

# コンパクトオブジェクト分科会

コンパクトな領域に隠された神秘を探る～観測・理論研究の最前線～

日時	7月30日 11:30 - 12:30 (招待講演: 米徳 大輔 氏) , 13:30 - 15:30 7月31日 10:30 - 11:30 (招待講演: 諏訪 雄大 氏) , 11:30 - 12:30 8月1日 9:00 - 10:00 (招待講演: 大須賀 健 氏) , 10:15 - 12:15
招待講師	米徳 大輔 氏 (金沢大学) 「ガンマ線バーストで探る初期宇宙」 諏訪 雄大 氏 (京都大学) 「爆発的コンパクト天体現象の理論研究: 何がわかっていて何がわかっていないのか?」 大須賀 健 氏 (国立天文台) 「”ブラックホール周囲の降着・噴出流はどこまでわかったか? ~最新の成果と課題~”」
座長	衣川 智弥 (京都大学 D1)、石井 彩子 (東北大学 M2)、川室 太希 (京都大学 M2)、高木 利紘 (日本大学 M2)、中西 俊貴 (早稲田大学 M2)、平井 遼介 (早稲田大学 M2)
概要	<p>コンパクトオブジェクト分科会では、ブラックホール、中性子星、活動銀河核といったコンパクトオブジェクトや、超新星爆発、降着円盤、ガンマ線バーストなどの高エネルギー天体現象に関する研究を扱います。これらの天体は強い重力、強磁場といった極限状態にあり、近年の理論やシミュレーション技術の発展、電波からガンマ線にわたる幅広い波長域の観測により、様々な事実が明らかになりつつあります。また、近い将来コンパクト連星からの重力波の観測が期待されており、天文学は新たな時期に差し掛かり始めました。</p> <p>現象を多方面から探ることで、天文学を通して新たな物理の発展が予期されており、コンパクトオブジェクトの重要性も高まってきました。コンパクトオブジェクトは基礎物理学を探る上でかかせない存在となりつつあります。</p> <p>しかし、ブラックホールや中性子連星、活動銀河核からのジェット噴出機構や超新星の爆発メカニズムなど、謎は未だ多く残されている事も事実です。</p> <p>本分科会では、これらコンパクトオブジェクトに関する研究の進展、最新の成果、将来性について、理論と観測の両面から議論したいと思えます。</p> <p>注) 超新星爆発や中性子星はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、激変星(新星や矮新星など)や白色矮星は太陽・恒星分科会で扱います。</p> <p>注) 活動銀河核 (AGN) のブラックホールとしての挙動やジェットに注目する場合はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、AGN ホスト銀河や AGN と銀河の共進化については銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 相対論の基礎理論に関する話題は重力・宇宙論分科会で扱います。</p> <p>注) 重力波についての話題は、コンパクトオブジェクトの天体現象としての重力波に着目したものについてはコンパクトオブジェクト分科会で取り扱う。</p>

米徳 大輔 氏 (金沢大学)

7月30日 11:30 - 12:30 B(エメラルド)

## 「ガンマ線バーストで探る初期宇宙」

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象として知られている。短時間ではあるが極めて明るく輝くため、初期宇宙を探るプローブとして利用されてきている。これまでに分光観測で確認された最高赤方偏移は  $z = 8.2$  で、測光観測では  $z = 9.4$  のイベントが確認されている。今後もより遠方の宇宙を観測できると期待されており、 $z > 10$  という宇宙で最初の星が誕生した頃の物理情報を得られるだろう。

本講演では、GRB を用いた初期宇宙観測について、2つの着眼点で紹介する。ひとつ目は GRB の後に続く残光現象を利用した分光学的なアプローチで、これはいわば王道の攻め方と言える。赤方偏移  $z > 7$  では、水素のライマン  $\alpha$  吸収の効果を強く受け、可視光では観測することができない。近赤外線での分光観測が重要となる。残念ながら  $z = 8.2$  の GRB では、赤方偏移の同定には成功したものの、良質な分光スペクトルが得られなかったため、初期宇宙の物理情報は得られていない。ここでは  $z = 6.3$  で発生した GRB 050904 の例を用いて、GRB を用いた観測的宇宙論の展開方法を説明する。

もうひとつは、GRB の突発的ガンマ線放射の特性 ( $E_{peak}$ -光度関係など) を利用したアプローチである。我々の研究グループは、これまでに  $z > 10$  の星形成率の測定や、宇宙再電離・重元素合成量の議論などを行ってきた。最近では、 $z > 2$  の宇宙における宇宙論パラメータの測定を行い、暗黒エネルギー量は時間に強くは依存しない宇宙項のような性質を持っていることを示してきた。このような手法は新しい試みであり、上記の関係式の物理的な起源や、全ての GRB について成立する普遍的な性質であるのかをきちんと議論しなくてはならないが、将来、暗黒エネルギーの起源 (まずは時間発展) を議論する一つの有効な手法と考えている。

諏訪 雄大 氏 (京都大学)

7月31日 10:30 - 11:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「爆発的コンパクト天体現象の理論研究：何がわかっていて何がわかっていないのか？」

コンパクト天体が引き起こす高エネルギー現象は、極限物理の実験場であると考えられます。そこでは地上実験では到達できない領域の物理が実現されており、これらの現象についての理解を深めることが、高エネルギー・高密度物理の世界に迫るための手段になることが期待されています。特に、超新星爆発やガンマ線バーストといった激しい爆発現象の中心部は、我々の知っている全ての相互作用 (重力・電磁気力・弱い力・強い力) が同時に重要な働きを及ぼす、極めて複雑かつ面白い状態になっています。それゆえ、いまだ爆発がどのように引き起こされているのか、完全にはわかっていません。

本講演では、超新星爆発とガンマ線バーストの中心エンジンについて、いまだどこまで解明されているのか、またどんな謎が残っているのか、についてお話ししたいと思います。

大須賀 健 (国立天文台)

8月1日 9:00 - 10:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「ブラックホール周囲の降着・噴出流はどこまでわかったか?～最新の成果と課題～」

ブラックホールの周囲では、吸い込まれるガスの重力エネルギーが解放され、強力な放射や高速なガスの噴出現象が引き起こされている。極めて小さな領域で膨大なエネルギーが解放されるため、活動銀河核や X 線連星、ガンマ線バーストといった高エネルギー天体現象のエンジンであると考えられている。また、この膨大なエネルギー放出は銀河の進化に影響を与えるであろうことから、近年話題となっている巨大ブラックホールと銀河の共進化の起源ではないかと期待されている。

