超 新 星 爆 発

佐　藤　勝　彦*

重力波の検出が議論されるとき，その候補として昔から挙げられるのが超新星爆発である．しかし重力波の放出以前の問題として，バーデ・ツビッキーという先駆者が超新星爆発が星の進化の最後に起こる重力崩壊によるという指摘をしてから 60 年近くなるにもかかわらず，その爆発機構すら現在明らかになっていない．これは，この現象がニュートリノ放出，原子核の溶解等複雑な素粒子原子核反応をともなった，一般相対論的現象であるからである．

重力崩壊，バウンス，爆発，重力波放出という機構を考えるにおいて，まず考えなければならないパラメータはコアの角運動量である．超新星爆発を起こすと考えられている大質量星がその主系列にあるとき，大きな角運動量を持っていることは良く知られており，その値は $J_c=GM^2/c$ で規格化した無次元量の値で 4～10 程度である．もしこの角運動量が星の内部でそのまま輸送されず局所的に保存されるならば，星の進化は大きく影響を受け H—R 図上での進化も大きく変化し観測と矛盾する．このことからも角運動量は内部から外層に向かって輸送されていることは先ずまちがいないことである．しかしその輸送のメカニズム，輸送量は定量的には全く分かっていない．重力崩壊寸前のコアがどの程度の角運動量を持っているかによって，重力崩壊，超新星の描象は次のように分類されるであろう．

（1） $q>4$ の場合

角運動輸送の効率が悪く Fe／Si コアの角運動量が $q>4$ である場合においてはすでに遠心力と重力がほぼつり合うようになり星は大きくひしゃげた構造を持つことになる．この段階ではコアはその角運動量を失うことによって，つまり外層に輸送することによって収縮することができる．角運動量のロスによってコアは収縮しその角速度はより速くなる．そして 回転エネルギー/重力エネルギー比，T/W は増大しその値が 0.14 を越えた時点で 3 軸非対称なモードに対して不安定となる．つまりコアの形状は ellipsoid となり fission へとむかう．この場合，分裂破片は角運動量を重力波として放出しながら，また外層の落下に伴う降下物質をかき混ぜる効果により角運動量をロスしながらその公転半径をちぢめ収縮することになろう．この場合，開放されるエネルギーの大半は重力波によって放出されることになる．しかしこの場合においては収縮を爆発に転ずる機構が存在しないように考えられる．収縮を爆発に転ずるためには，急激に物質を落下させそれに急激にブレーキをかけることによって衝撃波を発生させねばならない．しかしこの場合，系はズルズルゆっくりと収縮することになり動的に衝撃波を発生させることは不可能である．この場合，星の重力崩壊は強力な重力波源とはなるが（観山論文参照），超新星爆発を起こすことは不可能であろう．

（2） $1<q<4$ の場合

この場合，遠心力は初期モデルでは本質的ではないが，コアの重力崩壊の過程で重要となる．この場合についてはこれまでいくらかの数値実験例がある．しかしはっきりと，収縮から爆発に転じた例は存在しない．今では古典的研究となったが，Le. Blanc and Wilson (1971) の結果をはじめ，A. Symbalisty (1984)，及び最近の Max Planck 研究所のグループ Monchmeyer and Muller (1989) はいずれも回転重力崩壊では爆発は起こらないことを示している．確かに遠心力が効かないために物質が速い速度で落下する回転軸方向に衝撃波が発生するものの，結局さらに上から落下する物質によって衝撃波は停滞し外に向かって伝播しない．従来回転の効果は球対称の場合より爆発が起こりやすいのではないかという期待が漠然と存在していた．そして球対称重力崩壊で爆発が起こりにくいのは，回転の効果を入れていないからだという主張もしばしば聞かれた．しかし結果は回転の効果は爆発を弱めているように見える．これまでのシュミュレーションではこの事態を救うために磁場を入れることで爆発を起こそうとしている．しかし Le. Blanc and Wilson (1971) はもちろんのこと，A. Symbalisty (1984) も常識的には考えられないほどの強い磁場を仮定することによってのみ，微量ながらも質量の放出が起こるようになるだけである．Symbalisty の結果を見ると磁場によって角運動量が運ばれ，コアの収縮がより起こり質量放出が起こっている．しかしいずれも超新星爆発を説明できるほどのエネルギーは解放されていない．この場合も Stark and Piran (1985) が数値実験的に示したように重力崩壊によって静止質量の 0.1% 程度の強い重力波が放出されるが，星はブラックホールとなるであろう．

（3） $q<1$ の場合

実質的回転の効果は重力崩壊のダイナミクスには効かない場合である．Crub pulsar は現在の減速の割合などから，生まれた時点では周期 17 msec であったと考えら

