

コンパクトオブジェクト分科会

守屋 堯 氏 (国立天文台)

7月25日 18:15 - 19:15 B 会場

超新星爆発とその多様性

超新星爆発は星がその進化の最後に起こす爆発現象です。近年行われるようになった大規模な変光天体サーベイにより、非常に多様な状態で星が爆発を起こしていることが明らかにされています。標準的な恒星進化理論の枠組みでは説明が出来ないような超新星まで見つかり始めています。さらには、通常の超新星の10倍以上も明るくなり、その明るさの起源すらも不明な超新星が存在します。この講演ではまず、星がどうして爆発し、爆発するとどのように観測されるかなど、超新星爆発の基礎を理論と観測の両面から紹介します。その後、近年明らかになってきた超新星の多様性を紹介し、そこから分かってきた超新星爆発や恒星進化の研究の課題を議論します。

衣川 智弥 氏 (東京大学)

7月27日 16:45 - 17:45 B 会場

重力波：連星ブラックホールの合体からわかったこと

2015年9月14日、アメリカの重力波観測器 advanced LIGO は世界で初めて重力波 (GW150914) の直接観測に成功した。日本でも重力波観測器 KAGRA がテスト稼働を終え、本格的な観測に向け動き出している。今はまさに重力波天文学の黎明期に位置している。重力波観測のメインターゲットはコンパクト連星の合体である。コンパクト連星は重力波放出により軌道が縮まり、いずれ合体する。LIGO による重力波の初検出は約30太陽質量の連星ブラックホールの合体によるものであった。一方で従来観測されてきた X 線連星内にあるブラックホール候補天体は10太陽質量程度であり、30太陽質量のブラックホールはほとんど存在しないだろうと思われていた。そのため、この GW150914 の連星ブラックホールの形成については謎が残り、様々な説が提唱されている。本講演ではこの重い連星ブラックホールの形成理論について紹介し、連星ブラックホール合体を重力波で観測することによってどのようなことがわかるのかを講演する。

1. Abbott B. P., et al. 2016 Phys. Rev. Lett. 116, 061102, Abbott B. P., et al. 2016 ApJL 818, L22
2. Kinugawa T., Inayoshi K., Hotokezaka K., Nakauchi D., Nakamura T., 2014, MNRAS, 442, 2963

コン a1 中性子星の状態方程式と質量

橋詰享亮 (首都大学東京 宇宙理論研究室 M1)

中性子星の内部を支えているのは主に中性子の縮退圧だが、そのみで中性子星の最大質量を計算すると約 $0.7, M_{\odot}$ となる。実際の観測による質量は約 $1.4, M_{\odot}$ となっているため、中性子星の内部状態を考えるには縮退圧だけではなく、核力などの影響も考慮に入れる必要がある。中性子星の内部に関してはまだ不明確な点が数多く存在するため、内部状態を考えるには仮定と原子核実験による具体的な値が必要となる。様々な仮定と実験による値から中性子星の内部の状態方程式 (EOS) は調べられてきており、今までにいくつもの予想された EOS が作られてきている。これらの EOS を、一般相対性理論における重力と圧力勾配のつり合いを表す TOV 方程式に代入して解くことにより、中心密度と半径、質量の関係を調べることができる。ただし、TOV 方程式は時間不変で球対称な計量のもとで Einstein 方程式を解いて導かれたものであるため、中性子星の自転や磁場は考慮されていない。この計算を行うと、それぞれの EOS において中性子星の最大質量が存在することが分かる。そのため、実際に観測されている中性子星の質量から EOS の制限を行うことが可能である。

本研究では、考慮された状態が異なる 3 つの EOS に関して実際に TOV 方程式を用いて計算を行った。TOV 方程式は圧力 P と密度 ρ が polytrope の関係 ($P \propto \rho^{\gamma}, \gamma = const.$) であれば数値的に解くことができる。しかし、実際の EOS では γ が一定ではないため、直接代入して計算を行うことは難しい。そこで、EOS を七つに区分化し、それぞれを polytrope に近似した EOS (piece-wise polytrope EOS) を使って計算を行った。そして、各 EOS のグラフと最大質量の関係性を調べた。

- 1 J.S.Read, B.D.Lackey, B.J.Owen, and J.L.Friedman, Physical Review D 79, 124032 (2009)
- 2 F. Douchin and P. Haensel, Astron. Astrophys. 380, 151 (2001), arXiv:astro-ph/0111092
- 3 Shapiro S.L., Teukolsky S.A., 1983, Black Holes, White Dwarfs and Neutron Stars, (Wiley, New York)

コン a2 スーパーチャンドラセカール超新星候補 SN Ia 2012dn の赤外線超過：星周ダストの空間分布と親星への示唆

長尾崇史 (京都大学宇宙物理学教室 D2)

近年、典型的なものより明るい Ia 型超新星が発見されてきた。これらの超新星の光度を ^{56}Ni などの放射性崩壊で説明するには、爆発した天体としてチャンドラセカール限界質量より重い白色矮星を考える必要がある。その為、これらはスーパーチャンドラセカール超新星 (SCSN) と呼ばれており、その起源が大きな注目を集めている。Ia 型超新星の親星として、二つの有力なモデルが提案されている。白色矮星と非縮退星の連星で

ある SD モデルと二つの白色矮星の連星である DD モデルである。しかし、このどちらが主な親星なのかは分かっていない。これらを観測的に区別する方法の一つに、星周物質を調べる方法がある。SD モデルでは、爆発前に伴星からの大きな質量放出が期待される為、比較的多くの星周物質を持つと予想されている。近年、SCSN 2012dn において、近赤外光度曲線の後期に超過が発見された (Yamanaka et al. 2016)。Yamanaka et al. (2016) と Nagao et al. (2017) では、超新星周囲のダストによる吸収/再放射がこの赤外線超過の起源であると、簡単なモデルを用いて提案した。本研究では、3 次元モンテカルロ放射輸送計算を用いて、この赤外線超過を説明できる星周ダストの空間分布を詳細に調べた。その結果、ダストの分布の形状は、開き角が $50[\text{度}]$ 程度、内側半径が $0.04[\text{pc}]$ 程度の円盤形状であることがわかった。得られたダスト質量から親星の質量放出率を推定すると、 $1.6 \times 10^{-5} [M_{\odot}/\text{yr}]$ であった。これらの結果は、SCSN 2012dn の親星として SD モデルを強く支持する。また、星周ダストによる散乱により偏光した可視散乱エコーが生じることが予想される。本研究では、赤外線超過から予想されるダスト円盤からの可視散乱エコーによる偏光も計算した。その結果、円盤を ~ 45 度以上の角度で見込むような系では $\sim 2[\%]$ 以上の偏光が観測されることを明らかにし、赤外線とはまた別の可視偏光の観測から Ia 型超新星の星周環境を探る方法を新たに提案した。

- 1 Yamanaka, M., et al., PASJ, 68, 68, 2016
- 2 Nagao, T., Maeda, K. & Yamanaka, M., ApJ, 835, 143, 2017

コン a3 コンパクト天体を含む 4 体系の相対論的軌道安定性

鈴木遼 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

観測技術が目覚ましい発展を遂げ、2017 年 5 月現在で 3000 以上も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もとりわけ特異であるのが、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ため、周りに惑星が存在しているのは驚くべきことである。このような系の軌道や形成過程は超新星爆発についても新たな情報を提供する可能性があり、非常に興味深い。

代表的なパルサー・プラネットである PSR B1257+12 は、パルサーを中心に惑星が 3 つ公転している 4 体系である。Chambers et al. (1996) は、4 体系では「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。しかし、この研究では「惑星の質量は木星以下」「離心率や軌道系射角は 0 とする」等様々な条件を課しており、さらに、ニュートン力学を用いて軌道を計算していた。PSR B1257+12 のようなパルサー・プラネットはこれらの条件を満たさず、また、惑星が水星軌道よりも中心天体に近い距離を公転していることから、

水星軌道との類推により一般相対性理論の考慮が必要である。そこで本研究では、軌道計算を一般相対論を考慮したものに拡張し、先行研究で課されていた条件を満たさないパルサー・プラネットに対して、「惑星間距離」と「軌道が安定性を保てられる時間」の相関関係を調べた。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。「惑星が重い場合」「離心率をもつ場合」等先行研究から条件を1つ1つ変化させた場合における結果の違いを調べ、また、ニュートン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見えるのか調べた。

- 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)

コン a4 Suzaku/WAM 単独の到来方向決定によるガンマ線バーストのスペクトル解析 小高勝也 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ガンマ線バースト (gamma-ray Burst:GRB) とはビッグバン以降最大規模の爆発現象であり、初期宇宙というはるか遠方において数秒間に 10^{51-54} erg ものエネルギーが放出される。一日一回程度と高頻度で発生しているが、背景の物理現象は未だ明らかになっていない。その謎を解明しようと、近年では GRB 観測に特化した衛星も打ち上げられ、宇宙物理学の活発な研究分野の一つとなっている。GRB は全天で発生するため、スペクトル解析するためにその到来方向を特定することは検出器における重要な役割である。X 線天文衛星「すざく」に搭載されていた広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor:WAM)[1] は全天の半分の視野を持ち、硬 X 線の帯域で $800\text{cm}^2@100\text{keV}$ もの大きな有効面積を持つため、GRB のような突発的な天体現象の観測に適している。だが、到来方向の特定が行えないために、他衛星などで決定された到来方向を用いなければスペクトル解析が行えない。検出されていても、到来方向が不明なためにスペクトル解析が行えなかったイベントは約 1000 にも及ぶ。一昨年、埼玉大学修士課程を修了した藤沼洸の修士論文において、シミュレーションツールキットの Geant4 を用いた GRB の到来方向決定方法が開発された。この方法を用いることで過去に WAM で観測された GRB のスペクトル解析が可能になった。

本研究ではまず、WAM で到来方向決定を行った GRB のスペクトル解析で得られるパラメータの精度評価を行った。その方法として、他衛星の決定した到来方向を用いた解析結果と WAM で決定した到来方向を用いて解析した結果の比較を行った。精度は光子指数、 E_{peak} 、Fluence でそれぞれ 18%、

13%、40% と藤沼洸修士論文と矛盾しない値が得られた。次に、Tashiro et al.(2012)[2] で到来方向が不明なためにスペクトル変動の解析を行えなかった GRB のスペクトル解析を行った。その結果、放射のピークエネルギーの時間依存性が $E_{peak} \propto t^{-0.68^{+0.21}_{-0.22}}$ と求められた。これは slow cooling[3] のモデルを支持する結果であると考えられる。

