

2020 年度 第 50 回 天文・天体物理 若手夏の学校
星間現象分科会 アブストラクト

竹川 俊也 (神奈川大学 工学部 物理学教室 特別助教)

8月25日 10:00–11:00 room 2

銀河系中心と僕

銀河系中心 (僕らはよく「銀中」と略します) は楽しいところです。まずでっかいブラックホール (いて座 A*) があります、それだけで楽しいです。その周りをたくさんの恒星が飛び交い、大量の星間物質が渦巻いています。なんともわちゃわちゃしていて楽しげです。そんな銀中 (中心核から半径 200 pc 以内) を、僕は専ら電波望遠鏡で覗いています。銀中はどの波長で観測しても (電波でも赤外線でも X 線でも) そうなのですが、「なんだこれ？」のオンパレードです。わけがわかりません。変なものがいっぱい見つかります。特に僕たちのグループは、変な分子雲たちの素性を探ることに力を入れています。これら分子雲がどう変なのかと言いますと、小さいくせに速度幅 (スペクトル線幅) が異常に広いのです。僕たちはこれら特異な分子雲を「高速度コンパクト雲」と呼んでいて、銀中に 100 個くらい見つけています。高速度コンパクト雲の起源を知りたいのですが、厄介なことに他波長域に対応天体が見つかりません。こいつらは一体なんなんのでしょうか？近年の詳細なスペクトル線観測の結果、これらの内のいくつかは、まるで見えない点状重力源にとらわれているかのような局所的な軌道運動を示すことがわかりました。分子ガスの運動から「見えない重力源」の質量を評価すると、なんと 1-10 万太陽質量程度にもなります。これら見えない重力源の正体は、(重めの) 中間質量ブラックホールかもしれないということで、僕たちは最近ほそぼそと騒いでいます。この講演では、銀河系中心の何が楽しいかをお話しし、僕がこれまでに取り組んできた研究についてざっくばらんに紹介します。とりとめのない話になってしまうかも知れませんが、何かしらの参考になれば幸いです。

霜田 治朗 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻ポスドク)

8月26日 11:15–12:15 room 2

Basic reviews on Galactic cosmic-ray origin

Cosmic-rays (CRs) are charged, energetic particles with an energy GeV - 0.1 ZeV. Their origin and their roles in astrophysics are long standing problems. In this talk, we briefly review on their Galactic origin (for up to 3 PeV) and recent related issues: ionization rate of molecular clouds by CRs, and the gamma-ray paradigm in supernova remnants.

星間 1 衝撃波と星間雲の相互作用を探る数値シミュレーション

木下 真一 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

星間空間内の Shock(衝撃波)の伝搬は超新星爆発, 星風, 分子雲衝突, 銀河密度波など様々な機構に由来して発生する (Cox & Smith 1974; McKee & Ostriker). 衝撃波は周囲の星間雲内部の物理状態/組成に大きな影響を及ぼすと共に, 運動エネルギーを供給していく。こうして星間物質に与えられた運動量は星間雲内部の乱流の主要な起源とも考えられている。そのため ISM (Interstellar medium) の進化を理解するためには, shock-cloud の相互作用の物理を把握することが非常に重要である。

Shock は, 動圧と流体力学的不安定性によって cloud の形状を大きく変化させ, 運動エネルギーを与える。このとき cloud 内部の乱流, 磁場, cooling(放射冷却)の存在が cloud のエネルギー状態や形状の維持に大きく作用することが知られている (e.g, Banda-Barragan et al. 2018)。本研究は shock-cloud の相互作用を三次元磁気流体シミュレーションによって再現して, cloud の進化の様子について定量的に探っていくことを目的とした。

まずは乱流的な速度場を与えられた球状の cloud に平面衝撃波を与え, cloud の形状変化や, 乱流の様子, 運動・熱エネルギーの変化について調べてみた。乱流なしの cloud に比べて, 乱流的な cloud は, 衝撃波の方向に加速しやすく, 周囲の ISM との混合率が高くなる事がわかった。今後さらに乱流, 磁場, cooling の効果が cloud の進化に及ぼす影響や, 自己重力の作用について詳細に探っていく予定である。

星間 2 中性水素ガス衝突による大質量星団形成の初期条件依存性についての研究

前田 龍之介 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 D1)

