電波天文学特論II 2008-10

13　ブラックホール

ブラックホールはその強力な重力により光さえ脱出することのできない暗黒の天体である。太陽と同じ質量を持つ天体をつぶしてブラックホールにするためには、半径を 3 km 以下にする必要がある。これは太陽半径の 70 万 km と比べると極めてコンパクトである。一方、ブラックホールにガスが降着するとその強い重力場のためにブラックホール近傍の狭い領域から強力な放射が出され、活動銀河中心核（ＡＧＮ）として観測される。ＡＧＮは、コンパクトでかつ明るいため、ＶＬＢＩの重要な観測対象である。

13.1　古典的アプローチ

ブラックホールはニュートン力学的なアプローチによってミッチェル（1784）やラプラス（1796）らによって古くからその存在が予言されていた。質量 M を持つ天体の表面（半径 r）からの脱出速度は、系のエネルギーが 0 になる条件から

$$v_{\rm esc} = \sqrt{\frac{2GM}{r}}, \tag{1}$$

と書くことができる。ここでブラックホールの定義から、脱出速度 $v_{\rm esc}$ が光速度 c になるとして、

$$r_g = \frac{2GM}{c^2} \tag{2}$$

と得られる。これが質量 M のブラックホールの大きさを与える。この半径は一般相対性理論の厳密解（シュバルツシルト解）が与えるブラックホール半径と一致し、重力半径、あるいは、シュバルツシルト半径と呼ばれる。太陽質量のブラックホールの場合 $r_g = 3$ km, 地球質量のブラックホールの場合 $r_g = 0.9$ cm であり、通常の天体に比べて非常にコンパクトに天体を圧縮しない限りブラックホールは作れない。

13.2　ブラックホール周囲の描像

ブラックホール自身は（微弱なホーキング輻射を除いて）暗黒の天体であるが、ブラックホールにガスが落ち込むと、重力エネルギーが解放されて明るく輝く。そのために、ブラックホールをエンジンとするＡＧＮは宇宙論的な遠方でも観測可能であり、ＶＬＢＩでも重要な観測対象である。

ブラックホール周囲の描像は星形成領域の原始星に似ていて、

- ブラックホール

- 降着円盤
- ジェット

からなる。このうちブラックホール自身はＶＬＢＩの直接の観測対象とはならないが、ジェットおよび降着円盤は興味深い観測対象である。ジェットの観測はすでに多数の天体でなされているが、降着円盤についてはまだ直接の撮像観測はなされていない。これはＶＬＢＩの分解能をもってしてもまだ分解能が足りないからである。現在日本が打ち上げを進めている VSOP-2 衛星で、近傍銀河のＡＧＮの降着円盤が始めて観測にかかる可能性もあり、今後の研究の進展が期待される。

13.3　ブラックホールからのジェット

星形成領域のジェットについて述べたように、ジェットの速度はオーダー評価的にはジェットの加速領域のポテンシャルを表している。ブラックホールの場合定義よりその表面では脱出速度は光速度 c であり、したがってブラックホール近傍から放出されるジェットは光速度に近い速度を持つはずである。実際、以下に述べる超光速運動の観測から、ＡＧＮからのジェットで光速度の 90%〜99%にまで加速されているものが発見されており、ＡＧＮのエンジンがブラックホールであることを強く示唆している。

13.4　AGN ジェットの超光速運動

AGN ジェットを観測すると、ジェットの天球面上での見かけの運動速度が光速度を越えて観測されるという「超光速運動」がしばしば起こる。これは、AGN ジェットの運動速度が光速度に近く、その放射方向が視線に対して適度な角度を成しているときに起こる現象である。

今、天体から観測者に向けて時刻 0 に光子 P_1 が放射され、同時にジェット J が速度 v で視線に対してなす角度 θ の方向に放射されたとする。時刻 t が経過すると、光子 P_1 は観測者に対して

$$l_1 = ct \tag{3}$$

近づき、また、ジェット J は視線方向に沿って観測者に対して

$$l_2 = vt\cos\theta \tag{4}$$

だけ近づく。時刻 t にジェット J から観測者に向けて光子 P_2 が放射されたとすると、光子 P_1 が観測者に届いてから光子 P_2 が観測者に到達するまでの時間差 Δt は

$$\Delta t = (l_1 - l_2)/c = (1 - \frac{v}{c}\cos\theta)t \tag{5}$$

と書ける。一方、ジェット J の天球面上での位置は Δt の間に Δx だけ動いており、

$$\Delta x = vt\sin\theta \tag{6}$$

であるから、天球面上でのジェットの見かけの運動速度 v_{app} は

$$v_{app} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{v\sin\theta}{1 - v/c\cos\theta}, \tag{7}$$

と書ける。あるいは、光速度に対する比として β_{app} を用いて、

$$\beta_{app} \equiv \frac{v_{app}}{c} = \frac{\beta\sin\theta}{1-\beta\cos\theta}, \tag{8}$$

と書ける。この式から、β_{app} は適当な $\beta(\sim 1)$ および $\theta(\sim 0)$ を選ぶと 1 を超える値になることがわかる。すなわち、天球面上でのみかけの横断速度が光速度を超えて観測される「超光速運動」がおきる。このような現象は、VLBI を用いたモニター観測によって、多数の AGN で検出されている。このような超光速現象は、AGN から出るジェットが視線方向に光速に近い速さで放射されていることの強い証拠である。

