

コンパクトオブジェクト

1 Suzaku/HXD-WAM を用いた GRB データの系統解析

千葉 友樹 (埼玉大学 田代・寺田研究室 M1)
ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) とはビックバン以降宇宙最大の爆発現象であり、放射機構などは未だ謎の多い天体現象である。この謎に迫るために、GRB における統一的特徴を探る系統解析を多数のサンプルに対して行うことが重要である。Suzaku/HXD-WAM(Wide-band All-sky Monitor) は HXD を 4 つの面で囲むように構成され、ほぼ全天の半分という広視野、50–5000 keV の広いエネルギー帯域と 400 cm²@1 MeV の広い有効面積を活かし、2005 年から 2015 年までの観測期間で 1400 もの GRB を検出した。2005 年から 2010 年までに WAM で検出され到来方向の分かっている GRB に関しては先行研究 (Ohmori et al. 2016) で系統解析が行われており、GRB の継続時間を表す T_{90} とスペクトルハードネス比との間に、継続時間が長いイベントは軟 X 線が強く、短いイベントは硬 X 線が強いという傾向が確認できた。

本研究ではまず、先行研究では解析が行われていない期間である 2011 年から 2015 年までに WAM と Swift 衛星によって同時検出され到来方向が決まった 81 個の GRB の系統解析を行い、 T_{90} とハードネス比の分布を求めた。解析の結果、継続時間の短い方が硬 X 線が強く観測されるという先行研究の傾向と矛盾しない結果が得られた。また、藤沼洗修士論文によって開発された GRB 到来方向決定方法に関して新たな精度検証を行った。この決定法は 2 つの WAM 面のカウント比を用いて WAM 単独で到来方向を決定するものである。これにより到来方向が不明なため先行研究では解析が行えなかった GRB のスペクトル解析が可能となるので、解析サンプルの増加が見込める。検証では到来方向決定精度のよい Swift 衛星で決まった到来方向と WAM 単独決定法を用いて決まった到来方向とを比較した。その結果、藤沼洗修士論文では決定精度が悪いとされていた WAM2 面が一番明るいイベントでも、ライトカーブのピークカウントレートが 1,000 counts/sec を超える場合は十分に高い位置決定精度を得られるとわかった。

1. Ohmori, N. et al., 2016, PASJ, vol. 68, S30-6
2. K. Yamaoka et al., IEEE Trans. Nucl. Sci., vol. 52, no. 6, p.2765-2772, 2005

2 重力波による位置特定の高速化

筒井 拓也 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)
昨年、連星中性子星合体から放出された重力波が検出され、マルチメッセンジャー天文学への期待が膨らんだ。マルチメッセンジャー天文学のターゲットの一つとして短いガンマ線バースト (sGRB) がある。これは連星中性子星の合体が起源と思われており、重力波検出器でも観測できる。GRB が起きると、数

分後にはアフターグローと呼ばれる放射が観測されるようになる。これを観測することで、GRB を出すとされるジェットの開き角や天体周りの星間物質の密度を知ることができる。つまり、アフターグローに関連する重要なパラメータを制限することができる。また、GRB の強度には角度依存性があり、ガンマ線検出器では見えないこともある。重力波のみでのアフターグローの予言で、より多くの情報が得られると期待される。

以上のことからわかるように、追観測を素早く行うことは連星中性子星合体に関わる情報を最大限得るためには重要である。そのためには、イベントの位置を知ることが不可欠である。重力波検出器が複数稼働していると、信号の到達する時間差から天体の位置を特定することが可能である。しかし現在採用されているデータ解析手法では、この位置決定に 90 秒程度時間がかかる。最大限の情報を得るためには、より高速なアルゴリズムを考えることが必須である。

別の解析パイプラインで用いられている [1] の手法を既存の位置決定パイプラインに応用することにより、位置特定を数秒程度に高速化することが可能である。本講演では [1] の論文のレビューを行い、今後行っていく研究の展望を述べる。

1. K.Cannon PRD 75, 123003 (2007)

3 宇宙再電離を反映した GRB 残光スペクトルの予測

馬場 亮太 (東京大学天文学教室 M1)
宇宙史を考える上で、宇宙再電離期の解明は現在の大きな研究テーマの一つとなっている。今まで様々な研究が行われてきたが、最近注目されているのが GRBs (gamma-ray bursts) を用いた研究である。近年、遠方での GRB とその残光が観測された。GRB は最も明るい光を放つ天体現象であり、遠方から届く残光のスペクトルを解析することにより宇宙再電離の影響を考えることができ、宇宙再電離期に制限を付けることができる。このアイデアは論文 [1] で議論されている。

本研究では、宇宙再電離のシミュレーション結果を用い、今後遠方からの GRB の残光が観測された際にどのようなスペクトルが得られるかの予測を行う。この予測が正しければ現在考えられている宇宙再電離のモデルの正当性が強まり、正しくなければ宇宙再電離の新たなモデルを考える必要性が生まれる。

発表では主に論文 [1] のレビューを行った上で、研究の現状および今後の展望について述べる。

1. Totani et al.(2006) 2006PASJ...58..485T Totani, T., Kawai, N., Kosugi, G., et al. 2006, pasj, 58, 485

4 銀河中心ガス円盤におけるブラックホールの力学的進化～円盤中の合体条件～

竹澤 多聞 (筑波大学 宇宙理論研究室 M1)
一般相対性理論によって存在が予言されていた重力波の初検出

が 2016 年 2 月に発表された。解析の結果、この重力波はおおよそ $36 M_{\odot}$ と $29 M_{\odot}$ の 2 つのブラックホール (BH) が合体したときに発生したものである事が判明した。しかし、地球から約 10 億光年以上離れた場所で起こったことは分かっているが、どこで発生したか詳細は分かっていない。本研究では、重力波放出を起こした BH 合体が銀河中心領域のガス円盤中で起こったことを仮定し、その合体の可能性、条件を調べた。

銀河中心ガス円盤には銀河全体から落ち込んできた約 1 万個もの BH が存在すると考えられている。今回の計算はそのような状況にある BH 同士が合体する可能性があるかを確認するため、第一段階として局所的な 5 個の BH で軌道計算を行った。2 つの BH が合体するメカニズムは、ガスによる力学的摩擦や質量降着、3 体相互作用により軌道収縮し、相対論効果が有効になる距離まで近づき最終的に重力波を放出し合体するというものである。

状況設定は、銀河中心にある巨大質量ブラックホールの質量を $10^8 M_{\odot}$ 、5 つの周回させる BH の質量を $30 M_{\odot}$ 、ガス円盤を鉛直方向 z に温度 2000 K の静水圧平衡分布をもつケプラー回転円盤とし、5 つの周回 BH をガス円盤内に外縁から距離 r_0 内に均等に配置した。ガス円盤は $|z| < 0.1 \text{ pc}$ 、 $\sqrt{x^2 + y^2} < 1.0 \text{ pc}$ の範囲に存在する設定となっている。全ての周回 BH に任意の向きに摂動を与えてケプラー速度で円盤回転と順方向に回転させた。銀河中心ガス円盤の寿命が典型的には 1 億年と考えられているので 10^8 yr 経過したら計算終了とした。

計算はガス円盤の $z = 0$ でのガス数密度 n_0 と周回 BH を配置する距離 r_0 をパラメタ化して行い、どのような条件であれば周回 BH 同士が合体するかを調べた。

1. H. Tagawa, M. Umemura and N. Gouda MNRAS 462 3812 (2016)
2. G. Kuper, P. Amaro-Seoana, R. Spurzem MNRAS 371 L45 (2006)
3. E. Sirko and J. Goodman MNRAS 341 501 (2003)

5 一般相対論的効果を含んだ X 線放射輸送コードの開発

會澤 優輝 (東京大学 馬場研究室 M1)

ブラックホール連星 (Black Hole Binary; BHB) とは、恒星質量ブラックホールと恒星の連星系であり、ブラックホールに降着する物質が重力エネルギーの解放によって数千万度まで加熱されて X 線を放出する。この X 線のライトカーブやスペクトルから、BHB 周辺の構造を推定することができる。

しかし降着の機構は複雑なため未だ完全な理解には至っておらず、流体シミュレーションによる再現が試みられている。降着円盤のブラックホールに近い部分は特に強重力環境にあるため、これには重力赤方偏移や光路の曲がりなどの一般相対論的な効果を考慮したモデリングが必要だ。そこで我々は、一般相対論を考慮した降着系内の X 線放射シミュレ

ーションの開発に着手した。すでに我々の研究室が所有する、モンテカルロ法を用いて光子の伝播と相互作用を数値的に計算するシミュレーションコード (Monte Carlo simulation for Astrophysics and Cosmology; MONACO)[1] に一般相対論的な効果を組み込む。MONACO は電子と光子の逆コンプトン散乱 (Comptonization) や、鉄を含む様々なイオンからの輝線や吸収線スペクトルの扱いに長けたコードであり、高精度で降着系内の放射輸送過程を追うことができる。このシミュレーションの結果からライトカーブやスペクトルを抽出し、観測データと比較することが可能になる。

我々は上記の目標達成のための第一歩として、回転するブラックホールを表現するカー時空での測地線方程式から光の通過経路とエネルギーを計算するコードを構築した。その際、カー時空での光線の各物理量の時間変化を追跡するという方法 [2] を手法として用いている。本講演では、コードの設計や座標系の取り扱い、初期の結果について報告する。

1. Odaka, H., Aharonian, F., Watanabe, S., et al. 2011, *apj*, 740, 103
2. Vincent, F. H., Paumard, T., Gourgoulhon, E., & Perin, G. 2011, *Classical and Quantum Gravity*, 28, 225011

6 ブラックホール降着円盤状態遷移の輻射磁気流体シミュレーション

五十嵐 太一 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M2)

ブラックホール候補天体の X 線スペクトルには、高 X 線が卓越し光度の低いロー・ハードステートと軟 X 線が卓越し光度の高いハイ・ソフトステートがありハードステートからソフトステートへ遷移するハード・ソフト遷移が観測されている。Machida et al.(2006) では、ロー・ハードステートに対応する幾何学的に厚く光学的に薄い円盤において降着率が増大し輻射冷却が効くことにより円盤が冷え、冷却不安定性が成長することにより、鉛直方向に収縮し磁気圧優勢な円盤に遷移することが示された。しかし Machida et al.(2006) では、光学的に薄い場合の輻射冷却を近似的に取り入れられているため、光学的に厚い領域が現れるようなその後の時間進化を追うことができていなかった。

本研究では Takahashi & Ohsuga(2013) で開発された M1-closure 法を用いて輻射強度の 0 次、1 次モーメントの時間発展を陽的に解くモジュールを非相対論化することにより計算量を減らし、高次精度磁気流体シミュレーションソフトウェア CANS+ に組み込んだ CANS+R を用いる。本公演では CANS+R を用いて光学的に厚い領域を含むブラックホール降着円盤の輻射磁気流体シミュレーションを実施した結果を報告する。

1. M. Machida et. al 2006, PASJ, 58, 193
2. Takahashi & Ohsuga 2013, *ApJ*, 772, 127

7 活動銀河核におけるシンクロトロン偏光輻射輸送計算

恒任 優 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

活動銀河核の駆動源である(超)大質量ブラックホールは降着円盤やジェットを持ち、そこではシンクロトロン放射による電波光が生成される。ジェットの噴出・収束機構は未だ明らかでないが、重要な役割を持つと考えられているジェット根元の磁場構造を描き出すことが解明の鍵である。電波は星間物質の干渉を受けにくく強い偏光度を示すので、ブラックホール付近の未解明構造を知るツールとなる。特に近年稼働を始めた地球規模超長基線電波干渉系 Event Horizon Telescope を用いた観測プロジェクトでも電波ジェットが重要な役割を持つ。

輸送方程式で偏光を記述すると4成分連立形となり、一般相対論効果が顕著なブラックホール付近の輻射輸送計算がさらに煩雑なものとなる。観測データが乏しいことも相まって先行研究は少なく、既存モデルは仮定とパラメータを多数含み、得られている観測データを明確に説明することができない。

本研究では輸送方程式の係数を先行研究 [1] に従ってコードに実装し、3次元相対論的輻射輸送計算を行った。まず係数を定性的に解析し、次にジェットや降着流からの光が望遠鏡まで届く過程のシミュレーションを行った。輸送係数の解析で、電波のシンクロトロン放射では直線偏光が支配的で冷たいプラズマを通過すると回転を受けることがわかった。次に簡略化したジェットモデルについて特殊相対論の範疇で輻射輸送を計算し、撮像イメージの理論予測と偏光角回転 (RM) 分布を得た。