銀河中のほとんどの星は星団の中で形成することが知られている (Lada & Lada 2003)。星団の中でも若い大質量な星団は Young Massive Cluster(YMC)と呼ばれ, その典型的な質量と半径は $M \sim 10^4 M_{\text{sun}}$, $R \sim 1 \text{ pc}$ である。YMC は典型的に数十の大質量星を含み, 超新星爆発・恒星風・紫外線といった現象で周囲の星間媒質に多大な影響を与える重要な天体である。しかしながら, YMC の形成過程には不明瞭な点が多く, 特に, YMC を形成する巨大な質量のガスを, 1pc 程度のコンパクトな領域に自由落下時間以下の短いタイムスケールで集める現実的なメカニズムは, 長年 YMC 形成の大きな謎であった。しかしながら, 近年の大マゼラン雲 (LMC) における HI ガスの観測から, LMC に存在する YMC(R136, N44) が HI ガスの高速衝突によって形成したことが示唆された

(Fukui et al. 2017; Tsuge et al. 2019)。そこで, 本研究では YMC の形成メカニズムを探るべく, 観測で示唆された HI ガスの高速衝突によって, 実際に YMC が形成可能であるかどうかを, 自己重力・加熱冷却・化学反応入りの MHD シミュレーションを行うことで検証した。本研究のシミュレーションの結果, 観測で示唆される初期条件を用いると, HI ガスの高速衝突によって実際に $M \sim 4 \times 10^4 M_{\text{sun}}$, $L \sim 4 \text{ pc}$ 程度の YMC forming clump が形成可能であることがわかった。この YMC forming clump は YMC 形成領域で示唆される高い星形成効率 (30%) を仮定すると十分に YMC に進化しうる。このことから, HI ガスの高速衝突が YMC 形成を誘発する非常に有力なメカニズムであることがわかった。本研究ではさらに上記のシミュレーションに比べて, 低金属量, 強磁場, 高密度な初期条件を用いた HI ガスの衝突シミュレーションもを行い, 形成する YMC forming clump の初期条件依存性を調べた。その結果, 衝撃波後面で形成する分子雲のグローバルな重力崩壊で YMC forming clump が形成することや, LMC のような低金属環境下でも YMC forming clump が形成可能であることがわかった。さらに, HI ガス雲を模擬した高い初期密度のシミュレーションでは R136 に匹敵する $M > 10^5 M_{\text{sun}}$ の大質量な YMC forming clump が形成することもわかった。

星間 3 NGC 2023 における星形成

山田 麟 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

NGC 2023 は Orion B 分子雲内の B1.5 型星 HD 37903 に照らされる反射星雲で, 北側は活発な星形成領域 NGC 2024 と接続している。この領域の B 型星を含む星団の年齢は 0. 数 Myr と短く, 母体分子雲の電離は進んでおらず, 大質量星形成の初期段階を研究するのに適している (Mookerjee et al. 2009)。

初期の低分解能な分子雲の観測と可視光の観測から, HD 37903 は $\sigma \text{ Ori}$ を電離源とす電離水素 (HII) 領域 IC434 の膨張によって形成されたと考えられてきた (Elmegreen & Lada 1977)。一方で, 同じ Orion 領域内の M42/M43, NGC2068/2071, NGC2024 において, 分子雲衝突が大質量星形成を誘発した可能性が指摘されている (Fukui et al. 2018 ; Fujita et al. 2020 ; Enokiya et al. 2020)。以上から, 我々は NGC 2023 における星形成機構を理解するために, 分子ガスの空間分布, 速度構造の詳細な解析および, HII 領域の分子ガスへの影響の定量的な評価が必要と考えた。

今回我々は, 野辺山 45m 望遠鏡による, 12CO(J=1-0), 13CO(J=1-0), C18O(J=1-0) 輝線にて NGC 2023 全域をカバーする ($22' \times 26'$) 観測を行なった。この観測は, 広い観測範囲に加えて, $19''$ の高角度分解能と 0.3 km/s の高速度分解能を有する点で先行研究と比較し

