

円盤振動からブラックホールのスピンを求める

加藤 正 二

〈〒630-0114 奈良県生駒市鹿の台西 2-2-2〉

e-mail: kato.shoji@gmail.com

中性子星、ブラックホール星、銀河中心核などの強重力場中にある降着円盤最内縁部での準周期振動を通して、中心天体の質量やスピンパラメーターを求めようとする研究の現状を、筆者の研究も交えて紹介する。

1. 円盤振動論の研究の歴史

今から四十数年前になるが、筆者はプリンストンの高等研究所で C. C. Lin の密度波理論の談話を聴く幸運に恵まれた。最前列には Stromgren, Spitzer, Schwarzschild, Dyson という錚々たるメンバーが陣取って盛んに議論を交わしていた。密度波理論とは、渦状銀河の渦状腕構造を円盤上での波動で説明しようとする理論で、C. C. Lin と弟子の F. H. Shu が 1964 年に提唱したものである。C. C. Lin は流体力学分野での世界的権威で、流体の安定性に関する著書でも有名であることは当時筆者もよく知っており、その C. C. Lin が天文分野に進出してきたということで関心をもって、当時ニューヨークに滞在していた筆者はプリンストンまで聞きにいったのをよく覚えている。そのときにはすでに Lin and Shu の論文が出版された直後であったように思うので多分 1965 年ではなかったろうか。異分野間の交流ということと、Lin 教授の思慮深いとても穏健な人柄に強い印象を受けた。

円盤振動の研究は銀河円盤の渦状腕の研究として 1964 年に始まったとあってよいのではないだろうか。その後、密度波理論の一応の成功と、他方、X 線星や銀河中心核の研究の発展に伴って、円盤振動の研究対象は銀河円盤から、降着円盤の

研究に主題が移っていったように思う。ところで、ブラックホールや中性子星の周りの降着円盤の構造を考えようとすると、よく知られているように、相対論的効果が重要である。相対論的円盤の振動を考える場合にも、相対論に伴う現象が重要であることがわかってくるのは 1980 年ごろからである¹⁾。それは、相対論的円盤の内縁部では、エピサイクリック振動数が中心天体に向けて単調に増加するのではなく、円盤内縁の少し外側で極大をもち、それより内部では減少に転じ、内縁で零になることである。これに伴って、内縁部だけに存在する捕獲振動の存在がわかってきた。

一方、観測の面では、X 線星などで準周期振動 (QPO) と呼ばれる現象が早くから知られており、その種類も豊富であった。ある種の QPO は円盤の振動であろうと考えられるようになり、太陽や星の振動より内部の構造を求めようとする日震学 (helio-seismology) や星震学 (stellar-seismology) にならって、disco-seismology という言葉が 1980 年代中ごろには使われるようになった。しかし、1, 2 の例外を除いて、円盤振動論と観測との間のかみ合いはあまり深いものではなかった。これが前世紀末までの状況であった。この段階での円盤振動論の状況に関しては筆者のレビューを参照されたい²⁾。

2. 高振動数の準周期振動 (HFQPO) の発見と HFQPO の性質

今世紀に入る直前に観測面での新しい発見があり、円盤振動論も新しい局面に入った。それは X 線観測衛星 RXTE (Rossi X-ray Timing Explorer) によって、低質量 X 線連星 (LMXB) に数百ヘルツ以上の高振動数の準周期振動の発見があったことである。この準周期振動は、従来知られていた準周期振動に比べ振動数が高く、高振動数準周期振動 (HFQPO) と呼ばれている。その振動数は相対論的円盤の内縁部のケプラー回転の振動数程度なので、多くの人たちは、円盤の内縁部に起因する振動であろうと考えるようになった。もし、そうなら、この準周期的振動を通して、円盤内縁部の構造、ひいては中心天体の質量やスピンのわかるのではないかと考えられるようになった。この高振動数の準周期振動の特徴を表 1 にまとめておく。