ブラックホールの重力に引きつけられたガスが円盤を形成しつつ吸い込まれ、膨大なエネルギーを解放するといういわゆる降着円盤の理論は 1970 年代に構築された。幾つもの観測事実を説明することに成功したことで世界中で信じられるようになったが、あくまで現象論的なモデルであり物理的に解明したとは言い難い状況であった。しかも、近年になって説明できない観測事実も次々に報告されるようになった。

現象論的な研究に甘んじてきたそれまでの状況を打開する鍵は磁場と放射の扱いである。従来の研究では放射や磁場、多次元効果は無視もしくは極めて簡易的に扱われてきた。しかし、それでは問題の本質に迫ることはできない。そもそもガス降着には角運動量輸送が必須であるが、それは磁場によって引き起こされる。磁場は円盤内の乱流を助長するだけでなく円盤表面からのガス噴出現象を引き起こす場合もある。円盤の放射効率が円盤の形状や明るさを決めるし、放射圧でジェットが噴出する場合もある。重力や流体に加えて放射や磁場を空間多次元で正しく扱うこと、即ち多次元放射磁気流体力学計算が必要不可欠なのである。ただし、放射磁気流体力学計算は物理が難解で計算量が膨大なため、実現可能となったのはごく最近である。

本講演では、多次元放射磁気流体力学シミュレーションによって見えてきたブラックホール降着・噴出流の最新の描像を紹介する。そして残された課題と今後の発展についても議論する。

## コン 01a Ultra Long Gamma-Ray Burst の青色超巨星起源シナリオ

仲内 大翼 (京都大学 D2)

近年、Ultra Long Gamma-Ray Burst (ULGRB) と呼ばれる新たな種族の GRB が発見されている。ULGRB の継続時間は  $\sim 10^4$  s であり通常の LGRB ( $\sim 20$  s) より桁外れに長い継続時間をもつ現象である。このような ULGRB の特徴を説明する有力なモデルの一つとして青色超巨星起源シナリオが提案された。通常の LGRB を説明する上では青色超巨星は不適当と考えられるのでこれまでほとんど議論されておらず、観測による検証が必要である。本研究の目的は、ULGRB の多波長電磁波による観測結果を用いて青色超巨星起源シナリオを検証することである。そのため今回は ULGRB のアフターグローに注目した。紫外線 - 赤外線領域における ULGRB アフターグローの観測から、ULGRB には通常の超新星より 10 倍以上明るい superluminous supernova や hypernova が付随する可能性が示唆された。本講演では、青色超巨星起源シナリオに基づいて ULGRB に付随した明るい超新星を説明できることを示す。この結果青色超巨星起源シナリオがより強固なものになると期待される。青色超巨星を起源とした GRB の観測的性質を定量的に議論するのは本研究が初めての試みであるといえる。

1. Nakauchi, D., Suwa, Y., Sakamoto, T., Kashiyama, K., & Nakamura, T. 2012, ApJ, 759, 128
2. Kashiyama, K., Nakauchi, D., Suwa, Y., Yajima, H., & Nakamura, T. 2012, arXiv:1212.6431

## コン 02a Ib 型超新星 SN 2012au - GRB 付随型超新星とのリンク

高木 勝俊 (広島大学 M2)

$8M_{\odot}$  より重い星は、その一生の最期に中心核が重力崩壊して超新星爆発を起こすことが知られている。Ib 型超新星とは親星の水素の外層が、Ic 型超新星とは水素外層に加えてヘリウム外層が、それぞれ剥がされた状態で爆発したと考えられている [1]。Ib 型と Ic 型は観測的な特徴が近いことからよく比較されるが、それぞれの爆発機構の詳細はまだ分かっていない。また、GRB に付随して現れる爆発エネルギーの大きい Ic 型超新星と通常の Ib/Ic 型超新星の関係もよく分かっていない。これらの解明に迫るべく、我々は 2012 年 3 月に発見された Ib 超新星 SN 2012au を、口径 1.5m のかなた望遠鏡を用いて継続的に測光分光観測してきた。

我々の観測から得られた極大での総放射光度  $6.7 \times 10^{42}$  erg  $s^{-1}$  は他の Ib 型超新星よりも有意に明るく、GRB が付随した SN 1998bw に迫る値であった。また、極大での He 外層の膨張速度  $\sim 15,000$  km  $s^{-1}$  から、総エジェクタ質量  $5-7 M_{\odot}$  と爆発エネルギー  $(6-14) \times 10^{51}$  erg を見積もった。我々は、Ib 型超新星の極大での R バンドの絶対等級と He I の線速度の間に正の相関があることを提案する。光度曲線のモデルフィッティングを行うことで、内側に密度の高い領域が存在し、SN 1998bw とよく似た密度構造をもつことが分かった [2]。これらの結果から SN 2012au は、GRB が付随しない Ib 型超新星と GRB が付随する Ic 型超新星を結ぶ重要なリンクであることを示唆する。

1. Filippenko, A. V. 1997, ARA&A, 35, 309
2. K. Maeda, Mazzali, P. A., Deng, J., Nomoto, K., Yoshii, Y.,

## コン 03a 大質量連星系における超新星爆発が伴星に与える影響

平井 遼介 (早稲田大学 M2)

超新星爆発の爆発メカニズムを探るため、詳細な物理を考慮した大規模な数値計算が行われているが、観測に合うような爆発を再現出来た例はまだない。超新星の親星は大質量であると考えられているため、連星系を組んでいる可能性が高い。連星系による影響が超新星の爆発メカニズムに何らかの影響を及ぼしていることも考えられるため、超新星親星が連星系を組んでいるかどうかは重要な問題である。本研究ではそれを観測から制限できるようにするための第一歩として超新星爆発が伴星の質量をどの程度剥ぎとっていくかを計算した。また、その質量が連星の初期パラメータ (公転半径、主星質量、伴星質量) にどのように依存するかを調べた。

## コン 04a 次世代重力波観測器のための初代星連星の進化計算

衣川 智弥 (京都大学 D1)

