

シミュレーションとチームワークで挑む コンパクト天体周囲の降着流・噴出流



大須賀 健

〈筑波大学計算科学研究センター 〒305-8577 茨城県つくば市天王台 1-1-1〉

e-mail: ohnaga@ccs.tsukuba.ac.jp

コンパクト天体周囲の降着流・噴出流の研究は、シミュレーションによって急速に発展しています。私自身も研究仲間と共にシミュレーション研究を実施してきましたが、それを日本天文学会林忠四郎賞受賞という形で評価していただき、大変光栄に思います。本稿では、私が経験した研究テーマの変更や研究手法の変遷、シミュレーションにまつわる失敗談を紹介しつつ、受賞理由となった研究成果について解説させていただきます。

はじめに

この度は、日本天文学会林忠四郎賞という身に余る賞をいただき、誠にありがとうございます。ご指導頂いた方々や共同研究者のみなさんをはじめ、すべての関係者に深く感謝申し上げます。

本受賞におきましては、ブラックホールや中性子星周囲の降着流・噴出流のシミュレーション研究を評価していただいたわけですが、私がこの研究を始めたのは実はポストドクになってからです。最初のシミュレーション論文が出版されたのが学位取得から4年後ですので、かなりの後発組と言えるでしょう。それまでは何をしていたかということですが、大学院生のときはちょっとした数値計算を用いて活動銀河核のダストトーラスの構造を調べていました。シミュレーションは行いませんでしたが、指導教員である梅村雅之氏に輻射輸送計算や輻射流体力学に関する専門知識を徹底的に叩き込まれました。

その後、日本学術振興会特別研究員として嶺重慎氏に受け入れていただき、京都大学の基礎物理学研究所で降着流の研究へとテーマを変更しまし

た。はじめは簡易的な理論モデルを用いた研究を行い、その後、シミュレーションへと研究手法を変更しました。現実的な描像を得るためというのが表向きの理由ですが、業績の多くない私が生き残るためには、より新規性の高い研究で勝負しなければならぬという打算的な考えもありました。それまでの研究を継続しつつも裏でコード作成を進め、ようやくシミュレーションの研究成果を発表できたのが学位取得から4年後というわけです。

学振研究員の後は、立教大学、理化学研究所、国立天文台でブラックホール降着流・噴出流のシミュレーションを行いました。研究を大幅に発展させてくれたのは研究仲間でした。高橋博之さん、川島朋尚さん、野村真理子さん、朝比奈雄太さん、小川拓未さんは、私の力では到底到達できないレベルへと研究を押し上げてくれました。それ以外にも、京都大学の嶺重グループや千葉大学の松元グループのみなさん、X線や電波、光赤外観測のみなさんに助けていただきました。

以上のように、私の研究は多くの方々を支えられてきました。それは今でも続いています。研究

を通じて得られた仲間は間違いなく最も貴重な財産です。本稿では、受賞理由となったコンパクト天体周囲の降着流・噴出流に関するシミュレーション研究の成果を中心に、これまでの進展や将来の展望も含めて解説させていただきます。

1. 1次元定常モデルの限界と多次元磁気流体シミュレーションの勃興

中心天体の周りを周回運動するガスによって構成される平板状の構造が降着円盤（もしくは降着流）です（図1）。降着円盤内のガスは、角運動量を失うことで徐々に中心天体に近づき、ついには落下することになります。この際、重力ポテンシャルの一部がガスの熱エネルギーを介して輻射に変換されることで、降着円盤は光を発することになります。また、円盤からはガスが噴出することもあります。これは重力ポテンシャルの一部が、噴出するガスの運動エネルギーに変換されることで起こります。中心天体がブラックホールや中性子星の場合、利用できるポテンシャルエネルギーが非常に大きいため、生じる輻射もガス噴出流も強力になり得ます。そのため、コンパクト天体周囲の降着円盤はX線連星や活動銀河核といった高エネルギー天体のエネルギー源と考えられて

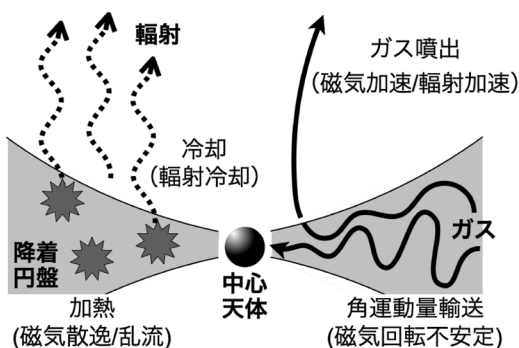


図1 降着円盤の概念図。角運動量輸送によってガス降着が起こる。一部のガスが噴出流となることもある。ポテンシャルエネルギーの一部が、ガスの熱エネルギーを介して輻射エネルギーへと変換される。

