
2021 年度 第 51 回 天文・天体物理 若手夏の学校
コンパクト天体 アブストラクト集

志達 めぐみ (愛媛大学 理工学研究科数理物質科学専攻・助教)

8月24日 14:30–15:30 B会場

X線分光と多波長同時観測で探るブラックホールX線連星の降着・噴出流

ブラックホール X 線連星は、星質量ブラックホールと恒星の近接連星系であり、星のガスがブラックホールに落ち込む際に開放される莫大な重力エネルギーが放射・運動エネルギーに変換され、強い X 線放射やガス噴出流が生じる。これまでに銀河系内に見つかっているブラックホール X 線連星のほとんどはトランジェント天体であり、普段は X 線で非常に暗いが、突然アウトバーストを引き起こし数桁以上もの増光を示す。その際、降着流は劇的な状態遷移を引き起こし、その遷移にともなって相対論的ジェットが噴出し、降着円盤に沿って噴き出すアウトフロー（「円盤風」）の観測的性質も変化する。ブラックホール X 線連星の降着円盤は主に X 線を放射し、ジェットは主に電波から可視光で輝く。また、円盤風は、X 線帯域で高電離の鉄などの青方偏移した吸収線として観測される。したがって、上記の複雑な挙動の背後にある物理を調べるために、X 線分光観測と多波長同時観測が有効である。

本講演では、ブラックホール X 線連星の基本的特徴を解説し、最近の X 線詳細観測や多波長観測による成果を紹介する。また、2022 年度打ち上げ予定の XRISM や、2020 年代末の打ち上げを目指す日本の次期 X 線衛星 FORCE などの将来ミッションについても紹介し、期待されるブラックホール X 線連星のサイエンスについて述べる。

浅野 勝晃 (東京大学 宇宙線研究所・准教授)

8月25日 13:15–14:15 B会場

天体現象における高エネルギー粒子の加速

古くから超新星残骸から X 線やガンマ線が検出されており、衝撃波によって電子や陽子が加速されている証拠とされている。最近になって Tibet や LHAASO が 100 TeV ガンマ線を検出しており、これによって PeV まで陽子が加速されている現場が特定されている。しかし、空気シャワーによる宇宙線観測によると、PeV を超え、 10^{20} eV にまで至る宇宙線が宇宙のどこかで加速されていることが分かっており、その起源はまだ明らかにされていない。

上記で述べたように、高エネルギー粒子加速の標準理論は、衝撃波における Fermi 加速である。しかし、宇宙では超新星残骸のような非相対論的な衝撃波だけではなく、ブレーザーやパルサー星雲、ガンマ線バーストのような相対論的衝撃波も形成されている。この質的な違いは粒子加速機構に大きな違いをもたらしている。また、粒子加速機構は衝撃波だけではなく、磁気リコネクションや、乱流なども考えられている。実際、ブレーザーやガンマ線バーストなどを対象にして、これらの代替加速機構が近年盛んに議論されている。

本講演では標準的な衝撃波加速機構のレビューを行い、多波長観測と比べたその問題点、代替加速機構とその妥当性などについて議論したい。

コン 1

電波銀河のガンマ線 loudness と X 線スペクトルの関係

榎木 大修 (広島大学 M1)

電波銀河は活動銀河核の 1 つであり、電波観測で中心コアとジェットが観測される天体である。Fermi 衛星では約 60 天体の電波銀河が検出されているが、それらは電波銀河の 10% 程度である。なぜガンマ線で明るいものと暗いものがあるのかを知るために X 線での性質に違いがないかを調べた。

本研究では、B.Mingo et al. (2014)[1] で示されたサンプルについて *XMM-Newton* 衛星、*Chandra* 衛星、*Nustar* 衛星、*Swift* 衛星のデータを用いて、X 線スペクトル解析を行った。このサンプルは、南半球で観測された、2.7 GHz で 2Jy 以上のフラックスを持ち、急なスペクトルを持つ電波銀河で、45 天体示されている。加えて、F.Massaro et al. (2015)[2] で示されている FR-I 天体と、Fermi で検出された電波銀河について、X 線データのある 43 天体を解析した。

スペクトル解析の結果から、スペクトルのべき指数の分布を調べたが、Fermi で検出された天体 (以下、Fermi 天体) とされていない天体の間で違いはなかった。一方、吸収の水素柱密度 N_H の分布を調べた結果、Fermi 天体でないものの約半数は、 N_H が 10^{22}cm^{-2} を超えたが、Fermi 天体のほとんどが超えなかったため、Fermi 天体には吸収がほとんどないことがわかった。そのことから、Fermi 天体はジェットを小さめの角度から見ていると考えられ、放射はトーラスに遮られないため吸収がないと理解できる。一方、一般の電波銀河はジェットを大きめの角度から見ていたため、ジェットのビーミング効果が弱く、ガンマ線の放射が弱くて見えにくいと考えられ、また、放射がトーラスの影響を受けやすく多くが吸収を示すと理解できる。

本講演ではこれらの結果について議論を行う。

1. B.Mingo et al., MNRAS, 440, 269, 2014
2. F.Massaro et al., APJS, 220, 5, 2015

コン 2

大局的輻射流体計算による超臨界降着流からのアウトフローの構造解明

芳岡 尚悟 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

X 線で極めて明るい超高光度 X 線源 (Ultra Luminous X-ray Sources ; ULXs) やマイクロクェーサーなどの光度が高い天体では、強い輻射圧による外向きのガスの流れで

あるアウトフローが生じる。これらの電磁放射特性を説明する一つに超臨界降着流からの放射がある。これを検証するには、光度やアウトフローの構造について正確に調べる必要があるため、輻射流体シミュレーションが必要不可欠である。しかし、これまでの輻射流体計算では、計算資源の制限から (1) 初期角運動量が小さく、(2) 比較的小さな計算ボックスの計算が主流であったため、質量噴出率が過大評価されていた可能性がある [1]。これは、初期トーラスからのアウトフローや、噴出後に円盤に落ち込む「フェイルドアウトフロー」が含まれていたことに起因する。

共同研究者である北木孝明氏 (京都大学) は上記問題に着目し、計算ボックスサイズ及び初期角運動量を大幅に増加させた計算を実行した。アウトフローを正しく見積もる計算の結果、噴出率が大きく減少し、観測結果と矛盾しない数値を得ることができた [2]。

本研究では、先行研究 [2] の結果を踏まえ、様々な質量降着率に対して軸対称 2 次元輻射流体計算を実行した。その結果、従来の計算より現実的な初期条件においても、質量降着率が増加すると、アウトフロー及びフェイルドアウトフローの噴出率が増えることや、アウトフローを放出する領域が広がることが明らかになった。ブラックホールへの質量降着率が $\sim 400 L_{\text{Edd}}/c^2$ (c は光速、 L_{Edd} はエディントン光度) のモデルでは、外部環境から注入されるガスのうち 43% が円盤表面からアウトフローとして噴出する。運動学的光度と X 線光度の比は ULX の観測結果と整合的であった。さらに講演では、アウトフローのスケール則についても議論する。

1. Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, ApJ, 628, 368
2. Kitaki, T., Mineshige, S., Ohsuga, K., & Kawashima, T. 2021, ApJ, 73, 450

コン 3

ブレーザー BL Lacertae 極大フレア期 (2020~2021 年) の可視近赤外線偏光撮像モニター観測

今澤 遼 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

BL Lacertae (以下 BL Lac) はブレーザーで、明るい可視光連続成分と、高い偏光度をもつ「BL Lac 型天体」の典型例である。2020 年 8 月、BL Lac は可視光・GeV ガンマ線で観測史上最大の光度に達した (Atel #13933)。静穏期の BL Lac はシンクロトロン放射のピークエネルギーが可視光以下にある Low-energy peaked BL Lac object; LBL に種別され [1]、Synchrotron-Self Compton 放射によるピーク

は GeV 帯域であることが知られているが、本フレア時には TeV ガンマ線での検出も報告された (Atel #13963)。その後も Fermi 衛星による GeV ガンマ線サーベイ観測により、2020 年 10 月、2021 年 1 月、2 月、4 月と大きなフレアが観測されている。このようなガンマ線での激しい光度変動は、ジェット内での粒子加速を示唆している。このフレアの原因を調べる事で、ジェット中の粒子加速機構に言及できるとともに、BL Lac 型天体の性質として新たな知見が得られる可能性がある。

上記の通り BL Lac からの可視近赤外線放射はシンクロトロン放射が卓越しており、偏光観測からは磁場の情報が取得できる。我々は、広島大学が保有する口径 1.5 m の「かなた望遠鏡」により、フレア期間を含む約 10 ヶ月間に渡る可視近赤外線偏光撮像モニター観測を実施した。その結果、GeV ガンマ線光度と可視光光度との相関に加え、GeV ガンマ線・可視光の激しい変動にともなう可視偏光方位角の大きな変化が確認された。この結果は、先行研究 [2] で示唆されている螺旋磁場モデルを補強することになる。本発表では、可視偏光観測によって取得した偏光情報および可視光光度と、Fermi/LAT・Swift/XRT により取得されたガンマ線・X 線光度との関係から、本フレア時の粒子加速機構・放射機構を議論する。

1. Uemura M., et al., PASJ, 72, 74, 2020
2. Marscher A., et al., Science, 452, 966, 2008

コン 4

GX 339-4 の X 線と可視光光度曲線のタイムラグ解析 大間々 知輝 (宇宙科学研究所・総合研究大学院大学 D1)

ブラックホールを中心天体として持つ X 線連星 (BHXR) を多波長で観測するとそれらの光度曲線が時間差 (タイムラグ) を伴って相関することが知られている。特に、X 線と可視光の数ミリ秒から数秒の短時間変動には、相互相関関数 (CCF) が ~ 0.1 秒 X 線が先行した順相関と数秒のタイムラグの反相関を示す奇妙な形になることが知られている [1]。このような形の CCF は、BHXR で数件報告されているがその詳細は分かっていない。我々は、タイムラグの推定、及びその相関した信号を抽出できるスパースモデリングを用いた手法を開発してきた。本解析手法は、光度曲線をフーリエ変換する際にパワースペクトルのスパース性を仮定することで両方の光度曲線に共通する信号のみを取り出すことができる利点がある。

本研究では GX 339-4 の X 線と可視光で観測された短時間変動の解析を行った。このデータでは先行研究で、X 線

が 0.15 秒先行する順相関と、X 線が 1 秒先行する反相関、可視光が 4 秒先行する反相関が報告されている。我々の解析では、可視光が先行する反相関成分以外の 2 成分が検出された。この 2 つのラグ成分をそれぞれ抽出、光度曲線の再構成、CCF 解析を行ったところ、X 線が 1 秒先行して反相関する成分は、可視光が 1 秒先行する順相関と 4 秒先行する反相関を示すことを確認した。これは CCF に見られる 2 つの反相関が、実際は、可視光が先行する順相関成分が周期的なことによって作られている可能性を示唆している。このような変動を示す物理現象としては、例えば、円盤内で可視光を放射していた領域がブラックホール近傍に落ち込み X 線を放射するといった描像が考えられる。

1. Gandhi, P., et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society: Letters, 390.1, L29-L33, 2008

コン 5

MAXI と NICER による Swift J1858.6-0814 のスペクトル 坂井 謙斗 (芝浦工業大学 M2)

