

論文の内容の要旨

論文題目 General Relativistic Magnetohydrodynamic Simulations of Astrophysical Jets and Quasi-periodic Oscillations
(宇宙ジェットと準周期的振動の一般相対論的電磁流体力学シミュレーション)

氏名 青木成一郎

活動銀河核 (AGN) は中心近傍の非常に狭い領域から銀河全体が放出する程度の膨大なエネルギーを放出している天体の総称である。AGN には、ブレイザー、BL Lac 天体、クェーサー、セイファート銀河など、一見すると異なる天体が含まれている。しかし、これらの天体は、超巨大ブラックホールとその周りの降着円盤及び中心近傍からジェットが噴出されている系を異なる角度から見たために性質が異なって見えるとする、統一モデルが提唱されている (Urry & Padvani 1995)。ブラックホールの周りでは降着によるエネルギー解放の効率が一番良く (対消滅を除く)、最大に回転しているブラックホールの周りでは、42%もの高効率でのエネルギー解放が可能である。従って、AGN のエネルギー源は重力エネルギーの解放に拠る可能性が高い。また、AGN の多くにジェットが見られるが、超光速現象が観測される例もあり、ジェットの速度は光速に非常に近いと考えられている。さらに、AGN ジェットはコリメーションが非常に良いのも特徴である。これら2つの特徴を同時に説明できるモデルとして、現在、磁場の力により加速されるモデルが最も有力である。このモデルは、Blandford & Payne (1982) により解析的研究から提唱された。このモデルでは、磁力線を介して、回転する円盤から磁力線に貫かれたプラズマに角運動量が与えられる。ガス圧を無視した場合、磁力線と降着円盤のなす角度が60度以下であれば、プラズマが得た遠心力が中心天体による重力に打ち勝ち、そのプラズマが放出される (磁氣的遠心力による加速)。一方、非定常数値シミュレーションを用いた磁場の力によるジェットの加速の研究は、Uchida & Shibata (1985) 及び

Shibata & Uchida (1986) により行われ、ジェットは磁氣的遠心力だけでなく、磁気圧によっても加速されることが分かった。また、このモデルではジェットが自然にコリメーションされることも数値シミュレーションにより示されている (Kudoh et al. 1999)。さらに、ジェットの最終速度はジェットの根元のケプラー速度のオーダーとなることが知られており (Kudoh & Shibata 1997a, 1997b)、回転していないブラックホール (シュワルツシルト・ブラックホール) の場合、降着円盤の内縁のケプラー速度は光速の 50% に達するため、光速に近い速度へのジェットの加速が可能である。従って、磁場の力により加速されるジェットのモデルは、AGN ジェットのコリメーション、最終速度を共に説明可能である。さて、観測から AGN の中心には超巨大質量のブラックホールが存在すると考えられている (Miyoshi et al. 1995)。磁場の力により加速するモデルでは、ジェットの根元の回転速度が速いほど最終速度が大きくなるため、その根元は降着円盤の内縁近傍にある可能性が高い。従って、AGN ジェットの加速を考える場合、一般相対論を考慮する必要がある。一般相対論的電磁流体力学 (GRMHD) を用いた宇宙ジェットの数値シミュレーションは、Koide et al. (1998) が世界で初めて成功した。彼らによると、ジェットは磁場の力により加速されるジェットとガス圧により加速されるジェットの 2 層構造となっている。磁場の力により加速されるジェットは、非相対論的扱いでも見られたジェットだが、ガス圧により加速されるジェットは、一般相対論的扱いに特有なジェットである。そこで我々はこのジェットの性質を調べた。

我々は、シュワルツシルト・ブラックホールの周りでケプラー回転する幾何学的に薄い円盤と、円盤を貫く一様な磁場、及びブラックホールの周りに静水圧平衡のコロナを仮定して、2次元 GRMHD