まず、この準周期振動は最初、中性子天体で観測され、ついでブラックホール候補天体でも観測されるようになった。一番の特徴は二つの振動が対となって観測されることが多く、しかも振動数の比が 2:3 に近いことである。中性子星の場合、対になる振動の振動数は一定でなく時間的に変化するが、相関をもって変動する。変動の幅は数百ヘルツにもわたる。これに対し、ブラックホール候補天体の場合は、数は少ないが、対の振動数は変動せず、振動数の比も常に 2:3 である。

もう一つ重要な性質は、HFQPO は常に観測されるのではなく、X 線星が特定の状態 (ステート) にあるときだけに観測されることである。すなわ

表 1 高振動数準周期振動の諸性質。

	中性子星	ブラックホール星
振動数	500~1,200 Hz	100~450 Hz
対の振動の振動数	2:3 に近いが変動あり	2:3 で変動なし
現れるステート	VHS のステートに現れる	
その他の特徴	LFQPO と相関あり	

ち、X 線星は明るくてソフト成分が強い high/soft state (HS)、暗くてハードな成分の強い low/hard state (LS) とそれらの 2 つの状態間の遷移の際に現れる very high state (VHS) とがあるが、HFQPO は遷移時の VHS でのみ観測される。

さらに追加すれば、いま考えている HFQPO 以外にも振動数の低いところにもいろいろな準周期振動 (LFQPO) があるが、HFQPOs はこれら LFQPOs と相関をもって現れる。

3. HFQPO の円盤振動モデル

HFQPO を説明しようとするモデルは種々提唱されているが、以下では、相対論的円盤の振動で HFQPO を説明しようとするモデルのうちの主なものを紹介する。大別して三つのモデルが提唱されていると思う。

- 1) パラメトリック共鳴モデル³⁾
- 2) 変形した円盤での共鳴励起モデル⁴⁾
- 3) 相対論的歳差モデル⁵⁾

1) のモデルは HFQPO が対になって現れること、しかもその振動数の比が整数比に近いことに着目し、円盤振動における特徴的な二つの振動の間のパラメトリック共鳴として HFQPO を理解しようとするものである。特徴的な二つの振動とは、水平方向のエピサイクリック振動 (通常のエピサイクリック振動のこと) と垂直方向のエピサイクリック振動 (粒子が円盤面から上下にずれたときの赤道面の周りの振動) のことである。このモデルは、ブラックホール候補天体としては初めて HFQPO が発見された GRO J1665-40 で対の一方の振動しか見つかっていない段階で、もう一方の振動の存在を予言したことで注目された。対の振動の振動数が 2:3 やその他の整数比であることを主張するので、観測家によって観測データの解析が精力的に行われた。中性子星の場合、HFQPO の振動数が変動し、必ずしも 2:3 ではないことで旗色が少し悪くなっている。理論的にも、二つの振動の間のパラメトリック共鳴で振動

の間のエネルギーのやり取りは起こるが、二つの振動を合わせた振動全体の励起は保存系では起こらないと考えられる。したがって、別に振動全体の励起機構を考える必要がある。

2) は共鳴を考える点では 1) と同じであるが、系が平衡状態からずれていることで起こる共鳴現象で波を励起させようとする考えである。このモデルを考えるうえでのヒントとなっているのは激変星での *superhump* 現象や、銀河間ガスを運動する銀河円盤での渦状腕の形成などである。前者は、激変星の *superoutburst* 時に軌道回転の周期とわずかに異なる微小振幅の振動 (*superhump*) が観測される現象のことである⁶⁾。後者は、*ram pressure* で変形した銀河円盤上に渦状腕が形成されるというものである⁷⁾。両者に共通することは、軸対称平衡状態からずれた円盤では、円盤の変形部分と波動との非線型相互作用を含んだ共鳴現象によって波動が励起される点である。2) はこのような機構を HFQPO の説明のためのモデルとして発展させたものである。

