

2019 年度第 49 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

岩崎 一成 (国立天文台)

7月31日 18:15–19:15 B 会場

## 衝撃波が駆動する星間媒質の相転移ダイナミクス

銀河の基本構成要素の一つである星間媒質は、幅広い密度・温度の相が混在する多相構造をもつことが知られている。銀河における多様な過程 (超新星爆発, 銀河渦状腕など) で生じる衝撃波は、星間媒質の相間の転移を引き起こし、銀河内の物質循環に重要な役割を果たしている。

本講演では、とくに中性水素原子ガスから分子雲への相転移過程に着目する。この過程は、磁気流体力学と加熱冷却過程・化学反応・輻射輸送・自己重力といった多様な要素が複雑に関連する興味深い研究対象であるとともに、星形成の初期条件を決定するという点で非常に重要である。本講演では、星間媒質の基本的な性質を解説したあと、星間媒質の相転移研究の進展を追うとともに、講演者らが進めている分子雲形成から星形成の初期条件を明らかにする試みについて紹介する。

馬場 彩 (東京大学 理学系研究科物理学専攻馬場研究室) 8月1日 13:15–14:15 C 会場

## 多様性の源: 超新星残骸

星は死の際に「超新星爆発」と言われる大爆発をおこすことがある。 $10^{51}$  erg にものぼる爆発噴出物の運動エネルギーは星間空間に衝撃波を形成し、秒速数千 km の膨張が数千年以上続く「超新星残骸」を形成する。超新星残骸は宇宙空間に重元素や宇宙線を供給する、宇宙の「多様性」の源である。

超新星残骸衝撃波では、衝撃波の運動エネルギーが徐々に下流物質の熱エネルギーへと変換され、数百万度–数千万度の光学的に薄いプラズマを形成する。このプラズマは熱的制動放射と共に電離した重元素からの特性 X 線を放射するため、X 線帯域で明るく輝く。従って、X 線帯域での超新星残骸観測は、プラズマの温度や密度測定と共に、プラズマ内の重元素量や電離度などを測定できる格好の手段である。また、超新星残骸衝撃波では、diffusive shock acceleration 機構で荷電粒子が超相対論的エネルギーまで加速し宇宙線を供給すると考えられている。加速された粒子の観測には、電波から X 線、ガンマ線まで広帯域の手法が用いられる。本講演では、これらの観測的知見について概観する。

## 星間 a1 young から middle-aged の超新星残骸からの非熱的放射についての統一モデルの構築に向けて 小橋 亮介 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 M1)

宇宙線の加速機構の解明は、高エネルギー天文学における重要な問題の1つである。とくに knee と呼ばれる  $10^{15.5}$  eV 以下の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 Acceleration; 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、その周りにある分子雲などとの相互作用により生じる  $\gamma$  線の形で観測することができる。DSA 理論を用いた  $\gamma$  線スペクトルの再現により DSA 理論の妥当性の根拠が得られる。

様々な SNR を  $\gamma$  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。そこで、先行研究である Yasuda & Lee (2019) [1] では、異なる星周環境における SNR の衝撃波での DSA と、 $\pi^0$ -decay や逆コンプトン散乱などの  $\gamma$  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 ( $\sim 5,000$  yr) までの  $\gamma$  線スペクトルを再現していた。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熱伝導や放射冷却といった効果を加味していなかった。そのため、Radiative 期 ( $\gtrsim 10,000$  yr) の SNR までは考えられなかった。

そこで、全年代の SNR で起こると考えられる物理を出来るだけ取り入れて数値計算することで、young ( $\sim 3,000$  yr) から middle-aged ( $\sim 30,000$  yr) までの SNR の  $\gamma$  線スペクトルの時間発展を再現できるかを研究する。使用するコードは、[1] で用いられた、1次元流体計算に衝撃波加速を加えた複合的なコード (CR-hydro code) で、SNR の進化と宇宙線加速を正確かつ同時に計算することができる。そこに、前述した熱伝導や放射冷却の効果をさらに加える。本発表では、研究の進捗とこれからの展望を説明する。

1. Yasuda, H. and Lee, S.-H. 2019, ApJ, 876, 27
2. Lee, S.-H. et al. 2015, ApJ, 806, 71

## 星間 a2 Chandra X 線観測衛星を用いた超新星残骸 Tycho の時間変動の観測 松田 真宗 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M1)

Tycho' Brahe の超新星残骸は、1572 年に Ia 型超新星爆発をした天体である。他には見られない特異な構造として、南部と西部に縞状構造が存在し、その成因は未だ不明である。これまでの研究で、この部分は周囲よりも硬い非熱的 X 線放射を

持つことが解明され、磁場乱流による粒子加速が示唆されている ([1],[2])。また、Okuno et al.(2019) では、縞状放射が形成されつつあると思われる部分での時間変動の観測が行われた。これにより、強度と光子指数の数年単位における変化が明らかになり、この2つが負の相関関係を持つことがわかった。以上から、増幅された磁場が粒子加速やシンクロトン冷却を促進し、粒子のエネルギー分布が年単位で変化した可能性を議論している。この場合、変動のタイムスケールから、 $100\mu\text{G}$  まで磁場増幅が起きていると見積もることができる [3]。

本研究では、縞状構造の成因を探るために高角度分解能の it Chandra X 線観測天文衛星の観測データから時間変動を調べた。Okuno et al.(2019) は、2003 年、2007 年、2009 年、2015 年の 4 回の観測データを用いて、極めて局所的な領域で解析した。対して我々は、2000 年と 2017 年も加え、縞状放射全体で変動の探査を行う。これにより、長期的かつ広範囲の情報が得られ、さらなる定量的な評価が可能になる。ストライプ毎のスペクトルの変化やその空間依存性は、成因を議論する上で重要な手がかりであり、これまで示唆されてきた磁場増幅や星間ガスとの相互作用の可能性に制限をつけることができる。本講演では、今回の観測で得られた結果について述べ、先行研究との比較・検討を行う。

1. Eriksen, K. A., et al. 2011, ApJL, 728, L28
2. Bykov, A. M., et al. 2011, ApJL, 735, L40
3. Okuno, T., et al. 2019, submitted.

