

ファラデーモグラフィを用いた AGN ジェットの偏波解析

阿部 裕人 (熊本大学 修士1年)

磁場は我々の身近な範囲のみならず、惑星や恒星、銀河、銀河団といった宇宙の様々な天体に普遍的に存在している。宇宙において磁場はガスの運動などの現象と密接に関係しており、宇宙進化の過程を紐解く上で重要な手がかりとなる。天体から放射されるシンクロトロン放射と、磁場中で偏波面が回転するファラデー回転の寄与を利用して、それぞれ視線に垂直な磁場成分と平行な磁場成分を得ることができる。しかし、得られた磁場成分は偏波源までの積分値に過ぎない。そこで三次元的な構造を捉えるための方法としてファラデーモグラフィという手法が用いられている。これは、観測量である偏波強度を逆フーリエ変換して、ファラデー深度空間における偏波強度分布 (FDF) を求めるものである。ファラデー深度とは、視線方向の磁場と熱的電子密度の積を視線方向に積分したものであるため、その関数である FDF は三次元的な情報を持っている。[1]

本研究では、楕円銀河 IC4296 の AGN ジェットの偏波解析を行なった。この天体は非常に明るく、赤方偏移 $z=0.01$ に存在している。[2] ジェットは天体に降着するガスの一部が細く絞られて噴出される現象であり磁場が密接に関係しているため、磁場構造を探ることがジェットの放射機構の解明につながると期待される。本研究では ASKAP の観測データ (800-1086MHz 帯) を使用した。ファラデーモグラフィの手法である RM CLEAN と QU-fit を用いて FDF を求め、ジェットの磁場構造に関する考察を行った。

1. Takahashi, K, PASJ, 75, Issue Supplement_1, S50, 2023
2. J.J.Condon et al, ApJ, 917, 18, 2021

磁場優勢な相対論的ジェットにおけるケルビン・ヘルムホルツ不安定性と粒子加速

一ノ瀬 愉斗 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

活動銀河核やガンマ線バースト、X 線連星などでは、相対論的な速度で噴出するジェットが観測されている。ジェットは超高エネルギー宇宙線の加速源の候補として考えられているが、その加速過程は未だ分かっていない。宇宙線の加速過程の 1 つとして、乱流による加速過程が提案されている。乱流を起こす候補としてケルビン・ヘルムホルツ (KH) 不安定性が挙げられる。KH 不安定性とは、相対運動する 2 つの流体の境界で発生する流体力学的不安定性で、ジェットとその周辺媒質 (ここでは円盤風) の境界面で起こり得る。しかし、磁場の強いジェットと磁場の弱い円盤風の境界において、KH 不安定が成長する条件や励起した乱流による粒子加速過程については未だよく分かっていない。

そこで本講演では、相対論的な強磁場ジェットと円盤風

の境界での KH 不安定の線形解析を行った、Chow et al. 2022[1] のレビューを行う。この論文では、KH 不安定性の成長条件と成長率を調べた。その結果、磁力線と摂動の波数ベクトルが平行または反平行のとき、磁気張力によって安定化してしまうことが分かった。不安定になるのは、 $1 < M < \sqrt{(1 + \Gamma_w^2) / [1 + (v_A/c)^2 \Gamma_w^2]}$ (ここで M はアルヴェーンマッハ数、 Γ_w は円盤風の断熱指数、 v_A はアルヴェーン速度である) のときに限られる。磁力線と波数ベクトルが垂直に近づくにつれて不安定条件を満たすパラメータ範囲が広がる。これは、磁気張力が効くような磁場優勢ジェットの境界面では、いつでも乱流による粒子加速が期待できるわけではないことを示唆する。実際に乱流が駆動し維持されるかどうかは非線形段階まで考慮する必要がある。

私はこの論文の結果を踏まえて、非線形段階の発展まで調べるために、2次元相対論的磁気流体シミュレーションを行っている。講演ではその結果を紹介するとともに、シミュレーション結果に基づいた乱流場による粒子加速シミュレーションについての展望を述べる。

1. Anthony Chow, Jordy Davelaar, Michael E. Rowan, & Lorenzo Sironi, arXiv e-prints, arXiv:2209.13699, 2022

超新星爆発におけるニュートリノ核子散乱の影響 伊藤 侃 (早稲田大学 M2)

太陽の約 8 倍以上の質量をもつ天体は、進化過程の最後に重力崩壊型超新星爆発 (Core-Collapse Supernovae, CCSN) を起こすことによって、中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体を形成する。

CCSN が起きる際、ミクロな物理とマクロな物理の両方のスケールでの物理を考慮する必要があり、シミュレーションによる再現が困難であるため、そのメカニズムの詳細は明らかになっていない。

CCSN はコアの重力崩壊により衝撃波が生成されるが、超新星内部で停滞する。それをニュートリノがエネルギーを輸送し、物質と相互作用することにより、衝撃波を復活し CCSN が起こる。そのため、ニュートリノの影響をより現実に近い形でシミュレーションに取り組むことが CCSN のメカニズムの詳細を解明することに直結する。その中で本研究においてはニュートリノ核子散乱に対して注目する。この反応は、これまでの研究においては等エネルギー散乱として扱われてきた [1,3] が、実際にはエネルギーのやり取りがあり、それを組み込む [2,4,5]。そのためには、ニュートリノ輻射輸送を記述する式であるボルツマン方程式を解く必要があるが、計算コストの観点から解像度を上げることが困難である。そのため計算コストを大幅に増やすことなく、影響を組み込む方法に関して検討した結果について報告・議論を行う。

1. K.Sumiyoshi and S.Yamada, ApJS, 199, 17, 2012
2. Chinami Kato et al, ApJ, 897, 43, 2020

3. Bruenn S. W., ApJ, 58, 771B, 1985
4. K.Sugiura et al, PTEP, 2022, 113E01, 2022
5. C. J. Horowitz, Phys. Rev. D, 65, 043001, 2002

光度曲線に基づく Ic 型超新星の CSM 構造の推定 井上 裕介 (京都大学 M1)

超新星は典型的に、超新星爆発の放出物 (ejecta) の速度の数万 km/s に対応する幅の広い輝線を持つが、数百 km/s の幅の狭い輝線を示すものもある。この幅の狭い輝線は、ejecta と大量の星周物質 (CSM) の相互作用による特徴と考えられている。CSM の起源として、親星の最期の質量放出による単独星シナリオと、親星の伴星に外層を剥ぎ取られる連星シナリオの二つの有力なシナリオがあるが、CSM との対応やシナリオ自体の詳細は未解明である。

Ibn 型、Icn 型超新星は幅の狭い輝線を持つ。これらの超新星は典型的に、親星の近くに濃い CSM を持つ単純な密度構造であり、単一の 冪乗則 $\rho \propto r^{-3}$ で表せるものもある [1]。このような CSM 分布に対応して、Ibn 型と Icn 型は急峻な光度曲線を示す。一方で、CSM に由来すると思われる、緩やかな光度曲線を示す超新星が見ついている。この超新星は、CSM を持つ Ic 型超新星 (水素とヘリウムが欠乏した典型的な超新星) と考えられている [2]。緩やかな光度曲線は、親星の近くで薄く、遠くで濃いような CSM 構造に対応すると考えられているが、その詳細な構造は不明である。このような複雑な CSM 構造は、未解明の質量放出現象で説明できる可能性がある。そのため、CSM 構造を詳しく調べることは、CSM の起源、大質量星の質量放出現象の解明、ひいては恒星進化論の完成に迫る上で重要である。

そこで本研究では、CSM の構造を流体計算により決定することを試みる。現在、爆発直後の CSM と ejecta の構造を初期条件として与える、数値流体計算コード SNEC を用いた一次元球対称系の流体シミュレーションを行なっている。また、その結果をもとに光度曲線の計算を行い、観測結果と比較して CSM 構造の解明に取り組んでいる。本公演では、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議論する。

1. Maeda, K., & Moriya, T. J., ApJ, 927, 25, 2022
2. H. Kuncarayakti et al., ApJ, 941, 32, 2022

機械学習を用いた輻射流体力学計算コードの高速化について 上野 航介 (筑波大学 宇宙物理理論研究室 M1)

ブラックホールや中性子星のようなコンパクト天体の周囲に角運動量を持つガスが落下 (降着) すると、円盤状の降着流 (降着円盤) が形成される。降着円盤内部やその周囲では強力な輻射場が形成されるため、降着流の時間進化を調査するには、輻射場と流体場の相互作用を自己矛盾なく解く輻射流体力学計算が必要である。

コンパクト天体周囲の降着流の輻射流体力学計算を実施した先行研究では、その多くが M1 closure 法を用いていた (e.g. [1])。M1 closure 法とは、輻射輸送方程式を直接解かず、そのモーメント式を解く手法である。具体的には、モーメント式を閉じるために必要なエディントンテンソルを 0 次と 1 次の輻射モーメント量から近似的に求めている。しかし、M1 法では非等方な輻射場を正確に解くことができない。エディントンテンソルを輻射強度から求める Variable Eddington Tensor (VET) 法 [2] や、輻射輸送方程式を直接解く輻射輸送直接法 [3] では、M1 closure 法よりも正確な輻射場を得ることができるが、計算量が多いという難点がある。

そこで本研究では、機械学習を用いて正確且つ高速に輻射場を計算する手法を開発する。そのための第一歩として、エディントンテンソルを機械学習によって推定することができるかを調査した。具体的には、VET 法や輻射輸送直接法に基づき構築した輻射流体力学モデル (輻射エネルギー密度、輻射流束、ガス密度、ガス圧、四元速度) を説明変数に設定し、エディントンテンソルを目的変数とした教師あり学習を行った。得られた学習モデルを用いた結果、M1 法では解くことができない二次元の輻射が交差する問題に対し、エディントンテンソルを高い精度で推定することができた。講演では、学習モデルから得られる輻射流体変数の時間発展についても議論する。

1. Takahashi, H. R., Mineshige, S., & Ohsuga, K. 2018, ApJ, 853, 45
2. Asahina, Y., Takahashi, H. R., & Ohsuga, K. 2020, ApJ, 901, 96
3. Ohsuga, K., & Takahashi, H. R. 2016, ApJ, 818, 162

ブラックホール候補天体 Swift J1842.5 - 1124 の X 線データの系統的解析 岡田 裕太 (京都大学 宇宙物理学教室 M1)

X 線連星とは、ブラックホールまたは中性子星を主星とする連星系であり、伴星からの質量降着によって X 線で明るく輝く。その多くは突発天体であり、X 線新星として発見される。コンパクト星を同定することは、連星の起源や X 線放射機構を理解する上で重要である。ブラックホールと中性子星の違いの一つは質量であり、中性子星には太陽質量の 2.5 倍ほどの質量限界が存在する。

本研究では、2008 年に Swift 衛星によって発見された X 線新星 Swift J1842.5-1124 [1] の X 線データを系統的に解析した結果を報告する。Swift J1842.5-1124 は 2020 年にもアウトバーストをおこし、Swift や NICER による観測が行なわれた。2008 年に RXTE 衛星によって観測された X 線スペクトルと時間変動の性質から、主星はブラックホールであると示唆されているが [2]、その質量やスピンについては制限がっていない。

ブラックホール X 線連星には、標準円盤からの黒体放射成分が支配的な「ソフト状態」と、コロナからのコンプトン散乱成

分が支配的な「ハード状態」が存在する。本研究では、ソフト状態での円盤内縁半径がブラックホールの最内安定円軌道に一致するという仮定と、アウトバースト中のソフト状態からハード状態への状態遷移光度がブラックホール質量に比例するという経験則 [3] から、ブラックホールの質量を、距離の関数として推定した。その結果、主星の質量は太陽質量の 2.5 倍を越えており、ブラックホールである可能性が高いと分かった。