てユニークである。

観測の結果、中心速度約 10 km/s の分子雲 (Blue cloud) と約 12 km/s の分子雲 (Red cloud) を同定した。2 つの分子雲は、位置速度図上で V 字の分布を示し、Blue cloud は南に 0.3 pc ずらすと Red cloud と相補的な空間分布を示す。これらは分子雲衝突天体に特徴的である。なお、NGC 2024 においても 2 つの分子雲が同定されており、その速度範囲と相補的な空間分布のズレの方向および大きさは NGC 2023 と共通である (Enokiya et al. 2020)。相補的分布のズレから見積もった衝突経過時間は約 0.3 Myr であり、この領域の YSO の星団の年齢と無矛盾である。また、HII 領域は、分子雲との境界付近 0.1 pc 程度の領域でガスの運動に影響が見られたが、HD 37903 までの距離は約 1 pc あるため、大質量星形成への影響は考えにくい。以上から、NGC 2023 領域の大質量星形成機構として、分子雲衝突モデルを新たに提案する。なお、本内容は Yamada et al. (2020) として、PASJ に投稿中である。

星間 4 銀河中心領域の電子・陽電子対消滅線観測の現状と SMILE-3 計画

津田 雅弥 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

銀河中心における電子・陽電子対消滅による 511 keV の輝線はガンマ線で非常に明るいものである。しかし、511 keV の輝線が発見されて以来 40 年以上たった今でも電子・陽電子対消滅を起こす陽電子の起源は解明されていない [1]。最近では、SPI/INTEGRAL 衛星が銀河中心領域の電子・陽電子対消滅線の観測を行なったが、銀河中心でハロー状に広がった分布を検出し [2]、また銀河中心領域/銀河面の光度比が $1 \sim 4$ とほかの波長での観測と比べて高く、他波長とは異なる分布を示した。銀河中心領域からの消滅線のフラックスに関しても、陽電子の起源の一つとして 26Al の β^+ 崩壊による陽電子生成があるが、銀河中心領域の対消滅放射の 20 %~30 % 程度しか説明できていない [3]。

現状、MeV ガンマ線観測は宇宙線と衛星筐体の相互作用からの雑音の多さやコンプトン散乱優位のため観測が難しく、空間分解能が低い。そのため消滅線の正確な分布をえるためには検出器の空間分解能を向上させ、対消滅線の到来方向をより正確に決定する必要がある。

我々は現状を打破するために電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) を開発している。ETCC の高雑音下での動作実験として、SMILE-2+ を行い、銀河中心領域の電子・陽電子消滅線を 5σ の有意度での観測に成功した。次期計画として検出感度を向上させ科学観測を行う SMILE-3 を計画している。SMILE-3 で期待される性能 (有効面積 10 cm²、空間分解能 $9^\circ @0.5$ MeV) をもってすれば、消滅線の放射が銀河面に広く分布しているのか、銀河中心領域にハロー状に広がっているの

かを分布の違いから直接観測することができる。本講演では、SMILE-3 計画で発展が期待される電子・陽電子対消滅による放射について述べる。

参考文献

- [1] A. De. Angelis, et al, 2018, J. High Energy Phys., 19, 1-106
- [2] Knödseder, J., P. et al., 2005, A&A 441, 513
- [3] Reba M. Bandyopadhyay, et al., 2009, Mon. Notices Royal Astron. Soc., 392, 1115-1123

星間 5 銀河系中心分子層で発見された HVCC forest の観測的研究

渡邊 裕人 (慶應義塾大学 理工学研究科基礎理工学専攻 M2)

銀河系中心核より半径 200 pc の領域に存在する中心分子層 (Central molecular zone; CMZ) は高温、高密かつ広い速度幅 ($\Delta V > 15$ km/s) を持つ分子雲の複合体である。その中でも一際広い速度幅 ($\Delta V > 50$ km/s) とコンパクトな空間分布 ($d < 5$ pc) を持つ分子雲は高速度コンパクト雲 (High-velocity Compact Cloud; HVCC) と呼ばれ、CMZ 内で多数発見されている。私たちのグループは、James Clerk Maxwell Telescope で得られた CO J=3-2 輝線の広域サーベイ・データを精査する過程で、一箇所に集中した 6 つの HVCC を発見した。この HVCC forest は $(l, b) = (+0.85 \text{ deg}, 0.0 \text{ deg})$ を中心とした 0.1 deg ($\sim 14 \text{ pc} @ 8 \text{ kpc}$) 四方の領域に分布する。このような HVCC の密集は CMZ 内にも類を見ず異例である。加えてその視線速度は -70 km/s から -140 km/s と負であり、銀河回転に逆行している。また、いずれの HVCC も高い CO J=3-2/1-0 強度比 (> 1) を示す。