シミュレーション結果から、複数のジェットの多波長観測において報告されている RM 分布の非対称性や反転現象 [2,3] を再現することができた。将来的には流体計算に基づくより現実に近いモデルについて一般相対論効果を考慮して計算し、この先得られるより子細な観測データとの比較を行う。これにより地平面近くのプラズマ構造や大質量ブラックホール自体の構造・起源の解明が期待できる。

1. J. Dexter, 2016, MNRAS, Volume 462, Issue 1
2. A. Broderick and A. Loeb, 2009, ApJL, Volume 703, Issue 2
3. S. O' Sullivan and D. Gabuzda, 2009, MNRAS, Volume 393, Issue 2

8 SS433 ジェット先端領域のファラデーモグラフィ解析

酒見 はる香 (九州大学 宇宙物理理論研究室 D1)
宇宙ジェット先端領域には、ターミナルショックなどの衝撃波が形成される。ジェットと共に伝播した磁場は、衝撃波で増幅され、乱流磁場を形成すると考えられる。乱流磁場の構造、形成、増幅機構を理解することは、宇宙物理学の未解決問題であ

る宇宙線粒子加速機構の解明や、電磁波放射の成因理解のために不可欠である。系内 X 線連星ジェットは、系外ジェットより数桁細かく構造を分解することができるため、乱流磁場のように小さい構造を観測するのに適している。そこで我々は X 線連星 SS433 のジェットの先端が到達していると考えられている星雲 W50 の東端領域に着目して磁場構造解析を行った。

従来の磁場構造解析は、放射の偏波角 χ が観測波長 λ の 2 乗に比例するという関係を利用して磁場の向きを同定するというものであった。しかしこの手法では、視線方向の磁場の情報が縮退するという欠点がある。そこで磁場の 3 次元構造を解明するために新たな手法ファラデーモグラフィが開発された。ファラデーモグラフィでは、偏波強度 $P(\lambda^2)$ をフーリエ変換すると、Faraday depth 空間上で異なる構造ごとに情報が分離できるという性質を利用する。我々はファラデーモグラフィの手法のうち、QU-fitting を採用した。QU-fitting では、Faraday depth 空間上で仮定したモデル関数をフーリエ逆変換し、観測された偏波強度と比較を行い最適なモデルを同定する。観測データは、Australia Telescope Compact Array による 1.4 – 3.0 GHz のものを使用した。

解析の結果、W50 東端の南北に伸びたフィラメント構造の一部と、W50 表面に巻きつくらせん状構造の磁場の類似性を発見した。また数値計算との比較から、フィラメント構造はターミナルショックにより増幅された磁場で明るく光るホットスポットである可能性が高いことを明らかにした。一方らせん状構造はジェットのバックフローで形成されるトロイダル磁場を反映したものであると推察される。本講演ではこれらの結果と今後の課題について発表する。

1. Sakemi, H., Machida, M., Akahori, T., et al. 2018, PASJ, 70, 27
2. Farnes, J. S., Gaensler, B. M., Purcell, C., et al. 2017, MNRAS, 467, 4777
3. Ideguchi, S., Takahashi, K., Akahori, T., Kumazaki, K., & Ryu, D. 2014, PASJ, 66, 5

9 磁場駆動型相対論的ジェットの質量注入モデル

荻原 大樹 (東北大学 天文学専攻 D1)

It is proposed that relativistic active galactic nucleus jets are powered by the rotation energy of a spinning black hole and driven electromagnetically in the highly magnetized region. The jet launching region is starved because the strong magnetic fields around the jet axis prevent plasma particles going into the region. Non-thermal leptons can be supplied by photon annihilation and/or pair-cascade. The emission and terminal Lorentz factor of the jet depend on how much the matters are loaded. However, the density distribution still remains an outstanding problem. The jet of M87 galaxy is the key observational target. M87 has the second

largest angular-size black hole and a bright radio jet. Recent radio observations have resolved the jet and showed the edge-brightened structure. This structure can be explained by the stationary axisymmetric synchrotron emission model with the assumption that the energy density of the electromagnetic field is much larger than the one of matter. Using this model, we constrained the density distribution in the jet (K.Takahashi et al. 2018 and our last year's talk (コンバ3)). However, this model does not take account of general relativistic (GR) effects. We applied the density distribution to the GR MHD code, HARM, and see the differences with the model. We will talk about the results and discuss the mass-loading mechanisms.

1. Takahashi, K., Toma, K., Kino, M., Nakamura, M., & Hada, K. 2018, arXiv:1802.00292

10 Swift 衛星による電波銀河 NGC1275 の可視光から X 線帯域の変動解析

今里 郁弥 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

電波銀河は電波からガンマ線までの広い波長帯域で放射する。この銀河の中心からはジェットが出ており母銀河を超えるスケールにまで達するが、これがどのように加速されているのか分かっていない。ジェットを真正面から見ているブレーザーはジェットの中心が強調されジェットの外側の様子を知ることができないが、電波銀河はこのジェットを斜めから見ているためジェットの外側の情報なども知ることができ、より詳細な情報を得ることができる。このためジェットの構造や AGN の物理を知るには電波銀河が適している。NGC1275 は近年電波とガンマ線観測での増光が見られている電波銀河である。この天体は X 線で 2008 年から 2015 年まで長期的にガンマ線と同じように明るくなり、また、ガンマ線フレア時に X 線フレアも見られていた。電波とガンマ線はジェット放射であると考えられているがその他の波長の放射起源がまだ分かっていない。そこで私は可視光から X 線の放射がジェット放射なのか降着円盤などからの放射なのかを調べた。電波銀河は可視光・紫外線では AGN の他に母銀河の放射が混入し、NGC1275 の場合は更に X 線でも卓越した銀河団の高温プラズマの放射が混入している。そこで Swift 衛星の可視光・紫外線と X 線のデータを用いて、これらに注意して NGC1275 の AGN 成分を取り出した。この結果と Fermi 衛星のガンマ線を比較したところジェット放射のガンマ線の増光に伴って X 線と可視・紫外も増光しており、更に可視・紫外の色が赤くなっていた。これは可視・紫外でシンクロトロン放射の他に紫外側に降着円盤の放射が見えており、シンクロトロン放射が増光すると紫外側は可視側より増光率が落ちるため色が赤くなったと考えられる。また可視と X 線、紫外と X 線の相関が同じ程度であったことから、X 線では

ジェット放射の他に降着円盤周辺の放射が見えている可能性がある事が分かった。

11 中性鉄輝線から探る大質量ブラックホール周辺のガス構造

山本 優馬 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 松下研究室 M1)

活動銀河核の中心には大質量ブラックホールがあり、広輝線領域 (BLR) からの放射が見えている天体であれば、ケプラー運動から、BLR の H β 輝線の速度幅と中心からの距離を用いてその質量を推定することができる。(e.g., Bentz et al. 2015) 一方、活動銀河核からの X 線には中性鉄から放射された蛍光 X 線 (中性鉄輝線) が 6.4 keV にしばしば見られる。これはブラックホール近傍で放射された X 線が周辺の冷たい物質中の中性鉄で散乱されて生じたものであり、Minezaki & Matsusita (2015) では、この輝線幅を用いた質量推定法が考案された。この手法であれば BLR が見えていない天体でも質量を見積もることができるが、中心鉄輝線の放射領域が未だ特定できていないため、正確な質量推定は行えていない。

Shu et al. (2010) では、6.4 keV で最もエネルギー分解能の高い Chandra 衛星の回折分光器を用いて活動銀河核の中性鉄輝線幅を解析し、H β 輝線幅との比較を行うことで、中性鉄輝線の放射領域とすでに中心からの距離がわかっている BLR との位置関係を調べたが、有意な相関は得られなかった。

本研究では Shu et al. (2010) と同様の解析を行った。その際、より正確に輝線幅を決定するために、輝線周辺のコンプトン肩や高階電離鉄による成分を考慮し、更に天体数も増やして解析した。その結果、中性鉄輝線の速度幅は約 10^{3-4} km s $^{-1}$ であり、Shu et al. (2010) の結果よりやや小さい傾向が見られた。H β 輝線幅に対しては、同等かやや小さい値となったが、Shu et al. (2010) と同様に相関は得られなかった。この結果から、中性鉄輝線の放射領域は BLR 付近か、より外側に分布することが示唆される。さらに、中心のブラックホール質量がすでに推定されている天体に対して中性鉄輝線の放射領域半径を求めると、この分布がトラス内縁部まで広がっていることが確認できた。

1. Misty, C. B., Sarah, K., 2015, PASP, 127, 67
2. Minezaki, T., Matsushita, K., 2015, ApJ, 802, 98
3. Shu, X. W., Yaqoob, T., & Wang, J. X. 2010, ApJS, 187, 581

12 MAGIC による活動銀河核 S5 0716+714 の観測

梶原 侑貴 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M1)

宇宙物理学における重要な天体の一つである活動銀河核 (active galactic nuclei, AGN) は、星に由来しない明るい光を放つ銀河中心のことで、その構造モデルは提唱されているものの放射機

構やフレアの生成機構などは解明されていない。特に TeV 領域などの超高エネルギー (very-high-energy, VHE) ガンマ線の測定は、1990 年前後から行われるようになった比較的新しい分野であり、他の波長帯と比べて AGN の観測データも少ない。VHE ガンマ線を放射する AGN はほとんどがブレイザーと呼ばれる天体であるが、現在 X 線領域では 2000 以上のブレイザーが確認されているにもかかわらず、VHE ガンマ線では 71 天体しか見つかっていない。

数分刻みの激しい光度変動をするブレイザーを特にとかげ座 BL 型天体 (BL Lacertae object, BL Lac) と呼ぶ。2012 年 11 月に起きた BL Lac IC 310 のフレアは 5 分間という短時間で激しく変動する VHE ガンマ線を放射しており、この観測から、ガンマ線放射が銀河中心のブラックホールのサイズよりも小さい領域から放射されていることが発見された。また昨年 10 月 IceCube によって検出されたニュートリノの多波長追尾観測で、ニュートリノ到来方向の誤差領域内に存在した BL Lac TXS 0506+056 から、強い VHE ガンマ線放射が検出された。ニュートリノの到来方向と同方向からの VHE ガンマ線フレアが観測されるのはこれが初めてで、AGN での粒子加速機構の理解が深まることが期待できる。このように AGN の VHE ガンマ線放射を観測することは、AGN の構造を解明する上で大きな役割を果たす。

S5 0716+714 も BL Lac の一つであり様々な波長帯で観測されてきたが、VHE ガンマ線では 2008 年に MAGIC 望遠鏡で初めて確認された。その時の観測では有効時間 ~ 13 時間で $\sim 6\sigma$ の有意度で、日ごとの大まかな光度変動しか捉えられていなかったが、昨年 12 月に ~ 2 時間の間に $\sim 32\sigma$ という高い有意度で検出され、20-30 分ごとの激しい光度変動が観測された。本講演では最新のガンマ線における AGN の研究成果を述べると共に、12 月に起きた S5 0716+714 のフレア解析の結果を述べる。

1. J. Aleksic, et al. Science 346(6213) 1080-1084 (2014)
2. H. Anderhub, et al. Astrophys. J. 704 129-133 (2009)

13 若い銀河に出現する Ia 型超新星の起源

岩田 朔 (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 M1)

Ia 型超新星爆発は、主に炭素と酸素からなる白色矮星が限界質量である Chandrasekhar 質量に近づくことで核反応が暴走し爆発に至る熱核暴走型超新星爆発として知られている。熱核暴走型超新星爆発の親星の起源については主に白色矮星と非縮退星の連星系において非縮退星から白色矮星への質量降着を考える Single Degenerate Scenario と、白色矮星同士の合体を考える Double Degenerate Scenario があり、現在も論争が続いている。また、熱核暴走型超新星ではあるが通常より暗い Iax 型超新星や、Chandrasekhar 質量を超えた白色矮星の爆発とみられる超新星も見つかってきている。それらは若い銀河の中に多

く出現しているため、このような超新星の起源には大質量星が関係している可能性があるが、はっきりとしたことは分かっていない。このように、熱核暴走型超新星について十分に確立された理論はいまだ存在しないというのが現状である。