いるのです。

さて、降着円盤の理論は、回転軸対称を仮定し、厚み方向に積分した動径方向1次元の定常モデルを中心に発展してきました（表1）。質量降着率がエディントン限界（エディントン光度を光速の2乗で割ったもの）程度の状況で有用となる標準円盤モデルが最も有名です [1]。標準円盤は、活動銀河核やX線連星の熱的放射を説明可能です。一方、低光度活動銀河核やX線連星の低光度状態など、質量降着率が極めて低い状況に特化したモデルが放射非効率降着流（ライアフ）です [2, 3]。質量降着率が大幅にエディントン限界を超えた状況を記述するモデルがスリム円盤です [4]。スリム円盤の光度はエディントン光度を超えます。エディントン光度を超えるということは、単純に考えると重力よりも輻射力が強くなり、ガス降着が不可能になってしまいますが、それについては後述します。以上の3つが、最も重要な降着円盤の1次元定常モデルです。降着円盤モデルの詳しい物理に関しては、バイブルと言うべき教科書がありますので、是非ご参照ください [5]。

コンパクト天体の基本的な性質が説明可能であるため、降着円盤の1次元定常モデルは広く受け入れられてきました。しかし、説明できない観測事実が次々に発見され、限界も指摘されるようになりました。中でも特に深刻な問題が、ジェットや円盤風を説明できないことでした*1。上記の円盤モデルは、いずれもガス噴出流が発生しない、もしくは発生しても無視できるほど弱いという仮定のもとに構築されているからです。また、降着

表1 三種の降着円盤の特徴。温度は中心天体が恒星質量ブラックホールの場合。

	スリム円盤	標準円盤	ライアフ
質量降着率	エディントン限界以上	エディントン限界程度	エディントン限界以下
光学的厚み	厚い	厚い	薄い
幾何学的厚み	厚い	薄い	厚い
典型的温度	$\sim 10^8$ K	$\sim 10^{6-7}$ K	10^9 K

円盤における角運動量輸送やエネルギー散逸の根源である円盤粘性を、アルファ粘性モデルと呼ばれる現象論モデルで扱っていることも問題でした。1次元定常円盤モデルの限界を打ち破り、より現実的な降着流および噴出流の構造を解明することが必要となってきたのです。

こうした状況を大きく変えたのが、S. A. Balbus氏とJ. F. Hawley氏による磁気回転不安定性の発見でした [6]。差動回転するプラズマの角運動量が、磁場を介して輸送されることがわかったのです。これにより、円盤粘性の起源は磁気回転不安定であると考えられるようになりました。磁気流体シミュレーションを用いれば、アルファ粘性を用いることなく、より現実的に降着円盤を調べることができるのです。松元亮治氏と柴田一成氏による大局的3次元磁気流体シミュレーション [7] を皮切りに、世界的に降着円盤の磁気流体シミュレーションが行われるようになりました。ちなみに、磁気回転不安定は実は過去に議論されていたことがわかり [8, 9]、Balbus氏とHawley氏による発見は「降着円盤業界最大の再発見」と呼ばれたりしています。

ここで断っておきますが、実は磁気流体シミュレーションの適用範囲は限られています。質量降着率がエディントン限界より極めて小さい降着流（1次元円盤モデルではライアフに対応）を調査することはできますが、質量降着率が大きい円盤（標準円盤やスリム円盤モデルに対応）を調べることはできないのです。輻射冷却や輻射力を扱っていないからです。アルファ粘性の制約から解放された磁気流体シミュレーションの最大の弱点が輻射輸送を解かないことであり、付け入る隙があるとすればここだと私は考えました。

2. 輻射流体シミュレーションへの挑戦

2.1 超臨界降着流の実現性の証明

磁気流体シミュレーションによる降着円盤の研究が隆盛を極める傍らで、私も降着円盤の研究を開始しました。テーマとして選んだのは超臨界降着流（もしくは超臨界降着円盤）です。超臨界降着流とは、降着率がエディントン限界よりはるかに大きく、光度がエディントン光度以上となる降着流（1次元モデルではスリム円盤に対応）のことです。超臨界降着流の研究意義は主に2つあります。光度がエディントン光度を超えるような高光度コンパクト天体のメカニズムを解明すること、そして、超巨大ブラックホールの急速成長過程を解明することです。ただし、この2つは密接に関係しています。

注目すべき高光度コンパクト天体の一例が超高光度X線源（ULX）です。ULXは太陽のおよそ百万倍以上の光度を持つ正体不明のX線源です。恒星質量ブラックホールのエディントン光度を超えているので、円盤光度の上限がエディントン光度であれば、中心天体は中間質量ブラックホール（質量の目安は太陽質量の数百倍から数万倍）しかあり得ません [10, 11]。エディントン光度はブラックホール質量に比例するからです。もう一つの可能性は超臨界降着流です。中心天体が恒星質量ブラックホールであっても、円盤光度がエディントン光度を上回っていればULXの大光度を説明可能というわけです [12, 13]。前者が正しければ、恒星質量ブラックホールと超巨大ブラックホールの間位置するブラックホールを見つけたことになり、超巨大ブラックホールの成長過程解明への大きな手がかりとなるでしょう。一方、後者が正しければ、降着率はエディントン限界を突破できると証明されます。ブラックホールの急速

