

ブラックホール時空と磁気圏

高橋 真 聡

〈愛知教育大学 〒448-8542 愛知県刈谷市井ヶ谷町広沢1〉

e-mail: takahasi@phyas.aichi-edu.ac.jp



天体としての「ブラックホール」は、どのような天体現象を引き起こすのだろうか。そこではコンパクトな領域に膨大な質量が集積しており、強重力場が生じている。しかし、単に“重力が強いところ”というだけではなく、“曲がった時空”としての性質が重要になっているはずだ。観測されるブラックホール候補天体の周辺には降着ガスがあって、膨大なエネルギーが放出されると考えられるが、曲がった時空ゆえに、通常では思いもしない現象が発生しているかもしれない。ブラックホールは、一般相対論により理論的に予言されたものだが、そもそも、ブラックホール候補天体に一般相対論は適用できるのか？ 本稿では、ブラックホール時空の性質について紹介し、磁気圏としての周辺環境、および時空情報を得る方策について述べる。

1. ブラックホールは存在するのか？

いまどき「ブラックホール」といえば、小学生や中学生にもおなじみの天体である。どうやらTVアニメやSF小説のおかげのようで、ある意味、啓蒙活動をしてもらっているわけだ。実際、児童・生徒たちのブラックホールへの関心は高いようで、ときおりブラックホールについて質問を受ける。「ブラックホールって何?」、「ブラックホールってどこにあるの?」、「ブラックホールに近づくとうどうなるの?」、「ブラックホールの形は?」、「ブラックホールに落ちると、ホワイトホールから出てくるの?」などだ。何でも吸い込んでしまう、一度入りこんだら決して抜け出せないなど、ブラックホールのミステリアスなイメージが、さまざまな“謎”を喚起するようだ。

「ブラックホール」は、1915年にアインシュタインが提唱した重力理論（一般相対性理論）からの一つの帰結として、予言されている。この正体は、星やガスが自身の重力で収縮し、それを囲む空間が極度にゆがめられ、ついにはわれわれの住

む宇宙から切り離されてしまった領域である。われわれの宇宙から侵入することはできるが、その内部領域からは、外部であるわれわれの宇宙への逆戻りができないという。何とも不思議な空間領域である。本当に存在するのだろうか？

ブラックホールは、大質量の恒星が、その進化の最終段階に行き着くところとして実在しそうである。恒星は、自分自身の重力を内部の圧力で支えて、自ら光り輝くガス球である。重力を支えるための内部の高温・圧力状態は、核融合反応によるものである。このエネルギー供給が安定であるため、恒星の寿命は、極めて長いものになっている。大質量星の場合、1,000万年～1億年である（太陽質量の程度だと100億年ほど）。核融合反応の進行に伴い、恒星内部の組成は徐々に変化して、恒星としても変化（進化）していく。そして、ついには内部領域での核エネルギー源を使い果たすことになる。こうなると、もはや高温・高圧状態を生み出せなくなる。

恒星内部で核エネルギー源を使い果たした恒星は、自身の重力でどんどん収縮していく。これを

「重力崩壊」という。この収縮によって中心のコア領域は高密度になるが、コア外層の物質はコアに衝突して跳ね返されて飛び散る。いわゆる「超新星爆発」である。仮に、恒星内部の圧力を突然ゼロにすると、太陽の10倍程の質量の星の場合だと、およそ5~6時間ほどで崩壊してしまう。恒星の寿命の長さを思えば、一瞬の出来事である。

この爆発の結果、コアの質量がある質量の範囲内であれば、コアが高密度の中性子からなる状態である「中性子星」になる。このことは、1934年に、バーデとツヴィッキーによって理論的に予想されていたのだが、実に、その後の1937年に中性子星が観測的に発見されたのである。このように、理論の予測が的中してくると、もっと質量の大きな星、すなわち臨界質量（チャンドラセカール限界）を超えた大質量のコアの行き着くところは、“ブラックホールであろう”と、誰しもが思うようになる。

われわれの宇宙にブラックホールが存在することに関する観測的証拠が、現状では、あくまで“間接的”なものであるとしても、もはや疑いの目でみる研究者は多くはないだろう。しかしながら、ここではあえて、「ホントにブラックホールは存在するの?」、「存在するならば、ブラックホール時空の性質はどうなっているの?」と、問うてみることにする。ブラックホールの存在を証明（直接観測）するための方策を探ること、さらにブラックホールの強重力場における“曲がった時空”の理解を深めるためである¹⁾。

2. コンパクトな領域に膨大な質量が存在する事実

天体としてのブラックホールは、さまざまな天体観測に基づき、銀河の中心核領域や、 γ 線バーストの源、一部のコンパクトX線天体において存在していると考えられている。ただし、現状では、間接的な証拠しか得られていないため、“ブラックホール候補天体”と呼ばれている。恒星質

量サイズのブラックホール候補天体（X線星）がいくつも見つかっているが、有名なものに“はくちょう座X-1”がある。ここではX線星が超巨星と連星系を作っているとされる。X線星の質量は、太陽質量の7倍以上であると推定され、チャンドラセカール限界を優に超えている。したがって、中性子星ではありえない。唯一の可能性として、ブラックホールということになる。

銀河中心領域におけるブラックホール候補天体の中には、実際に大量の物質が中心の狭い領域に集中して分布していて重力が強くなっているものが、いくつも見つかっている。このことは、ブラックホールと思われる候補天体の周りの星やガスの運動を観測することで確認できる。例えば、NGC4258における波長1.3 cmの水メーザ線による観測がある²⁾。これは、ケプラー回転している円盤からの放射と理解され、その円盤の半径は0.4~0.8光年、円盤の内側の質量は、 $3.5 \times 10^7 M_{\odot}$ （太陽質量）と推定される。このスケールにこれだけの質量が集積していることより、ブラックホールが存在すると指摘されている。ブラックホール以外の他のモデルで説明するには、密度が高すぎるのだ。同様に、われわれの銀河系の中心領域にあるSgr A*の赤外線観測により、その周囲の星の固有運動を調べることで（ケプラー運動を示す）、 $3.7 \times 10^6 M_{\odot}$ のブラックホールの存在が指摘されている³⁾。