現在、世界初の重力波観測を目指し、KAGRA, Advanced LIGO, Advanced VIRGO といった重力波観測計画が動き出しており、重力波による天文学の幕開けが期待されている。重力波観測のメインターゲットになっているのは連星中性子星 (NS-NS)、中性子星ブラックホール連星 (NS-BH)、連星ブラックホール (BH-BH) といったコンパクト連星である。コンパクト連星は重力波を発生してエネルギーを失いながら近づきあい、連星合体を起こす。合体時にも強い重力波を放出することが理論的に予測されている。これらの連星合体率は、連星の進化計算によって見積もられる。連星進化を主系列時から追い、どのように進化していくかをモンテカルロシミュレーションで計算し、その統計を取ることで直接観測できない連星ブラックホール等についても合体率を見積もることができる。宇宙年齢以内に合体するパルサーの観測例は少なく、連星中性子星についても星の進化計算から合体率を見積もることは重要である。コンパクト連星が合体するタイムスケールは、数億年のものから宇宙年齢以上のものまであり、非常に長い。そこで、本研究では宇宙で最初にできる星である初代星 (Pop III) 起源のコンパクト連星に着目し、初代星起源の連星がどれだけコンパクト連星に成りうるのかについて研究を行った。

## コン 05a パルサーとマグネター

植松 聖人 (新潟大学 M1)

本発表は論文 (Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1) のレビューである。高エネルギーの X 線パルサーである異常 X 線パルサー (AXPs) や、不規則な間隔で  $\gamma$  線及び X 線の大規模なバーストを放射する軟  $\gamma$  線リピーター (SGRs) はマグネターと解釈される。マグネターは自身の磁気エネルギーを、電磁波の放射エネルギー源とする孤立した中性子星である。他のパルサーの放射のエネルギー源とされる、ガスの降着、自転、残留熱では AXPs/SGRs の放射活動に十分なエネルギー

ギーを供給することができないと一般的に考えられている。このように考えられている理由や現在考案されているマグネターのモデルについて、AXPs/SGRsの観測に基づく特性についても触れながら紹介する。さらに、マグネターについて最近発見された弱い外部磁気双極子場と、AXPs/SGRsと他のパルサーとのいくつかの関連についても述べる。

1. Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1

## コン 06a マグネターの強磁場中での電流シートの時間発展

竹重 聡史 (京都大学 M1)

星の進化の一つの結果として出来る中性子星は一般に非常に短い自転周期と強い磁場 ( $10^{12}\text{G}$  程度) をもつ。この星が磁気双極子放射によってエネルギーを放出すると仮定するとその自転周期の変化率から磁場強度を見積もることが出来る。これによって  $10^{15}\text{G}$  もの非常に強い磁場をもつ中性子星であるマグネターが発見され、以来理論観測の両面から様々な物理が研究されてきた (Thompson & Duncan 1995)。マグネターでは質量放出を伴う爆発現象が起きており、そのエネルギーはおおよそ  $10^{44}\text{erg} \sim 10^{46}\text{erg}$  程度にもなることが知られている (Lyutikov 2006)。この質量放出のエネルギー源はマグネター内部および磁気圏に蓄えられた磁気エネルギーであると考えられており、このエネルギーを短いタイムスケールで粒子の運動エネルギーに変換して放出する物理過程が必要となる。このような機構として、太陽での爆発現象を説明すると考えられている磁気リコネクションを提案する。本研究では反平行な成分をもつ磁場における磁気リコネクションを考えるために磁場中の電流シートがどのように時間発展するかを考察した。太陽での爆発ではこのような磁場構造では、電流シートが種々の不安定性によって薄くなることで散逸が起り磁気リコネクションが起ることが知られている。しかしプラズマがマグネターと共回転していることを仮定して見積もられる電子数密度 ( $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ) は、電流シートが薄くなったときにそれを維持するのに必要な数密度 ( $\sim 10^{31}\text{cm}^{-3}$ ) よりも非常に小さい。したがって、マグネターで薄い電流シートを得るためには粒子数密度を補う機構が必要となる。このようなものとしては小さな爆発を複数起こしてマグネター表面の粒子を蒸発させて粒子を補うことが出来る可能性が指摘されている (Masada et al 2010)。本研究では別のアプローチを考え全く新しい物理過程として、マグネターの強磁場によって起こる電子陽電子対生成の効果によって粒子数密度を補うことを考えた。このアイデアをもとに方程式系を線形化して解析解を導出し、数値シミュレーションの結果と比較して電流シートが維持されること確認した。本研究は強磁場天体の爆発現象理論の基礎となりうるものである。

1. Lyutikov, M. 2006, MNRAS
2. Masada, Y., Nagataki, S., Shibata, K., Terasawa, T. 2010, PASJ
3. Thompson, C., & Duncan, R. C. 1995, MNRAS

## コン 07b 強磁場における電子プロパゲータの様々な表式

矢田部 彰宏 (早稲田大学 M1)

中性子星の中でも、非常に強い磁場をもつものをマグネターという。

マグネター周辺の超強磁場での現象を理解するためには、超強磁場における物理過程を理解しなければならない。本研究では、磁場中の量子電磁力学的な物理過程にとって必要な電子のプロパゲータ (伝播関数) を複数の表式で表した [1][2]。また、超強磁場特有の物理過程である複屈折の表式に関して考察を行い、最近発表された表式 [3] と従来の表式の関連を理解することができた。

1. Schwinger, J.. 1951. Phys. Rev. **82**. 664
2. Melrose, D. B. and Parle, A. J.. 1983. Aust. J. Phys. **36**. 755
3. Hattori, K. and Itakura, K.. 2013. Ann. Phys. **330**.23. arXiv:1209.2663v1.

## コン 08a ブラックホール候補天体 XTE J1856+053 の X 線観測

田中 結 (青山学院大学 M1)

ブラックホールは単体で明るく輝くことはないが、恒星と近接連星系をなしている時など、ブラックホールの周りに降着円盤が形成され、そこからの放射を観測することができる。

XTE J1856+053 は、1996 年 9 月 17-18 日に RXTE/PCA の銀河リッジ探査によって発見された X 線天体である [1]。RXTE/ASM の観測によると 9 月 10 日に初めて検出され、9 月 15-17 日に X 線フラックスのピークを向かえたことが報告されている。XTE J1856+053 は 2007 年に再増光し、3 月 14 日に XMM-Newton によって観測され中心天体の周りの降着円盤のスペクトルはソフト状態のモデルとよく合っていることが報告されている [2]。今回は、XMM-Newton の再解析を含め、「すざく」、RXTE/PCA、Swift/XRT のデータ計 6 個を解析し、中心天体の質量に制限をつけることを目的とする。すべての X 線スペクトルは、温度約  $0.7\text{keV}$  の降着円盤からの多温度黒体放射で概ね近似でき、得られた放射領域 (内縁半径) から、距離  $10\text{kpc}$ 、軌道傾斜角  $25^\circ$  と仮定すると質量は  $4.6 \pm 0.1 M_\odot$  になる。また、中心天体がブラックホールで銀河系内にあると仮定すると、距離は  $8 - 23\text{kpc}$ 、質量は  $3 - 8 M_\odot$  と制限を付けることができた。

