

鉄輝線—理論的な立場からのコメント—

小 嶋 康 史

〈広島大学大学院理学研究科 〒739-8526 東広島市鏡山 1-3-1〉

e-mail: kojima@theo.phys.sci.hiroshima-u.ac.jp



ブラックホール周りから出た輝線が相対論的なドップラー効果を受けて幅が特異な形状に広がる。それが観測されれば、ブラックホールの性質の解明まで迫れる。観測データによる論争を避ける理論的アプローチとして、確固たる信頼性のあるモデル構築が必要だ。

1. はじめに

今から 20 年前に書かれた Fabian らの論文¹⁾の引用回数を調べると現在 500 を超える。Barr ら²⁾の Exosat 衛星によるブラックホール天体 CygX-1 で見つけた幅広い鉄輝線に別の可能性を提案したものである。輝線幅を広げる機構としてコンプトン散乱を考えていたのに対して、放射物体はブラックホールの周りに非常に速く回転しており、そのためドップラー効果を受けて広がっているという解釈である。当然ながら、当時の X 線分光観測の精度では両者の優劣をつけられないが、次期 X 線衛星での精度向上に期待が高まっているように思えた。

Fabian らの論文¹⁾では放射物質が比較的外側に分布することを想定し、中心のブラックホールは回転していない (Schwarzschild ブラックホール) を仮定し、そのまわりの円盤状に分布したプラズマを考えたものである。その論文に触発されて、「回転するブラックホールの場合にどうなるか」を調べた³⁾。興味深いことに、アイデアが安直なためか、ほとんど同時に Laor⁴⁾ も全く同じことを

考えている。このようなドップラー効果を受けて広がった輝線は相対論的円盤輝線 (relativistic disk line) と呼ばれる*1。

2. 相対論的円盤起源の輝線

ブラックホール (一般相対性理論) の証拠が輝線の形からどのようにわかるかを説明しよう。輝線 (吸収線) の線幅からランダムな熱運動の速度が通常測定されるように、観測される線幅や形にガスの運動の情報が含まれている。物体が静止していれば、固有振動数 ν_0 にのみ値があるデルタ関数的なスペクトルになる。ランダムな場合はガウス型になり、その幅 $\Delta\nu$ が速度分散 σ に比例する。運動がある種の規則的な場合、輝線の形は運動に特徴的なものになる。ケプラー運動だとするとドップラー効果により、遠く物体から生じる低周波数側 (赤) のピークと近づく物体からの高周波数側 (青) のピークが出た形になる。それぞれのピークの振動数は固有振動数から速度の大きさに比例してずれる。 $\Delta\nu/\nu_0 = v/c$ 。質量 M の天体から半径 r の位置で回転するケプラー速度は $v = (GM/r)^{1/2}$ となるので、例えば $r = 100GM/c^2$ に

*1 Kerr ブラックホールまでの拡張版として Laor モデルと呼ばれることがあり、文献 3 と 4 では引用回数では大きな差がある。研究は (い) 創造 (計算, 観測) (ろ) 論文・口頭での発表 (は) 持続的な宣伝で完了すると、ある同僚に言われたことがある。(は) で他人の関連する内容の発表に即座にコメントをメールで送ることが昨今ではよくある。その点をさぼっていたのが、両論文の引用回数の差を生み出している。後の教訓ため、この脚注を追加させていただいた。

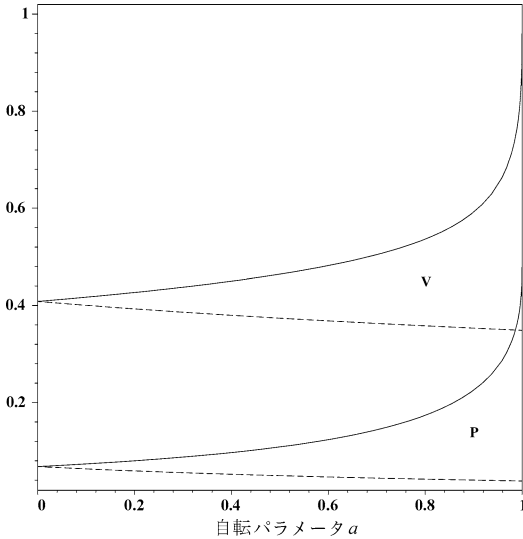


図1 最小安定円軌道（円盤の内縁半径）での回転速度 v と周期 P のブラックホールの自転パラメータ ($0 \leq a \leq 1$) による変化. 速度 v は c , 周期 P は $2\pi GM/c^3$ で規格化してある. 実線は自転と回転が同方向, 点線は逆方向の場合.

