

30. Chaotic Phenomenon of the Rotating Disk System

花見 仁史 (北大 理)

1. はじめに

ビッグバン以来、重力の谷を転がり落ちつつ、回転運動や熱により作られたテラスに引っかかった物質から銀河や星などが生まれた。宇宙にあるほとんどの構造、天体はこの重力とそれに均衡する力との相克生まれて転がり落ちる石ころのようなものといっていよう。

この宇宙の形態形成の要である重力は、エネルギー放出現象でも重要な働きを担う。活動的銀河中心核(AGN)や低質量連星系のX線源のような活動的天体現象は、中心に鎮座するブラックホールや中性子星へ物質が降り積もり、その重力エネルギーが散逸過程を通して一部を電磁場などに解放されて引き起こされると考えられている。いわば、人間社会でいえば体制とか権力に相当する中心天体の作った重力の谷に、まだ尻の青く形の定まらぬ星間ガスが自由だの自立などと抵抗し叫びながら落ちいき、宇宙空間を渡るその叫びを我々は電磁場として聴くのである。近年の観測技術は、この叫び声のなかに何か意味のありそうな震えさえも捕らえるようにまじった。X線観測衛星によりラビッドバースターやQPOと呼ばれる非線形振動的現象が発見され、特に「ぎんが」などで詳しく研究されるようになっていく。この非線形振動的現象を中心星への同一化をもくろむ織田信長ごとき重力に対する「へ」（星間ガス？）の様な石ころのささやかな抵抗の証であるとの偏見から見てみようと思う。

2. 降着過程に関係した非線形的振動現象

今日においては多くの天体現象が降着過程、特に降着円盤（アクリションディスク）のモデルにより理解されている。この円盤の定常状態のモデルには標準モデルとよばれるものがあるが、いろいろな天体で光度の激しい変化が観測され、非定常的な視点をいれたモデルも研究されるようになってきた。このような変動現象のなかで、近年大きく理解が進んだものにわい新星のアウトバーストがある。これは一万度前後の温度での水素の解離、再結合により降着円盤が熱的不安定な状態と成り、質量降着率の高い状態と低い状態の間を振動する極限周期的変動として説明される。その他、円盤の安定性の関係したアウトバーストのモデルは、星生成領域の活動性に関係している可能性も指摘されている。また、中性子星表面への物質降着による爆発的核反応によるバースト現象もある。しかし、ここでは中性子星への物質降着での重力エネルギーの解放と予想される天体からのX線強度の非線形振動現象を見て行くことにする。

A) ラビッドバースター

これは、MXB1730-335という天体で、1976年に発見されてから、多くのX線観測衛星により観測されてきた。この天体は、時々、X線強度が増大するバーストが数十秒続き、定常成分とバースト成分の強度がほぼ等しい特徴を持っている。この現象は中性子星に流入する星間ガスの重力エネルギーの解放によると考えられている。また、各々のバーストのエネルギーが次のバーストまでの時間間隔とほぼ比例する事が解っている。この事から定常的降着ではなく、何んらかの降着してきた物質を貯める構造が形成されている事が示唆される。

B) 準周期的振動(QPO)

この現象は、低質量X線連星系(LMXB)と呼ばれる中性子星を含む連星系からのX線放射強度の準周期的振動現象の事であり、現在のところ10個程度の天体で見つかっている。A)のラビッドバースターでも見つかっている。実際の光度のデータの時系列からは単なる雑音のようにしか認識されないが、図1に示される様にスペクトル解析をするとパワースペクトルが $1/f$ (f は振動数)に近い低周波ノイズ(LFN)とその裾野にある幅を持ったQPOを認めることが出来る。LFNとQPOはなんらかの関係がありそうであるが、LFNは常に見られるがQPOは出たり出なかったりする。さらにQPOは速いもの(10~50Hz)と遅いもの(数Hz)があることも明かとなっている。これらの事から、QPOを伴うLMXBのX線放射機構はその構造が多重状態を取っていることが示唆される。今のところQPOが発見されている天体は、その光度が $L_x \sim 10^{38}$ erg/sと中性子星のエディントン光度 ($=1.4 \times 10^{38}$ erg/s)に近いものが多い。しかしながら、ただ暗い天体では発見されなかった可能性もあるので今後の「ぎんが」などによる観測ではっきりしてゆくと思われる。