本研究では通常の Ia 型超新星に加え、Chandrasekhar 質量より重い Super-Chandrasekhar 白色矮星や軽い Sub-Chandrasekhar 白色矮星による Ia 型超新星、通常より暗い Iax 型超新星の起源への理解を深めることを目的とし、それらが若い銀河に多いことを踏まえ、中質量 (8-13 太陽質量) の恒星がヘリウム核を形成した段階で水素の外層を失ったモデルを考える。外層を失った星の爆発としては重力崩壊型超新星爆発である Ib 型や Ic 型超新星爆発があるが、似たようなモデルから Ia 型超新星に至る経路があるのかを探る。計算には、恒星進化コード MESA および原子核反応を考慮した流体力学のコードを用いる。

MESA を用いた計算により、水素の外層を失った星は、初期質量およびヘリウム核の質量の違いによってその後の進化経路が異なることがわかった。その中から、Ia 型超新星爆発に至る可能性のあるモデルについてダイナミクスの計算に移行して爆発するかどうかをみた。本発表では、これらの結果を詳しく示し、議論する。

1. L. Li et al., arXiv:1805.05810
2. B. Wang, P. Podsiadlowski and Z. Han, MNRAS, 472, 1593 (2017)
3. Nomoto, K., ApJ, 322, 206 (1987)

14 質量移動による WD-WD 連星系の進化

安西 信一郎 (首都大学東京 宇宙理論研究室 M1)

Ia 型超新星爆発は WD の質量がチャンドラセカール限界 ($\sim 1.4M_{\odot}$) を超え熱核融合を起こした際の現象と理解されている。WD の質量を増加させる為に、主なモデルの 1 つとして WD-WD 連星の合体による Double Degeneration Model (DD) が考えられている。このモデルを議論するには連星系の時間発展を検討する事が重要である。

連星の合体には軌道角運動量を外部へ放出する必要があり、DD では重力波放射等の寄与による軌道角運動量損失を考えている。軌道角運動量を失えば軌道半径が縮小していく為、連星系のロッシュ・ポテンシャルで定義されるロッシュローブ半径を片方の星の半径が上回る場合がある。この条件下では連星間の質量移動が起こると考えられる。WD-WD 連星系に置いても、質量比によっては半径の数倍程度の距離でロッシュローブを満たす事から質量移動は起こり得ると考えられる。

本研究では WD の力学的タイムスケール等の情報からドナーとなる WD の半径がロッシュローブ半径と等しい条件下の安定な質量移動を仮定し、重力波放射等による軌道角運動量の変化から系の進化を追う。この質量移動は連星の質量比により大きく異なる。条件によってはエディントン光度限界を超え

る質量移動が起こり得る為、今回の計算では質量降着の上限をエディントン光度限界とし、ドナーから削り取られる残りの質量は連星系外部に放出されるとした。このとき系の外部に放出される質量により失う軌道角運動量を、放出される質量と軌道角運動量損失の比を仮定し計算に加えた。

以上の計算から、連星系の質量及び質量比により連星系の最終的な状態は大きく異なり、系の質量と質量比は WD-WD 連星系の進化を決定する要素である事を示した。

1. Eggleton, P. P. *Astrophysical Journal*, vol. 268, p.368
2. T. R. Marsh, G. Nelemans, and D. Steeghs. *Mon.Not.Roy.Astron.Soc.* 350 (2004) 113
3. Verbunt, Frank; Rappaport, Saul. *Astrophysical Journal* v.332, p.193

15 連星系における超新星爆風の伴星進化への寄与

小形 美沙 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

重力波観測で注目を集めた連星系はブラックホールのような大質量星に限らず、様々な質量の星を構成要素としている。その存在割合は中質量星では 50%、大質量星に至っては 80% 以上にもなるとされているほど、宇宙では一般的な系である。重力波が観測された後は特にブラックホールや中性子星によるコンパクト連星が注目を集めている。しかし、こういったコンパクト連星の形成メカニズムは未だに解明されていない。

$8M_{\odot}$ 以上の星では重力崩壊型超新星爆発を起こし、その残骸として中性子星やブラックホールが残ることが知られている。これらの多くは連星をはじめとする多重星の系に存在していることが観測からわかっている。さらに星同士が相互作用することが可能なほど近距離のものも存在し、その結果として爆風で伴星が飛ばされてしまうこともあるため、星の進化を左右する効果の 1 つとなっている。こういった星の中でも特に超新星爆発後も連星系を保つものについては、その後の伴星の進化に応じて中性子星連星を形成し得るため、コンパクト星形成の理解のためにも欠かせない存在となってくる。

本研究では重力崩壊型の超新星を主星に、主系列星の星を伴星にもつ連星系において、超新星爆発の爆風が当たることで伴星にどのような変化が起きるのかを MESA (Modules for Experiments in Stellar Astrophysics) を用いて数値計算を行った。Hirai et al. (2018) は超新星爆風が伴星に与える影響についての多次元流体シミュレーションを行い [1,2]、爆風が伴星に与えるエネルギーが爆風のエネルギーの 8-10% 程度であるとした [2]。さらにこの結果の中でエネルギーを得た伴星が膨張することが確認されている。伴星の膨張率と主星との距離によっては伴星が主星を飲み込んでしまう可能性もあるため、原始中性子星を含む系のその後の進化に影響を与え得る。そこで本研究では連星間距離と爆発のエネルギーに応じて変化することの膨張率を調べ、その後に起こる進化について考察を行った。

1. R. Hirai, H. Sawai and S. Yamada *ApJ* 792, 66 (2014)
2. R. Hirai, P. Podsiadlowski and S. Yamada 2018 (arXiv:180310808)
3. P. Podsiadlowski 2003(arXiv:0303660)

16 非熱的放射から探る重力崩壊型超新星周りの星周物質

松岡 知紀 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

大質量星の進化理論は重力崩壊型超新星やブラックホール形成の理解に直結する。しかし最終段階における進化には多くの未解決問題が存在し、現在の我々の理解は非常に限られている。近年の超新星の観測から、恒星進化の末期段階において非常に動的な質量放出を起こすことが示唆されているが、その物理的機構は不明のままである。この理解のためには、星周物質 (CSM) の様相を研究することが手がかりとなる。なぜなら、CSM は大質量星の最終段階における質量放出の情報を持っているからである。そして、CSM の存在下で超新星爆発が起こると、噴出物質と CSM の間で相互作用が発生し、電波や X 線といった非熱的放射が観測される。

超新星と CSM の相互作用に関する従来の理論的研究では、CSM の密度構造として定常恒星風を仮定することで、電波や X 線といった非熱的放射の放射強度を説明していた。一方で、観測から示唆される動的な質量放出では、CSM の密度構造は急峻になることが予想される。このような動的な質量放出により形成される CSM 構造に基づく非熱的放射の性質を理解することで、恒星終末期の質量放出の変遷とその機構に迫ることができると期待される。

本講演では非熱的放射に注目し、超新星と CSM の相互作用に関する研究について概説する。従来の研究 (e.g., Chevalier et al. (2006a)) では、超新星と定常恒星風の CSM の相互作用を考えているが、CSM の密度構造が急峻な変化をする場合、高密度な領域において free-free absorption や陽子衝突の効果が重要になると期待される。そこで自身の研究では CSM の密度構造を変え、さらにこれらの相互作用を加えた非熱的放射の計算をする予定である。また、密度構造と非熱的放射の関係について調べる計画もしており、本講演ではその研究経過について議論する。

1. Chevalier, R. A., & Fransson, C. 2006a, *ApJ*, 651, 381
2. Maeda, K. 2012, *ApJ*, 758, 81

17 Failed Supernova の高密度環境下におけるニュートリノ振動とその観測について

財前 真理 (東京大学天文学教室 M2)

Failed supernova とは非常に重い質量をもつ親星 (本研究では太陽質量の 40 倍) が進化の最後に起こす現象で、重力崩壊によって作られた衝撃波がその重い外層の降着により押しつぶ

され爆発できなくなるものである。このシナリオでは最後にブラックホールが生成されるため、恒星質量ブラックホールの起源だとも考えられている。ここから放出されるニュートリノはブラックホールが形成される直前の非常に高温高密度な領域で作られたものであるため、一般的な超新星爆発以上に高エネルギーかつ大量のニュートリノが放出される。したがってニュートリノスペクトルの観測がこの天体に対するアプローチとして非常に重要な鍵になる。

しかし観測されるニュートリノのスペクトルを推定するとき問題となるのは、超新星の中心部で作られたニュートリノのフレーバーがニュートリノ振動により変化することである。超新星内部でのニュートリノ振動は真空振動、物質振動 (MSW 効果)、そして集団振動 (ν - ν 相互作用) の 3 つに分けられる。特にこの集団振動は最近取り入れられ始めた非線形効果であり、原始中性子星付近で大きくニュートリノのフレーバーを複雑に変化させるため重要視されている。そこで実際の 1 次元流体シミュレーションから得られた電子密度分布とニュートリノスペクトルに対して振動効果の計算を行なったところ、高密度電子との相互作用がフレーバー変化を押しさへ込んでしまいすべての時間帯において集団振動が影響を与えないことがわかった。このことは一般的な超新星爆発と比べると特殊な状況であり、観測において非常に重要な特徴になり得る。本発表ではこの結果を観測に結びつけつつ議論を行う。

1. Sumiyoshi et al. *Astrophys. J.* 667, 382 (2007)
2. Dasgupta et al. *Phys. Rev. D* 77, 113002 (2008)
3. Chakraborty et al. *Phys. Rev. D* 84, 025002 (2011)

18 衝撃波による宇宙線加速のテスト粒子シミュレーション

上島 翔真 (青山学院大学大学院 M1)

宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が地球に降り注いでいる。この高エネルギー宇宙線は加速されていることが示唆されており、加速機構の候補の 1 つとして衝撃波統計加速が考えられている。この衝撃波加速のシミュレーションでは、多数の粒子の運動方程式と Maxwell 方程式を自己矛盾なく解く Particle In Cell (PIC) シミュレーションや、荷電粒子と乱流磁場の相互作用による運動を確率的に計算するモンテカルロ法を用いたシミュレーションが行われている。PIC シミュレーションの多くは計算機資源の都合上、現実とは異なる空間 2 次元、速度空間 3 次元で計算している。また、計算領域も現実の天体現象に比べて遥かに狭いので現実には存在するはずの長波長スケールの電磁場と荷電粒子の相互作用が無視されている。モンテカルロ法を用いたシミュレーションでは乱流磁場と粒子の相互作用を乱数を用いて確率的に計算しているため乱流磁場と荷電粒子のジャイロ運動を正確に解いていない。本研究では、電磁場を解析的に与えることで、現実の空間 3 次元、速度空間 3 次元で計算した結果と、空間 2 次元、速度空間 3 次元で計算した結果を

比較し、両者が一致する 1 例を発見した。その際、粒子と乱流磁場の相互作用に関して確率的に計算せず、ジャイロ運動を解く MPI 並列計算コードを開発した。本発表では、空間 3 次元、速度空間 3 次元の結果と空間 2 次元、速度空間 3 次元の結果の比較を示す。

19 ブラックホール中性子星連星の合体前電磁波対応天体について

和田 知己 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

2017 年 8 月、連星中性子星合体に伴う重力波 GW170817 と電磁波対応天体 GRB170817A 等が観測された [1]。この観測では連星中性子星の合体時に放出される重力波に加えて、ガンマ線から電波に至るまでの幅広い波長の電磁波が合体後の天体から観測され、ショートガンマ線バーストなど謎の多い高エネルギー天体現象に対する観測的な手がかりが与えられた。2020 年には日本の神岡で建設中の KAGRA も観測を開始する予定である。さらに、DECIGO などの宇宙重力波望遠鏡が観測を開始すれば連星合体前から電磁波および重力波が観測できると期待される。まさに重力波マルチメッセンジャー天文学時代の幕開けである。

これらの将来観測を考慮すると、合体前電磁波対応天体に関する研究は非常に重要であるが、現在まだ数は少ない。特にブラックホール中性子星連星に関するものは非常に少ない。ブラックホール中性子星連星は、合体前に中性子星が潮汐破壊されるかどうかで振舞いが大きくかわる。潮汐破壊される場合には、破壊された中性子星がブラックホールの周囲にばら撒かれ、その粒子を用いて光ることはできる。一方で、潮汐破壊を受けずにブラックホールに吸い込まれる場合には、このプロセスでは光れないと考えられている。しかしながら、中性子星の磁場のエネルギーを連星運動で解放することにより、潮汐破壊されない場合にも合体前に連星が光れる可能性が、メンブレンパラダイムの手法を用いたこれまでの研究で示唆されている [2],[3]。

