
コンパクト天体 アブストラクト集
2022年度 第52回 天文・天体物理若手夏の学校

村瀬 孔大 (ペンシルベニア州立大学 物理学科 准教授)

高エネルギーマルチメッセンジャー天体物理学

高エネルギー宇宙ニュートリノの発見と重力波の直接検出の成功によりマルチメッセンジャー天体物理学の時代が本格的に到来した。中性子連星合体からの重力波とその電磁波対応天体の発見、活動銀河のフレアと関連した高エネルギーニュートリノ事象の検出によって時間領域も含めた高エネルギー天体现象への新たな知見が得られつつあり、理論と観測の両面で研究が活発に行われている。また従来の多波長天文学も大きく発展しており、地上のガンマ線望遠鏡によってガンマ線バーストから高エネルギーガンマ線が検出されるなどガンマ線による天文学も成熟しつつある。高エネルギー宇宙ニュートリノやガンマ線の生成機構を解明することは、100年来の謎である宇宙線の起源とその加速機構の解明にも役立つと期待されており、活動銀河やガンマ線バースト、超新星や潮汐破壊現象など様々な天体现象をマルチメッセンジャーで観測して理解しようとする試みが盛んに行われている。本講演では高エネルギー宇宙ニュートリノやガンマ線研究における最近の話題を紹介しつつ、高エネルギー宇宙粒子を用いたマルチメッセンジャー天体物理学の展望を述べる。

酒見 はる香（鹿児島大学）

宇宙ジェットとその周辺の磁場構造

ブラックホールなどのコンパクト天体からプラズマガスが細く絞られて噴出する現象を宇宙ジェットといい、活動銀河核、X線連星などあらゆる階層で見られる。ジェットの駆動や加速の機構については現在でも議論が続けられているが、磁場が本質的な役割を果たしているとの示唆が理論研究から得られている。そのため、ジェットに付随する磁場構造を観測的に明らかにすることが重要である。センチ波・メートル波帯の電波では、ジェットからのシンクロトン放射を観測する。それらのデータを用いた偏波解析により、ジェットに付随する磁場構造が明らかになる [1]。一方、ジェットからの偏波放射を利用して、ジェットと観測者との間の空間の磁場情報を得ることも可能である [2]。この手法を用いて、星間空間や銀河間空間など暗い領域の磁場を知ることができる。さらには近年、次世代の超大型電波干渉計 Square Kilometre Array (SKA) の試験機である MeerKAT などの高感度な観測装置の登場により、ジェットの形態から周辺に分布する磁場構造を推定することも可能となってきた [3]。本講演では偏波観測の基本的な事項を確認し、ジェット自身の磁場構造と、ジェットを利用し明らかにする周辺の磁場構造についての研究を紹介する。

1. Sakemi H., Machida M., Akahori T., Nakanishi H., Akamatsu H., Kurahara K., Farnes J., PASJ, 70, 27., 2018
2. Sakemi H., Machida M., Ohmura T., Ideguchi S., Miyashita Y., Takahashi K., Akahori T., et al., Galax, 6, 137., 2018
3. Chibueze J. O., Sakemi H., Ohmura T., Machida M., Akamatsu H., Akahori T., Nakanishi H., et al., Natur, 593, 47., 2021

活動銀河核円盤風によるセンチ波電波放射への寄与

山田 知也 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) は相対論的ジェット活動により電波光度の大きい Radio Loud (RL) AGN と、残りの 9 割を占める大規模なジェットをもたず比較的電波光度が小さい Radio Quiet (RQ) AGN に分けられる。RQ AGN の電波放射の起源については星形成やコロナなどの様々な候補が挙げられているが、いまだに謎に包まれている [1]。約 5 割の RQ AGN において、降着円盤から光速の数 10% の速さで、広い立体角に噴出される円盤風である超高速アウトフロー (Ultra Fast Outflows; UFOs) の存在が知られており [2]、我々は UFOs が電波放射の起源である可能性に注目した。実際に、Nims et al.(2015)[3] らによって UFO と星間物質の衝突により加速された非熱的電子によるシンクロトロン放射が、RQ AGN の電波光度を説明し得ることが定性的に示されている。しかし、電波スペクトルについては計算されておらず、円盤風の電波放射への具体的な寄与はわかっていない。

我々は Nims et al.(2015)[3] らのモデルに基づき、非熱的電子のエネルギー Spektrum を拡散方程式を解くことにより求め、シンクロトロン放射 Spektrum を計算することによって、観測データとの定量的比較を可能にした。一例として、近傍 1 型セイファート銀河である NGC 985 の X 線放射光度に基づいて電波 Spektrum を計算したところ、我々のモデルによってセンチ波帯域の電波 Spektrum 観測データを再現することに成功した。本講演では、モデルの概要と UFO が観測されているいくつかの近傍 RQ AGN の電波放射 Spektrum についてフィッティングを行った結果について報告する。

1. Panessa, F., Baldi, R., Laor, A., et al., Nature Astronomy, 3, 387, 2019
2. Laha, S., Reynolds, C., Reeves, J., et al., Nature Astronomy, 5, 13, 2021
3. Nims, J., Quataert, E., Faucher-Giguere, C., MNRAS, 447, 3612, 2015

相対論的ジェットに於ける磁気エネルギー転換機構

草深 陽 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

相対論的ジェットが重要な役割を果たす天体現象の 1 つにガンマ線バーストがある。ガンマ線バーストとは 10^{54} erg ものガンマ線を数秒-数分の間に放つ宇宙最大の爆発現象であり、その後残光と呼ばれる多波長放射が数日にわたって観測される。残光放射のエネルギー源は、相対論的ジェットと星間物質との衝突によって生じる先進・逆行衝撃波が、運動エネルギーを散逸させて生じる熱エネルギーと考えられている。近年、ガンマ線バースト残光の TeV ガンマ線が初めて観測され話題となっており、相対論的ジェットがもつ磁場の強さ・構造が、ガンマ線バースト残光のダイナミクス・放射に及ぼす影響を明らかにすることは、喫緊の課題となっている。特に逆行衝撃波はジェット内部を伝播するため、初期残光で重要となる逆行衝撃波からの放射に影響を与える。しかし、磁場優勢ジェットの数値計算は超高解像度を必要とするため難解であり、詳細な数値計算が行われていない。

本研究では、我々が開発した球対称 1 次元相対論的磁気流体数値計算コードを用いて、相対論的ジェット（噴流）の磁場の強さが先進・逆行衝撃波のダイナミクスに与える影響について調べた。このコードでは空間高分解能を達成するために AMR（適合格子細分化法）を実装している。計算の結果、先進衝撃波の発展については相対論的ジェットの磁場の影響が見られなかった。一方、磁場を強くすると逆行衝撃波の速度が増加し、相対論的ジェット内部を通過し切る時間が短縮した。また、相対論的ジェット及び衝撃波加熱された星間物質のエネルギー進化を計算した結果、元々相対論的ジェットが持っていた磁気エネルギーが全て星間物質の運動エネルギーに転換された。この磁気エネルギー転換機構は磁気リコネクションのような磁場散逸機構とは異なり、系の全磁束が保存している点が重要である。本講演ではこれらの結果と磁気エネルギー転換機構について議論する。

超臨界降着流からのアウトフロー；運動学的光度の質量降着率依存性とその起源 芳岡 尚悟 (京都大学 宇宙物理学教室 M2)

超高光度 X 線源やマイクロクェーサー、成長期の巨大ブラックホールなど、エディントン光度以上で輝く天体のガスダイナミクスや電磁放射特性を明らかにするために輻射流体シミュレーションは欠かせない [1] [2]。我々は、これまでの研究により、(1) 超臨界降着流からのアウトフローは「フェイルドアウトフロー」+「ピュアアウトフロー」という 2 つの構造を持つこと、(2) 運動学的光度は輻射光度よりも強い質量降着率 \dot{M}_{BH} 依存性を持つことを明らかにした。これらは超臨界降着流がアウトフローを通して周囲へ多大なエネルギーを供給することを示唆し、ブラックホールとその周囲環境の相互作用を理解する上で非常に重要である。

