

2020 年度 第 50 回 天文・天体物理 若手夏の学校  
コンパクト天体・宇宙素粒子分科会 アブストラクト

---

大須賀 健 (筑波大学 計算科学研究センター教授) 8月25日 13:15–14:15 room 2  
次世代のブラックホール天文学 (入門)

アインシュタインの一般相対性理論の登場からおよそ百年、ブラックホール天文学は変革の時代を迎えようとしています。イベント・ホライズン・テレスコープがブラックホールの直接撮像に成功し、世界トップを奪還したスーパーコンピュータ「富岳」の本格稼働が目前に迫っています。物質や光が吸い込まれる様子や相対論ジェットが生成される現場を、理論と観測の両面から直接調べる時代が到来するのです。ブラックホール周囲の高エネルギー現象やブラックホールの進化史が解明されれば、その影響を受けたと考えられる星や銀河の形成・進化論も大きく進歩するはずです。ブラックホール天文学の変革は、高エネルギー天文学はもちろんのこと、天文学全体に大きな発展をもたらすことになるのです。ブラックホール天文学の現状を俯瞰し、今後解明すべき課題について講演します。

---

大神 隆幸 (甲南大学 理工学部物理学科甲南大学外部資金等研究員)

8月26日 15:45–16:45 room 2

## すばる望遠鏡/HSCを用いた重力波対応天体の探査

中性子星連星合体からの重力波イベント GW170817 における電磁波での対応天体同定により、重力波観測と電磁波観測のマルチメッセンジャー天文学の新しい扉が開いた。日本では J-GEM (Japanese Collaboration for Gravitational-Wave Electro-Magnetic Follow-up) が組織され、日本国内外の可視光・近赤外線望遠鏡での重力波イベントの即時フォローアップ観測を行っている。その中でも 1.8 平方度の視野を持つすばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) は、10-100 平方度に及ぶ重力波望遠鏡の位置決定精度に対して必要不可欠な、北天での広視野観測を実現する 8m 級の望遠鏡唯一の装置として注目される。特に重力波望遠鏡が目標感度に到達し 200Mpc の距離の中性子星合体の検出が可能になれば、HSC 以外にその対応天体を検出することは不可能である。2019 年 4 月に LIGO/Virgo の 3rd Observing run (O3) が開始され、終了までの約 1 年間に 56 の重力波 (ブラックホール連星合体等も含む) が検出された。我々 J-GEM は、その内 3 つのイベント (S190510g, S191216ap, S200224ca) に対して、すばる望遠鏡/HSC を用いた follow-up 観測を実施した。本講演では、J-GEM におけるすばる望遠鏡/HSC を用いた重力波イベントの follow-up 観測の実施状況及び今後の展望を紹介する。

## コン 1 X 線突発天体 MAXI J1820+070 の多波長 SED 解析

吉武 知紘 (京都大学 理学系研究科宇宙物理学専攻 M2)

X 線突発天体 (X-ray Transients) とは、コンパクト天体と恒星からなる連星系であり、特に X 線で明るく、ときおり再増光 (rebrightening) が見られることが知られているが、その詳細な構造は理解されていない。このような天体を理解することは、未だに解明されていない銀河中心に見られる超巨大ブラックホールの形成の謎を解き明かすうえで重要である。

そこで我々は先行研究 (Shidatsu et al. 2019) により X 線と可視光で rebrightening が観測されている系内の X 線突発天体 MAXI J1820+070 に着目した。せいめい天文台の KOOLS-IFU を用いた可視光観測は 2019 年 5 月 11 日に行われたが、このとき天体は rebrightening を起こしていた (Adachi et al.). 可視光スペクトルの H  $\alpha$  線の観測から HWZI (Half Width at Zero Intensity) が 20 Å 程度であり、これは光学的に厚くて明るい円盤の内縁半径が大きく広がっていることを示す。また、せいめいの観測と準同時観測が赤外、可視光、紫外から X 線の波長で行われており、これを用いた SED 解析や降着円盤構造について議論する。

## コン 2 食の形状変化による IW And 型矮新星のモデルの検証

柴田 真晃 (京都大学 理学研究科宇宙物理学教室 M1)

矮新星は白色矮星 (主星) と低質量星 (伴星) からなる近接連星系であり、ロッシュローブを満たした伴星から輸送されたガスが主星の周囲に降着円盤を形成する。矮新星では円盤の熱的不安定性により準周期的に増光 (アウトバースト) が観測される。矮新星にはアウトバースト後に数週間から数年間、中間的な明るさ (スタンドスティル) を示しその後減光する天体が存在し、これらは Z Cam 型矮新星と呼ばれる。しかし近年の観測により、スタンドスティル後に減光せずアウトバーストを起こす、Z Cam 型とは異なる特徴を持つ天体が見つかった (Simonsen 2011)。このような天体は Z Cam 型のサブクラスとして IW And 型矮新星と呼ばれている。IW And 型の変動を説明するものとしては現在 2 つのモデルが考えられており、1 つは伴星からの質量輸送率が急激に増加することでアウトバーストが起こるとするモデル (Hameury and Lasota 2014)、もう 1 つは何らかの原因によって円盤内側にも質量が輸送されるとするモデル (Kato et al. 2020, Kimura et al. 2020) である。後者のモデルでは質量輸送が円盤内側まで届き、円盤内側は高温状態を維持することでスタンドスティルが実現できると考えられている。2 つのモデルはスタンドスティル期間中の

円盤半径が異なる変化をすると推測され、これを確かめることでモデルに制限をかけることができる。

本研究では食を持つ IW And 型矮新星 V2837 Ori の光度曲線解析を行った。この天体は VSNET による 2019 年の観測キャンペーンとサーベイデータなどにより 16 年間にわたって観測されており、そのデータを使用した。V2837 Ori は IW And 型では初めて食が観測された天体であり、スタンドスティル期間中の食の形状の変化を解析することで、モデルの検証のために重要な円盤の半径変化に関する情報が得られる。本講演ではこの観測結果とそれから示唆される IW And 型矮新星の挙動を説明するモデルについて議論する。