1. Markwardt C. B., et al., 2008, The Astronomer's Telegram, 1716, 1
2. Zhang, X. et al., MNRAS, Vol 510, Issue 1, 1258-1263, 2022
3. Vahdat Motlagh, A. et al., MNRAS, Vol 485, Issue 2, 2744-2758, 2019

Tomoe Gozen 高頻度サーベイデータに基づく銀河系外 Fast Optical Transient の発生率への制限 押切 翔 (東北大学大学院理学研究科天文学専攻 M2)

可視光突発天体のうち、明るさの変動が数日スケールである rapid transient と呼ばれる天体が近年、発見されるようになってきた。これは、広視野カメラにより高頻度での突発天体探査が可能になったことが大きな要因の一つである。しかし、変動の時間スケールが更に短い、数時間程度での変動を示す突発天体 (Fast Optical Transient, FOT) は観測難易度の高さもあり、ほとんど発見されていない。

そこで、我々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 Tomoe 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 FOT の探査を行った。このサーベイでは、約 3000 平方度の領域を一晩あたり 4 回程度、1 時間程の間隔で観測しており、数時間で変動する天体を検出することが可能である。約 3 年に及ぶ Tomoe Gozen の観測データの中から、検出期間が 5 日以内の突発天体を探し出し、113 天体の FOT 候補を選出した。これらを Pan-STARRS1 や ZTF など他のサーベイデータも合わせて光度曲線の比較を行い分類した結果、多くが、銀河系内の矮新星と考えるのが妥当であることが分かった。そして、銀河系外 FOT に対して、タイムスケールごとに発生率の上限値を定めた結果、絶対等級が -26 等級より明るい天体に対して、例えば、4 時間のタイムスケールで $3.0 \times 10^{-9} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ という制限が得られ、数日以下のタイムスケールで、他のサーベイよりも厳しい制限を設けることが分かった。

ガンマ線バーストの残光と超新星の間の相関 川口 健三郎 (東京大学理学系研究科 修士課程一年)

ガンマ線バースト (GRB) は数十ミリ秒から数百秒という短時間、ガンマ線が爆発的に放射される現象である。発光時間の長い Long-GRB は通常、Ib/c 型超新星 (SN) と関連付けられ、

これらを GRB-SNe と呼ぶ。与えられた GRB に関連付けられた SN は、低赤方偏移でのみ観測されるため、高赤方偏移では観測できない暗い GRB を考慮する際には、選択バイアスが存在する可能性がある。したがって、観測バイアスと、赤方偏移による補正を施した後に、GRB と SN のパラメータ間の関係を探ることが重要である。

これまで、GRB の即時放射のみが SN Ib/c と比較され、残光は考慮されていなかった。本研究 [1] では、GRB の即時放射と残光、および関連する SN の特性間の関係の存在を調べた。本発表では、選択バイアスと赤方偏移の補正前後の SN と GRB の観測可能量の 2 次元相関を 91 個調査したことで得られた、新たな相関のヒントについて説明する。

この相関は、GRB の可視光残光のプラトーフーズ終了時の輝度と、SN のレストフレームにおけるピーク時間との間のものである。この関係によれば、最も明るい可視光プラトーフーズは、最大のピーク時間と共に現れるということになる。この相関は選択バイアスと赤方偏移進化に対して補正されており、GRB-SNe の関連に関連する天体物理学モデルに新たな制約を提供する可能性がある。

1. Dainotti, M. G., et al. "The Quest for New Correlations in the Realm of the Gamma-Ray Burst—Supernova Connection." *The Astrophysical Journal* 938.1 (2022): 41.

対不安定型超新星の質量上限と $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 応答性 川下 大響 (東京大学 総合文化研究科 M2)

対不安定型超新星 (Pair-instability supernova: PISN) とは Very massive star と呼ばれる質量レンジ ($200M_{\odot}$ 前後) の一部の恒星の最期の姿である。PISN は Ia 型超新星と同じ熱核反応型超新星で、残骸を残さないため、ブラックホールの mass function には $50 - 130M_{\odot}$ に Pair-instability mass gap (PI mass gap) と呼ばれる間隙をもたらすことが予言されている。しかし、GW190521^{[1][2][3]} をはじめ、近年の重力波観測によってこの mass gap 範囲内に存在している可能性があるブラックホールの存在が続々と確認されている^{[4][5]}。

PISN を起こす下限質量に $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 反応率が応答することが明らかになったため^{[6][7][8]}、下限質量まわりについての研究は盛んにおこなわれ、よく理解が進んでいる^{[6][7][8][9]}。しかし、上限質量側の応答性については、PISN そのものの上限質量についての理解が不足しており、検討が十分にされていない。

本研究では、PISN を起こす質量上限の $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$ 応答性について検討した。その結果、反応率に依存する炭素燃焼プロセスの多寡に星の implosion の最大進行度が応答していることが明らかになった。また、PISN の質量上限付近では ^4He の光分解の進行に伴って爆発の成否が切り替わっている可能性が示

唆された。

1. R. Abbott *et al.*, Phys. Rev. Lett. **125** 101102, 2020
2. R. Abbott *et al.*, ApJL **900** L13, 2020
3. H. Estellés *et al.*, ApJ **924** 79, 2022
4. R. Abbott *et al.*, Phys. Rev. X **11** 021053, 2021
5. R. Abbott *et al.*, Phys. Rev. X **13** 011048, 2021
6. K. Takahashi, ApJ, **863** 153, year3
7. R. Farmer *et al.*, ApJ **887** 53, 2019
8. R. Farmer *et al.*, ApJL **902** L36, 2020
9. G. Costa *et al.*, MNRAS **902** 501, 4514

キロノバ光度曲線の多次元シミュレーション 北村 文里 (東北大学理学研究科天文学専攻 M1)

鉄より重い重元素は、rプロセス(速い中性子捕獲反応)で合成されると考えられている。しかし、それがどのような天体で起こるのかは明らかになっていない。現在最も有力な候補天体の一つが中性子星合体である。中性子星合体では、合体時に合成されたrプロセス元素の放射性崩壊によって電磁波放射(キロノバ)が生じると考えられており、中性子星合体における重元素合成を検証するためにはキロノバの観測が非常に重要である。キロノバの光度曲線はejectaの質量や速度、重元素の吸収によるopacityといった特徴に依存する。よって、キロノバの光度曲線を調べることで、中性子星合体の質量放出メカニズムやrプロセス元素合成の情報を引き出すことができる。

近年、現実的な中性子星合体のシミュレーションに基づく、キロノバの詳細な多次元シミュレーションが行われている。例えばKawaguchi *et al.*(2022)[1]では、長時間の流体力学シミュレーションによって得られたejectaの構造を用いて、正確な原子データに基づく詳細な輻射輸送シミュレーションが行われた。

このようなシミュレーションは現実的なモデルに基づく一方、その複雑さから、多くのシミュレーションを行うことは難しい。実際に、観測された光度曲線の解析には適当な吸収係数を仮定したシンプルなモデルが用いられる。重力波検出と連携して即時的にデータの解釈ができるようにするためには、詳細なシミュレーションによる現実的な解釈と、シンプルなモデルによる解釈の橋渡しが必要である。

本講演では、キロノバの多次元シミュレーションの先行研究を紹介し、シンプルなモデルで現実的な計算をどのように解釈できるかを議論する。

1. Kawaguchi *et al.*, ApJ, 913, 100, 2021
2. Kawaguchi *et al.*, ApJ, 865, L21, 2018

ブラックホール磁気圏強電場領域由来ガンマ線放射の理論的研究

金 滉基 (東北大学 博士課程1年)

宇宙におけるさまざまな高エネルギー放射現象や宇宙線の生成には、多くの場合、ブラックホール(BH)付近からの相対論的速度の噴出流(ジェット)が関与する。その駆動機構の有力なモデルの一つは、ガス降着に伴う磁束輸送により、BH上空に磁気圏と呼ばれる電磁場エネルギー優勢領域が形成され、磁場が関与したBH回転エネルギーの引き抜きが行われる、というものである(Blandford & Znajek 1977[1])。しかし、磁気圏内部からの電磁波放射が未検出であるため、この理論モデルの観測的検証は進んでいない。磁気圏プラズマ由来電磁波放射を直接検出することができれば、理論的予想との比較から磁気圏の物理量に制限を与え、ジェット駆動機構を解明する重要な手がかりとなる。

近年の研究により、磁気圏では局所的な強電場加速が起き、非熱的粒子による明るいガンマ線放射が見られる可能性が示された(Chen & Yuan 2020[2]; Kisaka *et al.* 2020[3]; 2022[4])。そこで本研究では、一般相対論的プラズマ粒子シミュレーションを用いて、BH磁気圏プラズマの挙動や電磁波放射の可能性を調べた。その結果、磁気圏に広がるプラズマの密度がある程度希薄な状況では、磁気圏に準周期的に振動する強電場領域が生じ、電場によって加速された非熱的粒子からのGeV-TeVエネルギー帯域のガンマ線放射が卓越することがわかった。講演では、現実のBH天体で想定される状況との対応や、検出可能性についても議論する。

1. Blandford, R. D. & Znajek, R. L. 1977, MNRAS, 179, 433
2. Chen, A. Y., & Yuan, Y. 2020, ApJ, 895, 121
3. Kisaka, S., Levinson, A., & Toma, K. 2020, ApJ, 902, 80
4. Kisaka, S., Levinson, A., Toma, K., & Niv, I. 2022, ApJ, 924, 283

タイトル

屈 楚舒 (東京大学 M2)

マグネターは極端な強磁場(10^{12} G から 10^{15} G)をもつ中性子星で、その強磁場によって多種多様な高エネルギー現象を引き起こしている。新しいマグネターも年に約1個のペースで発見されており、観測データによるマグネターの研究は活性化している。[1]

データ解析により一部マグネターの10 keV以下の定常X線放射のスペクトルには温度 $O(0.1)$ keV、半径 $O(1)$ kmの低温成分と、温度 $O(1)$ keV、半径 $O(0.1)$ kmの高温成分が存在することが明らかになっており、高温成分はマグネター表面磁場の活動によるホットスポットからの黒体放射だと考えられている。一方、中性子星表面からの放射は星自身の一般相対論効果により光線が回り込み裏側からの放射も観測できることが知られている(light bending)。[2] 本研究では、観測データから得

られるマグネターのパルス波形とスペクトル解析、またその両方から得られるホットスポットパラメータを、light bending を取り入れたモデルに基づいて計算し、両者が無矛盾かを検証する。また、MCMC 法を用いて相対論効果を取り込む妥当性も確認する。

本研究で用いている光線追跡モデルでは、観測方向とマグネターの自転軸の角度 i 、自転軸と星の中心からホットスポットの中心を通る線の角度 θ 、マグネターの半径 R などのフリーパラメーターが存在している。モデルのフリーパラメーターを適切に選ぶことで、SGR 1833-0832、PSR J1622-4950 などパルス波形が比較的単純なマグネターの説明ができ、4U 0142+61、SGR 0418+5729 などのマグネターは複数のホットスポットからの放射で説明できることが分かった。

1. V. M. Kaspi, et al., ARAA, 55, 266, 2017
2. F. Bernardini, MNRAS, 418, 638–647, 2011

全天X線監視装置 MAXI のイメージフィット解析システムの改良と同システムを用いた全天X線データの再解析

工藤 優乃 (日本大学 M1)