今回私達は Atacama Submillimeter Telescope Experiment で得られた CO J=4-3 輝線データの解析を行った。その結果、同領域の HVCC の一部に明瞭な「Y 字」状の空間-速度構造が発見された。これは点状重力源が分子雲へ高速で突入した場合に生じる特徴的な構造であると磁気流体シミュレーションによって予測されたものである。加えて、HVCC 同士の近隣性、速度構造の類似性および同程度の年齢 ($\sim 10^5 \text{ yr}$) も踏まえると、これら HVCC はハローなど銀河面外から落下してきたガス雲や星団によって、同時多発的に駆動されたと考えられる。

星間 6 銀河系中心に存在する高速度分子雲の自動同定及び統計的研究

宇留野 麻香 (慶應義塾大学 理工学研究科基礎理工学専攻 M2)

我々の住む銀河系の中心には、分子ガスが半径 200 pc 以内に集中する銀河系中心分子層（通称 CMZ）と呼ばれる領域が存在する。CMZ は銀河系円盤部に比べ高温・高密度・強い磁場を持つ等特異な物理状態を有する事が知られているが、その起源は未だ解明されていない。CMZ 内には高速度コンパクト雲（通称 HVCC）という、非常にコンパクト ($d \sim 5$ pc) で広い速度幅 ($\Delta V > 50$ km s⁻¹) を有する特異な分子雲が多数発見されている。発見された HVCC のうち特に運動エネルギーの高いものは大質量星団中の度重なる超新星爆発もしくは中質量ブラックホール等の点状重力源との遭遇により形成されたと考えられており、CMZ の特異性及び中心核超大質量ブラックホールの形成シナリオの解明において非常に重要な天体群であると示唆されている。

CO 0.02-0.02 や $l=1.3^\circ$ 領域等、個別の HVCC については詳細な研究がなされている一方で、HVCC 全体の概数や空間・速度分布の統一的な知見は未だ得られていない。本研究では JCMT で取得された CO J=3-2 輝線の大規模データに対し先行研究で開発された HVCC 自動同定アルゴリズムを適用し、HVCC のカタログ作成を行った。CO J=3-2 輝線は比較的高温・高密度な領域から放射される為、加熱・圧縮プロセスが働いている HVCC を効率良くトレース出来る可能性がある。自動同定アルゴリズムは (1) 円盤部による吸収・放射の影響の軽減、(2) 空間的にコンパクトで速度幅の広い成分の抽出、(3) 改良版 CLUMPFIND を用いた雲構造の同定の三段階からなる。今回の同定作業では目視で確認される HVCC との対応が最大化されるよう各パラメータを精査した。その結果、CO J=3-2 輝線のデータから 134 個の HVCC 候補天体が抽出された。本講演では同定された HVCC 候補天体の物理量や分布、一般的な分子雲との相違等について議論する。

星間 7 アンテナ銀河 NGC4038/4039 における広速度幅分子雲の探査

西山 苑実 (慶應義塾大学 理工学研究科 M1)

アンテナ銀河 NGC4038/4039 は、太陽系から 6300 万光年の距離にある衝突銀河である。アンテナ銀河の衝突領域には大量の高密度分子雲が集中し、その中で誕生した超巨大星団からの強烈な紫外線放射により広大な電離ガス領域が複数形成されている。近年、同領域において、空間的にコンパクトでありながら速度幅が異常に広い分子雲が一つ発見された。Firecracker と名付けられたこの特異分子雲は、星団形成領域から有意に離れた位置にあり、発見者らによって超巨大星団の前身であると解釈された。一方で、この Firecracker の特徴は、銀河系中心分子層において多数発見された高速度コンパクト雲 (High Velocity Compact Clouds; HVCC) と酷似している。HVCC の起源は現在も未解明であるが、一部については隠された巨大星団中の超新星爆発、あるいは中質量ブラックホールとの

重力相互作用などの形成メカニズムが提案されている。アンテナ銀河という銀河系外の特殊な環境で HVCC 同様の分子雲が発見されたことでその普遍性が垣間見えたことになり、これまで銀河系中心に限られていた HVCC の研究は新たな局面に入ったと言える。