3) は、相対論的円盤では、赤道面でのエピサイクリック振動数、円盤面からの上下の方向のエピサイクリック振動数がそれぞれ円盤の回転の振動数と異なることに着目する。すなわち、赤道面内で円軌道からずれた粒子の運動は赤道面内で *precession* する。また、角運動量の方向が円盤の回転軸からずれた粒子は軌道面が赤道面の周りに歳差運動をする。これらの運動を HFQPO や LFQPO と結びつけようとする。どの半径での *precession* を考えるかなど不定性があるが、結果的には 2) のモデルとは密接な関係があることがわかる。以下では 2) のモデルについて少し詳しく解説することにする。

4. 変形した円盤での振動の共鳴励起モデル

このモデルの基本は上に述べたように、円盤が変形していると仮定することである。ここでは、

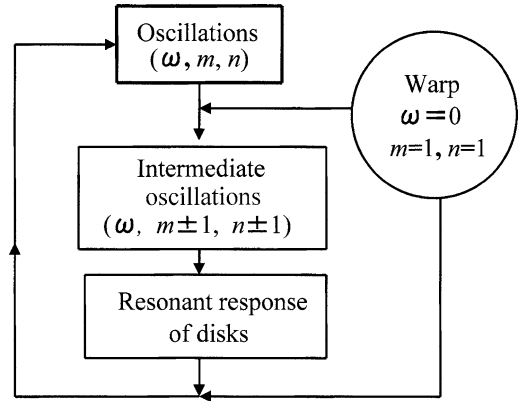


図1 振動 (ω, m, n) がワープ (warp) と非線型にカップルして、中間波 $(\omega, m \pm 1, n \pm 1)$ が生じる。その中間波は再度ワープとカップルして、元の振動にフィードバックするが、その間に、中間波は円盤と共鳴相互作用をもつので、このフィードバックの結果として元の振動 (ω, m, n) は増幅または減衰する。

円盤がワープ (warp) している場合を例にとって、円盤振動が励起される機構を図1に示す。図1では振動数 ω 、経度方向の波数 m 、赤道面に垂直な方向の波数 n のセット (ω, m, n) で振動を特徴づけている。ワープは $(0, 1, 1)$ にあたる。図に示されているように、ワープと (ω, m, n) の波が非線型的に結合すると $(\omega, m \pm 1, n \pm 1)$ の波ができる（ここではこれを中間波と呼ぶことにする）。中間波は円盤と共鳴を起こした後、もう一度ワープと非線型の相互作用をして、元の振動にフィードバックすることになる、このフィードバックの過程には、共鳴が含まれているので、元の振動は中立安定でなくなり、状況によって、増幅したり、減衰したりすることになる。この過程によって増幅する振動が HFQPO であると考えるのである。

共鳴には二つの種類がある。第一は中間波が円盤面内で円盤回転と共鳴を起こす場合であり、中間波に対する Lindblad 共鳴である（以下これを *horizontal resonance* と呼ぶことにする）。もう一つは中間波の円盤に垂直方向の振動が円盤の垂直方向の固有振動（垂直方向のエピサイクリック振

表2 円盤変形の種類と励起される振動との関係.

	$m=1$ 変形の円盤	$m=2$ 変形の円盤
振動を励起させる共鳴	Horizontal resonance	Vertical resonance
共鳴が起こる半径 (r_{res})	$\kappa = (\Omega + \omega_p)/2$	省略
励起される振動の振動数	$(\Omega \pm \kappa)_{\text{res}}$	$(\Omega \pm \kappa)_{\text{res}}$
振動数変動の原因	ω_p の変動	円盤の垂直方向の構造変化

ω_p は $m=1$ 変形が precession する振動数. 下付きの res は共鳴半径での値を示す.

表3 ブラックホール天体のスピンパラメーター a の評価.