## コン 3 MAGIC ガンマ線望遠鏡によるブレーザー S5 0716+714 のフレア観測

Yoo Seokhyun (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

ブレーザーは視線方向に噴出する相対論的ジェットを伴う活動銀河核で、激しい光度変動 (以下、フレア)、可視光帯域で大きな偏光を示す天体である。また、電波からガンマ線まで広い波長領域で観測され、多波長スペクトルには二山の構造が見られる。超高エネルギー (VHE) ガンマ線の帯域は、多波長スペクトルの内最も高エネルギー側に位置し、スペクトル形状を議論する上で重要である。VHE ガンマ線観測には大気チェレンコフ望遠鏡を用いた観測が有効である。大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC は衛星検出器よりはるかに広い有効面積を持ち、VHE 領域でも優れた時間分解能を得られることができるため、短時間変動の観測に適合である。本研究ではブレーザーのフレアの放射メカニズムを調べるために S5 0716+714 を観測・解析している。S5 0716+714 は多波長スペクトルの二つの山の内、低いエネルギー側のピークが可視光から紫外線の間に位置する Intermediate-frequency peaked BL Lac 型ブレーザーである。この天体は大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC を用いて、2007 年に初検出して以降、現在までフレアの観測を行っている。2015 年のフレアは電波からガンマ線までの多波長領域でスペクトルを得られたが既知のモデルではガンマ線スペクトルの形状を説明できず、より系統的な議論を可能にするため、さらなるガンマ線の観測が必要不可欠であった。私が解析する 2017 年のフレアは 12 月 28 日から 29 日に掛けて、MAGIC 望遠鏡を用いて観測し、2015 年より 3 倍の放射強度、本天体では初となる 1 日より短い時間スケールの光度変動を検出した。2015 年のフレア時のスペクトルは 1 日より短い時間での光度変動は考慮せず放射モデルを検証したため、本フレアの解析に適用できない。2017 年のフレアの解析には短い時間スケールの光度変動を考慮する必要がある。本講演では、2017 年フレアの MAGIC 望遠鏡観測データの解析について報告し、2015 年のフレアと比較しながら短時間スケールの光度変動、多波長スペクトルに対する解釈について議論する。

## コン 4 First Detection of Superoutbursts during Rebrightening Phase of a WZ Sge-type Dwarf Nova

反保 雄介 (京都大学大学院 理学研究科宇宙物理学教室 M2)

矮新星は、白色矮星（主星）と低質量星（伴星）、伴星から主星へと輸送されたガスによる降着円盤からなる近接連星系である。この系では、アウトバーストと呼ばれる増光現象が観測される。アウトバーストには大きく2種類あり、(i) 数日間、1~4等級程度明るくなる規模の小さなノーマルアウトバースト、(ii) 質量比 (=伴星質量/主星質量) の小さい系でのみ起こり、数週間に渡って4~9等級明るくなる、より規模の大きなスーパーアウトバースト、に大別され、いずれも主星への質量降着率が一時的に上昇することで増光する(Osaki 1996)。特に、質量比の最も小さな矮新星は、WZ Sge型矮新星と分類される(Kato 2015)。WZ Sge型矮新星では、スーパーアウトバースト直後に小規模なアウトバーストを起こすことがあり、これは再増光と呼ばれている。再増光には、enhanced mass transfer と、mass reservoir という2つのモデルが提唱されているが決着していない。

本講演では、2019年7月にスーパーアウトバーストが発見されたWZ Sge型矮新星 TCP J21040470+4631129の観測およびその解析結果を報告する。複数回の再増光を示した過去の天体では、再増光はすべてノーマルアウトバーストであったが、それに対し、この天体では再増光がスーパーアウトバーストに発展するという、観測史上初めての現象を見せた。その光度曲線とスペクトルの解析から、この現象を起こすには、スーパーアウトバースト直後に円盤の質量および角運動量が増加し、再び3:1共鳴半径まで円盤が成長することが必要であることがわかった。また、この天体は、Tampo et al. 2020で報告された以降も再増光を示しており、現在までの追観測の解析結果から示唆される、この特異な再増光のメカニズムについて報告する。

## コン 5 孤立ブラックホールにおける低光度降着流の 広帯域スペクトル計算

古野 雅之 (京都大学 理学研究科物理・宇宙物理学専攻 M2)

銀河系にはブラックホールが数多く存在すると予想されている。ブラックホールが銀河にどのくらい存在し、どのように分布しているかを知るには、ブラックホールの形成や恒星進化の理論を議論する上で重要である。しかし現在観測されているのは伴星からの質量降着によって輝くX線連星のみであり、その数はせいぜい数十個である。一方理論予想では108個にも及ぶと考えられており、(e.g. Caputo+2017)、さらに未発見のもの大部分は連星系をなしていない孤立ブラック

ホール (Isolated Black Hole, IBH) であると考えられている (Fender+2013)。

IBHが銀河内に存在するガス雲に突入した場合、ガス降着を起こして輝く。このときのスペクトルエネルギー分布 (SED) を予測した研究はいくつか存在する (Mahadevan 1997, Fujita+1998)。ところで星間物質がIBHへ降着する際、放射非効率降着流 (Radiative Inefficient Accretion Flow, RIAF) になると考えられているが、RIAFではガスが重力にあまり束縛されず磁気圧などに駆動されるアウトフローの存在が期待される。最近 Tsuna+2019において、IBHが作るRIAFのアウトフローからの非熱的電波放射を計算し、電波でのIBHの観測可能性が指摘されたが、他の波長域での観測可能性は明らかになっていない。

そこで本研究では、IBHのSEDをアウトフロー、ジェットも含めたRIAFモデルの流体場によって求める。RIAFとアウトフローの流体場としては輻射磁気流体計算により別途計算し、その流体場の上で輻射輸送の基礎方程式をモンテカルロ法を用いた計算コードで電波から硬X線に渡る広い波長域のSEDを計算する。本講演では、これらのパラメータを変えた計算結果と解釈、それを元にしたIBHの将来の観測可能性について述べる。

## コン 6 放射冷却と磁場の乱流化による定常円柱状 ジェットの加速機構

喜友名 正樹 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 物理学第二教室 天体核研究室 M1)

活動銀河核やマイクロクエーサーの中には、双方向に相対論的なプラズマ流を放出するジェット構造を持つものが存在する。ジェットのエネルギー源はコンパクト天体の自転エネルギーと考えられ、これを取り出すためのメカニズムの一つに磁場による回転エネルギーの引き抜きがある。このメカニズムで想定されるジェットの根本では、電磁場のエネルギー流速がプラズマのものより大きい。一方で我々の方を向いたジェットであるblazarの観測 [3] からは、中心の超大質量BHからシュヴァルツシルト半径の $10^3 \sim 10^4$ 倍離れた地点では電磁場のエネルギー流速よりもプラズマのエネルギー流速のほうが大きい。これらを矛盾なく説明するためには、コンパクト天体近傍の電磁場のエネルギーが何らかの形でプラズマのエネルギーへと変換され、粒子の加速が生じる必要がある。

理想電磁流体でジェットを記述すると、球対称のジェットでは膨張に伴って磁気圧と熱的圧力が勾配をなし粒子を加速するが、円柱状で広がらないジェットでは加速は生じない。近年のVLBIによる観測によると、ジェットの全体の形は放物線状であるが、ジェットのコアの部分は広がり少ない円柱状であることが期待される。ジェットを加速するには球対称の理想電磁流体ジェットに代わる新しい加速機構が必要となる。