近年、ブラックホールの存在は疑う余地が無くなった。しかし、依然として物が吸い込まれていく現象などの謎が残る。それらを解明する手段として、X線観測や可視光を含む多波長同時観測が挙げられる [1]。MAXI は国際宇宙ステーションに搭載されたX線観測装置である。全天で 300 個を超えるX線天体のX線の強度変化を約 92 分に 1 回の間隔で監視している。

これまで MAXI のデータを用いて 34 の新たなX線新星が発見されてきた。しかし、運用当初はバックグラウンドの処理や、突発天体の閾値などが最適化されておらず、明るい天体しか発見できていなかった可能性がある。本研究の目的は、13 年以上にわたる MAXI データを用いて、1 orbit (1 時間半) ビン、6 hour ビン、1 day ビンのタイムスケールで天球上の各点での光度曲線を作成し、見逃されてきたX線新星等の突発天体を発見することである。光度曲線は、周辺天体からの光子の漏れ込みも考慮したイメージフィット解析手法 [2] を用いて作成する。これまでに、同手法を用いて新天体の検出はできていない。

現在、同手法の改良を行い、調べたい天球座標の光度曲線とその周辺天体の光度曲線を同時に表示させることができた。その結果、検出された増光がその領域そのものの増光なのか、周辺天体の増光に影響されたものなのかがわかるようになった。

1. 根来均, 天文月報, 2019 年 9 月
2. Morii, M., et al., 2016, PASJ, 68, S11

X線天文衛星「すざく」を用いた弱磁場激変星 V603 Aql のスペクトル解析

黒川 音彩 (奈良女子大学 大学院人間文化総合科学研究科 M1)

宇宙には、太陽程度の質量を持ちながら大きさが地球ほどしかない高密度天体、白色矮星 (white dwarf) が存在する。この天体は太陽程度の質量を持つ恒星の最後の姿である。現在、この白色矮星は宇宙にありふれた天体であると考えられており、その数は白色矮星と恒星の個数を比にするとおおよそ 1:2 といわれている。この白色矮星が恒星と近接して連星系になっているものを激変星 (cataclysmic variables) という。変光星の一種であり、数秒から数年の単位で劇的にその明るさが変動することで知られている。この激変星は、白色矮星周辺の磁場が弱いものと強いもので大きく 2 つに分類され、それぞれ強磁場激変星、弱磁場激変星と呼ばれる。また、観測した時期によって物理状態が変わることが報告されている。

本研究では、すざく衛星の観測データを用いて弱磁場激変星である V603 Aql のスペクトル解析を行った。まず始めに、0.7 – 10.0 keV のエネルギー帯域で領域を選択しライトカーブを作成した。次に、先行研究 [1] を参考にして単一温度、二温度、多温度プラズマのモデル、先行研究 [2] を参考にして冷却フローモデルを用いてフィットした。またフラックスから光度を算出した。

本講演では、その結果を報告するとともに、これらの求められた値をもとに物理現象の考察、先行研究との比較を行う。

1. Baskill, D. S. et al., 2005, MNRAS, 357, 626
2. Mukai, K., and Orio, M., 2005, ApJ, 622, 602

ラインフォース駆動型円盤風を伴うブラックホール降着円盤の研究に向けて

黒田裕太郎 (筑波大学宇宙物理理論研究室 M1)

ブラックホール (BH) の周囲には角運動量を持つガスによって円盤状の降着流 (降着円盤) が形成され、宇宙に普遍的に存在するされている。Tombeshi et al. 2011[1] によって、BH 候補天体 PG1211+143 の輻射スペクトル中に速度 0.15C で青方偏移する吸収線の存在が報告された。これは、降着円盤由来のガス噴出流 (円盤風) が発生することを示唆している。Nomura et al. 2016[2] の輻射流体力学計算により、この円盤風がラインフォースによって説明可能であることが示された。ラインフォースとは、金属元素による束縛-束縛遷移吸収によりガスを加速させる力のことである。しかしながら [2] では、定常的な降着円盤を境界条件として仮定しており、現実的な降着円盤・円盤風構造の解明には至っていない。なぜなら、外部環境から降着円盤へ供給される質量輸送率や、降着円盤内部で発生する熱的・粘性不安定によって、降着円盤の密度や温度分布は時間発展し得るからである。このような円盤構造の時間変化が生じた場合、円盤風も時間進化し、やはり降着円盤自体の構造も変化すると予想される。したがって、降着円盤と円盤風を自己矛盾なく取り扱う計算が必要となる。

そこで我々は、降着円盤の構造進化とラインフォース駆動型円盤風を同時に解く数値計算コードの開発を目指す。本講演では、降着円盤の構造進化に着目した先行研究である Watarai et al. 2003[3] を紹介する。[3] では、1次元輻射流体力学計算を実施し、熱的・粘性不安定に起因して光度が数十倍変動することが示された。光度が時間変動すると輻射力も時間変動するため、円盤風による質量損失率も時間変動する可能性がある。[3] の計算手法をもとに、ラインフォース駆動型円盤風を伴うBH降着円盤の数値計算の将来計画についても議論する。

1. Tombesi, F., Cappi, M., & Reeves, J. N., ApJ, 742, 44, 2011
2. Nomura, M., Ohsuga, K., Takahashi, H. R., Wada K., & Yoshida, T., PASJ, 68, 16, 2016
3. Watarai, K., & Mineshige, S., ApJ, 596, 421, 2003

ガンマ線バースト残光の流体スケール乱流磁場による多波長偏光 桑田 明日香 (東北大学 D2)

ガンマ線バースト (GRB) の残光は、相対論的な衝撃波で加速された電子からのシンクロトロン放射だと考えられている。この衝撃波では星間空間の磁場の増幅が起こっているが、光度曲線と放射モデルの比較から、衝撃波圧縮のみによる増幅よりも100倍以上強い磁場が存在することが期待されている。これほど強い磁場の増幅メカニズムは残光の放射機構の大きな謎の一つであり、この解明は衝撃波での高エネルギー宇宙線の加速機構やGRBの全エネルギーの制限につながる。これまで、磁場の増幅メカニズムはプラズマ不安定と乱流ダイナモの二つが考えられてきた。これら二つのメカニズムで生じる乱流磁場のスケールは大きく異なり、シンクロトロン偏光の観測から区別できると予想される。前者の機構で生じるプラズマ慣性長程度のスケールの乱流磁場による偏光はモデル化され、観測と比較されている [1][2]。本研究では、もう一つの増幅機構である乱流ダイナモで生じる流体スケールの乱流磁場に着目し、偏光の準解析的モデルを構築し、数値計算を行った [3]。その結果、等方乱流磁場かつジェットの見込み角が0度の場合では、流体共動系での乱流磁場のスケールが衝撃波下流の厚み程度のときに、可視偏光度が観測の典型値 (~1-3%) を再現できることがわかった。また偏光度や偏光角の時間的振る舞いがプラズマスケール乱流モデルとは異なることも示された。一方、非等方乱流磁場かつジェット見込み角が0度でない場合は、プラズマスケール乱流モデルによる偏光と同じ振る舞いを示すことがわかった。以上の結果から、流体スケール乱流磁場モデルは既存の全ての偏光観測と無矛盾であることが示唆される。

1. Sari, R. ApJL, 524, L43, 1999
2. Shimoda, J., & Toma, K. ApJ, 913, 58, 2021
3. Kuwata, A., Toma, K., Kimura, S., S. et al. ApJ, 943, 118, 2023

ガンマ線バースト残光の多波長偏光 齋藤 瑞葉 (東北大学大学院 修士2年)

ガンマ線バーストは、数秒から数十秒の間に数百 keV ほどのガンマ線を放出する宇宙で最大規模の明るさのプロンプト放射と、その後徐々に減光しながら数日から数ヶ月続く電波から可視に渡る放射である残光の段階に分けられる。残光は、中心エンジンからの相対論的なプラズマ流が星間物質と相互作用して形成された衝撃波により加速された電子からのシンクロトロン放射と考えられており、磁場構造が重要である。ガンマ線バーストの加速機構と中心エンジンの正体は未だ未解明であり、衝撃波下流の磁場構造を明らかにすることでこれらの謎の解明につながる。

本講演でレビューする Shimoda&Toma 2021[1] では、衝撃波の下流に非等方なプラズマスケールの磁場を仮定し、電波から可視の多波長帯において偏光を計算した。その結果、電波の偏光は可視と似たような時間発展を示すが、ピークの値は著しく小さいことが分かった。また、ピーク周波数より高い周波数域において低い偏光度から高い偏光度への遷移が見られ、偏光度が低い領域と高い領域の偏光角の違いは0° または90°であることを示す。したがって、残光の偏光の多波長観測は、プラズマスケールの磁場モデルの検証に使える。

1. Shimoda & Toma, ApJ, vol.913, 58, 2021

近傍銀河 M101 で発生した II 型超新星 SN2023ixf の X 線観測 齋藤 裕次郎 (京都大学 物理学第二教室 M1)

10太陽質量以上の大質量星は、進化の最終段階で重力崩壊型超新星爆発を起こす。これは、コアが重力崩壊を起こし、コアが原子核程度の密度まで潰れた際の核力により生まれた反跳衝撃波がニュートリノ加熱によってエネルギーを獲得すること等による爆発である。超新星爆発により恒星内部で合成された重元素が星間空間へと放出されるため、この現象は元素の重要な供給源である。爆発の際に生じる衝撃波は、前駆星が放出した星風などの星周物質と相互作用を起こし、熱的、非熱的な X 線を放射する。爆発直前の星風による質量損失の履歴には未解明な点が多いため、その情報を含む X 線の検出は重要である [1]。しかし、X 線が観測された超新星は多くない。2023年5月19日、板垣公一氏により、距離 6.8 Mpc の近傍銀河 M101 に II 型超新星 SN 2023ixf が発見された。10 Mpc 以内での超新星の発見は稀であり、爆発以前のデータを用いた可視光 [2]、中間赤外線 [3]、X 線 [4] での前駆天体の探索、uGMRT(メートル波)[5] や IceCube(ニュートリノ)[6] での不検出による爆発機構の制限など、短期間に多くの解析結果が報告されている。本研究では、低電離の鉄輝線が検出されている NuSTAR(5/24, 5/31)[7] を中心とした、NICER(5/19-)、Swift/XRT(5/20-) というエネルギー帯や有効面積の異なる複数の検出器の観測による総合的

な解析結果を報告・議論する。また、我々は XMM-Newton での前駆天体の探索も行った [8]。その結果も併せて報告する。

1. Dwarkadas, V., Proc Int Astron Union, 14(S346), 83-87, 2018
2. Soraisam, M., ATel, 16050, 2023
3. Szalai, T., ATel, 16042, 2023
4. Kong, A.K.H., ATel, 16051, 2023
5. Chandra, P., ATel, 16052, 2023
6. Thwaites, V. et al., ATel, 16043, 2023
7. Grefenstette, B., ATel, 16049, 2023
8. Matsunaga, K., Atel 16060, 2023

パルサー磁気圏のプラズマ粒子シミュレーション 佐伯 聖真 (広島大学 M1)