Swift J1858.6-0814 は、2018 年 10 月 25 日に発見された X 線連星である [1]。アウトバーストは長く続き、明るくなった 2020 年 3 月に NuSTAR と NICER により I 型 X 線バーストが検出され、中性子星であると判明した [2]。同時に距離は 12.8 (9-18) kpc とされた。本研究では、MAXI のライトカーブで明るくなっていた、58880MJD から 58930MJD の期間の NICER のスペクトルを解析した。NICER のデータは 58913MJD から 7 日間のデータ (exposure time : 4333 s) を統計誤差を減らすために足し合わせて使用した。この期間の中では大きな変動は見られなかった。0.6-10 keV の flux は 9.9×10^{-10} erg/s/cm² で光度は 1.8×10^{37} erg/s であった。1.4M_☉ の中性子星のエディントン限界の 9% である。スペクトルの概略は、powerlaw ($\Gamma \sim 1.5$) で、LMXB のハード状態と考えられる。まず、中性子星表面を覆う、高温コロナによる逆コンプトン散乱と考え nthcomp モデル [3] を適用したが、それだけでは $\chi^2_{\nu}(\text{dof})=1.60(441)$ とデータを再現しなかった。そこで、光学的に厚い降着円盤を加えた phabs*(nthcomp+diskbb) でフィットしたところ、 $\chi^2_{\nu}(\text{dof})=1.15(439)$ とデータを再現した。nthcomp のベストフィット値は種光子の黒体温度 $kT_{\text{bb}} = 0.44 \pm_{0.030}^{0.031}$ keV、コロナの電子温度 $kT_e = 3.26 \pm_{0.27}^{0.27}$ keV、 $\Gamma = 1.72 \pm 0.01$ であり、光学的厚み τ と y パラメータは $\tau = 6.3$, $y = 1.0$ と算出できる。また、逆コンプトン散乱では光子数が変化しないことを考慮すると、種となる黒体放射の半径は 8^{+3}_{-2} km と計算でき、距離の不定性を考慮すると中性子星全体をコロナが覆っていると考えて矛盾ない。また、diskbb は

$kT_{\text{in}} = 0.27 \pm 0.02$ keV であり、境界条件補正 ($\xi = 0.41$; Kubota + 1998) と色温度補正 $\kappa = 1.7$ [4] を考慮すると、 $R_{\text{in}} \sqrt{\cos i} = 107^{+44}_{-32}$ km となり、降着円盤は中性子星の半径の 10 倍程度の位置に後退していると考えられる。この描像は中性子星 LMXB のソフト状態に近いハード状態と考えて矛盾ない。

1. ATel #12151 (H. A. Krimm et al. 2020)
2. Buisson et al, 2020 MNRAS 499 793
3. Zdziarski et al. 1996
4. Shimura et al, 1995, ApJ 445 780

コン 6

矮小銀河 IZw18 に存在する超高光度 X 線源の長期的光度変動

善本 真梨那 (大阪大学 M2)

青色コンパクト矮小銀河 (Blue Compact Dwarf Galaxy; BCD) は、星形成が活発で重元素量が $1/50 - 1/10 Z_{\odot}$ 程度の小規模な銀河であり、比較的若い進化段階にあることから銀河の形成・進化を理解する上で重要な天体である。BCD における超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray source; ULX) の出現頻度は星形成率で規格化した場合、スターバースト銀河 M82 の 20-100 倍と異様に高い。一方で、BCD のような重元素量の低い環境下では、恒星質量ブラックホール (BH) の質量上限値が上昇するという理論的予測 [1] があり、BCD における ULX の起源を議論する上で重要な結果といえる。

本研究では、近傍の代表的な BCD である IZw18 に着目し、ROSAT 衛星, Chandra 衛星, XMM-Newton 衛星, Suzaku 衛星によって得られた 1992 年から 2014 年までの計 6 回に及ぶ X 線観測データについて、その X 線源スペクトルと長期変動を調査した。その結果、IZw18 には常に 10^{39} erg/s を超える ULX が存在し、X 線スペクトルを既知の系内 BH 連星系のスペクトル遷移と比較すると、BH 周囲のコロナによる逆コンプトンモデルや降着円盤による黒体放射モデルで説明できることがわかった。本講演では、IZw18 に存在する ULX の起源を BH 連星系と仮定した上で、その状態遷移について詳しく報告する。

1. Belczynski, ApJ, Vol.714, p.1217-1226, 2010

コン 7

RXTE 衛星によるブラックホール候補天体 XTE J1550 – 564 の準周期振動の解析

鶴見 一輝 (芝浦工業大学システム理工学専攻 M1)

連星系ブラックホールは伴星からの質量降着により降着円盤を形成し、X 線などの電磁波を放射していることが知られている。降着円盤は降着率の変化ごとに観測されるスペクトルの様子が異なり、硬 X 線を多く含む強度の低い Low/Hard State (LHS) と軟 X 線を多く含む強度の高い High/Soft State (HSS) と、その中間状態である Intermediate State (IMS)、IMS の中でも Hard な成分の強い Hard Intermediate State (HIMS) と Soft な成分が強い Soft Intermediate State (SIMS) という状態に分類される。

高温コロナが発達していると考えられている LHS、HIMS、SIMS の観測データから得られるパワースペクトルには、幅のあるピークが現れることがある。これは準周期振動 (Quasi-Periodic Oscillation: QPO) と呼ばれ、その名の通り準周期的な X 線強度の時間変動である。QPO の原因は解明されていないが、レンズティーリング歳差運動などが関係していると考えられている [1]。QPO を解析することで X 線星の降着円盤の状態の解明につながることを期待できる。ブラックホール候補天体 XTE J1550 – 564 で発見された 0.1~10 Hz の QPO (Low Frequency QPO: LFQPO) が存在するデータに対して時間変動解析を行った結果、観測全体と、数データほどで行った 100s 程度の時間スケールでの解析で、QPO のピーク周波数 [Hz] と Count rate [counts/s] との相関が確認できた。今回は他のデータにおける 100s 程度の時間スケールと、10s 程度の時間スケールでの解析においても同様の相関が存在するかの調査を行い結果を報告する。

1. Stella & Vietri, ApJL, L59, 492, 1998

コン 8

MAXI, Swift を用いたブラックホール X 線連星アウトバースト光度変動の相似性解析

栗原 明稀 (東京大学 M1)

銀河系内のブラックホール (BH) 連星系は、恒星質量 BH と通常の恒星から成り、BH への質量降着率が急激に増加することで突発的な X 線増光 (アウトバースト) を示す。数十日から数百日の増光期間中に異なるスペクトル状態間を遷移し、定常状態に落ち着く。スペクトル状態遷移によって、異なるエネルギーバンド間の強度比は大きく変化する。2004 年からガンマ線バースト衛星 Swift/BAT によって、加えて 2009 年から全天 X 線観測装置 MAXI/GSC によって、それぞれ 15-150 keV、2-30 keV のエネルギー範囲で BH 連星系がモニターされてきており、多くのアウトバーストデータが蓄積されている。それらの時間変動・スペクトル変動のシステムティックな解析から、BH への降着現象の

包括的な理解が得られることが期待される。

本研究では、アウトバースト全体の形状に着目し、データサイエンスの手法を用いてその類似度を評価した。まず 20 天体について MAXI と Swift の光度曲線データを取得し、長期変動のパターンを調べるのに適したアウトバーストを MAXI で 28 個、Swift で 26 個選定した。それらについて、アウトバースト光度曲線間の相似性を定量的に調べるために、「ダイナミックタイムワーピング法」を適用し、データ間距離を指標とした階層クラスタリングを行った。分類の結果、同じ天体のアウトバーストには明らかな再現性があることがわかった。加えて、異なる天体間のアウトバーストでも顕著な類似性を持つものが複数存在することが確認できた。本発表では、光度曲線の特徴と連星系パラメータ等の物理量との関係について考察する。

コン 9

すばる望遠鏡を用いた銀河系中心領域における恒星質量ブラックホールの探査

佐久間 昂太 (東北大学理学研究科 M1)

恒星質量ブラックホールは、太陽質量の 100 倍以下の質量をもつブラックホールである。これまでに発見されている恒星質量ブラックホールは、全てブラックホール連星として観測されている。しかし、このブラックホール連星がどのように形成されるのかは未だ明らかにされていない。

また牧島 (2007)[1] によれば、発見されている恒星質量ブラックホールの数は、推定される数に比べてかなり少ない。新しい恒星質量ブラックホールの発見は、その質量や公転周期といった統計的性質の解明や、ブラックホール連星の形成シナリオを解明する手がかりとなる。

ブラックホール連星を含む連星系は、連星同士がお互いを隠し合う「食現象」によって、変光星として観測される場合がある。そこで本研究では、銀河系中心領域に存在する天体の明るさの時間変動を調査した。

本研究では PSF 測光を用いて天体の測光を行った。PSF 測光の精度は、作成する PSF の形状に大きく依存する。そのため、扱うデータを最も良く測光できる PSF 測光パラメータの検討を行った。

測光の結果から、検出された 1310 天体中 8 天体が周囲 1" の範囲にある天体よりも大きく変動していることが分かった。中でも S2-277 という天体は Gautam et al. (2019)[2] においても変動が確認されていた。変動の特徴や先行研究の結果から、S2-277 は回転変光星または食連星である可能性が示唆された。

本研究で変動していると確認された天体が、ブラックホール連星である証拠は見つからなかった。それらの天体がブラックホール連星であることを裏付けるためには、より長期

間の観測や分光観測によるドップラーシフトの確認などが必要である。

1. 小山勝二 他, 「シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象」, 日本評論社, 2007
2. Gautam, A. K., Do, T., Ghez, A. M., et al. , ApJ, 871, 103, 2019

コン 10

一般相対論的輻射輸送コードの開発とその適用 高橋 幹弥 (筑波大学 D1)

一般相対論的な輻射輸送計算は、ブラックホール近傍の撮像イメージやスペクトルなどの観測結果の解釈には必須である。さらにブラックホール近傍には高温プラズマが存在するため、輻射と流体の間でのエネルギーや運動量のやり取りを無視することができない。現在多くの一般相対論的輻射磁気流体 (GRRMHD) 計算では、輻射を計算する際に輻射輸送方程式 (光の放射強度の発展方程式) を直接解かず、近似的な方法で解くことが一般的である。しかし、近似解法では物理的に正しい解が得られない領域が存在するなどの問題を抱えている。また、輻射輸送方程式と同値な 6 次元ボルツマン方程式を直接解く試みもなされているが、数値拡散が大きくなるといった問題は依然解決されていない。

そこで我々は、ブラックホール時空中の測地線に沿って輻射輸送方程式を直接解く一般相対論的輻射輸送コードを開発した [1]。これは先行研究 [2] をベースに拡張したものである。新しく開発したコードは、光子数の保存を確実に保証しつつ、少ない数値拡散で計算することが可能である。さらに、輻射場の時間発展と同時に観測量も計算することができる初めての輻射輸送計算コードである。

本講演では、ブラックホール周囲での輻射の伝播のテストをはじめとしたコードの概要と、GRRMHD 計算で得られた降着流の構造を背景にした計算結果についても発表する。