本講演ではこれらの先行研究 [2],[3] を概観し、そのモデルの問題点を示す。その後、私が現在進めている連星磁気圏の解析的な研究の現状を報告し、その結果を用いて先行研究の問題点が解決できるかどうかを議論する。

1. Abbot, B.P. , et al. *PRL*, 119, 161101 (2017)
2. McWilliams, A.T., and Levin, J., *ApJ*, 742 90 (2011)
3. Lai, D., *ApJL*, 757 L3 (2012)

20 *NuSTAR* を用いたマグネター SGR 1900+14 の硬 X 線成分探査

丹波 翼 (東京大学 馬場研究室 M1)

マグネターは、自転周期およびその時間変化から算出される双極子磁場の強さが臨界磁場 4.4×10^{13} G を超える中性子パルサーであり、主に X 線帯域で輝く。マグネターの典型的な X

線光度は $10^{34-35} \text{ erg s}^{-1}$ で、スピンドウンで供給されるエネルギー $10^{32-34} \text{ erg s}^{-1}$ よりもはるかに大きいことがわかっている [1]。この観測事実は、マグネターのエネルギー供給源が自転ではなく、磁気活動であることを示している。強磁場エネルギーを非熱的な放射エネルギーに変換する機構ははっきりとはわかっておらず、磁気リコネクションやパルサーの振動など多くの説が唱えられている [1]。マグネターからの放射の特徴の1つに、100 keV 以上にまで伸びる硬 X 成分がある。起源は未解明だが、強磁場中の光子分裂も候補の1つである [1]。今後はより多くのマグネターで硬 X 線成分を精度良く測定することがこの成分の理解に繋がる。

SGR 1900+14 は、マグネターの中でも極めて強い双極子磁場 ($7.0 \times 10^{14} \text{ G}$) をもつ [1]。INTEGRAL の観測により、この天体は 10 keV 以上の硬 X 線成分をもつことが発見された [2]。また、その後の *Suzaku* の観測により、軟 X 線 (1–10 keV) では $kT \sim 0.5 \text{ keV}$ の黒体放射のスペクトルを、硬 X 線 ($> 15 \text{ keV}$) ではべき乗のスペクトル ($\propto E^{-\Gamma}$) をもつことが示された [3]。しかし、これらの観測は硬 X 線領域での感度が十分でなく、べき指数の不確かさは大きいままである。

我々は SGR 1900+14 を、硬 X 線の感度に優れた *NuSTAR* で 123 ks にわたって観測し、70 keV 以上まで有意な信号を捉えた。これは 50 keV までしか観測できなかった先行研究の限界を超えている。また、近隣天体 GRS 1915+105 による迷光の影響を取り除くことにも成功した。その結果、先行研究よりも精度良く硬 X 線領域のべき指数を定めることができた。さらに、この結果と他のマグネターを比較し、年齢や磁場強度との関係など、マグネターの普遍的な性質についても議論する。

1. Enoto, T., Shibata, S., Kitaguchi, T., et al. 2017, *ApJS*, 231, 8
2. Götz, D., Mereghetti, S., Tiengo, A., & Esposito, P. 2006, *A&A*, 449, L31
3. Enoto, T., Nakazawa, K., Makishima, K., et al. 2010, *ApJL*, 722, L162

21 量子論的 Synchro-Curvature radiation におけるメーザーと FRB

直江 知哉 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

FRB(Fast Radio Burst) は 1ms の間に 1GHz 程度の電波を放出する天体現象である。この天体現象は 2007 年に初めて Lorimer によって発見されて以降、現在までに数十の FRB が見つかっている。FRB の Dispersion Measure は 1000 程度でとても大きく、我々の銀河系の外で起きているという説が有力である。また FRB の輝度温度 TB は 10^{35} K と大きいことから、熱的放射ではなくコヒーレント光によるものだと考えられており、コヒーレント光の発生メカニズムには” particle bunching” と” maser” がある。磁場中における荷電粒子の運動は大き

く 2 つに分けられる。1 つは磁力線周りの円運動で、もう 1 つは磁力線に沿った運動である。前者による放射は Synchrotron radiation, 後者によるものは Curvature radiation と呼ばれている。だが実際には 2 つの運動の中間 (粒子が曲がった磁力線のまわりを螺旋運動しながら磁力線に沿って動く) もあり、この運動による放射は Cheng & Zhang(1996) によって初めて考案され、Synchro-Curvature radiation と呼ばれている。上であげた 3 つの放射で古典的に maser が生じるような状況がないかは以前より調べられており、その結果を用いて FRB が説明できないか議論している論文はいくつもある。しかし、中性子星の極付近のような磁場のとても強い状況 ($B=10^{12} \text{ G}$) では、その磁場の大きさから粒子が数メートル進む程度の中に放射によってランダウ順位がとても小さくなり量子論が効いてくるだろうと考えられている。よって、古典論での議論は正確でないかもしれない。だが、実際に量子論で放射を求めている先行研究はあるが maser が生じるかどうかまで議論しているものはない。よって、本研究では量子論での Synchro-Curvature radiation で maser の可能性について、また、polar gap のような磁場の強い領域からの放射によって FRB を説明できないかを議論した。

1. G.Voisin,S.Bonazzola,and F.Mottez,”Dirac states of an electron in a circular intense magnetic field”,2017
2. G.Voisin,S.Bonazzola,and F.Mottez,”Quantum theory of curvature and synchro-curvature radiation in a strong and curved magnetic field,and applications to neutron star magnetospheres”,2017

22 強磁場激変星うみへび座 EX における非平衡プラズマの発見

迫 聖 (奈良教育大学 天文研究室 M1)

激変星とは白色矮星 (主星) と恒星 (伴星) が互いに近接して連星系を組んでいる近接連星系天体である。白色矮星が強い磁場を持つ強磁場激変星 (magnetic Cataclysmic Variable; mCV) の場合、伴星からの降着物質は主星の強い磁場に沿って主星の表面に柱状の降着柱を形成しながら、高速で落下する。その際生じた衝撃波により降着物質は 1 億度以上に加熱され、高温プラズマが生成される。このプラズマは X 線を放射し、冷えながら降着するため、柱内には温度構造ができることが知られている。プラズマ生成では、先に粒子が加熱され、その後に電離が起こる「電離優勢状態」にある。あるいは、衝撃波加熱以外に電離が起こる場合はその逆の「再結合優勢状態」も考えられる。しかしながら、これまでのほとんどの研究では、それらが釣り合った電離平衡状態として考えられてきた。

そこで、本研究では mCV のプラズマが電離平衡であるかどうかを検証するために、うみへび座 EX (以後、EX Hya) について「すぎく」の公開データ [1] の解析を行った。解析では XIS (1–12 keV) と HXD (10–40 keV) のスペクトルを、従来のように電離平衡プラズマモデルと白色矮星表面での反射成分モデ

ルでの再現を試みた。すると 9–10 keV で残差が生じた。そのエネルギー帯域と形状から、その残差は完全電離した Fe の再結合連続 X 線 (以後、RRC, エッジエネルギー=9.18 keV) による可能性が考えられる。実際に、RRC モデルに追加すると残差は解消し、再結合する電子の温度は $kT_e = 2 \pm 1$ keV であることがわかった。この RRC モデル成分の追加の有意度は 4σ だった。

本結果では、RRC の追加が必要であったことから、電離平衡状態よりも再結合の頻度が高い。すなわち、「再結合優勢状態」にあると考えられる。また、その電子温度 $kT_e = 2 \pm 1$ keV から、このプラズマは降着柱の白色矮星表面付近にあると考えられる。本講演では解析結果の詳細を報告し、EX Hya の再結合優勢プラズマの生成機構について議論する。

1. Hayashi T. & Ishida M., 2014, MNRAS, 441, 3718 43

b 講演 (b1–8)

23 ハイパー核を持つ中性子星の Cooling

土肥 明 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

中性子星の内部は主に中性子の縮退圧により支えられているが、それのみで計算した時の中性子星の最大質量は約 $0.7M_\odot$ となる。実際の観測による質量は約 $1.4M_\odot$ であるため、中性子星の内部の状態方程式 (EOS) を考えるには縮退圧のみならず核力の効果も考えなければならない。しかし、核力に関してはまだ不明な点が多い。数ある中性子星内部の EOS の 1 つに 2014 年、Chen と Piekarewicz によって開発された EOS (FSU2) がある。この EOS は次のことが考慮されている。①核物質及び有限原子核の性質の再現性、②重イオン衝突の実験の結果、③中性子星の観測的上限値が $2.01M_\odot$ 、④中性子星内部での核子のペアリング。

特に、④は中性子星のニュートリノの放射率に関わる。中性子星は熱源を持たないで中性子星内部でニュートリノ放射が効くと温度が急激に下がる。(Cooling) ④の効果は EOS に関係なく起きる一般的な Cooling にも影響を与える。その付加的な Cooling への影響について書かれた論文 (R.Negreiros, 2018, arxiv1804.00334v1) についてレビューする。この論文により、核子を含む EOS による Cooling は、核子のペアリングの有無に関わらず、Cooling の観測結果とよく一致していることがわかった。さらに、ハイペロンを含む EOS による Cooling では特に観測結果とよく一致していることが分かった。これは、中性子星の Cooling の観測結果を説明するためには、中性子星の半径が小さくなるような柔らかい EOS が適していることを示唆していると考えられる。私の興味の対象は中性子星より半径が小さいクォーク星、ハイブリッド星の Cooling であるが、この論文で得られた結果を応用するとそういった Exotic な星の Cooling についても言及することができる。本講演では、レビューした論文結果に基づいて、Exotic な星の EOS に課せられる制限についても述べる。

1. Chen, W.-C., & Piekarewicz, J. 2014, Phys. Rev., C90, 044305
2. Tolos, L., Centelles, M., & Ramos, A. 2017a, Astrophys. J., 834, 3
3. Page, D., Lattimer, J. M., Prakash, M., & Steiner, A. W. 2004, The Astrophysical Journal Supplement Series, 155, 623

24 Tomo-e Gozen で迫る Ia 型超新星の color-luminosity relation に見られる多様性

有馬 宣明 (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 M2)

炭素・酸素からなる白色矮星が起源とされている Ia 型超新星という種族 (以降、SN Ia) は、爆発時の白色矮星の質量が一定 (理論限界質量 $\sim 1.4M_\odot$) であると考えられているため絶対光度がほぼ一定であり、非常に明るい (Mv \sim -19.3 mag) ことから、これまで遠方宇宙の距離指標として宇宙論研究に用いられてきた。しかし、その爆発シナリオは定まっておらず、また観測的な経験則として知られる、より明るい SN Ia ほど緩やかに減光する、という光度曲線に見られる関係 (=Phillips relation) も未だ物理的な理解がなされていない。SN Ia の性質の物理的な理解なしでは、これを用いた距離測定に基づく宇宙論パラメータの制限に対する信頼は得られない。

近年の測光データに基づく研究により、Phillips relation を用いて明るさを揃えた SN Ia の中でも、本質的にカラーの異なる 2 つ以上のサブグループが存在していることが示唆されている (e.g., Takanashi et al. 2017)。しかし、測光データからのみでは、extinction の影響により超新星固有のカラー情報のみを抽出することは困難である。一方、Branch et al. 2009 では、極大期付近の吸収線 SiII(5750Å, 6100Å) の等価幅 (連続光に対する吸収線強度を表す観測量) から、温度や膨張速度といった物理量の異なるグループに分類を行ない、分光学的な性質の多様性に迫る研究がなされてきた。こうした経緯から、私は過去のアーカイブデータを用い、明るさを揃えた SN Ia の intrinsic なカラー分布を補正する新たな分光学的パラメータを探っている。

また、我々は今年 9 月から本格的にスタートする、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡に搭載する「Tomo-e Gozen」と呼ぶ、20 平方度という非常に広い視野をわずか 0.5 秒で撮像が可能な高速読み出しカメラ、による超新星サーベイを計画している。本講演では上記のような Ia 型超新星の本質的な多様性、という自身の現在のアーカイブデータによる研究経過と、その目的のためのサンプルを生み出す Tomo-e Gozen 超新星サーベイ計画についての概要及び現状を兼ねて報告する。

