

ブラックホール周りの衝撃波の振舞い ～Black Hole SASI～



長倉 洋樹

〈早稲田大学大学院先進理工学研究所 〒169-8555 東京都新宿区大久保 3-4-1〉

e-mail: hiroki@heap.phys.waseda.ac.jp

ブラックホールとは、宇宙を研究している者のみならず多くの人たちを魅了する宇宙の産物であろう。ブラックホール近傍で起こっている現象は、強い重力の下で一般相対性理論が正しいかどうかを検証できる有力な実験場の一つであるとともに、さまざまな高エネルギー天体の活動現象にかかわっていると考えられている。筆者はこれまでに、ブラックホールの周りに存在している可能性のある衝撃波に注目し、そのダイナミカルな現象を調べた。その結果、衝撃波は Spiral Arm (渦巻腕) 構造となり、ぐるぐるとブラックホールの周りを回転することが明らかとなった。本稿では、ブラックホール周りの衝撃波の研究の歴史や、筆者がこれまで行った研究成果について紹介していく。

1. はじめに

1915～1916年にアインシュタインによって提唱された一般相対性理論（以下一般相対論と略記する）により、宇宙論はもちろん、天文学におけるわれわれの理解は著しく進歩した。例えば水星の近日点移動は一般相対論により、0.1%のレベルの精度で見事に説明されている。また、本稿のテーマであるブラックホール^{*1}候補天体も数多く観測されており、宇宙で現実に行っている超強重力場中の物理過程を考察できるようになった。このように一般相対論は、宇宙を語るうえで必要不可欠なものであるが、そもそもこの理論はどの程度正しいのだろうか？ 先ほども述べたように水星の近日点移動をはじめ太陽系圏内での実験や、連星系を組んだパルサー PSR1913+16 から

の重力波^{*2}の間接証拠など、比較的重力が弱い状況ならば一般相対論は検証されている。ではこれらの実験事実から一般相対論があらゆる状況下で正しいと結論してもいいだろうか。それは違う。なぜならばこれまでに、中性子星^{*3}の内部やブラックホールの近傍といった非常に重力が強い領域で本当に一般相対論が正しいかどうかはまだわかっていないためである^{*4}。実際、弱い重力場中の実験のみではその他の重力理論すべてを棄却できないため、強重力場中での検証が必要なのである。

強重力場中での物理を検証できる最も有力な候補は、ブラックホール近傍の現象である。宇宙には、太陽の約10倍～10億倍程度の質量をもつものまで、さまざまなサイズのブラックホールが存在すると考えられており、またブラックホールとの関連を示唆する高エネルギー天体現象（例えば

*1 一般相対論が予言する、重力が強すぎて光さえも逃げられない領域。

*2 一般相対論が予言する、時空のひずみが波動として伝わる現象。

*3 地球の約1兆倍の密度をもち、ほぼ中性子でできた超高密度天体。

*4 もちろん量子重力理論というマイクロなスケールでの重力理論という意味でも、一般相対論は問題を含むが、本稿ではこの点については議論しない。

ガンマー線バーストや活動銀河核など)も数多く報告されている。このようにブラックホールは現実にわれわれの宇宙に“ありそう”なのであるが、まだ感度や分解能といった観測技術の問題から、これがブラックホールだ!と完全に決定できるようなデータをとらえられていない。しかし、もしブラックホールの存在証拠をつかんだときには、強重力場中で一般相対論が正しい一つの証拠となるため、理論および観測の双方で活発に研究が進んでいる。ブラックホールの存在証拠をつかむには、ブラックホールそのものを“見る”ことは決してできないので(ブラックホールからは何も逃げられないのだから)、その周りのガスの振舞いから間接的に存在証拠を探さねばならない。一般的に、ブラックホールの周りには降着円盤もしくは降着流といったプラズマのガスが取り巻いていると考えられており、この降着流からの放射や重力波を用いてブラックホール近傍の現象を探ろうというのが、最も有力な方法である。こういった放射や重力波といったブラックホール近傍からのシグナルを理論的に予想し、観測と照らし合わせることで一般相対論が正しいかどうかを調べるのである。そこで筆者は、一般相対論の強重力場中での検証を大きなテーマとし、理論と観測の双方から、ブラックホール近傍のガスの振舞いについて研究してきた。本稿では、ブラックホール近傍に存在する可能性のある“衝撃波”についての研究を紹介するとともに、本研究で得られた結果から将来の一般相対論の検証可能性についても議論する。