パルサーは安定的な周期のパルス放射が観測される天体で、膨大な自転エネルギーを強磁場を介して電磁場、粒子の運動エネルギーに変換して放出する中性子星だと考えられている。パルサーの強磁場と高速の自転により、その磁気圏では荷電粒子の加速と電子陽電子対生成が起こり、それがパルサー磁気圏の電磁場エネルギーから粒子の運動エネルギーへの変換に深く関係すると考えられているが、粒子生成率とエネルギー変換効率の関係は分かっていない。この関係を調べるためには粒子生成を考慮した磁気圏の状態を解く必要があり、その状態は一般に非定常になるため、プラズマ粒子シミュレーションにより数値的に状態を解く必要がある。

本研究では、パルサー磁気圏の光円柱半径の外側も含めた領域で粒子の運動と電磁場の時間発展を同時に解ける 2 次元軸対称シミュレーションコード「PICsar2D[1]」を用いて、パルサー磁気圏での粒子生成率と磁気圏から放出される電磁場、粒子の運動エネルギーの関係を調べた。その結果、磁気圏での加速電場の遮蔽に最低限必要な粒子数を供給できる粒子生成率を境に電磁場エネルギーと粒子の運動エネルギーの比が大きく変化し、粒子生成率が大きい程全放出エネルギーに対する粒子の運動エネルギーの比が小さくなることが分かった。

1. Belyaev, M. A. (2017). PICsar2D: Public Release. arXiv e-prints, page arXiv:1707.01598.

コンパクト天体に関わる共通外層進化のレビューと今後の展望 櫻井 大夕 (早稲田大学 M1)

近年、LIGO や Virgo によって様々なコンパクト連星系からの重力波が観測されている (例えば [1], [2])。これらのコンパクト連星系の形成過程は共通外層進化という段階によって特徴づけられており、かつてから多くの注目が集まっている (レビュー論文 [3] を参照)。しかし、共通外層進化は幅広いスケールの物理過程が複雑に絡み合っているため、共通外層進化の多

くの研究がなされたにもかかわらず、外層放出やコアの合体のタイミングなどの定量的な側面は明確にはなっていない。

共通外層進化とは、連星系において 2 つの星が 1 つの共通外層の中を公転する段階のことである。そのタイムスケールは 300 年以下と短く、その間に連星系の間隔は約 100 分の 1 にまで減少する [4]。この軌道間隔の減少は連星の公転エネルギーが外層物質の運動エネルギーに変換され、外層物質に角運動量を与えることによって生じる [5]。そして共通外層進化によって連星間隔が減少し、外層が放出されると現在観測されているような近接連星系やコンパクト連星系が取り残されることになる。

コンパクト天体に関わる共通外層進化は、多次元の効果や一般相対論的效果が重要であると考えられており [6]、私の研究テーマとなっている。そこで、共通外層進化についてのレビュー論文 [3] を基に、私の研究の展望について発表する。

1. Abbott, R., Abbott, T. D., Abraham, S., et al. The Astrophysical Journal Letters, 915, L5, 2021, doi: 10.3847/2041-8213/ac082e
2. LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration, Abbott, B. P., Abbott, R., et al. Physical Review Letters, 119, 141101, 2017, doi: 10.1103/PhysRevLett.119.141101
3. Ivanova, N., Justham, S., Chen, X., et al. The Astronomy and Astrophysics Review, 21, 59, 2013, doi: 10.1007/s00159-013-0059-2
4. Paczynski, B. in IAU Symposium, 73, 75, 1976
5. Fragos, T., Andrews, J. J., Ramirez-Ruiz, E., et al. The Astrophysical Journal, 883, L45, 2019, doi: 10.3847/2041-8213/ab40d1
6. Cruz-Osorio, A., & Rezzolla, L. The Astrophysical Journal, 894, 147, 2020, doi: 10.3847/1538-4357/ab89aa

WZ Sge 型矮新星 TCP J23580961+5502508 の降着円盤構造の発展 佐崎 凌佑 (広島大学 M2)

矮新星は白色矮星と低質量星からなる連星系で、白色矮星の周囲に降着円盤を形成する。矮新星は降着円盤の不安定性でアウトバーストを繰り返す。WZ Sge 型矮新星と呼ばれる矮新星のサブクラスは、最もアウトバースト規模が大きく、典型的な増光振幅が 7-9 等、増光期間が 30 日程度である。WZ Sge 型矮新星の特徴の一つに早期スーパーハンプ (Early Superhumps:ESH) と呼ばれるダブルピークを持つ明るさの周期変動がある。ESH は降着円盤の幾何学的な構造を反映していると考えられている。[1] そのため多波長帯で長時間撮像することで降着円盤の動径方向と方位角方向の情報が得られ、円盤構造を再構成することができる。[2] しかし ESH はアウトバーストから数日しか現れず、多色連続撮像が必要なこともあ

り、これまでに3天体のみでしか円盤再構成は行われていない。

我々はかなた望遠鏡と観測装置 HONIR を用いて、2022年9月30日から10月2日までの3日間、WZ Sge 型矮新星 TCP J23580961+5502508 を可視光と近赤外線でも同時撮像した。観測の結果、1日目のESHの振幅はVバンドで0.16等、色指数V-Jの平均は-0.14等で、主極大に0.20位相遅れて最も赤くなった。3日間の中では初日のESH振幅が最も大きく、平均の色指数は最も青かった。また、主極大に対する色指数の極小の遅れは徐々に小さくなり、3日目には0.05位相となった。さらに、3日目は副極大付近でも色指数が赤く変動した。この特徴はV455 Andなどの過去に多色撮像されたWZ Sge型矮新星のESHで見られた傾向に近い。3日連続でのESHの多色観測を行ったのはこの観測が世界初である。再構成した降着円盤は初日に最も高く盛り上がっていた。降着円盤構造としては、初日は非軸対称な1本腕構造が現れ、その後、2本腕が発達して軸対称に近づいた。理論的には2:1共鳴半径での軸対称に近い2本腕構造が予想されているが[3]、特にアウトバースト初日では観測結果とこの理論予想とが大きく異なる。

1. T. Kato, PASJ, 1, 2015
2. M. Uemura et al., PASJ, 64, 92, 2012
3. Y. Osaki & F. Meyer, A&A, 383, 574, 2002

電子捕獲型超新星と鉄コア崩壊型超新星の多色光度曲線・判別手法

佐藤 大仁 (総合研究大学院大学 D2)

約10太陽質量(M_{\odot})を超える星は鉄コア崩壊型超新星となり、 $8M_{\odot}$ を下回る星は白色矮星として一生を終える。この間の8-10 M_{\odot} の星の結末を明らかにすることは、恒星進化理論だけでなく、超新星の爆発機構や元素合成、銀河の化学進化など、様々な点で重要である。理論的には超漸近巨星分枝星となり、白色矮星又は電子捕獲型超新星となるとされるが、電子捕獲型超新星の明確な観測はない。そのため、その観測が強く待ち望まれている。近年、候補天体としてSN2018zdが観測された[1]が、鉄コア崩壊型との提案もあり[2]統一的な解釈に至っていない。このように電子捕獲型超新星の発見、同定が困難となっているのは、その観測的特徴が十分に明らかにされておらず、同定方法が確立されていないことに一因がある。

そこで、9-12 M_{\odot} の赤色超巨星[3]、超漸近巨星分枝星[4]を親星とした鉄コア崩壊型、電子捕獲型超新星の光度曲線を、多波長輻射流体計算コードSTELLA[5]を用いて計算した。その結果、両方で放射絶対等級の光度曲線が類似することがあると分かった。これは、放射絶対等級の光度曲線だけでは、電子捕獲型超新星の同定が困難であることを意味する。また、多色光度曲線から、電子捕獲型ではプラトーが青いことが分かった。更に、これらの観測的特徴を用いて、電子捕獲型の判別手法を検討した。また、この手法をSN2018zdに適用することで、SN2018zdが電子捕獲型と考えられることが分かった。

本講演では、親星モデル、多色光度曲線、電子捕獲型の判別手法を紹介する。更に判別手法のSN2018zdへの適用結果や今後の展望にも言及する。

1. Hiramatsu, D., et al., Nature Astronomy, 5, 903, 2021
2. Callis, et al., <https://arxiv.org/abs/2109.12943>, 2021
3. Sukhbold, T., et al., ApJ, 821, 38, 2016
4. Tominaga, N., et al., ApJL, 771, L12, 2013
5. Blinnikov, S., et al., ApJ, 532, 1132, 2000

親星水素外層と超新星フォールバックの相関性 篠田 兼伍 (東京大学 修士二年)

重力崩壊型超新星爆発(以下、超新星)は、 $8M_{\odot}$ を超える大質量星の恒星進化の最終段階に起きる爆発である。超新星はその爆発過程で中心に中性子星やブラックホールを形成するため、爆発内部でエジェクタの一部が中心天体の重力場によって落ちていくフォールバック降着という現象が起こる。超新星のフォールバック降着が重要となる問題として、水素外層のあるII型超新星と水素外層のないStripped-Envelope超新星(SE超新星)における ^{56}Ni 問題が挙げられる。この二つの超新星における違いは外層のみで、内部構造は同じであると考えられていた[1]。しかし、近年の観測では内部構造を反映する ^{56}Ni 量がII型超新星よりSE超新星の方が少ないことが報告され[2]、SE超新星とII型超新星で爆発中心の性質が異なる可能性がある結論づけられている。一方、衝撃波が水素外層を伝搬する途中で逆行衝撃波を形成し、フォールバック降着量を増加させる見込みがある[4]。この逆行衝撃波によって、II型超新星での ^{56}Ni 放出量が抑制される可能性があるが、水素外層によるフォールバック降着量の増加を定量的に求めた計算は現在まで行われてきていない。

本研究では流体シミュレーションコードAthena++[3]を用いて、水素外層の有無がフォールバック降着量に与える影響を定量的に計算した。この結果、水素外層の束縛エネルギーが大きいほどフォールバック降着量は増加し、 ^{56}Ni 問題を解決しうることがわかった。

1. Smartt, S. J., ARA&A, 47, 63, 2009
2. Stone et al., ApJS, 249, 4, 2020
3. Meza&Anderson, A&A, 641, A117, 2020
4. Woosle&Weaver, ApJS, 101, 181-235, 1995

広帯域X線観測で探るブラックホール連星GRS 1915+105の降着状態の変化 菅原 一希 (東京理科大学 M1)

銀河の進化の鍵を握る超巨大ブラックホールの成長を知る上で、恒星質量ブラックホールの降着状態を探ることは一つの鍵となる。恒星質量ブラックホールは恒星と連星系をなし、その恒星からガスを剥ぎ取る。ガスは角運動量を持つため、ブラッ

クホールのまわりで円運動を行い、降着円盤を形成する。降着円盤からは黒体放射により X 線が放射され、この X 線を観測することで、ブラックホール近傍の降着画像を探ることができる。本研究では GRS 1915+105 に着目した。この天体は 1992 年に発見された、K 型巨星と連星系をなす X 線トランジェント天体である。エディントン比は 100% 程度に迫り、発見以来激しい光度の時間変動が観測されていた。しかし、2017 年以降は現在まで時間変動が少なく暗い状態が続いており、その原因はわかっていない。この天体の X 線スペクトルは、他のブラックホール X 線連星系で観測されている状態にはあてはまらない、非常に不思議な天体である。本天体の降着状態を調べることで、ブラックホール X 線連星系における新しい状態について明らかにすることが可能になるかもしれない。解析には、軟 X 線帯域に有効面積を持つ *NICER* と、硬 X 線帯域に有効面積を持つ *NuSTAR* の同時観測を用いることで、広エネルギー帯域の観測を可能とした。本研究では 2017 年 10 月の明るいときのデータと 2019 年 5 月の暗いときのデータを比較することで、天体が暗くなった原因を探った。明るいときのデータでは powerlaw 的な連続成分が優位なスペクトルが得られた一方で、暗いときのデータでは鉄輝線がはっきりと見られ、複数の電離反射成分で再現できるスペクトルが得られた。このとき、明るいときと暗いときでは吸収成分の値に大きな差は見られなかった。つまり、我々から見えている放射成分は大きく変わっているが、それは吸収体の変化によるものだけでなく、天体の降着状態にも変化があったと考えられる。