ブラックホール天体	対の QPO の振動数	質量 (M/M_{\odot})	スピン (a)
GRS 1915+105	113, 168	10.0-18.0	Negative-0.44
XTE 1550-564	184, 276	8.4-10.8	0.11-0.42
GRO 1655-40	300, 450	6.0-6.6	0.31-0.42

動など)と共鳴を起こす場合である(以下これを vertical resonance と呼ぶことにする).

どの場合の共鳴が波を増幅されるかの解析はかなり数学的に複雑であるが, 結果の解釈は比較的容易である. その前に, 二つ補足をしておく. まず, 波のもつエネルギーの符号についてコメントしておく. 波のパターンが経度方向に回る角速度 (ω/m) が, 円盤の回転角速度と等しくなる半径を共回転半径 (corotation radius) と呼ぶが, 波が共回転半径の内側に存在する場合, 波のもつエネルギーは負である. 逆に, 共回転半径の外側に波が存在する場合は, 波のエネルギーは正である.

次に, 取り扱っている波や中間波が共に波として伝播できる領域内に共鳴半径が起こる場合を考えることにする. そうでないと, 共鳴半径でのエネルギーのやり取りはあまり大きくなく波の増幅や減衰は有効に起こらないからである.

解析の結果は次のように解釈できる. すなわち, 共鳴半径での相互作用で, 波が増幅される条件は, 「考えている波のエネルギーと中間波のエネルギーが異符号である場合である」. 例えば, 考えている波のエネルギーが正の場合には, 中間波

のエネルギーが負であることが増幅される条件である. この場合には, 共鳴半径で正のエネルギーが中間波から, 元の波に流れて, 両者の波が共に増幅されると解釈できる*1.

なお, 円盤の変形としてはどのようなものが考えられるであろうか. 上の議論では, ワープなど経度方向の波数が 1 の場合を意識していたが, 必ずしもそうでなくてもよい. 2 本腕の変形でもよい. 表 2 を参照されたい.

5. HFQPO の説明ができるか

上記の振動の励起モデルを HFQPO に適用して, 観測を説明できるかどうか考える. ここで一つ仮定を導入する. それは, 上に述べてきた事柄だけでは, 共鳴半径の場所は一義的に決まらないで, 任意性が残っている. そこで, 次のような仮定を導入する. それは, 励起される振動にとっては, 共鳴半径は他の場所に比べて, 振幅が大きく, かつ他の場所に比べ長時間滞在する場所であると考える(具体的には波の群速度が小さい場所). そのような場所であれば, 共鳴による増幅が有効に起こるので, 観測される QPO はそのような条件

*1 共鳴半径近傍での波の振舞いによっては必ずしもこのように言い切れない場合がある.

を満たすものであると考える。なお、円盤での振動にはいくつかの種類があるが、ここでは、赤道面に垂直な方向にノード（振動の節）をもたない音波モード（p-mode）および、ノードを一つもつ重力波モード（g-mode）のみを考えることにする。どのような波がどこで共鳴励起され、かつその振動数はいくらであるかを表2にまとめる。

さらに、もう一つ仮定を導入する。それは、HFQPOは上述のように、VHSと呼ばれるステートで観測される。このステートでは、幾何学的に薄い円盤がワープし、その周りを高温のトーラスが取り囲んでいる状態であると考えられる。このような系で、QPOは円盤で励起されるが、観測されるのはトーラスを通過してきたX線である。したがって、コンプトン散乱のために高エネルギーの光子として観測されることになるが、1本腕の時間変動はトーラスを通過すると、高エネルギーでは2本腕の時間変動として観測されることになる⁸⁾。このように考え、基本的振動として、 $m=1$ および $m=2$ の振動を考えると、HFQPOとして観測される対の振動数は次式で定義される $2\omega_{LL}$ と ω_L となる：

$$2\omega_{LL} \equiv 2(\Omega - \kappa)_{\text{res}}, \quad \omega_L \equiv (2\Omega - \kappa)_{\text{res}} \quad (1)$$

