

# 赤道円盤の振動なんか調べて面白いかな、おっちゃん?

岡崎 敦 男\*

## 1. 某月某夜某天文屋宅

青少年「おっちゃん、居るか?」

おっちゃん「何や、隣のボンかいな。珍しいな。えらい上機嫌やけど何かあったんか?」

青「今日は新入社員の歓迎会があったんやけど、ちょっと飲み過ぎたかな。先月まで高校生として厳しい生活してたやろ。それでよけいに酔うたんやろな。それはそうと、歓迎会で社の先輩に『うちの隣に天文をやってるちょっと変わったおっちゃんが住んでます』と言ったら非常に興味持たれてね、『何か新しい話があったら聞いてきてくれ』と言われたんやけど、おっちゃん何か新しい話あるかな?」

お「漠然と新しい話と言われても困るな。お恥ずかしい事やけど、自分で研究している分野のこと以外はあやふやな知識しかないからなあ。」

青「知ってる。専門バカというやつやな。」

お「そう言われると身もふたもないけど……。専門分野の細分化というところはカッコイイかな?」

青「まあ、そんな事はどうでもええわ。それやったら、おっちゃんのやってる分野の話だけでもええから話してくれへんかな。」

お「うん、ええよ。今日はボンが酔うてるからまた今度にしよか。おっちゃんも嘘を言わんようにちょっと調べとくから。」

青「わかった。ほな、また来るわ。頼んだよ。」

というわけで、おっちゃん氏は隣に住む青少年君に自分のしている研究を中心とした話をすることになったのです。

## 2. 「赤道円盤が振動する話でいいかな?」

それからしばらくした日曜日、隣の青少年君は元気におっちゃん氏宅にやってきました。

青「今日は、早くもやってきたよ。」

お「ああ、今日は、待ってるのもシンドイから、早いうちに来てくれて良かったわ。それで時間あるかな。」

青「うん、夕方から前に言った先輩と会う約束してるから、その前に仕入れとこうと思って来たんやけど。」

お「それやったら十分やな。それで、赤道円盤が振動する話でいいかな?」

青「うんええよ。その代り、赤道円盤と言われても何の事かわからんから、初めにちゃんと説明してや。」

お「あっ、そうか。それなら、まず赤道円盤とは何かということをおっちゃんに喋って、それから、そういうものを持つ天体にどんなものがあるか少し列挙してみるか。その次に、どんな理屈が考えられているか紹介して、最後に赤道円盤の振動として理解できそうな現象について述べる事にしよう。」

と言いながら、おっちゃん氏は次のような話を始めたのです。

お「まず、アクリーション・ディスクの説明から始めよう。これは日本語で降着円盤、降積円盤、あるいは付着円盤と訳されている事からもわかるように、ある星、ブラックホールでもいいんやけど、の周りに降り積んでできたガスの溜り場の事やねん。どうして溜るかというと、それは降ってくるガスが角運動量を持つてくるからやねん。そのために、まっすぐ中心の星へ降る事ができないわけやな。この辺はいいやろ。それで、そういう円盤を持っている星にどんなものがあるかというと、ブラックホール、中性子星、白色矮星なんかがあるやな。これらの星をよくコンパクトな星という風に呼んでいる。他にも、普通の星の中にも円盤を持っているものがあるんや。B型輝線星、あるいは輝線(emission lines)の頭文字をとってBe星と呼ばれている星なんやけど、ここでB型というのは星のスペクトルタイプ(虹の7色分類)のことで、まあ大体、表面温度が1万度から3万度位の星やと思ってもらったらいいわ。太陽より半径も質量も何倍か大きい星やねん。後で言うけど、この種の星もなかなか面白いんや。」

青「そう願いたいな。もし面白なかったら怒るで。」

お「余り若いうちからせつかちになったらあかんよ。人の話を聞く時は、『面白いよ』と言われても、『どうせ面白くないやろけどとにかく聞いてみよか』ぐらいの気持ちで聞かなあかんねんで。それはとにかく……。コンパクトな星は重力が非常に強いから、その周りにできている円盤は全部外から降ってきたものなんやけど、Be星の場合は普通の星やからちょっと事情が違ってくるねん。もちろん、外から降ってきて円盤ができる事もあるやろけど、自分自身のガスを放出して円盤をつくる事もあるわけや。それで、これらを総称して赤道円盤と呼ぶことにしよう。」