また、多くの活動銀河核（AGN）においても、膨大なエネルギーが中心のごく狭い領域から放出されている。領域のサイズは、時間変動のタイムスケールより推定される。そのサイズが、発生するエネルギーの規模に比してコンパクトであるがゆえに、そのエネルギー源は、エネルギー変換の効率の良い「重力エネルギー」と考えられている。つまり、強重力を生み出すブラックホールに落下するガスの重力エネルギー（位置エネルギー）は、落下に伴い解放され、さまざまな物理過程を経て、放射のエネルギー（X線やガンマ線）やプラ

ズマの運動エネルギーに転換される。こうして外部空間に放出されるというものだ。

では、理論研究からは、ブラックホール候補天体で観測されている天体現象を説明するために、どのようなモデルが提案されているのだろうか。現在までに、ブラックホール周辺環境における統一モデルについては、ある程度のコセンサスができあがっている。ブラックホールの周りには、角運動量をもつガスからなる「降着ガス円盤」があって、そのガスは粘性で角運動量を失うことで、徐々にブラックホールに向かって落下していく。この際に、ガスの重力エネルギーが解放される、というものだ。ただし、ひとくちに“降着ガス円盤”といっても、モデルとしては、赤道面上に分布する薄い円盤状だったり、ガスの圧力や輻射の圧力で赤道面から離れるように膨張してトラス（ドーナツ）状になったりと、さまざまな形態のモデル解が可能である。これらのバリエーションは、ブラックホールに落下するガスの量や、ガス円盤表面からのエネルギー放出量などに応じて生じてくる。

降着ガス円盤の理論研究は、観測データに裏づけられたものとなっており、成功を得ているといえよう⁴⁾。現状の“ブラックホール候補天体”の発見においても、この降着ガス円盤の研究が主体となっている。もっとも、観測されるブラックホール候補天体から“候補”の2文字を取り除くためには、一般相対論の枠組における降着ガス円盤研究、およびブラックホール降着流研究の発展が不可欠になる。ブラックホールの境界領域（事象の地平面）にまで肉薄する、降着円盤の最内端領域での一般相対論効果を明らかにしていかなければならないのだ。ブラックホールの時空のゆがみの効果は、降着ガス円盤モデルの内縁領域をどのように修正するだろうか？

3. ブラックホール探査の物理学的意義

ここでは、ブラックホール探査の物理学的意義

について考えてみよう。ブラックホール時空というと、強重力のため時空（時間と空間を結合したもの）が“曲がっている”とか、“ゆがめられている”と表現することが多い。ブラックホールに限らず重力が強いところを通過する光線について、これを局所的な慣性系から眺める限りは（真空中として）光速度 c で直進する。しかし、少し広い範囲での軌跡を大局的に眺めてやると、その光線の軌跡は“曲がる”のである（重力レンズ効果）。したがって、ブラックホールや質量の大きな天体（銀河や銀河団など）の向こう側に位置する天体を観測するとき、途中の重力源によって、光線の軌跡が曲げられ、像がゆがむことになる。この原因は、重力源によって空間と時間が曲がっている（ゆがんでいる）からである。時空を曲がっているのは、重力場を生み出す源である“質量”（あるいは“エネルギー”）である。

この時空の曲がり具合は、重力場の方程式によって記述されることになる。なかでも、アインシュタインにより1915年に提唱された方程式（アインシュタイン方程式）が最も有名である。一般相対性理論は、この方程式によって記述される。アインシュタイン方程式が正しい重力場方程式であるかは、もちろん、実験や観測で検証されなければならない。

地上や惑星空間における弱い重力場における一般相対論の検証は、「太陽による光線の湾曲」や「水星の近日点移動」など、いくつも試みられてきた。また、「銀河の回転曲線」や「宇宙の加速膨張」など、大きなスケールにおける重力理論検証の試みもある。強重力場における一般相対性理論の検証としては、連星パルサーの観測による（間接的ではあるが）「重力波」がの発見されたこと、また最近では、連星パルサーの歳差運動の観測により⁵⁾、高い精度での一般相対性理論の検証がなされたとする報告がある（ここで、“連星パルサー”とは、互いに周回し合う極めて強い磁場をもつ中性子星連星のこと）。このように、現在までのさま

さまざまな検証の試みにおいては、一般相対論と矛盾するような事実は見つかっておらず、一般相対性理論の基礎をなす考えの多くが証明されてきた。さて、一般相対性理論は、ブラックホールのような“超”強重力の下でも成立するのだろうか。

曲がった時空の検証に際して、その程度の指標として、次のパラメーターを導入する⁶⁾

- 重力赤方偏移 $\varepsilon \equiv GM/rc^2$

- 時空の曲率 $\xi \equiv GM/r^3c^2$

ここで、 M は天体の質量、 G は万有引力定数、 c は光速の大きさ、 r は中心からの距離である。地球表面の場合、 $\varepsilon \sim 10^{-8}$ 、 $\xi \sim 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$ の程度である。ブラックホールの場合、 $\varepsilon \sim 1$ であるが、時空の曲率は、その質量に応じてさまざまな値をもつことになる。活動銀河核に存在するであろう巨大ブラックホールの場合、 $\xi \sim 10^{-25} \text{ cm}^{-2}$ の程度であり、地球と同程度である。X線連星の恒星質量サイズのブラックホールだと、 $\xi \sim 10^{-13} \text{ cm}^{-2}$ の程度となり、他の天体よりも大きな曲率の値をもつ。小さいブラックホールのほうが、その表面（事象の地平面）近傍での時空の曲がりは大きくなるのである。