1. M.Takahashi et al, MNRAS, in prep., 2021
2. R.Takahashi & M.Umemura, MNRAS, 464, 4567, 4585, 2017

コン 11

円盤磁場分布の決定から磁気駆動アウトフローの起源に迫る:円盤磁束輸送の理論研究 山本 凌也 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

多くの降着円盤には磁気駆動の円盤風やジェット (以下、まとめてアウトフロー) が存在しており、ガスの角運動量を外側へ輸送して降着を促進させ、円盤の構造を大きく変化させる。近年の磁気流体力学 (MHD) シミュレーションに

よって、磁気駆動アウトフローの発生機構に関する理解は進んできた。

しかし、アウトフローの駆動源である磁場が円盤内にどのように分布し、円盤進化にどういった影響を及ぼすのかという根本的な問題が残っている。磁場分布はアウトフローの発現の有無を決めるだけでなく、アウトフローのパワーや円盤からの角運動量輸送率を決める。したがってアウトフローを通じた大スケールへのフィードバックの理解や、ガス降着を通じた中心天体の成長を明らかにする上で、磁場分布を決める物理機構の解明は必須である。しかし多次元シミュレーションで円盤寿命程度の円盤進化と磁束輸送を同時に解くことは極めて困難であるため、初期に円盤ガスと磁場分布を仮定したケーススタディが主流となっており、別のアプローチが求められている。

そこで我々は、アウトフローの起源解明を目指し、円盤磁場の長時間進化を円盤ガスの進化も合わせて解くモデルの発展を行っている。このモデルは軸対称を仮定して円盤の厚み方向に積分した半径方向 1 次元の円盤面密度進化・磁場分布を解くモデルで [1]、その有用性からブラックホール円盤だけでなく原始惑星系円盤にも応用されている [2]。我々は [1] の追試を終えており、次の段階として磁気回転不安定性 (MRI) 円盤に着目し、乱流拡散に関わる近年の理論研究の進展を取り込むことで、モデルの進展を試みている。さらに、過去の研究ではアウトフローの性質を決める円盤外の磁場をポテンシャル磁場で近似してしまっているが、我々は新しい磁場計算法の開発を進めている。

1. Lubow S. H., Papaloizou J. C. B., Pringle J. E., MN-RAS, 267, 235, 1994
2. Takeuchi T., Okuzumi S., ApJ, 797, 132, 2014

コン 12

ダストトールスを用いた原始ブラックホール存在量への制限

柳澤 馨 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

原始ブラックホール (Primordial Black Hole; PBH) とは、初期宇宙において形成されたとされるブラックホールであり、 10^{15}g 以上の様々な質量をとると考えられている [1]。また、PBH は暗黒物質の候補であり、さらには 2015 年 LIGO によって初検出された重力波 [2] の起源としても候補の一つとされている。そのため、PBH の存在量に対する制限は重要な課題として注目されている。

PBH の存在量に制限をかけるためには、多様な質量帯を網羅する様々な検証が必要である。これまでの制限方法として、PBH が存在する場合に宇宙マイクロ波背景放射のスペクトルに与える影響が検出されないこと [3] や、マイク

ロレンズ効果により増光した光の観測 [4] を用いた方法がとられている。いずれの制限も PBH の存在量に対して厳しい制限を与えているものの、不確定性を孕んでいるため、さらなる検証が必要である。

我々は PBH の存在量に対する制限として、活動銀河核中心のダストトールスを用いた方法について研究を進めている。ダストトールスに PBH が存在すると仮定すると、PBH は周囲のガスを捕捉し降着円盤を形成する。その際、ガスは重力エネルギーを熱的放射として解放し、ダストトールスを構成するガスとダストを加熱する。ガスとダストの加熱および冷却からエネルギー収支を考えることで、PBH の存在量に制限を与える。ガスのエネルギー収支を考慮した結果では、PBH の質量 $10^1 M_\odot$ において $f_{\text{PBH}} = 10^{-5}$ となった。本講演では我々の研究における、ガスのエネルギー収支を用いた制限の概要と結果について議論を進める。

1. Sasaki et al., CQG, 35, 063001, 2018
2. Abbott et al., PRL, 116, 061102, 2016
3. Ali-Haïmoud & Kamionkowski, PRD, 95, 043534, 2017
4. Tisserand et al., A&A, 469, 387-404, 2007

コン 13

GPU を用いた Fast Radio Bursts の解析の展望 池邊 蒼太 (東京大学 M1)

Fast Radio Bursts (一般にその頭文字をとり FRB と略されることが多い。以下 FRB と呼ぶ。) は 2007 年に初めて検出された、典型的な持続時間が数 ms という非常に短いパルスを放射する天体現象である。発見されてから現在に至るまで多くの研究がなされてきたが、その光度関数、母銀河の特性、population が持つ性質、発生機構など多くが謎に包まれている。さらなる統計的な研究を行うにはより多くの FRB の検出、多波長観測、FRB が検出された後の追観測が重要である。

FRB の検出には、電波望遠鏡による観測によって得られる膨大なデータ量を処理する必要があるため、CPU を用いたプログラムではその解析に多大な時間がかかり FRB 検出直後に追観測を行うということができない。本講演ではこの状況を改善するために必要不可欠であると考えられる、GPU を用いたデータのリアルタイム処理についての見込み、そして今後の国内での FRB 観測の展望について述べる。

コン 14

シンクロトロン放射モデルによるガンマ線バーストのスペクトル変動の再現

ガンマ線バーストは超新星爆発や中性子星合体に起因し、 10^{54} erg にも及ぶ高エネルギー放射を伴う爆発現象である。ガンマ線バーストは数秒～数時間程度継続する γ 線を中心とした放射—即時放射とその後、数日間に及ぶ X 線～電波帯域での広帯域放射—残光放射で構成される。ガンマ線バーストの放射は、観測者を指向している相対論的ジェット中で作られていると考えられているが、その放射機構に関して未解明な部分も多い。すなわち、ガンマ線バーストの形成過程や放射場、予想されるエネルギー規模から、ジェット中の内部衝撃波での磁場形成や粒子加速による非熱的シンクロトロン放射モデルに加え、光学的に厚い「光球」からの放射を考慮した熱的プラズマ放射モデルなどが提案されている。各モデルに伴う物理現象における放射冷却の減光の時定数は各々のエネルギー依存性を示す。先行研究(勝倉 2020)(堀江 2021)では Swift 衛星の観測したガンマ線バーストの即時放射の減光過程におけるスペクトル変動を系統的に解析し、減光の時定数にエネルギー依存性があり、それがエネルギー帯域ごとで異なっていることを明らかにした。なかでも高エネルギー帯にみられた時定数がエネルギー依存性を持たない成分に注目、熱的放射モデルでの説明が検討されたが、実際のスペクトル形状と必ずしも一致しなかった。そこで、本研究では衝撃波の局所的構造による電子の再加速を考える再加速シンクロトロン放射のシミュレーションを行った。部分的に再加速されたジェット中の電子からのシンクロトロン放射がつくる光度曲線を計算し、時定数のふるまいを調べた。その結果、先行研究でみられたエネルギー帯域ごとに違う振る舞いをみせる時定数のエネルギー依存性の再現ことに成功した。

コン 15

ガンマ線バーストの非等方電子分布を考慮したシンクロトロン放射モデル

後藤 瞭太 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 修士二年)

ガンマ線バーストは相対論的なジェットからの放射現象である。今回の講演では、ガンマ線バーストの電子分布の非等方性を考慮に入れた放射モデルを発表する。非等方性を考慮に入れる動機は、ガンマ線バーストのシンクロトロン放射モデルにおける速い冷却問題の解決にある。

速い冷却問題とは、次のようである。ガンマ線バーストの観測から、シンクロトロン放射を行う電子の冷却時間は、力学的な時間スケールよりもはるかに短い。シンクロトロン冷却により直ちにエネルギーを失った電子からの放射は、観測されるガンマ線バーストのスペクトルの裾を再現しない。

我々はこの問題の解決策として、電子が磁場に対して平

行方向に主に加速されていればシンクロトロン冷却の影響が抑えられるということに注目した。磁場に対して平行方向への非等方な電子加速は、衝撃波に代わる加速メカニズムの候補である磁気リコネクションで起きることがプラズマシミュレーションで示されている。

今回の我々の研究では、加速電子の非等方な分布を初期条件として与え、シンクロトロン冷却、ジェットの膨張に伴う磁場の減少、断熱冷却を取り入れた電子分布の時間発展と放射スペクトルの計算を数値シミュレーションによって行った。その結果、電子分布の非等方性により冷却が抑えられ、ガンマ線バーストのスペクトルを説明するパラメータ(非等方分布を特徴づけるパラメータ、相対論的ジェットのローレンツ因子、冪乗分布の電子の最低ローレンツ因子など)領域が、これまでの観測から許される領域内にあることが明らかになった。

今回の講演では、ガンマ線バーストのシンクロトロン放射モデルに焦点を当てた簡単なレビューを行った後、我々の非等方電子分布によるシンクロトロン放射モデルを発表し、モデルの妥当性についての議論を行う。

コン 16

TeV 帯域で検出されたガンマ線バーストの放射機構

岩崎 啓 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

宇宙最大の爆発天体であるガンマ線バースト (GRB) は、相対論的ジェットをエネルギー源として、数秒から数十秒の間数 keV から数 MeV のガンマ線とそれに続き X 線や可視光で減光していく残光が観測される。この残光放射は、外部衝撃波によって加速された電子によるシンクロトロン放射で説明されてきた。Fermi 衛星の観測で残光のエネルギーが GeV 帯域に達することが分かり、シンクロトロン放射だけでは GRB の残光を説明できないことが示唆された。2018 年 7 月、初めて H.E.S.S. 望遠鏡で数百 GeV のガンマ線を放射する GRB 180720B が観測された [1]。2019 年 1 月には MAGIC 望遠鏡で GRB 190114C から TeV に及ぶガンマ線が観測された [2]。これはシンクロトロン放射では説明できず、シンクロトロン自己コンプトン放射 (SSC) を考えると説明できることが分かった [3]。しかし、H.E.S.S. 望遠鏡で検出された GRB 190829A では SSC 放射では説明できないことが示唆された [4]。TeV ガンマ線を放射する GRB の放射機構は、観測数が少ないことから系統的な議論に至っていない。本講演では、これまでに MAGIC と H.E.S.S. で観測された TeV ガンマ線を放射する GRB の観測結果を紹介し、高エネルギーガンマ線の放射機構について議論する。

1. H.E.S.S. collaboration, et al., Nature, 575,464-

467,2019

2. MAGIC collaboration, Nature, 575,455-458, 2019
3. MAGIC collaboration, et al., Nature, 575,459-463, 2019
4. H.E.S.S. collaboration, Science, 372, 1081-1085, 2021

コン 17

TeV ガンマ線バースト GRB 190829A の残光の Off-axis ジェットモデルによる理論的解釈 佐藤 優理 (青山学院大学 理工学研究科理工学専攻 M2)