## 星間 a3 宇宙加速のシミュレーションに必要な分解能の検証

### 西野 将悟 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M1)

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、そのスペクトルはベキ型分布をしている。knee energy と呼ばれる  $10^{15.5}$ eV でベキ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フェルミ機構によって加速されると考えられている。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てる (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、衝撃波は扱っておらず、Bell 不安定と粒子加速を同時に扱ってはいなかった。Inoue (2019) で開発されたコードを衝撃波による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。ただし、計算に

使う分解能が不足していると、衝撃波面が有限の分解能による厚みを持ってしまうため、エネルギーの小さい粒子は衝撃波面を往復するとき実際より小さい圧縮比を感じてしまい、それにより本来と異なったスペクトルが得られるという問題がある。ことような問題が生じない十分な分解能がどの程度かは知られていないため、必要な分解能を理論的に見積もった。この見積もりは、分解能を様々に変えた数値積算を行い、結果を移流拡散方程式の定常解 (Blandford & Ostriker 1978) と比較することで検証できると考えられる。今回の夏の学校で理論的に見積もられた必要分解能を数値計算で確かめた結果について議論したい。

1. Inoue, T. 2019, ApJ, 872, 46

## 星間 a4 M17 赤外線暗黒星雲領域の分子雲の力学状態と分子雲衝突の可能性について 木下 真一 (国立天文台 M1)

星の形成は分子雲の高密度領域にあるコアが重力収縮することによって開始される。したがって分子雲の力学的進化を調べることは星形成を理解する上で非常に重要である。分子雲の力学的進化を解明するためには分子雲内での分子ガスの質量、分布、物理状態などを知る必要がある。分子雲の主成分は水素分子 ( $H_2$ ) であるが、 $H_2$  は永久電気双極子モーメントを持たず、低温では輝線を放射することはできない。したがって分子雲の研究には水素やヘリウムに次ぐ存在量の一酸化炭素 CO などの回転遷移による分子輝線の観測を利用するのが一般的である。今回我々は野辺山 45m 電波望遠鏡によって得られた  $^{12}CO(J=1-0)$  と  $^{13}CO(J=1-0)$  の分子輝線データ (Nakamura et al. 2019) を用いて大質量星形成領域 M17 領域の分子雲の構造と力学状態を調べた。M17 領域を大質量星が形成されている M17-HII と大質量星の形成がみられない M17-IRDC (赤外線暗黒星雲を含む) の 2 つに分けて解析を行ったところ、両者の分子雲の物理状態に大きな違いがみられた。

M17-HII 中には柱密度の高い分子ガスが多く見られる一方、M17-IRDC 中には  $1 \text{ g cm}^{-2}$  (理論的考察から予想される大質量星形成に必要な柱密度の閾値) を超える柱密度の分子ガスが含まれていないことがわかった。また階層構造解析ツールである Dendrogram (Rosolowsky et al. 2008) を用いて構造解析した所、M17-HII 中の分子ガスは高密度でビリアルパラメータ ( $\alpha$ ) が 1 より小さく重力的に束縛されている一方、M17-IRDC 中にはビリアル平衡に近い重力的に束縛されていない ( $\alpha > 1$ ) 分子塊が多数ある事が判明した。また M17-IRDC 中の分子ガスの速度分散の方が M17-HII 中よりも約 3 倍大きかった。M17-IRDC 領域の  $^{12}CO/^{13}CO$  channel map を見ると速度の異なる 2 つの分子雲が存在する。この 2 つの分子雲が衝突し乱流場が励起された領域で分子塊が形成されたと解釈すると、M17-IRDC 領域の分子塊の力学状態が説明できるかもしれない。

## 星間 a5 ALMA による渦巻銀河 M33 の巨大分子雲の高分解能観測

近藤 滉 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

巨大分子雲やその進化の理解は、星と分子ガスからなる銀河の進化の理解につながる重要なテーマであると言える。さんかく座銀河 M33 は最近傍の渦巻銀河 ( $D \sim 840 \text{ pc}$ ) であり、IRAM-30m や NRO45m、ASTE の全面観測 (空間分解能  $\sim 50 \text{ pc}$ ) により巨大分子雲が同定/カタログ化されていることから、巨大分子雲の進化を調べるのに有意義なターゲットである。我々は ALMA Cycle 6 において、M33 の北部に存在する質量が  $\sim 10^6 M_\odot$  と非常に重たい 3 つの巨大分子雲に対して観測を行なった。各巨大分子雲の特徴として GMC-8 は星形成がアクティブでない分子雲、NGC 604 は巨大な H II 領域を伴う分子雲、GMC-16 は比較的小さな H II 領域を伴う分子雲である。観測は、空間分解能  $\sim 1 \text{ pc}$ 、 $^{12}CO$ ,  $^{13}CO$ ,  $C^{18}O$  の  $J = 2 - 1$  の輝線、及び 1.3mm 連続波により行なった。 $^{12}CO$  と  $^{13}CO$  のデータより、GMC-16 や NGC 604 では多くのフィラメント状分子雲を確認した。一方で、GMC-8 では比較的広がった構造がみられ、 $^{13}CO/^{12}CO$  は他の 2 つと比較すると低く、より高密度領域をトレースする  $C^{18}O$  輝線/1.3mm 連続波を検出できなかった。これらの結果から、巨大分子雲が進化するにつれ星形成へと至る高密度ガスが形成される可能性が示唆される。GMC-16 で見られたフィラメント状分子雲は 50-100 pc 規模で南北に伸びており、それらは銀河腕に沿っていると考えられる。さらに、 $C^{18}O$  輝線/1.3 mm 連続波を検出したフィラメントの先端部で大質量星原始星のアウトフローと考えられる速度成分を  $^{12}CO$  輝線で確認した。これらを H II 領域と比較すると、銀河の回転方向に数 pc ずれていることから銀河衝撃波による星形成の誘発が考えられる。一方で、NGC 604 では 10-15 pc のフィラメント状/シェル状分子雲や数 pc のクランプ状分子雲など複雑な構造が明らかになった。それらは H II 領域に沿っている分子雲、銀河規模での H I ガスの影響を受けている分子雲などで複雑に構成されていると考えられる。

## 星間 a6 $l = 0^\circ 85$ 高速度コンパクト雲群の観測的研究 渡邊 裕人 (慶應義塾大学 M1)

銀河系中心核より半径 200 pc の領域には中心分子層 (Central molecular zone; CMZ) と呼ばれる分子雲の複合体が存在する。CMZ の分子雲は高温、高密かつ広い速度幅 ( $\Delta V > 15 \text{ km s}^{-1}$ ) を持ち、複雑な運動状態にある。その中でも高速度コンパクト雲 (High-velocity compact cloud; HVCC) と呼ばれる分子雲は一際広い速度幅 ( $\Delta V > 50 \text{ km s}^{-1}$ ) とコンパクトな空間分布 ( $d < 5 \text{ pc}$ ) で特徴づけられ<sup>[1]</sup>、CMZ 内で複数発見されている。本研究では the James Clerk Maxwell Telescope (JCMT) で得られた CO  $J = 3 - 2$  輝線のデータを精査し、 $l = 0^\circ 85$  HVCC 群を発見した。これは  $(l, b) = (0.85, 0.00)$  から  $0^\circ 06$  以内の領域に集結した 6 つの HVCC により構成され

る。このような HVCC の集結は非常に稀であり、また群を構成する一部の HVCC は著しく高い CO  $J=3-2/J=1-0$  輝線強度比を示している ( $R_{3-2/1-0} > 2$ )。さらに、いずれの HVCC も銀河回転に逆行する負のシステム速度を持っており、一部の HVCC は位置-速度図上において共通の傾きが確認できた。