2. ブラックホール降着衝撃波の研究の背景

ブラックホール近傍のガスは、非常に速い速度でブラックホールに回転しながら落下(降着)し

ている*5。このような速い動きの中で、何らかの減速機構が働いたときには急激な圧縮が起こり、衝撃波が形成されることがある*6。衝撃波とは圧力やエントロピーなどが不連続的に変化する圧力波の一種のことである。衝撃波を通過した流体は一般に圧力や密度が増えるため、放出される光の量も衝撃波の前で変化するであろう。このコントラストを観測によりとらえられれば、衝撃波の特性を調べることができ、同時に降着しているガスの状態を知る一つの手がかりとなる。また、衝撃波が存在することで膨大な放射やアウトフローを生成し、ジェット形成とかかわっているといった議論もある。さらに衝撃波の時間変動が、ブラックホール候補天体からの準周期的振動(QPO)の理論メカニズムの候補であるなど、高エネルギー天体現象のメカニズムの解明という立場でも、衝撃波の振舞いは長年注目されてきた。

では、本当にブラックホール周りに衝撃波は存在しているのだろうか。仮にいったん衝撃波を形成したとしても、それがブラックホールにすぐさま飲み込まれてしまったり、また外側に飛んでいってしまうようであれば、衝撃波がジェット形成やQPOとかかわっているとは考えづらい。なぜならば、ジェットは準定常的に放出されているであろうし、またQPOのような準周期的な変動を、一過性の衝撃波で作出すことは難しいであろう。そのためブラックホールに流体が吸い込まれていくタイムスケールに比べて十分長く、衝撃波が存在していることが望ましいと考えられる。

実際にこのような状況が存在しているかどうかを理論的に考えるには、定常解を調べてみる方法が有用である。ブラックホール時空での流体の運動は、相対論的流体の時間発展方程式に支配されており、この方程式の解として衝撃波が定常的に存在できるかどうかをチェックするのである。結

*5 場合にもよるが、大体光の速さの数十パーセントぐらいの速さ。

*6 減速機構としてはいくつかあるが、例えば遠心力などである。

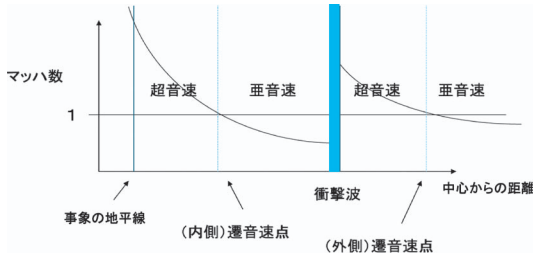


図1 ブラックホール降着流中での定常衝撃波の概観図。縦軸がマッハ数で横軸がブラックホールからの距離。ガスがブラックホールに飲み込まれる前に2度にわたって遷音速点を通ることがわかる(本文参照)。

論からいうと、少なくとも赤道面上の流れに関しては、このような定常的な解は存在することがわかっている。式を見てもわかりづらくなるだけなので、以下に図を用いて、簡単に定常降着解について説明しよう。図1に衝撃波を含んだ定常降着解の概観図を示した。横軸はブラックホールからの距離で、縦軸はマッハ数(流体の速度と音速の比)である。現在定常解を考えているので、衝撃波の静止系はブラックホールの静止系と同じ系であると考えてよい。ブラックホールから十分遠方に離れたところでは、重力が弱いためガスの運動はゆっくりしていて亜音速領域である。しかし、徐々にブラックホールに近づいていくにつれてガスは加速していき、やがて超音速となる。このようにガスは一度超音速流となるが、衝撃波を通過すると再び亜音速となってしまう。これは衝撃波のせいでガスの運動エネルギーの一部が、内部エネルギーやエントロピーに変換されたためである。このように亜音速となった流れは再びブラックホールに近づくにつれて加速していき、最終的には超音速でブラックホールに吸い込まれることとなる。この図から、衝撃波を含んだ定常解が存在するための一つの重要な条件がでてくる。それ