13.5　ブラックホール周囲の質点の回転運動

次に、ブラックホール周囲の降着円盤についての議論の準備として、ブラックホール周りでの質点の回転運動について考える。まず、ニュートン力学の場合について考えると、単位質量あたりのエネルギー E は軌道面上での局座標 (r, θ) を用いて

$$E = \frac{\dot{r}^2}{2} + \frac{r^2\dot{\theta}^2}{2} - \frac{GM}{r}, \tag{9}$$

と表せる。ここで書く単位質量あたりの運動量

$$L = rv_\theta = r^2\dot{\theta}, \tag{10}$$

を用いると、

$$E = \frac{\dot{r}^2}{2} + \frac{L^2}{2r^2} - \frac{GM}{r} \equiv \frac{\dot{r}^2}{2} + \Psi_{\rm eff}, \tag{11}$$

と書き表せる。ここで、$\Psi_{\rm eff}$ は実効ポテンシャルであり、

$$\Psi_{\rm eff} = -\frac{GM}{r} + \frac{L^2}{2r^2}, \tag{12}$$

というように、重力ポテンシャルと遠心力ポテンシャルの和となっている。ニュートン力学の場合、$r \to 0$ で $\Psi_{\rm eff} \to +\infty$ であり、角運動量を持った質点は中心天体に近づくことはできない。また、ある角運動量 L に対応する円軌道半径は ${\rm d}\Psi_{\rm eff}/{\rm d}r = 0$ で与えられる。

一方、相対論の場合、実効ポテンシャルは以下の形になることが知られる。

$$\frac{\Psi_{\rm eff}}{c^2} = -\frac{r_g}{2r} + \frac{r_g^2}{2r^2}l^2 - \frac{r_g^3}{2r^3}l^2. \tag{13}$$

ここで、規格化された角運動量 l は

$$l \equiv \frac{L}{cr_g}, \tag{14}$$

である。この式とニュートン力学の場合の実効ポテンシャルを比較すると、違いは第3項の存在のみである。しかし、この r^{-3} の項が存在することによって、質点の運動の様子は大きくことなる。

円軌道となる半径を求めるために、

$$x \equiv \frac{r}{r_g},\ f \equiv \frac{\Psi_{\rm eff}}{c^2}, \tag{15}$$

とすると、

$$f = -\frac{1}{2x} + \frac{l^2}{2x^2} - \frac{l^2}{2x^3}, \tag{16}$$

より、

$$\frac{{\rm d}f}{{\rm d}x} = \frac{1}{2x^2} - \frac{l^2}{x^3} + \frac{3l^2}{2x^4}, \tag{17}$$

円軌道を求めるために ${\rm d}f/{\rm d}x = 0$ とすると、

$$x^2 - 2l^2x + 3l^2 = 0, \tag{18}$$

という2次方程式を得、その解が、

$$x = l^2 \pm l\sqrt{l^2-3}, \tag{19}$$

と得られる。これより、$l < \sqrt{3}$ では実解が存在せず、l に対応する円軌道が存在しないことがわかる。臨界値に対応するのは $l = \sqrt{3}$ より $x = 3$、すなわち、

$$r_{\rm ISCO} = 3r_g \tag{20}$$

が最も内側の安定円軌道 (ISCO: Inner-most Stable Circular Orbit) の半径である。これより内側には安定円軌道が存在しないため、ブラックホール周囲の降着円盤も $r = 3r_g$ よりも内側で穴の空いたドーナッツのような構造となる。なお、上記の議論はブラックホールの回転がないシュバルツシルト場の場合であったが、ブラックホールにスピンが存在すると $r_{\rm ISCO}$ の値は $3r_g$ よりも小さくなりうる。

13.6 降着円盤からのエネルギー解放

ブラックホールに物質を落とした際にどれくらいのエネルギーが取り出されるかを考える。無限遠から初速0でじわじわとブラックホールの周りを回

転運動させながら物質を徐々にブラックホールに落とし込み、最も内側の安定円軌道に達したとする。ニュートン力学的に考えると質点の重力場の周りを円運動する物質のエネルギーは、

$$E = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{GMm}{r} = -\frac{GMm}{2r}, \tag{21}$$

と書き表されるから、最内安定円軌道に達した物質が持つエネルギーは

$$|E| = \frac{GMm}{6r_g} = \frac{1}{12}mc^2 \ (\approx 0.08mc^2), \tag{22}$$

となる。すなわち、この場合のエネルギー解放効率 $\epsilon \equiv |E|/mc^2$ は静止質量に対して約 8%になる。なお、上記の議論はニュートン力学的な議論に基づいているが、相対論に基づく計算によれば $\epsilon \sim 5.7\%$となることが知られている。また、最大回転のカーブラックホールの場合 $r_{\rm ISCO} = 1r_g$ となり、ニュートン的な計算では $\epsilon = 25\%$（相対論では $\epsilon \approx 42\%$ ）となる。したがって、ブラックホールに物質を落とすと静止質量に対して約 5% から数 10%のエネルギーを解放することができる。この高いエネルギー解放効率が、ＡＧＮの莫大のエネルギー放射機構として極めて有力視されている。ちなみに、このエネルギー解放効率 ϵ が高いことは、例えば、核反応のエネルギー効率と比較すれば明らかである。例えば、核融合で水素からヘリウムを生成する反応 (4H $\to$ He) でのエネルギー解放効率は

$$\epsilon = \frac{4m_{\rm p} - m_{\rm He}}{m_{\rm He}} \approx 0.007, \tag{23}$$

であり、ブラックホールのエネルギー解放効率に比べて一桁落ちる。