なお、その他の振動も含めると、励起され得る振動の振動数は $(m\Omega \pm \kappa)_{\text{res}}$ である。ここで $m=0, 1, 2, \dots$ である。

ワープが precession していない場合、共鳴が起る半径は $\kappa = \Omega/2$ で決まるので、上の二つの振動数、 $2\omega_{LL}$ と ω_L の比は中心星が回転しているかどうかにかかわらず、常に2:3であり、ブラックホール候補天体での観測を説明できる。振動数は中心星の質量とスピンの決まるので、もし、他の観測事実より、中心天体の質量がわかれば、中心天体のスピンの求まることになる。この方法で求めたブラックホール候補天体のスピンを表3に示す。

なお、GRO 1655-40 に対しては、Shafee et al.⁹⁾

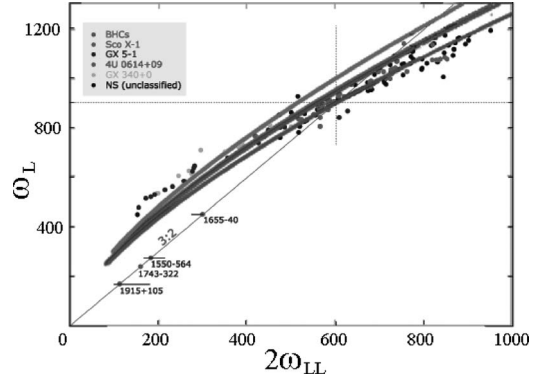


図2 二つの励起振動の振動数、 $2\omega_{LL}$ と ω_L の間の相関を示す。観測と比較するために、代表的ないくつかの中性子天体での対振動の振動数の相関を示す図に重ねている。4本のカーブは上から、 $(M/M_{\odot}, a)$ のセットが、 $(2.0, 0.3)$, $(2.0, 0.0)$, $(2.4, 0.3)$, $(2.4, 0.0)$ の場合である。

が観測される連続スペクトルをモデルから求めたスペクトルと比較して、 $a \sim 0.8$ を導いている。表3に示されているように、円盤振動モデルから求めた a の値はそれよりも小さい。

次に、中心星が中性子星の場合について考える。前に述べたように、中性子星の場合には観測される対の振動数が変動する。ただし、その変動は任意ではなく、相関をもって変動する。この相関まで説明しようとする、モデルに対する制約が追加されることになる。対の振動数が式(1)で決まるとすれば、変動の原因がどうであれ、対の振動数の相関は中心天体の質量とスピンのみによることになる。いくつかの質量、スピンに対して、相関関係を示したのが図2である。参考のために、代表的ないくつかの中性子星の LMXB に対して観測から得られている対の振動数をこの図に重ねて示している。観測データは単一の星に対するものではないが、広い範囲にわたってデータを最もよく説明するのは $M=2.4M_{\odot}$, $a=0$ の場合である。なお、ここで得られた質量は通常考えられている中性子星の質量よりは多少大きいようである。

6. ま と め

高振動数の QPO (HFQPO) は相対論的円盤の最内縁部の振動に起因する現象であり、この現象の機構を解明すれば、強重力場での動的現象の直接的観測の 1 例となるばかりでなく、ブラックホールの質量、スピンを精度よく知ることができる有力な方法の一つになると多くの人が考えている。しかし、HFQPO の諸性質を統一的に説明できる円盤振動のモデルは現在まだない。観測との比較が、一番定量的にできるモデルとして、本稿では筆者のモデルを中心に紹介したが、筆者のモデルの問題点の一つは、中性子星の質量が $2.4 M_{\odot}$ と通常考えられている質量より大きくなることである。ある理想化した仮定の元に得られている結果なので、その部分を改良すれば、もう少し小さい質量になる可能性はある。