は、2度にわたって亜音速から超音速への遷移が起こっていることである(この遷移する場所を遷音速点という)。遷音速点はマッハ数が1の場所であるが、実はこの点は方程式上で特異点となっており、正則性条件が必要となる特別な点である。簡単に言えば、どのような流れも定常な降着流となることはできず、ある条件を満たす(それが正則性条件)流れのみが解として許されるということである。しかも、その点が二つあるというのが衝撃波を含んだ流れの必要条件なのである。遷音速点の個数や位置、そして正則条件を満たすかどうかは、外部境界条件^{*7}でのガスの角運動量とエネルギーの値、そしてブラックホールの質量や角運動量の値に依存することが知られている。すなわち、縮退はあるもののブラックホールの影響が間接的に衝撃波の存在条件にかかわってくることを示唆しているのである。以下の議論では、もう少しこの降着衝撃波の特徴を詳しく見ていこう。

3. 衝撃波の安定性と Standing Accretion Shock Instability (SASI)

第2章では、衝撃波を含んだ定常降着解の存在条件について説明した。ただし、定常解をもつからといって、現実の系で衝撃波が存在している条件としては不十分である。少なくとももう一つ満たすべき重要な条件があり、それは安定性である。安定性とは少し聞きなれない読者も多いと思うので、ここでは簡単なモデルを用いて安定性について説明しよう。図2に不安定な系と安定な系の二つを用意した。左側には上に凸になっている左右対称の山の頂上に、球が乗っている。それに対し右側の系は下に凸の左右対称の谷の真ん中に、球が置いてある。さて、この球を少し揺らしてみたらどうなるであろうか^{*8}。左の図では、球

^{*7} 今回の議論では簡単のため、外部境界条件を無限遠方に設定する。実際のブラックホールへの降着を考える際には、ディスクの端を外部境界条件としてとることになる。

^{*8} このように少し揺らすことを“摂動を与える”という。

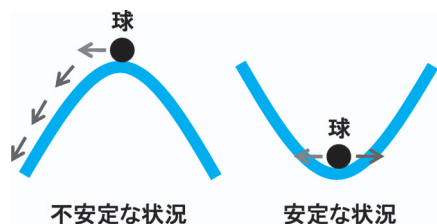


図2 不安定な系(左図)と安定な系(右図)を理解するためのおもちゃモデル. 左図は山の頂上に, 右図は谷間に球が置いてある. この球に摂動を与えた後の振舞いを矢印にて示した.

を左側に少しゆすったとすると, 一気にバランスが崩れまっさかさまに下に落ちていき, もとの状態には決して戻らないであろう. こういった状況を不安定な系という. それに対して右側の系の場合には球に摂動を与えても, 振動を繰り返しがて元の状態に落ち着く. このような状況を安定だという. すなわち, 定常解という条件では左右両方の系は許されるのであるが, 左の系は不安定であるため現実には起こりえないのである. このように安定性を解析することは, 現実に行っているかどうかを判断する一つの指針となるため, 宇宙のさまざまな系について安定性解析は行われている.