研究会報告

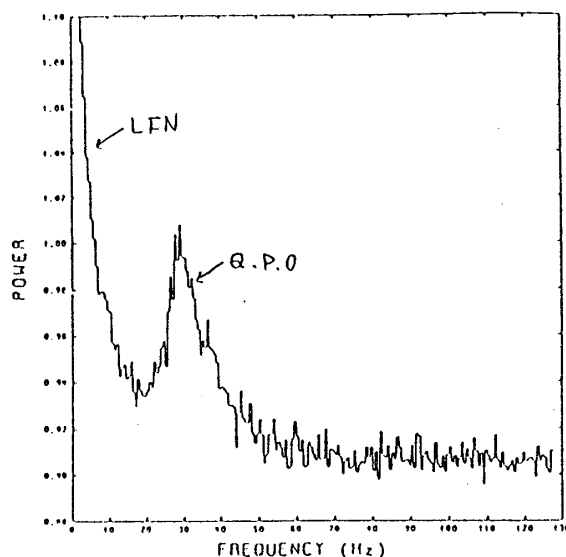


図1 GX-1のX線強度のパワースペクトル
(M.van der Klis, in 'the Physics of Accretion onto Compact Objects' Edited by K.O.Mason et al., 1986, Springer.)

3. モデル

上述のLMXBのX線変動に対してすでにいくつかのモデルが提出されている。ここでは詳しくは紹介せずに私の独断的考察を述べさせてもらう。

中性子星とその周辺の降着円盤からなるシステムの振舞いを現象論的に捉える時に大きく二つの立場があろう。一つはそのシステムの入力に相当する外部からの物質降着率変動するという外因の見方、もう一つは物質降着率などの外部環境は一定であるがシステム内部で自励起的変動が起こるといふ内因の見方がある。以下ではこの内因の見地からモデル化する。

内因説を採るとシステム内に質量とエネルギー（重力＝位置エネルギー）を貯める構造を持たなければならない。このような構造は力学平衡に近い状態にあるはずである。そこで定常、平衡、振動とかの概念を考え直してみよう。平衡状態は力学的には少なくとも二つの力の均衡により、また定常状態はシステムへの物質の流れなどの入力と出力の均衡により保たれる。一方、振動は平衡状態からのずれを均衡する力が互いに平衡状態に戻そうとして起きるものとも理解できる。この様に、ある複雑なシステムの力学的性質を調べる場合、均衡する可能性がある力の主なものに絞って見直す事は重要である。従ってLMXBの光度変動もこの視点から捕らえ直すことにする。

中性子星近傍において、最大の覇者は中性子星の重力である。これに対する宿命のライバルは物質の回転運動による遠心力である。しかし、散逸過程により徐々に屈服して落下する事になるのが降着円盤の標準モデルの描像である。この様な穏やかな撤退が常に起きれば世の中は大体平和な定常状態にあろうが、30代の大台が目前に迫ったひねくれものには水戸黄門をみているようで面白くない。LMXBの変動現象が面白そうに思えるのは印籠を有難たがらない造反有理を唱える思わぬ伏兵が潜んでいるかもしれないからである。それでは重力に逆らおうとする輩とは一体何物であろうか。私は中性子星の磁場が降着により解放される輻射が怪しいとにらんでいる。以下で中性子星の磁場が容疑者であるとしたもとでの内偵報告をする。

A) 中性子星の磁気圏と降着円盤との相互作用

中性子星が強い磁場を持っていると、その磁場の降着円盤への影響は無視できない。星近傍の磁場が強い領域は磁気圏 (Magnetosphere) と呼ばれ、磁場のストレスによる角運動量輸送への影響や、中性子星への物質の降着を止める効果があると考えられている。特に落下してきた物質と磁気圏との相互作用の結果、形成された境界は磁気遮断面 (Magnetopause) と呼ばれ、変動現象に深く関わっていると思われる。これは、磁気圧と重力との均衡で形成され、このシステム内の物質やエネルギーの貯蔵庫の働きをするであろう。従って予想される磁気遮断面の性質をまとめてみる。

