

ブラックホール降着流の物理

Physics of Black-Hole Accretion Flow

嶺重 慎[1]

Shin Mineshige[1]

[1] 京大・理・宇宙物理

[1] Dept. of Astron. Kyoto Univ.

ブラックホール降着流（降着円盤）の理論を概観する。ブラックホールは、X線連星系と呼ばれる近接連星系及び、活動銀河核の中心に存在していると信じられている。もちろんブラックホール自体は見えないので、ブラックホールの観測とはその周りに存在するガスからの電磁波、主にX線からガンマ線を捉えることになる。そこで前半では、標準円盤、光学的に薄い移流優勢流(ADAF)、光学的に厚いADAFの三種類の円盤モデルをとりあげ、その放射スペクトルを観測との比較のもとに議論する。後半では、観測の複雑な時間変動を紹介したのち、その意味するところを磁場の振る舞いに重点をおいて理論的に考察する。

宇宙を可視光で観測すると、核反応によりエネルギー生成して明るく光っている星や、星の集まりである銀河が多数見える。しかしX線で宇宙を見ると状況は一変する。すなわち、コンパクト天体に降り積もるガスが、その重力エネルギーの解放により光っている天体が多数見えてくる。その放射放出の温床が降着円盤であり、降着円盤がありさえすれば本来放射を出さないはずのブラックホールさえ明るく光り、X線等で観測できるようになる。現在のところ天体物理学的なブラックホールは、X線連星系と呼ばれる、コンパクト天体とふつうの星からなる近接連星系と、活動銀河核や、時に通常銀河の中心に存在していると信じられている。では、そのようなブラックホール天体はどのようなスペクトルを示し、またどのような時間変動を発現するのだろうか。またそれらの観測的特徴は、理論的にどのように理解されているのだろうか。

そこで前半では、降着円盤の代表的なモデルをいくつかとりあげ、それらの構造特性、放射過程と放射スペクトルを、X線連星系、活動銀河核それぞれの観測との比較のもとに議論する。とりあげる円盤モデルは標準円盤、光学的に薄い移流優勢流(ADAF)、光学的に厚いADAF (slim disk)の三種類である。標準円盤は1973年にシャクラとスニアエフにより提唱されたもので、降着に伴い解放された重力エネルギーを効率よく放射に換えて明るく光る点に特徴がある。残りの二種類の円盤モデルは最近注目されているもので、光学的に薄いプラズマゆえ、あるいは光子が厚いプラズマ雲にはばまれて外に出て行くのに時間がかかるゆえ、放射を出す効率が悪く、重力エネルギーの一部（あるいは大部分）がそのままブラックホールに飲み込まれて、標準円盤ほど明るく光らない種類の降着流である。

ところでX線連星系は二つのスペクトル状態、軟X線の黒体放射成分が卓越するソフトステートと、硬X線ーガンマ線領域に至る、べき成分が卓越するハードステートを示す。前者は標準円盤で、後者は光学的に薄いADAFで基本的に説明できる。一方活動銀河核は、電波からガンマ線にいたるべき型スペクトル成分と、紫外線域にみられるスペクトルの盛り上がり (Big Blue Bump)成分が共存しており、前者が標準円盤的、後者が光学的に薄いADAFあるいは円盤コロナと考えられているが、まだまだ議論が続いている。また光学的に厚いADAFは比較的高温の黒体スペクトルを示し、最近注目されているジェットソースや、狭輝線I型セイファート銀河に相当するのではないかと考えられる。このあたりの概略を最新の観測やわれわれの理論研究の成果もふまえて紹介する。

後半では、ブラックホール候補天体に特有の現象、複雑な時間変動について議論する。時間変動には短時間変動と長時間変動とがある。長時間変動はX線連星系に見られるもので（活動銀河核にも存在するかもしれないが、変動時間が人間の寿命をはるかに越える故認識され得ない）、X線新星とよばれる、数十年ごとに起こる準周期的な爆発現象が代表的なものである。この爆発は現在のところ、T Tauri 星の爆発現象であるFU Ori 現象と同じく、降着円盤の熱不安定性で説明するとする説が有力である。この円盤不安定モデルの基本と各種円盤モデルとの関わり、伴星の潮汐力に伴う不安定性との相互作用について、解説する。また短時間変動はX線連星系・活動銀河核の双方に見られるもので、無数の、さまざまな規模のフレアの重ね合わせと見ることができる。またそのパワースペクトルの計算より $1/f$ ゆらぎの一種であることが示されている。これらの特徴は、差動回転をしている円盤の中で磁場が増幅されて空間非一様構造（フラクタル構造）を形作り、そこにランダムに磁気リコネクションの火がついて大小さまざまな規模のフレアを発生したとすれば基本的には説明できることを示す。さらにゆらぎ発生の理解のため、地震のダイナミクスの理解にも用いられることがある自己組織化臨界(Self Organized Criticality)の概念を導入し、地震や太陽フレア、そしてブラックホール天体からのゆらぎに共通する物理過程の理解を試みる。