これらの問題への解決策としてTanaka & Toma [1] で提案さ

れたのは、Drenkhahn [2] で用いられたモデルを拡張し、理想電磁流体によるジェットの設定に非理想的な効果として \(\text{UTF}\{2460\}\)放射冷却 \(\text{UTF}\{2461\}\)そろったトロイダル磁場から乱流磁場への変換 \(\text{UTF}\{2462\}\)乱流磁場の散逸 の3つを同時に組み込むことで、広がらない円柱状ジェットにおいても効率的に電磁場のエネルギーを粒子のエネルギーに変換してジェットを加速する方法である。この方法を用いれば、放射冷却や磁場の散逸のみによる加速よりも効率的な加速が起こる。本発表では以下の論文 [1] について、レビューを行う。

[1]Tanaka S. J., Toma K., 2020, MNRAS, 494, 338

[2]Drenkhahn G., 2002, A&A, 387, 714

[3]Inoue S., Takahara F., 1996, ApJ, 463,555

## コン 7 爆発的質量放出により駆動される突発天体モデル：特異な突発天体 AT2018cow への適用

宇野 孔起 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻宇宙物理学教室 M1)

突発天体とは数日～数ヶ月の間に急激な増光・減光を示す天体である。近年、観測機器の発達や大規模なサーベイ観測により多くの突発天体が日々発見される中、特異な光度変化やスペクトル進化を示す天体が観測されている。このような特異な突発天体の理解は恒星進化の最終段階やその多様性を解明する上で極めて重要である。

AT2018cow は ATLAS のサーベイ観測により発見された、青く非常に明るい突発天体である。霏乗則で減少する光度、後退する光球半径、天体の色指数もほぼ一定という通常の超新星爆発 (SN) とは異なる特徴を持つと共に、観測初期にヘリウムの輝線、その後水素の輝線を放出するという特異なスペクトル進化を示す天体である。これらの観測的特徴を包括的・定量的に説明できるモデルは現在まで提唱されていない。先行研究では中間質量ブラックホール (BH) による潮汐破壊現象 (TDE) や電子捕獲型 SN を起源とするモデルが提案されてきたが、それらは光度変化やエネルギースケールといった、AT2018cow が持つ特異性の一側面しか説明していない。

本研究では、恒星風のような定常的なアウトフローを仮定した 'wind-driven model' を新たに提案し、AT2018cow の可視光・紫外線データに適用した。我々は、光度変化や光球半径、色指数の変化だけでなくスペクトル進化に関しても観測と良く一致する結果を得た。本モデルは AT2018cow が最大時で  $\sim 20 M_{\text{sun}}/\text{yr}$  という爆発的な質量放出をしており、アウトフローが放出される典型的半径は  $\sim 10^{13}$  cm であることを示した。  $10^{13}$  cm は赤色超巨星 (RSG) の典型的半径であることから、AT2018cow は RSG が関係した系であると示唆される。加えて、モデルから導かれるエネルギースケール ( $\sim 10^{51}$  erg)、総放出質量 ( $\sim 0.6 M_{\text{sun}}$ )、観測からわかる光度変化のタイムスケールを考慮すると、AT2018cow は BH による低質量 RSG の TDE、または failed SN である可能性が高い。

## コン 8 重力崩壊型超新星爆発における磁気流体ジェットの線形解析

道簾 皓平 (早稲田大学 先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻 M2)

重力崩壊型超新星爆発について、その爆発機構の研究においては、内部コアでの反跳によって生じた衝撃波が、伝播の途中でエネルギーを失い停滞してしまう、という問題が研究対象となっている。

現在、これを解決する機構として、ニュートリノ加熱機構が有力視されている。しかし、問題の解決に対してこの機構のみで十分であるかは不明である。さらに、超新星爆発のうち、特に大きな爆発エネルギーを持つ極超新星については、この機構のみでは説明できないと考えられている。

他方、一般的に、超新星爆発を生じる恒星、およびその後に残る中性子星は、そのどちらも磁場を有している。このことから、超新星爆発の際にも磁場が存在していると考えられている。さらに、この磁場は、重力崩壊による圧縮と自転による磁気回転不安定性から、ガスの運動に影響を及ぼす規模にまで増幅されると考えられている。

既に、先述の停滞衝撃波の問題をこの磁場によって解決する、という研究がなされており、数値シミュレーションの結果から、自転軸の方向にジェット状の爆発を生じる可能性が指摘されている。しかし、この数値シミュレーションは軸対称を課した結果であり、近年、非軸対称なシミュレーションでは、伝播速度がより遅く、幅広い構造の爆発が見られたと報告された。

本研究は、磁場が超新星爆発にもたらす影響について、超新星爆発内の磁気流体ジェットを解析することで、それを解明することを目的としている。現在、非軸対称下における、ジェット状とは異なる爆発の要因について、ジェットの崩壊ではないか、という考察こそなされているものの、詳細な解析によって結論した研究はなされていない。また、このジェット状の爆発かそうでない爆発かという差異が、どのような条件によって生じているのかは、不明である。

本研究では、超新星爆発内における磁気流体ジェットに対して線形解析を行い、その不安定モードを導出する。それによって、先に述べた爆発構造の定性的な差異の要因を理論的に解明する。

## コン 9 大質量星の重力崩壊における多次元一般相対論的 Boltzmann ニュートリノ輸送

赤穂 龍一郎 (早稲田大学 先進理工学研究科物理学及応用物理学専攻 M2)

約 8 太陽質量を超える大質量星は重力崩壊を起こして中性子星やブラックホールなどのコンパクト天体を形成することが知られているが、そのメカニズムやシナリオは十分に理解されていない。その定量的な理解には、なるべく正確な「第一原理的」

シミュレーションを行うことが必要である。大質量星の重力崩壊のシミュレーションにおいて必要不可欠なパーツの一つに、ニュートリノが挙げられる。ニュートリノは重力崩壊で解放されたエネルギーの 99% 以上を運ぶことが知られており、それと周囲の物質との反応が全体のダイナミクスに多大の影響を及ぼすことが知られている。また、ニュートリノは電磁波などと比べて深部の情報を持ち出すため、観測シグナルとしても便利である。

ニュートリノは周囲の物質と熱平衡状態にないため、位相空間分布関数に関する Boltzmann 方程式を解くことが最も望ましい。しかし、Boltzmann 方程式の数値計算は非常に計算コストがかかることが知られており、様々な近似法が用いられてきた。しかし、それらの近似法では Boltzmann 方程式を解いた結果と変わってしまうことが示唆されており、近似を用いない計算が必要とされている。現状、先行研究では非一般相対論的な空間多次元計算、あるいは一般相対論的な空間一次元計算しか行われていない。