ガンマ線バースト (GRB) は、ローレンツ因子が 100 以上の相対論的なジェットが観測者に向かってまっすぐ進んでいると考えられている。しかし、その起源天体や放射機構の詳細は未解明である。大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC, H.E.S.S. 等によって、超高エネルギーガンマ線 (TeV ガンマ線) の残光が 2018 年に初検出され、これまでに 4 イベント検出された (GRB 180720B, 190114C, 190829A, 201216C)。その中で、GRB 190829A については、発生後およそ 2 万秒後に H.E.S.S. によって 20σ レベルで超高エネルギーガンマ線が検出されたが、通常の GRB よりもガンマ線即時放射の全放射エネルギーが一桁以上小さく、さらに、X 線残光と可視残光のピークの時刻がほとんど一致するという 2 つの珍しい特徴を持つ。そこで、相対論的ジェットを真正面からではなく斜め方向から見たとした場合に、GRB 190829A の上述の特異な観測結果を説明できるかどうか調べた。この Off-axis jet モデルによれば、相対論的ビーミング効果により、真正面から見た場合の即時放射のエネルギーよりも低い値が観測される。同時に、このモデルでは残光の明るさがピークになる時刻は波長に依存しないためどれも同じになると期待される。本発表では、ジェットを斜め方向から見た場合、GRB 190829A の上述の観測結果を説明できるかどうかを検証し、その結果を紹介する。GRB 190829A は開き角が異なる 2 つのジェットからなる二成分ジェットモデルを用いて、ジェットを斜めから見ると説明できることがわかった。即時放射と初期 X 線残光、可視残光はジェットのローレンツ因子が 350 でジェットの開口角が 0.015 rad と狭いジェットを斜め方向から見たと解釈できることがわかった。さらに、後期 X 線残光と電波残光を説明するために、ジェットの開口角が 0.1 rad と広いジェットが必要なことがわかった。

コン 18

相対論的爆風の磁気流体シミュレーション

草深 陽 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

我々は次元相対論的磁気流体数値計算コードを開発し、相対論的爆風のシミュレーションを行なっている。本研究ではガンマ線バースト (GRB) に代表される相対論的衝撃波の発展を追う。相対論的流体力学に於ける、点源爆発の自己相似解である Blandford McKee 解 (Blandford & McKee 1976, 以下 BM 解) との比較も行う。

GRB はエネルギーにして約 10^{53} erg のガンマ線を、数秒間で放出する宇宙最大の爆発現象である。ガンマ線の放射機構は、衝撃波で加速した高エネルギー電子によるシンクロトロン放射であると考えられている。エネルギー源は相対論的ジェットであり、星間物質 (ISM) を掃き集めるにつれ減速していく (この状態を爆風という)。この時 ISM を先進衝撃波が、ジェット内部を逆行衝撃波が伝播する。この 2 つの衝撃波から、数日間放射され続ける X 線から電波領域までの放射のことを GRB 残光と呼ぶ。

本研究では GRB 残光を想定したパラメータ設定のもと、先進衝撃波と逆行衝撃波の発展を次元球対称シミュレーションにより明らかにする。ISM 領域は磁場が弱いので、先進衝撃波は BM 解に類似している。一方ジェット領域は磁場が強いので、磁気圧などが逆行衝撃波の発展に影響を及ぼす。先進衝撃波の減速開始時に於ける逆行衝撃波の振る舞いが初期残光に影響を与えるので、磁場の値に応じた逆行衝撃波の発展の違いについて議論する。

コン 19

相対論的衝撃波による統計的粒子加速とその発展 西川 智隆 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物 理学専攻 M1)

ガンマ線バースト (gamma-ray burst; しばしば GRB と略される) は、宇宙のある一点から非常に強いガンマ線が短時間に降り注ぐ天体現象として 1970 年頃に発見された。しかし、この現象があまりにも短時間であることと、いつどの方向から発生するのかわからないという理由から、宇宙のどこで、どのように発生するのか、発見されて以来 30 年以上も謎のままであった。最近になり、GRB は宇宙のきわめて遠方で、莫大なエネルギー (おおよそ、太陽が解放出来るエネルギーの最大値) をごく短時間 (数十秒間) で放射する巨大な爆発現象であることが分かってきた。そして、この現象が極めて明るいことから、宇宙の最も遠方の天体 (即ち、宇宙の初期) を観測的に研究できる可能性が考えられ、こういったメリットからも GRB の正体について現在も研究が続けている。

観測されるガンマ線は加速された粒子を起源として放射されたものであると考えられており、様々な加速機構のモ

デルが提案されている。本発表では、GRB における粒子の加速機構のモデルの一つである、相対論的衝撃波による粒子加速（統計的粒子加速やフェルミ加速と呼ばれる）を仮定し、このときに粒子がどのようなエネルギーのスペクトルを持って放射されるのか考察し、実際に観測されるガンマ線のエネルギースペクトルを説明可能であるのか議論する。

コン 20

MAXI が観測した GRB の系統的解析

平松 裕貴 (青山学院大学 M1)

ガンマ線バースト (GRB) とは、数ミリ秒から数 100 秒の短時間に 10^{54} erg ものエネルギーをガンマ線として解放する宇宙最大の爆発現象である。MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) は現在まで 136 個の GRB を観測している。MAXI に搭載されているガススリットカメラ (GSC) は GRB を観測する装置の中では、約 10 keV 以下のエネルギー帯域の X 線 (軟 X 線領域) に感度をもつため、他衛星とは異なる帯域の GRB スペクトルを得ることができる。Serino et al., 2014 では、MAXI が観測した GRB は他衛星で観測された GRB より光度が暗く、スペクトルがソフトなものが多いと報告されている。これらの GRB が従来のものと同様の性質なのか、スペクトルフィッティングによってパラメータの比較を試みる。

本研究では MAXI で観測された 136 個の GRB のうち 70 個の GRB のデータをスペクトル解析した。スペクトルモデルには、GSC の観測エネルギー帯域と統計を考慮して、星間吸収モデルとベキ型関数モデルを掛け合わせたものを使用した。その結果、flux の分布のピークは 10^{-8} erg/cm²/s となり、他衛星の観測より小さい値となった。ベキは -1.5 から -2.0 程度にピークを持ち、10 keV 付近に E_{peak} を持つソフトな GRB (XRF) が観測されている可能性を示唆している。一方で flux とベキの相関を見てみると、暗くてベキが -0.5 程度のハードな GRB やそれより明るいベキが -3.0 程度とソフトな GRB などが存在することがわかった。GRB 即時放射の光度と E_{peak} に相関があることが知られており、Nava et al., 2012 での相関を仮定して、GSC で観測される flux とベキの関係をシミュレーションすると、高赤方偏移の明るい GRB が GSC で観測した場合では暗くてハードなスペクトルとなることが推定された。

本発表では、flux とベキ、 E_{peak} と距離の相関関係を中心に、MAXI が観測した GRB のスペクトル解析からわかったことを報告する。

コン 21

ガンマ線バーストの観測の現状と電子飛跡検出型コンプトンカメラ

田原 圭祐 (京都大学大学院理学研究科物理学。宇宙物理学専攻 M1)

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst : GRB) は半世紀前に Vela 衛星によって最初に発見された [1] 宇宙最大の爆発現象である。ミリ秒単位で激しく変動するこの現象は、エネルギーフラックスのピークを MeV 領域に持つことが経験的に知られている。GRB は放射の継続時間が比較的長い Long GRB と継続時間が短い Short GRB に分類される。Long GRB である GRB030329 の観測で得られたライトカーブと Ic 型超新星 SN1998bw のスペクトルとの類似性から [2]、Long GRB の起源は Ic 型超新星であると考えられている。一方で、Short GRB に関しては観測例が少ないために、その起源は謎となっている。また、GRB の放射機構は研究が進められているが完全な理解は得られていない。解明のためには放射領域や磁場の構造を理解するために、偏光観測が期待される。以上より、GRB の観測装置には、MeV 帯域の感度、偏光測定能力が備わっていることが望ましい。

それを可能にする検出器が我々が開発している電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) である。ETCC は、MeV ガンマ線の主反応であるコンプトン散乱事象を一意に再構成することから、MeV 領域に高い感度を持つ。さらに、SPRING-8 における実験から、偏光検出能力も示されている [3]。本講演では、将来的に ETCC によって観測が期待される GRB について述べる。

参考文献

- [1] R. W. Klebesadel et al., 1973, *Astrophys. J.*, 182:L85-L88
- [2] J. Hjorth et al., 2013, arXiv:astro-ph/0306347
- [3] S. Komura et al., 2017, *Astrophys. J.*, 839:41 (13pp)

コン 22

輻射輸送シミュレーションを用いた中性子星合体のパラメータ推定

野際 洸希 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻修士二年)

中性子星合体は、重元素の起源の有力な候補である。中性子星合体時には強い重力波が放射され、ショートガンマ線バースト (SGRB) と放射性崩壊 (主にベータ崩壊) による熱的放射 (kilonova) が起こると考えられている。[1] kilonova の観測量からは、中性子星合体から放出される物質の質量や速度、electron fraction など、重元素の起源を考える上で重要な物理量を推定できる。しかし、kilonova の輻射輸送シミュレーションにおいて、パラメータの組み合わせ

せはまばらなグリッドでしか与えることができない。そのため、観測データと輻射輸送シミュレーションを直接比較して、中性子星合体のパラメータを推定することは難しい。

そこで、我々は機械学習の手法を用いて輻射輸送シミュレーションの結果からデータを補間し、パラメータ推定する方法を考えた。まず、放出物質の質量、速度、electron fraction を変えて波長依存性を考慮した輻射輸送シミュレーションを行った。その結果をガウス過程を用いてパラメータの多次元空間で補間する手法を開発した。計算時間について、輻射輸送シミュレーションでは1モデルにつきおよそ2~3時間程度かかったのに対して、ガウス過程で推定する手法では0.001秒程度であり、計算時間の大幅な短縮に成功した。

本発表では、本手法の概要と GW170817 の bolometric light curve に対してパラメータ推定を適用した結果を紹介する。

1. B. D. Metzger, G. Martinez-Pinedo, S. Darbha et al., MNRAS, 406, 2650, 2010

コン 23

中性子星でのアクシオン-光子変換の電波信号 大澤 周平 (富山大学 M1)

QCD(量子色力学) アクシオンは 1977 年に Peccei と Quinn によって、QCD における強い CP 問題を解決するために初めて導入された。この QCD アクシオンは素粒子物理の標準模型では説明できない暗黒物質の良い候補となる。本講演では、中性子星を使ったアクシオン探索についての論文(参考文献 [1]) のレビューを行う。中性子星の磁気圏で光子が QCD アクシオンに効率的に変換されることが可能であることから、中性子星からの電波を観測することで QCD アクシオンのパラメータ空間を高い感度で探ることができる。QCD アクシオンが銀河の静止系で等方であることと中性子星の磁気圏の構造が Goldreich-Julian モデルであることを仮定して、初めて光線追跡アルゴリズムを用いた 3 次元光子フラックスの計算を行い、先行研究(参考文献 [2]) で現れていた中性子星からの信号の回転依存性が今回の仮定の元で消えてしまうことが明らかになった。最後に、将来実験の SKA でどれくらいの感度で観測可能かを議論する。

1. Mikaël Leroy, Marco Chianese, Thomas D. P. Edwards, and Christoph Weniger Phys. Rev. D 101, 123003, 2020.
2. Anson Hook, Yonatan Kahn, Benjamin R. Safdi, and Zhiqian Sun, Phys. Rev. Lett. 121, 241102, 2018.