重力赤方偏移については、重力による時間の遅れのみが問題となるのだが、仮にブラックホール候補天体中に $\varepsilon \sim 1$ の重力赤方偏移が確認されたとしても、それは必ずしも一般相対論が予言するブラックホールの検証を意味しない。重力赤方偏移は、「等価原理の検証」と見なすことができるが、アインシュタイン方程式以外の理論式でも説明は可能なのである。

一方で、時空の曲がり具合を示す曲率については、重力理論の違いに応じて異なる“空間の曲がり方”を導く。したがって、あるブラックホール候補天体において時空の曲率による効果が観測される時、それが一般相対論が予言する値と一致

するか、否か、を検証することになる。巨大質量ブラックホールと恒星質量ブラックホールでは、時空曲率の程度が異なるが、曲率のパラメーター値に応じて、発現する物理現象・天体現象も異なってくるだろう。それらを示す現象が実際に候補天体の観測データ中に見つかれば、一般相対論が強重力場においても成立すると検証できたことになる。

ブラックホール周りの大域的な時空構造が、一般相対論で記述されている場合、その時空のゆがみの程度は、メトリックと呼ばれる幾何学的な意味をもつ関数を通じて記述される（物理的には重力ポテンシャルと見なせる）。このメトリックは、アインシュタイン方程式の解として求めることになる^{*1}。天体ブラックホールの周りの時空においては、ブラックホールの質量や角運動量が、パラメーターとしてメトリックに含まれることになる。そして、流体あるいは磁気流体の基礎方程式に、メトリックが含まれるようになる。流体や磁気流体の振舞いを調べることで、時空構造を知ることができるかもしれない。

メトリックを求めるに際し、本来だとブラックホールの周りの物質や磁場の分布も考慮して、アインシュタイン方程式の解を得るべきなのであるが、一般にそれを解くことは極めて困難である。したがって、通常は、ブラックホール外部の物質や磁場の重力場への寄与が無視できる近似として、既知のブラックホール時空のメトリックを用いて問題を扱う。天体ブラックホールを扱う場合、多くの場合、ブラックホール時空の真空解である「シュバルツシルド解」または「カー解」を適用して、その重力場における流体力学や電磁気学を考察するのである。

それでは、何を観測すればこれらのパラメーターについて知ることができるか？ 強重力場で

*1 観測される強重力場が他の重力理論で説明される場合、一般に時空を記述する方程式の解としてのメトリックは、一般相対論のものとは異なるものになる。重力赤方偏移や時空の曲率の値も異なってくるだろう。

証明したい概念としては、地上や惑星空間での検証では明らかにされていない部分、すなわち重力場が確かに時空構造にゆがみを生じさせるということ、重力場の自転によって時空構造に回転方向のずれが生じる（「時空の引きずり」という）ことだ。これについては、第7章で再び考えよう。

4. なぜブラックホールの「磁気圏」？

太陽がコロナを生成し、また惑星間空間に向けて磁気圏（磁場がガスに対して支配的な領域）を形成しているように、ブラックホールの周りの降着ガス円盤もまた、その表面上空にコロナや磁気圏を形成するかもしれない。そのガス円盤表面からは、太陽の場合と同様に、プラズマの噴出（フレア）が生じているであろう、また上空コロナ領域では、X線やガンマ線などの高エネルギー放射が発生しているだろう。さらに、ブラックホール磁気圏においては、噴出プラズマがガス圧や放射圧による力、電磁力などにより加速され、高速の降着円盤風、あるいは宇宙ジェットを生み出しているかもしれない。

さて、ブラックホール磁気圏の理論モデルを組み立てる際には、このブラックホール周りの降着ガス円盤の上空領域に対して、「太陽磁気圏」、「パルサー磁気圏」のアナロジーが適用できる。太陽磁気圏およびパルサー磁気圏においては、磁力線に沿うように流れる磁気流体（MHD）風が観測されている。ブラックホールの場合も、降着ガス円盤の上空にはコロナが形成され、さらにその上空には磁気圏が形成されるだろう。実際、一般相対論的磁気流体（GRMHD）シミュレーションによると、円盤上部にコロナ領域が形成され、回転軸を取り巻くファンネル（漏斗）領域には、磁場が支配的な磁気圏領域が形成される（図1参照）。この磁気圏領域には、密度の薄いプラズマが分布し、ブラックホールへの降着流と遠方へのプラズマ風が共存する（ブラックホール半径の数倍のところに分流点が存在する）。外向きの流れは、

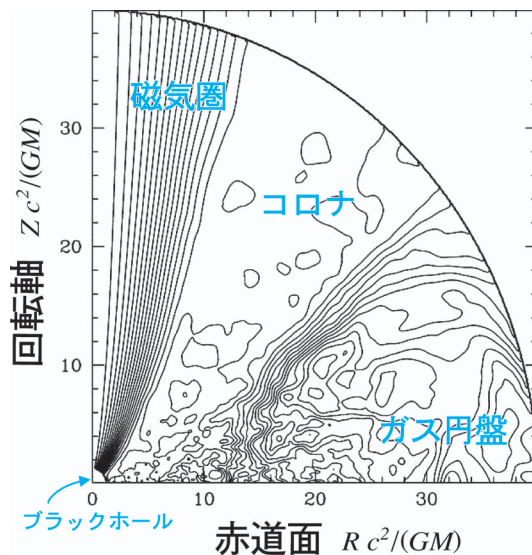


図1 ブラックホールの周りのMHDプラズマについての数値シミュレーション⁷⁾。図は磁力線の分布を示す。初期に赤道面上にトーラス状プラズマを置き、ポロイダル磁場のみ仮定して、時間発展を追った。降着ガス、およびその上空のコロナ領域では流体が支配的で磁場は乱流的である。一方、回転軸周りでは磁場が卓越しており磁気圏が形成される。ここでは、磁力線がほぼ放射状になっている。