1. Marshall, F. E., Ebisawa, K., Remillard, R., & Valinia, A. 1996, IAUC, 6504
2. Sala, G., Greiner, J., Ajello, M. & Primak, N. 2008, A&A, 489, 1239

## コン 09a Sy1 活動銀河核 IC4329A における新たな硬 X 線成分の発見

三宅 克馬 (東京大学 M1)

活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nuclei) の X 線スペクトルは、光子指数  $\Gamma \sim 2$  のべき関数型の一次成分、一次成分の反射と解釈されるおおよそ  $10\text{keV}$  から盛り上がるハンプ成分、反射成分に付随すると鉄輝線、などから成る。しかし、観測されるスペクトルの中では、これらの成分が混じり合う結果、何らかの仮定や先見なしにそれらを分離することは難しかった。硬 X 線のハンプ成分の解釈もまた、説明可能な様々な解釈が存在し、まだ決着はついていない [1][2][3]。そこで我々は今回、時間変動を利用したモデルに依存しない方法で硬 X 線成分を調べるため、明

るく時間変動のある天体として IC4329A を選び、「すざく」のデータを用いて解析を行った。その結果、差分スペクトルを用いて連続一次成分を抽出し、光子指数として  $\Gamma \sim 1.96$  を決定した。この  $\Gamma$  を固定した一次成分、およびその反射を組み込んだモデルフィッティングを行うことにより、時間変動する連続一次成分とは独立した新たな硬 X 線成分の存在を発見した。

1. Madejski et al. 1995. ApJ
2. Perola et al. 1999. A&A
3. Gondoin et al. 2001. A&A

## コン 10a 「すざく」を用いた LMXB GS1826-238 におけるハード状態のスペクトル解析

小野 光 (東京大学 M1)

中性子星 (NS) には  $\lesssim 2M_{\odot}$  の質量の恒星と連星系を成して、X 線を放射するものがあり、そのスペクトルには 2 つの状態が知られている。一つは 20 keV 以下の帯域が卓越しているソフト状態、もう一つは 20 keV 以上の高エネルギー帯域が卓越しているハード状態である。Sakurai et al. (2012) によると、光度が  $\sim 10^{36}$  erg/s の Aquila X-1 のハード状態の 1-100keV スペクトルが、NS 表面の黒体放射が逆コンプトン散乱されたものと、降着円盤による多温度黒体放射の和によって説明されることが分かっている。これに対して、GS1826-238 はつねにハード状態にある NS 連星だが、光度が  $\sim 10^{37}$  erg/s と高く、そのスペクトルが Aquila X-1 と同様に説明できるか不明だった。そこで「すざく」による GS1826-238 の 0.8 – 200 keV スペクトルを解析したところ、降着円盤の軸が視線方向から十分に傾いていると考えれば、一般的な光度、 $\sim 10^{36}$  erg/s のハード状態の天体と同様の描像で理解できることが分かった。

## コン 11a ガンマ線バーストにおける元素合成

藤林 翔 (京都大学 M2)

中性子連星合体時に作られる元素は、できる核種によっては崩壊によって電磁波を放射する可能性があり、重力波天体のフォローアップ観測のために重要となる。また、そもそも r-process という元素合成の過程がコンパクト連星合体で起こるかを確かめる上で、r-process が起こる場合の光度曲線を予言することは重要である。そこで、中性子星連星の合体時に期待される状況下で元素合成計算を行い、その元素組成を調べた。その結果、できる重元素のでき方が electron fraction  $Y_e$  に非常に依存することがわかった。

## コン 12a ブラックホール・中性子星連星の合体に対するスピンの傾きの影響

川口 恭平 (京都大学 M2)

ブラックホール・中性子星の連星合体は重要な重力波源であるとともに、sGRB のセントラルエンジンの候補としても注目されている天体現象である。ブラックホール・中性子星連星の合体過程のような、一般相対

論的效果が重要となる系では、その物理的振舞いについて解析的な議論をすることは難しい。したがって連星の各質量や、スピンといったパラメータが、重力波波形やその後の質量放出や降着円盤形成にどのような影響を及ぼすかは、系統的に数値相対論シミュレーションを行ってはじめて理解できる。これまでの BHNS 連星合体の数値シミュレーションでは、ブラックホールのスピンの傾きと、連星系の軌道角運動量の方向 (それぞれの軸の方向) が揃っている場合が考えられてきたが、連星の進化計算 (Population Synthesis) 結果 [1] では、スピンの向きが揃っていない (Tilted な) BHNS 連星が多く存在していることが示されている。しかしながら、こうしたスピンの傾きを考慮した数値相対論シミュレーションは現在世界でも Foucart et al. による限られたパラメータについてしか行われていない。F.Foucart et al.[2][3] による先行研究ではこうしたスピンの傾きが連星合体時に物質の precession を引き起こし、重力波や質量放出などに大きな影響を与えることが確認されている。本研究は、連星の各質量、スピンの大きさ、状態方程式といった、今まで研究されてきたパラメータに加え、スピンの傾きというパラメータを含めた BHNS 連星合体の系統的研究を行うものである。今回はその足がかりとして一般相対論的效果が重要になり、数値相対論が必要になるまでのブラックホール・中性子星連星の軌道進化を PN 近似を用いて調べた。それにより系のスピン傾きがその合体直前まで維持されることを確認した。さらに現在、数値相対論による計算を行っており、本発表ではその研究経過もあわせて発表する。

1. Belczynski et al. Astrophys.J. 682:474-486(2008)
2. F.Foucart et al. Phys. Rev. D 83, 024005(2011)
3. F.Foucart et al. Phys. Rev. D 87, 084006(2013)

## コン 13a 中質量ブラックホール形成の基礎的な数値シミュレーションの紹介

漆畑 貴樹 (東京大学 M1)

相対論的效果が発生する現象を理解する為にはアインシュタイン方程式を解く必要がある。しかし複雑な連立偏微分方程式の型をしており、厳密解はおろか数値的にも解くのが難しい。そこで時空を  $3+1$  形式に分解し、アインシュタイン方程式を数値的に解く事を目的として研究された分野が数値相対論である。当発表では、京都大学の関口雄一郎氏と柴田大氏による 2007 年の論文を通して、中質量ブラックホール形成の基礎となった数値シミュレーションを紹介する。また 2011 年、2012 年の論文を参照し、現在の中質量ブラックホール形成の研究状況の発表を行う。