1. Phillips, M. M., 1993, ApJ, 413, L105
2. Branch et al., 2009, PASP, 121, 238
3. Takanashi et al., 2017, MNRAS, 465, 1274T

25 球状星団におけるコンパクト連星を対象とした P³T 法のコード開発

吉成 直都 (東京大学天文学教室 M1)

本研究では Particle-Particle Particle-Tree: A Direct-Tree Hybrid Scheme for Collisional N-Body Simulations (S.Oshino et al. (2011)) のレビューを兼ねて、球状星団で形成されるコンパクト連星について述べる。

球状星団とは、銀河のハロー内に存在する 10 万から 100 万ほどの恒星が密集した天体である。球状星団のような重力多体系では、恒星どうしの相互作用が頻繁に起こる。その結果、3 体遭遇が起こり、連星が形成されると考えられている。その連星がさらに他の星と遭遇すると、軌道が縮まり合体すると重力波を放出する。

そこで、我々は、N 体シミュレーションを用いて球状星団の進化を数値計算する過程で、どれほどの連星が形成するのかを調べる必要がある。重力多体系の時間進化を計算するのに P³T 法という N 体シミュレーションがしばしば使われる。これは、遠方の星からの重力をまとめて計算し、近傍の星は直接計算することで低い計算コストで時間積分を行う手法である。しかし、球状星団内におけるブラックホールのようなコンパクト連星の軌道進化を計算するには、その連星のみ別のアプローチをして数値計算しなければならない。現時点では既存のコードで連星と P³T 法の両方を取り扱っているものがないため、それらを扱えるようにしたコードの開発に取り組んでいる。

1. S.Oshino, Y.Funato, J.Makino 2011, PASJ, 63, 881-892
2. M.Iwasawai, P.Z.Simon, J.Makino 2015, ComAC, 2, 6, 15

26 重力波の模擬データ解析

木村 優斗 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

2015 年 9 月、連星ブラックホールからの重力波が LIGO によって初めて検出された [1]。その後も連星ブラックホールからの重力波が 4 度検出され、2017 年には連星中性子星からのものも検出された [1]。このような重力波検出の大きな進歩を果たし、重力波天文学の時代が訪れることとなった。重力波検出装置である LIGO、Virgo や KAGRA は 2 本のアームを用いて空間の歪み (ストレイン) を計測している。ストレインはとても小さな値であり、また、地面の揺れや鏡を吊るすファイバーの振動などのノイズによって、ストレインが埋もれてしまう。そのため、ノイズの中から小さなストレインを見つけることはとても難しい。ゆえに、いかにしてノイズに埋もれたストレインを見つけることができるのか、データ解析が重要となる。私は LIGO Open Science Center にある LIGO のデータを使って、重力波のデータ解析を学んでいる。今後は LIGO のデータにノイズを加えた模擬データを作成し、同じ方法で重力波の波形を取り出すことができるのかを調べようとしている。どの程度の

ノイズであれば同じ結果が導かれるのか、もしくは導くことはできないのかを調べ、重力波を見つけることの難しさを例示したい。本発表では重力波検出のデータ解析についての方法を説明し、作成した模擬データの解析について、その手法と今後の結果からわかったことを発表する予定である。

1. Abbott, B.P. et al., Phys. Rev. Lett. 116, 061102(2016); 118, 241103(2016); 118, 221101(2017); 119, 141101(2017); 119, 161101(2017)
2. <https://losc.ligo.org/about/>
3. 川村静児, 基本法則から読み解く 物理学最前線 17 重力波物理の最前線, 共立出版, (2018)

27 大気チェレンコフ望遠鏡 CTA で観測するガンマ線バースト

大谷 恵生 (東京大学 宇宙線研究所 M1)

電磁波を用いた長年の宇宙観測から、我々の宇宙には非熱的に多くのエネルギーを放出する様々な高エネルギー現象が起きていることがわかった。これらの現象として、銀河系内ではパルサーや超新星残骸、銀河系外では活動銀河核などがあげられるが、この中でもガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst, GRB) と呼ばれる現象は、数十秒以内で 10^{53} erg にも及ぶエネルギーを解放する最も激しい爆発現象である。GRB の性質として、光速の 99.9999% に至る超高速のジェット流を放出することや、即時放射と残光放射と呼ばれる放射を伴い、様々な波長域の電磁波を放出していることなどがわかっている。しかし、Fermi 衛星の限られた有効面積では光子の統計が不足していることや、100 GeV 以上における銀河系外背景光 (Extragalactic Background Light, EBL) のガンマ線吸収の影響で MAGIC、H.E.S.S.、VERITAS などの地上チェレンコフ望遠鏡が未だ GRB を観測できていないことから、GRB の発見から 40 年以上経過した今でも多くの基本的な点が未解明となっている。

本講演では、GRB についてのレビュー、および次世代ガンマ線天文台 Cherenkov Telescope Array (CTA) が GRB の放射機構の解明に対してどのように貢献するかを述べる。CTA は 20 GeV のエネルギー閾値が見込まれており、EBL 吸収の影響が少ないエネルギー帯で GRB が観測できる。また、数十 GeV のエネルギー帯で比較すると、CTA は Fermi 衛星に比べて 1 万倍以上の有効面積を誇るため、GRB のように激しい短時間変動を示す突発天体の観測には絶大な威力を発揮する。さらに、現在建設中である CTA の大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) は 20 秒間に 180 度という高速回転性能を持つため、継続時間の長い GRB の一部については即時放射中に観測可能であり、Fermi 衛星では得られない 20 GeV 以上での詳細なスペクトルおよび時間変動のデータが期待される。これらの観測結果から、GRB の即時放射および残光放射の物理的機構や、ジェットの運動速度およびその機構についての理解、さらには GRB が最高エネルギー宇宙線の起源である可能性に

についても検証できると期待される。

1. Cherenkov Telescope Array 計画書, 2014, CTA-Japan Consortium

28 MCMC 法を用いた FSRQ 型活動銀河核ジェットの SED の解析

平出 尚義 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M1)

活動銀河核 (AGN) とは銀河のうち、太陽系程度の大きさから銀河全体を凌駕する明るさで輝く天体である。AGN の中には光速近くまで加速されたジェットを放射しているものもあり、ジェットの視線方向が地球を向く天体をブレーザーと呼び、さらにブレーザーの中でも特に明るい天体を FSRQ と呼ぶ。FSRQ のエネルギースペクトル (SED) は 2 山構造を取り、それぞれシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱であるとされている。これは SSC と EC で説明でき、SSC はジェット中の相対論的な速度になった電子が種光子を出すと同時に同領域の種光子を逆コンプトン散乱するモデルで、EC は種光子がジェット以外の場所である降着円盤、BLR、分子雲トラスからも放出され、逆コンプトン散乱するモデルである。その SED を fit することで磁場やドップラー因子などのジェットのパラメータを推定することができる。従来は FSRQ の放射の理論式は複雑かつパラメータの多さから計算量が多く、SED の fit が困難であった。そこで Finke et al. (2016) で用いられた放射式の近似計算を用いて計算の高速化を行った。そして MCMC 法と呼ばれる乱数を用いてパラメータの確率分布を推定する方法により、大量の時期のデータの一つ一つ目で見てパラメータを固定する方法から、自動で fit してパラメータの連続的な変化を不定性を含めて推定する。

本研究では 3C279 を対象とし、その多波長データから SED を MCMC 法を用いて計算してパラメータを推定する。3C279 は $z=0.536$ にある FSRQ でたびたび多波長領域でフレアが観測されている。2018 年 4 月にもフレアが起きており、この天体の大量の時間変動の SED を作成することによりパラメータの推定を行う。これにより今までわかっていなかったジェットのどの領域からガンマ線が発生しているのかや、フレアの発生メカニズムについて調べる。展望として大量の FSRQ について SED fit を行うことで、天体ごとのパラメータを調べ、ジェットの進化に迫る。本発表では FSRQ の放射モデルとその計算手法、解析結果について述べる。

1. Finke et al. The Astrophysical Journal, 768,54 (2008)
2. Finke et al. The Astronomical Journal, 830,94 (2016)
3. Hayashida M. et al. ApJ 807,79 (2015)

29 Astronomy Letters, 2018 Vol.44 No.6 (2018) の論文紹介

多良 淳一 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

SS433 は銀河系内に存在する X 線連星である。SS433 からは宇宙ジェットが噴出しており、また他天体に比べて我々との距離が近く詳細に構造を分解することができるため、これまでも活発に研究が行われてきた。先行研究から、ジェットにおけるニッケルの存在比が太陽組成の約 10 倍と推定されている。ニッケルが過剰に存在している原因は明らかにされていない。現在提案されている原因は、伴星のニッケル存在比が高い、ジェット噴出領域でニッケルが生成されている、などが挙げられる。そこで本論文は、ニッケル過剰の起源を明らかにするために、ディスクからのウィンドにおける太陽組成に対するニッケルの存在比に制限を与えることを試みた。解析には、2012 年 10 月 3 日-5 日に EPIC-pn カメラを用いて観測されたデータを用いている。フィッティングモデルには、以下の 2 つを用いた。1 つ目は、APEC モデルに基づいた熱 X 線放射スペクトルモデルである。2 つ目は、現象論的アプローチでそれぞれの輝線にガウシアンをフィッティングし、連続光としてべき乗を仮定したモデルである。R_{flour} を鉄の蛍光輝線強度に対するニッケルの蛍光輝線強度の値と定義する。これらのモデルについて、天体への見込み角などを変化させた際に R_{flour} がどのように変わるかを検証した。その結果、R_{flour} はニッケルの相対的な存在比によりほぼ決定されることが確認された。

これらのモデルを観測データにフィッティングした結果、いずれも同程度の R_{flour} であることを明らかにした。または、この値を用いてジェットとウィンドにおけるニッケルの太陽組成に対する存在比をそれぞれ見積もった。ジェットでの値に対するウィンドでの値の比は上限が 0.64 であることが明らかになった。ジェットとニッケルの存在比が大きく異なることから、伴星のニッケル存在比が高いという可能性は棄却されると考えられる。よって、降着円盤の中心部でニッケルが生成されていることが示唆される。

1. P. Medvedev et al. Astronomy Letters, 2018 Vol.44 No.6 (2018)

30 Hydrodynamically simulating the SS 433-W50 interaction

小野 宏次朗 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

SS 433 は、わし座の方向にある超新星残骸 W50 の中心付近に位置するマイクロクエーサーである。SS 433 は系内銀河に位置していることから、多波長による詳細な観測行われており、構造の理解が深められている数少ない天体として知られている。

SS 433 の大きな特徴として、双方向に光速の約 0.26 倍の速度を持つジェットを噴出していること、このジェットが約 162 日の周期で歳差運動をしていることなどが挙げられる。一方、

W50 は球状構造の中に、東西方向に細長く突き出た”ear” と呼ばれる領域を持っている。ear の位置と SS 433 のジェットが揃っていることから、この特異な構造は超新星残骸殻 (シェル) とジェットの相互作用によって形成されたと考えられている。しかし、東部の earの方が西部の ear に比べ 1.4 倍の広がった構造を持つなど、その形成過程には謎が多い。

本講演でレビューする Goodball ら (2011) では W50 の特異な構造の形成起源の解明を目的とする、流体シミュレーションが行われた。初めに超新星爆発を起こすことでシェルを形成し、その後、歳差したジェットを噴出させ、その時間発展を計算した。その結果、星間ガスの密度を銀河面に近い西部ほど高密度にすることで、ジェットとシェルによる相互作用から W50 の特異な構造を再現することができることがわかった。加えて、W50 の年齢、および超新星爆発の間に生まれた SS 433 の中心天体の年齢が 17000 – 21000 年の範囲であることが明らかとなった。

本講演では、レビューに加えて、紹介論文で考慮されていない磁場の効果を取り入れた MHD シミュレーションによるシェルとジェットの相互作用についての簡単なモデルを用いた結果についても紹介する。

1. Abell, G. O., & Margon, B., Nature, 279, 701 (1979)
2. Goodall, P. T., Alouani-Bibi, F., & Blundell, K. M., MNRAS, 414, 2838 (2011)

c 講演 (c1-22)

31 超臨界降着流とスリム円盤モデルの違い

北木 孝明 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D1)