*1 本稿では、降着円盤の回転軸付近に現れる超高速ガス噴出流をジェット、大きな開口角を持ち、円盤面に沿った方向に吹き出すガス流を円盤風と表記しています。

成長が可能となり、初期宇宙で発見されている超巨大ブラックホールの形成問題の解明に繋がります。このように、超臨界降着流の問題は、高光度コンパクト天体だけでなく、超巨大ブラックホール形成においても大きな意義を持つのです。

「超臨界降着は実現可能か否か？」これが解き明かすべき問題です。球対称降着であれば不可能ですが、円盤降着でどうなるのか決着を付けなければなりません。研究手段としては流体と輻射を同時に自己矛盾なく解く多次元の輻射流体シミュレーションが必須です。強力な輻射力にはガス降着を妨げる働きがあるからです。本当は磁場も解く必要があるのですが、まずはアルファ粘性で我慢することにしました。ちなみに、降着率がエディントン限界を超える状況での円盤モデルがスリム円盤ですが(1章参照)、モデルがあるからと言って超臨界降着が可能と結論づけることはできません。スリム円盤では、円盤表面での輻射力が重力を超えるにもかかわらず、ガスが噴出しないことを暗に仮定してしまっているからです。輻射流体シミュレーションで根底から再考する必要があります。

輻射流体シミュレーションをやると覚悟を決めたとき、同時に嫌な予感もしていました。大学院時代に、先輩やポスドクのみなさんが四苦八苦している姿を見ていたからです。悪い予感的中しました。シミュレーションでの苦労話を始めると切りがありませんので割愛しますが、簡単に言えば初心者が陥りやすい落とし穴に全て落ちました。独自の工夫を組み込んで失敗を繰り返した。結局、先行研究と同じ計算法を採用したことも多々ありました。この段階では、森正夫さんに大変お世話になりました。何度も研究室にお邪魔させていただきましたし、作業がはかどらず自宅に泊めて頂いたこともありました。

コーディングで苦戦した一方で、並列計算機が身近にあったことは幸いでした。輻射流体シミュレーションが困難な理由の一つが膨大な計算量で

す。並列計算がほぼ必須ですが、立教大学の理論物理学研究室には、小型ながらも並列計算機があったのです。しかも、ユーザーは須佐元さんと私だけですので、何かやらかしても謝るだけで許してもらえはるはず。初めて並列計算機を使う私にとって、気楽に、かつほぼ独占的に使えるマシンがある環境は理想的だったのです。なお、並列計算機は自前でメンテナンスする必要もあったので、パソコンやコンピュータ関連用品を購入するために何度も池袋駅前まで出かけて行かなければなりません。真夏に汗をかきながら台車を押したことはいい思い出です。

話を戻します。輻射流体シミュレーションによって得られた答えは「超臨界降着円盤は実現可能」というものでした[14]。強力な輻射の力によって円盤表面からガスが噴出しつつも、エディントン限界を超える降着率でブラックホールにガスが流れ込むことを世界で初めて実証できました(図2)。超臨界降着流のシミュレーションは過去にも試みられていましたが[15, 16]、初期条件として円盤を設定せずに長時間シミュレーションを実

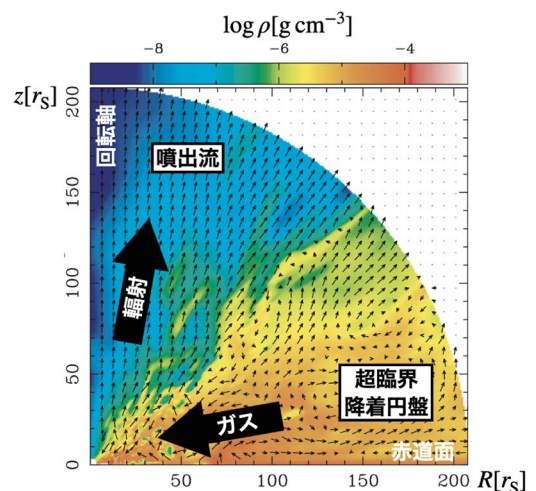


図2 輻射流体シミュレーションで再現した超臨界降着流。円盤ガスの一部が輻射力によって回転軸方向へ噴出する。 r_s はシュヴァルツシルト半径。文献[14]より改変。

施することで、準定常的な超臨界降着流が自然に形成されることを明らかにしたのです。この結果、ULXの光度を恒星質量ブラックホール周囲の超臨界降着流で説明できることがわかりました。同時に、ブラックホールが急速成長できることもわかりました。念のため断っておきますが、これをもって宇宙初期の超巨大ブラックホールが超臨界降着で形成されたとは断言できません。超臨界降着流を実現し得るだけの大量のガスを、ブラックホール周囲に集める機構が不明だからです。

さて、エディントン光度以上で輝くにもかかわらず、どうしてガスが降着できるのでしょうか？この疑問の答えは、シミュレーション結果を詳しく解析することでわかりました。結論を先に申し上げますと、系の非等方性によるものでした。降着円盤が形成される赤道面近傍はかなりの高密度ですが、円盤表面から回転軸付近にかけては比較的低密度となります。円盤内部で発生した大量の光子は、この低密度領域を通過して系外に逃れる傾向にあります。赤道面付近における外向きの輻射流束はあまり強くないため、輻射力は重力を超えず、降着が妨げられることはないのです。一方、円盤表面付近や円盤上空での外向きの輻射力は重力よりも遥かに強くなります。したがって、強力なガス噴出流が生じるわけです。多くのガスが赤道面近傍を通過して落下する一方で、大量の輻射が円盤上空から系外へ逃れるというすれ違いが起こっているのです（図2中の矢印）。この状況を嶺重さんは「交通整理」と呼んでいます。とてもわかりやすい例えです。