本研究では、空間多次元一般相対論的 Boltzmann 方程式を解くコードを開発し、その正確さを検証した。これは世界で初めての試みであり、先行研究に類を見ない重力崩壊計算を行うことが可能である。

## コン 10 3 次元対流効果を加えた超新星爆発の球対称 1 次元シミュレーション

佐々木 俊輔 (総合研究大学院大学 物理科学研究科天文科学専攻 M1)

大質量星はその進化の最終段階に、超新星爆発を引き起こす。その爆発のエネルギー源は自らの重力で爆縮し解放される莫大な重力エネルギーである。この 10 年で非常に研究が進んでいるが、これらの現象の機構はまだ完全に解明されていない。これは、ニュートリノの輻射輸送や対流などの複雑な流体現象が爆発に本質的な役割を果たしていると考えられ、研究の技術的難易度が非常に高いためである。標準的な重力崩壊型の超新星爆発はニュートリノ加熱により起こると考えられている。この機構の解明を目指して詳細なシミュレーションを行うとき、ニュートリノと物質の相互作用を 3 次元の多くの計算グリッドで計算するため、計算コストは莫大なものとなる。(Takiwaki et al 2016) 最近の研究では 1 モデルあたりの計算資源を減らすため球対称近似を取り入れ、3 次元的な対流の効果を取り入れた 1 次元シミュレーションが開発されている。(Couch et al 2020)

我々の研究目標は超新星爆発の理論研究において最も重要である爆発を起こす親星の質量の決定である。また、超新星爆発を起こすかどうかを事前に診断できる特性量についても調べる。研究方法は計算コストを抑えた系統的シミュレーションを行う。本計算では最新の 1 次元シミュレーションの手法 (Couch et al 2020) を用いる。この方法により 3 次元に比

べ約 1 万倍の計算資源を節約できる。

将来、最新の手法である (Couch et al 2020) の 3 次元的な対流効果の導入方法を改良し、より精度の高い 1 次元シミュレーションを行い、爆発が可能な親星の質量を決定する予定である。

今回は、この手法のテスト計算をデモンストレーションし、上記の目標に対する研究成果についても議論する。

## コン 11 光度曲線の系統的解析で探る超新星の多様性

齋藤 晟 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M2)

初期質量が太陽の約 8 倍以上の恒星はその一生の終わりに超新星爆発と呼ばれる大爆発を起こす。これまでの観測で様々な種類の超新星が見つかり、水素層の有無、減光率、ピーク時の絶対等級などの特徴量は多岐にわたっている。通常の超新星はピークでの明るさが -16 等から -18 等程度であるのに対し、近年発見された超高輝度超新星はピーク時に -21 等を超えるほど明るい。通常の超新星の主たる放射エネルギー源であるニッケル 56 の放射性崩壊では超高輝度超新星の明るさを説明することができず、さらにこれまでその二種類の超新星の間には明るさのギャップが存在すると考えられていたため、通常の超新星と超高輝度超新星は独立に調査されることが多かった (e.g., Anderson et al. 2014, ApJ, Decia et al. 2018, ApJ)。しかし近年、突発天体に特化した多くのサーベイによって両者の間の明るさの超新星も見つかりつつある (e.g., Arcavi et al. 2016, Matsuda et al. in prep)。

そこで我々は、過去に観測された全ての超新星の撮像観測データを用い、様々な種類の超新星の光度曲線の系統的な調査に着手した。本研究では、波長ごとの光度曲線からピーク等級や減光率を求め、それらの関係を調べる。本講演では光度曲線から得られる特徴量の分布や相関について述べ、さらに通常の超新星と超高輝度超新星の共通点や相違点について議論する。

## コン 12 すばる HSC-SSP transient survey を用いた明るい超新星の光度分布調査

松田 将大 (東北大学 理学研究科天文学選考 M2)

重力崩壊型超新星は、質量の大きな星が一生の最期に自身の質量を支えきれなくなり、重力崩壊することで起こる爆発現象である。その明るさはピーク時では -16 等から -19 等に達し、宇宙で最も明るい現象の一つとされている。それに対して、近年発見された超高輝度超新星はピーク時に -21~-23 等に達し、2 つの超新星の明るさ分布の間にはギャップが存在しているという報告もあった。しかし、これらの超新星を全て含んで幅広く明るさ分布を調べる系統的な調査は未だ行われておらず、バイアスのない真の明るさ分布は解明されないままだった。

今回、2016 年 11 月から 2017 年 4 月にすばる望遠鏡

の戦略枠観測 (SSP) によって主焦点広視野撮像カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) を用いた突発天体の探査を行った。この探査は COSMOS 領域と呼ばれる広い範囲 (Ultra-Deep layer 1.77 deg<sup>2</sup>, Deep layer 5.78 deg<sup>2</sup>) を約半年間に渡り、数日に 1 回程度の短い時間間隔で何度も繰り返し行うものであり、約 26 等級まで検出可能な観測である。

我々はこのデータから、重力崩壊型超新星や超高輝度超新星を含む大きな明るさを持つ超新星について解析を行い、過去に報告されたいくつかの種類の超新星との光度曲線の比較や、光度分布の調査などを行なった。HSC の観測期間、監視体積などを踏まえて、選び出した天体から event rate の計算も行なった結果、過去の研究結果とも比較して、ギャップのないおおよそ continuous な光度分布が得られた。

本研究では、光度分布のギャップ部分や超高輝度超新星に属する明るさを持つ天体の分類や性質、event rate を示し、明るい超新星の真の光度分布について議論する。

### コン 13 一般相対論的輻射輸送コード ARTIST の空間 3 次元化

高橋 幹弥 (筑波大学 数値物質科学研究科物理学専攻 M2)

昨年、EHT により史上初めてブラックホールの撮像が報告されるなど、近年詳細な観測結果が出始めている。銀河中心には太陽質量の数億倍にも及ぶ巨大ブラックホールが存在すると考えられており、銀河形成などに深く関わっていることが観測からも示唆されている。しかしながら、巨大ブラックホールの形成メカニズムは未だ謎である。1つの形成シナリオでは、質量降着過程が重要な役割を果たすと考えられている。したがって、質量降着過程や降着流の構造を正確に知ることは、巨大ブラックホールの形成を理解する上で必須となる。

特に、ブラックホールのごく近傍では、降着流が光学的に厚くなる。光学的に厚い領域では、ガスと輻射の相互作用が顕著になり、降着流の構造に大きな影響を与える。このように、光学的に厚いブラックホール近傍での降着流の構造を調べるには、輻射流体方程式を正確に解く必要がある。輻射流体方程式を正確に解く第一歩として、本研究では、輻射輸送方程式を正確に解くことを考える。しかしながら、ブラックホール周囲で輻射輸送方程式を正確に解くこと難しく、これまででは何らかの近似解を求めたり、限られた状況でしか物理的に正しい解を与えない式を解くことが一般的であった。