1. Yuichiro SEKIGUCHI and Masaru SHIBATA. 2007. Progress of Theoretical Physics
2. YUICHIRO SEKIGUCHI AND MASARU SHIBATA. 2011. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL
3. Masaru SHIBATA and Yuichiro SEKIGUCHI. 2012. Progress of Theoretical Physics

### コン 14a 三次元の一般相対論的電磁流体力学 (GRMHD) シミュレーションによる降着する回転ブラックホールのジェットと磁場の幾何について

伊地知 翔真 (京都大学 M1)

回転していて磁場を持つコンパクト天体やその降着円盤は強いトロイダル磁場をつくり、非常に磁化したプラズマを相対論的ジェットに変える。重要なのは、ジェットの形成プロセス自身は non-dipolar 磁場に対して不安定であることだ。三次元の一般相対論的電磁流体力学 (GRMHD) シミュレーションをつくり、dipolar (二極) / quadrupolar (四極) 磁場の降着におけるジェット形成プロセスや成長の安定性を見た。dipolar モデルでは、強い非対称的なディスク乱流にも関わらず、生成されたジェットは  $10^3$  重力半径で角度はおよそ  $\theta \sim 10^\circ$  まで絞られ、Lorentz 因子は  $\Gamma \sim 10$  まで達しており、重要な崩壊や消失は見られなかった。逆に quadrupolar モデルでは、定常的で相対論的なジェット ( $\Gamma \geq 3$ ) は作られなかった。このように、降着する磁場の幾何が相対論的ジェット形成の重要な役割を行うことを議論していく。

1. McKinney J.C., & Blandford R.D., 2009, MNRAS

### コン 15a 相対論的 MHD ジェットの加速機構

杜 駿 (東京大学 M1)

本稿では相対論的 MHD ジェットの効率的な加速についてレビューした。相対論的ジェットは AGN やクエーサー、GRB において発生している相対論的な速度を持つ細く絞られたプラズマの流れであると考えられている。降着流によるエネルギーの供給等とともにこの現象を説明するモデルとして MHD 流れが広く議論されてきたが、軸対称定常流で相対論的な場合には電磁場のエネルギーが流体の運動エネルギーに効率的に変換されず、運動エネルギー優勢な観測結果を説明出来なかった。そのため、軸対称 MHD 流れの中での Poynting エネルギーから運動エネルギーへの変換機構が解析と数値計算の双方で調べられてきた。Komissarov et al.(2009)、Lyubarsky(2010) などより外部からの単純な境界条件でもって流れを制限した場合に Poynting エネルギーが十分に運動エネルギーに変換されることがわかったが、それは観測結果が要求する迅速な変換ではなかった。Fendt & Ouyed(2004) は磁力線の釣り合いを考慮せずに磁場に  $B_p r^2 \propto r^{-q}$  のべき乗の分布を与え、 $q > 0$  の場合に急激な加速が与えられることを示した。さらに、Toma & Takahara(2013) は外部との境界付近において効率的な加速を与える磁力線の形状の具体例を与え、MHD によって相対論的ジェットの運動エネルギー優勢を説明できる可能性を示した。

1. Toma, K., & Takahara, F. 2013, arXiv:1303.2744
2. Lyubarsky, Y. E. 2010, MNRAS, 402, 353

### コン 16a ブラックホール候補天体 4U 1630–47 の very high state での観測的研究

堀 貴郁 (京都大学 M1)

ブラックホール (BH) への降着流の理解は、超強重力場下における物理の検証のみならず、銀河中心核にある巨大ブラックホールの成長メカニズムを解明するために不可欠な、たいへん重要な課題である。このための最適な研究対象が BH 連星とよばれる、恒星と太陽の数倍～10 倍程度の質量をもつブラックホールからなる近接連星系である。

BH 連星からの X 線放射は、質量降着率によって大きく 2 つの状態間を遷移することが知られている。降着率が低いときは low/hard state と呼ばれる状態をとり、硬 X 線の強いべき型のエネルギースペクトルを示す。この成分は、BH 近傍の高温コロナ中の電子が円盤からの光子を逆コンプトン散乱することで生じると理解されている。降着率が高くなると円盤まわりのコロナが少なくなり、円盤からの黒体放射が支配的となって軟 X 線で明るい状態 (high/soft state) へ遷移する。このとき、降着円盤の内縁は最内縁安定円軌道まで伸びている。さらに質量降着率が大きくなり Eddington 限界光度近くに到達すると、very high state (VHS) というコンプトン散乱成分が支配的な状態をとる。しかしこの状態は珍しいためこれまで観測例が少なく、降着円盤やコロナの物理状態や幾何形状がほとんど理解されていない。このような高質量降着率下での BH 降着流の理解は、質量降着による急速なブラックホール成長を理解する上で鍵となるものである。

我々は 2012 年 10 月、X 線天文衛星「すざく」を用いて VHS にあつた BH 連星 4U 1630–47 を観測した。その結果、VHS にある BH 連星としては過去最高精度で、1.2–200 keV という広域にわたる X 線データを取得することができた。このエネルギースペクトルを降着円盤からの熱的放射と、コロナによる逆コンプトン散乱成分からなるモデルを使って解析したところ、円盤の内縁半径が最内縁安定円軌道より大きくなっているという証拠を得た。これは high/soft state からさらに質量降着率が上がると、降着流が新たな状態に変化することを示唆している。本講演ではスペクトル解析の詳細を説明し、VHS の物理状態について議論する。

1. Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A. 2007, A&AR, 15,1

### コン 17a Failed SN における降着円盤からの放射の研究

中西 俊貴 (早稲田大学 M2)

ブラックホールなどの高密度コンパクト天体の周りには一般に降着円盤が形成されると考えられている。本研究では Failed SN と呼ばれる現象の後にできる降着円盤からの放射を計算した。これにより、重力波のカウンターパートとしての降着円盤の可能性を探した。基礎方程式を元に円盤の時間発展を追い、観測が可能であるかの考察を行った結果、 $10^{39}$  erg/s ものエネルギーを放出する事がわかり、MAXI での観測は十分に期待されるという結論がでた。この夏の学校では、本研究でのモデルやメソッド等を発表していきたい。

1. Woosley S. E., Heger A., 2012, ApJ, 752, 32

### コン 18c 「すざく」による ULX 天体 Holmberg IX X-1 のスペクトルの時間変動解析

小林 翔悟 (東京大学 M2)



