

回転星の一般相対論的重力崩壊

中村卓史*

1. 数値的相対論 (Numerical Relativity)

図1は、一般相対論的重力崩壊における特異性定理の仕事でホーキングと共にエディントンメダルを受賞したペンローズが描いた、回転星が重力崩壊してブラックホールになる過程の標準的な見方である。回転星(例えば、 $M \geq 8 M_{\odot}$ の星の中心核、又は $M \geq 10^8 M_{\odot}$ の超大質量星)が重力崩壊を始めると、徐々に重力が強まり、ついには光すらが系から脱出できないような強い重力の領域が発生する。(図1において、P点から発した光の波面は、一旦拡がるが、結局は縮んでしまう。)この領域の境界を「事象の地平面」と呼んでいる。すなわち、事象の地平面の内側から発せられた光は、遠方にいる我々には到達しない。逆に、我々は、事象の地平面内の現象を知る手段を持っていない。このような領域が発生すれば、その時空には必ず特異性が存在するというのが、大まかに言った特異性定理の内容である。さて重力が強くなると、物質は大きな加速度運動をすることになる。電荷が加速度運動すると電磁場の歪みが電磁波として放出される様に、物質が加速度運動をすると時空の歪み(又は、潮汐力)が重力波となって伝播する。時空の歪みが重力波として放出されてしまうと、最後に定常な最終時空構造が残される。この最終時空構造が、重力質量(M)と角運動量(J)のみで規定されるカー時空であると考えるのが、いわゆる標準的な見方である。カー時空の唯一性は、事象の地平面の外には特異性がないという仮定の下で、数学的に証明されている。

数値的相対論とは、図1のような一般相対論的重力崩壊をコンピューターでシュミレートすることにより、強い重力場での物理を明らかにしようとする新しい試みである。その創始者は、1976年に2つのブラックホールの直接衝突の過程を計算した。スマーである。

2. 我々の戦略

京都の天体核研究室では、1976年に、相対論的重力崩壊を数値的に解明しようというグループが結成された。前田、観山、佐々木そして筆者の4人の大学院生(当時)であった。(このグループは、中国での政治事件にたとえて、“4人組”と呼ばれていたようである。)私達は、最初は、チャンドラセカールによる定式化を勉強していたが、生意気にも、世界中で実際に数値計算しようとしているのは自分達だけであると思っていた。そこ

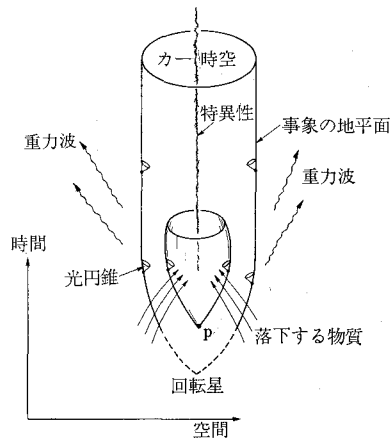


図1

へ、アメリカから帰って来られた佐藤文隆先生から、スマーの仕事の話を聞き、随分落胆したことを覚えている。さっそくスマーの論文を詳しく読み始めた。確かにすばらしい仕事であった。しかしながら、スマーが計算したのは、図1のような回転星の一般相対論的重力崩壊ではなく、2つの回転していないブラックホールの直接衝突であって物質は入っていないことがわかり、ショックも少しは和らいだ。

図1を最初から全てシュミレートするのは難しい。そこで、我々は問題をいくつかの小さな問題に分ける事に決定した。

ステップ1 2Dコード(2Dとは空間が2次元であることを意味し、ふつう軸対称を意味する。)で、重力波だけの時間発展を計算する。すなわち、初期に重力波の波束を空間に置いて、その伝播の様子を追う。ここでの狙いは、図1で重力波が遠方に伝播して行っているが、この伝播をコンピューターで再現できるかどうかをテストすることにある。答えは“Yes”であり、スマー、エプレイそして観山が、十分の精度で、重力波の伝播を追跡できることを示した。