本研究では、これらの特徴より HVCC 群がコンパクト高速度雲 (Compact high-velocity cloud; CHVC) や球状星団、超新星残骸など銀河面に属していないの天体の集団との相互作用によって形成された可能性を検討している。形成過程として点状重力源による重力散乱モデルや点状重力源突入モデルが適用できる。前者は HVCC CO-0.40-0.22 の起源として提唱されたモデル [2]、後者は W44 超新星残骸に付随する超高速分子ガス成分 Bullet の起源として提唱されたモデル [3] である。本発表では  $l = 0^{\circ}85$  HVCC 群の物理的特徴を踏まえ、その起源を議論する。

1 Oka, T., et al. 1998, ApJS, 118, 455

2 Oka, T., et al. 2016, ApJ, 816, L7

3 Yamada, M., et al. 2017, ApJ, 834, 3

## 星間 a7 CO 0.02-0.02 のラインサーベイ観測 中川原 峻介 (慶応義塾大学岡研究室 M1)

銀河系中心分子層に多数発見された高速度コンパクト雲 (High Velocity Compact Cloud; HVCC) は、空間的にコンパクトかつ非常に広い速度幅をもつ特異分子雲群である。銀河系中心核 Sgr A\* の約 5 分角東側に位置する CO 0.02–0.02 は、特に運動エネルギーの高い HVCC であり、既に多くの観測研究が成されている。この天体は、南西側に直径約 3 pc の空洞と、その内部に赤外線点源の集団を含むことから、巨大星団中の超新星爆発によって加速されたものと解釈された。一方で、この雲を構成する分子ガスは純粋な膨張運動を示さず、エネルギー注入率の観点からも超新星起源とする解釈には疑問が呈されていた。

そこで、CO 0.02–0.02 について、野辺山 45 m 電波望遠鏡を用いて行った波長 3 mm 帯のラインサーベイ観測の結果を詳細に解析した。観測は 80 GHz~116 GHz の範囲を 0.02 K のノイズレベルでカバーし、CO 0.02–0.02 内の二方向において 39 種の分子による 64 本のスペクトル線が検出された。検出されたスペクトルの形状は様々であったため、形状を入念に分類することで HC<sub>3</sub>N、SiO、CH<sub>3</sub>OH、SO、H<sub>2</sub>CS のスペクトル線が CO 0.02–0.02 を最もよくトレースすることを見つけた。これらの分子は、衝撃波ブルーブと高密度プローブであり、CO 0.02–0.02 の生成に衝撃波を伴う圧縮・加熱過程が関与したことを意味する。これは従来の超新星爆発起源を強く支持する結果である。また、2 方向の観測結果の比較、他の分子雲のラインサーベイ観測の結果との比較などについても議論する。

1. Oka, T., White, G. J., Hasegawa, T., et al. 1999, ApJ, 515, 249

2. Oka, T., Hasegawa, T., White, G. J., et al. 2008, PASJ, 60, 429

## 星間 a8 チャンドラ衛星による銀河系内の超新星残骸 G344.7–0.1 の X 線観測 福島 光太郎 (東京理科大学 理学研究科 物理学専攻 松下研究室 M1)

超新星残骸 (SNR) は超新星爆発の後に残る天体で、外向きの衝撃波と逆行衝撃波にそれぞれ加熱された、周囲の星間物質と親星の放出物 (イジェクタ) から成る高温プラズマが X 線を放射する。Ia 型超新星爆発は白色矮星への質量降着や白色矮星同士合体によって起こり、Si や Fe などの重元素を合成することで知られるが、爆発の詳細なメカニズムは未解明である。これを解明するには、Ia 型 SNR における重元素の空間分布の調査が鍵となる。イジェクタの分布は、Tycho や Kepler などによく研究されているが (e.g. Yamaguchi et al. 2014, Kasuga et al. 2018)、若い SNR では逆行衝撃波が中心に到達しておらず、SNR 全体の重元素分布を調べることができなかった。

銀河系内の SNR である G344.7–0.1 は比較的高齢 (~4000 yr) のため中心部まで逆行衝撃波が到達し、イジェクタが全て加熱されている。また G344.7–0.1 では他の高齢の SNR と異なり、Fe K 輝線が観測できる (Yamauchi et al. 2005, Yamaguchi et al. 2012)。この 2 点は Ia 型 SNR の Fe 分布調査における大きな利点で、現在観測されている SNR では G344.7–0.1 に固有の特徴である。そこで我々は元素分布調査に適した高い角分解能を誇るチャンドラ衛星で G344.7–0.1 を 210 ks に渡って観測した。このデータの解析により、Si のシェル構造とそれに囲まれた Fe の集中分布を発見した。中心部からの Fe K 輝線は中性に相当する低エネルギー (~6.4 keV) で、外側の Fe (~6.46 keV) に比べて有意に電離度が低かった。SNR の逆行衝撃波は外側のイジェクタから順次加熱していくため、爆発中心付近のプラズマが最も低電離となることが理論的に予測される。したがって本観測結果は、集中した Fe の分布位置が真に爆発中心であったことを強く示唆しており、親星の中心近くで多量の Fe が生成された事実を初めて明確に示した。

1. Combi, J. A., et al., 2010, A&A

2. Giacani, E., et al., 2011, A&A

3. Yamaguchi, H., et al., 2012, ApJ

## 星間 a9 Chandra 衛星を用いた X 線による重力崩壊型超新星残骸 N132D の時間進化の解析 畠内 康輔 (東京大学 馬場・中澤研究室 M1)

超新星残骸の膨張構造を理解することは爆発の機構や成長過程を知るために必要不可欠である。しかし実際の測定例は少なく、そのほとんどが先行研究 [1] にみるように Ia 型のものである。重力崩壊型では Cassiopeia A で非等方な膨張が観測されている [2]。しかし爆発から 1000 年を超える重力崩壊型超新星

残骸での観測はなく、サンプルが足りないため理論モデルとの検証が十分に行われていない。そのため若くない重力崩壊型の超新星残骸でも膨張構造を測定し、その進化そのものや星間物質が超新星残骸の進化に与える影響について決定することが必要である。

N132D は大マゼラン雲の中において X 線で最も明るい超新星残骸であり、若い超新星残骸から middle-aged な超新星残骸への過渡期にある。その内部プラズマは高い電離度を持っていると考えられているものの、電離度の低い中性鉄輝線の存在も指摘されており [3]、内部構造やプラズマ状態についても議論の余地が大いにある。

そこで我々は X 線衛星 Chandra の 2000 年 (94 ksec)、2006 年 (89 ksec)、2019 年 (34 ksec) にわたるデータを用いて、イメージングを主に用いた解析を行い、またエネルギーバンドから Si, S, Fe の輝線を検出した。さらに領域・エネルギーバンド毎の時間変化・スペクトルを解析することで膨張構造や時間発展、星間物質の分布について議論する。

