

ブラックホール降着流の輻射磁気流体シミュレーション

小田 寛 (上海天文台)

利用カテゴリ XT4B

ブラックホール降着円盤は、銀河系内ブラックホール候補天体、超光度 X 線源 (ULX)、活動銀河中心核 (AGN) 等の活動性の起源であると考えられており、降着円盤起源と考えられる輻射やジェットは周囲の物質の進化にも影響を及ぼす。これらの系は規模や状況は異なるものの共通する物理が多く、ブラックホール降着流の物理機構を解明することは理論天体物理学最大の課題である。

銀河系内ブラックホール候補天体の急激に増光するフェイズでは、X線スペクトルは暗く Power-Law 成分が支配的な Low/Hard 状態から、明るく熱的成分 (黒体放射成分) が支配的な High/Soft 状態へ遷移する (Hard-to-Soft 遷移と呼ばれる)。この遷移は質量降着率の増加に伴う、光学的に薄く高温 (電子温度 $T_e \sim 10^{9.5}$ K) な放射非効率降着流 (RIAF; Narayan & Yi 1995) から光学的に厚く低温 (有効温度 $T_{\text{eff}} \sim 10^7$ K) な標準円盤 (Shakura & Sunyaev 1973) への遷移で説明される (図1)。近年これらの典型的なもの他に様々な状態遷移が報告されている。

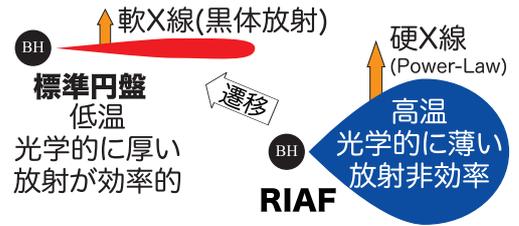


図1: 標準円盤、RIAF、及び Hard-to-Soft遷移の模式図

Hard-to-Soft 遷移には、明るく (エディントン光度の 30%程度以上) Power-Law 成分が支配的な Bright/Hard 状態、非常に明るく (エディントン光度程度) 熱的成分と傾きが急な Power-Law 成分が同程度の Very High/Steep Power-Law (VH/SPL) 状態を経由する「明るい Hard-to-Soft 遷移」と、これら比較的明るい状態を経由しない「暗い Hard-to-Soft 遷移」が報告されている (e.g., Gierlinski & Newton 2006)。スペクトル解析の結果から Bright/Hard 状態では電子温度が低く、また電波観測から Bright/Hard 状態から VH/SPL 状態への遷移中に相対論的ジェットの噴出も示唆されている。

Oda et al. (2007, 2009, 2010) は磁場を考慮したブラックホール降着円盤の一次元定常モデルにより、Bright/Hard 状態は光学的に薄い磁気圧優勢円盤によって説明でき、明るい Hard-to-Soft 遷移は磁気圧優勢円盤を経由する遷移である可能性がある事を示した。しかし何故磁気圧優勢円盤を経由する遷移とそうでない遷移に分岐するのか、磁気圧優勢円盤はその後どのように VH/SPL 状態へ遷移するのか、ジェット噴出の物理機構は何か等ははまだ解っておらず、解析的な手法では限界がある。本研究では輻射磁気流体コードを用いて、光学的に薄い領域から厚い領域まで含めたブラックホール降着円盤の時間発展を大局的にシミュレートする。特に質量降着率上昇に伴う光学的に薄い円盤から厚い円盤への状態遷移過程を重点的に調べる事を目的とした (図2)。