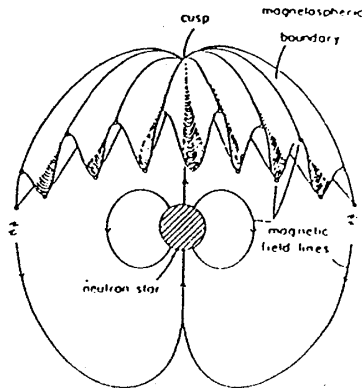


図2 磁気圏への球対称的降着により形成された磁気遮断面

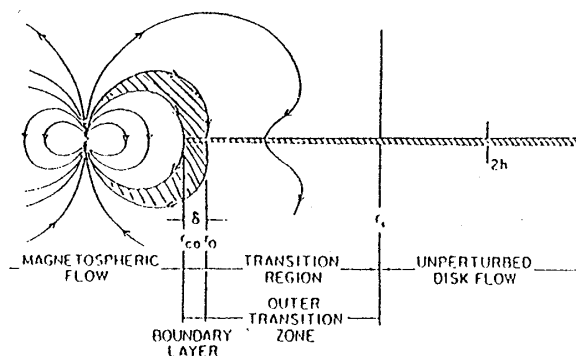


図4 降着円盤と磁気圏との相互作用

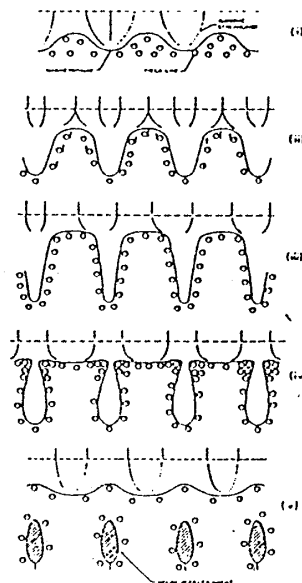


図3 図2の磁気遮断面でのR-T不安定性の成長

まず降り積もる物質の角運動量が無視できて球対称に落ちてくる場合の磁場の影響を見よう。磁気遮断面の位置は外部の落ちてきた物質の圧力（～単位表面積当りの重力）と内部の磁気圏の磁場の圧力と釣り合うところではほぼ決まる。中性子星の表面での磁場が 10^{12} G程度の時、この磁気遮断面の位置は 10^8 cm程度になる。ところが、この領域は比較的高密度になり輻射冷却がきいて温度の低下により静水圧平衡の条件が満たさなくなる。このような場合、油の上に重い水を乗せたようにレイリー＝テラー(R-T)不安定性が成長して(図2)、磁気圏のなかに塊状になった物質が落下していくと考えられている(図3、4、Aron and S.M. Lea, Ap. J., 207, 914, 1976)。

一方、物質が降着円盤を形成しながら落下する場合でも、磁気圏の磁気圧で流れが止められる。球対称の場合と同様だが、磁気遮断面の所で自由落下による動圧の代わりに円盤内の圧力と磁気圧で釣り合っている。定常状態であるとする、円盤の内縁である磁気遮断面の位置は、球対称の場合のほぼ0.2倍と成る。磁気双極子と円盤の回転軸が平行な定常状態の描像を図4に示した。しかし、この内縁近傍では磁場のストレスによる角運動量輸送が重要になり、むしろ物質は非定常的に角運動量を殆ど失って自由落下に近い状態で降着すると思われる。

B) 磁気圏の非線形振動モデル

その時々国際情勢の一面が国際紛争地域に反映されるように、磁気遮断面はこの様な重力と磁場の覇権を争うもの同士の関係を反映する境界とも見なせる。従ってその運動に着目した図3と4を掛け合わせた描像の単純化したモデルを考える。

図5にモデルの概観を示した。磁気圏の磁場の影響が無視できる降着円盤と磁気圏の間に形成された磁気遮断面を質量 m 、単位質量当りの角運動量 h 、半径方向の速度 V をもつ半径 r 、太さ L のリングと見なす。このリングに円盤から物質が溜り、不安定性の成長によりその一部が星に落下する。落下した物質は星表面に衝突し、熱化され発生したX線を我々は観測している事になる。