しかし、2017 年に Takahashi らがブラックホール周囲で輻射輸送方程式を光の軌道に沿って直接解くコードである ARTIST コードの開発に成功した。ARTIST コードは、いかなる状況でも輻射輸送方程式を厳密に解くことができる。一方で、この ARTIST コードは赤道面に限った計算しか実装されていない。これでは、現実的な理論計算や、流体計算との融合は不可

能である。

このような状況を踏まえて、現在、将来的に流体計算と融合することを念頭におき、ARTIST コードを赤道面に限らず空間 3 次元でも計算できるコードに拡張する計画を推進している。本講演では、ARTIST コードの空間 3 次元化の開発の現状と将来の展望について述べる。

### コン 14 Ly $\alpha$ Photon の輻射輸送を考慮した超巨大ブラックホール形成の研究に向けたレビュー

武者野 拓也 (筑波大学 数理物質科学研究群 物理学専攻 M1)

最新の観測結果により、誕生から間もない宇宙初期に太陽の 10 億倍という質量をもった超巨大ブラックホールが形成されていることが明らかになっており、その急速成長過程を明らかにするために研究が盛んに行われている。降着円盤からブラックホールにガスが降着する際、ブラックホール近傍の高温高密度なガスから発生する電離光子による輻射フィードバックがガス降着を妨げるという問題がある。これまでの研究では、光電離を取り扱う際に、電離した光子がすぐ隣の水素原子に吸収されるという、いわゆる on-the-spot approximation が用いられているが、これは Ly  $\alpha$  photon の輻射圧を過小評価している可能性がある。そこで、発表者は Ly  $\alpha$  photon の輻射輸送を厳密に取り扱ったガス降着の研究をする計画である。

本発表では、主に” Ly  $\alpha$  Radiation from Collapsing Protogalaxies. I. Characteristics of the Emergent Spectrum” (Dijkstra, et al (2006) のレビューを行う。本論文では、原始銀河を想定した光学的に厚い球対称ガスに対してモンテカルロシミュレーションを用いて解析を行い、Ly  $\alpha$  の輻射輸送について調査した。このレビューを通して、Ly  $\alpha$  放射の性質と影響、そしてその輻射輸送の数値的取り扱いについて解説する。また、発表者が現在取り組んでいる Ly  $\alpha$  の輻射輸送をグリッドベースで解くコードの開発状況についても述べる。

### コン 15 Super-Eddington 天体に対する dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着

尾形 絵梨花 (筑波大学 数理物質科学研究群物理学学位プログラム M1)

恒星質量ブラックホール (BH) は、X 線連星として発見されることが多いが、未だ発見されていない単独の BH が多数存在する可能性がある。単独の BH は星間空間を浮遊し、重力によって捕獲した星間ガスを吸い込んでいると考えられる (いわゆる Hoyle-Lyttleton 降着)。ただし、BH の周囲に降着円盤が形成され、そこで強力な輻射が生じると、重力だけでなく輻射力が星間ガスの運動に影響を与えることになる。このような背景のもと、Fukue & Ioroi(1999) は sub-Eddington

円盤からの輻射、Hanamoto, Ioroi, & Fukue (2001) は super-Eddington 円盤からの輻射による輻射力を考慮し Hoyle-Lyttleton 降着を調べた。ただし、いずれも星間ガスが光学的に薄いと近似されており、減光の効果は考慮されていない。BH が高密度ガス雲に突入する場合や、星間ガスがダストを含む場合、光学的厚みの効果が無視できない可能性がある。そこで本研究では、dusty-gas の Hoyle-Lyttleton 降着率を定量的に調べた。具体的には、減光を考慮した輻射力と重力を取り入れた運動方程式を解くことで、Hoyle-Lyttleton 半径領域の定常構造を調べた。なお、光度が super-Eddington であっても解析できるように、減光によって輻射力が弱まることで降着可能となることがわかった。例えば、Eddington ratio (光度/dusty-gas に対する Eddington 光度) が 1.1 の球対称光源の場合の降着率は、Hoyle-Lyttleton 半径での dusty-gas の典型的な光学的厚みが 0.0033 で Hoyle-Lyttleton 降着率の 17%、0.33 では Hoyle-Lyttleton 降着率の 79% となった。講演では非等方な円盤放射の場合についても報告する。

## コン 16 相対論的流体力学の SPH 法を用いた数値計算法

北島 歓大 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

本講演では Monaghan&Price(2001) や Rosswog(2010,2015) 等をもとに、流体数値計算の一つである相対論的 SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法の有効性を考察する。

宇宙物理学で現れる現象には、流体が光速に近い速度で動いている場合がある。例えば、ガンマ線バーストやブラックホール候補天体の周辺で観測される高エネルギー・ジェット等である。こういった超高速流では強い衝撃波が発生する。また、周辺はほぼ真空とも言える低密度の環境の中で、一部の領域だけが高密度になる現象である。このような相対論的かつ真空領域を大きな割合で含む現象を扱うのに有効な計算法の一つに相対論的 SPH 法がある。よく知られている SPH 法は非相対論的流体力学を扱う手法で長い歴史があり、種々の発展がなされている。しかし、相対論的 SPH 法の研究の論文は極めて少なく、まだまだ不十分である。

まず、標準的な SPH 法とは、流体を、広がりを持った粒子の集合体とみなすことで離散化し、それぞれの運動の時間発展を追跡するというラグランジュ的手法を用いた計算法である。このような特徴から、注目している高密度な領域には粒子数が必然的に多くなるので、空間分解能が高くなり、高精度な計算が可能となる。よって、興味のある空間スケールが大きく変動する問題において、他の計算法に比べ SPH 法は有利である。この標準的な SPH 法をもとに、相対論的な問題を扱えるようにしたものが相対論的 SPH 法である。

しかし、標準的な SPH 法には強い衝撃波を精度よく記述でき

ないという問題点がある。これは、衝撃波を記述するため古い手法である人口粘性を使用していること、及び、物理量の勾配を粗く近似していることに起因する。

本講演では相対論的流体力学の計算法において注意すべき問題点を示し、それが具体的な数値計算法においてどのようにして解決しようかということについて議論する。

## コン 17 パルサー磁気圏の粒子加速機構解明へのこれまでとこれから

橋山 和明 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

パルサーとは、数秒から数ミリ秒で周期的パルスを放射する天体である。その正体は半径が 10 km 程度で、強磁場を持つ中性子星であると考えられている。特に Crab パルサーは極めて明るいパルサーで、多数の観測が行われている。その放射エネルギーは中性子星半径が 10 km 程度であるのにも関わらず、太陽の 1000 倍以上にもなる。従来の観測で、パルサーは電波から数 TeV に渡るパルスを放射することが分かっているが、その放射機構は未解明である。

