

電波天文学特論 II 2008-11

13 ブラックホール

13.7 AGN のエネルギー

AGN の莫大な放射を説明する機構としてブラックホールエンジン説が提唱され、実際に AGN の中心部にブラックホール天体が発見されて、現代天文学においては AGN = ブラックホールというシナリオが確立している。以下では、実際に AGN のエネルギーをブラックホールでオーダー評価的に説明してみる。まず、AGN の光度として、 $L \sim 10^{12} L_{\odot}$ ($= 4 \times 10^{38}$ W) 程度を考えよう。これは銀河全体よりも明るく輝く QSO レベルの光度に相当する。一方、ニュートン的なアプローチではシュバルツシルトブラックホールのエネルギー解放効率 $\epsilon = 1/12$ で、カーブラックホールの場合それよりも大きくなるから、ここではオーダー評価的に $\epsilon = 0.1$ を採用する。このとき、この AGN の光度を説明するのに必要な質量降着率 \dot{M} は、

$$L \sim \epsilon \dot{M} c^2, \quad (1)$$

より

$$\dot{M} \approx 0.7 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$$

となる。すなわち、1年に太陽1個分程度の質量をブラックホールに落としこめば、銀河全体を上回る莫大なエネルギーを解放することができる。

一方、このようなエネルギーを解放するのに必要なブラックホールの大きさを考えよう。莫大な光度による輻射圧に逆らって物質を降着させるには、ブラックホールの重力が充分強くなければいけない。球対称の場合に、重力と電離ガスに働く輻射がつりあう光度はエディントン光度と呼ばれ、以下で与えられる。

$$L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi cGM}{\kappa} = 3.2 \times 10^4 \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) L_{\odot} \quad (2)$$

ここで、 κ は単位質量辺りの散乱断面積であり、陽子質量 m_p と電子のトムソン散乱断面積 σ_t を用いて $\kappa = \sigma_T/m_p$ 、と書くことができる。今考えている AGN の $10^{12} L_{\odot}$ という光度がエディントン光度を超えないためには (すなわち重力が輻射圧に勝って降着が起きるには)

$$M > 3 \times 10^7 M_{\odot}, \quad (3)$$

が必要である。すなわち、AGN の中心には太陽質量の数千万倍という超巨大質量ブラックホールが必要であることがわかる。上記の議論から、 $L = 10^{12} L_{\odot}$ は、 $M \sim 10^8 M_{\odot}$ 、 $\dot{M} \sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$ というブラックホールがあればエネルギー的には十分に説明できることがわかる。

13.8 降着円盤

ブラックホールに落ち込む物質はその角運動量によってブラックホールの周囲を回転し、降着円盤を形成する。この降着円盤中のガスが落ち込む際にエネルギーを解放することで上記のような莫大なエネルギーが生み出される。降着円盤には降着率などに応じていくつかの状態があることが知られておる。以下では標準降着円盤と ADAF (Advection Dominated Accretion Flow : 移流優勢円盤) 円盤について簡単に議論する。

13.9 標準降着円盤

標準降着円盤は、物質が粘性によって解放する重力エネルギーを局所熱平衡状態にある円盤からの黒体放射によって局所的に放射する、という円盤であり、降着円盤の中で最も基本的な描像のものである。この円盤の温度は以下のような議論から求めることができる。

まず、質量 M のブラックホールを考え、その周りを質量 m の粒子が半径 R の円運動をしているとする。その粒子のエネルギーは

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{R} = -\frac{GMm}{2R}, \quad (4)$$

と書くことができる。ここで、最後の等式はケプラー回転の速度 $v = \sqrt{GM/R}$ を用いた。この粒子が半径 ΔR だけ半径が小さい円軌道に落ち込んだ際に解放されるエネルギー ΔE は、

$$\Delta E = \frac{GMm}{2R^2}\Delta R, \quad (5)$$

と表される。半径 R 、幅 ΔR のリング全体を考えると、このリングを通じて単位時間当たりに降着する質量は \dot{M} であるから、このリングから単位時間当たりに解放されるエネルギー ΔL は

$$\Delta L = \Delta E \frac{\dot{M}}{m} = \frac{GM\dot{M}}{2R^2}\Delta R, \quad (6)$$