1. Maeda, K., Benetti, S., Stritzinger, M., et al. 2010, *Nature*, 466, 82-85
2. Delaney, Tracey, Rudnick, Lawrence, Stage, M.D., et al. 2010, *ApJ*, 725, 2038-2058
3. Bamba, A., Ohira, Y., Yamazaki, R., et al. 2018, *ApJ*, 854, 71

## 星間 a10 XMM-Newton RGS を用いた超新星残骸 N132D の高分解能 X 線分光解析 鈴木 瞳 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

重い星は重力崩壊によって爆発を起こし、超新星残骸となって数万年間 X 線で輝き続ける。超新星残骸の X 線スペクトルは、星の内部で作られた重元素や星周物質からの輝線を含むため、親星や周辺環境の特徴を知る手がかりとなる。但し、正確なスペクトル分析を行うには、分光能力の高い検出器によって得られた高統計のデータが必要となる。

本研究では、大マゼラン星雲内の重力崩壊型超新星残骸 N132D に注目した。先行研究からは約 1keV (1 千万度) の高温プラズマを持つ年齢 3000 年程度の残骸であることが知られる。欧州の X 線天文衛星 XMM-Newton は打ち上げ以来、検出器の機上較正を主目的に N132D の観測を定期的に行なってきた。これまでの総露光時間は 1 Msec を超え、科学的にも極めて価値の高い分光データが得られている。しかしながら、このデータが較正以外の用途で活用されることはほとんどなかった。そこで我々は科学的観点に基づき、XMM-Newton による N132D の観測データのなかでも特に分光能力の高い「反射型回折分光器 RGS」の網羅的なスペクトル解析を行った。

RGS による N132D のデータは、衛星打ち上げ直後の 2000 年に行われた 53 ksec の観測分のみが以前に報告されている (Behar et al. 2001)。6~37Å の波長域において C, N, O, Ne,

Mg, Si, S, Fe の輝線が分離され、Fe の電離状態から電子温度 0.2~1 keV の電離平衡プラズマが複数成分存在することが示唆されているが、モデルフィッティングによって定量的に確認されたわけではない。我々はこの先行研究よりも 20 倍統計の良いデータを用いて、定量的なスペクトル解析を行った。先行研究で使われた 1 次光スペクトルよりも分解能が 2 倍高い 2 次光スペクトルを用いることで、Ne IX の共鳴線と禁制線の分離に初めて成功した。これによって、プラズマの温度や電離状態の精密測定が可能になっただけでなく、内殻電離や電荷交換反応など、通常の電離平衡プラズマでは見られない原子過程のシグナルを探することもできる。本講演ではその詳細を報告する。

1. E. Behar. et al. *A&A*, 365, L242 (2001)

## 星間 a11 XMM-Newton 衛星搭載の回折格子分光装置 RGS による超新星残骸 N49 の X 線精密分光 天野 雄輝 (京都大学 理学研究科 宇宙線研究室 M2)

近年の CCD による観測で、分子雲衝突のある SNR から、イオンと中性物質の相互作用による電荷交換反応の X 線放射の示唆が得られた (Katsuda et al. 2011)。実際に、この SNR を XMM-Newton 衛星搭載の回折格子分光装置 (RGS) を用いて、精密分光した研究では、電荷交換反応の強い証拠がみつかった (Uchida et al. 2019)。電荷交換反応はヘリウム様酸素 (OVII) K  $\alpha$  禁制線、共鳴線などの CCD では分光できない微細な輝線の強度比に特徴が出る。

今回我々は、RGS を用いて、超新星残骸 (SNR) N49 の精密分光観測を行った。N49 は大マゼラン雲に位置し、年齢約 5000 歳と見積もられている、重力崩壊型の SNR である。先行研究により、南東部の広い領域で分子雲と衝突していることが明らかとなった (e.g. Yamane et al. 2018)。

取得したスペクトルの OVII K  $\alpha$  禁制線/共鳴線の強度比は熱的なプラズマからの放射では、説明できないほど大きな値を示していた。電荷交換反応は、この輝線の強度比を説明できるが、全エネルギー帯のスペクトルは説明できない。N49 のスペクトルにおける OVII K  $\alpha$  禁制線/共鳴線、OVIII Ly  $\beta$  /Ly  $\alpha$ 、Fe XVII (3s-2p)/(3d-2p) などの輝線の強度比は、プラズマによる吸収 (共鳴散乱) を受けやすい輝線の強度が弱い傾向を示している。これらの輝線の強度比の多くは、あるイオン化した吸収体を仮定した場合、共通の水素柱密度で説明できる。吸収体については、プラズマ深さの見積もりから N49 のリムにおける自己吸収の可能性が高い。本研究は、以前から指摘されていた、SNR での共鳴散乱による自己吸収 (Kaastra & Mewe 1995) の強い証拠となる。

1. Katsuda et al. 2011, *ApJ*, 730, 24
2. Uchida et al. 2019, *ApJ*, 871, 234
3. Kaastra, J. S., & Mewe, R. 1995, *A&A*, 302, L13

## 星間 a12 未知の PeVatron 天体に求められる条件の考察

飯田 竜太 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

宇宙空間には、宇宙線と呼ばれる高エネルギーの荷電粒子が多数存在している。われわれの銀河系内の宇宙線は主に陽子やヘリウムなどの原子核であり、そのエネルギー密度は  $1\text{eVcm}^{-3}$  程度である。これらの宇宙線は星間ガスの原子核と衝突してさまざまな反応を起こすとともに、星間ガスの電離や加熱に大きな影響を及ぼしている。

多くの宇宙線は、超新星爆発後にできる超新星残骸 (Supernova Remnant:SNR) の衝撃波によって加速されると考えられている。宇宙線のエネルギースペクトルはべきで表現でき、べきの指数は、3PeV 付近にある”knee”と呼ばれる折れ曲がり境に、-2.7 から -3 に変化している。このことから knee 以下のエネルギーを持つ宇宙線に関しては、SNR が主な加速機構であると長らく考えられてきたが、近年のガンマ線による観測では SNR で加速されている宇宙線のエネルギーはせいぜい 100TeV までであり、PeV の宇宙線は SNR 以外の未知の天体 (PeVatron) によって加速されている可能性は否定できない。

そこで本研究では、PeVatron が満たすべき条件を解析的に求めることにした。具体的には宇宙線光度やスペクトルをパラメーターにした PeVatron を銀河系円盤内に分布させる。分布も様々なタイプのもの考える。そして境界条件を与えた拡散方程式の Green Function を用いて、PeVatron からの宇宙線の伝搬を解き、地球で観測される knee 付近の宇宙線フラックス、スペクトル、非等方性を求める。それを実際の観測と比較することで PeVatron が満たすべきパラメーターを絞り、その結果から候補となりうる天体を絞り込む。その例として、まず PeVatron の候補とされている既存の大質量星の星団のみで、地球で観測されている PeV の宇宙線フラックスを説明できるかどうか検討したところ、フラックスが小さすぎて説明できないことがわかった。