超臨界降着が実現する本質的な要因ではないものの、ガス降着を助ける要素がもう一つあります。それは光子捕獲と呼ばれる現象です。光学的に十分厚い円盤の内部で発生した光子は、多重散乱を受けて拡散することになります。そして、ようやくのことで円盤表面から抜け出します。ただし、光学的厚みが大きすぎると、円盤表面に到達する前にガスもろともブラックホールに吸い込ま

れてしまいます。これが光子捕獲です。「輻射拡散時間が降着時間より長い」という光子捕獲の条件式を変形すると「質量降着率がエディントン限界より大きい」となります。つまり、光子捕獲は超臨界降着流で必然的に起こるのです。実際、私の輻射流体シミュレーションでも膨大な量の輻射エネルギーがブラックホールに吸い込まれることがわかりました。発生した光子が円盤から抜けることなくブラックホールに吸い込まれるのですから、光子捕獲は円盤光度を減少させます。輻射力が弱まることになるのでガス降着を助けることにはなりますが、超臨界降着が実現する本質的要因は非等方性の方でした。なお、超臨界降着流において、光度が質量降着率に比例しない主な理由は、この光子捕獲による光度の減少です。超臨界降着流の詳しい物理は論文[17]を御覧ください。

2.2 研究対象の拡大

ブラックホールのシミュレーションで、超臨界降着が実現可能であることがわかりました。では、超臨界降着はブラックホール特有の現象でしょうか？この疑問を投げかけてきたのは、立教大学の次にお世話になった理化学研究所の牧島一夫氏でした。牧島さんのグループの研究テーマには中性子星も含まれているので、中性子星への超臨界降着の可能性を考えて欲しいと言われたのです。牧島さんの一言がきっかけで、私の研究対象に中性子星が加わりました。

私は中心天体を中性子星に代えて輻射流体シミュレーションを実施しました。その結果、中性子星であっても超臨界降着が可能であることを実証しました[18]。超臨界降着が実現可能な理由は、やはり非等方性でした。「交通整理」の効果により、円盤内部ではガスが降着できたのです。ただし、ブラックホールの場合と全く同じではありませんでした。特に顕著なのがエネルギー変換効率の違いです。ブラックホールの場合、ポテンシャルエネルギーのごく一部しか解放できないのに対し、中性子星の場合は大部分を解放します。

中性子星がエネルギーを吸い込まないためです。したがって、質量降着率を揃えて比較すると、光度もガス噴出流のパワーも中性子星の方が大きくなるのです。この結果、中性子星周囲の超臨界降着流も ULX の有力な候補になりました。

論文 [18] の発表から7年後、一つの ULX で X 線パルスが見つかりました [19]。少なくとも一部の ULX の正体が超臨界中性子星降着流であることが判明したのです。正直に言えば単なる偶然ですが、せっかくなのでいかにも自分の予言が当たったかのように宣伝させていただきました。

さて、話が前後しますが、私が立教大学に所属していた頃も研究対象の拡大が起っています。それは、ブラックホール降着流の熱的不安定性に関するものです。

系内のマイクロクェーサーである GRS 1915+105 は、周期的な光度変動を示す時期があるのですが [20]、この原因が降着円盤の熱的不安定か否かが活発に議論されていました。1次元計算での研究は進んでいましたが [21]、多次元シミュレーションで確かめる必要がありました。ただし、超臨界降着円盤のシミュレーションを遥かに超える長時間計算が必要となるため、ほとんど実施されていませんでした。私も興味を持ってはいましたが、まあ無理だろうと思ってほかの研究をしていました。

そんなある日、須佐さんが私の部屋にきて言いました「大須賀君、そろそろ計算機を空けてくれないか」。私は、超臨界降着流の質量降着率依存性を調べるため、さまざまなパラメータで計算機を回していましたが、ちょうどこの熱的不安定が発生しそうなパラメータでシミュレーションを実行したのを忘れていたのです。1ヵ月以上計算し続けた結果を解析してみると、見事に周期的な光度変動が起っていました。論文にまとめて即座に投稿しました [22]。

普通、このような偶然は起こりません。共同利用の計算機に投入されたジョブは、計算が終わっ

ていなくても制限時間になると打ち切られるからです。しかし、立教大学のマシンは須佐さんと私しか使わないため、そういった設定をしていなかったのです。ジョブをきちんと管理しないのは、計算資源の無駄遣いになってしまうので決して褒められたことではないのですが、この件に関してだけは幸いしました。

なお、降着円盤の熱的不安定は円盤粘性の物理に非常に敏感であるため、アルファ粘性を用いた研究では限界があります。発展的な研究が進められていますが、最終的な結論はまだ得られていません。