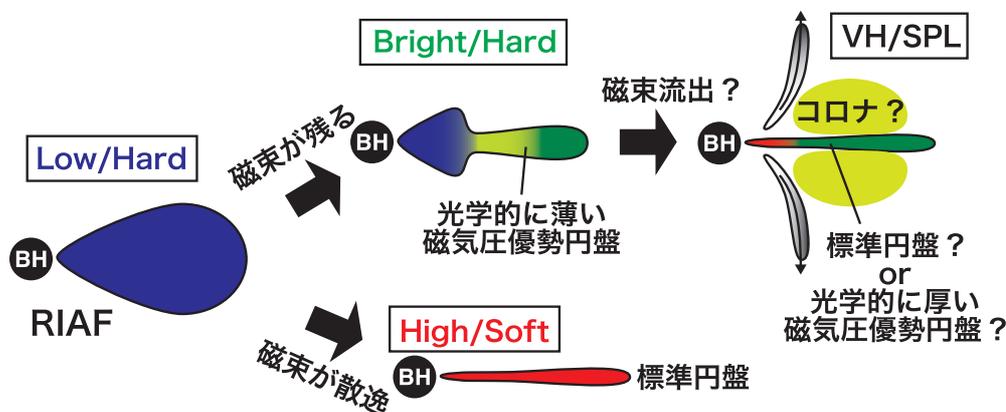


図2: 予想される明るいHard-to-Soft遷移(上の経路)と暗いHard-to-Soft遷移(下の経路)の模式図

磁気流体計算については宇宙磁気流体統合ソフトウェア CANS に含まれる磁気流体コードを用いる。輻射輸送計算部分には、輻射流束と輻射エネルギー勾配を関係付ける流束制限拡散近似 (FLD 近似; Levermore 1981) 及び輻射フラックスの時間発展の式を基礎方程式に含めるモーメント法(M₁法; Gonzales 2007)を用いる。FLD近似は計算コストが少なく実装が容易であるというメリットがある反面、光学的に厚い領域以外では必ずしも良い近似とはならないというデメリットがある。M₁法は計算コストはやや増えるものの、光学的に薄い領域でも比較的精度良く解ける。要求される計算コスト・精度に応じてこれらの手法を使い分ける。また、ブラックホール近傍の降着円盤では特徴的な速度が光速に近づくため、磁気流体部分についてのクーラン条件から決まる時間刻み幅が小さい事から、輻射磁気流体計算においても陽的差分を用いた(但し、エネルギー式の物質と輻射場の相互作用の項は Turner & Stone 2001 の代数的に解く手法を用いて陰的に解いた)。

FLD近似を用いた輻射流体モジュールの実装は完了し、一次元問題のテスト計算を行った。磁気流体波及び光学的に厚い場合の輻射の波等の一般的なテスト問題はクリアした。しかし光学的に薄い場合の輻射エネルギーの波の伝播のテスト計算において未解決の問題が残った。光学的に薄い極限では、輻射エネルギーの波面はほぼ光速で伝播する事が期待される。しかしテスト計算の結果は光速の約半分程度でしか伝播していない(図3)。考えられる原因としては、物質と輻射場の相互作用以外の輻射流体計算部分を陽的に解いている事が上げられるが、一時的な解決策として時間刻み幅を意図的に非常に小さくしても改善が見られない事からこの事が原因ではない可能性がある。一方FLD近似を用いた手法では、光学的に薄い場合、陽解法では不安定になる可能性もある。現在、原因を調査中である。

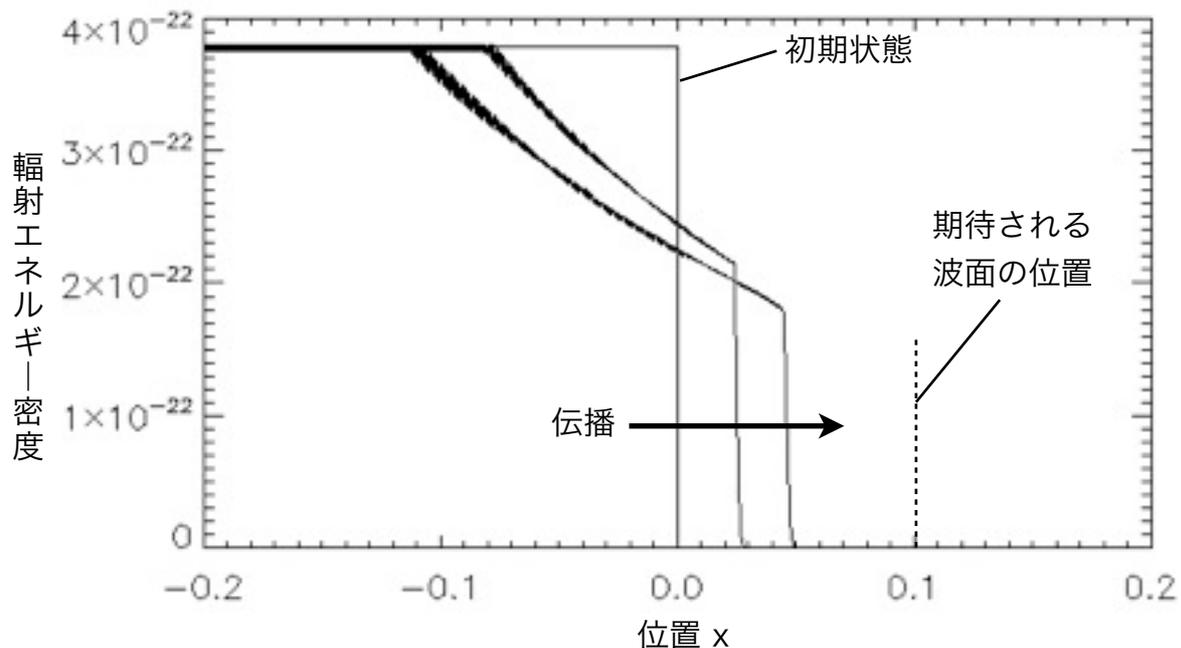


図3: 輻射エネルギーの波の伝播のテスト計算結果。時間経過と共に輻射エネルギーの波面が右側へ伝播。