発表ではその手法を詳しく述べるとともに、PeVatron の候補として大質量星の星団以外の可能性についても検討する。

## 星間 a13 深層学習を用いた超新星残骸 W49B の X 線スペクトルによる特徴抽出

大塚 駿平 (立教大学 M1)

星爆発では、原子番号が鉄以上の元素が合成され、化学進化を知る上で重要である。その分布は超新星残骸内で大きく偏りがあり、Tycho には鉄ノットが存在している。超新星爆発は、核爆発型と重力崩壊型に分けられる。今回、解析を行った超新星残骸 W49B は重力崩壊型の双極ジェットを伴う超新星爆発をしたと考えられている。Si,S などの元素は W49B 全体に分布し、鉄は東側に偏って分布している。また、分子雲と相互作用しており、過電離プラズマが観測されている。このように、W49B の放射はさまざまな特徴がある。深層学習は、さまざま

なデータ解析に用いられ、高速かつ高精度なアルゴリズムとして注目されている。宇宙物理学における X 線のスペクトル解析では、モデルフィットしたパラメータ推定とスペクトルを分類することに深層学習が応用されている。後者は、Tycho に適用されて鉄ノットや外縁部の衝撃波を自動的に分類することができている。本研究では、深層学習を用いたスペクトルの分類を、チャンドラ X 線観測衛星のデータを用いて、初めて重力崩壊型の W49B に適用した。スペクトルによる分類結果のマップを、X 線の全フラックスイメージや Si,S,Ar,Ca,Fe による輝線のフラックスイメージと比較し、概ね全フラックスと鉄輝線のフラックスによって分類されていることを示した。特徴的な分類が行われた部分のスペクトルを抽出し、モデルフィッティングを行った結果、鉄の存在度が 31 と非常に大きく、Si, S, Ar, Ca の存在度も高い領域が存在することを確かめた。この金属の存在度が大きい領域の起源について考察した。

1. Y. Ichinohe et al. MNRAS 475, 4739-4744(2018)
2. L. A. Lopez et al. ApJ 764:55(2013)
3. D. Kingma and M. Welling arXiv:1312.6114v10

## 星間 a14 Chandra X 線衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西領域の hot-spot の解明 日暮 凌太 (立教大学 M2)

超新星残骸から観測される非熱的な X 線は、高エネルギー宇宙線電子のシンクロトロン放射によって放射される X 線であると考えられている。この宇宙線電子は、超新星残骸の表面に形成される衝撃波面を往復することにより、エネルギーを獲得し(衝撃波統計加速)、光速に近い速度まで加速される。非熱的な X 線放射が支配的な超新星残骸 RX J1713.7-3946 は、TeV ガンマ線で非常に明るいことから超新星残骸での粒子加速を研究する上で重要天体の一つと考えられている。さらに、電波や X 線観測から分子雲や分子雲クランプと相互作用している可能性が示唆されている。本研究の目的は、超新星残骸 RX J1713.7-3946 北西領域に存在する多数の点源状 X 線源 (hot-spot : 超新星残骸までの距離を 1 kpc としたとき半径 5 mpc 程度の大きさ) の正体を解明することである。北西領域のシェル内には hot-spot が顕著に多く存在することを、本研究の解析で初めて明らかにした。しかし、これまでどの超新星残骸からも非熱的な hot-spot のような構造は検出されていない。本研究では hot-spot に対し、エネルギースペクトル解析、空間構造の解析、時間変動の解析を行った。これらの解析結果から hot-spot の成因として、超新星残骸の衝撃波と分子雲コアの相互作用により生じる可能性を定量的に示した。本発表では解析結果と、それらから考えられる hot-spot の成因、及び X 線放射機構について議論する。

1. Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., & Fukui, Y., ApJ, 744, 71, 2012
2. Gabici, S. & Aharinian, F. A., MNRASL 445, 70, 2014

## 星間 a15 乱流による多相星間媒質の構造形態について

Goux Pierre (東北大学 天文学専攻 M1)

近年の分子雲と中性星間媒質 (ISM) の観測により、天球面上の柱密度分布の中にパーセクスケールのフィラメント構造が存在することが確認されている。[1] によりこのフィラメント構造の領域が星形成の現場であることが示されている。従って星形成過程、特に星形成率を理解する為には、このフィラメント領域の起源や詳細な物理状態を解明する必要がある。

ISM のあるゆるスケールでの構造はその中の乱流構造を反映していると考えられているが、その詳細は未解明である [2]。その上、「フィラメント」は乱流物理と関係なく便宜的に定義されている。これは実際の三次元的な形すらも分かっていないということである。その為、定量的な解析を行う際に不都合が生じる。[3] そこで、フィラメント状、シート状、クランプ状等の構造を連続的に記述できるような解析手法を確立することが不可欠である。また、乱流は様々なスケール構造を作るプロセスであるので、逆に階層的な構造から乱流の物理的性質 (カスケード等) を知ることができる。

我々は、現実的な星間媒質の 3D MHD シミュレーションを行い、その形状を解析し、各スケールに対応する構造が分かり、乱流モデルとの比較を行った。その結果、更にスケールごとの形状が乱流の性質と密接に関連していることが分かった。

さらに超音速乱流のカスケードメカニズムが分かれば、それは分子雲の中で星形成を起こすようなフィラメントやコアといった高密度構造の起源と結びついてはるはずであるため、星形成のトリガー機構を理解することにも繋がる。

1. Ph. André et al. A&A 518 L102 (2010)
2. B. Elmegreen and J. Scalo Annual Review of Astronomy and Astrophysics 42:1, 211-273 (2004)
3. D. Chappell and J. Scalo ApJ 551 712 (2001)

## 星間 b1 超新星残骸内における超新星爆発による宇宙線加速

安田 晴皇 (京都大学 理学研究科 宇宙物理学教室 D1)

高エネルギー天文学の課題の 1 つとして、宇宙線加速機構が挙げられる。これまで、knee と呼ばれるおよそ  $10^{15.5}$  eV 以下のエネルギーの宇宙線 (銀河宇宙線) は、超新星残骸 (Supernova Remnant; SNR) での拡散衝撃波加速理論 (Diffusive shock acceleration; DSA) によって加速していると考えられてきたが、最近の SNR の観測 (e.g. Aharonian et al. 2007) からは、1 つの SNR による宇宙線加速では、最高エネルギーが knee に到達することが難しいことが言われてきている。しかし、こ