* 東大理　Katsuhiko Sato: Supearnova Explosion

れており，これは $q=0.03$ に対応している．重力波の放出は当然小さい．

結論として，回転の効果によって爆発がどの様に変化していくか，同時に重力波の放出量，その波形等がどの様に変化していくか調べる必要があろう．爆発に至らない重力崩壊の発見は重力波によるしか方法はない．また（2）や（3）の場合であっても我々の銀河内で起こる場合その検出は可能であり，ニュートリノ検出との同時観測を通じて爆発機構の解明にきわめて重要である．

ブラックホールの準固有振動と重力波放出

佐々木 節*

1. はじめに

星の重力崩壊によるブラックホールの形成や超新星爆発などの現象では，相当量の重力波が放出されると予想されているが，その波形や放出量についての定量的な評価は，最終的には3次元の一般相対論的数値計算に頼らなければならず，むずかしい問題である．しかしながら，ブラックホール時空に小質量の試験粒子を打ち込んだときに発生する重力波については，比較的容易に計算することが可能であり，また，その結果を非摂動的な状況に外挿した答が簡単な場合の数値計算結果とよく一致することが知られている．そのため，ブラックホールの摂動解析を詳しく実行する事は，数値計算と相補的な意味があり重要となる．ここでは，ブラックホールが形成される時にどのような重力波がどの程度発生すると考えられているかについて，摂動論の立場から視てみたいと思う．

2. ブラックホールの準固有振動

重力崩壊が進み恒星を形成する物質が空間の非常に小さい領域に閉じこめられると時空が大きく歪みブラックホールができる．ブラックホールは，その中に入ると二度と出てこれない因果的に一方通行の面，事象の地平面 (event horizon) によって囲まれている．事象の地平面が一旦形成されると，元の恒星の構成物質の情報はすべて忘れ去られ，その時空構造は全質量 M と全角運動量 J のみによって特徴付けられる．これをブラックホールの唯一性定理という．通常，角運動量は $J=Ma$ としてパラメーター a で表わすが，ブラックホールの角運動量には上限があり，$a \leq M$ ($J \leq M^2$) である（単位は $G=c=1$ の重力単位系；例えば [長さ]$=G$[質量]$/c^2=$[質量]，[角運動量]$=G$[質量]$^2/c=$[質量]^2 である）．一般の $a \neq 0$ の場合をカー時空といい，$a=0$ ($J=0$) の場合をシュバルツシルド時空という．

さて，一般に星に限らずどの様な物体でも，その物体に特徴的な振動モード，固有振動モードが存在する．そして，物体に小さな振動を与えるとその固有振動数での振動が大きく増幅される．この現象を共鳴振動といい，固有振動モードは共鳴振動モードともいう．実は，一見通常の星とは全く異なったブラックホールにもそうした固有振動が存在するのである．但し，一つだけブラックホールの場合が通常の物体の固有振動と異なっているのは，その振動が時空の振動であるため必然的に重力波放出を伴い時間的に減衰して行く点である．そのため，この振動は準固有振動モード (Quasi-Normal Mode; 略して QNM) と呼ばれている．

ここで，ブラックホールの QNM がどの様な式で与えられるか，簡単のためシュバルツシルド時空の場合で考えてみよう．時空の揺らぎは計量 $g_{\mu\nu}$ の揺らぎ $\delta g_{\mu\nu}$ で表わされるが，その内，重力波を表わす独立な成分は電磁波の場合と同様に2つある．そこでその2つをある1つの複素場 $\phi=\phi_+ + i\phi_\times$ で表わす．ここで，ϕ_+, $\phi_\times$ は重力波の2つの独立な成分である．

さて，QNM はブラックホールの共鳴振動モードであるから，そのような振動は振幅が無限に小さい入射波によっても励起される．すなわち，QNM は図1の様なブラックホールへ入射された波 ϕ_{in} を考えたときに，その入射波の振幅 A がゼロになる，という条件で決まる．式で書くと充分後の時刻 $t\to\infty$ で

$$\phi_{\rm QNM} \sim \begin{cases} e^{-i\omega(t+r^*)}; & r^* \to -\infty \\ e^{-i\omega(t-r^*)}; & r^* \to \infty \end{cases} \tag{2.1}$$

を満たす．この様な振動数は一般に複素数となる．図1の ϕ_{in} でいうと，その複素振動数 $\omega_{\rm QNM}$ は，複素 ω 面での振幅 $A(\omega)$ の零点である．

どの様な QNM が存在するかは，ブラックホールの安定性と大きく係わっている．任意の振動数 ω の摂動に対してブラックホールが安定であるためには，$t-r^*$

* 京大基礎物理学研究所 Misao Sasaki: Quasi-Normal Oscillations of Black Hole and Emission of Gravitational Waves