- 1 Yamaoka, K., Endo, A., Enoto, T., et al. 2009, *itPASJ*, 61, S35
- 2 Tashiro, M.S., Onda, K., Yamaoka, K., et al. 2012, *itPASJ*, 64, 26
- 3 Sari, R., Piran, T., & Narayan, R. 1998, *itApJ*, 497, L17

コン a5 機械学習による High-z GRB の選定 杉山真也 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

本研究では、Swift によって得られるガンマ線バースト (GRB) のデータとサポートベクターマシン (SVM) を用いて、赤方偏移の値 $z > 5$ となる高赤方偏移のガンマ線バースト (以後 High-z GRB と呼ぶこととする) の候補を迅速に選定できるようにすることを目標としている。SVM とは、観測されたデータ (訓練データと呼ぶ) から規則やルール、判断基準などを抽出し、その訓練データ自体や新たなデータ (評価データと呼ぶ) をカテゴリ別に分類できる、機械学習の手法の一つである。その手法で、高い信頼度で High-z GRB の候補の選定ができるようになれば、可視光残光が明るいうちにすばる望遠鏡等の大型望遠鏡で観測ができ、高赤方偏移の GRB 残光のスペクトルの観測が可能となる。このような High-z GRB のデータを多くとることで、宇宙再電離の時期やその様子、また様々な元素はいつ作られたのか、というような初期宇宙を探る手がかりになると考えられる。Swift によって 2015 年 11 月時点までに観測され、Swift チームによって解析された GRB のデータの中で、赤方偏移が決定され、機械学習で利用できるデータは 258 個あった。その中で $z > 5$ の GRB の数は 9 個であった。その 258 個の赤方偏移が決定されたデータから、1 個の High-z GRB を評価データとして残りのデータを全て訓練データとした。この訓練データで評価データを判定した結果、High-z GRB のデータを正しく判定できなかった。その原因の一つとして、それぞれのクラスに分類されるデータの数が偏ることで評価データを正しく評価できなくなる、不均衡データ問題が考えられた。この不均衡データ問題を改善するために、 $z > 3$ を高赤方偏移とし、High-z GRB を 56 個にした。そして、訓練データが High-z GRB 50 個、Low-z GRB 50 個の時の判別精度を確認したが、実際に利用できるほどの判別精度はなかった。これらの実験から、判別精度が良くない最たる原因を考察した。

コン a6 特殊相対論的流体力学を記述する高精度衝撃波捕獲数値計算法の開発

松本紘熙 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学 専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

天体物理学に現れる流体力学の問題の多くで、計算領域内の空隙 (密度が低く、物質がほとんど存在しない領域) が大きく、またその空隙の形が変形するような問題を取り扱う。例えば、ブラックホールによる潮汐破壊現象は空隙が大きく、その空隙が変形するような問題である。このときブラックホールの event horizon 近傍では落下物質の速度が光速に近い値になる。さらに、ブラックホールによって光速近くまで加速されたジェットが放出される。また、ジェットなどの超高速流では強い衝撃波が生じる。

流体力学のシミュレーション技法の一つに Smoothed Particle Hydrodynamics 法 (以下,SPH 法) がある。これはカーネル関数によって表される広がりをもった質量分布の粒子を用いて流体力学を記述する計算法である。SPH 法は、密度の高い領域に対して粒子をより多く注ぎ込む為、物理現象を見たい主な領域である高密度領域ほど空間分解能が高くなる。つまり、計算領域内の空隙が大きい場合に他の計算法に比べて SPH 法が有利である。しかし、標準的な SPH 法では強い衝撃波を精度良く記述出来ないという問題がある。そこで Inutsuka (2002) [3] は有限体積法で確立された Godunov 法を応用し、SPH 法で強い衝撃波を精度良く記述できる計算法 (以下,Godunov 的 SPH 法) を開発した。標準的な SPH 法で相対論的な問題を扱うことが出来る計算法を開発した研究は存在するが (Rosswog 2010[1], 2015[2]), 標準的な SPH 法では強い衝撃波を精度良く記述できない。そこで本研究では,Godunov 的 SPH 法で相対論的な問題を扱うことが出来る計算法を開発した。本講演ではテスト計算結果を通して、本研究で開発した計算法の有効性について議論する。

- 1 S,Rosswog JCP 229,8591 (2010)
- 2 S.Rosswog LRCA 1,1 109 (2015)
- 3 S.Inutsuka JCP 179,238 (2002)

コン a7 星雲 W50 と SS433 ジェット先端の相互作用領域の磁場観測研究 酒見はる香 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M2)

宇宙ジェットの形成において、磁場が重要な役割を果たすことはよく知られている。ジェットは星間媒質を圧縮し、新たな分子雲を形成する。また、ジェットにより形成される衝撃波による圧縮で磁場が増幅されるため、宇宙線粒子加速サイトの有力な候補でもある。しかしジェット内部の磁場構造は観測的に明らかになっていない点が多く、ジェットの形成過程を明らかにする上で磁場構造を観測的に解明することが急務である。そこで我々は X 線連星 SS433 に注目した。SS433 は非常に近いところに存在し、ジェットの詳細な構造を知ることができる稀有な天体である。SS433 は電波星雲 W50 の中心に位置し、そのジェット先端と星雲が相互作用しているだろうと考えら

れている。しかし SS433 ジェットはその駆動領域である W50 中心領域ばかりが注目されており、相互作用領域であるジェット先端についてはこれまで見逃されてきた。ジェット先端領域は、ジェット自体や付随する現象を明らかにする上で重要な情報源である。我々はこの領域に注目し、磁場構造解析を行った。解析には、Australia Telescope Compact Array による広帯域・多周波数の観測データ [1] を使用した。天体での intrinsic な磁場の方向を見積もり、ジェット先端領域の磁場ベクトルマップを作成した。その結果、W50 の東端に存在するフィラメント構造や W50 表面に磁場が沿う様子を確認した。これらの構造はジェットの先端に見られる Terminal shock、Bow shock であろうと推測される。さらに Terminal shock 上の一部の領域に対してファラデーモグラフィを実行し、視線方向ないしはビーム内に磁場構造を持った成分が複数あることを明らかにし、その成分がジェット軸に対して対称であることを示した。また、X 線の観測 [2]、Very Large Array での観測 [3] との比較も行った。ここまでの結果を踏まえて、ジェット先端領域の構造の描像を作成した。本講演では、これらの結果を紹介する。

- 1 Farnes, J. S., Gaensler, B. M., Purcell, C., et al. 2017, MNRAS, 467, 4777
- 2 Brinkmann, W., Pratt, G. W., Rohr, S., Kawai, N., & Burwitz, V. 2007, A&A, 463, 611
- 3 Dubner, G. M., Holdaway, M., Goss, W. M., & Mirabel, I. F. 1998, AJ, 116, 1842

コン a8 Radio afterglow of binary neutron star merger

林浩翔 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

Our research objective is to study the radio afterglow arising from the ejecta of binary neutron star (BNS) mergers. BNS mergers are one of the most promising targets of gravitational-wave (GW) detection. In addition to producing GW signals, they are also expected to eject mildly relativistic outflows (ejecta) and have various electromagnetic (EM) counterparts. Observation of an EM counterpart will not only increase the detection confidence of GW signals, but also provide invaluable information on the physics of the merger process. A good understanding of the expected EM signals is thus essential to detecting EM counterparts. In particular, Nakar & Piran (2011) predict a robust radio signal that would peak several weeks after the merger. They suggest a blast wave to be generated from the interaction of merger ejecta with the surrounding medium, in which the amplified magnetic field would accelerate electrons to emit synchrotron spectrum. Although such expected radio signals have been studied subsequently in some recent litera-

ture (e.g. Piran et al. 2013; Hotokezaka et al. 2016), they only give rough estimation without detailed consideration of the blast wave dynamics.

We follow the scenario of Nakar & Piran (2011), and aim to calculate a realistic radio afterglow light curve from BNS merger ejecta with quantitative modelling of the blast wave evolution. More specifically, we consider a blast wave not only interacting with the surrounding medium, but also powered persistently by ejecta supply from the BNS merger. With collaboration from Shibata group (University of Kyoto), we are using latest results of BNS merger numerical simulation to determine the density and velocity distribution of ejecta, with which we calculate the dynamical evolution of the blast wave, as well as its radio afterglow emission.

- 1 Nakar, E., & Piran, T. 2011, Nature, 478, 82
- 2 Piran, T., Nakar, E., & Rosswog, S. 2013, MNRAS, 430, 2121
- 3 Hotokezaka, K., Nissanke, S., Hallinan, G., et al. 2016, ApJ, 831, 190

コン a9 Failed Supernova におけるニュートリノ振動財前真理 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 M1)

Failed Supernova とは、大質量星が一度コアバウンスした後に次々と降着してくる物質に衝撃波が押しつぶされて丸ごとブラックホールが生成されるようなものである。このシナリオでは衝撃波による外へのエネルギー解放が起きないため明るく輝くことはない。従ってブラックホール形成理論を知る上ではこの大量に放出されるニュートリノが鍵となる。この中心部では原始中性子星が質量限界を越えてもまだ物質降着が続くため、普通の超新星よりも大量のニュートリノが発生する。またその分中心温度が高くなるため、ニュートリノの平均エネルギーも高くなる。以上のことから観測された場合には普通の超新星ニュートリノとは異なる性質が見られることになる。Super-Kamiokande などの現在稼働している検出器ならイベントが近くで発生すればスペクトルが得られると推定されているが、それらはニュートリノ振動による影響を受けているため全貌を把握するにはニュートリノ振動の詳細な理解が必要である。

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 (uu 相互作用) の 3 つに分けられる。前二つの振動は線型効果であるため解析的によく理解されているが、最後の集団振動は中心部の超高密度ニュートリノ同士の衝突による非線型効果であり、観測がなされていないため未だにわかっていないことが多い。本発表では集団振動の検証も兼ねて $40M_{\odot}$ の親星への 1 次元シミュレーションで得られた密度分布と初期スペクトルに対してこれらの振動効果を計算し、そ

こで見られる特徴について議論を行う。

- 1 Dasgupta et al. Phys. Rev. D 77, 113002 (2008)
- 2 Sumiyoshi et al. Astrophys. J. 667, 382 (2007)