上記結果を踏まえ、なぜ運動学的光度が極めて強い \dot{M}_{BH} 依存性を持つのか？という疑問に答えるために、ガス密度と速度の \dot{M}_{BH} 依存性を調べた。その結果、回転軸付近のガス密度は $\dot{M}_{BH}^{4.1}$ 、速度は $\dot{M}_{BH}^{-0.47}$ に比例することが分かった。運動学的光度は密度と速度の 3 乗の積で表されるため、 \dot{M}_{BH} 依存性が高くなる ($\propto \dot{M}_{BH}^{2.7}$) のである。さらにガス密度の \dot{M}_{BH} 依存性が高い理由を明らかにするために、単位質量あたりの輻射力の分布を調べると、 \dot{M}_{BH} が増加するにつれて、輻射力の強い領域は極方向へ集中することが確認できた。これは \dot{M}_{BH} が増加するにつれて光学的に厚い円盤が鉛直方向に膨らみ、輻射が極方向へ集中することに起因する。以上から、運動学的光度が \dot{M}_{BH} に強く依存する理由は、円盤が鉛直方向に膨らむことで輻射が極方向へ集中し、その結果、極付近で多量のガスが輻射力駆動の高速なアウトフローへと転じるためだと結論づけられる。

1. Takeo, E., MNRAS, 476, 673, 2018
2. Kitaki, T., PASJ, 73, 450, 2021

ジェットの内部構造を考慮した GRB 080710 の可視光・X 線残光の理論的解釈 大林 花織 (青山学院大学 M2)

ガンマ線バースト (GRB) とは 1 日に数回の頻度で天球面上のある一点から、典型的には数百 keV のエネルギーを持つガンマ線が 0.1 秒から 100 秒程度の間に見られる、電磁波では最大光度の天体現象である。GRB 本体である即時放射には残光放射が伴う。これらの放射は正体不明の中心エ

ンジンから放出される相対論的ジェットをジェットの進行方向に対し真正面 (on-axis) から見ることによって観測されると考えられている。Swift/BAT で検出された GRB 080710 の即時放射の光度は典型的な GRB と一致する。しかし、このイベントの残光は、発生から約 2.2×10^3 秒後に赤外から可視光にかけての帯域で同時に極大を示したことに加え、ピーク前の光度の上昇が典型的なものに比べると緩やかである点で特異である。このことを、残光の標準モデル (ジェットの中心軸に対する角度方向のエネルギー分布が一様なジェットを on-axis で見たと仮定した計算) で説明することは困難である。波長に依存しないピークを説明するだけならば、ジェットの中心軸からズレた角度から見たとする off-axis 残光であると考えられる。しかし、緩やかな増光部分や典型的な即時放射である点を単純な off-axis 残光で説明するのは難しい。そこで我々はジェットの内部構造が一様ではなく、角度依存性を持つと仮定することで観測結果が説明可能かを検討した。ジェットのエネルギーやローレンツ因子に角度依存性があるとき、ジェット放射における相対論的ビーミング効果等の角度依存性が顕著になり、中心軸から少しズレた方向からジェットを観測すると、可視光残光のピーク前の緩やかな増光を説明できると期待される。本講演ではこの検討結果について紹介する。

コンプトン散乱を考慮した偏光 X 線の輻射輸送計算コードの開発 竹林 晃大 (筑波大学 理工情報生命学術院 数理物質科学研究群 M1)

ブラックホールのスピンや降着円盤は、輻射スペクトルやその時間変動などによって、長年にわたって調べられてきたがまだよくわかっていない。こうした状況を打破する可能性を秘めているのが、昨年 12 月に打ち上げられた IXPE による偏光 X 線観測である。ブラックホール降着円盤から飛来する X 線がもつ偏光情報は、降着円盤の幾何構造を反映する。そのため、偏光 X 線の理論計算結果を観測データと比較することで、ブラックホール周りの降着円盤の構造 (すなわちスケールハイトや円盤内縁の位置、円盤の歪み、さらには円盤内部温度構造など) を解明し、観測者の視線角度といった天体と観測者の間の情報も得られる可能性がある。しかし、偏光 X 線の輻射輸送計算の開発やその結果に基づいた研究は、世界的に見ても立ち遅れているのが現状である。

そこで本研究では、コンプトン散乱を考慮した偏光 X 線の輻射輸送計算コードを開発した。このコードはモンテカルロ法に基づいており、偏光 (ストークスパラメータ I, Q, U) を加味したクライン・仁科の式に従って電子散乱を扱っている。テスト計算として、まずトムソン散乱の極限で平板から放射される光の偏光角と偏光度の見込み角依存性を調査した。その結果、抜け出す角度が 90° (平板に平行) に近い光子ほど、高い偏光度を示すという結果が得られた。具体的には、平板に垂直に抜け出す光子は偏光度の平均値がほぼ 0 となり、 90° 近くでは平均的に約 0.1 となった。これは、平板に垂直な方向に運動していた光子が平板に平行な方向に散乱されると、平板に平行な方向の偏光ベクトルを持つ光子が支配的になることが原因と考えられる。また、本テストの結果を準解析的に求めた先行研究 [1] と比較したところ、ほぼ一致していることが確認できた。

1. Chandrasekhar, S. 1960, *Radiative Transfer*.

非一様媒質中を伝搬する相対論的衝撃波加速中での衝撃波加速 森川 莞地 (東京大学 M1)

宇宙線とは宇宙から飛来する高エネルギー荷電粒子であり、その最高エネルギーは $10^{20}eV$ にまで達することが知られている。そして、最高エネルギー宇宙線の加速起源としてガンマ線バーストや活動銀河核などの高エネルギー天体における衝撃波加速が候補の一つと考えられている。超新星残骸などの非相対論的な衝撃波では、衝撃波統計加速が起こっていることがわかっており、衝撃波統計加速 (*Diffusive Shock Acceleration; DSA*) とは衝撃波面を粒子が何度も往復することによって上流と下流それぞれの反射の運動量の差から粒子がエネルギーを得るという加速機構である。しかし、相対論的衝撃波では衝撃波速度が相対論的であるため、粒子は衝撃波面を複数回往復することができないということが先行研究において示されている [1][2]。しかし、ガンマ線バーストの観測などから、相対論的衝撃波では粒子加速が起こっていると期待されている。

そこで本研究では衝撃波上流における熱的粒子の密度揺らぎが衝撃波面を揺らすということを考える。衝撃波面の揺らぎは、下流の乱流運動を駆動する。その乱流運動によって乱された磁場によって粒子の軌道が激しく乱され、粒子が上流に戻ることが可能になると期待される。粒子が相対論的衝撃波を複数回往復し、加速されるかどうかを相対論的 *MHD* シミュレーションとテスト粒子シミュレーションを用いて明らかにする。

1. Niemiec et al., ApJ, 650, 1020, 2006
2. Lemoine et al., ApJ 645, L129, 2006

超新星爆発の初期放射で探る爆発直前の大質量星の姿 村井 結太 (東北大学 修士1年)

重力崩壊型超新星爆発は、星の進化の最後に大質量星のコアが重力崩壊することで爆発すると考えられている。超新星爆発直後の数日の明るさは主に爆発した星の性質で決まるが、放射のタイムスケールが短いため観測データを得ることが難しく、星の半径や星周環境などといった爆発直前の星の姿は未だよく理解されていない。

近年は観測技術の向上などによって爆発直後のデータが取られるようになってきており、爆発直前の星の姿について研究が進められている。例えば Förster et al. 2018[1] では、測光観測によって、爆発直前の星に大規模な質量放出による高密度星周物質が存在することが示唆されている。しかし、対象天体は遠方の超新星爆発だったため、多くの天体で分光的な分類はなされていなかった。

そこで本研究では、分光データが存在する近傍の5つのII型超新星爆発について、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡の Tomo-e Gozen Camera で取得した爆発初期の観測データと先行研究で使われていた理論モデル (Moriya et al. 2018[2]) を用いて爆発直前の星の質量放出率の推定を行った。観測された光度曲線と理論モデルを網羅的に比較した結果、爆発直前の質量放出率が $10^{-5} - 10^{-3} M_{\odot}/yr$ と推定された。この質量放出率は典型的な赤色超巨星の質量放出率より大きく、先行研究と同様に爆発直前の星に高密度星周物質が存在することが確認された。