本研究では、ALMA Cycle0 におけるアンテナ銀河衝突領域の CO J = 3 - 2 輝線データを再解析し、Firecracker (もしくは HVCC) 同様の分子雲の探索を行った。その結果、衝突領域中に検出された計 107 個の分子雲のうち、Firecracker ともう一つの分子雲のみが極めて似通った性質を有していることがわかった。これは、系外銀河における HVCC 様分子雲の範例として貴重なターゲットを提供するものである。本発表では、検出に至るまでの詳細を述べるとともに、今後の系外 HVCC 様分子雲の検出の可能性について検討したいと考えている。

星間 9 著しく非対称な重力崩壊型超新星残骸 G350.1-0.3 におけるイジェクタ速度の測定

土岡 智也 (立教大学 理学研究科物理学専攻 M1)

近年、超新星のシミュレーションと観測の比較研究から超新星爆発が非等方的であることが示唆されている。しかし爆発前の星や爆発自身は点源としてしか観測できないため、非等方爆発メカニズムに迫る観測手段として十分とは言えない。空間構造が見られ、なおかつ輝線やアバングスといった情報をもつスペクトルが得られる超新星残骸の研究は、爆発構造や元素合成の描像を解明する上で非常に重要であると考えられる。

対象天体である超新星残骸 G350.1-0.3 については、先行研究から、赤外線や電波においても複雑な構造からの放射が観測されているほか、中性子星の速いキック速度が予測されており (Lovchinsky et al. 2011)、爆発時の非対称効果を議論する上で最適の天体であると言える。

本研究では、X 線で観測される形状が著しく非球対称な超新星残骸である G350.1-0.3 において、爆発によって生じたイジェクタの速度を測定し、「極度に非対称な超新星の運動学に迫る」ことを目的とした。

視線垂直方向に対してはチャンドラ X 線衛星による 2009 年と 2018 年の観測画像の比較解析から、視線方向に対しては輝線のドップラーシフトを捉えることによって速度を推定した。

本研究によって、明るい東側の領域に関してイジェクタが視線垂直方向に 2000-4500 km/s で移動していることを初めて示した (天体までの距離は Gaensler et al. 2008 より 4.5 kpc と仮定した)。そして視線方向に関しても多く領域で 1000-2000 km/s の赤方偏移が見られた。さらに、G350.1-0.3 と同じ爆発で生じたと考えられている CC0 (Central Compact Object) に対しても視線垂直方向の移動量の解析を行った。これらの解析結果から、本天体は非常に若く、非対称的な超新星残骸であることが考えられる。今回の解析ではその分布だけでなく運動学にも迫れる事が分かった

ので、今後非対称爆発の原因解明に重要なサンプルになり得る。本発表では、得られた解析結果から、G350.1-0.3の年齢や爆発の状態に関して詳細に議論する。

星間 10 宇宙線のフェルミ加速の計算法と精度の比較

樋口 諒 (名古屋大学 理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 M1)

宇宙線とは宇宙空間を飛び回る高エネルギーの陽子、原子核、電子といったものを指す。それらは 10^8eV から 10^{20}eV にわたる広いエネルギー分布を持っており、べき型の分布をしている。宇宙線のべきの値は $10^{15.5}\text{eV}$ で変化しており、これ以下のエネルギーを持つ宇宙線は超新星残骸が起源であると考えられている。超新星残骸による加速機構としては衝撃波フェルミ加速というメカニズムが考えられている。衝撃波フェルミ加速とは、電磁波の擾乱により、加速された粒子が衝撃波面を往復することでエネルギーを獲得し、加速されるという機構のことである。この機構を再現するには宇宙線の移流拡散方程式を解く必要がある。理想的な衝撃波を伴う流れのもとで移流拡散方程式を解析的に解くと宇宙線のべきの値を説明でき、宇宙線の分布関数 f は宇宙線の持つ運動量を p とすると、衝撃波面において $f \propto p^{-4}$ の関係があると導くことができる (Blandford&Ostriker1978)。しかしながら、宇宙線の移流拡散方程式を観測と比較できるような現実的な状況下で解くには数値的解法を用いる必要がある。数値的解法を用いて移流拡散方程式を解くと宇宙線の分布関数 f のべきは-4 よりも小さくなってしまい、計算結果に誤差が生じてしまうという問題がある。このずれがより少ない解法を用いて、現実的な状況に沿った計算を行う必要があるが、最適な数値的解法は未だ確立していない。本研究では、提案されている計算方法を比較検証し、優れた計算手法の検討を行った。