Ultra Luminous X-ray source (ULX) は渦巻き銀河の腕に存在する X 線で明るく点源である。光度は  $L_X = 10^{39.5-41}$  erg/s と恒星質量 ( $\sim 10M_\odot$ ) ブラックホール (BH) の Eddington 限界光度  $L_{\text{edd}} \sim 10^{39}$  erg/s を大きく上回る [1]。撮像分光観測によるスペクトル解析から、中間質量 ( $\sim 100 - 1000M_\odot$ ) BH が  $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているとする説と [2]、恒星質量 BH からの超  $L_{\text{edd}}$  放射であるとすつ説 [3] が存在し、決着がまだついていない。

ULX のスペクトルは BH 連星と同様に Disk 型と Power Law (PL) 型という異なる状態を遷移することが知られている。前者は上に凸なスペクトルで、後者は 10 keV 付近で弱いカットオフを受けたべき関数的に伸びる硬いスペクトルである。特に後者については、降着円盤からの多温度黒体放射と、光学的に厚く  $\sim 3$  keV という比較的低温なコロナによる逆コンプトン散乱モデルでよく再現されることが知られている [4]。しかしながら、平均スペクトルでの議論に限られており、スペクトルの時間変動まで含めた議論はごく少数に限られている。そこで代表的な ULX である Holmberg IX X-1 の「すぎく」での観測データに着目した。2012 年 4 月と 10 月でそれぞれ 180 ks と 320 ks に分けた合計 500 ks の長時間観測が「すぎく」で行われ、過去に類を見ない高統計なデータが得られた。今回このデータから長期/短期スケールでのスペクトル変動が得られたため、光度変化を含めて PL 型スペクトルの解釈が正しいかどうかの検証を行った。結果、観測を通じて「光学的に厚く電子温度の低い」コロナによるコンプトン散乱のモデルは妥当であり、Holmberg IX X-1 が中間質量 BH で、 $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているという解釈が時間変動を含めて可能であることが確認された。

1. Fabbiano 1989
2. Makishima et al. 2000
3. Mineshige et al. 2007
4. Miyawaki et al. 2006

## コン 19c 太陽系組成分布から見る重元素合成過程

山田 美幸 (お茶の水女子大学 M1)

私たちが構成する元素は、恒星内の自発的な核融合反応によって起こるものから、超新星爆発などで誘発的に起こるものまでであり、そのでき方は実に様々である。これまで、恒星内の元素合成については、組成分布をもとに様々な計算が行われ、各反応が起こるための具体的なプロセスはほぼ理解されてきた。しかし、鉄より重い重元素の合成過程に関しては、どこで、またどのように進行していったのか、観測データが少ない等の問題もあり、あまりわかっていない状況である。

本研究発表では、重元素が合成されるまでの過程を、組成分布図と照らし合わせ、現在考えられている様々な視点より紹介し、またそれらの過程の問題点についても考察する。

## コン 20c ガンマ線バーストジェット内部における放射輸送計算

柴田 三四郎 (甲南大学 D2)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は宇宙で最も激しい現象の一つであり、放射されるエネルギーは  $10^{51}$  erg にもなる。そのた

め赤方偏移  $\sim 8$  といった宇宙論的遠方のものでも観測可能である。様々な観測的、理論的研究から GRB は大質量星の重力崩壊に付随して生まれる超相対論的なジェットに起因すると考えられている。しかしその放射メカニズム自体は未だ分かっていない。最近ではその放射メカニズムとして相対論的なジェットからの熱的放射が注目されており、精力的に議論されているが、相対論的なジェットからの熱的放射をきちんと調べるには親星や星周物質中におけるジェットの伝播とジェット中での光子の輸送の両方を考慮に入れ計算する必要がある。そこで我々は相対論的なジェット中での放射輸送計算を行った。その結果ジェット中での放射輸送を考慮に入れた場合には、光子が光学的厚さが 1 となる面 (光球面) から放射されると仮定するような場合とは異なるスペクトルが得られるということが分かった。この事はジェット中での放射輸送計算の重要性を示している。

1. Meszaros, P., 2006, Rep. Prog. Phys., 69, 2259
2. Lazzati D., Morsony B. J., & Begelman M. C., 2009, ApJ, 700, L47
3. Mizuta A., Nagataki S., & Aoi J., 2011, ApJ, 732, 26

## コン 21c 超相対論的流体における衝撃波中の放射輸送シミュレーション

石井 彩子 (東北大学 M2)

宇宙最大級の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) は、発見以来数十年が経過している現在もその発生メカニズムが解明されておらず、宇宙物理学の重要なテーマの 1 つである。GRB の起源となる天体現象として、大質量天体周辺で形成される相対論的なジェットが挙げられている。相対論的なジェットを起源とする GRB の可能性を探るには、相対論的な流体と放射輸送のカップリング計算が必要である。しかし、カップリング計算を行うにあたり、背景が相対論的な流体である場合に放射、吸収、散乱などを評価する共動系と観測者系の変換を矛盾なく行う手法は確立されていない。そこで本研究では、同一の衝撃波について衝撃波が静止している系と衝撃波が相対論的な速度で動いている系でそれぞれ放射輸送計算を行い、結果を同一の系で比較・検討し、相対論的な流体を背景場とする放射輸送計算中での異なる系の変換手法を構築する。

1. P. Meszaros. 2006. Journal of Progress in Physics.
2. H. Nagakura et al. 2011. Astrophysical Journal.

## コン 22c GRB ジェットからの重力波メモリ

中田 めぐみ (日本大学 M1)

ガンマ線バースト (GRB) において、相対論的なジェットにより重力波が放射されることが先行研究によって指摘されている。この放射にともなう重力波は、ジェットのエネルギーと速度に応じて振幅が最終的に一定の値をもつので、「重力波メモリ」と呼ばれている。しかし、重力波はジェットの正面方向から角度  $\gamma^{-1}$  以上ずれないとアンチビーミングされることが知られている。なので、GRB と同時に重力波を観測することは難しいと考えられていた。今回私たちは、ジェットから放射されるガンマ線による重力波メモリを考察し、内部衝撃波モデルを用いて GRB ジェットからの重力波メモリの波形およびスペクトルを計算した。

そして、GRB と同時にジェットからの重力波メモリが観測される可能性について考察した。

1. Segalis and Ori, 2001, PRD, 64, 064018
2. Sago, Ioka, Nakamura and Yamazaki, 2004, PRD, 70, 10142
3. Kobayashi, Piran, and Sari, 1997, ApJ, 490, 92

### コン 23c 電波銀河 3C84 の VLBI 観測による電波強度とガンマ線強度の長期変動

千田 華 (東海大学 M1)