ステップ2 2Dコードで、物質のダイナミクスに注目して、回転星の一般相対論的重力崩壊をシュミレートする。ここでは、重力波の伝播を追うことはしない。このステップでの狙いは、重力が大変強くなって、事象の地平面が出来る所まで、回転星の重力崩壊をシュミレートできるかどうかということである。この問いへの答えを本文で与えることにする。

* 京大理 Takashi Nakamura: General Relativistic Collapse of Rotating Stars

ステップ3 ステップ1とステップ2での技術を組合わせることにより図1を2Dコードでシュミレートする。すなわち、物質のダイナミクスと物質の非球対称な運動により生じる重力波の伝播の両方を追跡する。(注: 球対称な系では、電磁波が出ないのと同様に重力波も出ない。)

ステップ4 図1を3Dコードでシュミレートする。

現在の到達点はステップ2で、これからステップ3に入る所である。ステップ3のむずかしさは、中心での強い重力場の領域と、遠方で摂動とみてもよいような弱い重力場(重力波)を同時に扱う必要があり、しかも両者が中間の中程度の強さの重力場を介して関係しているという点にある。いろいろな困難が山積みしており、現在私はステップ3に10年近くの間が必要ではないかと思っている。その理由は以下の通りである。

回転星のニュートン力学での重力崩壊においては、スタンダードな問題がある。すなわち、等温、等密度で剛体回転しているガス球の重力崩壊である。この問題は1972年にラーソンが初めて計算して以来、10グループ以上が2D計算をした。しかし、結果は必ずしも一致していなかった。ある人はリングが出来ると言い、別の人は、そうではないといった具合に、定性的にすら結論が違っていた。神谷による計算ではリングは出来なかった。彼はラグランジュ法を使ったので、質量や角運動量は局所的に保存されている。1980年にノーマン、ウィルソンとパートナーはオイラー法で差分に伴う角運動量の輸送を注意深く取扱った結果、角運動量輸送が小さい場合には、リングが出来ないことを示した。重力崩壊は、結局、密度と薄さがどんどん増大する中心のディスク状領域へ暴走して行く。ニュートン力学での2D重力崩壊において、定性的にすら違う結果を与えていた原因は、差分に伴う人工的な角運動量輸送であったわけである。現在では、すでに2Dの先の3D計算がなされており、分裂過程の解明も期待されている。

ニュートン力学の場合に較べて、一般相対論的な回転星の重力崩壊の特徴は3つ程ある。

① 基礎方程式が大変複雑であること。例えば、最も一般的な3Dの場合、リッチテンソルと呼ばれる項の計算には、 10^3 のオーダーの演算を必要とする。

② 違った人は、違った座標条件を使う。

一般相対性理論の基礎方程式であるアインシュタイン方程式は、一般座標変換に対して共変的であるので、ニュートン力学と違って座標の決め方に大きな自由度がある。逆に言うと、実際に数値計算をする時には、何らかの規則で座標を決めてやる必要があり、これを座標条件と呼ぶ。違った座標条件の2つの数値結果があった場合、両者を比較する事は、ニュートン力学の場合と違

て直ちにできる事ではない。両者の時空点の同定にも、コンピューターが必要になる。

③ ニュートン力学の場合のようにスタンダードな問題がない。これは、他の人々が最初に計算した人と同じ問題をやってくれば解決はするが、果してそうなるかはよくわからない。

ニュートン力学での2D重力崩壊での経験は、我々に違ったグループが違った方法で同じ問題を解き、その結果を比較することが是非とも必要であることを示している。計算機の能力は10年前とはもちろん比較にならないが、それを考慮に入れても、問題の複雑さから、ステップ3に10年近くかかるのではないかと思っている。

本文では、回転星の一般相対論的の重力崩壊の初の数値結果を報告してみたい。

角運動量(J)と質量(M)を持った星が重力崩壊して図1のようにカー時空と呼ばれる定常なブラックホールになったとしよう。この時 J は、どんな値でもよいかというとは、そうではない。カー時空の唯一性が証明されているのは、

$$q \equiv J \left/ \left(M \cdot \frac{GM}{C^2} \cdot C \right) \right. \leq 1 \quad (1)$$

の場合なのである。(1)式で、 G は重力定数で C は光速である。)しかし、この条件は、カー時空の唯一性を証明するために数学的に要求されるだけで、重力崩壊する前の回転星が(1)式を満たしているという保障は全くない。実際、最近のデフェリリーチュ達の解析によっても、 $M \geq 8M_{\odot}$ の星では、 $q \geq 1$ である可能性が大変強い。それでは、

① $q \geq 1$ の回転星が重力崩壊すればどうなるのか?