れまでの SNR での宇宙線加速の先行研究では、単純化された星周環境が用いられてきた。そのため、複雑な星周環境下での SNR における宇宙線加速を研究することが重要である。

そこで我々は、スーパーバブルと呼ばれる天体に注目することにした。スーパーバブルは、局所的に存在する複数の星の星風が作る大規模構造である。スーパーバブル内部では、超新星爆発を起こした星の残骸の内部で、新たに超新星爆発が起こることが予想される。その際に新たに作られる宇宙線は、残骸内の重元素の空間分布を反映するため、通常の星周環境の場合とは異なる性質を持った宇宙線が生成されることが期待される。そこで本研究では、超新星残骸内部で新たに超新星爆発を起こしたときの宇宙線加速をシミュレーションする。シミュレーションで得た超新星残骸の密度や重元素分布などを初期条件にして、Yasuda & Lee (2019) で開発された次元流体計算に次元準解析的な衝撃波加速計算を組み合わせたコードを使用し、中心での超新星爆発による宇宙線加速を計算し、観測されている元素により異なるベキ指数などを再現できるか確認する。本講演では、本研究の進捗状況を報告する。

1. Aharonian, F., Akhperjanian, A. G., Bazer-Bachi, A. R., et al. 2007, A&A, 464, 235
2. Yasuda, H., & Lee, S.-H. 2019, ApJ, 876, 27

## 星間 b2 すざく衛星による W51 領域からの中性鉄輝線の発見

嶋口 愛加 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M2)

$10^{15}$  eV より低いエネルギーを持つ銀河系内宇宙線は超新星残骸で加速されていると考えられている。280 MeV 以上の高エネルギー陽子は、分子雲と衝突して  $\pi^0$  粒子を生成し、崩壊する際にガンマ線を放射する。この観測によって高エネルギー宇宙線の調査を行うことができる。しかし、280 MeV 以下の低エネルギー宇宙線の有効的な観測方法は、未だ確立されていない。そこで、低エネルギー宇宙線が中性鉄を電離し、X 線の波長域で中性鉄輝線を放射することに注目する。私たちは X 線天文衛星すざくの観測データを用いて、超新星残骸に付随する中性鉄輝線の調査を行っている。実際にいくつかの超新星残骸から中性鉄輝線が発見されており、低エネルギー宇宙線の存在の証拠を得ることができている [1]。

W51 領域は、星形成領域 W51B や超新星残骸 W51C が位置する複合領域となっており、 $\pi^0$  崩壊によるガンマ線放射が報告されていることから [2]、宇宙線の加速が行われていることが期待される。また、すざくの観測データを用いて行った先行研究でも、粒子加速の可能性が示唆されている [3]。そこで私たちは中性鉄輝線に注目し解析を行ったところ、W51C の電波シェルが観測されている領域とそれに付随している分子雲の領域で中性鉄輝線を発見した。W51 領域は銀河面に位置しているため銀河面リッジ X 線放射 (GRXE) と比較をしても、有意に中性鉄輝線を発見することができた。さらに、この中性鉄輝線は



宇宙線起源である可能性が高いことから、低エネルギー宇宙線の密度を求め、その起源についての議論を試みる。

1. Nobukawa et al. 2018, ApJ, 854, 87
2. Abdo et al. 2009, ApJL, 706, L1
3. Hanabata et al. 2013, PASJ, 65, 42

## 星間 b3 CO $J=3-2$ 輝線データを用いた銀河系高速度分子雲の統計的研究 宇留野 麻香 (慶應義塾大学 岡研究室 M1)

我々の住む銀河系には、中心から半径 200 pc 以内の領域に分子ガスが強く集中する領域 (銀河系中心分子層; CMZ) が存在する。CMZ は銀河系円盤部に比べて高温・高密度・強い磁場などの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 内では高速度コンパクト雲 (High Velocity Compact Clouds; HVCC) と呼ばれる空間的にコンパクト ( $d \geq 5$  pc) かつ非常に広い速度幅 ( $dV \geq 20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ) を有する特異分子雲が多数発見されている。これらの 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、銀河系中心分子層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。

HVCC は分子ガスの集中する領域に存在するため、一般にその同定作業は容易ではない。本研究室の卒業生による先行研究では、CMZ の一酸化炭素 (CO) の  $J=1-0$  回転遷移スペクトル線データに対して二段階の前処理を行った上で同定作業を行う計算アルゴリズムを開発し、それまでの目視による同定に頼っていた状況を著しく改善した。一方で、先行研究で使用した CO  $J=1-0$  輝線は低温・希薄な分子ガス雲をトレースするものであり、CMZ 中においても一際高温・高密度状態にある HVCC の同定作業に相応しいものではなかった。よって、今回行った研究では CO  $J=1-0$  輝線に比べてより高温・高密度の分子ガスをトレースする 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自動同定アルゴリズムを適用した。本発表では、CO  $J=3-2$  輝線データでの現段階での解析結果について議論する。

## 星間 b4 オリオン領域における分子ガスの解析と星形成について 関口 卓馬 (新潟大学 宇宙物理学研究室 M1)

本講演は Nishimura et al.(2015) に沿って発表する。

星間物質が高密度な領域では、主成分である水素が水素分子の状態が存在するため星間分子雲と呼ばれる。分子雲は星形成の場となっており星形成過程を理解する上で、星形成活動と分子雲中のガスの物理的状態の関係を調べることは大変重要である。そのために、分子雲中に存在する分子の回転輝線の観測を行うが、主成分である水素分子は分子雲の温度では励起され

ない。そこで一酸化炭素の回転輝線の観測が行われることが多い。 $^{12}\text{C}^{16}\text{O}$ (以後、CO) は水素分子に次いで存在量が多く、また  $^{13}\text{C}^{16}\text{O}$ 、 $^{12}\text{C}^{18}\text{O}$ ( $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$ ) の同位体も存在する。CO は存在量が多いため光学的に厚く、分子雲表面の低密度部分からの放射を反映するため分子雲の全体像を把握することができ、逆に光学的に薄い  $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  は分子雲内部の高密度部分をトレースすることができる。このように一酸化炭素輝線の同時観測を行うことは、分子雲の状態を探る上で大切な役割を果たしている。

この論文は巨大分子雲 OrionA と OrionB を含むオリオン領域について野辺山宇宙電波観測所の 1.85m ミリ波サブミリ波望遠鏡で観測された CO( $J=2-1$ )、 $^{13}\text{CO}$ ( $J=2-1$ )、 $\text{C}^{18}\text{O}$ ( $J=2-1$ ) と NANTEN 望遠鏡で観測された CO( $J=1-0$ )、 $^{13}\text{CO}$ ( $J=1-0$ )、 $\text{C}^{18}\text{O}$ ( $J=1-0$ ) に対して大速度勾配近似を用いた解析を行い、分子雲中の水素分子の密度分布や温度分布など物理的状態を導出した。この結果と Spitzer 宇宙望遠鏡で観測された Young Stellar Objects(YSOs) の分布を比べることで、星が高密度ガス領域で効率的に形成されることを示した。このことについて発表する。今後は Gaia DR2 を用いたオリオン領域の解析を行うことで相補的な検討を試みる予定である。Gaia は可視光を中心としたバンドの位置天文衛星であり、恒星の位置、年周視差、固有運動などを観測している。このデータをオリオン領域に用いることで、恒星の形成場所の解明につながるためオリオン領域の星形成史を探ることができると考えられる。