ファンネル内の放射状磁力線に沿って相対論的速度にまで加速されるのだが、宇宙ジェット起源のモデルとして興味深い。

ブラックホール周りにおける磁気圏構造（プラズマや磁場の分布）の問題については、天体磁気圏の問題に固有の難しい問題が含まれる。ここで“難しい”と書いたが、その難しさの本質は、一般相対論の取り扱いとは別途に、古典力学の範疇において、未解決で残されている課題である。

例えば、定常状態の磁気圏における磁場やプラズマの分布を求める問題がある。理想磁気流体を仮定すると、プラズマ流体は磁力線に沿って流れるのだが、この磁力線間に働く力（ローレンツ力、慣性力、圧力勾配、重力）の釣り合い式を解くことになる⁹⁾。しかしながら、一般的に、解析的にも数値的にも解くことが困難であることが知られて

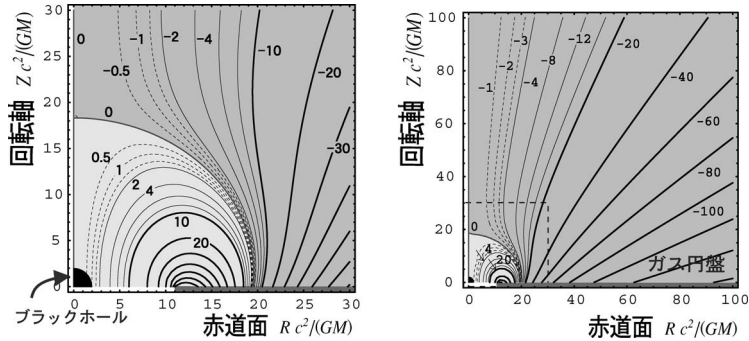


図2 ブラックホールの周りの薄い円盤が作る真空磁気圏¹⁾。図中の曲線は磁力線を示す。磁気圏は内側と外側の領域に二分される(境界を separatrix と呼ぶ)。Separatrix のすぐ内側の磁力線は、円盤とブラックホールをつないでいる。降着円盤内端の周りには、閉じたループ状の磁場構造が生じる。外側の磁気圏の磁力線は、遠方で放射状になる。

いる。この方程式は「Grad-Shafranov 方程式」として知られ、2変数の二階偏微分方程式で表される。磁気圏問題の場合、楕円型方程式の領域と双曲型方程式の領域が、磁気音速点で隣接する混合型を扱うことになる。この方程式は、系を特徴づける物理パラメーター（磁力線に沿った流れの保存量：円盤表面などでの境界条件により与える）をいくつか含むが、磁気音速点での“臨界条件”（ラバール管を通過する流れと同様の制限がある）を満足しなければならない。

この問題は、太陽磁気圏やパルサー磁気圏、また核融合プラズマの分野でもしばしば議論されている。それらの分野の知見・解法テクニックは、いずれブラックホール磁気圏にも拡張・応用されるであろう。しかし、それでもブラックホール磁気圏の場合、降着ガス円盤などプラズマ源において、いかなる境界条件を設定すべきか自体が未解決の問題になっているため、まだまだ多くの課題が山積している研究分野である。今後は、さまざまな方面からのアプローチが求められる。例えば、磁気圏とリンクした一般相対論的扱いによる降着円盤モデルの開発などだ。ここでは定常問題についての説明をしたが、時間発展問題としての数値シミュレーションによる長時間計算の結果との相互比較も必要になるだろう。

5. ブラックホール磁気圏のモデル

ブラックホール周りの磁気圏研究は、まだまだ未開拓の分野ではある。それでも、さまざまな角度からのアプローチが試みられている。磁気圏の磁場分布を求める戦略の一つとして、まずは“真空磁気圏解”を求める立場がある¹⁾。磁場は赤道面上のガス円盤内を回転方向に流れる電流（トロイダル電流）によって作られ、円盤の外側は真空であるとする。図2では、円盤内端あたりを中心とするループ状の磁力線と、遠方にまで伸びる開いた磁力線が示されている。内側のループ状の磁力線の一部は、ブラックホールを貫通しており、円盤内端よりやや外側の円盤表面とつながっている。一方、磁気圏の外側においては、十分遠方で放射状の磁場形状となる。実際の磁気圏には薄いプラズマが分布し、なにがしかの電流系を生じさせ、図2に修正を加えるはずである。とはいえ、真空磁気圏は、磁場が強くプラズマの慣性の効果が無視できて、磁気圏の回転が遅い場合には、近似解として有効である（ただし事象の地平面近傍は除く）。

磁場が十分強い場合でも、回転の効果が重要になってくるとき、ただし、プラズマの慣性項を無視できる状況は、force-free 近似により議論され

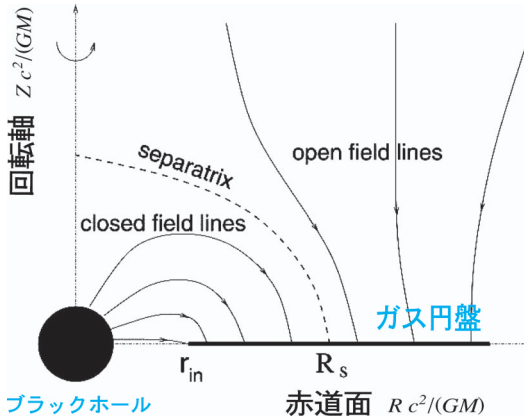


図3 ブラックホールの周りの薄いガス円盤が作るフォース・フリー磁気圏の概略図¹³⁾。磁気圏中を流れる電流のため、真空磁気圏からの変更が見られるものの、基本的な構造は同様である。