おっちゃんは段々夢中になってきました。一方、青少年君は初めて聞く言葉がいくつも出てきて頭がはちぎれそ

\* 京大理 Atsuo, T. Okazaki: Why Do You Enjoy Studying Equatorial Disk Oscillations

うです。たまりかねて叫びました。

青「もうあかん。覚えきれへん。何となく感じはわかるんやけど、知らん単語が一杯出てきて……、もうこれ以上覚えるのは無理や。」

お「覚えようとしてたんか。そんな事必要ないねんで。何となく感じがわかったらええねん。おっちゃんは喋る都合上いろいろ細かい事も言ってるけど、荒筋だけ聞いたらええねん。宇宙でこんなことが起こってるんか、と何となく思えるようになったら、それでもう十分過ぎる程なんやから。」

### 3. どんな天体があるのかな？

お「時間の都合もあるから、後の話に関係する天体だけについて話すことにしよう。いいね。では、規模の大きい順に見ていこう。まずは、銀河中心核。ここには、巨大質量（太陽の質量の100万倍から10億倍くらい）のブラックホールがあるとされている。その周りには円盤（ドーナツ状に膨らんでいるかも知れへんけど）が形成されており、更にこの円盤（ドーナツ）は、円盤状に分布したガス（雲）に取りまかされているらしい。その半径は、数100光年もあるねん。大きいやろ。急に規模が小さくなるけど、星と同程度の質量のブラックホールに移ってみよか。そういうブラックホールの候補はいくつかあるけど、これはもう確実にブラックホールやと信じられているのは白鳥座のX線天体第1号（Cyg X-1）だけやねん。Cyg X-1は、太陽の約10倍の質量のブラックホールとガス円盤の系で、円盤のモデルとしては、陽子と電子の温度が異なっている2温度モデルが有力なんやけど、薄っぺらな円盤とそれを取り囲む熱いコロナというモデルもある。Cyg X-1は、いろんな時間尺度の変光を示すことでも有名なんや。特に1ミリ秒から10秒くらいの間の時間尺度でもう混沌とした変光を示すねん。つまり、一見すると、周期性なんか全くないようなでたらめな変光を示すわけやな。この事は、また後で触れることにしよう。

さて、順番からいうと次は、中心に中性子星がある場合になるけど、今日の所は中性子星の話は省略しようと思うねん。というのは、中性子星の話は、これまで何回も天文月報に解説記事が出ているからね。とにかく、この辺の話では、中性子星の磁場と降着円盤の相互作用が面白いということだけ言っておこうか。

次は白色矮星のまわりの赤道円盤の話やな。ここでも、話を限って矮新星と呼ばれる天体についてだけしゃべることにしよう。とにかく、近接連星系中の白色矮星とその周りの円盤の系で、この円盤はもちろん相手の星（赤色矮星）から降って来たガスでできているわけや。この系が10~100日程度の間隔で小規模な爆発を起こしているところから、矮新星と名付けられた

んやと思う。この爆発の原因には、2説あり、まだ決着はついていない。1つは、相手の星から降りつもるガスの量自身が変化しているとする説であり、もう1つは円盤が相転移して（相手の星から降ってくるガスの量が一定でも）白色矮星表面へ降りつもる量が増加するという説やねん。ところで、この矮新星が、周期が30秒~1000秒くらいの準周期的変光を示しているんやけど、これは円盤の振動で説明できるかもしれん。