コン 24

再帰型ニューラルネットワークを用いた高密度天体の X 線強度変動のパワー スペクトル推定 牧田 佳大 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

宇宙 X 線の観測データは、統計的なノイズや系統誤差、サンプリング時間の非一様性、データギャップなどが生じやすい。それゆえ、解析結果にエイリアス(偽物の特徴量)が現れやすい。近年、観測量は増え、人力でデータを一つ一つ見ることが困難になりつつあるが、天体近傍の強い重力や、磁場や非定常な降着流の理解に繋がる重要な観測量が眠っている可能性もある。そこで、本研究では、将来的に特徴量の自動抽出を目指し、まずはデータ欠損のある時系列データかつ、時間的に等間隔ではない場合でも活用できるように、時系列データから周波数空間のパワースペクトルの特徴量を予測することができる再帰型ニューラルネットワークを構築した。再帰型ニューラルネットワークとは、層間を一方向にしか流れない通常の順伝播型ニューラルネットワークとは異なり、時間の概念を取り込む事で、前の時刻の中間層の出力が次の時刻の中間層の入力へ再帰するような構造を持つ、系列データの扱いに特化したニューラルネットワークである。

機械学習において、実際の観測量を教師データとするには、X 線観測の時系列データは均質なものが少ないため、まずは、教師データとして、周波数空間で、べき関数型スペクトルかつ周波数ごとに位相はランダムを仮定した時系列データを作成し、作成した時系列データにガウスノイズとデータ欠損を付与することで、任意の数の擬似的な X 線の強度変動の時系列データを生成することにした。更に、擬似的なデータでの実証を踏まえて、アメリカの大面積 X 線望遠鏡 Neutronstar Interior Composition Explorer (NICER) で観測された白色矮星 SS Cygni の実データに学習したモデルを適用した。本講演では、ネットワークの概要と学習結果、実データへ適用した結果や今後の課題について紹介する。

コン 25

3 次元対流効果を取り入れた球対称 1 次元シミュレーション 佐々木 俊輔 (総研大/国立天文台 修士 2 年)

大質量星は進化の最終段階に、超新星爆発を引き起こす。その爆発のエネルギー源は自らの重力で爆縮し解放される莫大な重力エネルギーである。この 10 年で非常に研究が進んでいるが、これらの現象の機構はまだ完全に解明されていない(e.g., A. Burrows & D. Vartanyan 2020)。ニュートリノの輻射輸送や対流などの複雑な流体现象が爆発に本

質的な役割を果たしていると考えられ、研究の技術的難易度が非常に高いことが理由である。標準的な重力崩壊型の超新星爆発はニュートリノ加熱により起こると考えられている。この機構の解明を目指して詳細なシミュレーションを行う時、ニュートリノと物質の相互作用を三次元の多くの計算グリッドで計算するため、計算コストは莫大なものとなる。最近の研究では1モデルあたりの計算資源を減らすため球対称近似を取り入れ、3次元的な対流の効果を取り入れた1次元シミュレーションが開発されている (Müller 2019, Couch et al. 2020)。

我々の研究目標は超新星爆発の理論研究において最も重要である爆発を起こす親星の質量の決定である。また爆発のシステマティックな理解を深めることも目的とする。本研究では計算コストを抑えた超新星爆発の多次元的対流効果を取り入れた1次元シミュレーションを行った。その結果、拡散係数が超新星爆発の重要な物理量（爆発のエネルギー、ニッケルの生成量、爆発の親星依存性等）に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。拡散係数は超新星爆発のモデル計算においてこれまで重要視されていなかったパラメータである。今後、より正確な第一原理に基づく現象論的モデルの開発と爆発メカニズムのシステマティックな理解を進め、より現実的に爆発可能な親星の質量を決定する。今回は本研究の成果について最終的な研究目標との対応関係を中心に紹介し議論する。

コン 26

光度曲線の系統的調査に基づく重力崩壊型超新星の爆発機構への制限

齋藤 晟 (東北大学 理学研究科天文学専攻 D1)

初期質量が太陽の約8倍以上の大質量星はその一生の終わりに重力崩壊型超新星と呼ばれる大爆発を起こし、放射性崩壊元素 ^{56}Ni を合成する。これまで重力崩壊型超新星に関する様々な理論的・観測的研究がなされてきたが、その爆発のメカニズムは未だ詳しくは解明されていない。近年の第一原理計算では爆発の再現に成功している例が増えつつあり、それらの結果は爆発のタイムスケールが約1秒以上という遅い爆発を示唆している。しかし、このような遅い爆発では超新星爆発時に合成される典型的な ^{56}Ni の質量 ($\sim 0.07M_{\odot}$) を説明することができないことを指摘されている [1]。ただし、この研究では具体的な観測データとの比較はなされておらず、典型値から一般的な傾向を述べるにとどまっていた。

そこで我々は爆発のタイムスケールに制限をつけるために、観測されている超新星の ^{56}Ni の合成量に着目した。まず、爆発前に外層が剥がれた超新星 (stripped-envelope 超新星) を対象に、今までに取得された全ての撮像観測データ

を系統的に解析することで、これまでで最大の総輻射光度曲線サンプルを構築した。そして求めた総輻射光度曲線から、超新星爆発時に放出された物質の質量とその時に合成された ^{56}Ni の質量を見積もった。さらに流体計算・元素合成計算を行うことで、どのような親星の質量・爆発のタイムスケールが観測結果から得られた放出物の質量と ^{56}Ni の質量を再現するかを調べた。この計算結果と観測の結果を比較することによって、観測されている重力崩壊型超新星の ^{56}Ni の合成量を説明するためには爆発のタイムスケールが約0.3秒以内であることが必要だと分かった。[1]

1. Sawada & Maeda, ApJ, vol886, 47, 2019

コン 27

早期光度曲線から探る IIn 型超新星の放射機構 犬塚 慧子 (京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

質量が $8M_{\odot}$ を超える大質量星は、その最期に重力崩壊を起こし、超新星爆発を起こす。重力崩壊型超新星の一種である IIn 型超新星は、スペクトル中に狭い水素輝線が見られ、長期間に渡って通常の重力崩壊型超新星の10-100倍の光度を保ち続ける。これは、超新星の放出物と大量の星周物質 (CSM) の相互作用による特徴と考えられる。しかし、IIn 型超新星を説明する上で必要な CSM の密度は、通常の恒星進化理論で考えられるより高く、起源が未解明である。また、最大光度も様々な値を持つことも知られており、天体によって放出物の質量やエネルギー、CSM の密度が異なることを示している。この事実より、IIn 型超新星の構造を解明することは、恒星進化論の完成においても重要な役割を果たすと期待される。

Moriya&Maeda(2014) では、超新星の放出物の密度構造を仮定して、観測量 (増光時間とピーク光度) から物理量 (CSM 密度、超新星放出物のエネルギー・質量) を決定するモデルが提唱された。本研究では、仮定していた密度構造も含めた放出物・CSM の構造をより詳細に決定することを目指して、観測量として色温度の情報を付加することを試みた。我々の新たなモデルで、超新星放出物の密度勾配と、最大光度や増光時間に関係があることが示された。密度勾配が小さいと光度が大きいほど温度も高くなるが、勾配が大きいと光度が大きいものほど温度が低い結果となった。これは密度勾配が大きい時、光球が拡大する効果が無視できず、効率的に冷却されるためである。

現在、オープンコード SNEC を用いた一次元輻射流体シミュレーションを行い、モデルと実際に観測された IIn 型超新星の光度曲線との比較に取り組んでいる。本発表では、最新の研究成果を紹介するとともに、得られた結果について

て議論を行う。

コン 28

Ia 型超新星 2019ein のスペクトル合成計算

小川 真央 (京都大学 M1)

Ia 型超新星は、質量降着を受けた白色矮星 (WD) の熱核爆発によるものであると広く知られているが、爆発時の燃焼波面の伝わり方はまだ分かっていない。標準的なモデルには、燃焼波面が亜音速な熱伝導によって伝わる deflagration model と、燃焼波面が途中で亜音速から超音速に変わる delayed detonation model (DD model) の大きく 2 つがある。そしてこの燃焼波面の違いは、WD の爆発的要素合成後の元素分布の違いとなって現れ、Ia 型超新星のスペクトルに反映される。したがって、爆発後の親星の組成の理解のためには、スペクトルのモデル計算を行うことが重要となる。[1]

SN2019ein について、爆発後 2.2 日というかなり初期のスペクトルが報告されている。超新星は時間と共に膨張することから、爆発初期には最外層でスペクトルが形成される。これを調べることで親星の外側の構造を決定し、燃焼波面の伝わり方に制限を与えることができる。[2]

私たちは、1 次元モンテカルロ輻射輸送計算のコード“TARDIS”を用いて、このスペクトルのモデル計算を行い、爆発後の星の密度構造と元素分布を求めた。その結果、星の最外層は炭素の燃え残りで構成されており、Ca が星の表面付近まで多く存在することが分かった。また、最初期のスペクトルには Si と Ca の高速吸収成分 (High Velocity Feature) が見られたが、これは最外層においては超新星放出物質の密度勾配が緩やかになることによって、外側で吸収線を作りやすくなるからだと分かった。ほとんど外側まで炭素燃焼が起きていることから、この星は DD model で燃焼波が伝わったということを示唆している。一方で、炭素の燃え残りの層の中にも Si や Ca がわずかにではあるが含まれている点は、既存の DD model では説明できない。これは、爆発初期の deflagration 波による対流がかなり激しく起きていた可能性を示唆する。本講演では、SN2019ein のモデルの詳細や、Ia 型超新星の爆発モデルを制限するための今後の展望を議論する。

1. Iwamoto, K et al., ApJS, 125, 439, 1999

2. Kawabata, M et al., ApJ, 893, 143, 2020

コン 29

Ia-CSM 型超新星 SN2020uem の測光・分光・偏光分光観測に基づく CSM 構造

宇野 孔起 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

超新星はスペクトル中の水素輝線の有無で大別される。中でも水素輝線を持たず、Fe や Si などの中間質量元素の吸収線が顕著な超新星は Ia 型超新星と分類される。Ia 型超新星は近接連星系をなす白色矮星の熱核暴走反応により引き起こされる爆発である。

近年、Ia 型超新星のスペクトルに狭く強い水素輝線を付加したような特徴的なスペクトルを示す超新星、Ia-CSM 型超新星が報告されている。Ia-CSM 型超新星は狭い水素輝線の他にも、長期に渡り Ia 型超新星の 10 倍程度の明るさを保つという特徴を持つ。これらの特徴は、Ia 型超新星と高密度な星周物質 (CSM) の相互作用に由来すると考えられる。しかし、通常の Ia 型超新星を引き起こす系ではこれほど大量の CSM は予想されておらず、その起源は未解明である。加えて、観測例の少なさから Ia-CSM 型超新星の詳細な爆発メカニズムや CSM 構造などもわかっていない。

我々は 2020 年 9 月 22.6 日 (UT) に発見された Ia-CSM 型超新星 SN2020uem について、せいめい・かなた望遠鏡を用いた可視・近赤外の測光・分光観測を行った。2020uem の光度やスペクトル進化は典型的な Ia-CSM 型超新星と一致した。特に、水素輝線強度比から非常に高密度な CSM 構造が示唆される。さらに我々は、発見から約 100 日後にすばる望遠鏡 FOCAS による偏光分光観測を行った。その結果、2020uem は 1 – 1.5 % ほどの波長依存性のない強い偏光度を示すことが明らかとなった。波長依存性のない強い偏光度は、非球対称に分布する高密度な CSM 構造や超新星周囲のダストがほとんど存在しないことを示唆する。これらの観測結果を総合的に勘案した結果、2020uem の CSM は円盤状に分布している可能性が明らかとなった。