とると、そのずれは1割 ($\Delta v/v_0 = 0.1$) 程度になる。さらに物体がブラックホールのより近傍に存在するなら、回転速度がより光速に近くなり、ブラックホール自身の性質も関係してくるかもしれない。

ブラックホールは質量 M と自転を表すパラメータ a ($0 \leq a \leq 1$) で特徴づけられる。 M はスケールを与え、 a は性質に関係する。赤道面上で重力と遠心力が釣り合ったケプラー回転が許される半径 r は Schwarzschild ブラックホール ($a=0$) 場合には $r \geq 6GM/c^2$ であるが、最大回転 Kerr ブラックホール ($a=1$) では $r \geq GM/c^2$ となる。この限界の半径は最小安定円軌道と呼ばれ降着円盤の内縁の半径となる⁵⁾。その点での回転速度 v と周期 P を図1に示した。 $a=0$ では通常のニュートン力学で求めた回転速度 $v = (GM/r)^{1/2}$ と回転周期 $P = 2\pi(r^3/GM)^{1/2}$ の表式に $r = 6GM/c^2$ を代入したものになっている。それが、パラメータ a により数倍変化していることがわかる。最大回

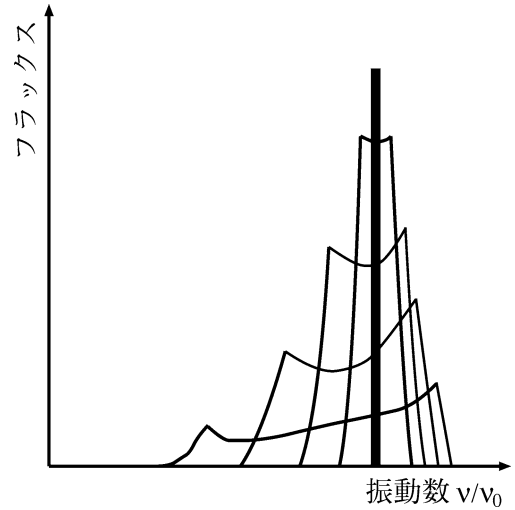


図2 相対論的円盤起源による典型的な輝線の形. 静止の場合（中央）はデルタ関数的になるが、回転速度がおおきくなるにつれ、幅が広がるとともに、二つのピークの非対称性が顕著になる。具体的な形はパラメータによるので、詳しくは関連文献を参照。

転 ($a=1$) に向かうにつれ、自転と同方向に回転している内縁の半径は小さくなり、回転速度は光速に近づく。

図2には回転速度が大きい場合の輝線の形を示す。速度が大きくなると幅が広がるが、それとともに低周波側（赤）と高周波側（青）の二つのピークの非対称性が顕著になる。これは、特殊相対論で知られている速度の2次の項に起因するドップラー効果、および、それと同程度の大きさの重力赤方偏移が効いてくるからである。全体として低周波側にずれるたものになる。図2に典型的な輝線の形を示したが、その計算にはブラックホールのパラメータのほかにいくつかの仮定（モデル）が必要である。

(a) 円盤の傾斜角（回転軸と観測者方向とのなす角度）。通常の速度の1次に比例するドップラー効果はこの角度に大きく左右される。

(b) 放射物質の範囲と分布。特に円盤の内縁半径が中心ブラックホールの性質の診断に重要になる。

輝線の形はこれらのパラメーターの複合的な産物であり、それを元にブラックホールの性質まで迫れるか。その答えは最内縁の半径がどこまで内側に入り込んでいるかを通じてのみ判別が可能となる。図1で述べた円盤の内縁半径が小さい、したがって最大の回転速度が大きいかが問題となる。回転するブラックホールかどうかはその放射物質が非常に内まで接近している場合に判別可能である。逆に言えば、Schwarzschild ブラックホールモデルで説明できない場合に初めて Kerr ブラックホールの登場となる。

3. プラズマ物理

前章で説明した、物質の静止系でデルタ関数的な輝線の形のドップラー効果による変更はどの振動数に対しても普遍的に適応できるが、その輝線の生成過程を述べる。観測で見られる 6.4 keV の輝線は鉄の K_{α} 蛍光 X 線である。(L 殻からの輝線も現在は報告されている⁶⁾。照射光により中性元素の最内殻の電子をたたき出し、そこに落ち込む際に放出された光である。そのためには冷たい(電離が進んでいない)ガスが必要である。実際にどのような輝線が出るかは電子密度 n 、単位面積当たりに入射する X 線のエネルギーフラックス F を用いて $\xi = 4\pi F/n$ で定義されるイオン化パラメーター ξ が鍵となる。

一様な密度に対して行われた計算⁷⁾をまとめると、値が小さいとき ($\xi < 100 \text{ ergs cm s}^{-1}$)、蛍光 X 線が現れる。逆に非常に大きいとき ($\xi > 5,000 \text{ ergs cm s}^{-1}$)、完全にイオン化して輝線は現れない。その中間段階では、電離度に応じたものになる。現実的な場合、入射光と反射物質の位置関係や密度構造など場所の依存性があるので観測されるものはある種の重ね合わせとなる。

4. 実現可能性

回転するブラックホールの性質までもわかる可能性を 2 章で示したが、果たしてそのようなことが実現するか。学会や研究会でその内容を話したが、当時寄せられた代表的な疑問を以下二つ。