である。これを局所熱平衡 (温度 T) の黒体放射として解放していることから、 ΔL は、

$$\Delta L = 2 \times 2\pi R \Delta R \times \sigma T^4 \quad (7)$$

を満たす。ここで右辺の最初のファクター 2 は円盤の両面 (裏表) に対応し、第 2 項目はリングの面積、第 3 項目の σT^4 は黒体の光度を表すシュテファンボルツマンの法則である。式 (6) と式 (7) が等しいとすると、標準降着円盤の温度 T は

$$T = \left(\frac{GM\dot{M}}{8\pi\sigma R^3} \right)^{1/4}, \quad (8)$$

となる。これが標準円盤の温度を与える式である。標準円盤からの放射のスペクトルは、上記の温度を持つ黒体放射の重ねあわせにより得ることができる。

前述のAGNの例 ($L = 10^{12}L_{\odot}$) にて、最内安定円軌道 (ISCO) 近傍の温度を評価すると、

$$M \sim 10^8 M_{\odot}, \quad R \sim 3r_g \approx 10^9 \text{ km}, \quad \dot{M} \sim 1M_{\odot}/\text{yr}$$

より、

$$T \approx 2 \times 10^5 \text{ K},$$

を得る。すなわち、このようなAGNの円盤の内側は紫外線から X 線を放射する領域となる。一方、VLBI の観測可能な輝度と比べると上記の温度は桁違いに小さく、熱的な放射としてこのような標準円盤を VLBI 観測することは極めて難しい。

13.10 低光度 AGN と ADAF 円盤

一方、上記のAGNよりずっと光度が小さいAGN (Low Luminosity AGN) においては、標準円盤的な描像は成り立たない。これは、降着率 \dot{M} が小さいために円盤の光学的厚み τ が小さく、そのために放射効率が悪くなり、結果として重力エネルギーは円盤から輻射とし解放されずガスの内部エネルギーとして蓄えられる。このために解放される重力エネルギーは円盤の温度を上昇させながら、最終的にはブラックホールに吸い込まれる。このような円盤は ADAF (Advection Dominated Accretion Flow) または RIAF (Radiation Inefficient Accretion Flow) などと呼ばれる。ADAF/RIAF 円盤で説明される典型例は我々の天の川銀河の中心にある超巨大ブラックホール Sgr A* である。

仮に、Sgr A* に標準円盤を適用すると、観測的に求まっている Sgr A* のパラメーター $M \sim 4 \times 10^6 M_{\odot}$ 、 $L \sim 2.5 \times 10^3 L_{\odot}$ を用いると、 $\dot{M} \sim 2 \times 10^{-9} M_{\odot}/\text{yr}$ 、 $T \sim 7000 \text{ K}$ (@ $R \sim 3r_g$) を得る。この質量降着は、銀河系中心領域の観測から期待される Sgr A* への質量降着率 $\dot{M} \sim 10^{-6} M_{\odot}/\text{yr}$ に比べて桁違いに小さい。また、温度 T から期待されるスペクトルは光赤外領域にピークを持つはずであるが、これも Sgr A* の観測と矛盾する。

これを解決する新たな円盤モデルとして提唱されたのが ADAF/RIAF である。この円盤では質量降着によって発生するエネルギーはほとんど放射として解放されず、内部エネルギーとして蓄えられる。したがって、この円盤は極めて高温になることが知られている。仮に放射によるロスが 0 として、重力エネルギーが内部エネルギーになったとすると、ISCO に対応する $R = 3r_g$ においては

$$\frac{mc^2}{12} \approx kT, \quad (9)$$

の関係より、温度は $T \approx 10^{12}$ K と見積もることができる。実際には放射によるロスが若干あるのでこれより温度は下がるが、 10^{10} – 10^{11} K という極めて高い温度が達成されることが詳しい計算から示されている（放射効率の違いにより、陽子と電子で異なる温度になる）。このような高温が達成されることにより、ADAF/RIAF 円盤は VLBI 観測可能な輝度を持つと考えられている（標準円盤の温度は VLBI の観測可能な輝度温度に比べると極めて低く、直接の検出は非常に難しい）。JAXA/ISAS の VSOP-2 プロジェクトでは M87 など近傍のいくつかの LLAGN について ADAF/RIAF 円盤を検出することを主要な目的として 2013 年ごろの打ち上げを目指しており、降着円盤を直接に分解して調べることが可能な時代が近いうちに到来すると期待される。