3. 世界初の大局的多次元輻射磁気流体シミュレーションへ

3.1 三種の降着流の再現

輻射流体シミュレーションの次は、いよいよ輻射磁気流体シミュレーションです。輻射磁気流体であれば、磁場起源の角運動量輸送やエネルギー散逸、輻射による加熱や冷却、さらには磁気圧や輻射力によるガス噴出など、コンパクト天体周囲で起こるほぼ全ての現象を扱うことが可能となります。降着流・噴出流の第一原理計算が可能となるのです (表2, 図1も参照)。

当時、降着円盤の研究は、質量降着率が小さく光学的に薄い状況は磁気流体シミュレーション、質量降着率が大きく光学的に厚い状況は輻射流体シミュレーションという具合に棲み分けが行われていました。1章に記したように、磁気流体シミュレーションの利点は円盤粘性を正確に扱えることです。ただし、輻射輸送を解かないので、その適

表2 計算手法と扱える主な物理過程の関係。

	磁気流体	輻射流体	輻射磁気流体
磁気回転不安定	○	×	○
輻射冷却	×	○	○
磁気加速	○	×	○
輻射加速	×	○	○

用範囲は質量降着率が小さい円盤に限られてしまうのでした。一方、輻射流体シミュレーションは、質量降着率が大きい状況を扱うことができますが、アルファ粘性を採用するので結果には不定性があります。その点、輻射磁気流体シミュレーションであれば、円盤粘性を正確に扱いつつ、質量降着率の大小にかかわらず、すべての降着流・噴出流を一網打尽にできるというわけです。

ブラックホール降着流・噴出流の大局的多次元輻射磁気流体シミュレーションという新しい挑戦は、これまで以上に強力な計算機パワーが必要ということで、国立天文台天文シミュレーションプロジェクト (CfCA) の並列計算機 Cray XT4 を用いて行いました。当時の私は CfCA に所属していたため、計算時間に関してはかなり融通してもらえたのですが、コードの作成にまたもや苦労しました。通常、流体シミュレーションや磁気流体シミュレーションでは陽解法を用います。しかし、輻射輸送や輻射と流体の相互作用を解く場合、陰解法が必要です。輻射にまつわる時間尺度が、流体の時間尺度よりも著しく短くなるからです。実は、この陰解法が並列計算効率を下げるのです。この問題は、並列計算機が大型になればなるほど顕在化します。最悪の場合、並列計算機の性能を全く活かせないという事態も起こるのです。それまでは比較的小型の計算機を用いていたのであまり気にしていませんでしたが、XT4 では深刻な問題となりました。自分の技術不足を実感することになったわけです。結局、見事にコードを最適化したとは言えませんが、まずは実用的なところまで改良することができました。

計算の結果はまさに期待通りのものでした。質量降着率が大幅に異なる三種の降着流を全て再現することに成功したのです。質量降着率がエディントン限界を超えると光学的にも幾何学的にも厚い超臨界降着流が、エディントン限界を少し下回ると光学的に厚く幾何学的に薄い降着円盤が、さらに降着率が下がると高温低密度ガスで構成され

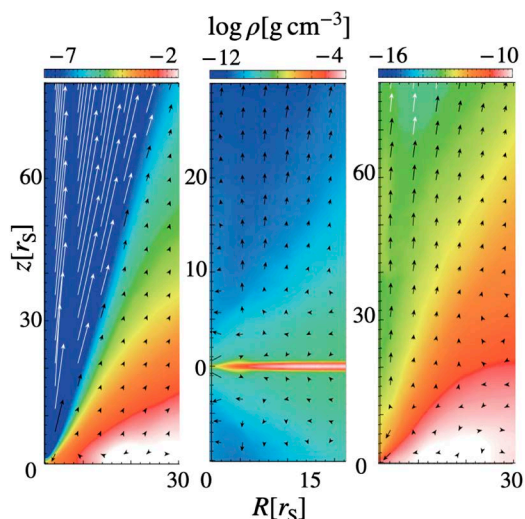


図3 輻射磁気流体シミュレーションで再現した三種の降着流（左ほど降着率が高い）。超臨界降着流（左）では輻射加速でガス噴出が発生。標準円盤とライアフに対応する円盤（中央と右）からは磁場の力でガスが噴出。

る幾何学的に厚く光学的に薄い降着流が現れました。降着円盤の1次元モデルでは、降着率に応じて解くべき方程式を予め修正し、三種（標準円盤、ライアフ、スリム円盤）の円盤を構築します。私が行った輻射磁気流体シミュレーションでは、基礎方程式を解くだけで、状況の違いに応じて三種の降着流が現れたのです（図3）。しかも、超臨界降着流からは輻射力によって、それ以外の降着流からは磁場の効果によってガス噴出が起こるということまで明らかにできました。この成果をまとめた論文 [23] は、第17回日本天文学会欧文研究報告論文賞に選ばれています。

3.2 超臨界降着流・噴出流の新たな知見

また、超臨界降着流から噴出するガス流については、新たな知見が二つ得られました。まず、円盤の回転軸付近に形成される光速の数パーセントの速度を持つジェットが、輻射で加速されつつローレンツ力で絞られていることがわかりました [24]。外圧の影響を考慮していない点が不十分ではありますが、輻射と磁場が共に働く新たなジェット