本研究の目的は、電波銀河 3C 84 からの電波強度とガンマ線強度それぞれの長期にわたる時間変動の相関を調べることで、電波とガンマ線の放射領域について物理的な考察を行なうことである。そのためにまず、2013 年 1 月 21 日に発生したガンマ線フレアの直前の 2013 年 1 月 15 日に、VERA 22 GHz で観測された 3C 84 のアーカイブデータを解析した。本解析により得られたデータイメージから、既に知られている 3 つのジェットコンポーネントが確認でき、中心核の C1 より 2mass ほど離れた C3 コンポーネントの方が明るい構造が確認できた。また、全フラックス密度は 26.0Jy と得られ、過去の 3 年間の VERA 22 GHz の観測データ (Nagai et al. 2010) と比べると電波強度は増大していることがわかった。一方、Fermi-LAT で観測された 3C 84 の母銀河 NGC 1257 のガンマ線モニターデータによる 2008 年から現在までのライトカーブでは、電波強度の時間変動のような長期にわたる増光は見られないが、2010 年にはその前後より 2.5 倍ほどフラックスが高くなっているのがわかる。1 日という短いスケールのガンマ線フレアに起因した電波変動は確認されていないが、観測開始から現在にいたる長期間でみると、電波とガンマ線の強度変動に何か関係がみられるのではないかと考える。今後はガンマ線フレア後から現在までの VERA 22GHz の観測データの解析を行い、今回のガンマ線フレアに起因した電波変動を調べ、また観測開始から現在までの長期間でのガンマ線と電波の強度変動から相互の関係について考察していきたい。

1. Nagai et al. 2012, MNRAS, 423, L122-L126
2. Nagai et al. 2010, PASJ, 62, L11-L15

### コン 24c VLBI による低光度 AGN M84 の観測的研究

中原 聡美 (鹿児島大学 M1)

低光度 AGN は、 $H\alpha$  輝線光度が  $10^{40} \text{ ergs}^{-1}$  以下で定義される、質量降着率の小さな活動性の弱い AGN である。そして、大多数の AGN はこの低光度 AGN であるため、AGN の普遍的な姿を知るのに重要な存在である。しかし、暗い天体であるため観測的研究が難しく、理解が進んでいない。本研究では低光度 AGN M84 について、VERA 22/43 GHz による 2 周波準同時、2 ビーム位相補償観測を用いて観測した。M84 は比較的我々の銀河系の近くにあり、中心ブラックホールの質量も大きく、視半径が大きいため、光度が低くても中心のコンパクトな領域を見る事ができると期待される。M84 から離角 1.5 度離れた明るい電波源 M87 を位相参照天体とする事で、M84 の検出を試みた。この観測結果を用いて、M84 の構造、輝度温度、スペクトル、ジェット速度といった情報を調べる事が本研究の目的である。本集録では、22 GHz の結果

1 エポックについて報告する。今回初めて VERA を用いて M84 を観測した結果、検出に成功し、M84 のシュバルツシルト半径の 1000 倍まで構造を分解してイメージを作る事ができた。構造については北側に微弱ながらジェット成分が伸びているのを確認できた。構造のサイズは解析結果のイメージでは確認できず、モデルフィットをして定量的に測定する必要がある。また、目的の情報を得るにはさらに多エポックで解析を進めていく必要がある

### コン 25c MAXI で探る Be 型 X 線連星パルサーの星周円盤の密度

高木 利紘 (日本大学 M2)

Be 型 X 線連星パルサーは主星が中性子星、伴星は Be 型星で、既知の大質量 X 線連星パルサーの 70% 以上を占める。Be 型星は、過去に一回でも水素の輝線が観測されたことのある B 型星で、e は可視光輝線を放射するという「emission」の意味である。水素の輝線 ( $H\alpha$ ) は、Be 型星の赤道面上にできる星周円盤から放射されている。星周円盤は粘性で外側へ広がっていくと考えられているが、生成過程やくわしい構造はよくわかっていない。星周円盤と中性子星の軌道が交わるところを中性子星が通るとガスが降着し、X 線の増光 (アウトバースト) が起こる。この X 線や  $H\alpha$  などの観測から星周円盤の構造が探られている [1]。全天 X 線装置 MAXI は 92 分で地球を一周しながら全天の約 90% を観測し続けることで、Be 型 X 線連星パルサーからのアウトバーストを常に監視しており、14 天体から合計 45 回観測している (2013 年 5 月 27 日現在)。

本講演では MAXI の観測から得られたアウトバースト X 線光度から、星周円盤の密度を求めた。観測された A 0535+262、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 のアウトバーストのピーク光度を用いて、中性子星への質量降着率を求め、降着モデルを Bondi Accretion あるいは Roche Lobe による捕獲と仮定し、推定を行った。推定した A 0535+262 の密度は  $1.4 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  となり、Be 型星の  $H\alpha$  プロファイルによる星周円盤密度分布モデル [2] の密度  $3.0 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  と比較し、同等の値を得た。GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 では求めた密度が、 $6.8 \times 10^{-16} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 、 $2.7 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 、 $1.9 \times 10^{-14} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  となり、軌道パラメータに近い A 0535+262 と GX 304-1 では、GX 304-1 のアウトバースト光度が A 0535+262 の半分になるので、密度が半分になり、GRO J1008-57、4U 0115+63 の密度も確からしい値を得ることが出来た。

1. Reig, Ap&SS, 332, 1, 1, (2011)
2. Silaj et al., Ap&SS, 187, 228, (2010)

### コン 26c 全天 X 線監視装置 (MAXI) による SFXTs 観測

榊原 大貴 (日本大学 M2)

全天 X 線監視装置 (MAXI : Monitor of All-sky X-ray Image) は、2009 年 7 月に国際宇宙ステーション (ISS) の日本の実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに搭載された。MAXI では、IGR J18483-0311 等のいくつかの SFXTs (Supergiant Fast X-ray Transients) 天体で受かっている。そこで、その他の SFXTs 天体でも増光現象が起こって

いるのではないかと考えた。その確認のため、SFXT 関連の論文から、SFXTs 候補天体をリストアップし、INTEGRAL や Swift/BAT などの他の衛星の観測をもとに、座標、flux、エネルギー領域を一覧にした。そして、MAXI の on-demand data を利用し、SFXTs 天体の座標近くに、その他の強い X 線源がないかを確認する。また、運用開始からの SFXTs 候補天体の座標の X 線強度変動を確認する。

### コン 27c MAXI/GSC のデータを用いた MAXI J1647-227 のスペクトル解析

小野寺 卓也 (日本大学 M1)