さて, 降着衝撃波についての話に戻るが, 降着衝撃波の安定性解析は10年以上前によって行われている^{1),2)}. ただし, ここで行われている解析は1次元(赤道面上での軸対称な摂動)のケースに限ったものである. 先ほど定常解の説明をしたが, 実は同じ外部境界条件(もちろんブラックホールの状態も同じ)に対して二つの衝撃波解が存在することが知られていたのであるが, 現実にはどちらの解を選ぶのかわからなかった. しかし Nakayama^{1),2)}の研究によって, そのうちの一方

の解は不安定であることが示され, 逆にもう一方の解は安定であることが示されたのである. さらに安定条件まで明らかにし, 衝撃波のすぐ後方で流体が減速している場合は安定で, 加速している場合は不安定となることを報告している. Nakayama^{1),2)}の研究では線形解析^{*9}を行っているのであるが, 時間発展方程式を完全に解いた1次元の数値シミュレーションの結果ともよく一致している.

このような1次元の安定性解析により, 現実には衝撃波が存在している可能性は高くなったのだが, 近年それを脅かす研究が報告された³⁾⁻⁵⁾. それらが, Standing Accretion Shock Instability (通称 SASI) と呼ばれる不安定性が新たに見つかったのである. これは, 衝撃波面に垂直な方向の摂動に対して安定な降着衝撃波も, 2次元や3次元的な摂動に対しては不安定になってしまう現象のことをいう. ちょっと余談になってしまうが, この SASI は最近超新星爆発の業界で, 爆発メカニズムの一つの候補として注目を浴びている⁶⁾⁻⁷⁾. もし SASI が生じると, 超新星内部の衝撃波が外側に伝播しやすくなるようで, 爆発に有利に働くという報告がされている^{7),*10)}.

さて超新星としてはうれしい SASI も, ブラックホール降着流中に SASI が起こってしまうとこれは困ったことになる. せっかく安定だと思っていた解が見つかったというのに, 実は SASI で不安定になってしまうというのだから, これはブラックホール降着流の背景でも早急に調べる必要がある. しかもブラックホールと超新星の降着衝撃波には多くの相違点(例えば降着流の速さ, 衝撃波後方のガスの流れの構造など)があるため SASI が起こったとしてもその時間発展の様子は違うであろう. また, ブラックホール時空を考え

*9 摂動の量が小さいと思って摂動の1次の量だけを考慮する解析方法

*10 ただし, まだすべての研究者が SASI が超新星爆発を引き起こすメカニズムであることを認めただけではなく, 現在もまだ論争中である.

るので、一般相対論の効果も重要となってくるかもしれない。筆者はこのブラックホール降着流中の SASI (以下 Black Hole SASI と記す) に関する研究をこれまでに行ってきた。結論からいうと SASI はブラックホール降着中でも一般的に起こり、衝撃波は不安定となる。これは残念な結果だと思われるかもしれないが、実は SASI が起こったことによって衝撃波が非常に興味深い振舞いを起こすことがわかり、この結果が一般相対論の検証に将来利用できる可能性も見いだせたのである。

4. 研究手法と主な結果～激しく時間変動する Spiral Arm 衝撃波～

この章では、主に本研究のセットアップ、研究手法そして主な結果について紹介しよう。まずセットアップについてであるが、動径方向の摂動に対しては安定である定常降着解を用意する。この降着解については先ほど説明したように、外部境界条件を設定すれば一意にその解が求まる(文献 1, 2 で示された安定性の条件より、二つの定常解のうちの一つが安定だったのであった)。この設定のもと、本研究では線形解析と時間発展の直接数値シミュレーションを行い、衝撃波の安定性とその時間発展の様子を調べた。以下に線形解析と数値シミュレーションについて詳しく説明する。

4.1 線形解析

第 3 章で説明したように、安定性の解析を行うには線形解析が非常に有用となる。ここでは細かい話は避けるが基本的には、衝撃波を含んだ定常降着解をほんの少し揺らしたときに、どんどん初期の状態からずれていくような解があるかどうかを線形の範囲で調べる。しかも線形解析を行うことで、何が原因で不安定が誘起されているのかを物理的に解釈しやすくなるといった長所もある。

本研究では赤道面上での動径方向および非軸対称^{*11}な摂動に対する安定性について解析した。先ほど SASI の説明をしたが、これは多次元的な摂動に対する不安定性であった。そのため、方位角方向の摂動も考慮することにより多次元的な摂動となるため、SASI が起こるかどうかを調べることができるのである。

