平成 20 年度国立天文台天文シミュレーションプロジェクト成果報告書

三次元輻射磁気流体力学シミュレーションを用いた
標準降着円盤モデルの構築

廣瀬重信 (海洋研究開発機構)

利用カテゴリ　XT4A ・ SX9A

光学的に厚く幾何学的に薄い＝標準降着円盤の α モデル (Shakura & Sunyaev 1973) は、長らく、観測・理論双方において降着円盤研究の礎となっている。その理由の一つは、定常・one zone 近似・α ストレス（ストレスは圧力に比例する）を仮定することで、基礎方程式である輻射流体力学方程式が簡単な代数方程式に帰着し、扱いやすい解析解が得られているからであろう。しかし、これらの基本的な仮定は、降着円盤のストレスが（磁気回転不安定性が生み出す）磁気乱流起源であるとする現在の考え方とは矛盾する。実際、α モデルは、多くの観測事実を説明することに成功を収めている一方で、問題点も存在する。例えば、α モデルは、輻射圧優勢な領域で熱的に不安定になることが知られている (Shakura & Sunyaev 1976)。ところが、観測的には、輻射圧優勢な領域が存在すると考えられる場合でも、（一部の例外を除いて）熱的に不安定な兆候は存在しない。そのため、α モデルで仮定されているストレスの圧力依存性を修正して熱的安定化を図るモデルがいくつか提案されているが、それらの修正を正当化する十分な理由は見つかっていない。

本研究の目的は、α モデルの仮定の一切を排除し、「ストレスが磁気乱流起源である」という第一原理から、標準降着円盤のモデルを構築することにある。具体的には、3 次元輻射磁気流体シミュレーション（流束制限拡散近似）を用い、垂直方向の成層を考えたシアリングボックスにおいて（力学的かつ）熱的に平衡な解を求める。

本年度は、特に、（α モデルでは熱不安定となる）輻射圧優勢な領域をターゲットとしてパラメータを設定し、計算を行った。その結果、熱時間に比べて十分長い時間に渡って、力学的かつ熱的平衡に落ち着く解を得ることが出来た (Hirose, Krolik, & Blaes 2009)。この平衡解は以下の特徴を持つ。1) energy dominance:（時間平均した）輻射エネルギーは、ガスエネルギーの約 20 倍。（この値は α モデルの熱安定限界より十分大きい。）2) hydrostatic equilibrium: 赤道面近傍は輻射圧で、上部（ただし光球面よりは下）はローレンツ力で支えられている。3) energy dissipation: エネルギー散逸分布は、スケールハイト程度にダブルピークを持つ。4) thermal equilibirum: 散逸エネルギーを円盤表面まで輸送する手段としては、radiation diffusion だけでなく、radiation advection も重要な役割を果たす。後者は、円盤に励起される音波モードの振動に付随する。

α モデルでは熱的不安定になる輻射圧優勢な状況にもかかわらず、本シミュレーションで得られた解が熱的に安定になる理由は、α モデルで仮定されるストレスと圧力の瞬間的な相関が、熱時間よりも十分に長い時間平均としてしか成り立たないからである。ストレスに伴うエネルギー散逸によって圧力が変動するが、それには熱時間程度の（物理的に自然な）タイムラグが存在する。したがって、磁気乱流によって、ダイナミカルなタイムスケールで、カオス的変動をするストレスの変動には圧力は追随しないので、α モデルのようなストレスと圧力の間の正のフィードバックが働かないのである。実際、ストレスと圧力の間にタイムラグを許せば、「独立なストレスの変動が圧力の変動を生み出し、それによってストレスと圧力の相関関係は得られる一方で、熱的な安定性も保たれること」を簡単なトイモデルによって示すことができる。