コン a10 非軸対称角度分布ニュートリノのフレーバー安定性解析

森長大貴 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

恒星が進化の果てに起こす現象である超新星爆発の機構は未だ十分に解明されていない。重力崩壊を起こした恒星は原始中性子星 (PNS) コアを形成し、発生した外向き衝撃波が外層の表面に到達することで爆発が引き起こされると考えられている。この衝撃波は内部で一度停滞するので、停滞衝撃波にエネルギーを与える加熱機構が必須であり、その一つが PNS から放出された大量の u_e や ar_{u_e} の核子による吸収である。ところでニュートリノは u_e の他に u_{μ} , $u_{\alpha}u$ という異なるフレーバーを持ち、ニュートリノ振動によりフレーバー転換が起こりうる。加熱機構の理解にはニュートリノ振動の理解が不可欠である。

ニュートリノ振動には物質の密度が影響し、通常 PNS 付近のような高密度領域では振動は抑えられる。ところがニュートリノの密度も十分大きければニュートリノの自己相互作用が無視できなくなり、振動する可能性が示唆されている。自己相互作用まで含めた運動方程式は非線形な積分微分方程式となり、数値的に解くことすら困難を極める。そこでフレーバー固有状態の安定性を、そこからの微小摂動に対して運動方程式を線形化することで議論する試みが成されている [1,2]。また近年、非球対称性が与える爆発への影響が研究されており、同時にニュートリノの角度分布の非軸対称性も指摘されている [3]。

そこで本研究では非軸対称なものを含む様々なニュートリノ角度分布に対して、フレーバー安定性を系統的に調べ上げる。これによりフレーバー転換が発生しうる条件を詳細に炙り出す。一般の角度分布を完全に調べ上げるのは事実上不可能であるので、現実的な角度分布を球面調和関数展開し、低次の項で近似することを考える。得られた結果は超新星のみならず、コンパクト天体同士の合体など、大量のニュートリノが発生する一般の系に対して適用することができる。

- 1 A. Mirizzi and P. D. Serpico, Phys. Rev. D 86, 085010 (2012)
- 2 I. Izaguirre, G. Raffelt, and I. Tamborra, Phys. Rev. Lett. 118, 021101 (2017)
- 3 H. Nagakura extitet al., arXiv:1702.01752

コン a11 超新星コアにおける流体力学的不安定性の線形解析

杉浦健一 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

重力崩壊型超新星爆発は大質量星が最後に起こす爆発現象である。超新星爆発は星の重力崩壊後に形成される衝撃波がコアを突き抜けることによって起きると考えられているが、この衝撃波は降着流によって停滞することが知られている。この停滞衝撃波の復活が超新星爆発を起こすために必要だが、その機構について完全には解明されていない。

衝撃波復活の代表的な機構として考えられているのが、ニュートリノ加熱機構である。この機構は超新星コアで生成されたニュートリノにより衝撃波を復活させる機構であるが、一次元数値計算では爆発が再現されなかった。ところが、多次元の数値計算によって流体力学的な不安定性による衝撃波面の変形が爆発に寄与することが明らかにされ、SASI と呼ばれている。[1] Takahashi et al.(2016) では非球対称非定常な物質降着により誘引される SASI の線形解析が行われ、摂動を球面調和関数展開した時の $l = 1$ 等の低次モードほど励起されやすいことが明らかにされた。

しかし一方で、ニュートリノ加熱機構以外にも衝撃波復活の機構が提唱されており、その一つが原始中性子星の g-mode 振動によって発生する音波の散逸によって爆発のエネルギーが供給されるという機構である。[3] そこで本研究では、非球対称な物質降着に加えて原始中性子星の振動による音波発生を同時に考慮したモデルを用いて、停滞衝撃波の不安定性の線形解析を行った。線形化した系の解析は、Laplace 変換を用いて行う。この手法の利点は、偏微分方程式の初期値・境界値問題を常微分方程式の境界値問題として扱うことができ、かつ指数関数的に時間発展する不安定に対してもこの手法が使えることにある。本研究を通して超新星コアにおける不安定性の定性的な性質を、系統的に明らかにする。

- 1 W. Iwakami et al. ApJ, 678, 1207(2008)
- 2 K. Takahashi et al. ApJ, 831, 75(2016)
- 3 A. Burrows et al. ApJ, 640, 878(2006)

コン a12 マージャープロセスにおけるブラックホールへの質量降着

川口雄大 (鹿児島大学 M1)

銀河の衝突・合体がスターバースト核の発生をトリガーすると考えられている。合体する銀河の質量比が大きく (マインーマージャー)、母銀河と衛星銀河がともに大質量ブラックホール (SMBH) を持つ場合、連星ブラックホールが形成されることでガス円盤のダイナミクスに大きな影響を及ぼし、激しい星形成とブラックホール (BH) への質量降着を起こすことが指摘されている [1]。一方、高赤方偏移 quasar で SMBH がすでに形成されていることから、非常に大きな質量降着率が SMBH 形成に不可欠であると考えられている。しかし、銀河合体時に大きなガスの inflow が起こったとしても、すべてが BH に行く

わけではなく、降着円盤スケールでどれくらいガスが落ちるかも分かっていない。一部は星になり、一部は outflow で失われるであろう。このようなマージャープロセスは銀河形成シミュレーションには入っているが、これまでのシミュレーションでは銀河中心の分解能がなく、BH 近傍の降着プロセスを明らかにすることができていない。そこでマージャープロセスのみを取り出した高分解能計算で、マージャーにより銀河中心部に星 + ガス + BH が持ち込まれた時に銀河の BH の成長にそれらがどのように寄与するかを調べた。本講演では銀河の落とし方や BH やガスの質量により母銀河の BH へどのような影響を及ぼすのかについて議論する。

- 1 Taniguchi, Y., Wada, K., 1996, ApJ 469, 581
- 2 Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomosaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2008, PASJ, 60, 667
- 3 Saitoh, T. R., Daisaka, H., Kokubo, E., Makino, J., Okamoto, T., Tomosaka, K., Wada, K., & Yoshida, N. 2009, PASJ, 61, 481

コン a13 超臨界降着流のスペクトル計算 北木孝明 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

中心天体へのガスの質量降着率がエディントン限界を超える、超臨界降着と呼ばれる現象がある。超臨界降着円盤は輻射圧優勢の光学的に厚い円盤で、そこからは非常に大量のアウトフローが吹き出すとされており、流体シミュレーションによる研究が行われている (Ohsuga+2005)。これは超高光度 X 線源 (Ultra-Luminous X-ray sources, ULXs) のようなエディントン光度以上の光度を持つコンパクトな天体現象を説明する有力なモデルとなっている。また、宇宙初期の超巨大ブラックホール形成にも不可欠と考えられている。

超臨界降着流のスペクトル計算は、共同研究者の川島朋尚氏 (国立天文台) によって行われた。川島氏の計算結果は ULXs のスペクトルを再現し、超臨界降着流が起きていることを支持する結果となった (Kawashima+2012)。しかしこの研究では ULXs が念頭に置かれていたため、中心ブラックホールの質量が十太陽質量に固定された計算しか行われていない。そこで超巨大ブラックホール形成を想定して、ブラックホール質量を変化させたスペクトル計算を行った。計算には Kawashima+2012 と同じコードを用いた。

その結果、軟 X 線は降着円盤からの寄与であり、円盤温度 $T_{\text{disk}} \propto M_{\text{BH}}^{-1/4}$ を反映したスペクトルとなるが、一方で硬 X 線はブラックホール質量に依存せず、10keV 付近に折れ曲がりをもつことがわかった。特に約 10keV 以上の X 線成分は、光速の約 20% の速度を持つファンネル壁でパルクコンプトンにより形成されることを明らかにした。さらに Wien 分布からの超過成分を確認し、それが光子指数 $\alpha \sim 3$ のべきをもつことを確認した。これは ULX の観測 ($\alpha = 3.1^{+0.3}_{-1.2}$) を再現する

(Walton+2015)。

本講演では、私が行ったこれらの研究結果を紹介する。

- 1 Kawashima, T., Ohsuga, K., Mineshige, S., et al. 2012, *Apj*, 752, 18-29
- 2 Ohsuga, K., Mori, M., Nakamoto, T., & Mineshige, S. 2005, *Apj*, 628, 368
- 3 Walton, D. J., Middleton, M. J., Rana, V., et al. 2015, *Apj*, 806, 65

コン a14 広エネルギー帯域観測から探る大マゼラン星雲の典型的ブラックホールの回転

村上爽太 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

ブラックホールとは、太陽の 30 倍以上の質量をもった大質量星が重力崩壊型超新星爆発を起こし、外層を吹き飛ばして質量を失った後にできる天体である。そこには非常に強い重力場が存在しており、いかなる光も抜け出すことができない。したがってブラックホールそのものを観測することはできない。しかしそのまわりにはガスや塵が回転しながら形成した降着円盤があり、そこからブラックホールへ物質が落ち込む際に X 線が放射される。その X 線をとらえることによってブラックホールの研究が推し進められている。

本研究では大マゼラン星雲に存在する典型的なブラックホール LMC X-3 を対象天体とし、広いエネルギー帯域に対するスペクトル解析からその回転について明らかにした。それにあたって、軟 X 線を観測できる XMM-Newton 衛星及び硬 X 線を観測できる NuSTAR 衛星を観測衛星として使い、それらのデータを併用することによって広いエネルギー帯域に対する解析を実現した。結果として、まず降着円盤からの多温度黒体放射を表す diskbb モデルを用いてスペクトルフィットを行い、ブラックホールが回転していない場合の理論値よりも小さい内縁半径を算出した。これは LMC X-3 が回転していることの証拠であると判断した。また回転しているブラックホールまわりの多温度黒体放射を表す kerrbb モデルを用いてスペクトルフィットを行い、ブラックホールの角運動量を表すスピンパラメータの値を求めた。使用したデータを個別にフィットした際には大きく異なる値で求まるものがあったが、それらを同時フィットすることによって $0.699^{+0.005}_{-0.051}$ という 1 つの値に定まった。以上より、LMC X-3 は光速の約 70% の速さで降着円盤と同じ回転方向に回転しているという結論を得た。

- 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 小山勝二, 嶺重慎 [編] 日本評論社 2007
- 2 James F. Steiner, Jeffrey E. McClintock, Ronald A. Remillard, Lijun Gou, Shin 'ya Yamada, & Ramesh Narayan 2010, arXiv
- 3 High Energy Astrophysics Malcolm S. Longair CAMBRIDGE 2011

コン a15 X 線衛星「すざく」を用いたガンマ線衛星 LS5039 の X 線周期探索

松元崇弘 (東京大学 馬場・中澤研究室 M1)