非常に高い X 線光度 ($L_X > 10^{39}$ erg/s) で輝く超高光度 X 線源 (Ultra Luminous X-ray source, ULX) と呼ばれる天体がある (Makishima+2000)。その正体は恒星質量ブラックホール ($M_{BH} \sim 10M_\odot$) への超臨界降着 (エディントン降着率 $\dot{M}_{Edd} \equiv L_{Edd}/c^2$ を超えた降着、 L_{Edd} はエディントン光度) か、中間質量ブラックホール ($M_{BH} \sim 10^3M_\odot$) への亜臨界降着かが論争になっている (Feng & Soria 2011)。しかし、ULX パルサーと呼ばれる中性子星が発見され (Bachetti+2014)、初めて現実の天体でも超臨界降着が起きていることが確定した。

超臨界降着の理論はまだ開拓されたばかりでよくわかっていない。超臨界降着流は放射圧優勢の光学的に厚い円盤であり、非常に多量のアウトフローが吹き出している。そのため放射流体シミュレーションが不可避であり、近年漸く実行されるようになった (Ohsuga+2005)。しかし問題として、計算領域が狭かったためにアウトフローをきちんと解いた研究はほとんどなかった。また、1次元解析解であるスリム円盤モデルとの違いも詳細には明らかとなっていなかった。

スリム円盤ではアウトフローが考慮されていない。そこで超臨界降着円盤のパラメータ依存性を明らかにし、アウトフロー

の影響に着目してスリム円盤と超臨界降着円盤の違いを解明した。研究方法としては、先行研究よりもかなり広い空間領域で 2次元放射流体計算を行い、解析モデルとの丁寧な比較解析を行った。

結果として、広範囲の定常流が得られ、光子補足半径より中では、アウトフローの質量噴出率が無視できることを世界で初めて明らかにした。そしてその原因が、円盤表面密度の減少であることを突き止めた。さらに定常円盤を丁寧に解析し、超臨界降着流とスリム円盤のパラメータ依存性が良く一致することを示した。しかし、円盤密度と動径速度の半径 r 依存性は、対流効果によってスリム円盤とは大きく異なることも明らかにした。

1. Makishima, K., Kubota, A., Mizuno, T., et al. 2000, ApJ, 535, 632
2. Bachetti, M., et al. 2014, Nature, 514, 202
3. Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, ApJ, 628, 368

32 位置天文学的重力マイクロレンズ現象を用いた、BH の質量決定

片岡 叡 (国立天文台 M1)

重力マイクロレンズ現象とは、光源となる天体 (ソース天体) からの光がそれよりも手前を横切る天体 (レンズ天体) の重力によって曲げられることで、一時的にソース天体が増光して見える現象である。また、重力マイクロレンズ現象による変化は増光だけでなく、見かけのソース天体の位置のずれとしても現れる。これらを観測することで、レンズ天体の物理量が得られる。

現在まで、重力マイクロレンズ現象による光度変化の観測は盛んに行われているが、レンズ天体が単独の場合、光度変化のみからレンズ天体の質量を求めることは困難である。しかし、ソース天体の位置のずれを観測することで、光度変化の観測からはわからなかったアインシュタイン角半径を求めることができるため、レンズ天体の物理量に新たな制限がつけられる。これに加えて、年周視差の効果が現れていれば、位置天文学的な観測と合わせることでレンズ天体の質量を一意に決定することができる。これは、自ら光を発さないような単独で存在する中性子星 (NS) やブラックホール (BH) の質量を決定することができる唯一の方法である。NS や BH の質量を決定し、その存在量を見積もることは、恒星や銀河系の進化を考える上で重要である。

このような科学的背景を踏まえ、本講演では重力マイクロレンズ現象の OGLE による地上観測と、Gaia 衛星による位置天文学的観測を組み合わせた BH の質量決定について紹介する。Rybicki et al. (2018) により、年周視差効果が見られる BH 候補イベントに対して Gaia の擬似データを組み合わせることで、BH の質量決定に必要な条件が見積もられた。これについての

詳細なレビューを行い、自身の研究計画を踏まえた将来展望について議論する。

1. K,A,Rybicki.,et al.,MNRAS,476,2013 (2018)
2. Wyrzykowski,L.,et al.,MNRAS,458,3012 (2016)

33 高精度磁気流体コード CANS+ を用いた降着円盤の局所 3 次元シミュレーション

富吉 拓馬 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1) 一般に弱い磁場を持った差動回転する円盤では磁気回転不安定性 (MRI) が成長し、これが降着円盤の角運動量輸送を支配していると考えられている (Balbus & Hawley, 1991)。磁気流体 (MHD) コードを用いた降着円盤における MRI の数値計算は数多く行われているが、円盤全体にわたって計算する方法と、一部分について計算する方法の大きく 2 つに分かれている。今回は降着円盤内で成長する磁気乱流をより高い解像度で計算することができる後者の方法を採用し、先行研究より解像度の高い空間 5 次精度での計算を行った。

本発表では 3 次元 MHD 計算コード CANS+ にシアリングボックス近似を実装した結果を先行研究と比較してその妥当性を示し、この手法が今後どのような課題に応用できるかについて述べる。

1. Balbus, S. A., & Hawley, J. F., 1991, ApJ, 376, 214
2. Hawley, J. F., Gammie, C. F., & Balbus, S. A., 1995, ApJ, 440, 742
3. Stone, J. M., & Gardiner, T. A., 2010, ApJS, 189, 142

34 ブラックホールの超臨界成長・円盤スペクトルの効果

竹尾 英俊 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D2)

宇宙初期 (赤方偏移 $z \sim 7$) における超巨大ブラックホール ($> 10^9 M_\odot$) の存在は、ブラックホールの急成長を示唆するが、その具体的な成長過程は不明である。こうした急成長には、超臨界降着 (エディントン限界を上回る降着) が不可欠とされる一方、ガス降着に伴う輻射電離加熱により超臨界降着は困難とされてきた。

これまで我々は、多次元効果がブラックホール降着成長に与える影響を研究してきた。そして、非等方輻射 (降着円盤の回転軸方向に強く、赤道面方向には弱い) 中では、超臨界成長が可能であること、また、 $M_{\text{BH}} \gtrsim 5 \times 10^5 M_\odot$ の大質量ブラックホールについて、電離領域が消滅すること (全系の中性化) を明らかにしてきた (e.g., Takeo *et al.* 2018, Sugimura *et al.* 2017)。

従来の研究では簡単のため、 $\propto \nu^{-1.5}$ という 13.6eV の電離光子を最も多く放出する、ソフトな輻射スペクトルが仮定されてきた。しかし、輻射源とされる降着円盤の温度は $\sim 10^8$ K 程度

に達し、keV 領域にピークをもつハードな輻射を放出することが知られている。一方で、ハードな光子は電離吸収に対して光学的に薄く、輻射フィードバックへの寄与は減ずると期待される。こうした効果による、超臨界降着条件への影響は明らかにされていない。我々は、これまでの 2 次元輻射流体シミュレーションに、超臨界降着円盤モデル (スリム円盤, e.g. Watarai 2006) に基づくスペクトルを加味し、新しい超臨界条件を導出した。本講演では、上記計算結果に基づき、円盤スペクトルの超臨界降着への影響について紹介する。

1. Takeo, E., Inayoshi, K., Ohsuga, K., Takahashi, R. H., & Mineshige, S. MNRAS, 476, 673, (2018)
2. Sugimura, K., Hosokawa, T., Yajima, H., & Omukai, K. MNRAS, 469, 62 (2017)
3. Watarai, K. ApJ, 648, 523, (2006)

35 ブラックホールの突入による二次元の平行磁場を仮定した分子雲の動的応答

細谷 亮太郎 (筑波大学 宇宙理論研究室 M1) 近年 X 線観測により天の川銀河の中に恒星質量ブラックホール (BH) 候補が約 60 個見つかったが (Corral-Santana *et al.* 2016)、これらの BH は恒星と連星系 (X 線連星) を形成し、伴星からの豊富な物質の降着が BH を活性化することで観測が可能であった。このような BH は全体のごく僅かな量で、伴星を持たないような孤立したブラックホール (IBH) も考慮すると、実際には $10^8 \sim 10^9$ 個の BH が天の川銀河中にあると見積もられている (Agol & Kamionkowski 2002; Caputo *et al.* 2017)。そこで、IBH の観測が期待されているのだが、IBH は痕跡として、空間的にコンパクトで幅広い速度幅を持つ星間物質を残していく。W44 分子雲の「Bullet」はそのような BH の痕跡の候補である (Sashida *et al.* 2013)。

本研究では二次元の磁気流体シミュレーションを用いて、分子雲に突入する (shooting model) ブラックホール周辺のガスダイナミクスを調べた。そのまま計算すると「Bullet」の空間的な大きさが Bondi-Hoyle-Lyttleton 半径 (BHL 半径) で表され、観測されたものよりはるかに小さい。そこで、雲の中に平行磁場層を仮定することで、加速されたガスの領域は、BHL 半径よりもはるかに大きくすることに成功した。また、W44 分子雲の「Bullet」の位置 - 速度マップに「Y」形状を再現した。さらに Bullet のサイズは、妥当なパラメータセットを用いて 1 桁以内で再現され IBH が分子雲に突入してコンパクトな広い速度分散を形成する Bullet の shooting モデルを支持することができた。

1. Nomura, Oka & Yamada (2018)

36 重力崩壊型超新星爆発からの重力波シグナル

山本 浩之 (福岡大学 M1)

重力崩壊型超新星爆発 (以下単に超新星と呼ぶ) とは、太陽の約 8 倍以上の初期質量を持つ恒星が、その進化の最終段階を迎える大爆発現象である。超新星は一天体現象でありながら、極めて多彩な天体現象の謎を解き明かす鍵を握っている。例えば、超新星爆発後に残された中性子星・ブラックホールといったコンパクト天体の形成過程そのものであり、爆発時に合成される元素は銀河の化学的進化・物質循環を担っている。このような多面性から、超新星は宇宙・天文分野において最も注目される天体現象の一つである。ところがこのような重要性にも関わらず、その根本となる爆発の物理的なメカニズムは、60 年にわたる研究の歴史を持ちつつも、未だ完全には理解されていない。

超新星の爆発メカニズムを解明する鍵となるのが、ニュートリノと重力波である。両者は超新星の外層を通過する際に物質とほとんど相互作用せず観測者に届くので、超新星の中心の情報を運んでくる。しかし、超新星コアで生成されたニュートリノは、ニュートリノ球付近ではニュートリノ集団相互作用の効果、さらに地球の検出器に到達する前に物質との相互作用を受けニュートリノの型が変化し、超新星中心の情報に加えて副次的な情報が含まれてしまっている。したがって、超新星の「生の声」を届けるといった観点からは透過性のある重力波の方がより直接的な情報を持っている。この信号を解析することで、超新星中心における物質の状態や運動を知ることが可能となり、爆発メカニズムに迫ることができると期待されている。現在、世界中に多くのニュートリノ・重力波検出器が存在しており、日本国内でも Super-Kamiokande や KAGRA が稼働している。

今回の夏の学校では、ニュートリノ駆動型超新星からの重力波の定性的特徴やその放射過程について詳しく議論していきたい。

1. Murphy J. W., Ott C. D., 2009, ApJ, 707, 1173-1190

37 ガンマ線バーストのリバースショック

小林 敬史 (青山学院大学 M1)

ガンマ線バーストのリバースショックは減光時間が短く、観測が難しかったのだが、近年多波長での即時追観測が可能になったため、リバースショックからの電磁波放射を観測できるようになった。リバースショックからの放射もでるとして、シンクロトロン放射を仮定し、実際の観測結果と比べた。エネルギー変換効率に幅を持たせることにより、実際の観測で暗く観測されたガンマ線バーストのリバースショックの残光放射を説明することができた。

38 電子イオン 2 温度磁気流体計算による宇宙ジェット数値実験

大村 匠 (九州大学 宇宙物理理論研究室 D1)