さて、Be星の話に移ろう。この種の星は、円盤を持たないおとなしい時期と、円盤を形成し、独特な活動をする時期を交互に繰り返している。おとなしい時期から活動期に移る際には、星からの質量放出（そして円盤が生まれる）に伴うダイナミックな現象が見られるという話や。このダイナミックな現象（グチャグチャした様子と言ってもええな）が静まってくる頃から、 $V/R$  ( $R$  ぶんの  $V$ ) 変動なるものが現れてくる。星+赤道円盤の系を真横から見ると、各輝線がそれぞれ2つのピークを持つわけで、そのうち、紫の方（Violet）の成分の強さを  $V$ 、赤い方（Red）の成分の強さを  $R$  と呼んでるんやけど、この  $V$  と  $R$  の比の値が時間と共に変わっていくのが  $V/R$  変動と呼ばれる現象なんや。約7年周期で変化する星が多いが、2年位の周期の星もある。更に、低温度に対応する輝線で  $V/R > 1$  の時に、高温度に対応する輝線では  $V/R < 1$  となっているのが観測された星もある。まあ  $V/R$  七変化という所やな。とにかく、星の自転周期が1日程度であることを考えると、この7年という周期がいかに長いものかわかるやろ。モデルはいくつかあるんやけど、どのモデルもその提唱者だけが信じているというのが現状やないかな。」

青「うーん。星の周りにはよく赤道円盤が形成されるし、それがいつも振動しているという事はわかったような気がするけど、今ひとつピンとこんなあ。別に振動していようと、じっとしていようとどっちでもええやんか。何が面白くて、ええ歳した人間が赤道円盤の振動の研究なんかするのかなあ。やっぱりおっちゃんは変わってるなあ。」

お「えらいきついなあ。まあ確かに、円盤の振動というのは目立たない分野で、もっと面白い世界が他に一杯あるやろけど……。例えば、赤道円盤の話でも、円盤が何かの拍子に不安定になった時なんかは劇的な光度変化が見られるし、劇的なものは人の注目を集め易くていつも良く議論されるわな。しかし、それ程目立たない日常的な変化を調べる事も大事なんやで、それによって、円盤の物理状態や、中心星がどんな状態にあるかを知る事ができる筈やからね。残念ながら現在は理論と呼べるものが殆どなく、まあ言ってみれば未開

の分野なんやけど、そのうち観測との詳しい比較ができるようになるのやないかな。赤道円盤の振動学（地震学）がまじめに議論されるようになるのもそう遠いことやないと思うで。」

おっちゃんは、青少年君の質問に胸を張って答えられない自分に寂しさを感じながら、自ら未開の分野と呼んだ、理論の話を始めたのです。

#### 4. 少し理屈っぽくなるよ

お「一般的な場合を考えるのはとても複雑なので、たいてい人は極端な場合だけを考えることになる。まあ、計算する人がどういう視点で物事を考えているか（あるいは考えざるを得ないのか）という事なんやけどね。例えば、円盤自身の重力を考慮するのかしらないのかとか、円盤中の一点だけで振動を考えるのか（ローカルな振動）それとも円盤全体に及ぶ振動を考えるのか（グローバルな振動）、熱の出入りは有るのか無いのか、円盤は薄いのか分厚いのか、磁場の事はどうしてくれるんやとか、それはもう考え出すときりが無いくらい選択肢があることになっている。言い換えると、こういう風に限定して考えないと問題が解けないという事で、そんなに初歩的な段階に今の理論（と呼ぶのがおこがましければ、計算）はあるわけやねん。今日は、最も簡単やしそれなりに重要な場合である『自身の重力は非常に弱くて、形は薄っぺらな円盤』だけについて喋る事にしよう。図1に書かれているような円盤やと思ってもらったらいいわ。

円盤の鉛直方向の厚さ  $H$  よりももっと短い波長の振動を考えると星の振動と同じタイプのモードが出てくるんやけど、この話は省略する。こんなに短い波長の振動は観測的に面白くないからね。

振動の波長が  $H$  程度の大きさで、円盤の水平方向の拡がりに比べると遙かに短いという場合を考えようか。つまり、円盤の各点が勝手気ままに鉛直方向に振動しているという場合やね。この種のローカルな振動が、これまで最もよく調べられた振動やねん。結果は、当たり前やけどみんな一致してて、ある点の鉛直方向の振動の周期はその点のケプラー運動の周期の程度になるという事やった。この結果は、振動が軸対称であらうとなかろうと変わらへん。高調波の周期は、粗っぽく言えば、ケプラー周期の  $1/2, 1/3, \dots$  となる。まあ、この辺の話は、鉛直方向の自由振動（＝圧力がない時の振動）の周期がケプラー周期になる事から予想できるわな。もし、こういうローカルな振動をしている円盤を観測すると、一見すると何が何やらわからんけど詳しく調べるといろんな周期の振動の重なっている事がわかる、という事になるやろね。