1. Förster, F. and Moriya, T. J. and Maureira, J. C. and Anderson, J. P. and Blinnikov, S. and Bufano, F. and Cabrera-Vives, G. and Clocchiatti, A. and de Jaeger, T. and Estévez, P. A. and Galbany, L. and González-Gaitán, S. and Gräfener, G. and Hamuy, M. and Hsiao, E. Y. and Huentelenu, P. and Huijse, P. and Kuncarayakti, H. and Martínez, J. and Medina, G. and Olivares E., F. and Pignata, G. and Razza, A. and Reyes, I. and San Martín, J. and Smith, R. C. and Vera, E. and Vivas, A. K. and de Ugarte Postigo, A. and Yoon, S. -C. and Ashall, C. and Fraser, M. and Gal-Yam, A. and Kankare, E. and Le Guillou, L. and Mazzali, P. A. and Walton, N. A. and Young, D. R., *Nature Astronomy*, 2, 808, 2018
2. Moriya, Takashi J. and Förster, Francisco and Yoon, Sung-Chul and Gräfener, Götz and Blinnikov, Sergei I., *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 476, 2840-2851, 2018

Ia 型超新星の Double Detonation model における He 外層質量の影響 鶴見 薫樹 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

0.5-8 太陽質量 (M_{\odot}) の中小質量星は最終的に C/O を主成分とする白色矮星になり、その一部は核融合反応により Ia 型超新星爆発を起こしてその一生を終える。スペクトルに水素の輝線が見られず、Si の輝線が強く見られる超新星が Ia 型超新星に分類される。白色矮星から Ia 型超新星へ至る詳細な爆発機構は未解明である。

Ia 型超新星へ至る爆発モデルの一つに、Double Detonation model がある。本モデルは、白色矮星表面に降着した僅かな He 外層に生じた超音速の燃焼波である detonation により発生した衝撃波が内側へ伝搬することで、C/O コアに点火・detonation を起こすモデルである。近年精力的に研究されている [1] モデルであり、水素の輝線が検出されない、爆発前後に伴星が観測されない、といった典型的な Ia 型超新星の特徴を説明できる可能性がある。Ia 型超新星の観測的性質を満たすためには少量の He 外層 ($\lesssim 0.02 M_{\odot}$) で爆発が実現されることが要求される。このような小質量 He 外層の場合に He detonation が発生する条件が調査される一方で、C/O コアの点火条件に関しては見過ごされている。

我々は、C/O コア点火条件として、He 質量 (M_{He}) $\sim 0.01 M_{\odot}$ が重要な境界値になると概算した。そこで本研究では、 M_{He} を連続的に変化させ、 M_{He} が C/O コアの点火に与える影響を定量的に評価することを試みる。 M_{He} の変化は爆発後の元素組成、即ち Ia 型超新星のスペクトルに大きく影響する。最終的に、モデルから得られた M_{He} と Ia 型超新星の観測スペクトルを比較することで、Double Detonation model が Ia 型超新星を説明可能か議論する。

我々は現在、数値流体計算コード FLASH[2] を用いて、核反応を含めた一次元球対称系での計算を行なっている。特に、 $0.001 M_{\odot} < M_{\text{He}} < 0.1 M_{\odot}$ を対象に C/O コア点火の条件を集中的に調査している。本講演では、現時点での計算結果および結果から課される Double Detonation model への制限の展望について議論する。

1. K. Shen et al., *ApJ*, 1409, 3568, 2014

2. B. Frixell et al., ApJ, 131, 273, 2000

活動銀河核 Mrk 766 が示す幅の広い鉄 K 輝線構造の起源 望月 雄友 (東京大学 修士 1 年)

活動銀河核の X 線スペクトルには、6–7 keV の帯域に幅の広い鉄 K 輝線構造が観測されることが多い。中心ブラックホールの周りには降着円盤、トーラス、円盤風などの高電離ガスや、広輝線領域などの粗密構造を持った低電離ガスなどが存在する。それぞれが X 線を吸収あるいは散乱することで、鉄 K 輝線のあたりに様々なスペクトル構造が現れ、複数の要素が足し合わさった結果、幅の広い鉄 K 輝線として観測されると考えられる。どの要素によってどのようなスペクトル構造が作られるのかという切り分けができれば、活動銀河核において各要素がどのように存在しているのか、という物理描像を得ることができる。

本研究では、活動銀河核 Mrk 766 を対象天体とした。過去の X 線観測から、この天体には X 線放射領域の一部を覆う部分吸収体と、光速の数%の速度で吹く超高速アウトフロー (Ultra Fast Outflow; UFO) が存在することが明らかになっている。また、“lamp post”と呼ばれる極端に小さいコロナをブラックホールの極近傍に配置することで、幅の広い鉄輝線を説明する先行研究も存在する。今回我々は、二つの X 線天文衛星、XMM-Newton と NuSTAR のアーカイブデータを再解析し、幅の広い鉄輝線の起源の解明を試みた。結果として、トーラスなどの遠方の散乱体による細かい輝線、シュバルツシルトブラックホール周りの降着円盤反射によるやや広がった輝線の他に、6.4–6.7 keV 付近に等価幅で 30–50 eV 程度の弱い輝線構造が存在することを見出した。また、この弱い輝線構造は、視線外の UFO による散乱成分と考えて矛盾がないことを明らかにした。結果として、降着円盤、トーラス、UFO を考えることで、鉄輝線構造が自然に説明でき、この構造に寄与する割合を調べることで、中心ブラックホール周辺の描像を描くことができた。

パルサー星雲観測の現状と CTA での観測による未来 笛吹 一樹 (東京大学大学院 理学系研究科 M1)

数ミリ秒から数秒の周期でパルスを放つ天体であるパルサーの周りにはパルサー星雲 (PWN) という天体がある。PWN は、TeV にまでわたる超高エネルギーのガンマ線放射が観測されている。特に、発見されている銀河系内の TeV ガンマ線天体の中において PWN は最大種族であり、圧倒的な存在感を放つ。PWN の放射にはパルサーからの相対論的速さの粒子の流れ (パルサー風) が関係していると考えられている。パルサーが失う回転エネルギーの内、パルスとして放出されるエネルギーは 10 % 以下であり、残りは全てパルサー風の運動エネルギーへの変換に費やされているとされる。よって、PWN は非常に効率よく粒子を加速させている天体として注目されている。しかし、その高効率な粒子の加速機構は未だ論議的であり、その解明は宇宙物理に新たな知見を与える点で重要である。PWN の放射モデルを確立させる為には、PWN の観測数を増やし、放射位置解析から PWN の空間的構造を探ったり、電波から X 線の観測結果とガンマ線の観測結果を結びつけたりすることが重要となる。これにより、星雲の半径や磁場の大きさ、電子陽電子数な

どのモデルパラメータ値に制限を与えることが期待され、PWN の放射モデルの理解につながる。Cherenkov Telescope Array(CTA) は現行の解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov telescopes, IACTs) と比べて 20 GeV-300 TeV で 5-10 倍もの感度をもつ。そのため、現在の 30 個程度の観測数を飛躍的に向上させることが期待される。また、CTA は角度分解能も現行の IACTs より 3 倍程精度が上がる為、PWN の大きさや周囲の超新星残骸との関係を探ることが見込める。本講演では、PWN の物理と CTA による PWN 観測の未来について詳細な説明を行う。

ロングガンマ線バーストの起源は？重力崩壊前の大質量星内部の回転速度勾配 西尾 恵里花 (東北大学理学研究科天文学専攻 M1)

ロングガンマ線バースト (LGRB) とは強力なガンマ線を数秒以上放出する宇宙で最大規模の爆発現象である。LGRB の起源の一つとして光速に近い速度のジェットが考えられている。このジェットの中心エンジンとして 2 つの説がある。1 つ目は大質量星が重力崩壊した後、形成される高速で回転する中性子星 (ミリ秒マグネター)、2 つ目は降着円盤を持つブラックホール (BH) である。どちらの説がより適切かを考える為には大質量星内部の半径方向の回転速度勾配が重要となる。なぜなら、ミリ秒マグネターを形成する為には内側が早く回転している必要があり、降着円盤を形成する為には外側が早く回転している必要があるからである。