現在、Crab パルサーの観測では高エネルギーパルスの放射領域の推定による理論モデルの検証が進み、その放射機構が明らかになりつつある。既存のモデルは多く、特に有力なモデルとして Polar Cap (PC) モデル・Outer Gap (OG) モデル・Slot Gap (SG) モデルが挙げられる。PC モデルは磁極近傍からの放射モデルで、OG・SG モデルは中性子星表面から光円柱外端に渡る領域からの放射モデルである。MAGIC 望遠鏡による Crab パルサーの観測 (25 GeV 以上) では、放射領域が中性子星半径の約 6.2 倍以上であると制限され、高エネルギー帯で PC モデルが棄却された。後の Fermi LAT の観測 (20 MeV - 300 GeV) によっても、約 3.4 倍以上であると制限されている。しかし現時点では OG・SG モデルのどちらか、あるいは両モデルで放射が説明可能ということに確証はなく、さらなる観測が不可欠である。

現在、次世代大型地上ガンマ線天文台 CTA (Cherenkov Telescope Array) の建設が始まっており、完成した暁には Fermi LAT より高エネルギー帯 (20 GeV - 300 TeV) の観測感度が、稼働中の地上ガンマ線望遠鏡よりも約一桁改善する。パルサーの高エネルギー観測においても、CTA によって従来より飛躍的に高精度なデータがもたらされ、放射領域の推定精度がさらに向上する。本講演ではこれまでに明らかとなっているパルサーの観測結果についてレビューを行い、将来の CTA による観測で期待される進展について述べる。



## コン 18 異なるクランピートラスモデルの X 線スペクトル解析における系統誤差の評価

南木 宙斗 (東京大学 理学研究科物理学専攻 M1)

多くの銀河の中心には超巨大ブラックホール (SMBH: SuperMassive Black Hole) が普遍的に存在し、SMBH と銀河の質量には比例関係がある (Marconi & Hunt 2003)。これは、銀河中心にある SMBH が幼少期の母銀河と共になんらかの関係をもって共に成長、進化してきたことを示唆する。SMBH とその母銀河の共進化を解明するうえで、SMBH を取り巻くトラスの理解は必要不可欠である。なぜなら、トラスは SMBH と母銀河の間に存在し、母銀河から SMBH への質量供給を担うと考えられているからである。

X 線観測は、ガス・ダストを含む全物質の分布を反映するため、トラス構造を調べるのに最適である。多波長観測結果から、その構造は多くのガスの塊からなる (クランピートラス) と考えられている。クランピートラスからの X 線放射を計算するには、モンテカルロ法によるコンプトン多重散乱の輻射輸送のシミュレーションが必要不可欠である。近年 Tanimoto et al. 2019 では、モンテカルロ輻射輸送計算コード MONACO (Odaka et al. 2016) を用いて、クランピートラスからの X 線放射モデル XClumpy を作成し、Circinus Galaxy の広帯域 X 線スペクトル再現に成功した。また、Buchner et al. 2019 も、モンテカルロ輻射輸送計算 XARS (Buchner et al. 2019) を用いて、クランピートラスからの X 線スペクトルモデル UXClumpy を作成している。本研究では、まだ検証されていない 2 つのモデルのパラメータ依存性を調べる。動径方向のクランプの配置は、XClumpy では指数分布で、UXClumpy では一様となっている。この違いにより、クランプの体積充填率に差が生じる。

そこで本研究では、両者のモデルを比較した。クランプ体積充填率を定義し、同じジオメトリ (水素柱密度、クランプの体積充填率) になるようにパラメータを調節して X 線スペクトルを作成したとき、どのような違いが出るか、またその違いを引き起こすパラメータを調べることによってどのパラメータがトラスのジオメトリに影響するかを議論した。

## コン 19 ピッチ角分布の非等方性を考慮に入れたガンマ線バーストのシンクロトロン放射モデル

後藤 瞭太 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

ガンマ線バーストは、 $10^{53}$ erg 程度のエネルギーを  $\gamma$  線として数秒の間に放つ宇宙で最も激しい爆発現象である。ガンマ線バーストの放射機構に関する未解決問題に、典型的な観測される低エネルギースペクトルが、標準的なシンクロトロン放射モデルの予言よりも硬いという問題がある。この問題の解決策と

して、シンクロトロン放射ではピッチ角 (電子の速度と磁場の間の角)  $\alpha$  が大きい電子ほど放射に寄与することから、低エネルギー電子ほどピッチ角分布が小さい値に偏っているモデルを提案したい。そのような着想に至った経緯は、最近の論文 (Luca Comisso et al, *Astrophys. J. Lett.* 895, L40 (2020)) で、磁気リコネクションにより加速された電子はそのようなピッチ角分布の非等方性をもつというシミュレーション結果が発表されたことにある。ここで、シンクロトロン放射をする電子のローレンツ因子  $\gamma$  とピッチ角  $\alpha$  の分布  $N(\gamma, \alpha)$  を計算する上で、電子の冷却とピッチ角の拡散を考慮すべきである。例えピッチ角の非等方性を考慮に入れたとしても、シンクロトロン放射や断熱膨張による電子の冷却により、標準モデルと同様の軟らかいスペクトルになってしまう可能性がある。また、プラズマ中の波動と電子の相互作用によるピッチ角の拡散が効きすぎると電子の速度分布はほぼ等方的になってしまうであろう。本研究では、ピッチ角分布の非等方性によるガンマ線バーストの硬い低エネルギースペクトル問題の解決を目指し、放射冷却とピッチ角拡散の効果を入れて、電子分布  $N(\gamma, \alpha)$  とシンクロトロン放射スペクトル  $F_\nu$  の時間発展計算を行う。講演ではその計算の進捗を報告し、実際にこれで放射スペクトルの問題が解決できるか議論したい。

## コン 20 電波望遠鏡 CHIME による SGRB からの残光観測に向けた解析パイプライン開発

鹿内 みのり (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M2)

ショートガンマ線バーストは、宇宙最大の爆発現象である。相対論的ジェットをエネルギー源として、ジェットと同じ方向に即時放射が観測される。また、相対論的ジェットと周辺物質の相互作用によって、ジェットが減速し開口角を保てなくなるとほぼ等方的にシンクロトロン放射が起こる。これを残光といい、X 線から電波帯までの広い波長帯で観測されうる。即時放射には指向性があることから、観測者のいる方向によっては即時放射が観測されず残光のみが観測されうる可能性がある。これを親なし残光という。これまでに検出されたショートガンマ線バーストからの残光は X 線から電波帯まで 100 個ほどで、すべて即時放射のあとに観測された親“あり”残光である。親なし残光を検出することでショートガンマ線バーストからの残光の観測数が飛躍的に増加することが期待されている。特に、電波望遠鏡 Canadian Hydrogen Intensity Mapping Experiment では、親なし残光の検出が可能になると残光の観測数は数万倍になると予想されている。