さて、グローバルな振動について考えてみようか。

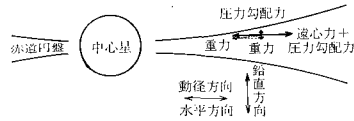


図1 赤道円盤の断面図。

この場合、円盤が相対論的か（つまり、ブラックホールに近い所を考えているか）そうでないかで少し変わってくるので、初めに共通に議論できることを述べて、次に非相対論的な場合、最後に相対論的な場合の事を考えることにしよう。問題を解く鍵は、(図1にあるように)円盤中の圧力は非常に小さくて、水平方向の力のバランスは殆ど重力と遠心力だけで保たれているという所にあるねん。こういう円盤中でどういう波(振動)がグローバルに存在し得るかという事を考えるわけや。波の形を  $\sin(\omega t + m\phi)$  とすると、円盤の回転に乗かって見た波の振動数  $\sigma$  は  $\sigma = \omega + m\Omega$  となるね。ここで、 $\omega$  は止まっている人から見た波の振動数で、 $\Omega$  は円盤の回転の振動数、 $m$  は波の腕の本数、 $\phi$  は適当に測った方位角やと思って欲しい。もしも圧力がない時は、許される振動は  $\sigma$  が水平方向の自由振動の振動数（即ち、周転円運動の振動数  $\kappa$ ）と一致するようなものだけになる。（同語反復かな？）この事を式で書くと  $\sigma = \pm\kappa$  となるわけやけど、ここで  $\sigma$  も  $\kappa$  も場所の関数やということが大事やねん。つまり、グローバルにこの式が成り立つ必要があるけど、それは一般に難しい事なんや。もし、もっと違った振動数で振れようと思ったら、何か重力と対抗できる力で支えてもらわなあかん。この力は圧力勾配力しかないわけやけど、前にも言ったように円盤中の圧力は非常に小さいから、結局ものすごい勾配をつけるしかないわけや。つまり、非常に短い波長の振動になるしか手はないんやけど、一方で余り短い波長の振動というのは時間がたつうちにグチャグチャになって消えてしまうやろな。と言うわけで『波は  $\sigma = \pm\kappa$  となる地点付近だけに存在する事ができる。この点から少し離れただけで、波は波長が非常に短くなって（時間と共に）消えてしまうだろう。』と結論できるわけや。」

青「おっちゃん、そろそろ疲れてきたんやけど……。」

お「そうやな、話を急がないといかん。上の話から、薄っぺらな円盤中にグローバルな振動が存在できるとすれば、それはとても特殊なものやという事がわかったんやから、あとはその特殊な波を捜すだけやな。これは以外と簡単やねん。非相対論的な円盤では、圧力を無視すれば、どこでも  $\Omega + \kappa$  が成り立っているけど、これはまた  $\omega = 0, m = 1$  の波に対して円盤全体で  $\sigma = \kappa$  が成り立っているという事や。特殊なモデルに対してやけど、実際に圧力の効果を入れて計算した結果、 $m$

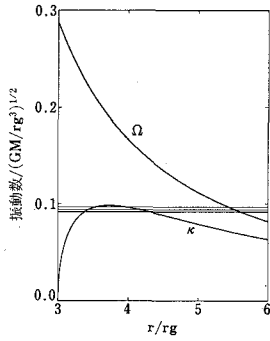


図2 周転円運動の振動数 $\kappa$ . 最大値を持つ事に注意. 合わせて円盤の回転の振動数 $\Omega$ も示している. 円盤中に捕捉されるグローバルな波の振動数が3つ細い横線で示されている. 図中 $r_g$ はブラックホールの半径.

=1 (一本腕) の, ケプラー周期よりずっと長い周期の振動がグローバルに存在する事が示されている.