クェーサー 2201+315 の形状探査 関 あずみ (新潟大学 自然科学研究科数理物質専攻 M1)

銀河全体の 1% 程度は、中心部の非常に狭い領域から銀河全体を凌駕する強い電磁波を放射している天体が存在する。このような中心部領域を活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) という。AGN の一部は、細く絞られたプラズマの流れであるジェットを持っており、AGN ジェットと呼ばれる。AGN ジェットは、どのように生成され、収束、加速されるのかが多く未だ解明されていない。近年、いくつかの電波銀河と BL Lac 型天体のジェットは、ブラックホール近傍では放物線状に絞られ、一定の距離で形状遷移を伴い円錐状に広がっていく様子が見つかった [1]。一方でクェーサーについても形状調査が始まっているが [2,3]、ジェットの形状が複雑で調べにくいという問題があった。

本研究では、クェーサーにおいても普遍的にジェットの形状遷移が見られるかどうか、そしてジェットの収束機構を調べるために、超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI) を用いて高解像度でジェットの形状を解析した。目標天体にはジェットの形状が比較的単純なクェーサー 2201+315 を選び、米国 VLBI・VLBA による多波長アーカイブデータの解析を行った。本講演では現時点での結果と、

今後の展望について議論する。

1. Kovalev, Y. Y., et al., *MSRAS*, 495, 3576, 2020
2. Okino, H., et al., *ApJ*, 940, 65, 2022
3. Burd, P. R., et al., *A&A*, 660, A1, 2022

アクシオンを考慮した重力崩壊型超新星爆発の親星依存性 高田 剣 (福岡大学 M2)

重力崩壊型超新星爆発は大質量星が進化の最終段階に爆発を起こす高エネルギー天体現象の一つである。しかし、その爆発メカニズムの詳細は未だ完全には解明されていない。先行研究 [1] では、超新星内でダークマターの候補である未発見の素粒子アクシオン (Axion-like Particles; ALPs) が生成された場合の効果が調査されている。その結果、質量 100 MeV 程度の ALPs が超新星内部で生成され、衝撃波の復活を引き起こす可能性があることが明らかになった。一方、[1] では親星を 20 太陽質量に固定して ALPs の効果が調べられた。しかし、中性子星の質量分布のような多様な観測可能性を予言するためには、多くの親星モデルに対して同様の調査を実施する必要がある。

そこで本研究では、質量の異なる 3 つの親星に対して、ALPs を考慮した球対称次元の重力崩壊型超新星シミュレーションを実行した。その結果、ALPs のパラメータである ALPs 質量と ALPs-光子間の結合定数の 2 つについて、超新星衝撃波と次のような関係があることを明らかにした。ALPs 質量が大きく、また光子との結合定数が高いほど衝撃波は膨張に転じやすい。しかし、ALPs 質量がある一定の値を超えると、有限の温度環境下での ALPs 生成率が下がり、衝撃波は膨張に転じにくくなる。また、親星の質量が異なる場合、中心で達成される最高温度が異なるため、ALPs 生成率に違いが生じる。そのため、軽い親星に対しては衝撃波が膨張に転じなかった比較的大きい質量を持つ ALPs であっても、高温環境が実現される重い親星では衝撃波が復活する可能性があるということを明らかにした。

1. Mori et al. 2022, *PRD*, 105, 063009

X 線食連星 SS433 の質量推定モデル 丹 海歩 (総研大/国立天文台 M1)

SS433 はコンパクト星に超臨界降着する大質量の X 線食連星であり [1]、銀河で見つかったマイクロクェーサーの最初の例である。SS433 の大きな特徴としては、水素とヘリウムで構成される輝線に加えてドップラーシフトした $H\alpha$ 線が 162.3 日の周期で変動することが知られており [2][3]、その動きは $\sim 1000 \text{ \AA}$ (速度にして数万 km/s) に及ぶ。この奇妙な輝線の振る舞いは SS433 の中心天体から噴き出すジェットの歳差運動によるものだと考えられている。

SS433 の質量比は今まで様々な手法で推定されており、分光観

測から視線速度を求めた論文 [4] や、ジェットによる食モデルを考え、その光度曲線から測定された食の幅から導出した半径を用いて質量比を計算した値などがある [5]。測光観測から恒星の質量を見積もることができるため、質量比を導出することでコンパクト星が中性子星かブラックホールかを決定することができる。直近の論文 [3] では、モスクワ大のシュテルンベルク天文研究所のコーカサス天文台における分光・測光観測により、SS433 の軌道の楕円度、軌道周期の増加を発見することに成功した。このことにより、コンパクトスターと恒星の質量比を $q = M_x/M_v > 0.8$ (M_x :コンパクト星, M_v :恒星) が得られた。この見積もりからコンパクト星の質量が $M_x > 8M_\odot$ とわかり、コンパクト星の正体は BH であるとわかった。また、軌道の楕円性はスレーブ降着円盤モデルとコンシステントである。この結果により、なぜ SS433 が一般的なエンベロープモデルではなく半分離型連星として進化したか理解できる。今回はこれらの論文をレビューすることで、SS433 の質量推定について考える。

1. Margon, B., Annual review of astronomy and astrophysics. , Volume 22, p. 507-536, 1984
2. Margon, B., Astrophysical Universe, vol. 233, p. L63-L68, 1979
3. Cherepashchuk, Universe, vol. 8, p.13, 2022
4. T. C. Hillwig, The Astrophysical Journal, vol. 615, p.422-431, 2004
5. Publications of the Astronomical Society of Japan, vol. 41, p.491-507, 1989

高解像度数値流体計算で迫る Ia 型超新星爆発機構の He 質量依存性 鶴見 薫樹 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

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一生を終える。Ia 型超新星の詳細な爆発メカニズムは未解明であり、有力なモデルの一つに Double Detonation model がある [1]。本モデルでは、白色矮星表面に降着した僅かな He 外層が点火し、超音速の燃焼波である detonation が発生する。発生した衝撃波が内側へ伝搬することで、C/O コアにも detonation を発生させ最終的な爆発に至ると考えられている。

Double Detonation model で 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 ($M_{\text{He}} \lesssim 0.02 M_\odot$) で爆発が実現されることが要求される [1]。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 [2]、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、 $0.4 \sim 1.35M_\odot$ の C/O

コアに対して M_{He} を $0.01M_\odot$ 近傍で連続的に変化させ、親星モデルを作成した。我々は、数値流体計算コード FLASH[3] を用いて、各親星モデルに対し He 外層に点火し、衝撃波の進行を解き、detonation の成否を判定した。計算条件としては一次元球対称や 13 核種の核反応ネットワーク (Aprox13)、適合核子細分化法 (AMR) などを採用した。

計算の結果、He 外層質量と Double Detonation の成否との間に、小質量 ($< 0.60M_\odot$)・中質量 ($0.60 \sim 1.10M_\odot$)・大質量 ($> 1.10M_\odot$) の親星モデルに大別される相関関係が見られた。特に、大質量親星モデルでは観測的制限 ($M_{\text{He}} \lesssim 0.02 M_\odot$) を満たしての detonation に成功した。本講演では、これらの結果から、Ia 型超新星の爆発モデルとしての Double Detonation model の妥当性を評価し、報告する。

1. S. Boos et al., ApJ, 919, 126, 2021
2. K. Shen et al., ApJ, 1409, 3568, 2014
3. B. Fryxell et al., ApJ, 131, 273, 2000

ガンマ線連星 LS I+61° 303 の X 線時間変動解析 寺農 夏樹 (甲南大学 M1)

恒星とコンパクト天体 (ブラックホール or 中性子星) からなる連星系は X 線連星と呼ばれ、その中でもガンマ線を放出する天体をガンマ線連星という。ガンマ線連星からの放射の起源は、マイクロエーサーのジェット由来とパルサー風由来の 2 つの説が考えられている。コンパクト天体が中性子星かブラックホールかを判別する方法は主に 2 つ考えられる。1 つは放射描像が異なることによる放射スペクトルの違いである。もう 1 つは周期的なパルスで、それが検出できれば中性子星であると判別できる。ガンマ線連星である LS I+61° 303 はコンパクト天体が Be 星を軌道周期 26.5 日で周回しており [1]、コンパクト天体の質量は $1-4 M_\odot$ であるから中性子星、低質量ブラックホール、両方の可能性がある (e.g., [2])。最近、ある軌道位相でのみ、周期 ~ 0.27 s の電波パルスが検出されたという報告 [3] があり、コンパクト天体が中性子星であると示唆されている。

本研究は LS I+61° 303 の X 線で同様にパルスが見られるか調査することを目的とし、電波パルスが検出された軌道位相にあたる 2005 年 1 月 27 日 (露光時間:50 ks) の XMM-Newton、2021 年 10 月 31 日 (露光時間:2.5 ks) の NICER、2 つの X 線観測衛星データを用いた。スペクトルはべき 1.8 のべき関数で説明できた。XMM-Newton はイメージングができるので、天体のまわり半径 14 arcsec の領域から、天体放射が卓越する $0.2-10$ keV の帯域のデータを抽出した。NICER はイメージングができないので、スペクトルから $0.7-5$ keV の天体放射が卓越した帯域のデータを抽出した。抽出したデータからライトカーブを作成し、ライトカーブをフーリエ変換することでパワースペクトルを作成した。結果として、電波観測で示唆された周期 0.27 s では有意なピークが見られなかった。本講演では、X 線帯域でパルスが見られなかった原因を含め、LS I+61

° 303 の放射の描像を議論する。

1. Gregory, P. C. et al, ApJ, 575, 427-434, 2002
2. Dhawan, V., Mioduszewski, A., & Rupen, M. 2006, VI Microquasar Workshop: Microquasars and Beyond, 52.1.
3. Shan-ShanWeng, et al, Nature, 6, 698-702, 2022

Subaru/HSC transient survey における Rapid Transient 探査 敏蔭 星治 (東北大学天文学専攻 修士 1 年)

Rapid Transient は一般的な超新星に比べて光度進化のタイムスケールが短い (≤ 10 day) 突発天体である。近年、観測間隔の短い超新星サーベイが進み Rapid Transient の発見数が増加したことで、その一部は星周物質との相互作用で光る超新星の種族であると示唆されている。こうした天体は最終進化段階における質量放出などとの関連から恒星進化を考える上で大変重要な天体である。

本研究では、Subaru/HSC transient survey [1, 2] において COSMOS・SXDS フィールドで発見された超新星 3381 天体の測光データをもとに機械学習によって Rapid Transient を選び出し、その性質や発生頻度を調査した。機械学習による分類では、シミュレーションで得られた Ia 型, Ibc 型, II 型超新星, Rapid Transient の光度曲線をもとに学習し、観測された超新星を 4 タイプに分類する教師あり学習モデルを開発した。この機械学習モデルはシミュレーションデータにおいて 94 % という高い分類精度を示し、来る Rubin/LSST era においても有用であると考えられる。この手法を実際の観測データに適用し、過去に観測されている Rapid Transient と比較することで、Subaru/HSC transient survey における Rapid Transient が 15 天体得られた。これらの天体について、先行研究 [3] に基づき光度進化のタイムスケール・最大光度を比較することで、ヘリウムを豊富に含む星周物質との相互作用で光る超新星 (Ibn 型超新星) の候補を選出し、発生率を求めると Ibc 型超新星の 0.6-1.2 % 程度と算出された。この結果は、恒星の最終進化段階におけるヘリウム外層の質量放出メカニズムを解き明かす上で重要な示唆を与える。