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) とは、ISS (International Space Station) の日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置された X 線観測装置である。MAXI の目的の 1 つは、ブラックホールや中性子星からのアウトバースト、また  $\gamma$  線バーストなどの X 線領域で突然明るく輝く突発現象を捉えることである。本研究では、MAXI が発見した新 X 線天体 MAXI J1647-227 の解析を MAXI/GSC のデータを用いて行った。各エネルギー帯のハードネスレシオを取ることで、本天体が軟 X 線領域 (2-10 keV) でスペクトル変化していることが確認できた。また、中性子星周りの降着円盤の最内縁半径と天体までの距離を仮定する事で、天体のおおよその傾き (視線角度  $\theta$ ) を見積もることができた。今後は、より詳細なスペクトル解析を行い、本天体の半径と質量、そして天体までの距離を算出することを目標としている。

1. 諏訪文俊. 2011.  
日本大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 修士論文
2. The Astronomer's Telegram.  
<http://www.astronomerstelegam.org>
3. Mitsuda et al. 1984. PASJ 36,741-759

### コン 28c コンパクト連星の軌道決定に対する統計的手法

山田 慧生 (弘前大学 D2)

私は、浅田秀樹 (弘前大)、郷田直輝および山口正輝 (国立天文台) 諸氏との共同研究である、コンパクト連星の軌道決定に対する統計的手法について議論する。

X 線や  $\gamma$  線連星の伴星の正体は、中性子星なのかブラックホールなのか、未だ確定するに至っていない。この正体をつぎとめるには、連星の軌道要素決定が重要な鍵となる。位置天文連星に対する従来の軌道決定法 [1,2] の、実用上の問題を解決するために考案された統計的手法 [3] は位置測定の標準誤差  $\sigma$  が軌道長半径  $a_K$  より小さい場合に有効である。一方で、 $\sigma > a_K$  の場合には軌道要素の決定精度が悪くなるという問題があった。そこで今回、計算速度をあまり損なうことなく観測時刻の情報を取り入れることで決定精度を飛躍的に向上した。

1. H. Asada, T. Akasaka, M. Kasai, PASJ 56, L35 (2004).
2. H. Asada, PASJ 60, 843 (2008).
3. H. Iwama, H. Asada, K. Yamada, PASJ 65, 2 (2013).

### コン 29c pulsational pair-instability における質量放出

石井 達穂 (東京大学 M2)

pulsational pair-instability は、圧力を支えるために使われていたエネルギーが電子陽電子ペアの静止質量エネルギーに使われることで酸素燃焼の時に不安定を起こすが星全体を飛ばす爆発には至らず、pulsation しながら質量放出を繰り返す。これは pair-instability よりも少し軽い 40 – 60  $M_{\odot}$  の CO コアを持つ大質量星で起こる。放出された質量は互いに衝突し非常に明るく輝く可能性があるが、その光度は放出された質量、爆発エネルギーと pulsation の時間間隔に依存する。そこで本研究では恒星進化計算と流体力学計算を組み合わせて進化を求めることで pulsation 時の放出を詳しく調べた。ここでは 1 回の pulsation における放出質量を求めるために以下の方法をとった。まず、恒星進化計算で 1 回の pulsation の進化を計算し、pulsation 後の星の全エネルギーを求める。次に星の進化計算から得られたエネルギーと等しくなるように星の中心部にエネルギーを与え流体力学計算を行う。星の中心部で上昇したエネルギーは衝撃波となって外へ伝わり、星の表面付近の流体は加速してその一部は脱出速度を超える。そこで脱出速度を超えた質量を放出質量とする。次の pulsation の恒星進化計算は pulsation によって星が十分膨張したところから始め、まず放出質量分の質量を人為的に放出させ、その後星が収縮し始める。

この一連の計算を繰り返すことで我々は金属量が  $Z = 0.004$  で初期質量が 250  $M_{\odot}$  で炭素燃焼後の質量が 61  $M_{\odot}$ 、金属量が  $Z = 0.004$  で初期質量が 140  $M_{\odot}$  で炭素燃焼後の質量が 54  $M_{\odot}$  の 2 つのモデルについて pulsation 時における質量放出を計算した。この 2 つのモデルについてそれぞれ質量放出は最大で 4  $M_{\odot}$  および 1  $M_{\odot}$  であり、爆発エネルギーは最大で  $3.9 \times 10^{50}$  erg および  $3.8 \times 10^{49}$  erg であることがわかった。重力崩壊に至るまでに 3 回および 6 回 pulsation し、合計で 7.9  $M_{\odot}$  および 4.0  $M_{\odot}$  の質量が放出された。

1. Woosley, Blinnikov and Heger. 2007. Nature, 450, 390
2. Chatzopoulos and Wheeler. 2012. ApJ, 760, 154

### コン 30c 加速粒子を考慮した降着流

木村 成生 (大阪大学 D2)

質量降着率が小さい降着流は光学的に薄くなり、移流優勢降着流 (ADAF) が形成されると考えられている [1]。ADAF は非常に希薄かつ高温となるため、降着流内の物質は無衝突プラズマとなる。近年、その無衝突プラズマ中の磁気リコネクションにより、降着流内の粒子が加速されることが示唆された [2]。さらに、その加速粒子を利用して活動銀河核ジェットの形成を説明しようというモデルも提案された (中性子注入モデル [3])。降着流中で加速された陽子が背景の陽子と反応し高エネルギーの中性子を作る。この中性子が降着流から逃走してジェットの起源となるのが中性子注入モデルである。中性子注入モデルでは、降着流内には加速粒子が存在し、高エネルギー中性子が逃走することで降着流からエネルギーが抜き取られる。しかし、加速粒子や中性子の脱出を考慮に入れた降着流の研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では加速粒子を考慮に入れて円盤の方程式を定式化し、定常解を求めた。本研究で用いたモデルでは、降着流の構造を決めるのに重要な 2 つのパラメータがある。加速粒子の「平均注入エネルギー」 $\gamma_{inj}$  と、「エネルギー

配分率」 $f_{\text{acc}}$ である。 $\gamma_{\text{inj}}$ が大きいとき、加速粒子は降着流から効率よく抜け出すことができるため、 $f_{\text{acc}}$ を大きくしても熱的粒子が支配的な降着流が形成される。しかし、 $\gamma_{\text{inj}}$ が小さいときは、加速粒子が降着流から抜け出る割合が小さいため、 $f_{\text{acc}}$ を大きくした場合には加速粒子が支配的な降着流が形成される。そして、これらの降着流の構造は移流優勢円盤の自己相似解を用いて理解できることがわかった。

1. Narayan R. and Yi I., 1994, ApJ, 428, L13
2. Riquelme M. A. et al., 2012, ApJ, 755, 50
3. Toma K. and Takahara F., 2012, ApJ, 754, 148