今回レビューする論文 McNeill&Müller[1] では酸素が燃焼している対流層の回転速度分布を調べる為には、重力崩壊前の大質量星に対して三次元流体計算を行なった。先行研究である Yoshida, et al.[2] と比べると対流が準定常となる為には十分な時間で計算を行なった点で優れている。

その結果、酸素燃焼による対流層内では角速度はわずかに半径方向に正の勾配を持つことが明らかとなった。球面平均した角運動量フラックスの解析から、角速度の正の勾配には半径方向に流れる対流だけではなく子午面上の流れが影響することが判明した。もし大質量星内部の対流層が常に正の回転速度勾配を持っているならば、星の中心に高速で回転するマグネターを形成することは難しい為、LGRB のジェットは BH とその周りの降着円盤から放出されていると考えられる。

1. McNeill, L. O. & Müller, B., MNRAS, 509, 818, 2022
2. Yoshida, T., et al., MNRAS, 506, L20, 2021

Tomo-e Gozen の高頻度サーベイを用いた Fast Optical Transient 探査 押切 翔 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻 M1)

近年、観測機器の性能向上により、短い時間間隔で広範囲の視野をカバーした突発天体探査が可能になっている。これにより、明るさが 1 日程度で変動する超新星爆発初期や rapid transient と呼ばれる天体などの突発天体の探査が盛んに行われるようになった。しかし、ガンマ線バースト残光やキロノヴァなど、Fast Optical Transient と呼ばれる、光学的に観測可能で、数時間程度での変動を示す天体の探査には、より短い時間間隔での観測が必要となる。

そこで本研究では、東京大学木曾観測所の 105cm シュミット望遠鏡に搭載されている Tomo-e Gozen カメラを用いた可視光広視野高頻度サーベイのデータを利用し、銀河系外の短時間突発天体

の探査を行った。このサーベイでは一晩に1時間程度の間隔で複数回、同じ領域を観測しているため、短い時間スケールでの突発天体の変動を知ることができる。Tomo-e Gozen の約2年に及ぶ観測データの中から、数時間だけ増光していた天体を探査したところ、8個の候補天体が選出された。しかし、これらの天体には Pan-STARRS1 で暗い対応天体が存在したため、Pan-STARRS1 や WISE の測光データを用いた色指数の比較や、光度曲線の特徴、増光率などから、全て銀河系内天体であると結論づけた。本講演では、検出した短時間突発天体候補の性質と、銀河系外短時間突発天体の発生率について議論する。

Event Horizon Telescope による Sgr A* の撮影

大場 絢平 (新潟大学 自然科学研究科数理物質科学専攻 M1)

Event Horizon Telescope (EHT) Collaboration は2017年4月に世界各地にある8つの望遠鏡を用いて天の川銀河中心にある超巨大質量ブラックホール Sgr A* の観測を行い、今年5月、観測結果を報告した。ブラックホールとは、1915年にアインシュタインの一般相対性理論で予言された、光でさえ脱出できない天体である。太陽質量の数千万倍から数十億倍ほどの質量を持つ超巨大質量ブラックホールが各銀河中心に存在するとされている。画像解析やモデリング解析の結果、直径 $51.8 \pm 2.3 \mu\text{as}$ (M87* に匹敵) のリング状の画像が得られた。この Sgr A* の EHT 画像は、この場所に存在すると推定される質量約 $4 \times 10^6 M_{\odot}$ のカー・ブラックホールが作るシャドウの直径と矛盾しないことを示した。

この結果は、天の川銀河の中心に超巨大ブラックホールが存在することの直接的な証拠であり、重力半径の 10^3 から 10^5 のスケールで行われた恒星軌道の力学的測定から得られた予測と、事象の地平線スケールの画像や変動を初めて結びつけることに成功した。さらに、超巨大質量ブラックホール M87* における EHT の結果との比較により、一般相対性理論の予測との整合性が中心質量で3桁以上にわたって得られた。

1. The EHT Collaboration et al., ApJL, vol.930, L12, 2022

晩期の大質量星における激しい質量放出と Thermal Pulse ー 先行研究紹介と研究計画 ー

長谷川 智也 (東京大学 M1)

超新星爆発直前の数年間に激しい質量放出を行う大質量星の存在が近年確認されている。例えば、スペクトルの中に水素の非常に細い輝線が見られる「II_n型」に分類される4つの超新星が爆発直前に1年間あたり 10^{-2} から 10^{-1} 太陽質量程度の物質を放出していたと報告されている [1]。これまでこの高い質量放出率を説明する理論モデルがいくつか提唱されてきた。例えば大質量星の死の直前数年間に行われる核燃焼に着目して、燃焼領域で起こる激しい対流が励起した内部重力波のエネルギーが星の外層に伝わって質量放出を起こすというモデルが提示されている [2]。赤色超巨星を用意し実際にこのモデルのいう機構で質量放出が起こるか数値シミュレーションで検証した研究があるが、その計算結果では星の外層の構造変化は起こったが大規模な質量放出は起こらなかった

[3]. 私は C や O の Shell(殻) での核燃焼時に起こる Thermal Pulse が引き起こす星の構造変化を調べることで激しい質量放出の機構を研究する計画である。Thermal Pulse とは殻燃焼時に温度の急な上昇と降下を周期的に起こる現象である。C や O の核燃焼は温度依存性が高く核燃焼は激しく暴走すると予想される為、星の構造変化や質量放出を静水圧平衡を仮定せず動力学的に調べる必要がある。本講演では以上の内容についてより詳しく紹介する。

1. Kiewe, M. ; Gal-Yam, A. ; Arcavi, I. et al. ApJ. vol. 744, 10. 2012.
2. Quataert, E. ; Shiode, J. MNRAS. vol. 423, p. L92-96. 2012.
3. Fuller, J. MNRAS. vol. 470, p. 1642-1656. 2017.

Electron heating in shock-driven turbulences

Theo Abounnaser (the University of Tokyo M1)

Non-relativistic shockwaves of SuperNovae Remnants (SNR) have proven to be promising sites for the acceleration of high energy nuclei [1]. The shock formation is naturally associated with self-generated turbulences [2], while the back-reaction of cosmic rays on the shock amplifies the turbulences, creating a smooth pre-shock transition upstream called the “precursor” . Within this picture, turbulences mediate the shock’s structure and dissipation of energy into accelerated ions. On the other hand, gamma-ray bursts (GRB) events are associated with relativistic shocks. The prompt emission is usually associated with internal, possibly mildly relativistic, shocks. There, a considerable amount of the internal energy mostly carried by ions, can be converted into radiating high-energy electrons [3]. If the detailed emission process is already unclear, how the energy is dissipated otherwise remains completely unsolved. In the case of the ultra-relativistic shock-front decelerating in the interstellar medium, also associated with the long-lasting “Afterglow” emission, detailed analysis of the spectrum [4] and dedicated simulations [5] bring out the possibility that energy is converted by heating the electrons ahead of the shock. Early studies have explored such mechanism for SNR shocks both theoretically [6] and with simulations [7], also revealing associated features like an early efficient acceleration of electrons [8]. Whether pre-heating or particle acceleration can occur at mildly relativistic shock remains unknown, this is the target of my research. In this context, many instabilities can arise at the same time [9], and it is not obvious which one will govern the dynamics of the plasma. Hence, my research efforts are focused on theoretical estimations of the growth rates and the length over which turbulent field remain coherent as the key to understand the environment in which electron heating could occur. In this talk, I would like to put forward the typical situations associated with a GRB where a shock may give rise to turbulences, before offering a review of the occurrences of pre-heating in recent literature. Finally, I will introduce some elements from my research to present a panorama of shock-driven turbulences that could be responsible for the pre-heating phenomenon.