1. Nishimura et al., Revealing The Physical Properties of Molecular Gas in Orion with a Large-scale Survey in  $J=2-1$  Lines of  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ , and  $\text{C}^{18}\text{O}$ , The Astrophysical Journal, 216:18, 2015, January

## 星間 c1 XMM-Newton 衛星における SN1987A の RGS データ解析 ト部 夕希乃 (関西学院大学 M1)

質量の大きな星の最期に超新星爆発が起こると、超新星残骸 (SNR) が発生する。特に、年齢の若い SNR の内部には高温プラズマが存在しており、その物理状態を知るためには、SNR の観測データからプラズマ温度や電離度を決定することが有効である。1987 年に大マゼラン雲で発生した超新星残骸 SN1987A は太陽系から最も近い場所 (距離にして約 50kpc) で観測された SNR で、重力崩壊型の Ihspace-.1emI 型 (可視光観測で水素の吸収線が見えるもの) に分類される。可視光観測によって発見されたのち、様々な波長域での観測が行われるようになった。X 線観測においては、爆発の数ヶ月後に X 線天文衛星 Ginga が初めて成功し、その後も Chandra や XMM-Newton における継続的な観測により、軟 X 線領域におけるフラックスの増光と定常化が認められている。XMM-Newton 衛星には X 線観測で主に利用される CCD の他に、反射型回折格子 (RGS) が搭載されている。測定できるエネルギー帯域は 0.35-2.5 keV

で低エネルギー帯に特化しており、点源にしか適さないものの、分解能が 3.2 eV と非常によいことが特徴である。SN1987A は視直径が 1.7 秒角と XMM-Newton の PSF (Point Spread Function) より小さいため、RGS による解析に適している。我々は XMM-Newton 衛星で継続的に観測したデータのうち、最新 7 年分のデータを全て足し合わせて解析を行った。本研究では O VII および Ne IX の主要な 3 つの輝線 (forbidden, intercombination, resonance) に注目し、輝線の強度比がプラズマのパラメータになることを用いてプラズマ温度を推定するとともに、プラズマの物理状態について議論する。

1. R. Sturm, F. Haberl, B. Aschenbach, and G. Hasinger. High resolution X-ray spectroscopy of SN1987A: monitoring with XMM-Newton. *Astronomy and Astrophysics*

### 星間 c2 大型レーザーを用いた超新星残骸における無衝突衝撃波の生成実験 瀬井 柊人 (青山学院大学大学院 M2)

宇宙線の加速源については超新星残骸などの天体現象における無衝突衝撃波があげられるが、未だに理論的、観測的な解明には至っていない。そこで本研究では観測研究、理論研究に次ぐ第三の研究手法として実験室で磁化プラズマ中を伝搬する無衝突衝撃波を生成する実験を行った。大型レーザーを用いた無衝突衝撃波の実験では、アブレーション・プラズマはビアマン効果で磁化され、無衝突衝撃波生成までのタイムスケールを短くしている。本発表では、輻射流体シミュレーションの結果を用いたビアマン磁場の強度の見積もり、及び、プラズマ粒子シミュレーションを用いて無衝突衝撃波の生成過程について調べた結果と、これらの実験結果との比較について報告する。

1. Umeda, M., Yamazaki, R., et al. 2019, PoP

### 星間 c3 中性水素ガス衝突による星団形成の理論的研究 前田 龍之介 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M2)

銀河スケールにおける最大の星形成の要因は、Young Massive Cluster (YMC) と呼ばれる星団の形成である。ここで YMC とは質量が大きく若い ( $M > 10^4 M_{\odot}$ ;  $t_{\text{age}} < 100 \text{ Myr}$ ) 星団を指す。YMC の形成機構はその重要性とは裏腹に長年謎に包まれていたが、近年の観測で中性水素ガスの高速衝突による YMC 形成の可能性が示唆された (Fukui et al. 2017)。

本研究では上記の YMC 形成シナリオの理論的な側面を、自己重力・加熱冷却入りの MHD シミュレーションを行うことで検証する。今回はその理解の第一段階として”衝撃波で圧縮された領域は自己重力で束縛されたコンパクトな大質量ガス塊を作ることが可能か?”ということについて検証を行った。シミュレーションの結果、実際に ( $M \sim 10^4 M_{\odot}$ ,  $L \sim 4 \text{ pc}$ ) 程度

の cluster forming core が衝撃波後面で形成可能であることがわかった。また、ごく最近になって Fukui et al. (2017) をフォローアップした星団形成の観測 (Tsuge et al. 2019) が報告されてきているが、そういった観測にも本研究のモデルは応用できるものと考えている。

1. Fukui, Y., Tsuge, K., Sano, H., Kenji, B., Yozin, C., Tachihara, K. & Inoue, T. 2017, PASJ, 69L, 5F
2. Tsuge, K., Sano, H., Tachihara, K., Yozin, C., Bekki, K., Inoue, T., Mizuno, N., Kawamura, A., Onishi, T. & Fukui, Y. 2019, ApJ, 871, 44T

### 星間 c4 低金属環境における超音速星間乱流についての数値シミュレーション 中津川 大輝 (名古屋大学 理論宇宙物理学研究室 (Ta 研) M2)

星は宇宙を構成する最も基本的な要素であり、現在生まれている星は分子雲で形成されていることが知られている。本研究では、超音速の速度分散をもつ分子雲乱流が、金属量にどのように依存して発生するのかを調べている。

Koyama & Inutsuka (2002) で行われた現実的な星間媒質における加熱冷却を考慮した 2 次元の流体シミュレーションでは、衝撃波圧縮を受けた星間媒質内に多数の低温高密度のクランプが形成されることが示された。形成された低温高密度な分子雲クランプは超音速で高温低密度領域の中を動き回り、乱流を引き起こす。この超音速乱流の起源は、熱的不安定性を經由して形成されたクランプのランダム運動と考えられている。

加熱冷却は重要であり、冷却が効かない断熱ガス中の衝撃波伝搬のシミュレーションによれば乱流の速度分散は亜音速にとどまることが知られている (Inoue et al. 2013)。高温領域における冷却は水素原子の  $\text{Ly} - \alpha$  輝線の放射が主であるが、低温領域における冷却の機構は、炭素イオンをはじめとする金属原子の微細構造輝線放射が重要である。すなわち、低温高密度領域において、冷却がどの程度効くのかは金属量に依存する。ところが今までに行われた超音速乱流分子雲の形成シミュレーションは太陽近傍の金属量で行われたものがほとんどであり、金属量を変えて行われたものはほぼない。