星間 11 数値計算を用いた宇宙線加速に向けたテスト計算とその応用

西野 将悟 (名古屋大学 理学研究科 素粒子宇宙物理学専攻 M2)

宇宙線には 10^{20}eV 以上にも及ぶ高エネルギーな粒子が存在し、そのスペクトルはべき型分布をしている。knee energy と呼ばれる 3PeV 程度でべき指数が変化しており、knee energy 以下のエネルギーの宇宙線は銀河内の超新星残骸で衝撃波を往復することで加速されると考えられている。そのような加速機構は衝撃波フェルミ機構と呼ばれている。しかし、銀河内の磁場強度では衝撃波フェルミ機構で宇宙線が knee energy に到達できないことが知られている。そこで、Bell 不安定と呼ばれる磁場を増幅する機構が提唱される (Bell 2004)。実際に Bell 不安定の効果を考えることで knee energy を実現で

きるかどうか確かめるためには、何桁にもわたるエネルギーの範囲で宇宙線加速を数値計算しなければならず、そのためには MHD 方程式と移流拡散方程式を同時に解く必要がある。そのような計算が行えるコードに Inoue(2019) で開発されたコードがある。ただし、Inoue(2019) では Bell 不安定自体は扱っていたが、衝撃波での粒子加速は扱っておらず、それらを同時に計算していなかった。Inoue(2019) で開発されたコードを衝撃波での粒子加速に適用することで Bell 不安定の効果を入れた粒子加速のシミュレーションができると考えられるが、実際に計算可能かはテスト計算で確かめる必要がある。今発表ではテスト計算の結果について発表する。また Bell 不安定に加えて、宇宙線圧力による背景流体へのフィードバックも、衝撃波近傍の物理量を変化させることで宇宙線の加速効率に影響を与えると考えられている。実際にどう宇宙線加速に影響するかについても今発表で議論したい。

星間 12 middle-aged 期に至る超新星残骸からの非熱的放射の計算

小橋 亮介 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M2)

knee と呼ばれる 3PeV 以下のエネルギーを持つ宇宙線は銀河系内由来とされている。加速機構の有力候補の1つとして、超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR) における拡散衝撃波加速 (Diffusive Shock Accleration; DSA) 理論が提案されているが、これで説明できるかは未だ解明されていない。加速された宇宙線は、その周りにおける分子雲などの相互作用により生じる非熱的放射の形で観測することができる。DSA 理論を用いた非熱的放射の再現により DSA 理論の妥当性の根拠が得られる。

様々な SNR をガンマ線で観測すると、そのスペクトルには年齢に依存した概形が見られ、またそのピークエネルギーも年齢に応じて変動している。この起源については加速機構の不定性も相まって、まだよく分かっていない。この変動を理解するため、我々の研究室では、全年代にわたって SNR の進化を一つのモデルで再現することを目標に数値モデルを構築している。先行研究である Yasuda & Lee (2019) は、様々な環境における SNR の衝撃波での DSA 理論と、 π^0 崩壊や逆コンプトン散乱などのガンマ線放射機構を組み合わせることで、超新星爆発後の年代が初期から Sedov 期 ($\sim 5,000\text{yr}$) までのガンマ線スペクトルの計算を可能にした。しかし、SNR の時間経過に伴い温度が低くなることで、衝撃波後方のガスで起こる放射冷却の効果を加味していなかった。そのため、Radiative 期 ($\geq 10,000\text{yr}$) の SNR までは考えられなかった。

そこで、Yasuda & Lee (2019) で開発されたコード (CR-hydro code) に、前述した放射冷却の効果を加えることで、Radiative 期にいたる計算を可能にした。本研究でも、非熱的放射の一般的な描像を得るために、様々な環境を

用意して計算を実行した。また、宇宙線の加速効率によって流体進化の様子も影響を受ける (Lee et al. 2015)。本発表では、宇宙線の加速効率パラメータと環境の密度パラメータを変えた各場合の計算結果を比較し、議論する。

星間 13 超新星残骸 W28 における過電離プラズマの生成機構の観測的研究

火物 瑠偉 (奈良教育大学 大学院教育学研究科教科教育専攻 M1)