モデルとしてプレスリリースを行いました。

なお、より高速なジェットを作る場合、放射加速には弱点があります。特殊相対論効果である放射抵抗が加速を妨げるのです。終端速度は放射流束に起因する力と放射抵抗による力が釣り合ったところで決まります。別の言い方をすると、流体静止系での放射流束（放射の力）がゼロになるときの速度が終端速度となります。終端速度は光源である円盤の幾何学でおおよそ決まり、光度には依存しません。よって、光度が大きくなったとしてもジェットの速度は上昇しないのです。ジェットの成分がペラプラズマだったらどうかと質問されることもあります。質量に依存するのは加速効率であり、終端速度は変わりません。よって、SS 433で観測されているようなジェット（光速の26%程度）は放射加速で再現できますが、光速の99%を超えるようなジェットは説明できません。あくまで放射で加速するのであれば、放射抵抗をかいくぐる巧妙なメカニズムが必要でしょう。

新たな知見のもう一つは円盤風の分裂です。超臨界降着流からは、ジェットとは別に、大きな開口角を持つ円盤風が発生するのですが、この円盤

風がレイリー-テイラー不安定で無数のガス雲に分裂することがわかったのです（図4）[25, 26]。このガス雲は、観測者の視線を横切ることで光度変動を引き起こすはずですが、ガス雲のサイズと速度から見積もった変動時間はULXの観測と矛盾しません[27]。また、ガス雲の噴出を示唆する観測結果が次々に報告されたこともあり[28, 29]、ガス雲を含む円盤風の研究はますます重要視されるようになっていきます。

この円盤風の分裂の研究については、思い出深いエピソードがあります。私が初めてこの成果を国際会議で発表したとき、次の講演者であるM. Middleton氏が観測から示唆される描像を提示したのですが、これがシミュレーション結果と瓜二つだったのです。ULXの新しい描像を参加者に印象づけるという意味では大成功ですが、裏工作でもしたのではないかと疑われる程のできすぎた展開でした。

4. チームワークによる研究の発展

2000年代中盤からの約10年間に行った研究（2章と3章参照）は、黎明期にあった放射流体／放射磁気流体シミュレーションをいち早く実施したこともあり、予想以上に高い評価を得ることができました。この期間だけで国際会議での招待講演数が20回を超えましたし、R. Narayan氏に至っては、レビュー講演の中でこの期間を“Ohsuga Era”と名付けて成果を認めてくれました。大変光栄なことですが、喜んでいる暇はありませんでした。ライバルグループの参入によって競争が激化したのです。厳しい状況の中、研究を大幅に発展させてくれたのは研究仲間でした（図5）。

大局的放射磁気流体シミュレーションに関しては、Narayan氏のグループとJ. Stone氏のグループが本格的に参入してきました。激しい競争の中で起こった重要な進展の一つが一般相対論の導入です。一般相対論効果を組み込んだシミュレーションは、事象の地平面近傍の現象を正確に扱う

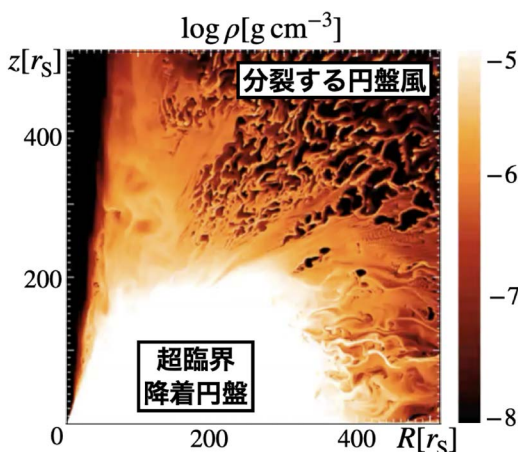


図4 超臨界降着流から噴出した円盤風が、レイリー-テイラー不安定で多数のガス雲に分裂する様子。

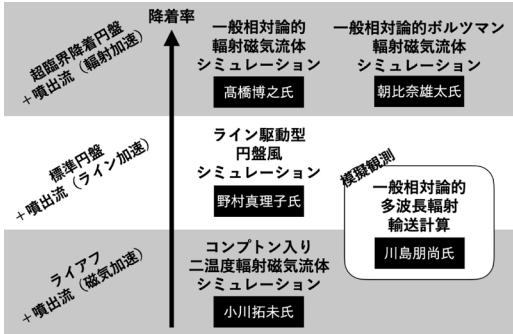


図5 研究仲間による研究の発展.