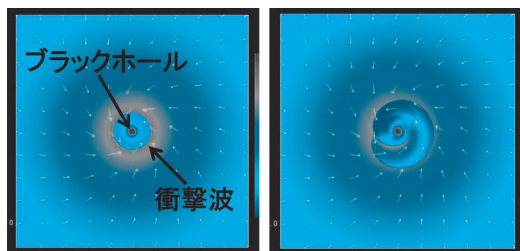
線形解析の結果、やはり衝撃波は不安定であった。すなわちブラックホール降着流中でも SASI は起こるようである。では果たして、この衝撃波は、先ほどの球が山から転がってってしまうように、ブラックホールへ飲み込まれたり、外側に飛んで行って、やがては消えてしまうのであろうか？ それとも何か別の状態に行き着くのであろうか？ このように系が初期の定常状態から大きく外れ、非線形効果(摂動量が大きくなって、2 次以上の項が効いてくる)が重要となってくる領域では、直接数値シミュレーションを行って、系の時間発展を調べる方法が手取り早い。本研究では、ブラックホール時空における一般相対論的流体 (General Relativistic Hydro Dynamics, 通称 GRHD) コードを用いて、この衝撃波の時間発展を調べたので以下に説明する。

4.2 GRHD による数値シミュレーション

一般相対論的流体の運動を決めるには、質量保存 (1 成分)、運動量保存 (3 成分) そしてエネルギー保存 (1 成分) の計五つの非線形連立偏微分方程式を解く必要がある。この時間発展の方程式を解くには、特殊な状況以外は解析的に解くのは不可能であるため、数値的に解くことを考える。近年、流体や磁気流体の計算を非常に精度よく、そして安定に^{*12}解けるようになった^{8), 9)}。筆者もこれらの先行研究を参考にし、数値計算コードの開発を行い、衝撃波を含む系でも安定に精度のよいコードの作成に成功した。後はこのコードを用

*11 非軸対称とは方位角方向に非対称であるという意味である。

*12 ここで安定という意味は数値的に安定という意味で衝撃波の安定性とは関係ないことに注意。



摂動を与える前の、
軸対称定常の降着衝撃波

非軸対称な摂動を与えた
後の衝撃波の振る舞い

図3 非軸対称摂動を与えた後の衝撃波の振る舞いを表した図。赤道面を上から見ており、コンターは速度の大きさを、矢印は3次元速度ベクトルを表している。中心部分はブラックホールである。衝撃波が非軸対称な摂動を与えると Spiral Arm に変形することが右図からわかる。

いて、衝撃波に非軸対称な摂動を加えた後に系がどのように発展するのかをシミュレーションすればよい。

では、数値シミュレーションから得られた主な結果を紹介しよう。図3は衝撃波が大きく変形していく様子を示した図である。この図は、赤道面上を真上から見ており、流体の速度の大きさを表したものである。速度の大きい領域ほど白色となっていく、白色のところから突然青色にジャンプするところが衝撃波の位置に対応している。矢印はガスの速度のベクトルを表し、中心はブラックホールである。左側が摂動を与える前の状態で、右側がある程度系が時間発展した後の、ある時刻でのスナップショットである。この図から、初期にはほぼ軸対称な構造をしている衝撃波が Spiral Arm (渦巻腕) 構造をとってブラックホールの周りを取り巻いているのがわかる。さらに衝撃波はガスの回転する方向と同じ方向にぐるぐると回転し、また動径方向にも大きく振幅を繰り返すことがわかった。また、衝撃波がこの領域から消えてしまうことはなく、常に存在し続けることもわかった。