ガンマ線連星は全天でたった 6 つしか見つかっていない稀有な天体である。大質量星の周りを伴星として高密度のコンパクト天体が回っていて、TeV 帯域にまでおよぶ超高エネルギーガンマ線や X 線を放射している。伴星の公転に同期して幅広い帯域で放射強度が変動するため、公転による周辺環境の周期的な変化と非熱的放射の比較が容易である。コンパクト天体の正体が分かっているものは 1 つだけであり、他の 5 つについてはブラックホール (BH) が中性子星 (NS) か論争が続いている。非熱的放射の起源は、伴星が BH の場合と NS の場合の 2 つのシナリオが考えられている。前者では BH の降着円盤から吹き出す相対論的ジェットが作る衝撃波から、後者では NS からのパルサー風と大質量星からの星風がぶつかってできる衝撃波からガンマ線が発生する。天体について理解を深めるには、伴星のコンパクト天体の正体を見極めることが必須である。NS からの X 線放射には自転に同期した数十 ms ~ 数十 s の周期的変動 (パルス) があることが多いため、NS と BH を区別するには放射周期の有無を調べるのが良い。そこで我々は、X 線衛星「すざく」の硬 X 線検出器 HXD が時間分解能と感度に秀でていることに着目して時間変動解析を行った。具体的には、伴星の正体が分かっていないガンマ線連星の HXD による観測データのうち、一公転周期以上を一観測でカバーしている LS5039 に対して Z_m^2 テストという手法で周期探索を行った。 Z_m^2 テストとはイベントの時刻をある周期での位相に変換し、位相分布の偏りを見る手法である。この手法は、従来の周期解析手法に比べ偽検出の可能性が低く感度も良い。様々な周期を試した結果、周期 8.96 s 付近でパルス周期の兆候を発見した。これは伴星が BH でなく、さらに強磁場 NS である可能性を示唆している。

- 1 Casares, J., *mathrm{Ribacuteo}*, M., Ribas, I., et al. *MNRAS*, 364, 899 (2005)
- 2 de Jager, O. C., Raubenheimer, B. C., & Swanepoel, J. W. H. *A&A*, 221, 180 (1989)
- 3 Takahashi, T., Kishishita, T., Uchiyama, Y., et al. *ApJ*, 697, 592 (2009)

コン a16 銀河系内の孤立ブラックホールの検出可能性について

津名大地 (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)

大質量星の最終段階として生まれると考えられるブラックホール (BH) は、X 線観測によりこれまでに数十の候補が発見されてきた (e.g. Remillard & McClintock 2006)。また最近では重力波干渉計 LIGO が連星 BH からの重力波の直接検出に

成功する (Abbott et al. 2016) など、BH の存在は確実なものになっている。

現在までに X 線観測によって見つけられてきた BH は全て恒星と連星系 (X 線連星) を形成し、その強い重力で恒星から物質を降着することで明るく輝いている。しかしこのような BH の他に、伴星を持たないような孤立ブラックホール (IBH) と呼ばれるものも存在すると考えられている。これらは銀河系内の星間空間のガスを降着することで輝くと考えられていて、X 線連星と比べてかなり暗いため今のところ検出されていないが、将来の望遠鏡での検出が期待されている。

本研究では銀河系内に存在する IBH について、現在および次世代の X 線望遠鏡による検出可能性を考察した。まず IBH の分布について、過去の研究 (e.g. Agol & Kamionkowski 2002) よりも正確なものを得るために銀河系のポテンシャルを用いて IBH の軌道を計算した。またガス密度の分布の最近の観測結果を用いてこれらの IBH の降着率を推定し、radiatively inefficient accretion flow (RIAF) という降着円盤モデルを仮定することで光度およびフラックスの計算を行った。

本研究での計算には、2 種類の大きな不定性が存在する。一つはこのような BH が誕生するときのキックの大きさで、もう一つは実際の降着率と球対称降着を仮定したボンディ降着率の比である。本研究ではこの 2 つについて幅広いパラメータ領域で計算した結果から、過去の観測結果によるこれらのパラメータの制限についても議論を行う。

- 1 Remillard R. A., McClintock J. E., 2006, ARA&A, 44, 49
- 2 Abbott B. P., et al., 2016b, Physical Review Letters, 116, 061102
- 3 Agol E., Kamionkowski M., 2002, MNRAS, 334, 553

コン a17 「すざく」衛星による MAXI J1659-152 の X 線スペクトル解析

早川亮大 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

ブラックホール (BH) 連星は、伴星からの物質供給が起こることで、降着物質が重力エネルギーを獲得し、X 線として解放される。このときに起こる放射は、主に降着円盤からの熱的な放射成分と、BH 周辺のコロナからのコンプトン放射による連続成分で構成され、前者が優勢の場合をソフト状態、後者が優勢の場合をハード状態と呼ぶ。

MAXI J1659-152 は、国際宇宙ステーションに設置された全天 X 線監視装置 (MAXI) によって 2010 年 9 月 25 日に発見された BH 候補天体である。その後次々と追観測が行われ、「すざく」衛星では、2010 年 9 月 29 日から 2010 年 10 月 1 日までの間に 3 回観測が行われた。この天体の軌道周期が約 0.1 日であり、現在発見されている BH 連星では最短である。さらに、これまでの研究で伴星は $0.15\text{-}0.25M_{\odot}$ の M5 矮星であることが示唆されている。また、発見当初は BH 連星に似た時間変動が

見られることからハード状態であったが、「すざく」衛星での観測時はハード状態からソフト状態へ向かいつつある過渡期であったことがわかった。

今回、この天体についての「すざく」衛星のデータ解析を行った。観測 1 日目においてエネルギースペクトル、ライトカーブ、パワースペクトルの取得を行った。また、11-70keV の Low-Frequency QPO (準周期的振動) の周波数が 2.3Hz と求まった。本発表では、研究の進捗を報告する。

コン a18 X 線天文衛星 NuSTAR と XMM-Newton による狭輝線セイファート 1 型銀河 SWIFT J2127.4+5654 の観測

井戸垣洋志 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

狭輝線セイファート 1 型銀河 (NLS1) は活動銀河核 (AGN) の中でも質量が $\sim 10^6 M_{\odot}$ と小さい一方で、光度は $10^{43\text{-}46}$ erg/s と高く、大きな質量降着率を持つ [1]。NLS1 の X 線スペクトルは、べき $\gamma \sim 2$ で伸び 30-40 keV 付近に折れ曲がりをもつべき関数成分と、2 keV 以下にピークをもつ超過成分からなる。これは、後者の低温で光学的に厚い放射が、熱的な電子コロナによって逆コンプトン散乱されるモデルでよく再現される。このモデルでは、電子コロナは外側から落ちてくる陽子とクーロン衝突することでエネルギーを得る (heating) 一方で、逆コンプトン散乱によって光子にエネルギーを奪われる (cooling)。これらの釣り合いが折れ曲がりとして現れており、電子温度 kT_e に対応している。NLS1 は降着率が小さい広輝線セイファート 1 型銀河 (BLS1) と比べて kT_e が小さいことが知られている (Malizia et al. 2008[2]) が、その理由はあまり議論されてこなかった。Ohmura et al. (2017) はこの heating と cooling の釣り合いから、 kT_e とエディントン比 $\eta = L/L_{\text{Edd}}$ の関係式 $kT_e \propto \eta^{-\frac{2}{3}}$ を導き出した [3]。この相関係係が正しければ、NLS1 は η が大きいために kT_e が小さくなると自然に説明できる。Ohmura et al. (2017) は「すざく」のデータを解析し相関の兆候を見ることはできた。しかしデータ数が少ない上、硬 X 線検出器 (HXD) では折れ曲がりの検出は容易ではなく、大きな不定性があった。そこで本研究では、2012 年に打ち上げられ 5-80 keV で 2 桁以上の感度をもつ NuSTAR と、0.3-10 keV で大きな有効面積をもつ XMM-Newton を用いてこの相関を検証する。これによって折れ曲がり検出できればより多くの天体で kT_e を求められる。今回は両衛星での同時観測が 3 回行われ、データが豊富で変動の激しい SWIFT J2127.4+5654 に着目した。本講演ではこの観測データの解析結果について報告する。

- 1 Boller, Th. et al. 1996, A&A, 305, 53
- 2 Malizia, A. et al. 2008, MNRAS, 389, 1360
- 3 大村峻一, 京都大学, 2017, 修士論文

コン a19 活動銀河核からの FeK $_{\alpha}$ 輝線スペクトル解析による放射領域の速度構造の推定

今井悠喜 (埼玉大学 理学部物理学科 宇宙物理実験 田代・寺田研究室 M1)

宇宙に数多ある銀河の中には、中心部から電波から γ 線に広く渡って電磁波を放射しているものがある。その領域は活動銀河核と呼ばれ、正体は太陽質量の 10^6 から 10^9 倍の超巨大ブラックホールと考えられている。活動銀河核の可視光スペクトルには広幅輝線と狭幅輝線が見られるもの、狭幅輝線のみ見られるものがあるが、この違いは「トラスモデル」によって説明される。これはトラス状の吸収体が囲む中心ブラックホールを、我々がトラス越しに観測する場合、中心からの生のスペクトルに吸収がかかり、トラスの穴方向から観測する場合と異なって見えるとするものである。活動銀河核からの X 線スペクトルに見られる中性鉄 K_{α} 輝線は比較的吸収による影響が小さく、活動銀河核の重要な探針である。Minezaki&Matsushita (2015) は、この鉄輝線の線幅広がり放射領域の運動によるドップラーシフトとして利用したブラックホール質量測定法を提案した。伊藤由裕修士論文 (東京理科大学 2016) は X 線衛星 Chandra HETG で線幅を調べたが、エネルギー分解能に優れる一方で観測エネルギー帯域が狭く、エネルギーの冪乗で表される成分の減少が不自然に緩やかで、輝線幅の決定に影響を与えている問題があった。そこで本研究では伊藤修論で解析された内、特に鉄輝線が卓越している天体 NGC4151 について、冪乗成分が支配的な硬 X 線領域で高精度観測が可能な X 線衛星 NuSTAR を用いて冪乗成分を決定した上で輝線幅を調べ、放射領域の速度構造及び場所を議論した。その際複数のモデルを比較して輝線がブラックホールによる重力赤方偏移を受けたか調べたが、結論できなかった。また鉄輝線は幅が広い成分、幅が狭い成分の 2 成分でよく表され、既に放射領域の場所が調べられている H_{η} 輝線幅との比較で放射領域の場所を推定した。結果、幅の狭い成分の起源はトラス吸収体内縁部が候補として示唆された。

- 1 Minezaki, T., and Matsushita, K. 2015, ApJ, 802, 98
- 2 Shu, X. W., Yaqoob, T., and Wang, J. X. 2010, ApJS, 187, 581