ためにも、Blandford-Znajek効果（磁場を介してブラックホールから回転エネルギーを抽出[30]）を調査するためにも必須です。中心となったのがNarayan氏のグループと高橋博之さんでした。高橋さんは、超臨界ブラックホール降着流の一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションに成功しただけでなく、磁化した中性子星への超臨界降着流の構造を世界で初めて明らかにしました[31, 32]。昨今、これに追従する研究が増えてきています。加えて、電子と陽子の温度を別個に扱うコードへの拡張が、高橋さんと小川拓未さんによって進められています。

また、輻射磁気流体シミュレーションの肝である輻射輸送の計算法が改良されました。私のシミュレーションも含め、それまでは輻射場の時間発展を近似的に扱っていましたが、輻射輸送方程式を直に解く手法の実装が進みました。Stone氏のグループが非相対論版を[33]、ついで私が特殊相対論版を開発しました[34]。そして、ついに朝比奈雄太さんが一般相対論版の開発に成功しました[35]。当該分野の研究者が長年にわたって目指してきた一つのゴールに、世界で最初に到達したのです（その後、Stone氏のグループもコード開発に成功しています[36]）。この一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションが、現在の主流となっている近似法に取って代わる日はそう遠くないと私は予想しています。

シミュレーション結果と観測結果との比較に必要な、多波長輻射輸送計算を実施したのが川島朗尚さんです。シミュレーションで得られた密度や温度、速度といった流体情報は、そのままでは観測と比較できません。輻射輸送計算を行い、輻射スペクトルや撮像イメージを理論的に作り出すことが必要です。川島さんは超臨界降着流の輻射スペクトルを理論的に計算し、観測と合致することを証明しました[37]。これが、ULXの正体が超臨界降着流であるという根拠の一つとなっています。その後、川島さんは一般相対論的多波長輻射輸送計算コードの開発にも成功しています[38]。

ラインフォース（金属元素の束縛-束縛遷移吸収に起因する輻射力）によって降着円盤から噴出するガス流、いわゆるライン駆動型円盤風も私達の重要な研究対象です。ライン駆動型円盤風の本格的な研究は、D. Proga氏らによって始まりましたが[39]、円盤と円盤風の無矛盾な構造を初めて解き明かしたのは野村真理子さんです[40]。野村さんは、活動銀河核で検出される青方偏移した金属の吸収線が、このライン駆動型円盤風で説明できることを実証しました[41]。また、ライン駆動型円盤風の噴出によるブラックホールの成長速度の低下についても調査しています[42]。

加えて、私が筑波大学に異動した後は、筑波大学の大学院生が先頭に立って研究を推進してくれています。また、嶺重グループや松元グループの大学院生も大きく貢献してくれています。紙面の関係で紹介しきれませんでした。観測グループの方々との共同研究もますます増えてきています。以上のように、コンパクト天体周囲の降着流および噴出流の研究は、共同研究者の方々の方によって急速に発展しているのです。

5. 将来展望

最後になりますが、将来に対する展望について、私の個人的見解を述べさせていただきます。まず、コンパクト天体周囲の降着流・噴出流の研

究においては、多種多様なブラックホール天体を統合的に理解する研究が進展すると思われます。X線連星や活動銀河核をはじめとする高エネルギーコンパクト天体は、天体ごとに光度も質量も異なりますし、ジェットや円盤風の有無もパワーも異なります。質量降着率の違いが円盤の光度や磁場構造の違いを生み、加速機構の異なる噴出流の発生に繋がっていると思われます。ブラックホールのスピンの関係している可能性もあります。様々な条件下で網羅的にシミュレーションを行うことが、コンパクト天体の全体像と多様性の起源の解明への第一歩と私は考えています。

また、超巨大ブラックホールの形成問題と星形成や銀河進化との関係は、現代天文学の最重要課題の一つです。ブラックホール噴出流のパワーや角度分布が解明できれば、星や銀河が受ける影響を知ることができます。逆に、星や銀河の理解が進めば、ブラックホールの周辺環境が明らかになり、ブラックホールの成長過程がより現実的に議論できます。ブラックホールの成長に関しては合体も有力ですが、降着過程の方を徹底的に探してみたいと個人的には思っています。

次に、本稿の主題の一つである数値シミュレーションですが、コンパクト天体に限らず、天文学全般において今後ますます重要になってくると考えられます。昨今、イベントホライズンテレスコープやIXPE衛星、ジェイムズウェッブ宇宙望遠鏡が理論予想を覆す結果を連発しています。XRISM衛星やユークリッド衛星をはじめとする次世代の観測プロジェクトも驚くべき結果をもたらすことでしょう。そのような状況の中で新たな知見を得るためには、観測と比較可能な高精度理論モデルの構築が不可欠です。大規模シミュレーションが最も有力な手段でしょう。

ただし、シミュレーションの手法については、大きく変化する可能性があります。これまでのシミュレーション天文学は、第一原理計算で宇宙の謎を解明することが基本目標でした。大きな成功

を収めてきましたが、同時に限界も見えてきました。そこで注目されるのが人工知能(AI)の利活用です。機械学習を駆使して計算効率を向上させることが新たな突破口と考えられています。シミュレーションとAIの融合をテーマに、2023年4月にスタートした「富岳成果創出加速プログラム“シミュレーションとAIの融合で解明する宇宙の構造と進化”[43]」は、90名を超える天文学および惑星科学のシミュレーション研究者が参画する一大プロジェクトです。理論天文学の新たな潮流を生み出すべく、課題責任者として全力を尽くす覚悟でいます。是非期待していただきたいと思えます。

