下では $N=3$ のポリトロープとして，それ以上の密度では漸近的に $N=1$ のポリトロープになるようにした．初期状態としても簡単のため，密度一様で剛体回転する球状コアとした．そのコアの質量を $1.4M_\odot$ とすると大体 100 km の半径から重力崩壊を始めた．計算結果は，初期の回転速度や内部エネルギーによって異なる．実際の重力収縮過程ではニュートリノ放出による cooling が重要な過程と考えられるがここでは無視した．その分初期から十分重力エネルギーに比べて内部エネルギーの小さい場合について計算を実行した．

図2に初期の（内部エネルギー)/|重力エネルギー|(α_0)$=0.05$ で（回転エネルギー)/|重力エネルギー|(β_0)$=0.2$ の場合の進化を示した．収縮と共に主に状態方程式が堅くなることによりディスクを形成し，それがリングへと成長する（a）．リングは数個に分裂して（b）そのいくつかは，合体する（c）．まさに図1に示したような場合が存在することが示された．これ以外に，α_0 と β_0 をいろいろ変えて調べた結果，(1) 分裂の条件は α_0 に対する依存が大きい．（このことは，収縮中の cooling にも依存することを示していて，将来ニュートリノ cooling 過程を考慮する必要がある．）(2) 分裂の開始は，状態方程式の変化によってトリガーされる．(3) Landau-Lifshitz 公式によって，重力波放出を調べてみた結果，リング形成時，分裂時および分裂片の合体時に特に強く放出されている．(4) その結果，重力波を強く放出する継続時間は約 25 msec 以上も続くことが示された．

* 国立天文台 Shoken Miyama: Collapse, Fragmentation and Coalesce of Proto-Neutron Star

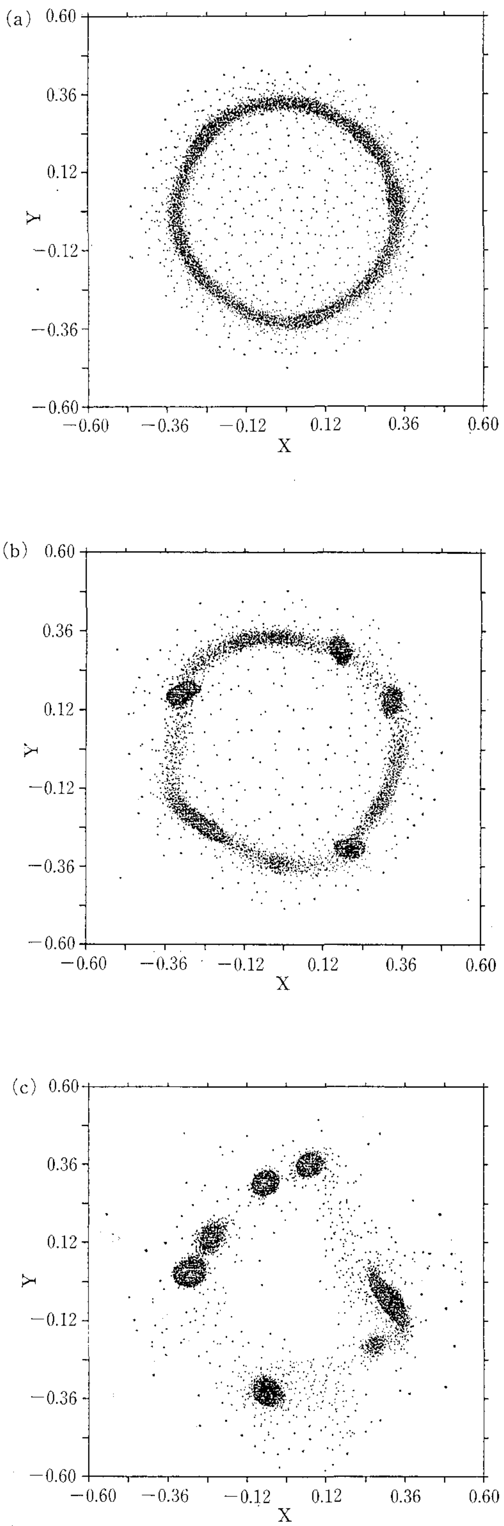

図 2 原子中性子星の進化のシミュレーシン．回転軸を上から見ている．リングを形成して分裂し，その分裂片が再び合体する．

正確な総放出エネルギー量は，ニュートニアン計算であるためや，粒子数が少ない(粒子数は最大でも 10^4 体)ため計算の精度に限界がある点や，更に動的過程が完全に終了するまで計算を実行していないため，現在までの計算では確かでない．更に，これまでの計算は重力波放出にともなう反作用を考慮していない．このため，現在以下のような点で計算精度の向上を試みている．

(1) 粒子数 10^5 体の計算を実行する．これにより分裂片を記述する粒子数が約 10^4 体となり，分裂片同士の衝突過程に於ける重力波放出過程についても正確に把握できる．現在テスト計算を実行中である．Facom-VP 400E クラスの計算機で 1 モデルに対して約 50 時間必要となる．

(2) SPH 法に於いて重力波放出の反作用項が計算可能な表式を得た．この反作用項は，反作用ポテンシャルとして運動方程式に作用するが一般に四重極モーメントの時間に対する高階微分の計算を必要とする．これが個々の SPH 粒子の反作用の和として表わされることを示すことができ，精度よく計算可能である表式が得られた．

以上によって我々は，種々な初期状態を持つ原始中性子星の進化を求めることから，中性子星形成過程の重力波放出量についての正確な算定を得たいと考えている．更に，我々は種々の分裂・合体過程に於いての重力波放出の波形変化を得られることができる．これらをカタログ化する事によって，将来的に重力波観測計に於いて波形観測が可能になったとき，重力波天文学を構築することが可能になると考える．