リングの半径方向の運動方程式は次のようになる。

$$m \frac{dV}{dt} = (B_o^2 - B_o^2) 2\pi r 2L / 8\pi + mg - m'_{in} V_d \quad (1)$$

$$g = -GM/r^2 + h^2/r^3 \quad (2)$$

研究会報告

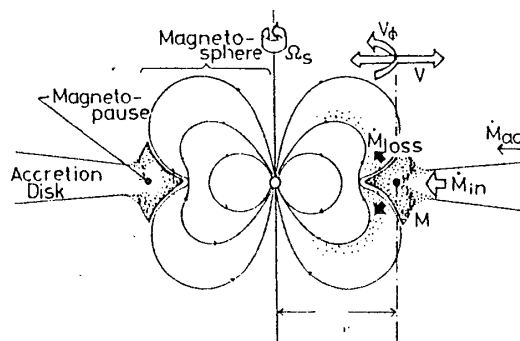


図5 非定常降着モデルの概観

$$dr/dt=V \quad (3)$$

$$B_{\phi} = \mu/r^3 \quad (4)$$

ここで m'_{in} 、 V_d 、 B_{ϕ} は各々円盤から磁気遮断面に加わる質量の割合(円盤の定常降着率 m'_{acc} にほぼ等しい)、磁気遮断面と円盤内の物質との半径方向の速度差、と外界の磁場を表している。磁気遮断面には円盤から物質が加わるだけでなく、上で見たように加速度 $g_{eff}(=dV/dt)$ が正なら、R-T不安定性により磁気圏のなかに物質が落下し失われる事もおき、その不安定性の成長率は線形解析から、

$$\omega \sim (g_{eff}k)^{1/2} \quad (5)$$

となる。ここで k は揺らぎの波数である。質量損失率 m'_{loss} に一番影響を与えられる波数は、磁気遮断面全体で同時に不安定性を引き起こす揺らぎのもの、つまり半径の逆数程度と考えられる。従って、質量損失率は以下ようになる。

$$m'_{loss} = m\omega = m(g_{eff}/r)^{1/2} \quad (6)$$

これから、磁気遮断面に対する質量保存則は、

$$dm/dt = m'_{in} - m'_{loss} \quad (7)$$

定常状態であれば磁場によるストレスを考慮した標準モデルで記述できるが、今の場合、非定常な回転方向の運動方程式を解かなければならない。

$$mdh/dt = B_{\phi} \phi 2\pi r^2 2L/4\pi + m'_{in} h_0 \quad (8)$$

$$h_0 = (GM/r)^{1/2} r \quad (9)$$

ここで、 h_0 は半径 r で円盤から付け加わる物質の単位質量の角運動量である。

(8)の右辺の第一項は磁場によるトルクを表しているが、 $B\phi$ が必要である。それには、MHD(Magnetohydrodynamics)方程式系の磁場の時間変化を考慮しなければならない。軸対称性を仮定し、磁場のポロイダル成分(回転方向に垂直な方向成分)は双極子配位からずれなく外部の磁場の影響を無視すると、 $B\phi$ について、

$$DB\phi/Dt = -B_{\phi}(V_{\phi} - V_{ms})/L - m'_{loss} B\phi/M \quad (10)$$

を得る。ここで $V_{\phi} = h/r$ 、 $V_{ms} = \Omega_s r$ は磁気遮断面と磁気圏の回転速度である(円盤の回転速度の方向を正と取る)。磁気圏の回転は内部のアルファベン速度が速いので剛体回転とみなした。(10)の第一項は磁気溜りの物質と磁気圏の回転速度のずれにより B_{ϕ} を回転方向に引きずる事による $B\phi$ の生成、第二項は、磁気圏内に落下する物質と共に磁気遮断面から失われる $B\phi$ を表している。

これらの方程式により、磁気遮断面の動力学の性質が記述される。この方程式系は四つの常微分方程式から成るので、ポアンカレベンディクソンの定理より一般には非線形振動が発生しうる。結局、無限自由度のMHD方程式系から少数自由度の常微分方程式系が得られた事になり、気象学者ローレンツが乱流の発生の説明の為に基本モードを取り出し、カオス力学系のローレンツモデルを導出したのと似ている。

実際に数値的に解を求める時にはこれらの方程式を無次元化したもので計算した。この動力学の性質を左右する制御パラメータは外部の質量降着率 m'_{acc} と中心星の角速度 Ω_s である。

C) 結果

無次元化した m'_{acc} と Ω_s のとりかたによりその動力学の性質が大きく三つに分類出来た。性格は、しばらく振動するが広がってしまうもの、極限周期振動、カオスの振動に分かれた。図6はカオスの振動の場合の無次元化した m'_{loss} と m の時間変動を表している。結果として、 $\Omega_s > 0$ なら、つまり円盤と星の回転の方向が一致してる場合は周期的振動、 $\Omega_s < 0$ 、両者の回転方向が逆ならカオスの振動が