1. Yasuda N. et al., PASJ, 71, 74, 2019
2. Tampo Y. et al., APJ, 894, 27, 2020
3. Anna Y. Q. Ho et al., APJ, 2023

ニュートリノ冷却優勢降着円盤の性質 仲間 可南子 (東北大学 修士 1 年)

回転ブラックホールの周りに降着円盤が形成されるという構造は、多様な連星系や大質量星のコア崩壊で起こると考えられている。降着円盤の性質は降着率や温度などに依存する。太陽

質量を一秒で落とすほどの降着率を実現される時、内部は、超高密度、超高温となる。このため、円盤は光学的に厚くなるため放射冷却が効かず、高エネルギーのニュートリノ脱出による冷却が卓越する。冷却過程がニュートリノの脱出による円盤なので、Neutrino Dominated Accretion Flow (NDAF) と呼ばれる。

NDAF は、宇宙一明るい爆発現象のガンマ線バースト (GRB) の中心エンジンとして有力である。GRB のエネルギー源は、降着円盤で解放された重力エネルギーだと考えられている。GRB の典型的な光度 $10^{51} \sim 10^{53}$ erg/s に相当する重力エネルギーを短時間に供給するため、高い降着率が必要である。その降着円盤は NDAF になっていると考えられている。

今回紹介する Kohri & Mineshige 2002 [1] は、NDAF の構造を円盤の定常解においてニュートリノ冷却と電子の縮退圧を考慮し、解析的に調べたものである。その結果、(1) ニュートリノ冷却が支配的になる降着率の範囲、(2) ニュートリノ光度には先行研究で考えられていなかった電子の縮退の影響が大きいこと、(3) NDAF は熱的にも粘性不安定に対しても安定であること、(4) 磁場が臨界値に達するため量子電磁力学的効果を今後考慮する必要があること、が明らかになった。

1. Kohri, Mineshige, ApJ, 577, 311, 2002

X 線連星パルサー A 0535+262 の中性子星への質量降着率と自転周期の変化率の関係の調査 新居田 祐基 (愛媛大学大学院理工学研究科 M1)

中性子星は、大質量の超新星爆発によって生成され、ほぼ中性子のみからなる天体である。太陽程度の質量を持つ一方、半径がわずか 10 km 程度であり、非常に高い密度を持つ。その内部を調べることで、実験室で再現することの難しい超高压高密度の極限状態での物質の振る舞いを探ることができる。中性子星と恒星が近接連星系を形成し、恒星から中性子星へのガス降着により X 線で輝くものを X 線連星と呼ぶ。X 線連星のうち、中性子星からの周期的なパルスが X 線で検出されるものは X 線連星パルサーと呼ばれる。

過去の X 線連星パルサーの観測から、パルス周期 (中性子星の自転周期) は時間変化しており、その変化率と X 線光度には相関があることが示唆されている [1]。これは、恒星から中性子星にガスが降着する際に、ガスが持っている角運動量が中性子星に受け渡されることが原因とされる。Ghosh & Lamb (1979; 以後 GL79) による理論モデルによると、自転周期の変化率と光度の相関関係は、中性子星の質量や半径、磁場強度に依存する [2]。このことを踏まえ、実際の観測結果に GL79 の理論モデルを適応することで、中性子星の物理パラメータを推定し、物質の状態方程式に制限を加えようとする研究も行われている [3][4]。

本研究では、数桁にも及ぶ増光を示す X 線連星パルサー A 0535+262 に着目し、全天 X 線監視装置 MAXI で得られた光

度変動のデータと Fermi 衛星で得られたパルス周期のデータを用いて、光度と自転周期の変化率の関係を調査した。その結果、これらの間に相関が見られることを確かめた。得られた相関に GL79 モデルを適用することで、中性子星の物理パラメータの制限を試みた。

1. Bildsten L., et al., ApJS, 113, 367, 1997
2. Ghosh, P., & Lamb, F. K., ApJ, 234, 296, 1979
3. Takagi, T., et al., PASJ, 68, 13, 2016
4. Yatabe, F., et al., PASJ, 70, 89, 2018

3次元流体シミュレーションによる超巨大質量ブラックホール周囲の降着流に乱流が及ぼす影響の調査

西田 海斗 (大阪大学宇宙進化グループ M2)

銀河の中心に存在する超巨大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) の周囲には、ジェットやアウトフロー・降着流などの様々な温度を持つ複雑なガス構造が存在する。また、中心から 1-100pc の領域に、低温分子ガスで構成される核周円盤 (Circumnuclear Disk; CND) の存在している。これらの構造は、ガス降着に起因するため、降着構造の理解は重要である。また、ガス降着には、ガスの角運動量の引き抜きが必要であり、これに乱流が重要と考えられている。乱流の駆動源としては、超新星爆発や重力、磁気回転不安定性 (MRI) などが示唆されている [1][2]。さらに近年、Wolf-Rayet 星の恒星風と CND の相互作用による乱流が降着円盤形成に寄与する可能性など、SMBH 周囲の降着流について新描像が次々に発見されている [3][4]。しかし、乱流が与える影響に関して、物理的な理解や乱流のサイズ・スペクトルによる違いについての体系的な調査は未だ十分ではない。本研究では、様々なスケール・スペクトルの乱流を持つ降着流について調査する。また、歴史的に星形成分野では、多様な物理過程が複雑に絡み合い、数値計算が活きる対象としてこれを解くための技術が発展してきた [5][6]。我々は、これらの知見を SMBH 降着の研究に応用した計算を行う。

我々は、SMBH 周りの降着構造に乱流が与える影響を体系的に理解するために、銀河スケールの入り口 (中心から ~100 pc) からの降着と円盤形成を解く 3次元流体シミュレーションを行う。本計算では、計算領域中心に SMBH を模擬するために、点源重力とガスを吸い込むシンク粒子を仮定する。初期条件には、密度・温度・エネルギーが様なガス分布と様な乱流を仮定する。我々は、乱流のスペクトルやサイズ、圧縮成分とソレノイダル成分の比をフリーパラメータとし、降着構造や円盤形成について調査する。本講演では、これらの検証結果をまとめ、報告する。

1. Kawakatu, N., & Wada, K. 2008, ApJ, 681, 73
2. Balbus & Hawley, 1991, ApJ, 376, 214
3. Solanki et al. 2023 (arXiv:2301.07735)

4. Kaaz et al. 2023 (arXiv:2201.11753)
5. Larson, R. B., 1969, MNRAS, 145, 271
6. Takasao et al. 2018, ApJ, 857, 1,4

IXPE 衛星による恒星質量ブラックホール Cyg X-1 の偏光 X 線の短時間変動の研究 二之湯 開登 (東京理科大学 M1)

ブラックホール連星 (BHBs) は伴星からのガスがブラックホールに降着する過程で、ブラックホール (BH) 周囲には X 線を放射する数 keV の降着円盤と数 100keV のコロナが形成されると考えられている。しかし、その詳細な物理過程や幾何学的構造は明らかになっていない。

BHBs からの X 線は、降着円盤やコロナにおいてコンプトン散乱を受け偏光していると考えられており、その偏光をプローブとして、BH 近傍の物理状態が解明できると期待されている。2021 年に打ち上げられ X 線偏光観測衛星 IXPE により、高感度軟 X 線偏光観測が実現され、Cyg X-1 の観測では、見積もられた偏光度から降着円盤とコロナの幾何学的構造が制限された [1]。

また、BHBs からの X 線強度は非周期的に短時間での激しい強度変動を示すことが知られている。この変動をとらえる解析手法として、「ショット解析」が考案された [2]。「ショット解析」では、光度曲線から数秒スケールの増光現象 (ショット) を判別し、ショットを足し合わせることで、ショットの平均的特徴を捉えることができる。

私はショット解析と偏光観測を組み合わせ、急激な強度変動と偏光状態の変動の相関から、急激な強度変動の起源を探ることを目的に、IXPE の Cyg X-1 観測データにショット解析を適用し偏光 X 線の短時間変動の研究を行っている。IXPE に搭載されている 3つの検出器の観測データから得られる光度曲線を用いてショット解析を行い、ショットはピークの ~1 s 前から明るくなりはじめ、ピーク後 ~1 s で暗くなることが確認できた。また、ショットにおけるストークスパラメータ (Q, U)、モジュレーションカーブを用いて偏光の時間発展を定量化し、変動の評価を行った。本講演では、偏光 X 線の短時間変動へのアプローチとその起源の考察について述べる。

1. Krawczynski et al., Science, v.378, p.650-654, 2022
2. Negoro et al., ApJL, v.423, p.L127, 1994

超新星爆発における Sc, Ti, V の合成 播田 實りょう太 (総合研究大学院大学 M1)

太陽質量よりも 8 倍以上重い質量を持つ恒星は、進化の最終段階で超新星爆発を起こす。その爆発を再現するため、現在までさまざまなシミュレーションが行われてきたものの、超新星爆発の爆発エネルギーや元素合成を完全には再現できていない。超新星爆発の爆発機構は、その結果として爆発的に合成される元素に影響を残すことが期待されており、超新星爆発にお

ける元素合成を観測的に調べる手段の一つとして、金属欠乏星と呼ばれる金属量の少ない星が用いられている。

金属欠乏星はビックバン直後の宇宙初期に形成された低質量星である。宇宙は水素とヘリウムとごく少量のリチウムから始まり、その後恒星が生まれ、恒星内元素合成や超新星爆発などにより重元素が合成、放出され、それらの重元素が次世代の恒星に取り込まれるといった過程を繰り返すことで、時間と共に宇宙における金属量は増加してきた。そのため、宇宙初期に形成された金属欠乏星の元素組成は、一つのあるいは数少ない超新星爆発による元素合成の結果を反映していると考えられる。

近年、金属欠乏星の詳細な観測により、Sc, Ti, V の Fe に対する存在量 $[Sc/Fe]$, $[Ti/Fe]$, $[V/Fe]$ *¹ の間には正の相関があることが明らかとなった [1]。Sc, Ti, V は超新星爆発の際に爆発的に合成されるため、観測されている存在量および相関関係を再現することは爆発機構への制約を与えることとなる。しかしながら、これらの観測量は現在の超新星爆発の流体計算に基づいた元素合成計算では再現できていない [2]。そこで、本研究では、金属欠乏星における Sc, Ti, V の存在量を説明する爆発的要素合成が起きる物理条件に焦点を当て、温度、密度、元素合成計算時間、ニュートリノのエネルギーなどをパラメータとして元素合成シミュレーションを行った。

本講演では、Sneden et al. 2016[1] の簡単なレビューを行ったのち、元素合成シミュレーションによって得られた、金属欠乏星の Sc, Ti, V の観測を説明する条件の詳細と、超新星爆発におけるそれらの条件の実現可能性について議論する。

1. Sneden, C., et al., ApJ, 817, 53, 2016
2. Leung, S.-C., et al., arXiv, 2304.14935, 2023

MAXI が観測した GRB のスペクトル解析 平松 裕貴 (青山学院大学 D1)