これはおもしろい結果である。なぜならば先ほどの線形解析では衝撃波は非軸対称な摂動に対し

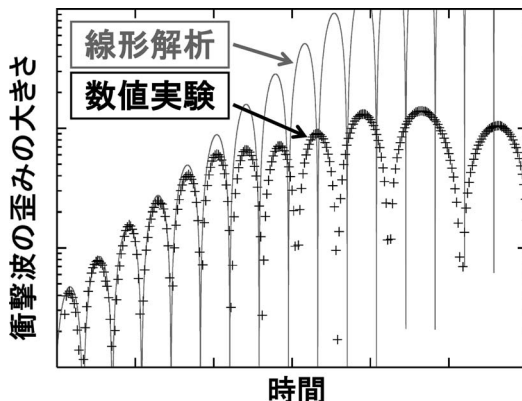


図4 線形解析と数値実験のそれぞれの計算で得られた、衝撃波のひずみ度合いの時間発展の様子を比較した図。縦軸が衝撃波のひずみの度合いを表しており、横軸が時間である。途中までは線形解析結果と数値実験結果がほぼ重なっているが、ある時刻からずれ始めている。この時間から非線形効果が重要となることを意味している。

て不安定であったにもかかわらず、実際には衝撃波は準定常的にブラックホールの周りを取り巻いているのである。すなわち、衝撃波は線形のレベルでは不安定であるものの非線形のレベルでは準安定だということである。このことをもう少し詳しく説明しよう。

図4は衝撃波のひずみ具合の時間発展を示したもので、非軸対称的に与えた摂動がどのように増幅していくのかを、線形解析と数値計算の両方とを比較した図である。横軸が時間で、縦軸がそのずれの大きさを意味している。線は線形解析から予想された結果で、プロットが数値シミュレーションデータである。この図からわかることは、数値シミュレーションも初期には線形解析のものと一致しながら時間発展しているのに対して、あるところから大幅にずれ始めて、やがてひずみ具合が飽和していくのがわかる。実は、この初期のフェイズではひずみの度合いが小さいため線形解析のものと一致していたのだが、そのひずみの度合いが大きくなり非線形効果が重要になったところからずれ始めているのである。そして、非線形

領域にくると衝撃波はそれ以上ひずみが大きくなることはなく、半永久的にその付近で振動を繰り返すことがわかった。

衝撃波がどのような速度で回転し、また振動するかはブラックホールの角運動量に依存するといった興味深い結果も得られた。ブラックホールが角運動量をもつと時空が引きずられ、ガスもブラックホールと同じ方向に回転していく。そのため衝撃波の時間発展にも影響を及ぼすのである。ここでは結果のみを紹介するが、初期条件として衝撃波の位置を固定した状態でブラックホールの角運動量の値を増やしていくと、SASIによる衝撃波の動径方向の振動の大きさは増える。ただし衝撃波が回転する速度は変わらない。さらに筆者は、外部境界条件で与えるガスの角運動量とエネルギーを固定した状態で、ブラックホールの角運動量を増やしていく場合について調べてみた。すると初期の定常衝撃波解の衝撃波の位置が外側にシフトし、SASIが起こると動径方向の振動の振幅は小さくなる傾向にある。このような振舞いを起こす理由はSASIの不安定性を引き起こすメカニズムと関係があるのであるが、ここではこれ以上立ち入らない。強調したいことは、SASIによる衝撃波のダイナミクスにブラックホールの回転の影響も表れるということである^{*13}。

5. Black Hole SASI を観測でとらえる！

ここまでの話をまとめると、ブラックホール降着流中でもSASIは起こり、Spiral Arm構造をとりながらブラックホール周りをぐるぐると回転し、動径方向にも振動を続け、ブラックホールの状態も衝撃波の振舞いに影響を与えるということである。さて、ここまでの議論では主にBlack Hole SASIの特性について説明したのであるが、

一般相対論の検証についてはあまり触れてこなかった。そこで、Black Hole SASIを利用して、どのように一般相対論の検証を行うのかについて、最後に簡単にこの件について説明しよう。