コン b1 FDPS によって並列化された SPH コードの GPU による高速化

山内俊典 (東京大学 鈴木・蜂巢研究室 M1)

流体計算に用いられる微分方程式の数値解析手法の 1 つに SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) がある。これは対象とする物体を粒子の集まりとして表現し、ラグランジュ的に粒子を移動させながら解析する粒子法の 1 つであり、様々な天体現象を解析する手法として用いられている。一般に粒子法を用いたシミュレーションは膨大な数の粒子を扱うため並列化が必須である。しかし並列化コードの作成は容易ではなく時間もかかる。FDPS (Framework for Developing Particle simulators) はこのような問題を解決するために作成されたフ

レームワークである。ユーザーは FDPS を使うことでプログラムの並列化を意識せずに、並列化されたプログラムを書くことができる。FDPS を用いたシミュレーションの手順は、次のような流れになっている。(1) ドメイン分割、(2) プロセス間での粒子の入れ替え、(3) 粒子の加速度の計算に必要な情報の収集、(4) 粒子間の相互作用計算、(5) 粒子データのアップデート。(1)(2)(3) はプロセス間通信が必要であり、FDPS のライブラリが適切に実行する。(4)(5) はプロセス間通信を必要としないため、実際の計算式などはユーザー自身が書く。シミュレーション全体で最も計算量が重い部分が (4) の相互作用の計算であり、現段階での FDPS では CPU 上で SIMD 命令を用いて計算している。本研究ではこの計算を、GPU (Graphi Processing Unit) を用いて並列化することによってコードの高速化を目的としている。このコードを使った SPH シミュレーションで、白色矮星同士の合体計算や中性子星による白色矮星の潮汐破壊計算などができる。今回の発表ではコードの開発方針、状況と今後の展望について発表する。

コン b2 X 線新星 V404 Cyg の多波長タイムラグ解析 木邑真理子 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

一般的に、天文学の時系列データはスパースである。天候や天体の位置、衛星姿勢など様々な制限により、観測で得られるデータは穴あきかつ不等間隔な時系列を持つようになる。また、同じ天体を異なる波長域で観測する場合、観測機器の違いなどにより、完全に同じサンプリング間隔を持つ同時観測データを得ることは困難である。

X 線新星は、主星がブラックホールまたは中性子星、伴星が低質量の主系列星からなる近接連星系である。主星の周囲には伴星から流れ込むガスによって降着円盤が形成されている。この降着円盤の熱不安定性により、突発的に主星に降着するガスの量が増え、様々な波長域で急激な増光現象 (アウトバースト) を起こすことが特徴である [1]。アウトバースト中、しばしば短時間の光度変動が観測されるが、その原因はよくわかっていない。そこで、各波長域での短時間光度変動の放射機構を探るため、多波長光度曲線間のタイムラグ解析が良く用いられてきた。しかし、そのような解析は相互相関関数を計算するなどの古典的手法に則っていたため、完全に同じサンプリング間隔を持つ等間隔の時系列データに限られていた。そのようなデータでない場合には、物理的機構を考慮せずに補間がなされていた。

私達は、状態空間モデルとベイズ推定を用いた手法 [2] を X 線新星 V404 Cyg の時系列データに適用し、異なるまばらなサンプリング間隔を持つ X 線と可視光の光度曲線間のタイムラグを補間せずに求めることに成功した。この解析から、X 線変動が可視光に対して 30–50 s 遅れていることがわかった。この結果は、これまで可視短時間変動の原因としてよく考えられてきたシンクロトロン放射や X 線照射では説明できない。そこで私達は、この X 線の遅れが、質量降着流の変動が降着円盤内を外側から内側へ伝わる時間に対応するのではないかと提案した

[3]. 本発表では、この結果を紹介し、[2] の手法の応用についても議論する。

- 1 Tanaka & Shibazaki, 1996, extitARA&A, 34, 607
- 2 Tak et al., 2016, preprint, (arXiv:1602.01462)
- 3 Kimura et al., 2016, extitMNRAS, submitted

コン b3 活動銀河核ジェットの加速モデル 萩原大樹 (東北大学天文学専攻 M2)

活動銀河核から相対論的速度で吹き出すジェットには未解決問題が多数ある。駆動機構、加速機構、収束機構、質量注入、安定性について多くの研究がなされているが、未だ謎が多い。本研究では加速機構問題に着目する。近年の電波観測により明らかになってきたジェットの詳細な放射強度分布を理論的に再現することで加速に必要な状況・物理量を制限し、この問題の解決を図る。

ジェット加速モデルの一つに電磁的加速モデルがある。活動銀河核中心部にあるブラックホール自体やその周辺の降着円盤の回転エネルギーを磁場を介してポインティング流速を作り、それを粒子の運動エネルギーに変換するモデルである。しかし、この理論モデルに対する観測的証拠は未だ無い。

M87 銀河に付随するジェットでは縁部分が明るく光る構造が知られている。この特徴的な放射構造はジェットの磁場構造に重要な示唆を与えるにも関わらず、これまで考えられてきたどの理論予測でも考慮されていなかった。最新の電波 VLBI 観測によりブラックホールから数千シュバルツシルト半径の距離でジェットが三叉のフォークのような放射構造を持っていることが明らかになった (Asada, Nakamura & Pu 2016, Hada 2017)。

本研究では電磁場加速モデルを用いてこの特徴的な三叉フォーク放射構造を再現することにより、モデルの観測的検証を行った。定常軸対称、磁場のエネルギー密度が粒子の持つエネルギー密度よりも十分に大きいという force free 条件のもとでブラックホール近傍の磁場・密度場の構造をパラメーター化し、この三叉フォーク放射構造を矛盾なく説明する条件を調べた。この結果について議論する。

- 1 Avery E. Broderick and Abraham Loeb 2009. ApJ.679:1164
- 2 Keiichi Asada, Masanori Nakamura, and Hung-Yi Pu 2016. ApJ,833:56
- 3 Hada, K. 2016, Galaxies, 5, 2

コン c1 定常流を用いた衝撃波下流のジェットの構造解析

渡邊玲央人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

宇宙には様々なダイナミックな現象があり、その一つとして宇宙ジェットがある。現在、宇宙ジェットは様々なスケールで重力天体の周辺で発見されている。中心に大質量ブラックホールを持つ AGN からは、数百 kpc もの長さにわたって銀河間の虚空を貫いていて、光速に近い値で噴出されるプラズマガスが電波として観測されている。このような宇宙ジェットには未だ解明されていない様々な問題がある。ジェットはどのような機構によって光速に近い値まで加速されているのかという加速機構の問題、なぜジェットが拡散せずに細いまま進んでいくのかという収束問題、ジェットの構造や安定性問題などが挙げられる。重力天体の成長や周辺の星間空間を深く知るために、私たちにこれらの問題を解明していくことが望まれる。

先行研究では数値シミュレーションによってジェットの時間発展の様子を描写した研究が数多くあり、未解決問題が研究されている。本研究では、少し違ったアプローチを考え時間発展ではなくジェットが定常流になっていることを使いその形状を求めることを考える。今回ジェットはどのような状況下で安定し、崩れるのかということ解析することを目標に、ジェットの先端に生じるバウショック下流の流れについて着目し、細かい物理現象やジェットの構造を理解することを目標として定常解を求めることを試みた。

- 1 Christian Fromm, Spectral Evolution in Blazars(2014)
- 2 H.Nagakura, Gamma-Ray Bursts from Explosive Death of Massive Stars(2011)

コン c2 プラズマ粒子シミュレーションによる無衝突衝撃波遷移層での波動励起機構について 篠田理人 (青山学院大学大学院 理工学研究科 M1)

地球には、高エネルギー荷電粒子である宇宙線が飛来している。観測されている宇宙線のスペクトルには、宇宙線のエネルギーが $10^{15.5}$ eV 付近で Knee という特徴的な曲がり存在する。それ以下のエネルギー帯の宇宙線は、超新星残骸の無衝突衝撃波によって加速されていると考えられている。その加速の方法は、Fermi 加速理論が考えられている。Fermi 加速理論は、粒子が選択的に衝撃波遷移層を往復することで、正味のエネルギーを得るものである。

しかし、Fermi 加速理論には問題点がある。それは、インジェクション問題と呼ばれる。粒子が衝撃波遷移層を往復するためには、衝撃波遷移層を超えるためのエネルギーをあらかじめ持っていることが必要であるというものであり、遷移層を超える最低エネルギーを持つに至る運動論的物理過程が未解明のままである。

本研究では、プラズマ粒子シミュレーションを用いて低マッハ数の無衝突衝撃波遷移層での粒子、電磁場の挙動を調べ、インジェクション問題の解明の一助になることが目的である。そ

の為、本研究では、イオンの温度非等方不安定により励起される電磁波動について着目してシミュレーションデータを解析を行った。

講演では、研究の結果とその考察について掲載する予定です。

- 1 坂下 士郎/池内 了 共著:「宇宙流体力学」(培風館)
- 2 高原 文郎 :「天体高エネルギー現象」(岩波)
- 3 Francis F.Chen 内田 岱二郎訳:「プラズマ物理入門」(丸善)

コン c3 2次元効果を考慮した、ブラックホールへの超臨界降着

竹尾英俊 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

宇宙初期 (赤方偏移 $z \sim 6-7$, 宇宙年齢 $\sim 1\text{Gyr}$) において、超巨大ブラックホール ($> 10^9 M_\odot$) が観測されているが (Mortlock et al. 2011)、その形成過程は不明である。一説として、宇宙初期 ($z \sim 20$, 宇宙年齢 $\sim 0.2\text{Gyr}$) にできた初代星由来のブラックホール ($\sim 10^{1-3} M_\odot$) が、ガス降着で急成長したとするものがある。この説に従うと、エディントン限界を上回る、超臨界降着による成長が不可避である。なぜなら、このブラックホールがエディントン限界で降着し続けても、観測された時期までに、 $> 10^9 M_\odot$ へと成長できないためだ。しかし、球対称的な輻射場を仮定する限り、超臨界降着は困難である。中心部からの輻射が、周囲のガスを電離加熱し、降着を抑制するためだ (Park & Ricotti 2011)。

そこで我々は、2次元 (非球対称) 効果を考慮することで、超臨界降着が実現する可能性に着目した。なぜなら、輻射は本来、降着円盤由来で、非等方性を有するためである。我々は、原始ガス (水素・ヘリウム) の電離・再結合を考慮した、2次元輻射流体計算を行った。結果、輻射場の強い極方向では、電離されたアウトフローが噴出する一方、輻射の弱い赤道面方向から超臨界降着が実現することを明らかにした。また、 $\gtrsim 5 \times 10^5 M_\odot$ 程度の大質量ブラックホールの場合、電離領域は消滅し、全系が中性化すること、さらに、2次元効果により、極方向に 8000mK の中性アウトフローが噴出することを明らかにした。本講演では、上記の降着解の発生プロセスと、観測的示唆を解説する予定である。