② $q \leq 1$ なら、本当にカー時空が形成されるのだろうか?

以下において、この2つの疑問に対する現時点での数値的相対論の解答を示すことにする。

3. 回転星の一般相対論的の重力崩壊

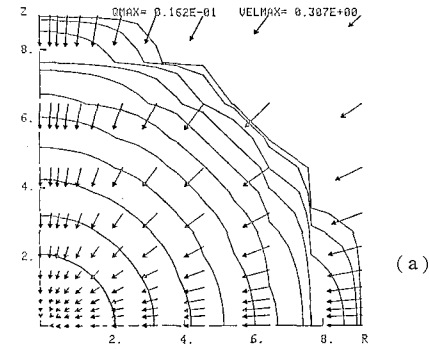
解いたモデルの数は22ヶである。それらは3つのタイプに分けることが出来る。

① タイプA, 超大質量星($M \sim 10^8 M_{\odot}$)で、初期の回転則が剛体回転に近いもの。

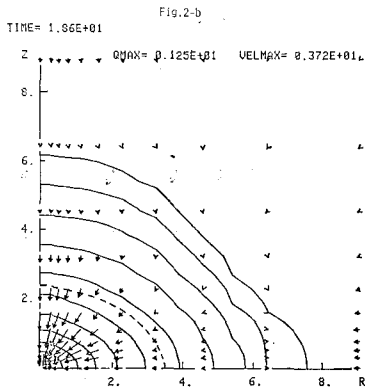
② タイプB, 超大質量星($M \sim 10^8 M_{\odot}$)で、初期の回転則が強い微分回転のもの。

③ タイプC, $M = 10 M_{\odot}$ の回転星で、状態方程式には核力の効果も入っているもの。

モデルの名前は、タイプと q の値で付けることにする。又、質量、長さ、時間の単位は、それぞれ、 M , $\frac{GM}{C^2}$, $\frac{GM}{C^3}$ で、例えば $M = 10^8 M_{\odot}$ の時は、長さと同時間の単位は、それぞれ $1.5 \times 10^8 \text{ km}$, $5 \times 10^2 \text{ sec}$ である。どのような数値結果になったかを典型的なタイプAを例に



(a)

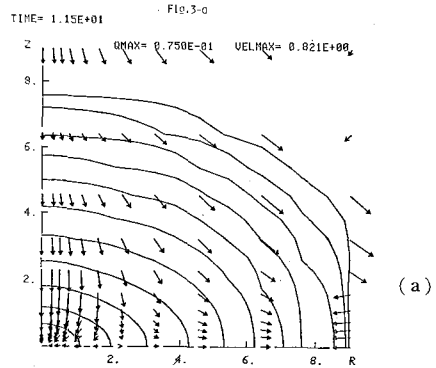


(b)