本公演では 2020uem と他の超新星の比較や、CSM 構造の詳細について議論する。

コン 30

r プロセス元素を合成する特異な超新星爆発の観測的特徴

長谷川 樹 (東北大学 修士 1 年)

近年、中性子星合体からの重力波 (GW170817) に付随し、電磁波対応天体 (キロノバ) が観測された。これにより、宇宙における r プロセス元素の起源として中性子星合体が有力となったが、銀河の化学進化を説明できない可能性も指摘されており、唯一の起源とは限らない。そこで別の候補として考えられるのが、大質量星の重力崩壊由来でも通常の超新星とは異なる爆発メカニズムをもつ場合である。特に注目されているシナリオは、高速の自転と強磁場をもつ親星による、磁気駆動型の爆発である。

我々は、特殊な重力崩壊型超新星において r プロセス元素

が生成された場合の電磁波放射に対する影響を調べた。まず 1 次元流体計算で超新星爆発の流体環境を計算し、その結果を用いて r プロセス元素を加味した輻射輸送計算を行った。この輻射輸送計算では、通常の超新星でも生成される ^{56}Ni と、r プロセス元素全体の質量を様々な値に変えて、組成の違いが光度曲線に与える影響を調べた。その結果、 ^{56}Ni の放射性崩壊で光る超新星においても十分な r プロセス元素が合成された場合、高い吸収係数の効果により、特に g バンドや r バンドなど、可視光の短い波長の放射が暗くなり、カラーが赤くなることがわかった。この結果を観測されている超新星のカラーと比較することで、超新星の r プロセス元素合成量が約 0.3 太陽質量以下であるという制限を得た。また、磁気駆動型の超新星のモデルで予想される ^{56}Ni の合成量が少ない超新星では、r プロセス由来の放射性崩壊が主要な熱源となる可能性もある。本講演では、そのような新しい超新星シナリオの観測的特徴についても議論する。

コン 31

中性子連星合体残骸からの核ガンマ線放射スペクトルを用いた合成重元素核の診断 大住 隼人 (秋季から 埼玉大学理工学研究科 M1 予定)

宇宙に存在する元素のうち ^{56}Fe より重い中性子捕獲元素の合成過程は主に s-process と r-process の 2 つがあり、特に後者は唯一 ^{209}Bi 以上の元素を合成できるとされている。この過程では、中性子過剰環境において中性子捕獲が β 崩壊よりも短いタイムスケールで起こることで急速に合成が進む。r-process の進行度は環境の中性子の割合によって変化し、電子分率が低い環境 ($Y_e < 0.25$) でより重い元素が合成される。その有力候補は、重力崩壊型超新星爆発 (SN) と中性子星合体 (NSM) の 2 つがあるが、前者は Y_e が低い環境が実現されにくいという理論予測もあり [1]、後者が有力視されている。しかし観測的には、NSM 重力波天体からの赤外線観測等の証拠はあるものの、未だ直接的な核合成の証拠はつかみきれていない。NSM で合成された元素が崩壊し放射された核ガンマ線は、NSM 残骸が爆発直後の光学的に厚い時期は観測されにくい、薄い時期に入ると観測が可能になる。

先行研究 [3] では r-process 元素崩壊シミュレーションが開発され、NSM や SN の残骸からの核ガンマ線放射が計算された。r-process で合成された重元素の総質量は $0.01M_\odot$ または $0.05M_\odot$ を仮定し、断熱膨張モデル [2] を使用している。崩壊には JENDLE/DDF-2015 の核データベースを用い、元素崩壊と核ガンマ線放射量を計算している。

本研究では、前述したシミュレーションで推定された核ガンマ線放射をもとに、その flux 比から残骸年齢・環境の診

断を行った。結果、NSM 環境で年齢推定ができる flux と、 Y_e の不明な残骸において各年齢ごとに Y_e 推定の基準となる flux を提示した。さらに未知残骸が NSM 的・SN 的であるかの推定のために、十分な感度を必要とするものの、新たな Y_e の診断法を提案した。本講演ではこれらの詳細について述べる。

1. Shinya Wanajo, Bernhard Müller, Hans-Thomas Janka, Alexander Heger. Apj 852,40, 2018.
2. C. FREIBURGHaus, J.-F. REMBGES, T. RAUSCHER, E. KOLBE, F.-K. THIELEMANN, K.-L. KRATZ, B. PFEIFFER, and J. J. COWAN. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 516:381-398, 1999.
3. 三輪祐也, 埼玉大学理工学研究科修士論文『中性子星-中性子星合体残骸からの r-process 元素崩壊による核ガンマ線の推定』, 2020

コン 32

キロノバのスペクトルで探る r-process 元素合成の痕跡 土本菜々恵 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

速い中性子捕獲元素合成 (r-process) の起源は未だ解明されておらず、その有力な候補が連星中性子星合体である。連星中性子星合体が起こると中性子星の一部が放出され、r-process で合成された原子核の放射性崩壊によって電磁波放射 (キロノバ) が引き起こされる。2017 年に連星中性子星合体からの重力波 (GW170817) とそれに伴うキロノバが観測され、確かに中性子星合体で r-process が起こっていることが確認された。しかし、唯一同定が報告されているストロンチウム [1] を除き、実際にどの元素がどれほど合成されたかは明らかになっていない。

我々はキロノバのスペクトルを用いた元素の同定に向け、中性子星合体の放出物質における現実的な元素組成を考慮した輻射輸送計算を行った。その結果、軽い元素が支配的な元素組成モデルにおいて、ストロンチウムの吸収線が確かに現れることを確認した。またこのモデルでは、同時に強いカルシウムの吸収線も現れた。これはカルシウムとストロンチウムが共に比較的電子割合の高い物質でよく合成され、それらの原子構造もよく似ているためである。これにより、ストロンチウムとカルシウムの吸収線を放出物質の物理状態のトレーサーとして使えることがわかった。結果を GW170817 のスペクトルと比較することで、これらの元素の質量割合比やエントロピーに制限をかけられることを示す。

一方、ラインの強さは放出物質内の元素組成分布と温度

に強く依存している。講演では他の元素組成と重元素の吸収線についても議論する。

1. Watson et al., Nature, 574, 497, 2019

コン 33

食を用いた IW And 型矮新星のアウトバースト機構の検証

柴田 真晃 (京都大学 M2)

矮新星は白色矮星（主星）と低質量星（伴星）からなる近接連星系であり、ロッシュローブを満たした伴星から輸送されたガスが主星の周囲に降着円盤を形成する。矮新星では準周期的に outburst が観測され、これは円盤が高温状態と低温状態を行き来する円盤不安定性モデルで説明されてきた。しかし、近年、中間的な明るさの状態（standstill）の後に減光せず outburst を起こす、矮新星としては特異な変動を示す天体が見つかっており、IW And 型矮新星と呼ばれている。現在この光度変動を説明するものとしては、伴星からの質量輸送率が急激に増加するモデル [1]、円盤の質量降着率が変化するモデル [2], [3] の 2 つが考えられている。円盤半径の時間変化を追うことでモデルの判別が可能となる。

我々は食を持つ IW And 型矮新星 AC Cancri の解析を行った。AC Cancri は Kepler 衛星の K2 mission により集中した観測がなされており、その期間の食の時間変化を調べた。食のモデル計算の結果、円盤半径は outburst の開始時に増加した後、減少することがわかった。これは円盤の質量降着率が変化するモデルを支持する結果である。また、本天体では primary eclipse だけでなく、secondary eclipse も観測されており、我々は secondary eclipse の解析手法を新たに開発し解析を行った。両者の結果を比較することで、円盤の高温領域の大きさを見積もることが可能となり、その結果 standstill で円盤外側に低温領域が存在することが示唆された。本講演では、上記の結果について報告し、IW And 型矮新星の理論モデルの検証を含めて議論する。

1. Hameury, J.-M., & Lasota, J.-P., A&A, 569, A48, 2014
2. Kato, T., PASJ, 71, 20, 2019
3. Kimura, M., et al., PASJ, 72, 22, 2020

コン 34

異常に長い軌道周期を持つ矮新星 ASASSN-19rx のアウトバーストメカニズム

伊藤 潤平 (京都大学 M1)

激変星は、白色矮星（主星）と低温星（伴星）から成る近接連星系で、Roche lobe を満たす伴星から流れ出したガスが主星の周りに降着円盤を形成している。特に降着円盤の熱的不安定性より準周期的な増光（アウトバースト）が起こる天体を矮新星と呼ぶ。多くの矮新星の軌道周期は 10 時間以下であるが、それより長い軌道周期を持つ矮新星も少数ながら存在することが知られている。このような系は伴星が準巨星に進化し Roche lobe を満たすことで質量輸送が起るとされる [1]。

長軌道周期矮新星のアウトバーストは、一般の矮新星のそれに比べ、1) 増光幅が小さい、2) 増光速度が遅い、3) 頻度が低い、4) 継続時間が長い、といった特徴が見られる。しかし、長軌道周期矮新星 GK Per のアウトバーストも一般的な矮新星と同様に円盤の不安定で説明できることが示された [2]。また、長軌道周期矮新星のアウトバーストの特徴は伴星が準巨星であること、降着円盤の半径が大きくなること等と関連している可能性が示されている [3]。しかし、このような系で降着円盤の半径と温度分布がアウトバーストを通じどう変化するか等は観測的には明らかではない。

ASASSN-19rx は長軌道周期矮新星の中で食を示す唯一の系である。我々は 2019 年 8 月のアウトバーストの測光結果に対し食を用いた降着円盤構造のモデリングを行う。精度の良いモデリングの為にせいめい望遠鏡の分光観測から得られた伴星のスペクトル型や視線速度等の情報を用いる。これによりアウトバースト中の降着円盤の半径と温度分布の時間変化を追ひ、それが一般的な矮新星とどう異なるか調べる。

本発表は始めに、Kimura et al.(2018)[3] のレビューを行い、長軌道周期矮新星に対する現在の理解を述べる。その後、ASASSN-19rx の現状の解析結果と今後の研究の指針を報告する。

1. Kalomeni et al., ApJ, 833, 83, 2016
2. Kim et al., ApJ, 384, 269, 1992
3. Kimura et al., PASJ, 70, 78, 2018

コン 35

矮新星における降着円盤の位相変化による周期変動解析

関 亮輔 (芝浦工業大学理工学研究科システム理工学専攻 M2)

矮新星とは白色矮星（主星）と低質量星（伴星）が、互いの共通重心を公転する近接連星系であり、準周期的な増光現象（アウトバースト）を繰り返す。矮新星ではロッシュローブを満たした伴星のガスが主星の周囲に輸送され降着円盤を

形成し、円盤の熱的不安定性によって増光現象が発生する。矮新星の明るさは主星での核融合反応によるものと、伴星からのガスが降着円盤に流入する点 (hot spot)、降着円盤からの放射によるものが観測される。これらの明るさは矮新星の公転運動によって周期的に変化する。