- 1 Mortlock D. J. et al., 2011, Nature, 474, 616
- 2 Park K., Ricotti M., 2011, ApJ, 739, 2

コン c4 超臨界降着ブラックホールのスペクトル

五十嵐太一 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1)

Ultraluminous X-ray sources (ULXs) の X 線の典型的な光度が $10^{39} - 10^{41} \text{erg ms}^{-1}$ であり、中性子星やブラックホールのエディントン光度を超えることが知られている。ULX のスペクトルには大きく 2つの状態があり、 5keV 付近でロールオーバーする山形のスペクトルと 10keV 以上まで伸びるべき

関数型のスペクトルに分類できる。これらのことを説明するためには、恒星質量ブラックホールへの超臨界降着と太陽質量の $100-1000$ 倍のブラックホールへの亜臨界降着の 2つが考えられていて、どちらが正しいかはわかっていない。

今回紹介する論文 (Kawashima et al. 2012) ではコンプトン散乱、自由-自由吸収、フォントラッピングを含めた超臨界降着の輻射流体計算から、NGC 1313 X-2 に非常によく似たスペクトルを得られていることから、超臨界降着による説明を支持する。

- 1 T. Kawashima et al. 2012 ApJ 752 18

コン c5 Fast Radio Burst の起源について

米川信哉 (東北大学天文学専攻 M1)

E. Waxman (2017, arXiv:1703.06723) をレビューする。Fast Radio Burst (FRB) とは、1 ミリ秒程度の非常に短い時間に、強度 $0.1-10\text{Jy}$ もの電波が放射される天体現象であり、距離の指標となる Dispersion Measure が大きく、またコヒーレントな放射であることが知られているが、起源やメカニズムについては不明である。本発表では、同じ場所で繰り返し起こる FRB 121102 について議論する。FRB はこれまで 20 例程度観測されているが、この FRB 121102 のみ定常電波源が付随して検出されている。本論文では、その定常電波源について詳細に考察し、サイズや放射電子のエネルギー、これまでの 4 年間で放出された総エネルギーなどを推定した。個々の電子のエネルギーが高くないことから、今まで議論されてきた「マグネター星雲モデル」では説明できない。むしろ weak stellar expansion で生じる mildly-relativistic な噴出物が衝撃波を作り、それが定常電波源となっていることが示唆される。一方、FRB の起源としては、highly-relativistic な噴出物による衝撃波でのシンクロトロンメーザーであることを提案する。

- 1 E. Waxman. arXiv:1703.06723 (2017)

コン c6 電波銀河の形成過程の解明

津久井崇史 (国立天文台三鷹 M1)

電波銀河はジェット形状や電波強度によって FR type 1 (FR1)/ type 2 (FR2) に大別できることが古くから知られており、FR1 はコアとジェットに沿って高い輝度を示し FR2 は電波ローブを形成しローブの端に高い輝度を示す。FR1 はパワーの弱いジェットを持つのにに対し、FR2 はパワーの強いジェットを持つ。

一方で可視のスペクトルでは高階電離輝線を持つもの (HERG) と低階電離輝線を持つもの (LERG) の二つに分類できる。HERG は中心部からの多量の電離光子が周囲のガスを高階まで電離することができていて、LERG は周囲のガスを高階まで電離するほど光子が生成されていないと考えられる。FR2 には HERG が多く存在するが FR1 ではほとんどが LERG に分類

されている。この分類は降着円盤のモードを本質的に表しており、前者は放射効率が高い標準降着円盤に対応し、後者は降着円盤の放射効率が低い移流優勢降着 (ADAF) モードに対応していると考えられている。これは降着円盤とジェットの結びつきを示す強い証拠である。

FR1 と FR2 に分岐する詳細な物理メカニズムは解明されていないが、ジェットのパワー (降着円盤モード、降着率、BH スピン、BH 質量に依存すると考えられている) に依存するだけでなく、ジェットの片方が FR1 もう片方が FR2 の形をしている Hybrid source も存在するため、周辺環境も大きな影響を与えていると考えられている。環境効果や BH 質量などの影響を取り除けばより本質的な電波銀河の分類、ジェット形成のメカニズムそのものにも迫れるのではないかと考えている。またジェットの形による分類とスペクトルの形による分類とを比較することで降着円盤とジェットの物理的な結びつきの理解を得られると考えられる。

本発表は観測と理論の両面から FR1/2 分類の問題点を紹介し、降着率や BH 質量の測定に加え、環境とジェットの相互作用や、ガスの降着の直接撮像観測を可能にする ALMA 望遠鏡を用いて今後どのような研究をしていくか発表する。

- 1 Gendre, M. A., Best, P. N., Wall, J. V. (2010)
- 2 P. N. Best, and T. M. Heckman (2011)
- 3 Active Galactic Nuclei Beckmann, and Shrader (2012)

コン c7 次世代ガンマ線天文台 CTA でみるガンマ線バースト

野崎誠也 (京都大学 宇宙線研究室 M2)

ガンマ線バースト (gamma ray Burst, GRB) は、等方仮定で 10^{53} erg ものエネルギーを数ミリ秒から数百秒の間に放出する、宇宙最大の爆発現象である。GRB から放出する超相対論的ジェットの時間発展に応じて、まず MeV ガンマ線を中心とした即時放射が起こり、その後、電波から X 線、ガンマ線にも渡る広いエネルギー帯で徐々に減光していく残光放射が起こる。この GRB の中心駆動天体の正体、放射機構などの基本的なことも未だに謎であり、多波長での GRB 観測により、この謎の解明に取り組まれている。GRB からの放射は少なくとも GeV 領域まで伸びており、GeV ガンマ線放射の性質は、特に近年のフェルミ衛星での観測により明らかになってきた。しかし、限られた検出面積のために光子統計が少なく、その放射機構を特定するには至っていない。

その中で、GRB からの放射機構の特定への貢献が期待されているのが、Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画である。CTA 計画は 32 か国が参加している国際共同計画であり、北サイト (スペイン・ラパルマ) と南サイト (チリ・パラナル) に大きさの異なる 3 種類の望遠鏡を計約百台建設する。CTA では、現行のチェレンコフ望遠鏡よりも 10 倍良い感度で、20 GeV か

ら 300 TeV という広いエネルギー帯のガンマ線を観測することができる。CTA を用いることで、その圧倒的な有効面積により、20 GeV 以上のガンマ線放射を高統計で検出することができ、ガンマ線放射の時間発展を研究するのに最適である。これによって、即時放射、残光放射における高エネルギーガンマ線の放射機構の特定だけでなく、相対論的ジェットの物理の理解、最高エネルギー宇宙線の起源であるかの検証にも貢献することができる。本講演では、CTA における GRB 観測の展望について発表する。

コン c8 Event Horizon Telescope による銀河系中心核 Sgr A* の超巨大ブラックホールの観測 津田修一朗 (国立天文台三鷹 M1)

ブラックホールのごく近傍の領域は降着する物質の重力エネルギーが最も大きく解放されるため、多様な高エネルギー天体現象の現場であると考えられている。また、この領域は事象の地平面の存在により生じるブラックホールの影 (シャドウ) の存在など、アインシュタインの一般相対性理論が予測する強重力場特有の物理的現象が見られることが期待される。このような領域の撮像は天文学における長年の目標の一つである。

この目標の実現に最も適した天体の一つが、天の川銀河の中心 Sgr A* に存在する超巨大ブラックホールである。Sgr A* のシュバルツシルド半径 (R_s) はおよそ 10 マイクロ秒角であり、全天のブラックホール候補天体の中で最大である。この視直径に匹敵する空間分解能の観測が、超長基線電波干渉計 (VLBI) という手法によって実現されようとしている。VLBI は地球上に点在する複数の電波望遠鏡の開口を合成することで地球規模の仮想的な望遠鏡を構成する技術で、現存する観測装置を圧倒する空間分解能を達成することができる。VLBI 観測を約 1 mm の波長で実現することができれば、その空間分解能は Sgr A* の 2-3 R_s に到達する。

Event Horizon Telescope (EHT) は 1.3 mm 帯で VLBI 観測網を構築し、ブラックホール近傍の撮像を目標とする国際プロジェクトである。これまで EHT は 10 年近くに渡り観測装置の性能を向上させながら試験観測を行い、ブラックホール近傍の事象の地平面スケールの放射構造の空間分解に成功している。また EHT の観測性能を大幅に向上させる大型電波干渉計 ALMA が加わった初の本観測が 2017 年 4 月に行われ、ブラックホール近傍のイメージが今後数年の間に初めて得られることが期待されている。本講演では、EHT による Sgr A* の 10 年にわたる初期観測成果を紹介したのち、今後の将来展望を講演者の研究計画と合わせて紹介する。

コン c9 超高光度 X 線源

森田貴士 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超高光度 X 線源 (ultraluminous X-ray source, ULX) は、 10^{39} [erg/s] を超える高い X 線光度を持ち、銀河中心以外の場所で観測される X 線源である。ULX の光度を説明するために

は、恒星質量ブラックホールに超臨界降着（質量降着率がエディントン降着率以上）が起きている、もしくは中間質量ブラックホール（ $10^2 - 10^5$ 太陽質量）に垂臨界降着が起きていると考える必要がある。超臨界降着と中間質量ブラックホールはどちらも大質量ブラックホールの起源や進化に深く関係しているため、ULX の性質を解明することは非常に重要である。

超臨界降着円盤は輻射圧優勢で光学的に厚い円盤であり、高速のガスが噴き出る現象（アウトフロー）が起こる。近年、X 線だけでなく可視光や電波を使った多波長での観測により、このアウトフローの存在を示唆する証拠が見つかった（Fabrika et al. 2015）。また、いくつかの ULX は中心天体として中性子星を持つことが分かった（Bachetti et al. 2014）。中性子星の質量には上限があるため、このことは、超臨界降着が実際の天体で起きていることを示す事実である。一方、中心天体の質量を直接求められないために、中間質量ブラックホールである可能性も残っており、議論が続いている。本講演では、Kaaret et al. (2017) をもとに観測的な視点から、ULX 研究の現状とその課題についてレビューする。加えて、ULX IC342 X-1 に関する自身の研究についても紹介する。現在、すばる望遠鏡と X 線衛星 *XMM-Newton*、*NuSTAR* による同時観測データを用いた多波長での解析を進めている。