1. Morlino & Caprioli, A&A, 538, A81, 2012

2. Bret et al, Physics of Plasmas 21, 072301, 2014
3. Kobayashi & Sari, ApJ, 551, 934, 2001
4. Panaitescu and Kumar, ApJ, 560, L49, 2001
5. Vanthieghem et al, ApJL, 930, L8, 2022
6. Papadopoulos, Ap&SS, 535, Vol 144, 1988
7. Shimada and Hoshino, ApJ, 543, L67, 2000
8. Dieckmann, A&A, 377, Vol 356, 2000
9. Bret, ApJ, 990, 699, 2009

特殊相対性理論的光子拡散の研究 竹田 麟太郎 (筑波大学大学院 M1)

ブラックホール周辺の光学的に厚い降着円盤やそこから発生する高密度アウトフローでは、光子が多重散乱されつつ拡散していると考えられる。現存する輻射流体コードは、こうした相対論的流体中での光子の多重散乱過程を厳密に扱わず、非相対論的な拡散近似等を用いている。ブラックホール周囲のガスの構造やダイナミクスをより正確に解明するには、相対論的流体中での光子の多重散乱を正確に扱える数値計算コードの開発が必要である。その第一歩として高橋芳太らによって、相対論的流体中での光子多重散乱の集団的振る舞いを記述する確率密度関数の解析解が得られている。[1]

そこで本研究では、流体静止系とそれに対して一定の速度で運動する実験室系において、任意の時刻での光子の確率密度分布を得るためのモンテカルロ輻射輸送計算コードを作成した。まず、数値計算によって得られた流体静止系での光子の確率密度分布は、解析解と一致した。次に流体静止系と実験室系での光子の確率密度分布を比較したところ、十分に時間が経過したときの分布の違いはローレンツ収縮の効果のみで理解できた。しかし拡散の初期段階では実験室系での分布が非対称となり、ローレンツ収縮の効果のみでは説明できないことが確かめられた。この非対称性の原因は、流体の進行方向とその逆方向で光子の拡散速度が異なるからである。

講演ではこのような相対論的流体中での多重散乱光子の振る舞いについて述べる。

1. Takahashi et al., in prep.

Pair-instability supernova における元素合成と $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率の影響 川下 大響 (東京大学 総合文化研究科広域科学専攻 M1)

初期質量 $140M_{\odot} \leq M_{\text{ZAMS}} \leq 260M_{\odot}$ 程度の大質量星は、酸素燃焼段階で、電子陽電子対生成の不安定性により “Pair-instability supernova (PISN)” を起こすと考えられている。PISN は典型的超新星よりも多い ^{56}Ni を生成するため、非常に長く明るく輝く。また、PISN は通常の超新星爆発と異なり爆発後にコンパクト天体を残さない。そのため、ブラックホール (BH) 質量分布には $100M_{\odot}$ 付近に “Pair-instability mass gap” と呼ばれる BH の存在しない質量帯があると言われていいる。実は、このギャップ質量範囲は天体物理学における重要な核反応 $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ の反応率に

強く影響を受けることが近年明らかになった [1]。その後、重力波イベント GW190521 の観測からこの質量ギャップ領域に BH が存在したことがわかり、この反応率への注目が著しく増している [2,3]。こうした質量ギャップはこれまで BH 質量関数の観点のみで議論され、重力波観測を通してのみ検証可能であった。一方、光度曲線をはじめとする光学的観測情報への影響はほとんど理解されていない。本研究では $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率の不定性をパラメータに、PISN での ^{56}Ni 生成量、またその場合の光度曲線への影響について調査した。公開コード MESA・STELLA を用いて、大質量 He 星の 1 次元の恒星進化と、光度曲線計算を行った。本研究の結果、初期質量の同じ He 星では $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率と相関を示すように ^{56}Ni 合成量が増加する傾向が明らかとなった。本講演では、その結果について報告・議論する。

1. R. Farmer et al., ApJ 887 53, 2019
2. R. Abbott et al., Phys. Rev. Lett. 125 101102, 2020
3. R. Farmer et al., ApJL 902 L36, 2020

中性子星-ブラックホール連星合体によるキロノバ 齋藤 瑞葉 (東北大学 M1)

宇宙に存在する重元素の起源には解明されていない点がある。中でも、速い中性子捕獲 (r プロセス) で重元素を合成するには中性子過剰な環境が必要であり、どこで起こるのか完全な理解には至っていない。r プロセス元素合成が行われる環境の候補として、NS-NS 合体や NS-BH 合体が考えられている。この連星合体時に合成された r プロセス元素は放射性崩壊を起こし、それによりキロノバという赤外線放射が起こると考えられている。近年 NS-NS 合体起源の重力波が観測され、その電磁波の追観測によりキロノバが実際に確認された (Abbot et al.2017[1])。しかし、NS-BH 合体起源の重力波はいくつか観測されているものの、それに伴うキロノバは観測されていない。今後、重力波・電磁波の同時観測数の増加が期待される中で、NS-BH 合体起源のキロノバの放射過程について詳細に理解することが重要である。キロノバの放射過程を考えるには、その放射の現場となる NS-BH 合体に伴う質量放出のメカニズムが重要である。

NS-BH は、重力波放射に伴い徐々に軌道半径を縮めていき、NS が BH の潮汐半径内に入ると BH の潮汐力により破壊される。この破壊された NS の一部が dynamical ejecta として放出される。Dynamical ejecta の質量、速度、角度などがキロノバの性質を決める上で重要である。そこで本講演では、NS-BH 合体から放出される dynamical ejecta の運動学的性質を、数値相対論に基づく詳細なシミュレーションで示した Kyutoku et al. 2013[2] のレビューを行う。この論文では、dynamical ejecta の典型的な質量が $\sim 0.1M_{\odot}$ 、速度が光速の $\sim 20 - 30\%$ あることがわかった。さらに、ejecta は主に軌道面上に広がり、軌道面からの開き角は $\sim 10 - 20$ 度となる様子も見られた。

本講演では、以上の結果についてまとめた上で、この ejecta からのキロノバの放射も議論する。

Kyutoku et al. 2013[2] では、ニュートリノ輻射輸送は考慮されていなかった。私は修士課程において、これを考慮した解析を行う予定である。ニュートリノ加熱が dynamical ejecta の性質に与える影響を明らかにすることで、より現実に即したキロノバの放射過程について考えたい。

1. B.P.Abbott et al. [LIGO SCientific and Virgo], Phys. Rev. Lett. 119 (2017) no.16, 161101
2. K. Kyutoku et al., Phys. D 92 (2015), 044028

キロノヴァ AT2017gfo のスペクトルのモデル化

高田 凜 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター 修士課程 1 年)

中性子星連星 (BNS) 合体 GW170817 に伴うキロノヴァ (KN) は、重力波源に対応する唯一の電磁波対応天体として知られている。本論文では、原子に関する最新のデータを用いて輻射輸送モデルを立て、正確に較正されたスペクトルの観測値と比較した。それには、BNS 合体の流体力学的シミュレーションに基づいた原子核ネットワーク計算による元素組成を用いた。合体後 1.4 日の青いスペクトルは、高い電子分率を持つ核合成軌道が必要であることを示す。観測と最も良く適合するモデルは、第一 r 過程ピーク元素 (Sr と Zr) のみで構成されており、強い吸収スペクトルは Sr II の吸収により良く再現された。この段階 (合体後 1.4 日) ではランタノイドの質量分率に上限を設け、 $X_{LN} \lesssim 5 \times 10^{-3}$ とした。他方、合体後 2.4 日から 6.4 日にかけてのスペクトルでは、適当な量のランタノイド物質 ($X_{LN} \approx 0.05^{+0.05}_{-0.02}$) が必要となることがわかった。これにより、6000 Å 以下の領域はランタノイドで覆われ、0.7-1.0 μm に存在する著しい特徴 (Sr II) を説明するのに十分な量の軽い r 過程元素が生成される。この組成は観測データとよく一致し、青いフラックスの欠如が近赤外線 (NIR) 過剰を引き起こすことを示している。また、初期段階 (合体後 1.4 日) とそれより後の段階における物質の組成が異なることから、互いに組成の異なる噴出物が存在するか、或いは 2 つの成分が混ざった物質が存在していることがわかる。このことは、「2 成分」キロノヴァモデルに対して更なる支持を与え、核合成軌道から元素組成を制約するものとなる。不確定要素は、主として原子データの精確性と膨張する物質の電離状態にある。[1]

1. J. H. Gillanders et al, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, stac1258, 2022

ブラックホールの X 線強度変動の解明に向けた Cygnus X-1 の短時間フレア解析

伊藤 雅輝 (立教大学大学院 修士 1 年)