る。プラズマの慣性力による磁場の変形の効果は取り込まれてはいないが、磁気圏中にはプラズマが存在し、円盤と磁気圏プラズマからなる電流系が生じ、これが磁場構造を決めることになる^{12), 13), 15)}。図3には、force-free 近似での数値計算例（定常解）を示すが、基本的には上記の真空解と同様の磁場形状が得られている。プラズマの慣性力が重要である場合（GRMHD）については、一般相対論的取り扱いに拡張したベルヌーイ方程式や Grad-Shafranov 方程式が導出され^{14), 16)}、さらに磁場形状についても考察されている。ブラックホールと円盤表面の間をループ状につなぐ磁力線が示されるなど、上記と同様の構造が得られている。

ブラックホール近傍からの宇宙ジェット生成を主目的とした、GRMHD 数値シミュレーションも開発されてきた^{7), 8), 17)}。ジェットの形成と同時に、ブラックホールへの降着流も扱うことになるので、磁気圏の構造についての理解を得ることもできる。また、曲がった時空における、流体や磁気流体のダイナミクスについても議論が進められている。重力赤方偏移や時空の引きずりの効果は、ブラックホール周りの情報伝達（因果律）に深

くかかわるのだが、それらが構造形成にどのように関与するのか興味深い。最近では、3次元シミュレーション、輻射を取り入れたシミュレーションへの拡張が検討されている。こうして得られたダイナミカルな数値実験による磁気圏の磁場構造やプラズマ流の解と、定常問題として解析的に得られた解の擦り合わせが、今後は必要になる。

磁気圏全体を解く試みとは別に、一つの磁束管に沿った流れについての遷音速流（亜音速から超音速へと加速される流れ）¹⁹⁾ や、ブラックホール時空のゆがみが引き起こすであろう天体現象の研究においても、解析的手法やシミュレーション技法を利用したものなど、さまざまなアプローチがある。現状では、観測事実から理論モデルへの制約がそれほど強くないので、提案されている理論モデルもさまざまである。解析的手法とシミュレーション技法による研究領域には、同様のブラックホール研究を行っていても、それぞれの得意・不得意に由来する住み分けが生じている。つまり、研究手法の都合上、扱っている物理パラメーター領域が異なっていたりする。観測データによる制約がゆるい現状において、どちらかの結果のみを見て、ブラックホール天体に関する理解を得たと思ってしまうのは危険である。

6. ブラックホールの自転のエネルギーの抽出

ブラックホール候補天体が、ブラックホールであると見なせるときには、その集積質量が、どの程度の速度で自転しているかについても推定したい。ここでは、ブラックホールが自転している場合、その回転エネルギーが外部に抽出可能であることについて紹介しよう。特に、電磁流体による引き抜き機構について紹介する。大質量のブラックホールが高速で自転している際にもつ回転エネルギーは、膨大な量となる。実際にこのエネルギーを外部空間に抽出することができれば、重力

エネルギーとは別のエネルギー源を示したことになり、さまざまな高エネルギー天体現象を説明するうえで極めて重要な意味をもつことになる。

ブラックホールからの回転エネルギー抽出の機構としては、「ペンローズ過程」が有名である²⁰⁾。ブラックホール周りの「エルゴ領域」と呼ばれる領域において、負エネルギーの粒子軌道が存在可能であることを利用して、負エネルギー粒子をブラックホールに飲み込ませる機構、したがってブラックホールがエネルギーを失う機構である。粒子を負のエネルギー状態におくためには、エルゴ領域に外部から(正エネルギーの)粒子を投入し、分裂させ、一方の破片を負エネルギー状態に遷移させ、他方の破片はその差額のエネルギーを上乗せさせて外部へ逃す。こうすることで、入射時よりも大きなエネルギーが返ってくるというのだ。しかし、天体現象としての実現のためには、その条件にかなり厳しい制限があることが示されている。実際にこの機構が、(少なくともオリジナルのアイデアのまま)働いていることはないであろうと考えられている*2。

ブラックホール周りに磁気圏が形成されている場合には、ブラックホールの強重力と電磁場が相互作用することで、ブラックホールの回転エネルギーの抽出が可能になる¹²⁾。定常で軸対称の磁気圏においては、磁力線は一定の角速度で回転するのだが、一般に、ブラックホールの自転角速度とは独立に異なる値をもつ。自転するブラックホー

ルによる周辺時空の引きずりは、磁力線を背景の時空ごと、ブラックホールの自転方向に引きずり込むことになる。時空の引きずりの程度は、ブラックホールに近い領域ほど強く、離れるにつれて急激に弱くなる。磁力線は一定の角速度で剛体回転するが、ブラックホールからの距離に応じて、張りついている空間に対してのずれの程度が異なることになる。いま、磁力線を引きずっているのは背景の時空そのものであるのだが、差動回転する流体のアナロジーを用いて考えてみると、時空の引きずりが磁力線にトルクを与えていることが理解できよう。これにより、エネルギーや角運動量が輸送されるのである。