- 1 Fabrika, S., Ueda, Y., Vinokurov, A., Sholukhova, O., & Shidatsu, M. 2015, *Nature Physics*, 11, 551
- 2 Bachetti, M., Harrison, F. A., Walton, D. J., et al. 2014, *nat*, 514, 202
- 3 Kaaret, P., Feng, H., & Roberts, T. P. 2017, arXiv:1703.10728

コン c10 全天 X 線監視装置 MAXI による LMC 領域のモニター観測 下向怜歩 (宇宙科学研究所 M1)

LMC (Large Magellanic Cloud : 大マゼラン雲) 領域には、4 つの明るい X 線天体 LMC X-1、X-2、X-3、X-4 が存在し、これらはどれも連星系である。X-1 と X-3 はブラックホール連星系、X-2 は磁場の弱い中性子星と低質量の伴星からなる X 線連星系、X-4 は強い磁場を持つ中性子星を含む連星 X 線パルサーで、いずれも伴星から中心天体への質量降着によって強い X 線を放出している。

本研究では、MAXI が 2009 年に国際宇宙ステーション (ISS) に設置されてから現在までの LMC 領域のデータ解析を行った。ISS は約 92 分で地球を一周し、MAXI はそれに合わせて全天のスキャンを行っている。MAXI に取り付けられた GSC (Gas Slit Camera) 検出器を用いて、4 天体の 2009 年 10 月 ~ 2017 年 3 月における 2-20keV 帯域のエネルギースペクトル変化、イメージ、ライトカーブを詳細に調べた。この期間において、LMC 領域を X 線で継続的にモニターを行ってきたのは MAXI だけである。

本講演では、MAXI の結果と過去の X 線観測の結果の比較からわかってきた LMC X-1, X-2, X-3, X-4 の X 線放射機構とこれらブラックホール / 中性子星周辺の物理状態について報告する。

コン c11 KEPLER モデルを用いた熱核 X 線バーストに降着率と金属量が与える影響の解析 山田龍王 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

X 線バースト (XRB) は、天体から放出される X 線の強度が 1 - 10 s 程で通常の 10 倍近くに増加し、数 10 - 100s 程の減衰時間で元に戻る現象である。バースト時のピーク光度はエディントン光度 $\approx 10^{38}$ erg s⁻¹ 近くにまで達する。X 線バーストは中性子星と低質量星 ($\sim 1M_{\odot}$) との連星系で起こり、そのメカニズムの違いから I 型と II 型に分類される。多数の観測例がある I 型 X 線バーストは、伴星から中性子星表面に降着した物質の不安定核燃焼によって引き起こされる。核燃焼のプロセスは伴星からの物質の降着率に依存して変化する。通常は H/He の混合バーストが起きるが、降着率が低くなると、He のみを燃料とするバーストが発生する。このバーストは混合燃焼と比べて光度が大きく、持続時間は短い急激な光度曲線の変化を見せる。これらのバーストの挙動を説明するための様々なモデルが提案されてきた。観測をよく説明するシミュレーションモデルを得ることで、核物質の状態方程式を制限することが期待される。将来的には、中性子星の $M - R$ 関係に厳しい制限を加えることが可能になるかもしれない。

今回紹介する論文では、1D 流体力学コード KEPLER を用いて、金属量、降着率に対して広くパラメータを振った 464 のモデルについてシミュレーションを行い、モデル毎の光度曲線の変化に関する性質を解析した。その結果、バースト間の再起時間は降着率に対する冪乗則を持ち、その冪は金属量によって $-(1.1 - 1.24)$ で変化すること、H/He 混合燃焼から純粋 He 燃焼へ移行するためには、太陽系組成比の場合バーストの再起時間が hot CNO cycle を経て H が使い果たされる時間と一致することを発見した。また、バーストの持続時間、光度曲線の凸性、バースト時に対する休止時のフラックスの比などの観測可能な現象と比較することでモデルの妥当性を検証している。

- 1 Lampe, N., Heger, A., Galloway, D.K. 2016, *ApJ*, 819, 46
- 2 Heger, A., Cumming, A., Galloway, D. K., Woosley, S. E. 2007a, *ApJL*, 671, L141

コン c12 元素合成から探る重力崩壊型超新星の爆発機構 澤田涼 (京都大学宇宙物理学教室 D1)

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星が恒星進化の最後に起こす爆発現象である。そして、重力崩壊型超新星が爆発成功するか否かという問題は、ブラックホール形成に直結しており、

宇宙の物理的進化を考える上で重要な現象である。しかし、特に「中心での爆発ダイナミクスを第一原理から計算した数値流体シミュレーション」では観測量を説明できる爆発に未だ至っていない。これは計算精度や近似にも課題が残されているが、なによりも現在の超新星爆発の物理への理解が不十分である可能性が大きい。この問題に対して本研究では、公開コード「FLASH」を用いて流体計算および元素合成反応計算を行うことで、観測量を再現するためにはその爆発メカニズムにどのような制約が与えられるのかを調べた。爆発的要素合成で作られる元素の生成量や分布は、爆発ダイナミクスの影響を多分に受ける。そのため生成される元素を通じて、爆発中心領域でどのような現象が起きているのか理解することができる。具体的には、近年の第一原理計算で示唆されている「長時間かけて爆発エネルギーが観測値まで成長する」という結果に注目した。そして、「成長時間をパラメーターに爆発エネルギーの成長時間は、現実的に観測される重力崩壊型超新星が再現されるためにはどの程度まで許されるのか」を調べた。その結果、現状の第一原理計算での爆発エネルギーの数値計算での現実的再現性の条件として、200[ms]程度以内で 10^{51} [erg]へ到達する必要を要求できた。本研究により、重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズムの探求において強い制約がかけることに成功した。

- 1 Suwa Y, Tominaga N, Maeda K. arXiv:1704.04780
- 2 Nakamura K, Kuroda T, Takiwaki T, Kotake K. *Astrophys.J.*793 45 (2014)
- 3 Woosley, S. E. & Weaver, T. A. 1995, *ApJS*, 101, 181

コン c13 天体物理学における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応の重要性和現状

森寛治 (国立天文台三鷹 M2)

$^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応は、Ia 型超新星や X 線バーストにおいて鍵となる反応である。

超新星爆発のうち、スペクトルに水素の吸収線が見られず、かつケイ素の吸収線が強いものを Ia 型超新星と呼ぶ。Ia 型超新星の親星はいまだ明らかとなっていない。しかし、有力なシナリオとして、白色矮星に伴星から質量が降着しチャンドラセカール質量近くまで成長すると超新星爆発に至る Single Degenerate (SD) シナリオと、白色矮星連星が重力波を放出しつつエネルギーを失い合体に至り、超新星として爆発を起こすという Double Degenerate (DD) シナリオがある。SD シナリオでは、超新星爆発の直前に白色矮星の内部で $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が開始し、対流が発生することが知られている。この進化段階は carbon simmering と呼ばれており、電子捕獲反応を通して親星の中性子度を変化させ、超新星爆発の元素合成に影響を及ぼす可能性がある。DD シナリオでは、連星合体後の進化の様子は $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応の反応率に敏感に依存する。

一方、X 線バーストは、中性子星に降着した水素やヘリウムが核爆発を起こす現象である。通常の X 線バーストの持続時

間は数分程度であるが、ごくまれに数時間もの長時間持続するものが観測されている。この現象をスーパーバーストと呼ぶ。スーパーバーストでは中性子星表面で炭素が燃えているものと考えられており、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応が重要な役割を担っている。

このように $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 反応は普遍的に重要な素過程であるが、その反応断面積を実験的に測定することは難しい。これは、天体物理的な環境では熱的に分布するプラズマ中で反応が起こるため、低エネルギー領域における反応断面積が重要になるためである。ところが近年、Trojan Horse Method のような間接的手法の発展や、実験装置の進歩によって、その測定の試みが始まっている。本発表では、この反応にまつわる実験の現状と、我々の研究の予備的な結果を紹介する。

- 1 Spillane et al. *PRL* 98 122501 (2007)
- 2 Chamulak et al. *ApJ* 677 160 (2008)
- 3 Sato et al. *ApJ* 807 105 (2015)

コン c14 IIb 型超新星親星の半径と質量放出率

大内竜馬 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

重力崩壊型超新星は大質量星が進化の最期に起こす爆発現象である。爆発時の親星 (爆発直前の星) が持つ外層の構造や親星近傍にある星周物質の性質に応じて、超新星は異なった観測的特徴を示す。特に、爆発直後には水素の吸収線が見られるが、徐々にそれが弱まり次第にヘリウムの吸収線が卓越するスペクトル進化を示すものを IIb 型超新星という。II b 型超新星の親星は水素外層の大部分が剥ぎ取られ、少量の外層を残した星だと考えられている。このような外層の剥ぎ取りの原因としては、単独大質量星 ($\gtrsim 25M_{\odot}$) が持つ強力な恒星風か、あるいは伴星への質量輸送の二説が考えられる。まだ議論に決着はついていないが、近年の観測事実は後者の説をより強く支持している [1]。4 つの IIb 型超新星について、爆発直前の親星の撮像観測データに加え、爆発の詳細な多波長観測データが得られている。これらの観測は、半径の比較的大きい親星が爆発直前に持つ質量放出率は、半径が小さい親星のそれより一桁程度高いことを示唆する [2]。このような高い質量放出率は単独星恒星風では説明ができない。

本研究はこの観測事実の原因を明らかにすることを目的とした。そのために私は公開コード MESA を用いて、様々な値の初期パラメータを持つ多数の連星について進化計算を行った。計算は主系列段階から主星の爆発直前まで行った。本計算により、半径が大きい親星ほど爆発直前により高い連星間質量輸送率を持つため、それに伴ってより高い質量放出率を持つことが明らかになった。さらに、それらの半径が大きい親星モデルのいくつかは、爆発直前にきわめて高い質量放出率とそれに伴う濃い星周物質を持つために、IIc 型超新星という別の分類の超新星として観測される可能性があることを示した。またそのような超新星の発生頻度を見積もった。本研究会では以上の成果を発表する。

- 1 Benvenuto, et al. ApJ, 762, 74 (2013)
- 2 Maeda, et al. ApJ, 807, 35 (2015)

コン c15 コンパクト天体におけるニュートリノ輻射 輸送の研究

西野裕基 (京都大学 天体核研究室 D2)

高密度天体におけるニュートリノ輻射輸送の数値計算結果について報告する。大質量星の崩壊あるいは中性子星を含む連星の合体衝突の際には、大量のエネルギーがニュートリノを介して放出される。放出された莫大なエネルギーは、ごく一部が周囲の物質に受け渡され、相対論的なジェットを形成しうる。相対論的なジェットが形成されたのならば、ガンマ線バーストと呼ばれる突発的な電磁放射が起きる可能性が高い。このガンマ線バーストのシナリオは広く受け入れられているが、ジェットの形成機構については数値計算によって十分に確かめられてはいない。なぜなら、輻射輸送計算は一般に数値計算コストが大きいので近似的な取り扱いしか行われてこなかったからである。数値計算コストの少ない近似計算手法は数多く提案されているが、それらの近似の有効性は検証が必要である。本講演では、それらの近似手法による計算結果について検証する。

- 1 Meszaros&Rees, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 257.1 (1992): 29.
- 2 Zalamea&Beloborodov, Mon.Not.Roy.Astron.Soc. 410.4 (2011): 2302-23.

