

ブラックホールへ内向きに周期的に伝播する衝撃波

青木 成一郎 (東大)、小出 真路 (富山大)、

工藤 哲洋 (ウェスタンオンタリオ大学)、柴田 一成 (京大)

1. 要旨

ブラックホールの周りの降着円盤内での衝撃波形成について調べる為、1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションを行った。その結果、ブラックホールへ向かって伝播する、周期的な衝撃波が得られた。この周期性は、一般相対論の効果により、epicyclic frequency が有限であるために起こることが解った。また、その周期は epicyclic frequency の最大値により決まる。さらに、この衝撃波の周期は、high-frequency QPO の周期と同じオーダーとなる結果となる結果が得られた。

2. イントロダクション

宇宙ジェットの一般相対論的電磁流体力学非定常数値シミュレーションは、Koide et al. 1998, 1999 が世界で初めて成功した。その結果、2層構造のジェットが得られた。磁場の力により加速される magnetically driven jet

とガス圧により加速される gas pressure driven jet である。前者はこれまでの様々な非相対論的電磁流体力学非定常数値シミュレーション(Uchida & Shibata 1985, Shibata & Uchida 1986 など)にも見られたが、後者は一般相対論的扱いにより初めて見られたジェットである。このジェットは一般相対論の効果(marginally stable orbit の存在)による激しい降着によって、降着円盤内の降着流中に衝撃波が生成し、その衝撃波がジェットを加速すると彼らは考えている。ブラックホールの周りの降着流中には、衝撃波生成が伴う様々な現象が考えられ、例えば、QPO がその一例である。そこで、今回は、1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションを用いて、衝撃波生成について調べた。

3. 方法

シュワルツシルトブラックホールの周りに sub-Kepler で回転 (Kepler 回転で安定) する降着円盤を置いた。時空はシュワルツシルト時空を採り、固定。降着円盤の自己重力は無視。ブラックホールの周りに Bondi flow コロナを置いた。また、境界は自由境界を採った。これらの条件の元で赤道面に沿った1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションを行った。

4. 結果

1次元一般相対論的流体力学数値シミュレーションにより、周期的に、内向きに伝播する衝撃波が得られた(図1, 図2)。(線形) 波の伝播の数値シミュレーション (安定な降着円盤の一点に圧力の摂動を加えた、図3右) の結果得られた減衰振動と sub-Kepler の場合の振動 (図3左) を比べると、ふるまいが非常によく似ている。その為、sub-Kepler の場合の周期性は、降着円盤内の様々な点で生じた波の重ね合わせと、大きな擾乱による非線形効果の結果と解釈できる。また、一般相対論の場合、非相対論の場合と異なり、epicyclic frequency が有限であることから、生成した波はブラックホールへ内向きに伝わることであり、また、その周期は epicyclic frequency の最大値で決まることが解った。さらに、ブラックホール近傍では、ブラックホールが物質を吸い込み、物質の密度が低い為、この波の伝播に伴って、波の速度振幅が増大し、超音速と

なって、衝撃波が生じることが解った。また、この衝撃波の周期を見積もると、例えば、中心のブラックホールの質量を 10 太陽質量の場合、67Hz となり、black hole high-frequency QPO の典型的な周波数(100Hz 程度)と同じオーダーとなる結果が得られた。

参考文献

- Kato, S., Fukue, J., & Mineshige, S. 1998, Black-Hole Accretion Disks(Kyoto: Kyoto Univ. Press)
Kato, S. 2001, PASJ, 53, 1
Koide, S., Shibata, K., & Kudoh, T. 1998, ApJ, 495, L63
Koide, S., Shibata, K., & Kudoh, T. 1999, ApJ, 522, 727
Matsumoto, R., Kato, S., & Honma, F. 1988, in Physics of Neutron Stars and Black Holes, ed. Y. Tanaka (Tokyo: Universal Academy Press), 15
Uchida, Y., & Shibata, K. 1985, PASJ, 37, 515
Shibata, K., & Uchida, Y. 1986b, PASJ, 38, 631

図 1

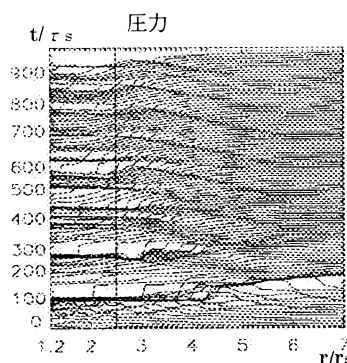


図 2

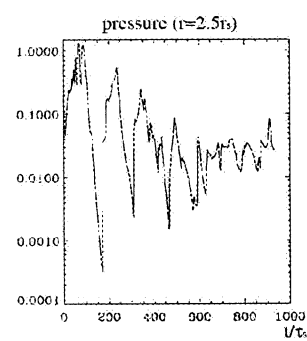


図 1 : 圧力の時間変化。横軸はブラックホール (半径: r_s) からの距離。縦軸は時間。外向きに伝播する衝撃波が 1 回、内向きに伝播する衝撃波が数回、出ている様子が見られる。

図 2 : $r=2.5r_s$ (図 1 の実線上)での圧力の時間変化。横軸は、時間 ($\tau_s=r_s/c$)、縦軸は圧力。内向きの衝撃波が数回、伝播の様子が分かる。

図 3

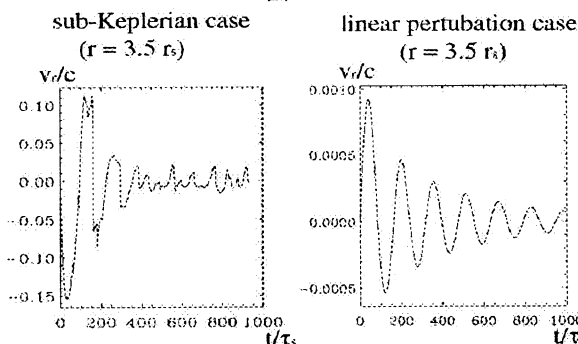


図 3 : $r=3.5r_s$ での radial 方向の速度の時間変化。左図は初期に sub-Kepler の場合、右図は平衡状態の降着円盤の 1 点に初期に圧力の 1 % の摂動を与えた場合。振る舞いが似ており、sub-Kepler の場合は、線形摂動の場合の重ね合わせと非線形効果によると解釈される。