恒星がその寿命を迎える時、超新星爆発を起こす。この爆発後に残る天体は超新星残骸と呼ばれ、噴出物 (イジェクタ) と衝撃波によりかき集められた星間物質 (ISM) で構成される温度 $kT \sim keV$ の高温プラズマを伴う。この高温プラズマが生成される際、まず粒子 (電子) の温度 (電子温度 kT_e) が上昇し、その電子がイオンを電離し電離状態 (電離温度 kT_z) が上昇する。この時は $kT_z < kT_e$ の電離優勢プラズマ (IP) であり、10 万年以上かけて $kT_z = kT_e$ となり、電離平衡状態 (CIE) となる、と考えられている。しかし近年、X 線天文衛星すざくの観測などから、電離が過剰に進み、再結合が優勢状態にある過電離プラズマ (RP) が観測された (e.g., [1])。この起源については様々な説があるものの、未だに議論が続けられている。これまでの X 線スペクトルデータの解析では「CIE (元素間で電離状態が同じ) だったプラズマの kT_e が急激に低下し、電離状態を変えながら現在に至る」ことを仮定したモデルを用いられてきた。しかし、多くの超新星残骸のプラズマ状態は IP であり、元素間で kT_z は異なる。そこで、Hirayama et al. (2018) では過電離遷移時に元素間で kT_z が異なることを仮定したモデルを用いて IC443 のスペクトルの再現を試みた。その結果、RP に遷移した時点で Ne から Fe、Ni までの元素間で過電離遷移時において kT_z が異なることを明らかにした。

W28 は銀河中心近くに位置する超新星残骸であり、RP が報告されている [1]。Sawada & Koyama (2012) では、すざくによる観測を行い、元素間における電離状態の違いやシミュレーションで算出した電離タイムスケール等を調べ、RP 生成の要因は高密度星周物質 (CSM) 内から希薄な ISM 空間への伝播による断熱膨張であるとされた。また、Okon et al. (2018) では kT_e の空間分布を調べた結果、分子雲との位置相関から熱伝導による過電離プラズマ生成を主張した [3]。しかし、従来の「CIE プラズマを初期状態」を仮定したモデルを用いており、スペクトルの再現も良くなかった。そこで、本研究では先行研究 [1, 3] で使用したすざくデータを用いて、W28 のスペクトルに新しいモデル [3] を適用することでスペクトルを再現し、RP 生成初期のプラズマ状態を調べた。まず従来のモデルを試したところ、先行研究と同様に大きな残差が残った。次に、新しいモデルを用いてスペクトルの再現を試みると、残差は大きく解消した。この結果、Ne から Fe までの元素で kT_z が異なることを明らかにした。本発表では、解析の詳細と得られた結

果を用いて W28 の RP 生成機構について議論する。

星間 14 XMM-Newton 衛星搭載の RGS を用いた超新星残骸 J0453.6-6829 の X 線精密分光による共鳴散乱と電荷交換の探索

小柴 鷹介 (京都大学 理学研究科物理学・宇宙物理学専攻 M1)

超新星残骸 (SNR) の X 線スペクトルの解析から、元素組成比やプラズマの温度、電離状態などの様々な物理情報が得られる。これらを正確に測定するためには放射過程への正しい理解が必要である。近年、SNR の X 線スペクトル解析において従来考慮されてこなかった物理過程である共鳴散乱 (RS) と電荷交換 (CX) の兆候が示された [1][2]。主にこの 2 つの物理過程により、標準的なプラズマの熱的放射に比べて、ヘリウム様酸素 $K\alpha$ (OVIIHe α) 線の禁制線/共鳴線の強度比が大きくなる。この強度比の測定には、OVIIHe α 線の禁制線や共鳴線を分光できるエネルギー分解能を持つ検出器で観測する必要がある。

本研究では、RS と CX が SNR で一般的であるかどうかを検証するために、XMM-Newton 衛星搭載の反射型回折分光器 RGS を用いて SNR J0453.6-6829 の解析を行った。J0453.6-6829 は大マゼラン星雲に位置し、年齢が約 1.3 万歳の重力崩壊型 SNR である。先行研究では、電離非平衡プラズマの熱的放射モデルでスペクトルを説明しており、OVIIHe α 線の禁制線に顕著な残差が見られる [3]。本講演では、J0453.6-6829 における OVIIHe α 線の禁制線/共鳴線の強度比に着目し、RS と CX の可能性を探る。