第2章で、衝撃波が存在するとその前後で光の放出量が増えることを説明した。さらにBlack Hole SASIが起こり、衝撃波が激しく揺れ動けば光の放出もまた時間変動するだろう。もしBlack Hole SASIが本当に起こっていたとして、観測からそれをとらえられればブラックホールの情報やガスの状態に制限をつけることができる。実際、2013年にはVSOP2/AstroG計画から電波天文衛星が打ち上げられる予定で、近い将来ブラックホール近傍の直接撮像が可能となる時代もすぐそこまできている。楕円銀河の一つM87の中心に存在するとされる超巨大ブラックホールは、VSOP2計画の最大のターゲットで、約10倍のシュバルツシルト半径のスケールで、分解することが可能と考えられている。そこで、M87の超巨大ブラックホールの近傍で、Black Hole SASIが起こっていたとすると、VSOP2でとらえたときにはどのように見えるのか、そのイメージング計算を行ってみた。

ここでは、計算方法の詳細は省略するが、先ほどの流体の計算データを使って、その後一般相対論的輻射輸送計算を行いイメージングの計算をした。輻射機構として、ここでは簡単のため熱的シンクロトロン放射のみを考え、また磁場の大きさもプラズマベータ（ガス圧と磁気圧の比）を10と仮定した。視野角は30度である。

図5が、理論的に予想されたM87のBlack Hole SASIのイメージングデータである。左から右にかけて1カ月ごとのスナップショットで、電波強度を表している。一番上の段、そして一番下の段がそれぞれ43 GHz、345 GHzのイメージン

^{*13} Black Hole SASIの理論メカニズムや、ここで紹介した結果をより詳しく知りたい方は、文献10, 11を参照していただきたい。

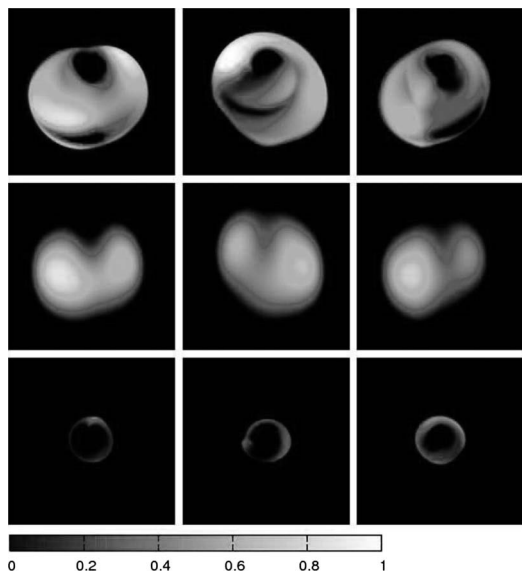


図5 M87 ブラックホール周りのイメージングの理論計算結果。図はインテンシティーを表している。上図は、周波数が43 GHzでのイメージングで（ただしこのイメージングは分解能無限大のとき）、真中の図がVSOP2の分解能に合わせてイメージングが呆けてしまう効果を考慮したもの。下図は345 GHzでのイメージング（分解能無限大のとき）。左から右に進むにつれて、約1カ月ごとのスナップショットを載せた。

グの予想データである。もし、観測器が無限大の感度と分解能があれば、それぞれの波長域ではこのように見える。しかし実際には無限大の感度や分解能などはないので、それを考慮したのが真ん中の図である。この図はVSOP2の感度と分解能に合わせて、43 GHzでのイメージはどのようになるのかを予想した。一番上の図と比較すると、同じデータであるが相当ぼかされてしまっていることがわかるであろう。このことから、VSOP2の感度では何とか衝撃波が動く様子はつかめそうであるが、中心のブラックホールの影が見えるところまではVSOP2では分解できないようである。そのためVSOP2のレベルではまだ一般相対論の

検証が行えるレベルではないであろう。しかし重要なことは、Black Hole SASIで衝撃波が回転する時間スケールはおおよそ数カ月の程度であるため、その時間変動のみならばVSOP2によるほかしたデータでもとらえられる可能性があるという点である。この時間変動がとらえられれば、ブラックホール近傍の降着流の状態を知る一つの手がかりになると期待できる。