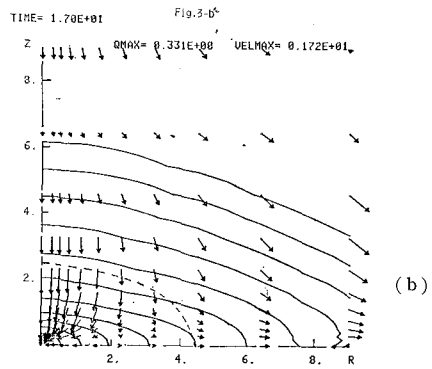
図 2

とって示すことにする。このタイプでは、初期の星の半径は 10.5 で、初期には、球対称的に自由落下している。図 2 (a) は、モデル A 50 (タイプ A で $q=0.5$) の、ほぼ初期の状況を示す。赤道面に対する面対称性を仮定しているの、上半面のみを描いている。実線は密度の等高線で、2本違うと密度が 10 分の 1 に落ちる。矢印は速度ベクトルを表す。密度と速度の最大値は QMAX, VELMAX として図に入っている。初期の密度分布は球対称で、落下速度も球対称であることがよくわかる。(この初期条件は以下のモデルでも同じである。) 図 2 (b) が、このモデルの最終状態で、点線は、その内側からは光すら脱出できない地平面である。物質分布は、回転の効果で少しオプレートになるものの、全ての物質は、回転しているブラックホールに吸い込まれる。

図 3 は、モデル A 105 である。このモデルでは、星はかなり速く回転している。 $t=11.5$ (図 3 (a)) では、 $R \leq 2$ で物質は垂直に落下している。赤道面に沿った落下は、回転のためかなり押えられている。 $2.4 \leq R \leq 7.7$ では、外に向かう流れの速度は、 $0.3C$ にまでなっている。最終的には (図 3 (b)), オプレートな中心核が形成され、その外側に地平面 (点線) が出る。外層は、 R 方向に相対論的な速度で拡がる。この外層の一部は、



(a)



(b)

図 3

系から脱出してしまうが、ブラックホールに近い部分は、結局もどってくると思われる。したがって、このモデルでの最終状態は、A 50 とは全く違う。すなわち、(ブラックホール)+(拡がる外層) であって、外層の一部は無制限に行き、一部はもどってくる。

図 4 に、モデル A 146 を示す。 $t=5.76$ (図 4 (a)) では、中心近くでは、ほぼ垂直に物質は落下している。 $2 \leq R < 6.5$ では、強い外への流れを見ることが出来る。 $t=18.8$ では (図 4 (b)) 中心でバウンスが起っている。赤道面近くでは、外への流れが、 $R=9$ まで拡がり、薄い外層が、この流れに向かって落下している。 $t=23.2$ では、 Z 軸にそって、ジェットが発生しているのがわかる。中心核では、運動は小さくなり、薄い外層は、 R 方向にも Z 方向にも拡がっていく。図 4 (d) では、明らかなジェットを見ることができる。系の質量を $10^8 M_\odot$ とすると、このジェットの質量は $5 \times 10^8 M_\odot$ である。また速度は光速に近く、運動エネルギーは、 4×10^{59} エルグにも達し、双対電波源のエネルギーに匹敵する。ほとんど速度がゼロになっている中心部分の、質量と角運動量はそれぞれ 0.21 と 0.04 である。したがって、 q の値は、ほぼ 1 であるので、中心部分は、もう一度重力崩壊する可能性がある。