相対論的な円盤については図2を見てもらうと話が早い. まず,  $\Omega \approx \kappa$  となっていることから, 一本腕のグローバルな振動が存在しないとわかる. (実は, この図では半相対論的なポテンシャルとでもいうべきものにより相対論的効果を近似しているのだから, 図2は定性的には正しいが定量的には正しくない.) もう1つすぐにわかることは,  $\kappa$  が最大値  $\kappa_{max}$  を持っているという事やね.  $\kappa = \kappa_{max}$  の周辺では  $\kappa = \text{一定}$  と近似しても悪くないから, 結局  $\omega \sim \kappa_{max}$ ,  $m=0$  の波がグローバルに (と言っても  $\kappa = \kappa_{max}$  周辺に限られるけど) 存在することがわかるわけや.

5. 応用例を少しだけ

お「最後に, 3. の天体現象を 4. の理屈で解釈するとどうなるかとしてことを見てみようやないか.

(a) 一部の銀河中心核

相対論的な円盤の振動やとすると, 太陽の約1億倍の質量のブラックホールに対して約1日の周期になるわけなんやけど, 今の所そういう周期性を示す銀河はあまり見つかってないなあ. セイファート銀河 NGC 4151 と, 他に 2・3 個の銀河だけ.

(b) Cyg X-1

幅広い時間尺度の変光はローカルな振動で説明できる. 10 ミリ秒より少し短い周期の成分を強く持っているとの報告もあるけど, もしこれが本当なら, 相対論的な円盤中のグローバルな振動を見ている可能性があるな.

(c) 矮新星

準周期的変化はローカルな振動で説明可能.

(d) Be 星

$V/R$  変動は (非相対論的な円盤中の) グローバルな一本腕振動で説明できると考えているんやけど, どう思う? 約7年という周期は一本腕振動にとって都合ええねん. それに,  $V/R > 1$  の輝線と  $V/R < 1$  の輝線が同時に観測されることがあるという事も, グローバ

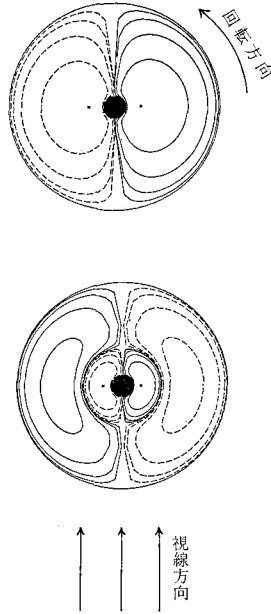


図3 Be 星子想図. 中心星を黒丸で示した. その周りが円盤部分. 密度の高い部分を実線で, 低い部分を破線で表した. 上図が基本的なモードに, 下図が第一高調波に対応する.

ルな振動のパターンとして理解できそうやな. おっちゃんの想像を図にしたのが図3やねん. 温度は円盤の内縁で最も高く, 外へ向って減少しているでしょう. 図3の上図を下側 (観測者側) から見ると, 密度の高い領域が遠ざかり低い領域が近づいているから,  $V/R < 1$  になる. この図では温度の高い輝線も低い輝線も同じ傾向の  $V/R$  を示している. それに対し, 下図では, 温度の高い領域は全体として遠ざかっているのだから  $V/R < 1$  に寄与し, 温度の低い領域はそれとは逆に  $V/R > 1$  に寄与することになる. まだ思いつきの段階やけど, 傾向としてはいいんやないかな.

とまあ, これでおしまいなんやけど, 応用と言うには少しお粗末やったかな.

青「要するに, まだ何にもわかってないという感じやね. 良く言えば『最前線』, 悪く言えば『とても恥ずかしい研究の現状』といった所かな. おっちゃんももっと頑張らないとあかんよ.

お「そうねえ. やっぱり人材不足という事かなあ. 天文学という広い分野を少数でカバーしないといけない現実があって, 人の来ない分野はどうしても歩みがのろくなるからなあ.

青「なんやらしみじみしてきたね. ほな, 僕もう行くわ. おっちゃんももうちょっと賢くなって, はよ就職先見つけるんやで.

青少年君が去り, 薄暗い部屋におっちゃんが1人座っています. それにしても, おっちゃんが無職だったとは……. 驚き, 驚き.