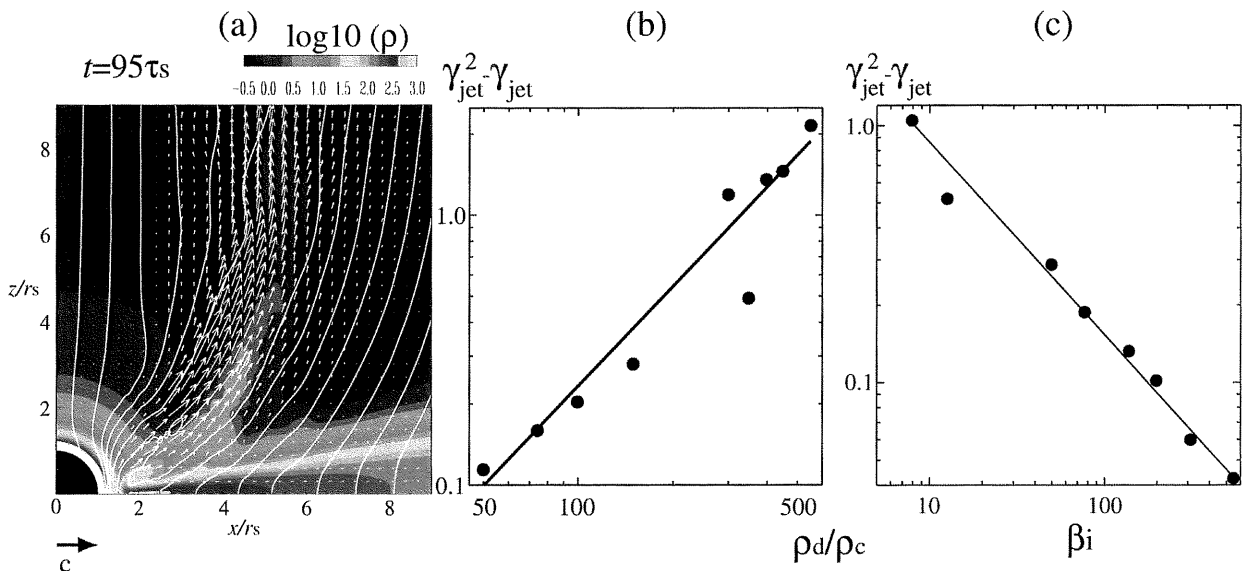


図 1 (a) GRMHD シミュレーションで得られたジェット生成の様子。色は密度の contour、白線は磁力線、矢印はポロイダル速度 (光速の場合、図の左下の矢印の長さ)、左下の黒い領域はブラックホールを表す。 r_s はシュワルツシルト半径。 τ_s ($\equiv r_s / c$) は時間の単位。(b) $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet}$ の ρ_d / ρ_c に対する依存性。(c) $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet}$ の β_i に対する依存性。直線は最小自乗法でフィットしたもの。それぞれ、 $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet} \propto (\rho_d / \rho_c)^{1.23}$ 及び、 $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet} \propto \beta_i^{-0.75}$ の依存性を示す。

シミュレーションを行った。モデルにおけるパラメータの内、降着円盤とコロナの密度の比 (ρ_d / ρ_c) 及び降着円盤の内縁でのガス圧力と磁気圧の比 ($\beta_i \equiv p / (B^2 / 2)$) を選び、ジェットの物理量の依存性を調べた。その結果、 ρ_d / ρ_c が大きく、 β_i が小さいほど、ジェットは速いことが分かった。具体的には γ_{jet} をジェットのローレンツ因子として $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet}$ (非相対論的極限での単位質量当たりのジェットの運動エネルギーに相当) が $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet} \propto (\rho_d / \rho_c)^{1.23}$ 及び、 $\gamma_{jet}^2 - \gamma_{jet} \propto \beta_i^{-0.75}$ の依存性を示す (図1)。これらの依存性はガス圧により加速されるジェットの加速機構から以下のように説明できる。まず、磁場により降着円盤から角運動量が引き抜かれ、円盤中の流体要素がブラックホールへ向かって落下し始める。角運動量の引き抜きは持続し、落下速度が速い磁気音速を超える (超音速)。しかし、ケプラー運動に必要な角運動量はブラックホールに近いほど小さいため、流体要素は遠心力によりブラックホール近傍で急激に減速される。その結果、超音速で落下する流れの中で衝撃波が生成する。この衝撃波によって増大したガス圧により、ジェットが加速される。

さて、観測から、マイクロウェーサーから放射される電波、赤外線、及びX線の時間変動の間には相関があることが示されている (Mirabel et al. 1998)。電波はジェットからのシンクロトロン放射、X線は降着円盤からの放射と考えられるため、これはジェットの時間変動と降着円盤での時間変動との間に相関があることを示唆する。マイクロウェーサーからのX線放射における時間変動の中で、我々は high-frequency quasi-periodic oscillations (QPOs) に着目した。ブラックホール候補天体における high-frequency QPOs を説明する有力なモデルは2つ有り、一つはブラックホールの周りのエルゴ領域での降着円盤の歳差によるもの、もう一つは円盤での振動によるモデルである。円盤での振動によるモデルでは、解析的研究から、降着円盤の内縁近傍で音波がトラップ、増幅され、円盤でのエピサイクリック振動数の最大値 (κ_{max}) 程度のコヒーレントな振動が生じると予想されている (例えば、Kato 1978 や Kato & Fukue 1980 など)。実際に、この現象は、擬ニュートンポテンシャルを用いた粘性込みの降着円盤の数値シミュレーションによって再現された (例えば、Matsumoto et al. 1988, 1989 や Honma et al. 1992 など)。

我々は、このモデルに着目し、回転しているブラックホール (カー・ブラックホール) の周りの時空を用いた1次元一般相対論的流体力学による数値シミュレーションを行った。ただし、簡単化のため、降着円盤の粘性を入れないモデルを用いた。粘性は円盤内で音波を発生させる原因となるが、我々は初期にケプラー速度より小さい回転速度を与えること (sub-Kepler) で円盤に擾乱を与え (ケプラー速度で回転する場合、円盤は安定で落下しない)、音波を発生させた。その結果、円盤からブラックホールへ向かって伝播する準周期的衝撃波を得た (図2)。 κ_{max} はブラックホールの回転 (a : スピン) に依存するが、 $a=0.0$ (回転してない)、 $a=0.95$ (最大回転の95%の回転) 及び $a=0.99$ (最大回転の99%の回転) の場合に、それぞれに対応する κ_{max} 程度の頻度で準周期的に衝撃波が生成した。線形解析との比較から衝撃波の生成のメカニズムを理解するため、ケプラー回転する円盤に初期に線形摂動を与えた計算も行った。その結果、ブラックホール近傍で κ_{max} 程度のコヒーレントな振動が得られた。この結果は以下のように解釈できる。ブラックホールの周りの降着円盤では非相対論的扱いと異なり、エピサイクリック振動数に上限 (κ_{max}) が存在するため、