その 1 「冷たい(完全電離せず内殻の電子を保っている)状態の物質がそれほど内側まで存在できるか。」

ブラックホール周りの幾何学的に薄い標準円盤理論では内側ほど温度が高い。限界である内縁半径付近まで冷たいガスが存在しているとは想像しがたい。蛍光 X 線を出す反射物質がブラックホールの地平線の数十～百倍程度より外にあるなら、ブラックホールの性質など関係しないであろうというものである。

その 2 「多数のモデルパラメーターが含まれるが、観測データから逆問題として物理量を求めるのに任意性がありすぎないか。」

輝線の形は雑音などから生じる典型的なガウス型と異なるので何らかの証拠になるとしても、パラメーターの数が多い。2 章のモデルのカテゴリ (a) 「円盤の傾斜角」は天体とわれわれとの位置関係であるのでどうにもならないが、カテゴリ (b) のほうは理論的に減らすことができる。原理的には反射物質の幾何学や構造が決まれば、イオン化パラメーター ξ の場所依存性から輝線の強度や形状が求められる。そのためには、降着円盤の理論のさらなる発展が必要である。「これこそが、(回転する)ブラックホールの証拠」であると結論できるまでの精度がある、パラメーターが少ない理論モデルを構築することである^{*2}。

その後 20 年の降着円盤の理論の進展は省略するが、結論的には先ほどの到達目標にほど遠い。標準降着円盤理論に加え、別種の移流優勢円盤や磁場を考慮した円盤の発展など多様性が増してい

*2 問題は設定されたがハードルは高い。当時の個人的な展望は否定的であり、それが脚注 1 で述べた広報活動を怠った一因である。

る（文献 8 参照）。回転と重力との均衡状態で決まる内縁の半径が、その他に磁場などの追加された要因で大きな変更を受ける。蛍光 X 線を出す物質の（回転）運動と分布はさらに複雑になることは容易に想像できるし、ブラックホール＝一般相対論のテストが難しくなることは間違いない。

5. 観測の紆余曲折

ASCA 衛星（1993–2001 年）による MCG-6-30-15 の観測で幅が広い鉄輝線発見の論文⁹⁾が出た。論より証拠。観測の目覚ましい進歩である。その後、数多くの Seyfert 銀河の相対論的円盤輝線の証拠が報告されている¹⁰⁾。つづく XMM-Newton 衛星（1999–）、Chandra 衛星（1999–）、Suzaku 衛星（2005–）でも非常に幅が広い輝線 ($\Delta\nu/\nu_0 > 0.5$, $\nu/c > 0.5$ ）したがって $a > 0.9$ の Kerr ブラックホールの証拠が報告されている。また、Cyg X-1 をはじめ恒星質量ブラックホールの観測も報告されている。総合報告として、文献 11, 12 を参照。ただし、その妥当性には論争があることを注意しておく（本特集の観測の専門家の章を参照）。

さて、本特集の企画者からの依頼の意図はこの論争の判断、あるいは理論 vs. 観測のバトルを期待したのかもしれない。観測データの詳細を知らずして、多くを語ることはできないし、先に述べた理論的なハードルを越えずしてバトルもあるまい。ただ、相対論的円盤輝線を主張する新しいデータは、より複雑な（つまり、当初考えていた非対称な幅広いものに似つかわしくない）ものとなり、相対論的な速度を要する非常に幅広いという特徴だけが残った印象がある。それを説明するための位置関係も複雑なものが必要となっている。

最後に、観測からブラックホールの性質まで迫るという挑戦は鉄輝線に限らず、円盤からの連続光放射、高周波 QPO、時間変動（エコー）などの手法で提案されているが、「これこそが（回転する）ブラックホールの証拠となるまでの精度ある理論モデルを構築する」という課題は依然残っている。

参考文献

- 1) Fabian A. C., Rees M. J., Stella L., White N. E., 1989, MNRAS 238, 729
- 2) Barr P., White N. E., Page C. G., 1985, MNRAS 216, 65
- 3) Kojima Y., 1991, MNRAS 250, 629
- 4) Laor A., 1991, ApJ 376, 90
- 5) 小山勝二, 嶺重 慎(編), 「ブラックホールと高エネルギー現象」(日本評論社, 2007)
- 6) Fabian A. C., et al., 2009, Nature 459, 540
- 7) Ballantyne D. R., Ross R. R., Fabian A. C., 2001, MNRAS 327, 10
- 8) Kato S., Fukue J. Mineshige S., *Black-Hole Accretion Disks towards a New Paradigm* (Kyoto University Press, 2008)
- 9) Tanaka Y., et al., 1995, Nature 375, 659
- 10) Nandra K., et al., 1997, ApJ 477, 602
- 11) Reynolds C. S., Nowak M. A., 2003, Physics Reports 377, 389
- 12) Miller J. M., 2007, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 45, 441

A Commentary on Broad Iron Line

Yasufumi KOJIMA

Department of Physics, Hiroshima University,
Higashi-Hiroshima 739-8526, Japan

Abstract: An emission line from the vicinity of a black hole exhibits intrinsic profile broadened by relativistic Doppler effects. The profile is used as a probe of black hole or its nature. In order to avoid any observational dispute originated from ambiguous data, a robust model is needed.