本発表では、電波望遠鏡 CHIME を用いてショートガンマ線バーストからの親なし残光を検出するための解析パイプラインの開発状況について報告する。

## コン 21 ショートガンマ線バーストを用いた中性子星合体からの物質放出量の調査

野際 洸希 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

従来、金やプラチナなどの重元素は超新星爆発で作られたと考えられていた。しかし超新星爆発では中性子の量が足りないことが分かってきており、近年では連星中性子星合体が有力候補として考えられている。中性子星の合体時に中性子を豊富に含んだ物質が放出され、速い中性子捕獲反応 (r-process) が起こる。そして放射性崩壊 (主にベータ崩壊) により電磁波放射 (kilonova) が生じる [1]。理論計算によると、放出物質の質量は太陽質量の 1% 程度、速度は光速の 5%~25% 程度、吸収係数は  $0.1\sim 10.0[\text{cm}^2/\text{g}]$  程度と予想されている [2]。銀河系の重元素量を説明するために必要な最低限の放出物質の質量は太陽質量のおよそ 1% であるが、各々の中性子星合体でどの程度の質量が放出されているかは明らかではない。

中性子星合体時には強い重力波が放射され、ショートガンマ線バースト (SGRB) が起こると考えられている。重力波は遠方で起こると検出が難しいのに対して、SGRB は遠方で起こっても観測することができる、つまり観測数が多い。そこで我々は、過去に観測された SGRB のデータから kilonova が付随していると思われるものを選び、放出物質の質量、速度、吸収係数のパラメータ推定を行った。

本発表では、各々の kilonova の放出物質の質量の多様性について議論する。

1. B. D. Metzger, G. Martinez-Pinedo, S. Darbha et al. 2010, MNRAS, 406, 2650
2. Masaru Shibata, and Kenta Hotokezaka, 2019, ARNPS, 69, 41

## コン 22 キロノバのスペクトルで探る r-process 元素合成の痕跡

土本 菜々恵 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

金やプラチナなどの元素の合成には速い中性子捕獲元素合成 (r-process) が必要である。r-process 元素の起源として近年注目されてきたのが連星中性子星合体であり、これが起こると中性子過剰な物質が放出され、r-process で合成された原子核の放射性崩壊によって、キロノバと呼ばれる電磁波放射が引き起こされる。実際 2017 年に初めて連星中性子星合体からの重力波 (GW170817) とそれに伴うキロノバが観測され、理論的予測との合致から r-process が起こったことが確認された。一方、昨年同定が報告されたストロンチウム [1] を除き、実際にどの元素がどれほど合成されたかは明らかになっていない。

本研究では、重元素の束縛遷移をまとめたデータベース (VALD) から最新のラインリストを構築し、様々な密度、温度における元素の吸収線の強さを系統的に計算した。VALD を用

いたラインリストは実験データを基に作成されているため、元素ごとのラインの数は不完全だが、遷移波長が正確である点で同定に適している。結果を GW170817 に付随して観測されたキロノバのスペクトル [2] と比較して、合成された元素の同定を試みた。また、このラインリストを用いて、中性子星合体の放出物質における現実的な元素組成を考慮してキロノバの輻射輸送シミュレーションを行い、元素組成がスペクトルの形に与える影響を調べた。

その結果、昨年同定が報告されたストロンチウムの吸収線が確かに現れることを確認した。また、ストロンチウムと似た元素構造を持つカルシウムが、比較的電子割合の高い放出物質のトレーサーとして使えることがわかった。発表では、他の重元素の吸収線と組成についても議論する。

1. Pian, E. et al. 2017, Nature, 551, 67
2. Watson, D. et al. 2019, Nature, 574, 497

## コン 23 非回転ブラックホールまわりの移流優勢降着流の一般相対論的磁気流体シミュレーションについて

桑田 明日香 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

天体への降着流の性質は、質量降着率によって変化する。質量降着率が大きい場合、輻射が効率的な明るくて低温の円盤ができる。逆に質量降着率が小さいと輻射の効率が悪くなり、高温の降着流が形成される。この後者の降着流のことを、輻射非効率流 (radiatively inefficient accretion flow, RIAF) と呼ぶ。我々の銀河中心にある Sgr A\* や EHT (Event Horizon Telescope) が撮像した M87 の降着流は RIAF と考えられている。

Narayan & Yi 1994 は、RIAF の中でも特に移流のみを考慮した移流優勢降着流 (advection-dominated accretion flow, ADAF) の解を導いた。この解から、ADAF 中ではガスは重力的に束縛されていないため、ジェットやアウトフローを生成するのではないかという示唆が得られている。ジェットやアウトフローと ADAF の関わりを調べるには一般相対論的磁気流体 (general relativistic magneto-hydrodynamic, GRMHD) シミュレーションが必要である。

そこで、本発表では、非回転ブラックホール (BH) まわりの ADAF について長時間の GRMHD シミュレーションを行った、Narayan et al. 2012 についてのレビューを行う。この論文では、ADAF での磁場の影響を調べるため、磁場が弱いモードと強いモードの 2 つのシミュレーションを行い、結果を比較した。磁場が弱いモードでは、BH への質量降着率の 60% がアウトフローとして放出された。一方、磁場が強いモードでは、 $\sim 160\text{GM}/c^2$  の半径において BH への降着物質とほぼ同量のア

アウトフローが生成された。しかし、アウトフローの生成率ははっきりした収束を示さなかったため、真の値はこの計算の予測値より小さいと考えられる。

今まで、この論文以外でもさまざまな GRMHD シミュレーションが行われてきたが、RIAF 中の非熱的現象はあまり調べられておらず、特にシミュレーションに基づいた高エネルギー放射の研究は非常に少ない。今後、私はそれについて研究していきたいと考えている。

## コン 24 パルサーの磁場と降着円盤の相互作用を利用した回転エネルギーの効率的な引き抜き機構

久世 陸 (東北大学 理学研究科天文学専攻 M1)

中性子星やブラックホールのような高密度星から相対論的速度のアウトフローが出ていることが観測から分かっているものの、その機構はまだ判明していない。この相対論的アウトフローの形成機構の解明をめざして研究を進める予定である。その先駆けとして今回は中性子星の磁場と降着円盤の相互作用の効果を考えた論文 Parfrey et al. (2016) の紹介を中心に講演を行う。

中性子星を含む低質量 X 線連星は、中性子星への質量降着により X 線で輝いている天体である。伴星からの降着は中性子星にトルクを与え、ミリ秒パルサーの起源として考えられている。実際、ミリ秒周期のパルスを持つ低質量 X 線連星も見つかっている。この X 線連星が相対論的ジェットを出している観測的兆候もあるが、ブラックホールを含む X 線連星と振る舞いが異なるため、ジェットの形成過程が異なる可能性がある。