X 線連星ジェットは、恒星質量程度のブラックホールから数光年に渡って伝搬している細く絞られた超音速なプラズマ流である。ジェットのエネルギーの起源は、中心天体の重力エネルギーの解放にある。そのため、ジェットは中心天体近傍ガスの元素組成や磁場といった情報を遠方へと伝える役割を担っている。また、ジェット伝搬によって、多数の強い衝撃波が形成されるため、衝撃波による宇宙線粒子加速の場としても注目されている。宇宙ジェットは高温希薄なプラズマ流であるため、流体の運動のタイムスケールよりもイオンと電子のクーロン衝突による緩和時間が長くなる。その結果、電子とイオンが異なる温度を持つ 2 温度状態となる。さらには、プラズマの運動量の大部分をイオンが担っていることから、ジェットの衝撃波によってイオンが優先的に加熱される。また、電子は輻射によってエネルギーを失うと考えられる。したがって、ジェット内では、電子温度がイオン温度よりも低い状態になると考えられる。しかし、ジェット内の 2 温度構造について着目した研究は、これまで行われていない。そこで本研究では、磁気流体方程式に新たに電子のエネルギー方程式を追加した 2 温度磁気流体方程式によってジェット伝搬数値実験を行い、ジェット内の電子とイオンの温度構造の違いについて検証した。その結果、ジェットのホットスポットで電子温度がイオン温度よりも一桁低下することを明らかにした。また、求めた電子温度を用いてジェットの表面輝度を求め、観測結果との比較を行った。今後は、ジェット生成機構である降着円盤において 2 温度磁気流体方程式を用いた数値実験を行っていく予定である。

1. Resser, S., M. et al., 2015, MNRAS, 454, 1848

39 セイファート銀河に強いジェットは存在するか？

米川 信哉 (東北大学 天文学専攻 M2)

活動銀河核 (AGN) とは、母銀河に匹敵するほどの光度を持つ銀河中心核である。AGN は電波の強弱による分類分けがなされており、電波で非常に明るい AGN を radio-loud AGN、比較的 low 光度な AGN を radio-quiet AGN と呼ぶ。radio-loud AGN は全体の 10% を占め相対論的速度の噴出物 (ジェット) が観測されているが、radio-quiet AGN はジェットが非常に弱いと考えられている。しかしながら近年、radio-quiet AGN であるセイファート銀河の X 線の中に、ジェット放射と考えられる短時間変動成分が含まれていることが指摘されている (Noda et al. 2014;2016)。これが正しいければ、セイファート銀河が強いジェットを持つことになる。

本研究では、NGC3227 や IC4329A の観測データを用いて、セイファート銀河の変動 X 線成分と電波成分を再現するシンク

ロトロン放射モデルを立てる。そしてそのモデルでシンクロトロン自己コンプトン散乱放射強度を計算し、現在建設中で TeV 帯域を観測する CTA 望遠鏡で検出できるかを議論する。もし CTA で検出できるのであれば、セイファート銀河に強いジェットが存在することが確定し、CTA の観測対象が格段に増えることになる。今回の発表ではこの研究の進捗を報告する。

1. Inoue S., Takahara F. ApJ, 463, 555 (1996)
2. Noda, H., Makishima, K., Yamada, S., et al. ApJ, 794, 2 (2014)

40 高エネルギーニュートリノ現象対応天体の追観測

森田 雅大 (東京大学 理学系研究科 天文学専攻 M1)

ニュートリノは相互作用をほとんど起こさないため、天体の内部機構を調査するのに有効であり、現在 IceCube 実験において TeV から PeV に及ぶ高エネルギーニュートリノ現象の観測が盛んに行われている。このような高エネルギーニュートリノは、放射源からの宇宙線とガスの反応 (pp 反応) や宇宙線と光子の反応 ($p\gamma$ 反応) によって作られるのだが、この宇宙線の起源については不明な点が多い。そこで現在、IceCube ではニュートリノを検出するとアラートが配信される仕様になっており、様々な波長域においてアラートとほぼ同時にフォローアップ観測を行うことで宇宙線起源の解明を目指している。

IceCube アラートは一様等方に分布しており、各アラートの位置の誤差は半径 1 度ほどである。そのためフォローアップ観測を行うに当たっては、誤差円領域内を素早く観測し天体を同定することが必要であり、この役割には木曾観測所の 1m シュミット望遠鏡を用いた視野直径 9° の広視野 CMOS カメラ (Tomo-e Gozen) が適している。

本発表では IceCube 実験のフォローアップ観測の現状の詳細をレビューし [1]、現在自研究としても取り組む予定である、Tomo-e Gozen による追観測に際してその性能や課題から、今後の研究の展望について述べる。

1. M.G.Aartsen, 2017, A&A, 607, A115
2. Morokuma, T., 2016, PASJ, 68, L9

41 コンパクト天体を含む 4 体系の軌道安定性における相対論的効果

鈴木 遼 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D1)

観測技術が目覚ましい発展を遂げ、2018 年 5 月現在で 3700 以上の系外惑星の存在が確認されている。多数の個性的な系外惑星の中で我々が注目しているのは、パルサーを中心に複数の惑星が公転している系 (パルサー・プラネット) である。パルサーは超新星爆発を経て形成されるので、周りに惑星が存在してい

るのは驚くべきことである。そのため、パルサー・プラネットの形成機構が議論の対象となっている。

惑星系の形成には軌道の時間進化が密接に関わっている。天体の軌道計算の歴史は古く、主に太陽系をその対象として発展してきた。Chambers et al. (1996) は、多体系の軌道計算により、惑星を 3 つ以上もつ系において「惑星間距離」と「軌道が安定性を保っていられる時間」に相関関係があることを示した。この研究では初期の太陽系を想定しており、「惑星の質量は木星以下」や「中心天体と惑星の距離は 1 AU 以上」等の条件のもとで、古典力学を用いて軌道を計算していた。しかし、代表的なパルサー・プラネットである PSR B1257+12 では、惑星が水星軌道より近い距離でパルサーの周りを公転しているため、一般相対性理論の効果が無視できず、先行研究の手法そのまま扱うことはできない。そこで本研究では、軌道計算手法を一般相対論的に拡張し、先行研究で古典力学を用いて調べられていた「惑星間距離」と「軌道が安定性を保っていられる時間」との相関関係が、相対論的効果を考慮することによりどのように変化するか調べた。計算においては、1 次のポストニュートン近似を用いた相対論的な運動方程式を採用し、それを Implicit Runge-Kutta 法を用いて直接数値積分した。本研究では特に「中心天体と惑星との距離が近い場合」「惑星が重い場合」に着目し、古典力学による計算と相対論を考慮した計算の結果を比較し、相対論的効果がどのように現れるのか調べた。

1. J. E. Chambers, G. W. Wetherill and A. P. Boss Icarus 119 261 (1996)
2. A. N. Youdin, K. M. Kratter and S. J. Kenyon ApJ 755, 17 (2012)
3. M. Konacki and A. Wolszczan ApJ 591 L147 (2003)

42 マグネターフレアに基づいた FRB 121102 の解釈

宇野 真生 (京都大学 天体核研究室 M1)

Fast Radio Bursts (FRB) と呼ばれる、継続時間がわずか数ミリ秒程度である電波バーストの存在が観測からわかっている。FRB 121102 のソース天体は、その継続時間が短いことから、コンパクト天体と推測されているおり、特に、マグネターからのアウトフローによって熱せられた $N \sim 10^{52}$, $E_N \sim 10^{48}$ erg, $R \sim 10^{17}$ cm を持つパルサー星雲と考えることができる。このような天体は定期的に起こるフレアによってそのエネルギーを開放し、星雲にエネルギーを与え、FRB を引き起こすと考えられている。今回は、実際に FRB のソースをマグネターと考え、特にマグネターからのフレアによって、FRB の観測と整合性のある結果が得られるかどうかを検証した。

星雲の粒子数は巨大フレアによって生じる ion ejecta によるものと整合性を持つ。また、FRB 121102 のソースは磁場の散逸や ejecta によって生じた内部衝撃波によって熱せられ、このような現象を考えることによって星雲の放射も説明される。ま

た、内部衝撃波によって粒子は GHz のシンクロトロン放射を伴うようなラーモア回転を起こし、これは ms のスケールで観測される。さらに、フレアの ejecta は charge-starvation を起こすこともあり、そのとき ejecta のエネルギーの一部は真空中の電磁場として放出する。

1. Beloborodov, Andrei M. *Astrophys.J.* 843 (2017)

43 連星系中性子星の X 線時間変動と状態遷移

河村 浩良 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1)
超高度 X 線パルサーの発見等を契機として中性子星への降着流の研究が活発化している。中性子星降着流では、中心天体の質量と降着率以外に中性子星の地場の強さと中性子星の回転速度等がパラメータとして加わるために、ブラックホール降着流に比べて時間変動のパターンが多く、理解が遅れていた。しかし、多数の連星系中性子星の X 線観測の結果から、ブラックホール候補天体のアウトバーストと同様に、降着率の上昇に伴って、硬 X 線が強い hard state から軟 X 線が強い soft state への遷移が起こり、さらに降着率が上昇すると Z-source と呼ばれる状態へ遷移することが明らかになった。中性子星の磁場が 10^9 G より小さいとき、アルベン半径が中性子星の表面付近まで小さくなり、降着物質は赤道面に降着する。磁場 10^{10} G 程度になると、降着物質は磁力線に沿って磁極に降着し、X 線パルスが観測されることがある。降着率がエディントン降着率の 10% より小さい場合、 10^9 G 程度の磁場でも、アルベン半径が中性子星の半径より十分大きくなり、磁極への降着が生じることがある。さらに降着率が低下すると、アルベン半径が共回転半径に一致したところで降着率が急激に低下し、暗い hard state に遷移する。

今回は、以上の中性子星高降着流の最新の描像を紹介するとともに、磁気流体コード CANS+(Coordinated Astronomical Numerical Software) を用いた中性子星の周りの降着円盤のシミュレーションの今後の計画について発表する。

1. Homan et al. *Astrophysical Journal*, 719 p.201-212 (2010)
2. Asai and Matsuoka (2012)
3. Takahashi (2017)

44 原始中性子星冷却におけるニュートリノシグナル

杉浦 健一 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

超新星爆発は、宇宙におけるニュートリノ発生源の一つとして知られている。大質量星が超新星爆発を起こすと、その中心部には原始中性子星 (PNS) が形成される。PNS はニュートリノを内部に溜め込んだ高温な星であり、このニュートリノが PNS 内部の物質と反応しながら外部に放出されエネルギーを

持ち出すことで、PNS の冷却が起こり中性子星へと至る。超新星からのニュートリノの大半はこの PNS 冷却過程で放出され、DUNE や JUNO などの将来の高感度ニュートリノ観測装置を用いれば、銀河系内の超新星については数千個のニュートリノが検出されると見積もられており、詳細にニュートリノ光度、スペクトルが観測されることが期待されている。

しかし一方で、PNS 冷却過程の理論的な研究は精力的にされている [1] もの、未だ発展途上にある。難しさの一端は、PNS は強い力で相互作用した高温・高密度核物質で構成されており、ニュートリノと核物質の反応は、高密度核物質の状態方程式に依存することにある。特にニュートリノの反応率は、中性子や陽子の感じる強い力による平均的なポテンシャルエネルギーに大きく依存することが知られており [2]、状態方程式とニュートリノ反応の一貫した取り扱いが、ニュートリノ光度やスペクトルを調べる上で重要となる。

以上を踏まえて本研究では、PNS 冷却計算に応用することを見据えて、核子の平均場近似を用いることで状態方程式とニュートリノ反応の首尾一貫した取り扱いの定式化を行う。特に理論的な面で不定性の大きい状態方程式については、現実的な核力ポテンシャルを基に構築された最新のもの [3] を用いて、従来の相対論的平均場を用いた状態方程式との違いも比較する。ニュートリノ反応率の状態方程式依存性は、超新星ニュートリノ観測から状態方程式に制限をかける手掛かりにもなりうるため、その観点から考察した結果も発表する。

1. K.Nakazato et al., *ApJS*, 215, 2 (2013)
2. L.F.Roberts, S.Reddy and G.Shen, *Phys. Rev. C*, 86, 065803 (2012)
3. H. Togashi et al., *Nuclear Physics A*, 961, 78 (2017)

45 マグネターにおけるコロナの形成と放射

林 航大 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)
本発表では論文 [1] に従って、マグネター周りのコロナの形成とそこからの放射について議論する。

中性子星のうち少なくとも 10% は $B > 10^{14}$ G の強磁場を持つマグネターとして生まれると考えられている。マグネターはその活動期には Soft Gamma Repeaters または Anomalous X-ray Pulsar として観測されてきた。また、散発的に起こる X-ray outburst の他にも、継続的な活動として表面からの $k_B T \sim 0.5$ keV の黒体放射、10keV 以上で支配的になる放射が観測されている。高エネルギー (10keV 以上) で支配的になる継続的な放射 ($L \sim 10^{36}$ erg/s) はマグネター周りのプラズマで形成されるコロナから放出される可能性が示唆されている。