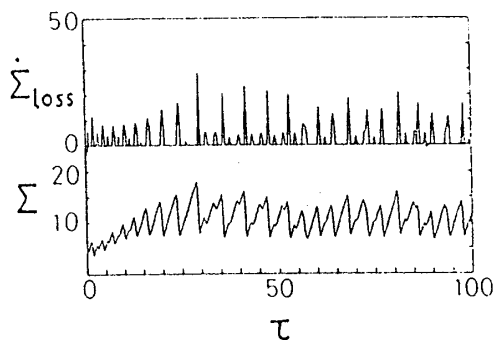


図6 無次元化した $\dot{m}'_{\text{loss}}(\Sigma'_{\text{loss}})$ と $m(\Sigma)$ の時間変動

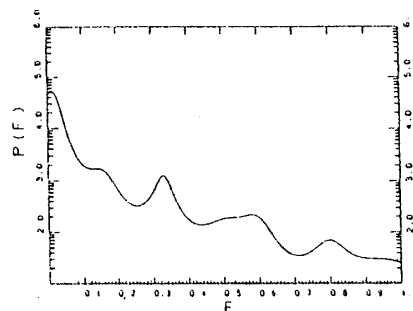


図7 カオティックな場合のスペクトル

発生する場合がある事が解った。

スペクトル解析をすると確かにカオティックな場合、負のべき乗的な連続スペクトルが出てくる(図7)。

D) 結果の物理的解釈

上で述べたようにカオスの振動の発生は星の回転方向のとり方に深く関係していると思われる。この原因を思考実験的に調べる事にする。得られた結果は、常に質量が変動しているが、仮想的に磁気溜りを質量が一定のままのテストリングとみなす。このテストリングは、磁場の弱い外部ではほとんどケプラー的に回転しているが半径が小さくなるにつれ、磁場で磁気圏の回転に引きずられてその回転速度にケプラー的回転から乗り移るであろう。このときのテストリングの回転の振舞いを図8aで示した。円盤と星が準方向回転であれば回転速度が正のままケプラー的回転から磁気圏の回転に乗り移るだけであるが、逆回転の場合、一度、回転速度が0に成らなければならない。従って、このテストリングに働く遠心力を考慮した正味の引力の振舞いが変わってしまう。これを図8bに示した。実線は単位質量当りにかかる磁場の圧力による斥力であり、鎖線は準方向回転の場合の重力と遠心力による引力、一点鎖線は逆回転の場合の引力である。鎖線と実線との交点は質量の一定である場合には力学的に釣り合った力学的平衡点を表している。同回転の場合、その点がA点の一つでその点は安定点であるが、逆回転の場合には平衡点はB、C、D、の三つとなる。ただしBとDが安定点となりうるがC点是不安定平衡点である。

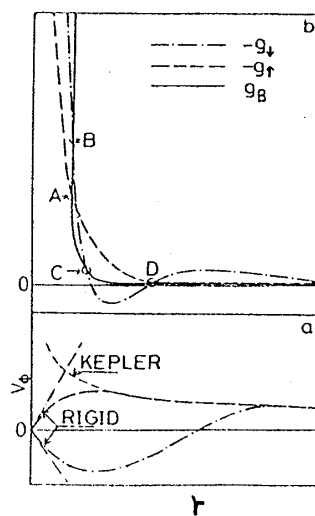


図8a)中性子星が円盤に対して準回転と逆回転している場合のテストリングの回転速度の振舞いとb)遠心力を入れた重力と磁気力との関係

研究会報告

揺らぎにより、それぞれの安定点の近傍で起こる振動を励起させる。ここで計算したモデルでは、この揺らぎを引き起こすものはR-T不安定性により引き起こされた質量の変化である。質量変化は振動を励起させるだけでなく、平衡点のずれも引き起こす。準方向回転であれば平衡点が一つしかないのので平衡点のずれは基本的な系の振舞いに影響を与えない。しかしながら、逆回転の場合、このB、C、Dの平衡点が非常に近くなると、平衡点のずれは各平衡点に付随した振動の混合を引き起こすと思われる。これが逆回転の場合にカオス的振動を引き起こした原因と考えられる。

