

連星中性子星の合体と重力波

大 原 謙 一*

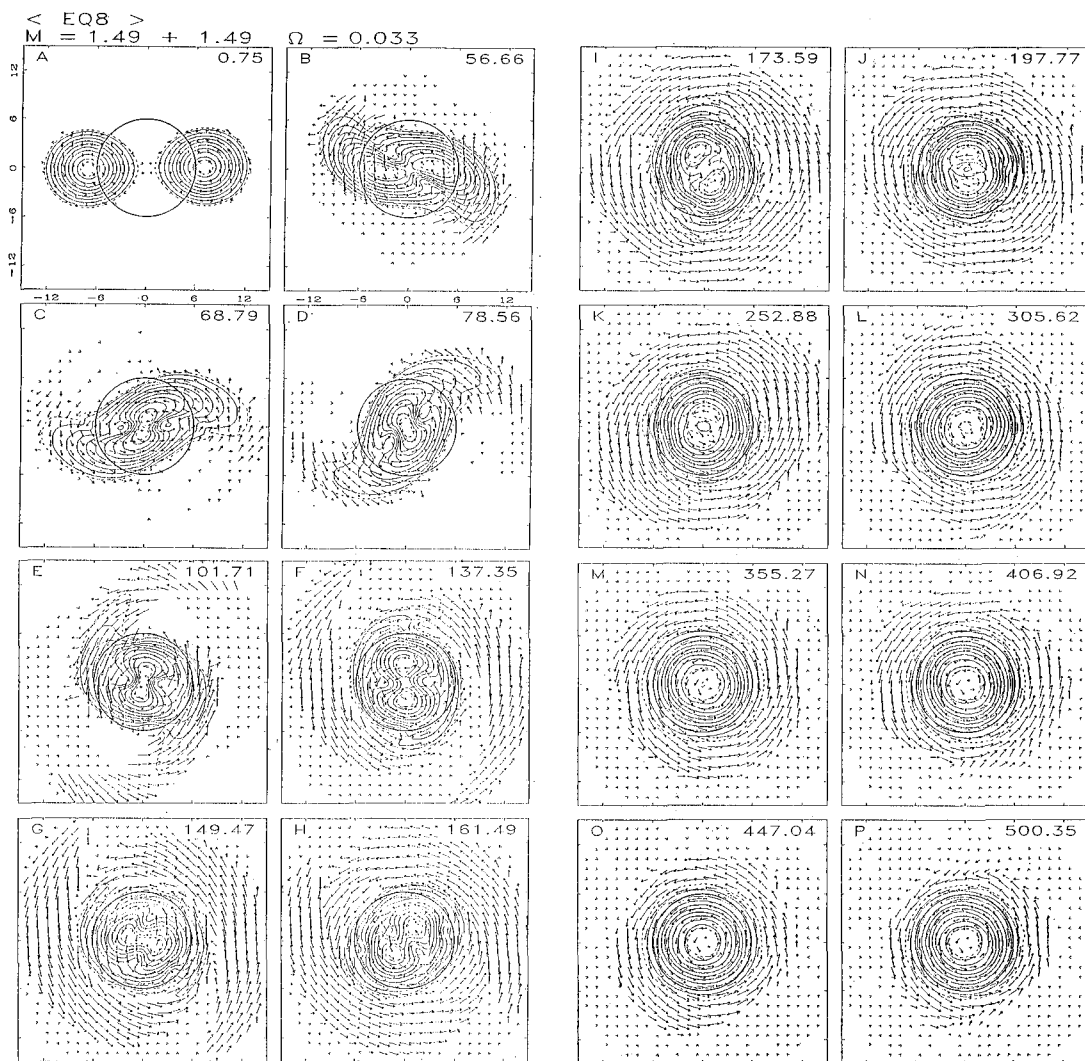
レーザー干渉計を用いた重力波観測装置の主要なターゲットとして、中性子星やブラックホールの衝突あるいは超新星爆発などで放射される重力波が考えられている。例えば、連星系にある中性子星は重力波を放出する事によりエネルギーと角運動量を失い互いに接近していき、最終的には衝突合体すると考えられる。この時に、大量の重力波が放出されるはずである。これまでに、約 500 個の pulsar が発見されており、その中で連星系をなしているもの（連星 pulsar）が十数個ある¹⁾。ただし、これらの連星 pulsar がすべて大きな重力波源になるわけではない。伴星の質量が非常に小さかったり、軌道周期が長く離心率が小さければ、なかなか合体するところまでいかないし、合体したとしても出てくる重力波はたいしたことがない。これまでに発見されている連星 pulsar の中で、将来衝突・合体し爆発的な重力波源となることが期待されるのは 3 個しかない。このうち、PSR 1913+16 という pulsar は詳しく観測されている。この場合、伴星も中性子星と考えられており、2つの中性子星の質量は、 $1.444M_{\odot}$ と $1.386M_{\odot}$ である。また、観測されている軌道周期の変化は、それが重力波放出によるとして計算したものと非常によく一致している。2つの中性子星は互いに接近し続けており、その内に衝突・合体するはずである。最近、球状星団の中に発見された PSR 2127+11C と PSR 1534+12 という連星中性子星は、おもしろいことに、2つの中性子星の質量や軌道周期、離心率が PSR 1913+16 と非常によく似ており、重力波を出して、将来、衝突・合体することが期待される。とはいっても、それは約 1 億年後のことであり、我々が実際にこれらの連星中性子星の衝突・合体するのを観測できるわけではない。では、これまでに発見されている連星 pulsar の合体まで待てないとしても、我々から観測できる範囲内では、このような連星 pulsar の合体がどれくらいの頻度で起こるのであるのか。これは、中性子星が 1 年間にどれくらいの割合でできるのかに依存するが²⁾、我々から 50 Mpc 以内で 1 年に 1 ないし 10 回程度連星中性子星の合体が起こると予想される。ただし、最近の観測によると、球状星団の中に多数の pulsar が存在しているということが示唆されており、我々の銀河系の球状星団の中には、全部で 10^5 個もの中性子星が存在しているという推計もある。そうする