ブラックホール (BH) 連星は激しく不規則な X 線の短時間変動を示す。その原因は、BH 降着流の不安定性などが考えられているが、なぜ激しくランダムに変化するのか未だに謎である。BH 連星からの X 線放射は質量降着率によって 2 つの状態が存在する。降着率が低いときは LHS (low/hard state) と呼ばれ、降着率が高くなると HSS (high/soft state) と呼ばれる。明るい BH 連星の代表格であるはくちょう座 X-1 (Cygnus X-1) は、X 線衛星「RXTE」と国際宇宙ステーションに搭載された全天 X 線監視装置「MAXI」を用いて 2 つの状態を分別できる。X 線衛星「RXTE」の PCA 検出器を用いて、LHS と HSS の状態に対して、フレアを検出し、重ね合わせて平均化する手法 (ショット解析) を適用し、短時間フレアの平均的なプロファイルを得た。別の客観的なアプローチ方法として、機械学習の手法である VAE (Variable Auto Encoder) を用いて、短時間フレア

の自動分析も試みている。本講演ではこれらについて紹介したい。

相対論的乱流中の荷電粒子からの放射スペクトル

後藤 瞭太 (東京大学宇宙線研究所 博士1年)

宇宙において、乱流は普遍的な現象である。そして、コンパクト天体における乱流は、天体ごとには多種多様である。例えば、ガンマ線バーストでは、weibel 不安定性によりプラズマの微視的スケールの乱流が励起されると考えられている [1]。一方、パルサー星雲では、kink 不安定性による流体の巨視的スケールの乱流が励起されていると考えられている [2]。このように、乱流のスケールはコンパクト天体ごとに様々である。

コンパクト天体において、乱流中の荷電粒子による放射スペクトルが観測されている。その例は、磁場中の荷電粒子が行うシンクロトロン放射である。理論的にはシンクロトロン放射スペクトルは、荷電粒子の一樣磁場中における螺旋軌道から計算される。ところが、乱流のスケールが、荷電粒子の螺旋軌道のラーモア半径より小さくなると、荷電粒子は螺旋運動を描かなくなる。この場合、放射スペクトルはシンクロトロン放射の理論の予言とは異なり、ジッター放射と呼ばれている。ジッター放射は、ガンマ線バーストなどの天体の放射スペクトルの解釈に応用されてきた [3]。

このように天体ごとの乱流の多様なふるまいは、天体ごとの放射スペクトルの多様なふるまいに反映されているという解釈が考えられる。

本研究では、ガンマ線バーストなどのコンパクト天体における相対論的な乱流中の放射に注目する。乱流中の放射は、乱流が相対論的な場合には先行研究で詳細に調べられていない。相対論的な乱流中には、磁場と同程度の強い電場が存在する。この場合、電磁場中の荷電粒子が行うドリフト運動も考慮して放射を考える必要がある。

本講演では、様々なスケールの相対論的乱流中での荷電粒子の軌道計算結果とそれから得られた放射スペクトルの物理的解釈について議論する。

1. Medvedev & Loeb, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 526, 697-706, 1999
2. Porth et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society ,438 , 278-306, 2014
3. Medvedev, THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 540, 704-714,2000

NICER、XMM-Newton などの X 線衛星を用いたマグネターのデータ解析

屈 楚舒 (東京大学 M1)

マグネター (magnetar) は若くて強い磁場をもつ中性子星の一種である。その磁場の範囲は 10^{12} G から 10^{15} G まで広がっており、主に 10^{14} G 程度の磁場を持つマグネターが多く (30 個程度) 発見されている。[1]

マグネターは磁場の減衰をエネルギー源として、多種多様な高エネルギー現象を引き起こす。その中でも特に持続時間がミリ秒から秒までの突発バースト (short burst) と持続時間が週から月までのアウトバースト (outburst) が多く観測され、ピーク光度が 10^{47} erg s^{-1} まで達するジャイアントフレア (giant flare) やそれに伴う準周期振動 (QPO) も発見されている [2]。普段は X 線で暗

く観測感度以下のマグネターも、アウトバーストにより数多く見つかるようになっている。

一方、マグネターはアウトバースト時に自転も変動する。その周期変動の解析はパルサーの研究方法を借りてエネルギーごとにパルスプロファイルを算出して行う。マグネターからはパルサーと同じようにスピンドウンやグリッチが発見されていて、同時にマグネターはスピンドウンのリカバリーが大きかったり突発スピンドウン (anti-glitch) が観測されたり [3]、パルサーとは異なる自転進化の性質を持ち、パルス波形の変化も観測されている。

本講演では、これまでに観測された X 線衛星データを用いた Swift J1555.2-5402 をはじめとするマグネターの時系列データとスペクトル解析の途中経過を報告する。今回は特に時系列データは NICER、スペクトルデータは XMM-Newton のデータに注力する。現時点ではマグネターの時系列データとスペクトルデータは独立に解析する研究が多いが、両者を組み合わせることで新たに引き出すことのできる物理について議論する。

1. V. M. Kaspi, et al., ARAA, 55, 266, 2017
2. Yuri Levin, MNRAS, 368, L35, 2006
3. R. F. Archibald, et al., Nature, 497, 591, 2013

標準進化に比べ重い伴星を持つ矮新星 LL Andromedae の進化経路 伊藤 潤平 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

矮新星とは、主星に白色矮星、伴星に低温星を持つ近接連星系で、Roche lobe を満たす伴星からの質量輸送により主星周りに降着円盤を形成する系を指す。この質量輸送は連星系から角運動量が失われることで続き、そのため伴星が縮退するまで伴星質量の減少・軌道周期の短縮が同時に進む。これは矮新星の進化と呼ばれる。矮新星特有の現象に、アウトバーストという準周期的な増光現象があり、これは矮新星の進化の状態を知る上で重要性が高い。

多くの矮新星は標準的な進化モデルに基づく同様の進化経路を取り、軌道周期と伴星質量が強く関係する。しかし一部の矮新星はこのモデルと異なる進化経路を取る。矮新星 LL And は軌道周期に対し伴星質量が重い可能性が指摘されており、これは伴星の水素欠乏が進んでいるためだと考えられた [1]。

我々は LL And の 2021 年のアウトバーストの測光分光観測を実行した。本天体の測光観測から主星に対する伴星の質量比が 0.111(3) と与えられた。これは軌道周期に対し大きく、本天体が標準的な進化経路をとらない可能性を強く支持する。対して分光観測では、伴星の水素欠乏が進んだ天体と異なり、He/H の輝線強度比が低いことが分かった。更に、伴星の水素欠乏が進んでいると仮定して推定されたアウトバースト周期は実際の系の約 1/10 となった。これは LL And で伴星の水素欠乏が進んでいるという仮説と反すると考えられる。

標準的な進化と異なる進化の経路をとる別の原因として、伴星の金属量が低く、伴星半径が小さくなることが寄与すると指摘された [2]。LL And の金属量は太陽の半分程度である可能性が指摘されており [3]、この仮定の下で LL And の標準的な進化モデルとの乖離を説明できることが分かった。本講演では上記の結果に関して報告・議論する。

1. Kato, T., PASJ, 56, 135, 2004
2. Patterson, J., et al., PASP, 120, 510, 2008
3. Howell, S. B., et al., ApJ, 575, 419, 2002

合体直前の超巨大バイナリブラックホール 星 篤志 (東北大学 M2)