6. まとめと今後の展望

本稿では、強重力場中での一般相対論の検証の重要性を説明するとともに、それを行う一つのアプローチである、ブラックホール降着衝撃波について紹介した。ただし、これまでに行った研究では多くのところを単純化してしまったせいで、まだまだ現実の系を考察するには不十分であり、さらなる詳細な計算が必要であろう。まず、最も優先的に考えねばならないのが降着流および衝撃波の3次元的な効果である。今回の計算では赤道面のみを考えているため、鉛直方向の分布は全く考慮しなかった*14。しかし現実の系は3次元であるため、鉛直方向の影響は無視できないであろう。

そしてもう一つ必ず修正すべき点があり、それは乱流粘性の効果を取り入れることである。一般的にブラックホール降着流には乱流粘性が働いており、そのせいで角運動量輸送やエネルギー散逸が起こっている。しかし、散逸の効果を含んだ計算は一般的に難しく、ブラックホール降着流の研究背景において矛盾なく取り入れた計算はこれまでにされていない。そもそも一般相対論的な流体に、適当に散逸の効果を加えると、因果律を破ってしまうという問題があるため、矛盾なく行うことは簡単なことではないのである。しかし、近年相対論的散逸流体の必要性が多く研究者によって認識され始めて、きちんと因果律を保った定式化の下で（すでに理論としては1970年代にIsrael

*14 イメージングを計算したときにはある指数関数を写して密度分布を決めた。

と Stewart によって提唱されていた) 解析しようという試みが始動している。筆者も現在、この因果律を保った相対論的散逸流体の扱いの下でのブラックホール降着流の性質を調べている。その研究結果については今度また別の機会に紹介できればと考えている。

このようにまだまだ強重力場中での一般相対論の検証を行うには不十分な点が多いが、それでも着実に理論、観測ともに進歩し続けている。今後、上記の点を改善しさらに Black Hole SASI の研究を進展させていくとともに、ブラックホールのかかわっている天体現象の理論メカニズムの解明に向けた研究を行っていく予定である。

謝 辞

本研究に関する議論や論文執筆といったすべてにおいて、指導教官である山田章一先生に深く感謝いたします。また、M87 近傍のイメージング計算を行ってくれた共同研究者である理化学研究所の高橋芳太さんにもこの場を借りて御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) Nakayama K., 1994, MNRAS 270, 871
- 2) Nakayama K., 1996, MNRAS 281, 226
- 3) Foglizzo T., 2001, A&A 368, 311
- 4) Foglizzo T., 2002, A&A 392, 353
- 5) Blondin J. M., Mezzacappa A., DeMarino C., 2003, ApJ 584, 971

- 6) Ohnishi N., Kotake K., Yamada S., 2006, ApJ 641, 1018
- 7) Marek A., Janka H.-T., 2009, ApJ 694, 664
- 8) Kurganov A., Tadmor E., 2000, J. Comput. Phys. 160, 241
- 9) Shibata M., Sekiguchi Y., 2005, Phys. Rev. D 72, No. 044014
- 10) Nagakura H., Yamada S., 2008, ApJ 689, 391
- 11) Nagakura H., Yamada S., 2009, ApJ 696, 2026

The Dynamics of Shock Waves around a Black Hole

—Black Hole SASI—

Hiroki NAGAKURA

Department of Science and Engineering, Waseda University, 3-4-1 Okubo, Shinjuku-ku, Tokyo 169-8555, Japan

Abstract: Black holes have attracted a great deal of interest from many people. The phenomena around black holes are the strong test sites for verification of General Relativity in the strong gravitational field. Besides, it is supposed that black holes associate with the various high energy astrophysical phenomena. In the past, I have especially focused on the shock waves, which could be formed around a black hole, and investigated the dynamics of shock waves. We have found that the shock waves deform to the spiral arm structure, while they rotate and oscillate around a black hole. In this report, I explain the history of the research for shock waves around a black hole, and present our research findings.