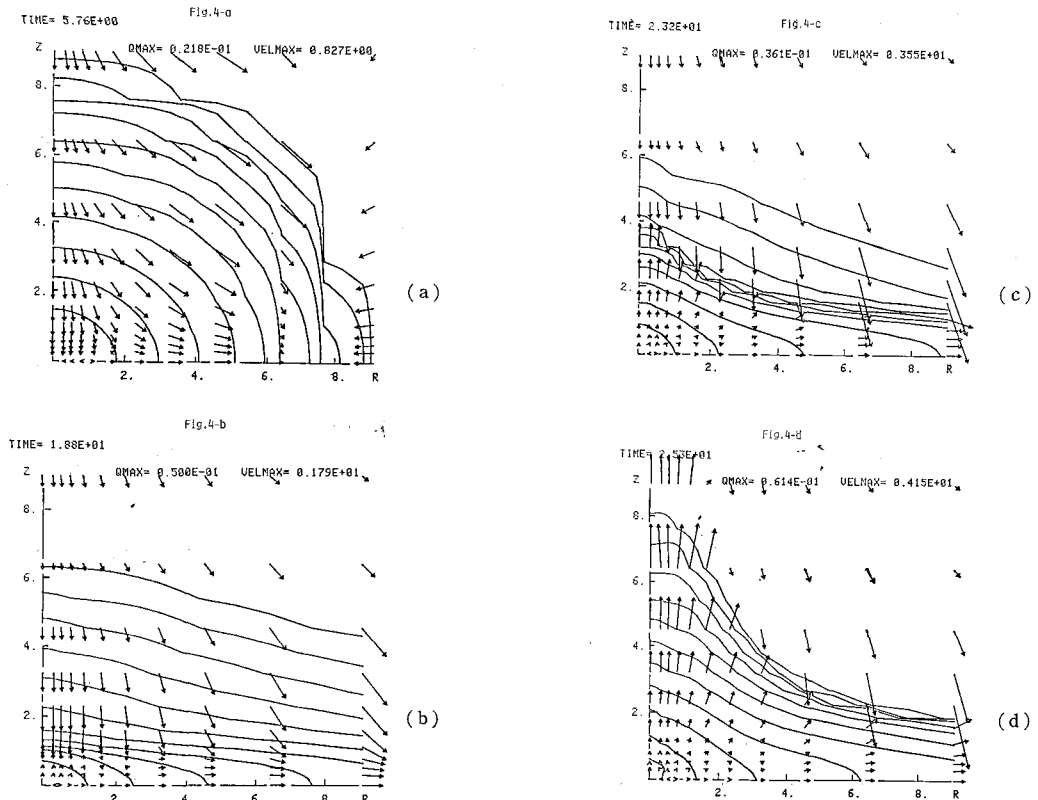


図 4

以上で、タイプAの数値結果を見て来たが、他のタイプの結果も合わせると次の2点を結論することが出来る。

① タイプAでは $q \leq 1.05$ 、タイプBでは $q \leq 0.92$ としてタイプCでは $q \leq 0.86$ なら、地平面が出来る。この3つのタイプは、初期の密度分布、回転則と状態方程式が違っている。それにもかかわらず、事象の地平面が出来る臨界の q の値 (q_0) は、ほぼ同じである。数値実験的には、 $q_0 = 0.94 \pm 0.1$ である。さらに、地平面が出来たモデルでは、地平面の外で、特に異常な現象は何も発見されなかった。そこで、 $q < 1$ の場合に限り、カーブラックホールの特異性は、事象の地平面の内側にあることを思い出すならば、現時点での数値的相対論の結果は、 $q < 1$ ならば、カーブラックホールが形成されるという、標準的な見方を支持している。

② $q > 1$ の場合には、物質のダイナミクスは、初期条件に強く依存する。タイプAではジェットが、タイプBでは膨張するディスクが、そして、タイプCでは膨張するリングが発生する。どちらにしても、全ての物質が重力崩壊してブラックホールになることはない。角運動量の大きい部分を放出して、残りの $q < 1$ の部分がA 146のように、ブラックホールになると思われる。

4. 結 語

ウェーバーの先駆的な仕事以来、世界で10以上のグループで、超新星爆発に伴う重力波を検出しようという努力がなされている。バイナリーパルサー (PSR 1913+16) の周期の変化から、重力波そのものの存在は、間接的に確認されたものの、その直接的な検出はまだない。(ウェーバーが一時、検出したと言っていたのは、ノイズであったと言うことで結着がついている。) 現在、ヘリウム温度に冷している、スタンフォードとローマの検出器の感度では、もし我々の銀河系で、 $0.01 M_{\odot} C^2$ くらいのエネルギーが、1 kHz くらいの重力波となって放出されれば検出可能である。しかしながら、現在の感度では、幸運に頼るしかないので、最低1月に1イベントが期待できるように、Virgo クラスタでの超新星爆発までを検出できる感度にしようという努力がなされている。過去10年間の重力波の検出器の発展を考えると、それには、少なくとも10年は必要であろう。10年というのは、筆者が予想している。数値的相対論のステップ3のタイムスケールである。あと10年すれば、重力波の観測がなされ、それとほぼ同時に、理論的にも、数値的相対論がコンピューターの中で重力波を産み出すであろう。そして、重力波天文学が、新しい分野として確立されるであろうと私は信じている。