トルクの正負は、つまりエネルギー輸送の向き(内向きか外向きか)は、時空と磁力線の角速度の大小に依存する。自転しているブラックホールの角速度が、磁気圏の磁力線の回転角速度よりも大きい場合には、磁場により、ブラックホールの自転に対してブレーキとなるようにトルクがかけられる。ブラックホールの自転速度は遅くなり、回転エネルギーが失われる*3(図4右側を参照)。このとき、ブラックホールはエネルギーを失うものの、静止質量(irreducible mass)が減ることはない(「ブラックホールの面積増大則」は保証される)。逆に、磁力線の方が速く回転している場合には、ブラックホールはエネルギーと角運動量を得る。

磁気流体降着流を考えると、そのエネルギー・フラックスは電磁気成分と流体成分の和と

*2 ほかに、波の散乱によるブラックホールの自転エネルギー抽出の機構(super-radiance)がある。これは、自転しているブラックホールに向かって入射された波が、回転する時空(ポテンシャルの壁)によって散乱され、波の振幅が増幅されて跳ね返ってくるものである。波のエネルギーが増幅された分、ブラックホールの回転のエネルギーは減じる。

*3 定常で軸対称なブラックホール磁気圏において、事象の地平面を横切るポインティング・フラックスについて考えてみよう¹²⁾。地平面上でのフラックスは、導径方向(r 成分)のみなので、これを ε^r と書くと、 $\varepsilon^r = (\mathbf{E} \times \mathbf{B})_{\hat{r}} = E_{\hat{\theta}}^{\theta} B_{\hat{\phi}}^{\phi} \sim (\Omega_F B_{\hat{r}}) B_{\hat{\theta}}^{\theta}$ となる。 Ω_F は磁力線の角速度であり、添字の H は、事象の地平面の量であることを表す。この式中の電場と磁場は、理想磁気流体の条件により関連づけられている。事象の地平面での境界条件より、トロイダル磁場は $B_{\hat{\theta}}^{\theta} \propto (\omega_H - \Omega_F) B_{\hat{r}}^r$ となる。ブラックホールの場合、一般に、 $B_{\hat{r}}^r \neq 0$ となるところがミソである。これより、事象の地平面を横切るポインティング・フラックスは $\varepsilon^r \propto \Omega_F (\omega_H - \Omega_F) (B_{\hat{r}}^r)^2$ となる。ブラックホールの自転角速度が磁力線の角速度よりも大きくて($0 < \Omega_F < \omega_H$)、ブラックホールが磁気圏を引きずる恰好のときには $\varepsilon^r > 0$ となる。この場合、ブラックホールから外向きにエネルギーが引き抜かれていることがわかる。

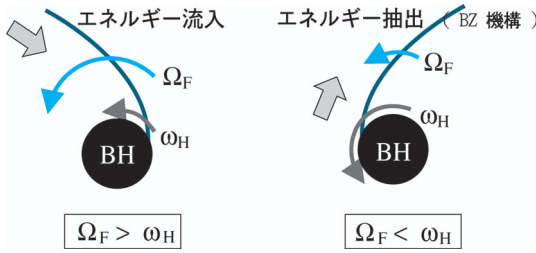


図4 ブラックホールと電磁場の相互作用. ブラックホールの自転角速度 ω_H が磁力線の角速度 Ω_F よりも大きい場合には、外向きのポインティング・フラックスが生じる. ブラックホールの角運動量と回転エネルギーが、磁気圏へ輸送されることになる.

して記述される. 事象の地平面を横切るエネルギー・フラックスの電磁気的な成分は、すでに述べたようにブラックホールと磁力線の角速度の大小に応じて外向きにも内向きにも流れる. 一方、流体に関するエネルギー成分は、一般に正のエネルギーをブラックホールに持ち込む（内向きに正のエネルギーの流れ）. ただし、磁場が卓越している場合には、負のエネルギーの流体が事象の地平面を横切って落下することが可能である. これは、磁気流体の降着に際し、プラズマ源からブラックホールに至るまでに、磁場成分と流体成分の間でエネルギーの転換が生じるからである. プラズマ源では内向き正のフラックスだった流体が、磁場と相互作用することで、地平面では負の内向きフラックスに転換するというのだ. この機構を、ペンローズ過程を拡張したものとして「MHD ペンローズ過程」という^{14), 18)}.

ブラックホールから電磁流体気的な機構により抽出されたエネルギーは、磁力線に沿ってプラズマ源に輸送される. 磁力線が円盤表面につながっている場合、そのつけ根の円盤表面（ループ状磁場の場合には円盤内端とは限らない）の輝度は増大するのかもしれない. あるいは、磁気圏に輸送されてきた電磁気的エネルギーは、ダイナモによる磁場増幅を引き起こすかもしれない（一般に、軸対称磁気圏の場合、ダイナモ機構は生じないと

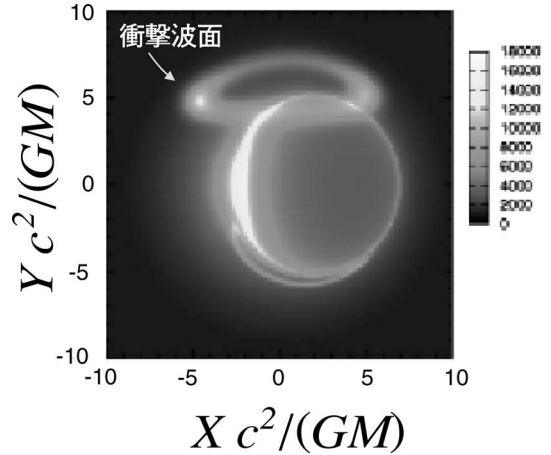


図5 ブラックホール・オーロラ. 磁気圏のループ状磁力線に沿って降着するプラズマ流は衝撃波を形成できる. 衝撃波発生によって生じた高温のプラズマは、あたかもオーロラのように観測されるだろう. (高橋芳太氏提供)

される. しかし、時空の引きずり効果は、それを可能とするのである. 何らかの磁気不安定性が生じたり、磁気リコネクションによるプラズマ加速が生じるなど、ブラックホールからのポインティング・フラックスとしてのエネルギー抽出は、ブラックホール磁気圏の活動性を高めるかもしれない.