Gamma-Ray Burst (GRB) は短時間に高エネルギーのガンマ線を解放する爆発現象である。Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) は国際宇宙ステーション (ISS) に搭載されている全天 X 線監視装置であり、現在 152 個の GRB を観測している。MAXI に搭載されている Gas Slit Camera (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 線に感度を持つため、他の観測機器とは異なる帯域の GRB スペクトルを得ることができる。過去の研究 (1) では MAXI が観測した GRB は他の観測機器で観測された GRB より flux が低くスペクトルが柔らかいものが多いと報告されている。本研究では MAXI が観測した 152 個の GRB のうち 80 個の GRB のスペクトル解析を行い、flux とスペクトルパラメータの系統的調査を行った。

解析結果より、flux が低くスペクトルが硬い GRB が一定数存在した。GRB 即時放射の光度と E_{peak} に相関があることを

*¹ $[A/B] := \log(N_A/N_B) - \log(N_A/N_B)_\odot$. ここで N_A, N_B は元素 A, B のそれぞれの存在量。

仮定すると (2)、これらは遠く明るい GRB か近傍の光度の暗い GRB を観測している可能性が示唆される。更に $\log N - \log S$ 分布から他の観測機器よりも flux が低いところまで傾きが $-3/2$ に沿っていることが示唆された。従って GSC は近く暗い GRB を観測している可能性がある。より詳細にスペクトルパラメータを調べるために Fermi に搭載されている Gamma-ray Burst Monitor (GBM) を用いて joint-fit スペクトル解析を行った。その結果広いエネルギー範囲でスペクトルが上手くつながっていることが確認されたが、ベキで合わない構造が見られるイベントも存在した。

本発表では MAXI が観測した GRB のスペクトル解析の結果を報告する。

1. Serino et al. 2014, PASJ, 66, 87
2. Nava et al. 2012, MNRAS, 421, 1256

NICER を用いた Cyg X-1 の吸収線解析 堀尾 侑平 (立教大学大学院 修士 1 年)

ブラックホール連星 (BHB) とはブラックホールを含む連星系ことである。BHB の代表的な天体の一つがはくちょう座 X-1 (Cygnus X-1) であり、青色超巨星とブラックホールが連星系を成している。BHB はこれまで様々な観測研究が行われており、降着円盤の存在やジェットと呼ばれるガスの噴出の存在が確認されている。しかし、降着円盤の物質の降着過程やジェットの発生機構、伴星の星風の流れなど未だ解明されていない謎が多く残る。そんな BHB の代表的な天体である Cygnus X-1 の国際宇宙ステーション搭載の検出機「NICER」の観測によるエネルギースペクトルに高階電離した鉄の吸収構造が発見された。吸収は伴星の星風の影響で起きていると言われている。[1] そこで星風などの BHB 周りの物質の動きの解明に近づくために吸収線の解析を行っている。

BHB の X 線放射には LHS (low/hard state) と HSS (high/soft state) の 2 種類の状態があるため、「MAXI」のデータを用いて吸収線らしきものが確認された時の状態を特定した。更に、BHB の軌道周期によって検出機の視線方向のガスの分布が異なるため吸収線が見えた時期の軌道位相の特定も行なった。また、吸収線スペクトルの詳細解析も試みている。本公演ではこれらについて紹介する。

1. Yamada et al, PASJ, 65, 80, 2013

すざく衛星によるブラックホール X 線連星系 LMCX-3 のスペクトル解析

松尾優里佳 (奈良女子大学院修士 2 年生 宇宙物理学研究室)

ブラックホール連星系の X 線スペクトルは大きく very high 状態、high/soft 状態、intermediate 状態、low/hard 状態、quiescent 状態に分けられることが知られている [1]。high/soft

状態のスペクトルを表現するモデルは確立されつつあるが、low/hard 状態や intermediate 状態を表現するモデルはまだ確立していないのが現状である。low/hard 状態や intermediate 状態のスペクトルはブラックホール連星の降着円盤の放射である熱的成分に比べ、コンプトン散乱等の放射による非熱的成分が強く表れている状態だと考えられているが(例えば、[2])、非熱的成分の制限が非常に難しい。本研究では、「すぎく」衛星のデータを用いて大マゼラン星雲(LMC)の中にあるブラックホール X 線連星系 LMC X-3 の解析を行った。この天体は大マゼラン雲に存在する X 線天体でこれまでに対象までの距離は 48.1kpc、質量が $5.35\text{-}6.223M_{\odot}$ 、傾斜角度は $69.24 \pm 0.72^{\circ}$ と推定されている。今まで LMC X-3 は明確な high/soft 状態を示していたが [3]、今回解析した 2013 年 03 月 28 日のデータは low/hard 状態もしくは intermediate 状態に近い状態であると考えられる。LMC X-3 の low/hard 状態を再現できるモデルを検討し、今回の発表ではその結果を報告する。

1. Esin, A. A. et al., ApJ, 489, 865, 1997
2. Makishima, K. et al., PASJ, 60, 585, 2008
3. Kubota, A. et al., ApJ, 714, 860, 2010
4. Authors3, journal3, vol3, pages3, year3

強磁場中性子星の広帯域スペクトル解析と硬 X 線の起源

松橋 裕洋 (東京大学 M1)

中性子星は一般に太陽質量の $8 M_{\odot}$ から $10 M_{\odot}$ の質量を持つ恒星が超新星爆発を起こした後に生成される天体である。中性子星の中には磁場強度 4.4×10^{13} G を超える強磁場を持つ天体が知られておりマグネターと呼ばれている。この天体はその強磁場をエネルギー源として X 線を放射していると推測されている [1]。またマグネターは強磁場の天然実験場であり、強磁場中の物理現象を観測する最適な天体である。マグネターの X 線スペクトルは低エネルギー側 (<10 keV) を中性子星表面からの黒体放射が支配し、高エネルギー側 (>10 keV) をベキ型スペクトルで説明することが多い。ベキ型スペクトルを作る要因は、電子陽電子対消滅により生成したガンマ線がマグネターの磁場により分裂し、低エネルギー側まで落ちてくる光子分裂と推測されている [2][3]。光子分裂の頻度は磁場強度に依存するため、自転に伴う光子分裂スペクトルの変動を知ることはマグネターの磁場構造の理解につながる。[4] では自転に伴うスペクトルのベキ変動が見られたが更なるサンプル数が必要である。

今回は、マグネター 4U0142+61 について光子分裂成分の自転に伴う変動解析を NICER と NuSTAR の同時観測で得られた広帯域 X 線スペクトルを用いて行った。[4] の手法をもとに一回転一周期の位相を 5 つに分割し、それぞれの位相でスペクトル解析を行った。得られたスペクトル解析の結果から各位相でのベキを比較することによりベキ型スペクトルの起源と強磁場

中の物理現象について議論を行う予定である。

1. Enoto Teruaki, 天文月報,105(7),431, 2012
2. Barding,Harding,APJ,4,1998,
3. Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., Rea, N., Hurley, K., Shibata, S.,APJ,8,2010 ,
4. Tsubasa Tamba, Aya Bamba, Hirokazu Odaka, Teruaki Enoto, PASJ, 13, 2019,

ULX パルサーの自転位相分解スペクトル解析による超臨界降着流の構造の解明

三浦 大貴 (東京大学, ISAS/JAXA M1)

典型的な恒星質量ブラックホール ($M \sim 10M_{\odot}$) に対するエディントン光度 1.4×10^{39} erg s⁻¹ を超える光度で輝くコンパクト天体を超高光度 X 線源 (ULX) と呼ぶ。その大部分はコンパクト星への質量降着により輝く X 線連星であると考えられており、主星が恒星質量程度であればエディントン降着限界を超えた超臨界降着を、そうでなければ中間質量ブラックホールの存在を示す [1]。したがって、いずれの場合も、降着によるコンパクト天体の質量増大過程を理解するのに恰好の対象である。ULX が発見された当初は、コンパクト天体の正体はブラックホールであると考えられていたが、最近の観測によりいくつかの天体からパルスが検出され、主星が中性子星であることが明らかとなっている [2]。この ULX パルサーを観測・解析することにより、超臨界降着流の幾何構造や放射領域を解明することができるかと期待される。

NGC 5907 ULX1 は ULX パルサーのなかで最も明るい天体であり、特に 2014 年に最も高い光度 ($L \sim 10^{41}$ erg s⁻¹) で観測された [3]。また 2003 年と 2014 年の比較を行った先行研究では、2014 年の方にのみパルスプロファイルが高エネルギーほど先行する様子が報告されている [4]。これは降着の構造に関係すると考えられるが、詳しくは理解されていない。そこで本研究では、0.3 – 10 keV に感度を持つ XMM-Newton と 3 – 80 keV に感度を持つ NuSTAR の二つの X 線天文衛星で観測された 2014 年のデータを用い、広帯域の自転位相分解スペクトル解析を行った。その結果、低エネルギー側は移流と放射が同程度効いた円盤黒体放射モデル、高エネルギー側は磁場に捕捉されて降着した物質によるパルス放射成分で再現できた。本講演では、得られた結果の詳細と、物理的な解釈について議論する。

1. Philip Kaaret, Hua Feng, and Timothy P. Roberts, ARA&A, 55, 1, 303-341, 2017
2. Bachetti M., Harrison F. A., Walton D. J. et al., Nature, 514, 202-204, 2014
3. Fürst F., Walton D. J., Israel G. L., et al., A&A, 672, A140, 2023
4. Israel G. L.,Belfiore A., Stella L., et al., Science, 355, 6327, 817-819, 2017

RXTE 衛星によるブラックホール天体 XTE J1550 – 564 の準周期振動とエネルギー依存性の研究

水川 竜希 (埼玉大学 M1)

ブラックホール連星では、しばしば周期が完全には一定ではない時間変動である準周期振動 (Quasi-periodic oscillation: QPO) が X 線で観測される [1]。これは光度曲線のフーリエスペクトルである Power Spectrum Density (PSD) で幅の広いピークとして特徴づけられる。QPO は硬 X 線が相対的に強いハードな状態 (very hard state) で観測されることが多く、降着円盤の周りに存在する、温度が数 10keV の高温プラズマが QPO の起源であることが示唆される [2]。本研究では、高温プラズマと QPO の関係を詳細に調べるために、ブラックホール天体である XTE J1550 – 564 の RXTE 衛星による観測データを用いて PSD のエネルギー依存性について精査した。

1 つの観測時期ごとのデータを **4keV、4keV-13keV、13keV-30keV、30keV-** の 4 つのエネルギー帯に分割して PSD を作成し、それぞれにモデルフィットを行ってピーク周波数、QPO 強度 (rms^2) を評価した。また、hardness ratio (HR) を 13keV 以上のカウントレートを 13keV 未満のカウントレートで割った数値と定義して観測データごとに計算した。結果としてまず HR が大きく、ハードな状態ほどピーク周波数が小さくなるという関係を得た。さらに、ピーク周波数が高いほど、逆に QPO の強度は小さく、その影響はエネルギーの低い帯域に顕著に現れるという結果を得た。この結果は、ピーク周波数と QPO 強度の関係については議論があるが、一方のエネルギー帯域と QPO 強度の関係は、高温プラズマの発達と QPO が相関していることを示しており、QPO が高温プラズマと関係している可能性を示唆している。