本発表では、偶発的に起こる星震で生じるねじれた外部磁場によってコロナが形成されることを見る。具体的には次のような過程を考え、数値的に調べる。強磁場のもとでは磁場のねじれによって形成される誘導電場が星表面の粒子を加速し、その粒子による放射が雪崩的な e^\pm 対生成を引き起こす。形成され

た e^\pm プラズマが $\nabla \times \mathbf{B} = \frac{4\pi}{c} \mathbf{j}$ によって要求される電流を担い、また遮蔽によって誘導電場を制限する。重力で星表面に落ち込む粒子と、対生成で生じる粒子が自己組織化臨界の状態での動的な平衡が実現されるように誘導電場が維持される。これにより、磁力線に沿った電圧が 1GeV 程度になり、ジュール散逸によるエネルギー散逸率 ($\sim 10^{36}$ erg/s) が観測されているものと同程度になることを見る。

1. Beloborodov, A.M., & Thompson, C. 2007, Ap&SS, 308, 631-639
2. Kaspi, V. M., & Beloborodov, A. M. 2017, ARA&A, 55, 261

46 Common Envelope 初期段階における暴走的落下

鈴木 方隆 (東北大学 天文学専攻 M1)

高輝度赤色新星の放射には2つの特徴がある。まず、可視光域にピークを持つ急激な放射をした後、減衰しながら放射のピークが赤外線に移っていくことである。二つ目は、急激な放射の前に周期的な放射が見られることである。これらの特徴は、連星が外層を共有するほど接近しているとき (common envelope 期) の放射によって説明できると考えられている。重力波が観測されるようなコンパクト連星の形成にも関係している。本講演では連星の軌道進化を数値的に計算した、「Runaway Coalescence at the Onset of Common Envelope Episodes (Macleod, Ostriker and Stone 2018)」をレビューをする。

この論文では、重い星からより軽い星への不安定な質量輸送の流体計算を行っている。特に質量輸送が始まり、軌道半径が急激に減少して重い星の外層に他方の星が飛び込んでいく過程に着目している。結果として、連星系から吹き出すガスの形状は連星間距離が小さくなるにつれて大きく変化することが分かった。連星間距離が大きいときはラグランジュ点からガスが細く吹き出し、連星間距離が小さくなると広範囲に放出される。この過程を通して、質量放出率が一桁増加する。このような遷移過程が、高輝度赤色新星のような特徴的放射を説明しうることを見ていく。

1. Morgan Macleod, Eve C. Ostriker and James M. Stone arXiv:180303261v1 (2018)
2. R. Tylenda et al. arXiv: 1012.0163v2

47 重力崩壊型超新星爆発のメカニズム

秀島 健太 (福岡大学 M1)

太陽の約8倍以上の重さをもつ恒星は進化の最終段階において中心部に鉄のコアを形成する。この鉄コアが重力的に不安定になって急激に潰れ始め (重力崩壊)、それによって生じる爆発が重力崩壊型超新星爆発である。この現象は中性子星やブラッ

クホール天体の生成現場であり、爆発の際に形成される元素組成は銀河の化学進化にも重要な役割を果たしていると考えられており、天文学や高エネルギー宇宙物理解分野において最も注目される天体現象の一つである。しかし、重力崩壊型超新星爆発がどのような過程により起こっているのかは、長い研究の歴史を持ちつつも未だ解明されていない。この現象を解明するためにあたって、まず内部コアで起こっている現象を理解する必要がある。

重力崩壊が進み中心密度が核密度に達したとき、核力によって急激に圧力があがるため内部コアが外側の物質をはじき返し、内部コア表面に衝撃波が形成される。しかしこの衝撃波は、その背面で鉄の光分解とニュートリノ冷却によりエネルギーを失い、およそ半径が 100-200km の地点で一度失速し、外側から落下する物質の運動量とつり合う点で停止してしまう。停止した衝撃波が復活するにあたって重要になるシナリオが、ニュートリノ加熱メカニズムである。ニュートリノによって再加熱された衝撃波は再び外側に向かって動き出し、星の表面まで達して超新星として観測されると考えられている。

今回の夏の学校では、超新星はどのようなメカニズムで起こるのか、そしてニュートリノはどのように衝撃波を再加熱し復活に導くのかについて、最新の多次元シミュレーションの結果を交えながら詳しく議論していきたい。

1. Kei Kotake, Katsuhiko Sato & Keitaro Takahashi 2006, Rept. Prog. Phys. 971-989

48 超新星爆発シミュレーションにおけるニュートリノ輻射流体計算法

岐部 秀和 (福岡大学 M1)

太陽の約8倍以上の質量をもつ恒星は、元素合成の最終段階で中心部に鉄のコアを形成する。この鉄コアが重力的に不安定になることで急激に潰れ (重力崩壊)、それによって生じる爆発が重力崩壊型超新星爆発である。この現象は、自然界の4つの相互作用がすべて関与して起こるという点で非常に興味深い。しかし、重力崩壊型超新星爆発がどのような過程で起こっているのかは、過去40年以上にわたる理論研究にも関わらず未だ完全には理解されていない。

大質量星のコアでは、電子捕獲反応と光分解により重力崩壊がカタストロフィックに進み、中心密度が核密度に到達すると中心で核力による急激な圧力上昇が起きる。その情報が亜音速で伝わり遷音速点；原始中性子星の表面で、衝撃波が形成される。しかしこの衝撃波は、その背面での鉄の光分解とニュートリノ冷却によりエネルギーを失い一度、失速してしまう。この失速した衝撃波を復活させるシナリオとして、最も有力視されているのがニュートリノ加熱メカニズムである。ニュートリノによって再加熱された衝撃波は再び外側に向かって動き出し、星の表面まで到達すると超新星として観測されると考えられて

いる。ただし、この一連の流れを数値的に解くためにはニュートリノ輻射場と流体の間のエネルギー、運動量のやり取りを正確に解く必要がある。このニュートリノ輻射輸送問題をまともに解こうとすると、ニュートリノの分布関数に関するボルツマン方程式を差分化して解く必要があるが、その分布関数は時間、空間、位相空間の7変数に依存するので計算量が膨大になる。よって、現時点では何らかの近似を用いて解く必要がある。

今回の夏の学校では、超新星におけるニュートリノ輻射輸送問題をどのように数値的に解くのか、その歴史的な流れを追っていき、また最新の計算手法についても紹介していきたい。

1. M. Liebendorfer, S. C. Whitehouse, & T. Fischer 2009, *The Astrophysical Journal*, 698:1174-1190

49 ニュートリノ集団振動の4次元の摂動に基づいた絶対的・対流的不安定性

森長 大貴 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

重力崩壊型超新星爆発は、重力崩壊を起こした星が中心に原始中性子星を形成し、そこから放出されるニュートリノが周囲の衝撃波に吸収されることで発生すると考えられている。この時、ニュートリノの吸収効率は電子型ニュートリノが他のフレーバーを圧倒するため、フレーバーを変化させるニュートリノ振動を適切に扱う必要がある。ところが原始中性子星周辺で実現されるニュートリノの密度が極めて高い環境下では、ニュートリノ同士の自己相互作用に誘起されるニュートリノ集団振動と呼ばれる現象が発生し、ニュートリノ集団振動の発展方程式が数値的にも解くことが困難な“非線形積分偏微分方程式”となる。そこでニュートリノ振動が起きていない状態（フレーバー固有状態）に対して加えた微小な摂動が成長するか減衰するか、つまりフレーバー固有状態の安定性を見ることで、フレーバー転換の有無を判定する線形安定性解析が行われてきた [1]。この時、摂動に対する解の安定性は、線形化された偏微分方程式に加えた外力に対する応答の様子で、安定、絶対的不安定、対流的不安定という3種類に分類することができる [2]。先行研究ではニュートリノの角度分布として2-beamモデルと呼ばれる簡単なモデルを仮定した場合の安定性解析が行われ、モデルパラメータと安定性の関係が調べられている [3]。ところが、この先行研究では1次元空間に制限された摂動のみしか扱っていないという問題があったため、空間3次元の摂動を扱い解析を行う必要があった。そこで本研究では時空4次元の摂動を扱うことで、先行研究の時空2次元の摂動の場合と結果を比較し、絶対的不安定性が4次元の摂動の下では消滅するという重要な結果を示した。

1. I. Izaguirre, G. Raffelt, and I. Tamborra, *Phys. Rev. Lett.* **118**, 021101 (2017).
2. E. M. Lifshitz and L. P. Pitaevskii, *Physical Kinetic*

ics. Landau and Lifshitz Course of Theoretical Physics (Butterworth-Heinemann, Washington, DC, 1997), Vol. 10, Chap. VI.

3. F. Capozzi, B. Dasgupta, E. Lisi, A. Marrone, and A. Mirizzi, *Phys. Rev. D* **96**, 043016 (2017)

50 Improvement points to get more accurate distance value to type Ia supernova through dust extinction

Yun JeUng (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M1)

It is widely known that Type Ia supernovae (SNe Ia) are used to measure their distances. However, the explosion nature is still unclear until today. We can demonstrate the progenitor system if the signature of the circumstellar material (CSM) is obtained. In this decade, observational diversity has been discussed based on their expansion velocities of the ejecta. I discuss the relationship between the CSM signatures and ejecta properties among SNe Ia.

In this paper, the authors divide supernovae into two categories based on expansion velocity. SNe having the high-velocity features are HV SNe Ia. On the other hand, the others having the low-velocity features and averaged luminosities are normal SNe Ia. Some SNe Ia are suffered from the extinction by the host galactic dust. Authors demonstrate that the dust extinction coefficients of HV SNe Ia are quite low (R_v 1.6) comparing to those of normal SNe Ia (R_v 2.4). These indicate that the dust should be related to be the explosion nature of SNe Ia, suggesting that some SNe Ia have a circumstellar dust. It can give a constraint on the progenitor scenario, e.g., single-degenerate scenario.

Also, authors used average value of their examined supernovae because they examined 158 supernovae. However, among these 158 SNe, there are some good SNe that fit well with the theory, on the other hand, some other SNe are affected by severe scatter effect. Therefore, it is also interesting research to compare these two groups by selecting 10 SNe that have good results and other 10 SNe that are affected by scattering.

By further refining these parts that I mentioned above, we can provide more useful tools for cosmological studies.

1. X. Wang 2009ApJ...699L.139W
2. R. Amanullah MNRAS.stv1505

51 フェルミガンマ線宇宙望遠鏡による新星と超新星の調査

宇都宮 拓哉 (立教大学 M1)

観測的な天文学には、観測する電磁波の違いによって、赤外線天文学や X 線天文学、ガンマ線天文学などがある。その中でも、宇宙から飛来するガンマ線を観測して研究するガンマ線天文学では、観測対象として、超新星残骸や活動銀河、ガンマ線バーストなど、宇宙の高エネルギー現象や遠方の宇宙の現象などがある。本研究では、2008 年に NASA によって打ち上げられたフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡によるデータ解析を行う。フェルミ衛星は、アメリカ、フランス、日本などによる研究組織によって、共同開発され観測が始まった。観測波長は、ガンマ線であり、2018 年現在も観測を続けている。今回、観測対象としては宇宙の高エネルギー現象の一つである新星、超新星について調査する。新星とは、激変星の一種で、白色矮星と巨星の近接連星系において、白色矮星の表面での爆発により、明るさが劇的に増える現象である。発生原理としては、巨星からガスが白色矮星に流れ落ちて表面に降り積もり、その物質が、白色矮星の強い表面重力によって熱核暴走反応を起こし爆発を起こすというものである。超新星は、大質量星が最期を迎えるときに起こす大規模な爆発現象で、I 型や II 型など種類がある。I 型は新星と発生原理が似ており、II 型は、重い恒星が自身の重力により収縮し、中心部が重力崩壊を起こし、大爆発を起こすというものである。新星については、フェルミ衛星による観測がすでに行われている。しかし、実際にフェルミの感度の GeV 帯域のガンマ線が検出されている新星の数は 10 個程度と少ないため、それらの新星やそれ以外のものについて、さらに解析していきたいと思う。超新星については、フェルミ衛星の観測可能な GeV 帯域のガンマ線の観測がまだできておらず、その帯域のガンマ線の観測を目指している。

1. 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
2. A. Franckowiak, P. Jean, M. Wood, C. C. Cheung, and S. Buson *A&A* 609, A120 (2018)