ブラックホールへの降着流において、磁気圧勾配や遠心力（さらに時空の引きずりが作り出す「遠心力」）による減速が生じ「衝撃波」が発生する²²⁾. 衝撃波面 (fast MHD shock) の位置は、エルゴ領域のあたりに位置し、事象の地平面に近い(図5). この衝撃波面においては、静止質量エネルギーのオーダーの熱エネルギーが生成可能である. 熱化された超高温プラズマ領域は、高エネルギー放射の源となるだろうが、この放射には時空のゆがみの効果が有意に含まれることになる. 発生した放射は、ブラックホールに近い位置であることもあって、8-9割程度はブラックホールに飲み込まれてしまう. しかし、発生するエネルギー量が膨大であれば、遠方の我々にも十分観測可能と考えられる. 定量的な評価については、今後、

磁気圏モデルと降着円盤モデル（磁気圏モデルに境界条件を与える）の融合などが必要になる。

7. 何を観測すれば良いのだろうか？

ブラックホールが生み出す時空のゆがみ（曲率）の効果を調べるためには、例えば、光線の軌跡を調べてやれば良い。とりわけ、直接ブラックホールの像を見ることができれば、最も重力の強い環境についての情報を、直接得ることができる。ただし、ブラックホールそのものは光（＝電磁波）を出さないで、ブラックホールが作る強重力の中であって、ブラックホールの周りで光り輝いている天体を見ることになる。これは、福江氏の記事（前々号）にもある、「ブラックホール・シャドウ」である。このシャドウの発見は、「事象の地平面」の存在確認にもつながる重要な研究である。ブラックホール・シャドウが期待どおり発見されたら、すなわち“ブラックホール発見”というニュースは、研究者に限らず、一般の人々にも大きなインパクトを与えることになるだろう。そのためのプロジェクトは、もう始まろうとしている（前号、前々号参照）。

ブラックホール時空における降着円盤の回転運動およびプラズマの状態については、円盤内縁領域における、鉄などの輝線スペクトル観測により知ることができる。スペクトル線に現れる、ドップラー効果と重力赤方偏移を精度良く知ることができれば、ブラックホールの自転角速度を知ることができる。これは、ブラックホールの自転により、周りの時空と一緒に“引きずられて”回転させられることを意味し、「時空の引きずり」効果の検証となる。理論的には、何らかの輝線が観測されれば、そこに重力赤方偏移およびプラズマの運動状態の情報を見ることができる。実際の観測においては鉄輝線が用いられるのだが、現状のX線観測からは必ずしも有意な結果は得られていない。観測対象によって、見えていない場合もあれば、実は存在していても見つかっていない場合も

あるのだろう。統一の見解は得られていないのが現状のようだ。観測される鉄輝線がブラックホール近傍を起源とするという理論、および実際の鉄輝線の観測についての詳細は次々号で紹介する。

降着ガス円盤の内端領域や、さらに内側で事象の地平面に迫る領域での降着流における天体現象も、時空のゆがみの情報を提供するものとして期待できる。例えば、ブラックホール候補天体など、コンパクトな天体において、準周期振動（QPO）が観測されている。これは、降着ガス円盤の最内縁部である種の振動現象と考えられている（加藤氏の記事参照）。この円盤振動の機構の解明が進めば、ブラックホール天体の質量や自転（スピン）といった時空の情報が得られるだろう。

円盤最内縁部よりさらに内側の領域の時空構造を知るためには、円盤からブラックホールに降着する流れの物理過程を理解しなければならない。この領域で、重力エネルギーを輻射エネルギーに変換する過程の一つとして、衝撃波形成が重要になる。重力で加速され落下していくガスの運動エネルギーは、衝撃波が発生することで高エネルギー輻射のエネルギーに変換可能である。そこでは、どのような機構・効率でエネルギー変換が行われるのか。また、安定なのか、不安定なのか。そのダイナミクスにも、時空のゆがみの効果が関与することになるので興味深い（長倉氏の記事参照）。

ブラックホールの周りの時空構造を抽出するためには、大局的磁気圏としての活動性に注目するのも方策の一つである。降着円盤や磁気圏中を流れる電流が作る（大局的な）磁力線は、円盤表面からブラックホールにまで伸びて、ブラックホール領域を貫くことが可能である。ブラックホールは、磁力線を介して、ブラックホールから離れた領域に作用を及ぼすことができる。例えば、宇宙ジェットに物理に磁場が重要な役割を果たしているとして、ブラックホールから遠く離れた領域での観測データの中にブラックホール時空の情報が

紛れている可能性がある。理論的には、ブラックホールの境界条件が、宇宙ジェットの高磁気プラズマ構造の安定性あるいは不安定性を支配し、その大局的構造にブラックホールの時空構造を反映させることが可能であるからである²¹⁾。このように、ブラックホールの周りでの重力場と電磁場の相互作用を利用して、一般相対論効果を抽出することが可能である。

8. 「観測的ブラックホール天文学」時代に向けて

ブラックホールが作る強重力場でのプラズマ物理研究によって、ブラックホール時空に固有の性質は見つかるだろうか。局所的な系でのプラズマ現象については、太陽磁気圏や地球磁気圏あるいはパルサー磁気圏の研究で知られている現象が生じているに過ぎないのかもしれない。つまり、流体と一緒に運動する系の上では、特に新しい現象が見つかるわけではないのかもしれない。しかしながら、(局所的ではなくて)大局的にその流体の運動を追跡してみると、重力場の効果ゆえにわれわれにとって目新しい現象となっているかもしれない。遠方のわれわれが観測する座標系へと座標変換するとき、ブラックホール時空に固有な性質が紛れ込むのだ²³⁾。この性質とは、基本的には「重力赤方偏移」と「時空のゆがみ」によるものであるが、特に自転しているブラックホールにおいて見られる「時空の引きずり」の効果の検証は、とりわけブラックホール研究を魅力的にするだろう。