矮新星 V1504Cyg は Kepler によって 2009 年 6 月から約 3 年半の間可視光観測された天体であり、軌道周期とそれよりも数%短い negative superhumps という周期が確認されている。negative superhumps は円盤が傾斜している事で発生する現象と考えられている。また、他の矮新星で円盤が傾斜している事のもう一つの証拠として super-orbital signals が報告されており [1]、本研究では V1504Cyg の super-orbital signals の解析を目標としている。V1504Cyg の super-orbital signals の周期は約 3 日である事が計算から分かったが、直接その存在を確認できなかったため、光度曲線を軌道周期で folding する事で間接的に確認を行った。結果は降着円盤の位相変化と共に光度の最大値の位相が変化している様子を確認した。これは円盤が公転面から傾いて歳差運動している事から説明でき、super-orbital signals の存在の証明となる。

1. Kimura et al., 2020, PASJ, 72, 22

コン 36

V455 And 2007 Superoutburst の分光観測 反保 雄介 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

矮新星は、白色矮星 (主星) と低質量星 (伴星)、伴星から主星へと輸送されたガスによる降着円盤からなる近接連星系である。この系では、アウトバーストと呼ばれる増光現象が観測される。特に、質量比 (= 伴星質量 / 主星質量) の最も小さな矮新星は、WZ Sge 型矮新星と分類される [1]。WZ Sge 型矮新星アウトバーストの初期 10 日程度には、軌道周期とほぼ同一の周期を持つ光度変動 (early superhump) が観測される。

本講演では、2007 年に観測された V455 And の super-outburst の分光観測結果を報告する。本天体は、アウトバースト初期から終了後までにわたる密な分光観測が行われた。解析の際に必要な軌道周期などの連星系のパラメーターは、[2] によって求められたものを採用した。アウトバースト中のスペクトル進化と、測光観測から得られるアウトバーストの進行ステージを比較したところ、early superhump が消失するにつれ、バルマー輝線が single peak から double peak へと変化したことを確認した。これは、アウトバーストの進行とともに、降着円盤構造が変化したことに由来すると考えられる。さらに、アウトバースト初期のデータに Doppler tomography と呼ばれる手法を適用

し、降着円盤内の輝線強度マップを作成した。これを、多色測光観測から得た降着円盤の高度マップ [3] と比較すると、円盤内部で高度が盛り上がっている位相が、He II 4686Å の輝線強度が強い位相と一致することがわかった。これは、中心部からの放射によって降着円盤内の盛り上がった部分が増熱され、He II 輝線を放射しているからであると推察される。

1. Kato, T., PASJ, 67, 108, 2015
2. Araujo-Betancor, S., et al., A&A, 430, 629-642, 2005
3. Uemura, M., et al., PASJ, 64, 92, 2012

コン poster1

ラインフォース駆動型円盤風の輻射流体シミュレーション；超高速アウトフローの起源

植松 正揮 (筑波大学数理物質科学研究群物理学学位プログラム M1)

一部の活動銀河核で観測される青方遷移した鉄の吸収線は、光速の 10 % 程度の速度を持つ超高速アウトフロー (Ultra Fast Outflow; UFO) の存在を示唆する。UFO はおよそ半分のセイファート銀河で検出されることが報告されているが、その駆動機構は未だ不明である。UFO の起源として有力と考えられているのがラインフォースによって駆動される円盤風である。ラインフォースとは中間電離状態もしくは低電離状態にある金属元素に紫外線が照射される状況で効果的になり、円盤表面からのガスの噴出流である円盤風を生成する。これまでのラインフォース駆動型円盤風のシミュレーション研究では、典型的なブラックホール質量 (10^8 太陽質量) や放射効率 (0.5) でのみ実施された (Proga et al. 2000, Proga and Kallman 2004)。

しかし、本講演でレビューする Nomura et al. (2016) では、幅広いパラメータにおけるシミュレーションを行い、アウトフローの速度や電離度、柱密度を求めることで、ラインフォース駆動型円盤風の発生条件、さらには青方遷移した鉄の吸収線の検出確率を系統的に評価した。その結果、放射効率が 0.1-0.7、ブラックホール質量が $10^6 - 10^9$ 太陽質量の場合、UFO が検出されることが明らかになった。その際、UFO が検出される立体角 (観測確率) は 13-28 % であると見積もられた。これは X 線観測から示唆されている約 40 % (Tombesi et al. 2011) とおよそ一致する。質量流出率と運動エネルギー流出率も Tombesi et al. (2012) の観測結果と矛盾しないことが分かった。

コン poster2

ブレーザーによる高エネルギーニュートリノ放射

松井 理輝 (東北大学 理学研究科 天文学専攻 M1)

最高エネルギー宇宙線の起源の解明は、宇宙物理学における重要な課題の1つである。高エネルギーの宇宙線陽子は他の粒子との相互作用から高エネルギーのニュートリノを生成することが知られており、ニュートリノ観測がこの問題を解く手がかりである。南極の大型ニュートリノ検出器 IceCube によって、天体起源とされる sub-PeV エネルギーのニュートリノが、全天に渡って拡散的に検出されている。しかし、普遍的な起源天体を同定するには至っていない。

起源天体の候補にブレーザーと呼ばれるものがある。ブレーザーとは、電波で明るい AGN の一種で、相対論的ジェットが視線方向を向いた天体である。またブレーザーは、宇宙における主要な γ 線源であり、ジェットによる宇宙線加速の現場でもあると考えられている。これらの高エネルギー光子および陽子から、光中間子生成と呼ばれる反応でニュートリノが生成される。本公演では、そのようなプロセスを系統的に調べた論文 Murase *et al.* 2014[1] についてレビューを行う。この論文は拡散ニュートリノのスペクトルを計算することで、主に次のことを示した。(1) 簡単なブレーザーモデルでは、IceCube 観測の sub-PeV の強度を説明することは難しい。(2) ブレーザーから 0.1~1EeV の拡散ニュートリノが放射されることが予想され、これは次世代の検出器で観測可能なフラックスである。これらの理解に至る過程を議論する。

一方で、後の論文 [2,3] によって、1つのブレーザーがニュートリノ起源天体として同定された。このことからブレーザーは、より高エネルギー帯域ニュートリノの主な起源天体として有力視されている。私は、各天体ごとの EeV ニュートリノ観測可能性について、次世代検出器を想定した研究していく予定である。

1. K. Murase, Y. Inoue, C.D. Demer, Phys. Rev. D, 90, 023007, 2014
2. IceCube Collaboration et al., Science, 361, 147, 2018a
3. IceCube Collaboration et al., Science, 361, eaat1378, 2018b

コン poster3

一般相対論的多波長輻射輸送コード (RAIKOU) を用いて探る活動銀河核中心ブラックホールの周辺描像

人見 拓也 (筑波大学 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム M1)

活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) のブラックホール降着円盤は電波から γ 線まで幅広い放射をする。X 線は円盤最内縁付近の高温領域から発せられており、また電波では Event Horizon Telescope (EHT) によりブラックホールの事象の地平面スケールの撮像分解観測がされるようになってきた。一般相対論的多波長輻射輸送コード RAIKOU はブラックホール近傍において電波から X 線までの多波長を高精度に取り扱うことができる数値計算コードである。本講演では RAIKOU を解説した Kawashima *et al.* in prep. のレビューをする。[1]

光子が輻射輸送過程で受ける効果は、放射・吸収・散乱の3つである。ブラックホール近傍での主要な効果は制動放射/吸収、シンクロトロン放射/吸収、そしてコンプトン/逆コンプトン散乱である。RAIKOU は熱的/非熱的電子両方におけるこれらの素過程すべてを扱うことができる。また、光子の軌道を高精度に解くことで、擬似撮像観測が可能である。散乱の影響が無視できる電波帯の擬似観測イメージの作成にはレイトレーシング法を、無視できない X 線などの計算にはモンテカルロ法を用いる。[2]

本発表では、RAIKOU の信頼性を確かめるために Kawashima *et al.* in prep. で行われたテスト計算の結果を2つ紹介する。一つ目は、低温の熱的放射源で生成された光子が、周囲の高温プラズマによって逆コンプトン散乱されるテストである。その結果、Dolence *et al.* (2009) と同様の輻射スペクトルを得ることに成功した。二つ目は、放射非効率降着流 (RIAF) の電波帯の撮像イメージの計算である。その結果、EHT と同様のイメージが得られた。このコードを用いて、降着円盤とブラックホールスピンの回転軸が一致していない場合に Lense-thirring 効果で歳差運動する降着円盤のスペクトルを計算することで、ブラックホール天体の準周期的光度変化や非定常ジェットの起源を解明できる可能性がある。[3]

1. Authors1, journal1, vol1, pages1, year1
2. Authors2, journal2, vol2, pages2, year2
3. Authors3, journal3, vol3, pages3, year3

コン poster4

最内縁安定円軌道半径内部の応力がブラックホールスピンの推定に与える影響

大野 翔大 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム M1)

ブラックホール降着円盤では、ブラックホールの極近傍から X 線が放射されると考えられている。X 線スペクトル

から放射温度を推定し、円盤モデルと結びつけることでブラックホールの質量やスピンの見積もられている。降着円盤内を落下し、最内安定円軌道 (innermost stable circular orbit; ISCO) より内側に到達したガスは、安定した円軌道を維持できず、ブラックホールに向かって落下する。従来考えられてきた標準降着円盤モデル (Novikov & Thorne 1973)[1] では、ISCO 半径以下の領域で応力がゼロとしてきた。しかし、近年多くの一般相対論的磁気流体 (general relativistic magnetohydrodynamic; GRMHD) シミュレーションが実施され、ISCO 近傍やその内部に磁気応力が存在することが明らかになってきた。

Beckwith et al. (2008)[2] では、ISCO 以内での応力の存在がブラックホールのスピンの推定にどのような影響を与えるのかを調べた。本講演ではこの論文のレビューをする。この論文では、ブラックホール降着円盤の 3 次元 GRMHD シミュレーションの結果をもとに、ISCO 以内で応力及びエネルギー散逸のあるモデルを構築した。さらに、一般相対論的輻射輸送計算を実施し、放射温度を求めてスピンを測定し、ISCO 以内で応力のないモデルとの比較を行なった。その結果、ISCO 以内に応力のあるモデルの方がスピンの推定値が小さくなることが明らかになった。これは、応力のないモデルの放射エッジ半径 (その半径より外側で観測者に届く光の 95% が放射される) が ISCO 半径程度になるのに対し、応力のあるモデルでは放射エッジ半径が ISCO 半径より内側となり、放射温度が約 2 倍と高温になるからである。観測角度を変えてもこの結果は変わらない。この研究では比較的降着率の小さい低光度ブラックホール降着円盤を対象としていたが、高光度降着円盤を対象とする場合は輻射による加熱・冷却、輻射による力が無視できないため、一般相対論的輻射磁気流体シミュレーションが必要となる。

1. Novikov, I.D., Thorne, K.S., in Black Holes, eds. C. De Witt and B. De Witt (New York: Gordon & Breach), 343, 1973
2. Beckwith K., Hawley J. F., Krolik J. H., MNRAS, 390, 21, 2008b

コン poster5

高速電波バースト "Cosmic Comb" モデルの概観 金 滉基 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