銀河の中心には観測と理論的な観点から超巨大ブラックホール (SMBH, $10^{6-10} M_{sun}$) が存在すると考えられている。また銀河同士が衝突合体することによって生じると考えられる超巨大バイナリブラックホール (SMBBH) の調査は SMBH の Seed や成長過程、母銀河との共進化などを理解する上で重要である。本会において報告する研究対象の天体 SDSS J143016.05+230344.4(赤方偏移 $z = 0.08105$, セイファート 1 型) は SMBBH を持っていると言われている [1]。そして、2022 年 1 月までに観測された可視光、紫外線、X 線の光度変動周期の減衰から、バイナリ軌道の周期が短くなっており数日から 3 年以内に合体する可能性が高いと示唆された [1]。また 2022 年 1 月から NICER による X 線モニター観測では [1] と同様の変調が観測され、総フラックスが 2 倍に増えたと報告された [2]。また、2022 年 1 月のパロマー 200 インチによる可視分光観測から広輝線領域 (BLR) に存在するバルマー輝線のプロファイルが、2005 年に観測した SDSS の輝線プロファイルから大きく変化しており、SMBBH の軌道進化とそれに伴う活動性の高まりから複雑な BLR 構造が発現した。一方で、この天体は SMBBH を持っているのではなく、単一の BH だけを持っているとも示唆されている [3]。そこで本研究では、せいめい望遠鏡による可視分光の追観測を行うことで、ターゲット天体は確かに複雑な BLR を形成し、単一の BH だけでは説明が難しいことを明らかにした。また講演では、解析結果をもとに輝線間のシフトから軌道運動についても議論をする。

1. Jiang et al., arXiv, 2201.11633, 2022
2. Dheeraj et al., 2022ATel15225, 2022
3. Massimo et al., arXiv, 2205.06275, 2022

一般相対論的輻射磁気流体計算で探る突発的な超臨界降着現象 島田 悠愛 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

超大質量ブラックホール (SMBH) 近傍において、突発的に光度が Eddington 限界光度 (球対称降着において重力と輻射力が釣り合う時の限界光度) 以上に増光する現象が観測されている [1]。これは SMBH によって潮汐力破壊された恒星ガスが突発的に超臨界降着 (Eddington 限界降着率以上の降着) している可能性を示唆している。これまでは準定常的な超臨界降着円盤による潮汐破壊現象の研究 [2] が主であった。しかし、破壊されたガスは様々な角運動量を持っているため、増光開始時に降着する、角運動量の小さいガスについても調査する必要がある。

そこで本研究では、一般相対論的輻射磁気流体力学コード UWABAMI[3] を駆使し、角運動量の小さいガスによって引き起こされる超臨界ブラックホール降着流を調査した。具体的には、初期条件として設定する回転平衡トーラスの角運動量をパラメータとしてシミュレーションを実行した。

その結果、降着流の構造は、初期角運動量の大小によって二つに大別できることがわかった。比較のため計算した、角運動量大きいモデルでは超臨界降着円盤が形成されるが、角運動量小さいモデルでは、円盤を形成することなくガスがブラックホールに落ち込むことがわかった。二つの傾向に別れた原因はケプラー半径と最内縁安定円軌道半径の大小関係であると考えられる。角運動量小さいモデルではケプラー半径が最内縁安定円軌道半径より小さいために、ガスは円運動を行えず、円盤を形成せずにブラックホールに落ち込んだと考えられる。また、角運動量小さいモデルでは降着衝撃波が形成された。

1. S. Komossa, JHEAp, 7, 148, 2015
2. Lixin Dai et al., ApJL, 859, L20, 2018
3. Hiroyuki R. Takahashi et al., ApJ, 826, 23, 2016

降着駆動型 X 線パルサーの鉄輝線の NICER 解析 永井 悠太郎 (京都大学理学研究科 M1)

中性子星やブラックホールの連星合体から重力波が観測され、連星の進化はますます重要な研究対象となってきた [1]。その連星の進化を考えるには、伴星からの星風や中性子星の磁場、それらに関係する降着過程のより深い理解が必要であり、重要な観測の手段に X 線で観測できる鉄輝線の解析がある。降着駆動型 X 線パルサーを含む大質量 X 線連星は、これまでの衛星で鉄輝線の観測が数多く行われてきたが、より高いエネルギー分解能の装置や、早い時間変動をとらえる大きな有効面積を持つ検出器を用いた新しい観測が求められている。

近く打ち上げ予定の XRISM 衛星は高エネルギー分解能の X 線カロリメータを搭載し、かつてない精密な鉄輝線データを得ることができる。この衛星では X 線連星 Cen X-3, Vela X-1, Cir X-1 などが初期観測ターゲットに選ばれている。そのひとつである Cen X-3 は、自転周期 4.8 秒のパルサーが連星周期 2.1 日で公転し、過去の研究から食 (eclipse) の間には低電離の鉄輝線よりも高電離の鉄輝線が観測されやすいことや、鉄輝線付近のエネルギー帯の時間変動がそれ以外の連続成分に比べて遅れていることなどが知られている [2][3]。ここから、この連星では中性子星の降着円盤の内縁付近から低電離の鉄輝線が、それよりも遠方からヘリウム様と水素様の高電離の鉄輝線が観測されていると考えられている [4]。

XRISM ではこれらの鉄輝線の性質を詳しく調べる予定であるが、そのためには速い時間変動に着目したスペクトル解析や数秒という短い周期のパルス位相に分割した鉄輝線の解析が必要となる。そこで、私は XRISM のデータ解析に先立ち、高い時間分解能と大きな有効面積を持っている X 線望遠鏡 NICER の観測データを用いて Cen X-3 などの X 線連星のスペクトルの時間変動や到来時間差の解析を進めている。

1. T. M. Tauris et al., ApJ, 846, 170(58pp), 2017
2. K. Ebisawa et al., PASJ, 48, 425-440, 1996
3. T. Kohmura et al., ApJ, 562, 943-949, 2001

4. P. S. Wojdowski et al., ApJ, 582, 959-971, 2003

公転による変動の解析による Cyg X-3 の鉄輝線の放射起源の推定 新井 翔大 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

ブラックホール連星系についての理解は中心のブラックホールの理解のためには重要なものである。特に降着円盤や恒星風といった幾何学的構造は複雑で、これらの理解によってブラックホールの理解につながる直近の課題である。銀河系にある X 線連星系の中で Cyg X-3 は最も明るい天体の一つであり [1]、Cyg X-3 では、伴星である WR (Wolf-Rayet) 星から主星のコンパクト天体に向けて、強い恒星風が吹いてその恒星風に存在する電子と X 線が相互作用するため、公転とともに観測される X 線のフラックスに変化が生じる [2]。このため、恒星風がブラックホール降着系に与える影響を知るのに最適の天体である。

そこで、私はスペクトルの中で特に鉄輝線に注目した。現在最もエネルギー分解能が良い Chandra HETG (High-Energy Transmission Grating) のデータを用いて、公転の位相でデータを分割した上で、各位相で鉄輝線をガウシアンによってフィッティングした。フィッティングによって、線の中心エネルギー、線幅、フラックスを求めた。今回は、このような解析から得られた鉄輝線と連続成分のライトカーブを比較することによって、Cyg X-3 の鉄の起源について議論を行う予定である。

参考文献

1. Bonnet-Bidaud, J. M., and Chardin, G., Physics reports, Vol 170, 325–404, 1988
2. Pringle, Nature, Vol 247, 21–22, 1974

Pop III 連星間の安定な質量移動による 連星ブラックホールの形成シナリオ 宮内 侑 (京都大学 天体核研究室 M1)

重力波イベントのカタログである GWTC-2 によると、連星ブラックホール (BBH) 合体による重力波放出が 46 件報告されており、そのうち、35 件は 30 太陽質量以上の BH を含んでいた。このような重い BH の存在は予想されておらず、その起源は未だ謎である。

重い BH の形成を説明する有力なモデルの一つに、Pop III 連星が BBH へと進化するという説がある [1]。これは、大質量星である Pop III は、宇宙初期に誕生し金属量が 0 とみなせるので、星風による質量損失が効かず、重い BH への進化が起りやすいからである。しかし、このモデルが妥当であるためには、BH 質量だけでなく、BBH の合体率など、他の観測結果も説明可能であることを示す必要がある。

通常、連星進化では、共通外層 (CE) の形成が考えられている。CE 形成によって、ロッシュローブの L1 点における連星間の質量移動だけでなく、L2 点や L3 点から連星系外への質量の流出も起きる。これは不安定な過程なので、急激な質量移動が起き、連星間距離が急激に小さくなる。その後、

コンパクト連星となるか単独星になるかの条件には不定性があり、このモデルでの解析は困難である。そこで、安定な質量移動 (SMT) による Pop III 連星の進化が提案されている [1]。これは、膨張した主星の外層がロッシュローブを包み、L1 点のみを通じて安定的に伴星へ質量移動が行われるというものである。このモデルでは、CE 形成をしないため、連星進化過程を解析的に取り扱え、最終的な連星間距離も計算可能である。