今後、さまざまなブラックホール観測プロジェクトが立ち上がり、詳細な観測データが得られるようになるだろう。観測データは、曲がった時空における流体や電磁流体の複雑な相互作用の結果として得られるはずだ。したがって、降着円盤や磁気圏の物理が支配する現象と、ブラックホール時空(曲がった時空)に固有な現象とを、きちんと区別する必要がある。また、曲がった時空に対し

て何を期待するのか、どのような物理量に着目して観測すべきかを提案したり、得られたデータをいかに解釈すべきかなど考察する必要もある。このような部分において、理論天文学やプラズマ物理学、相対論分野の果たす役目は重要になるであろう。これらの分野を融合していくことで、きたるべきブラックホール観測時代に向けて、多角的な視点からのモデル構築を仕上げていかなければならないと思う。ブラックホールの発見は観測天文学者の仕事かもしれないが、またそれは「重力理論への制限はあるのか?」、「ブラックホール以外の(未知の物質による)天体の可能性は?」などの、物理学者の問いにも答えることになる。それは、「一般相対性理論の検証」を導くか、あるいは「新たな重力理論」への糸口になるのかもしれない。時空構造までを考慮して構築された“天体ブラックホール”の理解は、まだ始まったばかりなのである。

謝辞

本稿は、2009年3月日本天文学会春季年会にて開催された、企画セッション『BH時空』の動機・背景を捕捉するものとして執筆した。理論的側面が中心となったが、特にブラックホール時空および磁気圏環境については、富松 彰氏と小林太一氏の講演、高橋芳太氏の講演が参考になった。また、降着ガス円盤・降着流(衝撃波の安定性/不安定性)については、それぞれ加藤正二氏、長倉洋樹氏の講演と月報記事(来月号掲載)が参考になった。重力理論については、齊田浩見氏との議論が有益であった。これらの方々に深く感謝します。最後に、本特集の企画においてお世話になった三好 真氏、根来 均氏に感謝します。

参考文献

- 1) ソーン K. S. (林 一, 塚原周信 訳), 1994, ブラックホールと時空の歪み, 白揚社; テイラー E. F., ホイラー J. A. (牧野伸義 訳), 2004, 一般相対性理論入門: ブラックホール探査, ピアソン・エデュケーション
- 2) Miyoshi M., et al., 1995, *Nature* 371, 127
- 3) Ghez A. M., et al., 2005, *ApJ* 620, 744
- 4) Kato S., Fukue J., Mineshige S., 2008, *Black-Hole Accretion Disks—Towards a New Paradigm* (Kyoto University Press, Kyoto)
- 5) Breton R. P., et al., 2008, *Science* 321, 104
- 6) Psaltis D., 2008, astro-ph/0806.1531
- 7) Mckinney J. C., Gammie C. F., 2004, *ApJ* 611, 977
- 8) Mckinney J. C., 2006, *MNRAS* 368, 1561
- 9) Sakurai, T., 1985, *A&A* 152, 121; Sakurai T., 1990, *Computer Phys. Report* 12, 247; Keppens R., Goedbloed, J. P., 2000, *ApJ* 530, 1036
- 10) 高橋真聡, 富松 彰, 1991, *日本物理学会誌* 46, 835
- 11) Tomimatsu A., Takahashi M., 2001, *ApJ* 552, 710
- 12) Blandford R. D., Znajek R. L., 1977, *MNRAS* 179, 433
- 13) Uzdensky D. A., 2005, *ApJ* 620, 889
- 14) Takahashi M., Nitta S., Tatematsu Y., Tomimatsu A., 1990, *ApJ* 363, 206
- 15) Komissarov S. S., 2005, *MNRAS*, 359, 801
- 16) Nitta S., Takahashi M., Tomimatsu A., 1991, *Phys. Rev. D* 44, 2295
- 17) Koide S., Meier D. L., Shibata K., Kudo S., 2000, *ApJ* 536, 668; 小出眞路, 2009, *日本物理学会誌* 64, 373
- 18) Hirotani K., Takahashi M., Nitta S., Tomimatsu A., 1992, *ApJ* 386, 455
- 19) Takahashi M., 2002, *ApJ* 570, 264
- 20) Wagh S. M., Dadhich N., 1989, *Phys. Report* 183, 137
- 21) Tomimatsu A., Matsuoka T., Takahashi M., 2001, *Phys. Rev. D* 64, 123003
- 22) Takahashi M., Goto J., Fukumura K., Rilett D., Tsuruta S., 2006, *ApJ* 645, 1408
- 23) Takahashi M., Koyama H., 2009, *ApJ* 693, 472

Black-Hole Spacetime and Magnetosphere**Masaaki TAKAHASHI**

Department of Physics and Astronomy, Aichi University of Education, Kariya, Aichi 448-8542, Japan

Abstract: Black holes are most mysterious astrophysical objects with the strongest gravitational field in the universe. Although many black-hole candidates are observed in the center of galaxies and X-ray binaries, there are no direct observational evidences for existing real black holes. In this paper, I review the present theoretical models of a black hole magnetosphere, where high-energy astrophysical phenomena in the curved spacetime are expected. Then, I discuss the prospect of probing with observations in the electromagnetic spectrum for black hole systems.