高速電波バースト (Fast Radio Burst, FRB) は、～数 ms のごく短期間にエネルギーが $10^{37} \sim 10^{40}$ erg にも達する電波パルスが観測される現象である。2006 年の初検出 (Lorimer et al. 2007) 以降多数の観測があり、全天での観測頻度は $\sim 2500 \text{ day}^{-1}$ に及ぶ。また、その様相は多岐にわたる。FRB 121102 のようなリピーターがある一方、多

くは単発である。また数日間にわたる "残光" が見えるものや、ガンマ線バーストとほぼ同時に観測されたものもある。2020 年には近傍のマグネター SGR 1935+2154 から FRB 200428 が観測され、一部の FRB はマグネターに由来することが示されている (The CHIME/FRB Collaboration et al. 2020)。こうした特徴を説明するためにこれまで多数のモデルが提唱されてきた。しかし、いずれも観測でわかっている全ての特徴を説明できるものではない。

本講演では、現在も盛んに議論が行われているこの現象について、Zhang et al. 2017 [1] を中心に紹介する。この論文では、パルサー磁気圏に別の天体から放出されたプラズマ流が衝突し、磁気圏の磁場やプラズマが掃き集められ "comb" 構造を形成し、そこで磁気リコネクションによる粒子加速が起き FRB 放射が生じる、という状況を考えている。プラズマを放出する天体にさまざまなものを想定できるため、個々の観測に適用しやすい利点がある。プラズマ流とパルサー磁場のエネルギーを比較した結果、非相対論的な速度のプラズマ流でも十分 comb 構造を形成しうることが示された。これは、FRB の比較的高い観測頻度を説明できる。

このモデルで想定する磁気リコネクション加速による粒子の最大エネルギーを見積もると、 $\gamma \sim 10^6$ の高エネルギーとなった。このような粒子からの放射は電波以外の FRB カウンターパートになり得る。また、高エネルギー宇宙線の起源となる可能性もある。これらを今後の私の FRB 放射機構の研究に繋げていきたい。

1. Zhang, B. et al. 2017, ApJL, 836, L32Z

コン poster6

「すざく」衛星による低質量 X 線連星 EXO 0748–676 の dips/bursts の解析 中間 洋子 (東京工業大学 M1)

中性子星表面から放射される X 線のスペクトル解析により、中性子星を作る核物質の状態方程式に制限を与えることができる期待されている。そのため、X 線連星系に属している中性子星に着目してきた。本発表では X 線天文衛星「すざく」のアーカイブデータを利用した。X 線連星系 EXO 0748-676 のスペクトル解析結果について報告する。定常放射に関する解析は、すでに出版されているため [1]、本研究では、X 線バーストと dip を解析対象とした。「すざく」による EXO 0748-676 の観測は 2007 年 12 月 25 日から約 1 日間行われ、有効観測時間は 46 ksec、光度はやや暗い $a \text{ few } 10^{36} \text{ erg/sec}$ であった。このライトカーブに現れる dip 中のスペクトル解析及び 4 回観測された X 線バースト中の吸収線探索を行った。X 線連星系では伴星の物質が中性子星周りに降着円盤を形成し、時折 dip という現象を

引き起こす。Dip は降着円盤の外縁の分厚い部分により中性子星近傍からの X 線放射が、ある期間遮蔽・吸収される現象であり、降着円盤外側の構造や X 線放射領域の広がりに関する情報を含んでいる [2]。一方、X 線バーストは磁場が弱い中性子星表面に降着円盤の物質が降着した物質が突発的に引き起こす熱核反応の暴走現象であり、X 線で光度が桁違いに増加し、数十秒のタイムスケールで減少していく。[3]。X 線バーストに伴い、鉄などの重元素が生成されるため、それらの元素による吸収線の形成が期待されている。X 線バースト中の吸収線の見かけのエネルギーから重力赤方偏移がわかるため、中性子星の質量半径比、引いては状態方程式に制限が加えられると期待されている。

1. Zhang et al. ApJ, 823, 131, 2016
2. White, N.E. and Swank, J.H., ApJ, 253, L61, 1982
3. Woosley, SE and Taam, R.E., Nature, 263, 101, 1976

コン poster7

ブラックホール・中性子星連星合体におけるキロノヴァ/マクロノヴァ放射モデル 西浦 怜 (京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 天体核研究室 M1)

ブラックホール・中性子星連星 (BH-NS 連星) の合体は地上重力波検出器で観測できる重力波源の 1 つである [1]。さらに、BH-NS 連星の合体はショートガンマ線バーストやキロノヴァ/マクロノヴァなどの電磁波対応天体を伴うことが期待される。中でもキロノヴァ/マクロノヴァは数値相対論の結果を用いた輻射輸送シミュレーションなどにより研究されている [3]。このような理論的に導出された結果と観測結果を結びつけることにより、ブラックホールのスピンや BH-NS 連星の質量比などのパラメータに制限をつけることができる。しかし、輻射シミュレーションには多くの計算機資源が必要であるという問題がある。

本講演では、輻射輸送シミュレーションの結果を再現する準解析的モデルを作る [3] のレビューを行う。まず BH-NS 連星合体の放出物の質量、速度に対するフィッティング公式 [4] を改良する。さらに、放出物に異方性がある場合にキロノヴァ/マクロノヴァの光度曲線を求める準解析的なモデルを作り、フィッティング公式と組み合わせることにより、輻射輸送シミュレーションの結果を再現した [3]。BH-NS 連星の質量比など、様々なパラメーターごとに準解析的モデルと輻射輸送シミュレーションを比較した結果、各バンド帯において、放射光度 ~ 1 mag の誤差に収まった。このように、本研究で導出した準解析的モデルは輻射輸送シミュレーションの結果と良く一致し、観測の解釈に有用である。

参考文献

- [1] Abbott, R., et al. 2021, ApJ, 915, L5
- [2] Tanaka, M., et al. 2014, ApJ, 780, 31
- [3] Kawaguchi, K., et al. 2016, ApJ, 825, 52
- [4] Foucart, F. 2012, Phys. Rev. D, 86, 124007

コン poster8

Blandford-Znajek 機構によるブラックホールの回転エネルギーの抽出 原良 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

活動銀河核 (AGN) では、中心付近のコンパクトな領域から銀河全体やそれ以上に匹敵する高エネルギーの放射が観測されている。AGN の中には、ジェットと呼ばれる構造が見られるものもある。ジェットは光速近くまで加速され、Mpc スケールまで伸びていることもある。ジェットのエネルギー源は、銀河中心に存在する超巨大ブラックホールであると考えられている。しかし、ジェットがどのようなメカニズムで光速近くまで加速されるのか、どのようにして Mpc スケールに渡ってジェットの絞られた構造が維持されているのか、など未解決問題も多く残されている。

ジェットの駆動機構の候補の一つとして、Blandford-Znajek 機構が考案されている。これは、定常的に回転している Kerr ブラックホールの回転エネルギーを電磁場を用いて引き抜くというメカニズムで、R.D.Blandford と R.L.Znajek により提唱された。

この講演では、[1] の文献を中心に、BZ 機構について紹介する。

1. R. D. Blandford and R. L. Znajek. Mon. Not. R. astr. Soc. 179, 433-456. (1977)
2. A. Tchekhovskoy. ASSL, volume 414. chapter 3. (2015)
3. R. Blandford, D. Meier, and A. Readhead. ARAA. 57: 467-509. (2019)

コン poster9

初期宇宙の超巨大ブラックホール形成～hyper-Eddington 降着率の実現性～ 鈴木 智也 (京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻天体核研究室 M1)

本講演では [1] のレビューを行う。

初期宇宙 ($z \geq 6$) には質量 $10^9 M_\odot$ 以上の超巨大ブラックホール (SMBH) の存在が数十例確認されている。その形成過程には様々な説があり、有力な説の一つとして $10^2 M_\odot - 10^4 M_\odot$ の種ブラックホール (BH) に質量を急速に降着させ、成長させるというシナリオが提案されている。

通常の球対称降着では、輻射の効果により降着率には上限が存在する (Eddington 降着率 $= \dot{M}_{\text{Edd}}$) ため、降着率を大きくするのは簡単ではない。非球対称の場合も同様で、例えば、[2] では中心星からの輻射の効果を入れた 2D シミュレーションを行っているが、このときの質量降着は降着期と非降着期が交互に現れるような描像になっており、その平均降着率は $\dot{M}_{\text{Edd}}$ 程度に抑えられている。

[1] では [3] に従い、電子散乱によって輻射がガスに捉えられる効果 (photon trapping) を加えて 1D 球対称シミュレーションを行うことで、降着率が $5000\dot{M}_{\text{Edd}}$ を超えるような安定な解 (hyper-Eddington 降着) を発見している。このとき、中心コアでは photon trapping によって輻射が中心星に落下しているため、外側エンベロープでは輻射圧を無視でき、降着率は輻射加熱によるガス圧と重力の比較によって決まる。実際、この解が実現する条件は、ガス圧の効果を無視できる領域の半径 (Bondi 半径) が、ガス圧の効果が重要になる HII 領域の半径よりも大きくなることとして説明されている。

[1] では更に、この解を初期宇宙における種 BH に適用し、初期質量に依らず最大 $10^5 M_{\odot}$ 程度まで成長させられることが示されている。これ以降は $\dot{M}_{\text{Edd}}$ を下回る降着であっても $10^9 M_{\odot}$ 程度の SMBH を $z \geq 6$ に作ることができ、観測された SMBH の形成が説明できる。

1. Inayoshi K., Haiman Z., and Ostriker J. P., MNRAS, 459, 3738, 2016
2. Park K. and Ricotti M., ApJ, 739, 2, 2011
3. Begelman M. C., MNRAS, 187, 237, 1979

コン poster10

種 BH への降着における輻射フィードバックの影響

藤村 大夢 (東北大学 天文学専攻 M1)

EHT の観測により、M87 の中心にあるブラックホールが観測された。このような銀河中心に位置しているブラックホールは超大質量ブラックホールと呼ばれ、およそ $10^6 M_{\odot}$ 以上の質量を持つことが知られている。超大質量ブラックホールは赤方偏移 $z \sim 7$ の初期宇宙に存在していることが分かっている。この観測事実から、初期宇宙において巨大天体を急速に形成するプロセスが求められている。恒星質量程度のブラックホール (種ブラックホール) から超大質量ブラックホールに成長するというシナリオがある。この場合、観測事実を満たすために輻射圧と重力の比から求まるエディントン限界降着率程度で常に成長し続けることが要請されるが、エディントン降着率で常に成長するのは現実的な環境では困難である可能性があり、さらに輻射による加

熱などの影響でエディントン降着率よりもっと低い降着率まで抑制される可能性もある。種 BH から超大質量ブラックホールにどのように成長したかは未だ分かっていない。

Milosavljevic et al(2009) では、輻射の影響を考慮してブラックホールへの降着流の構造について調べた。その結果、輻射による加熱及び輻射圧の影響で降着率がエディントン降着率よりもっと低い降着率まで低下するという結果を得た。ここでは、Milosavljevic et al(2009) のレビューを行い、種ブラックホールへの降着における輻射フィードバックの影響を議論する。

1. Milosavljevic M, Bromm V, Couch S., 2009, ApJ, 698, 766