今回レビューする論文 [2] は、恒星進化や半解析的手法を用いて、Pop III 連星の SMT による BBH 形成過程をモデル化した。そして、Pop III 連星のうち、SMT によってハッブル時間内に合体する BBH へと進化するものの割合を統計的に見積もった。その結果、観測期間 O1 中の BBH の合体率が説明可能であることが示された。

1. Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., MNRAS, 442, 2963, 2014
2. Inayoshi K., Hirai R., Kinugawa T., Hotokezaka K., MNRAS, 468, 5020, 2017

硬 X 線望遠鏡 NuSTAR を用いた低質量 X 線連星系 MAXI J1820+070 の観測 青山 祐也 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河中心の超巨大 ($10^5 - 10^{10} M_{\odot}$) ブラックホール (BH) の形成過程を解き明かすためには、ガスを降着して成長している BH を観測することが重要であり、その一つとして恒星質量 BH と恒星の連星系がしばしば着目される。BH が恒星と連星系を成すと、一部は恒星のガスを自身に降着させ、降着円盤を形成する。ガスはの中で重力エネルギーを開放して高温となり、その熱エネルギーの一部を光子として放射し、主に X 線で輝く。降着円盤の状態は、質量降着率で変化し、特に降着率が低い「ハード状態」では、放射が非効率になるため円盤の一部がさらに高温となり、～数 100 keV の電子雲 (コロナ) を形成すると考えられている。コロナは、降着円盤からの光子を逆コンプトン散乱し、～100 keV までべき乗で伸びる連続成分が支配的な X 線スペクトルを示す。このスペクトルを物理モデルで再現することで、コロナの電子温度や光学的厚みが推定できるが、円盤との依存関係や幾何学的な構造に関しては、未だ議論が続いている。

そこまで議論できていないので、「短い時間変動」にこだわるのを止めて、単純に「新しく見つかった MAXI J1820+070」が他の BH 連星と同様の描像で説明できるか調べた。そのためにも露光時間が 58254 s と長く、硬 X 線帯域 (3-79 keV) に感度があり、コロナからのスペクトルを調べるのに最適な NuSTAR のデータを使用した。スペクトルは、BH 周辺からの X 線放射がコロナ内の逆コンプトン散乱による冪関数モデルと光子が降着円盤に入射し内部で改めて再放射される反射モデルで再現できた。鉄の各電離パラメーターによる鉄の存在比から降着円盤の近傍領域と遠方領域では、それぞれ FeXXIV と FeXX が多く存在していることも分かった。さらに、光度曲線のカウントレートの高い時間から低い時間をとった差分スペクトルから、鉄輝線の強度が変化しないのに比べて連続成分の光子指数が大きく変化したことが分かった。

Athena++ を用いた超新星爆発での fallback 質量降着の 3 次元シミュレーション

篠田 兼伍 (東京大学 M1)

大質量星 ($\gtrsim 8M_{\odot}$) は恒星進化の最終段階で重力収縮し、重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) を介して中性子星、ブラックホールへと進化する。CCSN における fallback 質量降着は宇宙に存在する重元素量やブラックホールのキックやスピンを考える上で重要である。しかしその際 CCSN 内部では複雑な流体不安定性が発生し、外層中を衝撃波が走るときの流体相互作用はシミュレーションでしか追うことができない。そのため超新星爆発の fallback 降着を定量的にシミュレーションするためには、'計算時間と計算領域の確保の両立' が課題となっている。具体的には、超新星の爆発直後から後期段階まで、中心天体への質量降着をグローバルな領域で追う必要がある。先行研究としては、球対称 1 次元での系統的研究 [1] または特定天体での 3 次元シミュレーション [2] にとどまっている。つまり、CCSN 内部での fallback 質量降着の 3 次元描像は十分に研究されていない。

本研究ではオープンコード Athena++ を用いて、超新星爆発における衝撃波発生から、shock breakout までの fallback 質量降着の 3 次元シミュレーションを行った。具体的には恒星進化コード MESA を用いて計算した初期質量 $15M_{\odot}$ の親星の爆発進化の計算を 3 次元で行った。本講演では計算結果と fallback 質量降着の解析結果を報告する。

1. Fernández, MNRAS, 476, 2366-2383, 2018
2. Chan et al., ApJL, 852, L19, 2018

3 次元シミュレーションによる超新星爆発の多次元対流効果の解析

佐々木 俊輔 (総研大 D1)

太陽の 8 倍以上の質量を持つ星はその進化の最終段階に、超新星爆発を引き起こすと考えられている。超新星爆発のエネルギー源は重力崩壊によって解放される重力ポテンシャルエネルギーであるが、その爆発メカニズムは完全に理解できていない。ニュートリノ加熱や乱流といった複雑な流体現象を伴うためである。近年計算機科学の発展に伴い、3 次元の超新星爆発シミュレーションが可能になった。[1] その結果、ニュートリノ加熱に伴う複雑な乱流現象が爆発に重要な役割を果たすことがわかってきた。

しかし、多次元的な対流効果は 3 次元の複雑な流体現象であり、解析も困難であるため、爆発メカニズムにどのような影響を与えるのか、未解明な点が多い。乱流に着目したシミュレーション研究も行われ [2, 3, 4]、乱流のエネルギー生成や散逸、乱流圧などのメカニズムに対する効果が議論されている。また、乱流によるエネルギー輸送やニュートリノ加熱に与える効果も注目されている。乱流にはさまざまな効果があると考えられるが、最も重要な効果は何かわかっていない。

本研究では実績ある超新星爆発のシミュレーションコード 3DnSEe を用いて、乱流によるエネルギー生成や散逸が爆発メカニズムにどのような影響があるか解析を行った。その結果レイノルズ分解した R_{rr} の半径分布は先行研究らと対応する結果が得られた。今回はシミュレーションの詳細

細と現在得られている乱流の解析結果について紹介する。

1. Adam Burrows and David Vartanyan, MNRAS 491, 2715-2735 (2020)
2. Jeremiah W. Murphy and Casey Meakin, The Astrophysical Journal, 771:52 (13pp), 2013 July 1
3. Radice, journal3, vol3, pages3, year3
4. Kazeroni, Rémi and Krueger, Brendan K. and Guilet, Jérôme and Foglizzo, Thierry and Pommère, Daniel, MNRAS, 480, 261-280, 2018

かにパルサーの巨大電波パルス解析

柴田 湧輝 (広島大学 M1)

高速電波バースト (FRB) は 2007 年に初めて報告された新しい現象であり [1], 一日に全天で $\sim 10^3 \sim 10^4$ 回発生し、一度に $\sim 10^{38} \sim 10^{40}$ erg の高エネルギーを継続時間 ~ 1 ms の非常に短い時間で放射する突発的な電波バーストで、その起源や放射機構は未解明である。起源天体として継続時間、エネルギー、発生頻度からコンパクト天体があげられ、その中でもパルサーが放つ巨大電波パルス (GRP) に着目する。

パルサーとは、高速回転する中性子星で、電波からガンマ線のすべての波長領域で周期的にほぼ一定の明るさのパルス信号を放射している。GRP は通常の電波パルスに加えて散発的にかつ 10-1000 倍以上も明るくなるものであり、GRP の極端に明るいものが FRB として観測されている可能性がある。よって、この GRP の理解が FRB の解明に進展をもたらすと期待される。

最近の研究で、かにパルサーからの GRP に同期して X 線で増光が見られ [2]、GRP の放射機構に新しい知見をもたらした。これに加えて、同研究で X 線の増光率が GRP 発生のタイミングで異なる兆候が報告され、GRP の性質に回転に対する位相依存性の手掛かりが得られた。そこで本研究では、かにパルサーを電波望遠鏡である白田と鹿島の観測で得られたデータから GRP を抽出し、GRP の特性の位相依存性を調べた。その結果、早いタイミングで起きた GRP ほど、高エネルギーを持つ GRP の発生頻度が高い兆候が見られた。この結果について理論的考察も行った。

1. Lorimer et al. Science, 318, 777, 2007
2. Enoto et al. Science, 372, 187, 2021