そこで本講演では、低金属環境における超音速乱流について、コンピューターシミュレーションで調べた結果を紹介する。超音速乱流の起源や性質、金属量との関係についてを議論したいと考えている。

1. Koyama H. & Inutsuka S. 2002, ApJ, 564, L97
2. Inoue T. & Omukai K. 2015, ApJ, 805, 73
3. Inoue T. & Inutsuka S. 2012, ApJ, 759, 35

## 星間 c5 星形成における分子雲フィラメント構造の役割

柏木 頼我 (国立天文台 M1)

銀河の中には、星間物質のガスとダストが集まってできた星間雲が存在する。星間雲は密度が高く、星間物質の平均個数密度  $1\text{cm}^{-3}$  に対して  $10^2\sim 10^6\text{cm}^{-3}$  ほどある。なかでも、水素が水素分子として存在するような星間雲のことを分子雲と呼ぶ。分子雲のサイズは、数から数十 pc ほどであり、温度は 10K 程度、質量は太陽質量の数十倍から数千倍ほどである。分子雲は、数十万年から数百万年のタイムスケールで自己重力により、ゆっくりと収縮していき、恒星の元となる原始星を生み出す。その分子雲の中でも、特に密度が高くなった領域がフィラメントの様に存在している。これを分子雲フィラメントという。分子雲フィラメントの進化を考えると星形成を理解するのに重要であるという新たな考え方「フィラメントパラダイム」を紹介する。本ポスターは、これまでの分子雲フィラメントに関する研究をまとめた論文である André, Ph.et al.2013,in PROTOSTARS AND PLANETS VI, Eds. Henrik Beuther et al. (Tucson: University of Arizona Press),p.27 を元に、2009 年に打ち上げられた赤外線宇宙望遠鏡 *Herschel* の観測結果と、これまでの研究によって得られた分子雲フィラメントの物理的特徴や性質を紹介する。例えば、フィラメントの中心密度と温度の逆相関関係や、フィラメント同士が交差することによる大質量星の誕生などがある。これらの分子雲フィラメントで起きる現象が星形成を理解するにおいて重要な役割を果たしていることがわかった。このポスター発表を通して、星形成における分子雲フィラメントの役割の理解を目指す。

1. André, Ph.et al.2013,in PROTOSTARS AND PLANETS VI, Eds. Henrik Beuther et al. (Tucson: University of Arizona Press),p.27

## 星間 c6 高出力レーザーを用いた磁化プラズマ中の無衝突衝撃波生成実験

杉山 慧 (青山学院大学大学院 M1)

宇宙には、宇宙線と呼ばれる高エネルギーの放射線が存在する。超新星残骸や活動銀河核、太陽フレアなどの衝撃波面では荷電粒子が相対論的な速度にまで加速され、それが宇宙線の起源になっていると考えられている。また、 $10^{15.5}\text{eV}$  程度までのエネルギーを持つ高エネルギー宇宙線は我々の天の川銀河内で加速されていると考えられており、加速起源として最も有力視されているのが、超新星爆発のときの噴出物である超新星残骸による無衝突衝撃波である。無衝突衝撃波とは、粒子の平均自由行程が衝撃波遷移層の厚さに比べて非常に長い為に粒子同士の衝突がほとんど起こらないプラズマ(無衝突プラズマ)中で起こる衝撃波のことである。粒子の加速機構には、衝撃波遷移層を幾度となく行き来することでエネルギーを得るフェルミ加

速というものがあるが、最初に加速過程に注入される粒子の予備的加速のメカニズムなど未解決問題が多く、多数の理論研究がなされているにも関わらず、実験的検証がない。そこで本研究では、観測研究、シミュレーション研究に次ぐ第三の研究方法として、大型の高出力レーザーを用いた実験室宇宙物理学という新たな研究分野に着目し、地上の実験室で無衝突衝撃波を生成し、その精密測定を通じて粒子加速の理解に迫ることを目指す。本実験は昨年で 5 年目となり、昨年度も例年同様、大阪大学レーザー科学研究所の激光 XII 号レーザーを用いて実験を行った。また、3D-CAD を用いて実験装置を設計し、磁場発生装置のアライメントを行った。また、雰囲気ガスとして、過去の実験でレーザーによって光電離することが確認出来ている窒素を使用した。ターゲットとして厚さ 2 mm と面積  $4\text{mm} \times 6\text{mm}$  のアルミニウムを採用し、レーザービーム数 4 本、雰囲気ガスを窒素ガスとすることで、光電離した窒素プラズマを、噴出するアルミニウムプラズマが押し、窒素プラズマ中に無衝突衝撃波を形成する。また、昨年度にして初めて外部磁場 1.5T を定常的にかけた実験を行うことに成功した。本発表では、昨年度の実験結果を発表する。

1. 坂下 志郎・池内 了 共著:「宇宙流体力学」(培風館)(1996)
2. 観山 正見・野本 憲一・二間瀬 敏史 共著:「天体物理学の基 II」(日本評論社)(2015)

## 星間 c7 銀河系円盤部における高速度分子ガス 横塚 弘樹 (慶應義塾大学基礎理工学専攻物理学専修 岡研究室 M1)

銀河系中心核 Sgr A\*から 300pc 以内の領域には大量の分子ガスが集中しており、その領域は中心分子層 (CMZ) と呼ばれている。CMZ には、高速度コンパクト雲 (high velocity compact cloud;HVCC) と呼ばれる空間的にコンパクト ( $d < 10\text{pc}$ ) かつ特に広い速度幅 ( $\Delta V \geq 50\text{km/s}$ ) を示す特異分子雲が多数存在する。膨張運動を伴う球殻状もしくは円弧状の分子ガス構造に付随し、超新星爆発のような局所的な爆発現象に起因して駆動された可能性がある。しかしながら、HVCC の多くは他波長領域に対応天体を持たない。慶應義塾大学岡研究室では孤立ブラックホールが突入する事により形成された可能性があると提唱している。HVCC は CMZ 以外の領域での報告例は少ない。この事から今回、銀河系円盤部における高速度分子ガス探査を野辺山 45m 電波望遠鏡から得た CO J=1-0 銀河面データを用いて行った。その結果、速度幅を有する分子雲を約 60 個発見した。しかしながら、そのほとんどは対応天体があり原始星起源であると考えている。その中で広い速度幅 ( $\Delta V \leq 30\text{km/s}$ ) を有し対応天体を伴わないものを一例発見した。現段階では、アウトフロー、超新星爆発における相互作用、分子雲衝突の可能性は低いと研究成果から分かっている。今後の展望としては、ブラックホール突入シナリオを含め新たなシナリオを吟味し議

論していく。