E) 観測との対応

上に述べた結果は、無次元化した方程式を解いて求めたものである。観測と対応させる為に、典型的な時間スケールとバーストのエネルギーと必要とされる中心星の磁場の強度を導出しておこう。

$$t_{d,un} = 0.2(r/10^9 \text{ cm})^{3/2} (M/M_\odot)^{-1/2} \text{ (sec)} \quad (11)$$

$$E_B = 2.58 \times 10^{38} (M/M_\odot)^{1/2} (r./10^6 \text{ cm})^{3/2} (m_{acc}/10^{18} \text{ g/s})$$

$$x(r/10^9 \text{ cm})^{3/2} \Delta \tau \quad (\text{erg}) \quad (12)$$

$$B_0 = 2.98 \times 10^{13} (M/M_\odot)^{1/4} (r./10^6 \text{ cm})^{-3} (m_{acc}/10^{18} \text{ g/s})$$

$$x(r/10^9 \text{ cm})^{7/2} \Delta \tau^{1/2} \quad (\text{gauss}) \quad (13)$$

ここで $\Delta \tau$ は無次元化したバースト間隔である。

この場合、系の振舞いは磁場による磁気遮断面の角運動量の損失の時間スケールと回転の時間スケールがほぼ等しい為、 $t_{d,un}$ は回転の時間スケールでほぼ決っている。従って $t_{d,un}$ は磁気遮断面の平均的半径によるから、振動現象の時間スケールが $t_{d,un}$ と見なしうるなら、観測から換算した $t_{d,un}$ からReservoirとしての磁気遮断面の典型的半径がわかり、さらにその半径で支える為に必要な星の磁場の強度がわかる。

観測からQP0の典型的振動数(数10Hz)を説明するには、磁気遮断面の半径が 10^8 cm になる 10^{18} G の星の表面磁場が必要である。また、ラビッドバースターのバースト間隔は10sから1000sのなるので半径は 10^{10} cm 、星表面の磁場が 10^{15} G 以上なければいけないことになる。

このモデルでは回転軸と磁場双極子の軸が揃っていたが、一般には傾いている場合も有り得る。この様な場合、磁気遮断面から落下した物質は磁場に沿ってその軸上の星表面に衝突し、熱化され輻射を発生させるから、X線バルサーとして観測されてもよいことになる。現在の所その様な例はまだ見つかっていないが、もし発見されれば、このモデルの検証になりうる。

磁場と回転運動が重力に抵抗する容疑者としたX線変動のモデルをたて、その振舞い調べてきたが、ここで提出したモデルは輻射や熱的効果を見捨てていた。実際の現象においては、これらの物理過程はかなり重要になると思われる。QP0などは今のところエディントン光度に近いものに発見されているように輻射が無視できない状況が絡んでいる可能性がある。従って輻射も重要参考人として事情聴取中である。

最後に

QP0に付随した1/fノイズと似たものが活動的銀河中心核からも観測される事も聞くから、1/fノイズは降着現象に不変的なものかもしれない。この1/fノイズは1/f^bに比例するノイズのうちb=0のホワイトノイズとb=2のブラウンノイズの中間のべき数b=1であることから、褐色色ノイズとかピンクノイズと呼ばれる。さらにこのピンクノイズは電気回路や高速道路上の車の流れさらには心臓の鼓動にも見つかっている。このように我々が一般的に活動的とか生き生きしていると感じる裏には、カオスに関係したピンクノイズが顔を出す。科学技術の進歩と共にシステムを細分化する還元論的世界観は日常生活にも大きな陰を落としているが、自然の生き生きした振舞いを記述するには我々はまだまだ未熟である。カオティックな振舞いに現れるピンクノイズのパワースペクトルが1/fということはその振舞いに長時間相関がある事を意味する。つまり、一見無軌道な振舞いも過去の歴史を背負っていることになる。創造の営みの背後にはカオティックな過程が潜み、伝統の中から小さな差異を増幅させ、新しいものを生み出す力となっているとも思える。この観点からみると1/fノイズは決定論的法則に支配された世界の隙間からのささやかな自由意志を訴えるピンクのモーツァルトかもしれない。

最後に、スペクトル解析について色々お世話になった北海道大学地震予知観測地域センターの山本さん、カオス力学系について教えてくださった薬学部の松本さん、思い込みの強い私の議論につき合ってくれた坂下教授をはじめとする北海道大学宇宙物理研究室の皆さんに感謝します。