もちろん、近い将来、全く違う方向からの円盤振動モデルが HFQPO 現象の説明となる可能性はある。モデルの妥当性のチェックの意味では、SgrA* での準周期振動の観測的研究はこの分野の発展に寄与するところが大きいと思われる。なぜならば、X 線星の場合と違って、振動現象の空間的構造がわかるので、モデルのチェックばかりでなく、モデルづくりにもいろいろヒントを提供するであろう。陽震学と星震学との関係に似た関係が SgrA* での QPO 研究と X 線星での QPO 研究との間にもあるであろう。

最後に本稿の執筆を薦めてくださった 2009 年度春季天文学会年会の企画セッション「BH 時空」の三好 真氏はじめ世話人の方々に感謝する。

後記:

ワープした円盤での振動の励起に関する最近の発展を補足したい。Ferreira and Ogilvie¹⁰⁾ が、ついで Oktariani et al.¹⁰⁾ が数値計算で、捕獲振動がワープで励起されることを示している。また、Henisey et al.¹¹⁾ は円盤に突然ティルト (tilt) を与

えた後の時間発展を数値シミュレーションで調べ、振動の励起を確認している。なお、話が変わるが、従来、円盤振動としては円盤面内での振動や面内でのエピサイクリック振動が関係してくる振動が主として調べられてきたが、二本腕をもち、垂直方向の運動が卓越する振動も、適度の振動数をもち、かつ動径方向に捕獲されることがわかった (Kato¹²⁾)。このような振動も QPO の一つの候補として検討の価値があるかもしれない。

参考文献

- 1) Kato S., Fukue J., 1980, PASJ 32, 377; Okazaki A. T., Kato S., Fukue J. 1987, *ibid.* 39, 457
- 2) Kato S., 2001, PASJ 58, 909
- 3) Abramowicz M. A., Kluzniak W., 2001, A&A 374, L19; Kluzniak W., Abramowicz M. A. 2001, Acta Phys. Pol. B 32, 3605
- 4) Kato S., 2004, PASJ 56, 905; *Idem.*, *ibid.*, 2008, 60, 111; 1387
円盤振動論の全般的解説としては、Kato S., Fukue J., Mineshige S., 2008, “Black-Hole Accretion Disks—Towards a New Paradigm” (Kyoto University Press, Kyoto) を参照されたい。
- 5) Stella L., Vietri M., 1998, ApJ 492, L59; *Idem.*, 1999, Phys. Rev. Lett. 82, 17
- 6) Whitehurst R., 1988, MNRAS 232, 35; Hirose M., Osaki, Y., 1990, PASJ 42, 135; Lubow S. H., 1991, ApJ 381, 259
- 7) Tosa M., 1994, ApJ, 426, L81; Kato S., Tosa M., 1994, PASJ 46, 559
- 8) Kato S., Fukue J., 2006, PASJ 58, 909
- 9) Shafee R., McClintock J. E., Narayan R., Davis S. W., Li L.-X., Remillard R. A., 2006, ApJ 636, L113
- 10) Ferreira B. T., Ogilvie G. I., 2008, MNRAS 386, 2297; Oktariani F., Okazaki A. T., Kato S., 2009, PASJ 投稿中
- 11) Henisey K. B., Blaes O. M., Fragile P. C., Ferreira B. T., 2009, arXiv: 0910. 1882
- 12) Kato S., 2010, PASJ 投稿予定

Measuring Spins of Stellar-Mass Black Holes by Using HFQPOs

Shoji KATO

2-2-2 Shikano-dai Nishi, Ikoma-shi, Nara 630-0114, Japan

Abstract: High frequency QPOs observed in low mass X-ray binaries are now considered to be disk oscillations in the innermost region of relativistic disks. Here, we present a disk oscillation model of high frequency QPOs and discuss how the mass and spin of the central objects are evaluated by this model.