パルサーの持つ磁場は円盤との相互作用により、大局的な磁場構造が変更を受ける (Uzdensky et al. (2002))。この効果により、パルサーウィンドのフラックスは真空双極子放射より大きくなることができ、相対論的ジェットの形成機構になり得る。また、パルサーウィンドによるスピンドウトルクが増大することによって、降着によるスピナップは弱められる。このことは 1 ミリ秒よりも短い周期をもつパルサー が検出されていないことと無矛盾である。他にも、観測量との比較やモデルの妥当性についても議論をする予定である。

## コン 25 ニューラルネットワークを用いたパルサー探索

八谷 卓朗 (熊本大学 自然科学教育部理学専攻物理科学コース M1)

パルサーとは非常に安定した周期でパルスを放射する中性子星である。その安定した周期性を利用して、パルサータイミングアレイ (PTA) と呼ばれる重力波の検出が試みられている。地球とパルサーの間に重力波が存在すると、時空が歪むことでパルスの伝播経路が変化し、パルスの到着時刻も変化する。実際のパルスの到着時刻と予測された到着時刻の差はタイミング残差

と呼ばれ、PTA では数年~十数年に渡りタイミング残差を測定することで重力波を検出する。しかし、未だ重力波の検出には至っておらず、PTA に適するパルサーの個数不足が課題となっている。

パルサーの総数を増やすために、従来では、全天を長時間観測する非効率な方法が用いられていた。そこで、全天の電波サーベイカタログ内の未同定天体の中からパルサー候補を効率よく選定することが求められている。先行研究では、予め膨大な数の未同定天体からニューラルネットワークを用いて、パルサー候補となる天体を選定する方法が提案されている。その結果、未同定天体約 50 万個の中からパルサーの候補天体を約 2000 個まで大幅に絞ることが出来た。しかし、学習を行うデータにランダム性を含む為、ネットワークの信頼性が不明であった。本発表では先行研究のレビューを行い、ニューラルネットワークを用いたパルサー探索の信頼性を議論する。また、訓練に使うパルサーと非パルサーの比率は実際には同じではないため、ネットワークの再現度が教師データの比率に依存してしまう。そこで、訓練データとテストデータの確率分布が異なる共変量シフト下での学習を用いた結果を報告をする。

## コン 26 電波銀河 IC310/NGC1275 の GeV TeV ガンマ線の時間変動の研究

今澤 遼 (広島大学 先進理工系科学研究科 M1)

2012 年 11 月、電波銀河 IC310 から TeV ガンマ線でのフレアが検出された。TeV フレアを検出したのは大気チェレンコフ望遠鏡 MAGIC であり、衛星搭載の検出器と比較して優れた有効面積を持つ。それゆえ短時間変動の調査が可能で、IC310 の TeV フレアからは 5 分程度のきわめて短い時間変動が検出された。このタイムスケールから推測される放射領域は、IC310 中心ブラックホールのシュバルツシルト半径より小さいものであった。

さらに電波銀河はジェットの見込み角に制限があるため、相対論的な効果を考慮しても、結果は高エネルギーガンマ線が小さな領域から生成されたことを意味している。そのため、この TeV フレアを説明するためには、高エネルギーガンマ線を生成するためのジェット駆動機構および加速機構について新たに議論を行う必要がある。

先行研究では、ブラックホールと近傍の磁場との相互作用による放射や、ジェット内部の構造を仮定することで説明されている。しかしながら電波銀河 TeV フレア時の他波長での同時観測事例は多くはなく、いずれの物理機構の解釈も結論し難い。

そこで私は、Fermi 衛星で取得された GeV ガンマ線について、TeV フレアが検出された期間と静穏期における変動を調査した。その結果、TeV フレアを含む期間では、GeV ガンマ線のスペクトルがハードになる傾向が見られ、GeV ガンマ線光度についても有意な検出が示唆された。

本講演では IC310 と NGC1275 について、MAGIC 望遠鏡による

先行研究のレビューを行うとともに、Fermi 衛星の解析により得られた GeV ガンマ線の変動を受けて、ジェット内の粒子加速と GeV~TeV ガンマ線放射についての議論を行う。

#### [引用文献]

1. J. Aleksic et al. 2014, Science, 346, 1080
2. S. Ansoldi et al. 2018, A&A, 617, A91

### コン 27 GeV/TeV 帯域で検出されたガンマ線バーストの初期 X 線残光における緩慢減衰期の統計的性質

佐藤 優理 (青山学院大学 理工学研究科理工学専攻 M1)

ガンマ線バースト (GRB) とは、0.1 秒から 100 秒程度の間在天球面上のある一点から 1 MeV 程度のガンマ線が観測される宇宙で最も明るい爆発現象のひとつである。GRB はブラックホールや中性子星の近傍から放出する相対論的ジェットから生じると考えられており、GRB の発生後に同じ場所で X 線源や可視光源、電波源などが出現し、数日かけて暗くなる残光が観測される。残光は、ジェット噴出物と周囲の星間物質が衝突することで生じる外部衝撃波が起源であり、そこで加速された電子によるシンクロトロン放射であると考えられている。一般に X 線残光の光度曲線は複数の折れ曲がりを持ち、数千秒から数万秒ほどの間で  $-0.5 \sim 0$  乗程度のゆるやかな減衰が続くものがある (緩慢減衰期)。最もシンプルな標準理論では  $-1$  乗よりもゆるやかな減衰を説明するのは難しいため、緩慢減衰期の理論的説明は未確立であり、X 線残光における最大の謎のひとつとなっている。本講演では、Fermi Large Area Telescope (LAT) や大気チェレンコフ望遠鏡 で GeV/TeV の高エネルギーガンマ線が検出され、同時に、Neil Gehrels Swift Observatory に搭載された X-ray Telescope で発生後 400 秒以内に観測された 26 イベントの X 線残光のデータを解析した。その結果、上記 26 イベント中 9 イベントでは X 線残光の光度曲線は緩慢減衰期を持たないことがわかった。残りの 17 イベントでは GeV/TeV ガンマ線が検出されなかった GRB の緩慢減衰期と比べ光度曲線のべきが急な傾向にあった。さらに、GeV/TeV ガンマ線が検出されなかった GRB についても同様の解析を行なった。緩慢減衰期を持たない GRB の割合は、GeV/TeV ガンマ線が検出されなかった GRB では 3%、GeV/TeV ガンマ線が検出された GRB では 35% であった。これらの解析結果から、緩慢減衰期がない X 線残光を持つ GRB は、即時放射のエネルギーが大きく、初期に全てのエネルギーが衝撃波に注入されていると解釈できる。