謝辞

繰り返しになりますが、この度の受賞に関し、私の研究に関係したすべてのみなさんに感謝申し上げます。本稿をきっかけにこれまでを振り返ってみますと、勇気を持って研究テーマを変え、研究対象を広げつつ新しい研究手法に挑戦したことが今に繋がっているように思えます。成功したことよりも失敗したことの方が多かったと思いますが、なんとかここまで辿り着けたのは、研究仲間との強力なチームワークがあったからだと思えます。記念講演でも引用させていただいた「財を遺すは下、仕事を遺すは中、人を遺すを上とする」という名言は、人材が最も貴重であるということを伝えています。今後も研究仲間を大切にしつつ、大学院生をはじめとする若手研究者とも協力し、これまで以上のチームワークで天文業界を盛り上げていきたいと思っています。

参考文献

- [1] Shakura, N. I., & Sunyaev, R. A. 1973, A&A, 24, 337
- [2] Ichimaru, S., 1977, ApJ, 214, 840
- [3] Narayan, R., & Yi, I., 1994, ApJ, 428, L13
- [4] Abramowicz, M. A., et al., 1988, ApJ, 332, 646
- [5] Kato, S., et al., 2008, Black-Hole Accretion Disks—Towards a New Paradigm (Kyoto: Kyoto University Press)

- [6] Balbus, S. A., & Hawley, J. F., 1991, *ApJ*, 376, 214
[7] Matsumoto, R., & Shibata, K., 1997, in *ASP Conf. Ser. 121, Accretion Phenomena and Related Outflows*, IAU Coll., 163, ed. D. Wickramasinghe, G. V. Bicknell, & L. Ferrario, (San Francisco, CA: ASP), 443
[8] Velikov, S., 1959, *Zh. Eksp. Teor. Fiz.*, 36, 1398
[9] Chandrasekhar, S., 1961, *Hydrodynamic and Hydro-magnetic Stability* (Oxford:Clarendon)
[10] Makishima, K., et al., 2000, *ApJ*, 535, 632
[11] Miller, J. M., et al., 2004, *ApJ*, 614, L117
[12] Watarai, K., et al., 2001, *ApJ*, 549, L77
[13] King, A. R., et al., 2001, *ApJ*, 552, L109
[14] Ohsuga, K., et al., 2005, *ApJ*, 628, 368
[15] Eggum, G. E., et al., 1988, *ApJ*, 330, 142
[16] Okuda, T., & Fujita, M., 2000, *PASJ*, 52, L5
[17] Ohsuga, K., & Mineshige, S., 2007, *ApJ*, 670, 1283
[18] Ohsuga, K., 2007, *PASJ*, 59, 1033
[19] Bachetti, M., et al., 2014, *Nature*, 514, 202
[20] Belloni, T., et al., 1997, *ApJ*, 479, L145
[21] Watarai, K., & Mineshige, S., 2003, *ApJ*, 596, 421
[22] Ohsuga, K., 2006, *ApJ*, 640, 923
[23] Ohsuga, K., 2009, *PASJ*, 61, L7
[24] Takeuchi, S., et al., *PASJ*, 62, L43
[25] Takeuchi, S., 2013, *PASJ*, 65, 88
[26] Takeuchi, S., et al., *PASJ*, 66, 48
[27] Middleton, M. J., et al., 2011, *MNRAS*, 411, 644
[28] Jin, C., et al., *MNRAS*, 471, 706
[29] Motta, S. E., et al., 2017, *MNRAS*, 471, 1797
[30] Blandford, R. D., & Znajek, R. L., 1977, *MNRAS*, 179, 433
[31] Takahashi, H. R., et al., 2016, *ApJ*, 826, 23
[32] Takahashi, H. R., & Ohsuga, K., 2017, *ApJL*, 845, L9
[33] Jiang, Y.-F., et al., 2014, *ApJ*, 796, 106
[34] Ohsuga, K., & Takahashi, H. R., 2016, *ApJ*, 818, 162
[35] Asahina, Y., et al., 2020, *ApJ*, 901, 96
[36] White, C. J., et al., 2023, *ApJ*, 949, 103
[37] Kawashima, T., et al. 2012, *ApJ*, 752, 18
[38] Kawashima, T., et al., 2023, *ApJ*, 949, 101
[39] Proga D., et al., 2000, *ApJ*, 543, 686
[40] Nomura, M., et al., 2020, *MNRAS*, 494, 3616
[41] Nomura M., et al., 2016, *PASJ*, 68, 16
[42] Nomura M., et al., 2021, *MNRAS*, 507, 904
[43] <https://www2.ccs.tsukuba.ac.jp/aiuniverse/> (2023.11.6)

Studying Accretion Flows and Outflows around Compact Objects using Simulations and Teamwork

Ken OHSUGA

Center for Computational Sciences, University of Tsukuba, 1-1-1 Tennodai, Tsukuba, Ibaraki 305-8577, Japan

Abstract: The research of accretion flows and outflows around compact objects is rapidly developing through numerical simulations. Here, I give an overview of the development of theoretical research on inflow-outflow mechanisms, and introduce the results of my research with colleagues that led to the Hayashi Award.