円盤の外側で発生した音波の内、 κ_{\max} 以上の振動数を持つ音波のみ、ブラックホールへ到達可能である。さらに、線形理論から予測されるように、到達可能な音波の中で、 κ_{\max} 程度の振動数を持つ音波が時間と共に支配的となる。このため、ブラックホール近傍で κ_{\max} 程度のコヒーレントな振動が生じる。sub-Kepler の場合は、大きな（線形）摂動を初期に円盤に与えたと解釈できるため、線形摂動の場合と同様のメカニズムで、 κ_{\max} 程度の頻度の準周期的衝撃波生成が得られたと考えられる。ただし、衝撃波となるのは、ブラックホールへの音波の伝播に伴い、非線形効果が重要となるためである。従って、我々が得た準周期的衝撃波は、降着円盤の内縁近傍での音波のトラップによるものではなく、円盤内で非一様かつ最大値（ κ_{\max} ）を持つエピサイクリック振動数分布が音波に対してフィルターの役割を果たすためである。この準周期的衝撃波生成に必要な条件は、降着円盤が非定常であることのみだが、円盤が普遍的に非定常性を示すことは磁気流体不安定（例えば、Balbus & Hawley 1991 や Hawley & Balbus 1991 など）の電磁流体力学数値シミュレーションから予測されている。さらに、準周期的衝撃波形成の頻度である、 κ_{\max} をマイクロクエーサーのうちの 2 つ、GRS 1915+105 及び GRO J1655-40 における high-frequency QPOs の振動数と比較した結果、中心のブラックホール候補天体のスピンはそれぞれ、 $0.0 < a < 0.4$ 及び $0.85 < a < 1.0$ と予測できることが分かった。

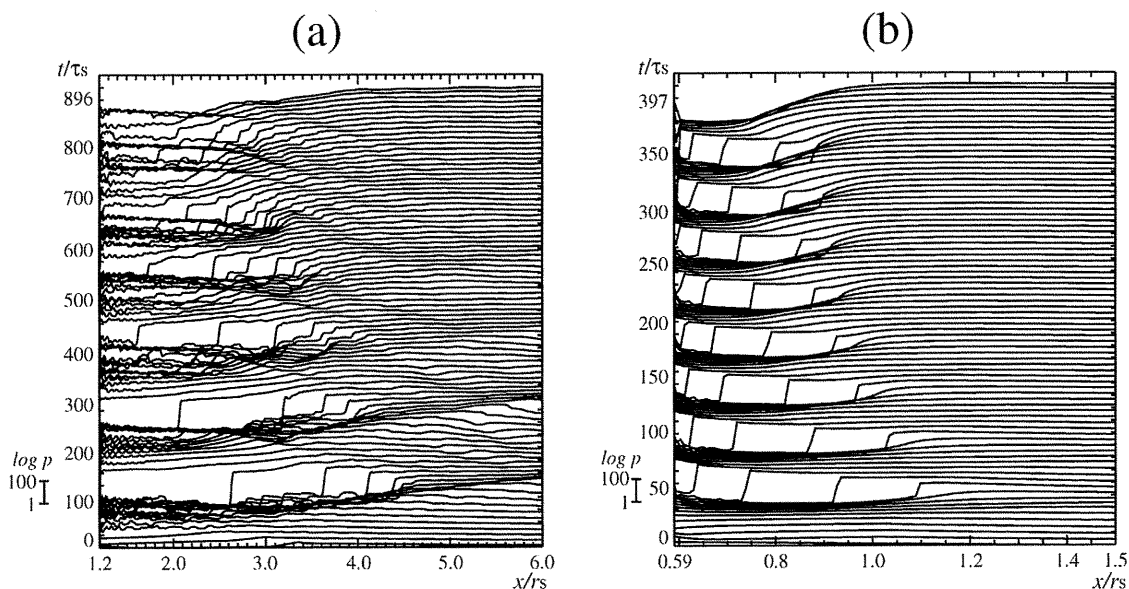


図 2 (a) スピンパラメータが $a=0.0$ (回転していないブラックホール)、(b) $a=0.99$ (非常に速く回転しているブラックホール) の場合の、ブラックホールへ向かって伝播する準周期的衝撃波形成。横軸はシュワルツシルト半径を単位としたブラックホールからの距離、縦軸方向へは対数スケールで表した圧力を時間発展の順に並べてある。いずれの場合も、それぞれのスピンパラメータに対応した、 κ_{\max} 程度の頻度でブラックホールへ向かって伝播する衝撃波が形成されている。