コン c16 連星中性子星合体 (BNS) における数値シ ミュレーションの現状と今後の展望

岡本和範 (大阪大学 宇宙進化研究室 M1)

中性子星 (NS) は大質量星の進化の最後に残された高密度天体である。大質量星の内部では核融合が起こり、それによる圧力で星の重力を支えている。核融合は最も安定な鉄まで合成する。その後核融合は進まず圧力と重力のバランスが崩れ、圧力が重力に対抗出来なくなり重力崩壊を起こす。多くの星では重力崩壊を起こす前に縮退圧によって支えられており、特に中性子の縮退圧によって支えられる星を NS という。

最近、重力波の直接観測により、その発生源の一つである連星中性子星 (BNS) が注目されている。BNS は二つの主系列星の連星が中性子星の連星になった状態である。BNS の最後の過程に合体があり、BNS 合体が引き起こす物理現象の一つに重力波の放射がある。ブラックホール連星から放射される重力波の直接観測の成功により今後 BNS 合体から放射される重力波が観測される事が期待されている。BNS 合体を起源とする重力波を観測すれば、一般相対論的な光速に近い速さで運動する状態での NS を調べられる。この恩恵により NS 内部の高密度な極限物質の状態方程式を獲得できる。BNS 合体はショートガンマ線バースト (SGRBs) の起源の候補の一つとされている。宇宙での高エネルギー天体の一つにガンマ線バース

ト (GRB) があり、宇宙最大の爆発とも言われる巨大で激しい爆発現象の事で数秒から数十秒の間、明るく輝く事が分かっている。GRB には短時間に明るく輝く SGRBs があるが SGRBs の起源については良く分かっていない。最近では BNS 合体を良く表している数値コードが多く開発されており、それらを用いて BNS 合体の数値シミュレーションが盛んに使われている。この様に BNS は NS の研究において重要である。

BNS のダイナミクスを得る為に高度な三次元数値シミュレーションを使うと、BNS 合体を再現する事が出来る。本発表では BNS 合体における数値コードとシミュレーション研究の現状を紹介し、今後の展望について述べる。[1]

- 1 Luca Baiotti, Luciano Rezzolla, 2016, preprint (arXiv:1607.03540)

コン c17 超新星爆発における重力波放射過程 日永田琴音 (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 倍以上の質量を持つ重い恒星が、その進化の最終段階に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。例えば超新星は爆発後に残される中性子星・ブラックホールといった高密度天体の形成過程そのものであり、また爆発時に合成される元素恒星は銀河の科学的進化・物資循環を担っている。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機構は、60 年以上にわたる研究の歴史を持ちつつも、未だに完全には理解されていない。

超新星の爆発機構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到達するので、超新星の中心の情報を直接運んでくる。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、爆発機構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、アインシュタイン方程式から出発して重力波の 4 重極公式を導出し、超新星を源とする重力波の特徴を最新の数値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。

コン c18 重力波から考えるブラックホール連星の 起源

和田知己 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

LIGO O1 run ではブラックホール連星 (binary black hole, BBH) の合体から生じる重力波を 3 イベント観測した。この重力波の解析結果から、合体する前のブラックホール (black hole,

BH)の質量、有効スピン、BBH合体のevent rateといった量が明らかになったが[1]、これらの観測を説明するBBHの起源については諸説あり、はっきりとわかっていない。その説の1つに連星系が重力崩壊をおこしBBHができるというシナリオがある。このシナリオではBBHの有効スピンの重力崩壊する直前の星の種類に大きく依存する。そして、今回の3イベントでは有効スピンは非常に小さかった(例えばGW150914では $\chi_{\text{eff}} = -0.06^{+0.14}_{-0.14}$)。このことから、今回観測されたBBHが連星起源であるとする、その連星の種類を考えることができる。

本講演ではHotokezaka & Piran [2]に沿って以下の内容をレビューし、BBHの起源となりうる星の種類を調べ、将来見つかるであろう重力波の特徴を考察する。まず、連星起源のBBHに対して、有効スピンの小さくかつハッブル時間内に合体するという(我々が重力波を観測するのに必要な)条件は、その起源となる連星がWolf Rayet連星(WR星)と(今はまだ観測はされていない)種族III連星であれば満たしうることをみる。それらの連星に対してBBH形成率と合体時間分布を仮定し、有効スピン分布および、赤方偏移によるevent rateの変化を計算すると、今回の観測に一致する。またこの計算結果から、有効スピンの大きいBBH合体のevent rateがredshift($z \sim 2-3$) (WR星)や($z \sim 5$) (種族III)にピークをもつことがわかる。これにより、将来的に大きいredshiftの重力波まで観測できるようになれば、このピークの有無によりBBHの起源に制限を与えることができる。

また、6月に終了予定であるLIGO O2 runの解析結果と本論文の結果との比較も、LIGO O2 runの解析結果が出ていれば紹介したい。

- 1 Abbott, B. P., et al. 2016, Physical. Review. X, 6, 041015
- 2 Hotokezaka, K. & Piran, T., arXiv:astro-ph/1702.03952

コンc19 MAXIの長期データを用いた大質量X線連星系の周期性の研究

酒巻愛(日本大学 宇宙・数理解析研究室 M1)

SFXT (Supergiant Fast X-ray Transient) はINTEGRAL衛星によって20天体ほど発見された大質量X線連星系HMXBs (high mass X-ray binaries) の一種であり、コンパクト天体の中性子星とOB型超巨星で構成されている。通常のHMXBsは数百秒から数千秒で平均の10-50倍の明るさになるが、SFXTは数時間に及ぶX線の増光が起こる。暗い時はX線光度が $L \sim 10^{32}$ [erg/s]であるのに対し、増光時には短時間で $L \sim 10^{36} - 10^{37}$ [erg/s]に達する。まだ解明されていないこれらSFXT特有のふるまいの原因を、全天X線監視装置MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image)の観測データを用いて明らかにすることが本研究の目的である。

MAXIは国際宇宙ステーションの日本実験棟「きぼう」の船

外実験プラットフォームに搭載され、2009年8月15日より7年以上、約92分で全天からのX線をスキャン観測し続けている。SFXT周辺に明るい天体がなく、MAXIが検出したことがある5天体を選び、MAXIにより得られた時系列データを用いてパワースペクトル解析を行い、周期変動の有無を調べた。そこでは、MAXIから得られるデータは離散的でかつ、データ欠損が含まれているため、これらを考慮したプログラムを作成した。

解析結果より、IGR J08408-4503とIGR J18483-0311でそれぞれ35日と18日の周期が検出された。それらはSwift衛星のBAT検出器から得られた周期(Romano et al. 2014)とINTEGRAL衛星から得られた周期(Levine et al. 2011)と一致することを確認した。これら周期解析の結果に加え、得られた周期でX線の光度曲線を重ね合わせ、その周期内でのエネルギー強度分布を調べる畳み込み解析の結果も発表する。

- 1 Romano et al. 2014, A&A, 562, A2
- 2 Levine et al. 2011, ApJS 196, 6

コンc20 大質量ブラックホール連星周りの星の確率的分岐を伴う離心率の進化 岩佐真生(京都大学 天体核研究室 D3)

大質量ブラックホール(以下MBHと略記)連星は銀河の合体に際して形成されると考えられている。この連星は最終的に重力波放出をして合体する可能性があり、将来の観測の宇宙重力波干渉計eLISAの重要な観測対象となっている。またMBHの周囲には星が多く存在すると考えられており、この星はMBHへと落下すると重力波や電磁波を放射すると考えられている。このような事象はMBHの強重力場の情報を引き出す可能性があるため重要である。近年、単独のMBHの場合に比べてMBH連星の場合の方がこのような事象の割合が増加することが示唆されている。なぜなら、MBH連星の場合には離心率が大きく振動するKozai-Lidov(KL) mechanism[1,2]が働くと考えられているからである。しかし、KL mechanismによる離心率の振動は短距離力(一般相対論的效果や星団が形成するポテンシャル)により抑制されることが示唆されている。この短距離力の効果はMBH連星間の距離が大きいほど優位に働く。本研究では軌道収縮するMBH連星におけるKL mechanismと短距離力との関係について調べた。具体的には永年摂動論のもと位相空間の構造の進化を調べることでMBH連星周りの星の軌道の進化を明らかにした。その結果、MBH連星の軌道収縮に伴い位相空間の不動点で特徴的な分岐が起こることがわかった。また離心率の進化は初期条件にセンシティブであり、確率的な分岐を起こすことがわかった[3]。本発表ではこの確率的分岐について報告する。

- 1 Y. Kozai, Astron. J. 67, 591 (1962)
- 2 M. L. Lidov, Planet. 562 Space Sci. 9, 719 (1962).
- 3 Iwasa and Seto, in prep

コン c21 Schwarzschild 特異点の安定性について 坂井佑輔 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

約2年前に LIGO でブラックホール連星からの重力波を検出し、重力波天文学への一歩を切り開いた。しかし、ブラックホールには特異点と言う重大な問題を孕んでいる。現在のところ LIGO が検出した波形データによれば、いずれも自転の小さいブラックホールだと考えられるが、それにはやはり特異点が存在する。今回は、回転のない球対称ブラックホールの摂動を考え、その結果特異点が摂動によらず安定である事を発表する。これは重力波によるブラックホール研究の中で、今一度深刻な問題であると考え、これからの研究へと繋げるのが動機である。

- 1 B.S. Sathyaprakash and Bernard F. Schutz Living Rev. Relativity, 12, (2009), 2
- 2 JoHN A. WHKKLKR, Palmer Physical Laboratory, Princeton University, Princeton, Nm Jersey (Received July 15, 1957)