と、中性子星の合体の頻度はもっと高くなるかもしれない。

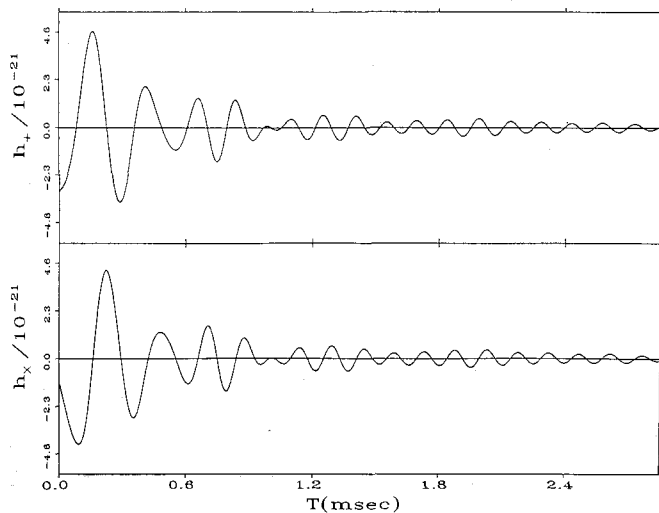
上では、現在連星系にある中性子星が最終的に合体することを考えたが、それとは別に、もうひとつの種類の連星中性子星の合体プロセスが考えられる。これは、II 型の超新星爆発の際に起こるものである。II 型の超新星では、星の中心核が重力崩壊をして、最終的にはひとつの中性子星ができると考えられている。しかし、その中心核の回転速度が速いと、遠心力のため回転軸に垂直な方向の収縮がおさえられるため、まず、薄いディスクができることになる。このようなディスクは、重力的に不安定であることが知られており、自由落下の時間スケールでディスクは分裂していくつかの塊ができるはずである。それぞれの分裂片は中性子星のようになっており、原始中性子星と呼ばれる。このような連星ないしは多重星状態の原始中性子星群は、重力波を出して再び合体し、最終的にひとつの中性子星になると考えられる。分裂片が 2 個ならば、先に考えたような連星中性子星ができることになる。実際、SN 1987A では、このようなシナリオのようなことが起こったとする理論がある³⁾。これが、II 型超新星で普通に起こることなら、10 Mpc の距離内で中性子星の合体による重力波の爆発的放射が起こる頻度は、1 年に 30 回程度ということになる。

では、中性子星の合体で放出される重力波はどのようなものであろうか。その振動数、振幅、あるいは波形やスペクトルなど、中性子星の合体の際に放射される重力波をより詳しく予測しておくことは、重力波観測装置の建設計画をたてる上でも、また、実際の観測結果を解析する上でも非常に重要なことである。そのためには、一般相対論的な数値シミュレーションコードを用いた、いわゆる 3 次元シミュレーションをする必要がある。しかし、残念ながら、今までのところ、完全に一般相対論を取り入れた 3 次元シミュレーションに成功した例はない。そこで、我々は、そのためのひとつのステップとして、ニュートニアン⁴⁾の 3 次元流体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行った。ここでは、放射される重力波を四重極公式を用いて計算する。また、重力波放射の反作用の効果も四重極公式の範囲内で取り入れている。シミュレーションのひとつの例を図 1 と図 2 に示す⁵⁾。この計算は、スーパーコンピュータ HITAC S820/80 で行い、約 200 時間の CPU 時間を要した。図 1 は、初期に、それぞれ $1.4M_{\odot}$ の質量を持つ

* 高エネルギー物理学研究所 Ken-ichi Oohara: Coalesce of Binary Neutron Stars and Gravitational Radiation



EQ8



▲ 図1 連星中性子星の合体. 実線は密度の等高線で最大値から 1/10 おきに描かれている. 矢印は速度ベクトルを示す. 右上の数字は無次元時刻 t で, $t=1$ は約 $5\mu\text{sec}$ に相当する.

▲ 図2 連星中性子星の合体の際に放出される重力波の波形. z 軸上の距離 10 Mpc から観測した場合.

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 $h \sim 10^{-21}$ 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。計算はニュートン

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。

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 $(\alpha_0) = 0.05$ で (回転エネルギー)/重力エネルギー $(\beta_0) = 0.2$ 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。

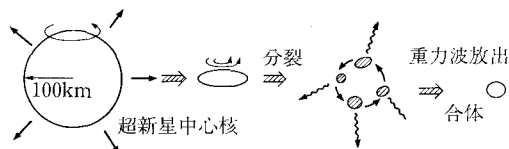


図1 Ruffini と Wheeler の中性子星形成シナリオ

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