1. Strohmayer, APJ, 552, 49, 2001
2. Ingram & Motta, NewAR, 85, 101524, 2019

連星系における共通外層の時間発展と双極惑星状星雲の形成

水谷 耕介 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

宇宙に存在する天体には、未だにその形成原理が解明されていないものが多くある。例えば X 線連星や Ia 型超新星の祖先、重力波源としての合体するコンパクト天体などが挙げられる。ここで述べた天体には、連星というキーワードが共通している。連星系の時間発展に関わる物理は宇宙での現象の根底に関わるものであり、これを理解することは多くの現象のメカニズムを明らかにすることにつながる。しかし、恒星の連星系における回転半径のスケール ($\sim 10^{15}\text{cm}$) と前述のコンパクト天体の合体が起きるスケール ($\sim 10^6\text{cm}$) には大きな隔りがあり、効率的に角運動量を失うメカニズムが必要となる。このメカニズム

として、共通外層 (CE) の形成が重要な役割を果たすと考えられている。

CE の形成から近接連星の形成に至るまでのシナリオを調査するために、これまでにいくつかの MHD シミュレーションが行われてきた。これらのシミュレーション結果から、CE の時間発展には磁場の動的かつ大きな増幅が伴うことが確認されている [1]。このことより、CE を対象とするシミュレーションでは、磁場を考慮することと磁場によって駆動されるガスの流れを追うためのより大きなスケールを扱うことが求められている。

本講演では、CE 段階での磁場の影響を定量的に理解するために行われた、双極惑星状星雲の形成機構としての CE に関する 3 次元 MHD シミュレーション論文 [2] のレビューを行う。本論文の結果として、磁場によって駆動される高速のガスの流出が伴星の運動によってはじき出された CE によって収束され、観測と整合性のとれる双極惑星状星雲の形成が起きることが確認された。

1. Ohlmann, S.T., et al., Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 462, L121-L125, 2016
2. Röpke, F.K., De Marco, O., Living Rev Comput Astrophys, 9, 2, 2023

低輝度超新星の初期観測で探る大質量星の爆発と星周物質の性質

村井 結太 (東北大 M2)

超新星爆発は、宇宙の進化において重要な役割を担っている。超新星爆発の中でも重力崩壊型超新星と呼ばれるものは、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起こる爆発だと考えられている。超新星爆発の爆発後数日の明るさは主に爆発直前の星の大規模な質量放出で作られる星周物質などの性質で決まるが、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い。そのため、爆発直前の星の進化や星周物質の性質、そして爆発のメカニズムは未だ理解されていないことが多い。近年は高頻度突発天体サーベイによって爆発直後のデータが取られるようになりつつあることで、爆発直前の星や爆発のメカニズムについての理解が進められている。しかし、重力崩壊型超新星の中でも特に低輝度な超新星は観測することが難しいため観測例が少なく、未だに理解されていないことが多く存在する。

本研究では、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡、京都大学 3.8m せいめい望遠鏡、広島大学 1.5m かなた望遠鏡を用いることで、低輝度な超新星爆発 SN 2021gmj の爆発初期の撮像及び分光データを取得することができた。そこで、SN 2021gmj の撮像データを超新星噴出物と星周物質の相互作用の光度曲線モデル [1] と比較することで、爆発直前の星の質量放出率を推定した。その結果、質量放出率が $10^{-3} M_{\odot}/\text{yr}$ のモデルが初期の観測を再現することを確認した。この値が通常の大質量星の質量放出率 ($\sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$) より大きいことから、

この結果は爆発直前の星に高密度星周物質が存在することを示唆しており、爆発直前の星の進化を調べる上で重要である。さらに、極初期の分光データからも高密度星周物質による輝線が発見されたことで、低輝度な超新星も他の一般的な重力崩壊型超新星と同様に、爆発直前の星に高密度星周物質が存在することを確認した。本研究は、観測例の少ない低輝度な超新星のさらなる理解に繋がると考えている。

1. Moriya, Takashi J. and Subrayan, Bhagya M. and Milisavljevic, Dan and Blinnikov, Sergei I., PASJ, 75, 634-635, 2023

ガンマ線バーストの残光放射による相対論的ジェット の内部構造の探査

村越 麻友 (青山学院大学 修士2年)

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、0.1 秒から数 100 秒間に渡り 1MeV 程度のガンマ線が観測される、宇宙で最大光度の電磁波放射天体現象である。GRB 発生後には、数日から 1 か月程度かけて X 線や可視光など多波長に渡り残光放射が観測されている。GRB はローレンツ因子が 100 以上の相対論的ジェットから放射されていると考えられているが、ジェットの起源天体や生成機構などは未解明である。

ジェットの内部構造 (運動エネルギーのジェット中心軸からの角度依存性) はジェットの生成機構を反映して決まると考えられるため、観測される残光放射と無矛盾なジェットの内部構造を決定することは、ジェットの生成機構に迫る手段となる。そのため、現在、世界中でジェットの内部構造を決めるために残光放射を用いた研究がさかんに行われている。

本研究では、ジェットの内部構造をモデリングし残光放射を計算するための公開コードである `afterglowpy` を用いて、ジェットの内部構造の有無が残光放射の光度曲線にどのように反映されるのかを調べた。具体的には、運動エネルギーが角度に対して一様なジェットである Top-hat 型と、運動エネルギーが角度に対して Gauss 分布するジェットである Gaussian 型のそれぞれについて、可視光と X 線の残光放射を理論的に計算した。さらに、観測される残光放射の光度曲線からジェットの内部構造をどこまで決定できるのかを考察した。その結果、ジェットを真正面から観測した場合 (on-axis) では Top-hat 型と Gaussian 型の区別はつかないが、視線方向がジェットの開き角から外れた場合 (off-axis) では光度曲線の立ち上がり方に違いが生じることが分かった。さらに off-axis では、光度曲線の立ち上がり具合を見れば、ジェットが Top-hat 型か否かを判断できることが分かった。

恒星進化計算コード MESA を用いた超新星爆発に 影響を与える CSM の起源解明

村田 一晟 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

大質量星が最期に起こす超新星爆発には、爆発の原理、観測スペクトル、光度などによって多くの分類がなされている。また、最近の観測によって超新星爆発した星の多くは circumstellar material (CSM) を持っていた可能性が高いことがわかっており、注目を集めている。特に観測スペクトルによる超新星爆発の多様性の一因がこの CSM にあると考えられている。例えば幅の狭い (narrow) 水素輝線が見られるものは II_n 型超新星に分類されている。このような輝線は、水素に富む高密度な CSM が超新星爆発のエネルギーを得て光るときの爆発自体よりも弱い Doppler broadening に由来するものと考えられている。CSM の形成過程は jet の噴出によるものという説や、binary interaction によるものという説などがあるがまだ十分に調査されていない。そこで CSM の形成過程の検証のため恒星進化計算を行った。

本研究では 1 次元恒星進化計算コード MESA を用いる。まず、2 つの先行研究 1,2 の再現を行った。先行研究 1 では CSM が単一の恒星の爆発直前の mass loss によって形成されたとして、恒星に時間的に一様なエネルギーを注入して mass loss を起こし CSM を形成している。ここでは mass loss の原因が明らかでないため、人工的にエネルギーを与えている。結論として、単一の星での mass loss による CSM の形成は現実的ではないとしている。先行研究 2 では連星進化のモデルに対して mass loss を考えて、公転周期や連星の質量比などのパラメータを変えた 66 個のモデルを計算している。結論としてどのモデルで II_n 型超新星爆発を起こすような濃い CSM ができるのかを明らかにしている。

これらの研究をさらに発展させた内容として、先行研究 1 に対しては直ちにエネルギーを与えた場合や間欠的にエネルギーを与えた場合の計算を行い、CSM の形成の可否について考察する。先行研究 2 に対しては先行研究 1 で行っていたエネルギー注入を連星進化に適用した場合の影響について議論する。

1. Ouchi, R., & Maeda, K., ApJ, 877, 92, 2019
2. Ouchi, R., & Maeda, K., ApJ, 840, 90, 2017

HEX-P 衛星を用いた中性子星連星合体残骸の同定 と r-process 核輝線検出の推定 本上 侑吾 (埼玉大学 修士1年)

宇宙の元素合成における重元素、特に最も重い元素を合成する過程である、r-process の進行現場の特定は非常に重大な課題の 1 つである。r-process を進行させる中性子過剰な環境として、最も有力な現場が中性子星連星合体である。中性子星連星合体からの r-process 合成核の崩壊による核ガンマ線を観測することができれば、r-process 合成の直接的な証拠となる。しかし、その放射は極めて微弱で、メガパーセクの距離にある合体直後の天体のフォローアップ観測や、銀河系内の残骸探査

は、2030 年代の MeV ガンマ線ミッションでも感度が不足する (Terada et al., 2022, ApJ, 933(1), 111)。

本研究では、r-process 合成核の娘核からの特性 X 線に着目し、新たに X 線帯域での他天体との識別と輝線の検出可能性を検討する。そこで、2-200 keV の硬 X 線を含む帯域で 4400 cm^2 の有効面積を持つよう米国で提案されている、HEX-P 衛星計画での検出可能性を探った。中性子星連星合体における r-process 核からの X 線ガンマ線の放射データは、Terada et al., 2022 の核ガンマ線の推定データに、崩壊後の娘核からの特性 X 線の推定データを加えたものを使用した。中性子星連星合体は、他の硬 X 線天体に比べて特殊なスペクトル形状を持つと予想されており、2-200 keV 帯域のエネルギースペクトルのスロープを調べることで他の天体と区別できる。そこで、観測時間 1 Ms の観測シミュレーションを実施し、(25-70 keV)/(2-25 keV) と (70-200 keV)/(25-70 keV) におけるエネルギー帯域ごとの輻射量の比を見た。その結果、距離 100 pc 以内において、残骸年齢 10^4 year まで、中性子星連星合体とその他の天体現象を、少なくとも 3σ の有意度で区別できるという結果を得た。加えて、本発表では、各残骸年齢において、HEX-P のエネルギー帯域で最も強い輝線に着目し、その検出可能性についても議論する。

ニュートリノ反応が原始中性子星外層の後期熱進化における影響の解析

Liao Jinkun (東京理科大学 M2)

超新星爆発後、中心に原始中性子星 (proto-neutron star, PNS) と呼ばれるコンパクト天体が残される。この天体がニュートリノの放出により、温度が下がっていき、中性子星に進化する過程は原始中性子星冷却 (PNS cooling, PNSC) である [1]。

ニュートリノは物質との相互作用が弱くて、電磁波よりも高い透過性を持つので、天体の高密度領域を見ることができ、ニュートリノ観測を通じて、高温、高密度物理の解明に繋がると期待されている。1987 年に大マゼラン星雲で起こった超新星爆発 (SN1987A) の際に、検出器カミオカンデによって 12 秒間に 11 個のニュートリノイベントが観測されている [2]。近年ニュートリノ検出器の感度の向上により、長時間の観測が期待されている [3]。また、先行研究が長時間計算を用いて、PNS 外層の異なる重い原子核分布によるニュートリノ反応や進化計算への影響を議論されていた [4]。

そこで本研究では、特に PNS 外層の後期熱的進化に注目し、包括的詳細な解析を行った。球対称一般相対論的な準静的 PNSC 計算コードを用いて、PNS の ~ 50 秒の進化を計算した。この計算を通じて、PNS の冷却に寄与する各反応を議論する。

1. Roberts L. F., ApJ, 755, 126, 2012
2. Hirata K., et al., Phys. Rev. Lett., 58, 1490, 1987
3. Nakazato, K., et al., ApJ, 925, 98, 2022
4. Nakazato, K., et al., Phys. Rec. C, 97, 035804, 2018