

ブラックホール磁気圏における MHD 波とプラズマ不安定性

MHD waves and plasma instabilities in black hole magnetospheres

富松 彰 [1]

Akira Tomimatsu[1]

[1] 名大・理・物理

[1] Department of Physics, Nagoya Univ

ブラックホールの周辺には強重力によってプラズマが集積しており、MHD 相互作用を通じて高エネルギーの天体現象が生起されると考えられている。このブラックホール磁気圏に関する軸対称・定常構造の解析では、磁力線の回転角速度が小さい場合には、回転ブラックホールから周辺のプラズマにエネルギーが供給されることが知られている (Blandford-Znajek 過程)。また、観測されているようなプラズマジェット形成を説明するものとして、回転軸方向への磁気流体の加速とコリメーションが磁気圏において起きることも指摘されている。ただし、大域的な磁気圏構造を決定することは数学的に非常に困難であり、ブラックホールからのエネルギー抽出や周辺でのジェット形成の有効性については、あまり明快には理解されていない。そのため、最近では、適当な初期条件を設定して、一般相対論的な MHD 方程式を数値的に解くという手法が発展してきた。これはダイナミカルなレベルでジェット形成などの問題にアプローチするものであるが、得られた結果が初期条件に依存した過渡的な現象を示しているのか、定常的な構造に至るものかを判定することは困難である。

上記のような定常構造の解析とダイナミカルな数値計算の間を結ぶ研究として、定常平衡解に対する摂動の時間発展を考察することが重要になる。本講演では、電磁場のエネルギー密度が流体のエネルギー密度より卓越している極限において (Force-Free 近似)、線形摂動の立場からいくつかの話題を紹介することにする。相対論的な MHD 波の研究は古くからなされており (例えば、Alfvén 波や磁気音波の分散関係について、Lichnerowicz 1967)、回転ブラックホール磁気圏への応用が試みられてきた (詳しい解析については、Uchida 1997)。例えば、ブラックホールの表面近くでは、流体成分の変動強度が増大するため、Force-Free 近似は破綻することが示され (Hirovani, Tomimatsu & Takahashi 1993)、その近似に基づく数値計算は表面上の境界条件における因果律の破れという観点から問題があることが指摘されている (Punsly 2004)。もちろん、このような表面近傍の問題を除けば、Force-Free 近似をブラックホール磁気圏にも適用することは可能である。

定常磁気圏における Blandford-Znajek 過程はブラックホールの質量とスピンを減少させる過程であった。この過程と競争するものとして、周辺部の擾乱によって発生した MHD 波が伝播・降着していく過程もブラックホールの進化を考える上で興味深い。従来の MHD 波の取扱は短波長の幾何光学近似に基づくものであったが、光円柱と呼ばれる境界面を通過してブラックホールまで到達する波の伝播を明らかにするためには大域的な波動解を構築しなければならない。このような大域的な波の伝播は真空中での電磁波や重力波についてはよく調べられているが、ここでは、モノポール型の定常磁場を背景として伝播する長波長の軸対称 MHD モードによる弱回転ブラックホールへのエネルギー輸送について報告する (Onda, Mitsuda & Tomimatsu 2006)。そして、遠方での磁場摂動の強度とブラックホールの質量 (およびスピン) 変化率との関係を示したい。

一方、フレア的な輻射エネルギーの放出との関連において、ブラックホール磁気圏におけるプラズマ不安定性の問題が議論されている。回転磁気圏では磁場のトロイダル成分が生成されるため、ブラックホールから遠方まで伸長している磁力線ではスクリュウ型不安定が発生する可能性がある。ただし、その不安定性の判定については古典的な Kruskal-Shafranov 条件が採用されることが多い (例えば、Gruzinov 1999, Li 2000, Wang et al 2004)。本講演では、相対論的な摂動解析により (Tomimatsu, Matsuoka & Takahashi 2001)、磁力線の回転にはスクリュウ型不安定性を抑制する効果があることを指摘したい。この不安定性は Blandford-Znajek 過程の効率と密接に関連するものであると共に、ガンマ線バーストのような天体現象にも適用されるものであり、今後の詳細な解析の発展が期待される。