1. Amano et al. 2020, ApJ, in press
2. Uchida et al. 2019, ApJ, 871, 234
3. Haberl et al. 2012, A&A, 543, A154

星間 15 XMM-Newton/RGS を用いた超新星残骸 G292.0+1.8 の X 線精密分光

佐藤 諒平 (埼玉大学 理工学研究科 M1)

大質量星 ($>8M_{\odot}$) が恒星進化の最終段階に引き起こす爆発現象のことを超新星爆発といい、超新星爆発の後に残された星雲状の天体を超新星残骸という。超新星爆発を引き起こした星 (親星) は、検出されるケースが極めて稀であるためよく分かっていない。近年、超新星残骸中に検出される星周物質 (爆発前に親星から放出されたガス) の観測が、親星を推定する有力な手がかりとして注目されている。超新星残骸 G292.0+1.8 (G292) は、その中央付近に星周物質と目されるベルト状構造が観測されている天体である。本研究では、星周物質の組成比の測定を通じた親星の推定を目的として、G292 を XMM-Newton 衛星に搭載された Reflection Grating Spectrometer を用いて、X 線精密分光観測した。G292 を 5 つの領域に分割し、

スペクトルを抽出した結果、RGS は多数の X 線輝線を見事に分離し、特に一部の領域において、N Ly α の初検出にも成功した。さらに、RGS と同時観測を行う CCD 検出器 (MOS) は、Al He α の初検出に成功した。RGS の観測による各スペクトルは、2 温度の熱放射モデルと冪関数モデルにより再現された。高温成分 ($kT \sim 0.76\text{keV}$) の元素組成比は $O/Fe \sim 4.75 \text{ solar}$ など、重力崩壊型超新星の爆発噴出物と一致していた。一方、低温成分 ($kT \sim 0.26\text{keV}$) の組成比は概ね太陽組成比と一致していた。したがって、この成分は爆発噴出物が掃き集めた星周ガスと考えられたが、元素組成比は $N/O \sim 0.49 \text{ solar}$ と計測され、重い星の星風で通常観測される窒素過剰と一致しなかった。本講演では、その原因について考察するとともに、MOS データも加えた解析の結果についても報告する。

1.Kamitsukasa, F., et al. 2014, PASJ, 66, 3

星間 16 XMM-Newton と NuSTAR による Ia 型超新星残骸 3C397 の鉄族元素の空間分布測定

大城 勇憲 (東京大学 理学系研究科物理学専攻 M1)

超新星残骸の X 線観測は、その親星の特定や爆発のメカニズムを探る有効な手段である。3C397 は Ia 型超新星の残骸であり、年齢は数千年と推定されている。X 線天文衛星「すざく」による研究では、非常に豊富な鉄族元素 (Cr, Mn, Fe, Ni) の存在が報告された。さらに、質量比 Mn/Fe , Ni/Fe は、これまでに観測されたどの Ia 型超新星残骸のものよりも大きく、超新星爆発時の電子捕獲なしには説明できないことが明らかになった (Yamaguchi et al. 2015)。この事実は、3C397 の親星がチャンドラセカール質量 (MCh) に近い白色矮星であったことを示す。一方、「すざく」の観測により得られた Mn/Fe や Ni/Fe 比は、一般的な near-MCh モデルの予想値をも上回っており、爆発時の白色矮星の中心密度が従来想定よりもさらに高い可能性が指摘された (Dave et al. 2017; Leung & Nomoto 2017)。この解釈が正しければ、Mn や Ni に加えて Cr の大部分も電子捕獲を通して生成されるため、これらの重元素の分布が空間的な相関を持つことが予想される。したがって、鉄族元素の分布の調査が、親星の密度決定の鍵となる。

そこで本研究では、「すざく」より空間分解能に優れる XMM-Newton 衛星と NuSTAR 衛星を用いて各 $\sim 130\text{ks}$ の観測を行い、SNR 全体の諸物理量と鉄族元素の空間分布を調べた。それらの X 線スペクトルから鉄族元素輝線をクリアに検出し、輝線強度比の空間依存性を確認した。本講演では、電離非平衡プラズマモデルを用いた詳細な解析の結果に基づき、親星の爆発時の密度や進化過程について議論する。