

伴星解明に向けた Ia 型超新星残骸 Kepler の X 線分光解析

穴澤 萌衣 (京都大学 理学研究科 M1)

Kepler の超新星 (Supernova;SN) は 1604 年に銀河系内で最後に観測された Ia 型 SN である。Ia 型 SN は白色矮星がチャンドラセカール質量を超えることで爆発するが、質量を増加させる機構には主に 2 つのモデルがある。1 つ目は白色矮星と伴星の連星系において伴星の外層が星周物質 (Circumstellar Material;CSM) として白色矮星に質量降着する single-degenerate(SD) モデル、2 つ目は白色矮星連星が融合する double-degenerate(DD) モデルである。Kepler の超新星残骸から CSM 起源の放射が観測されたことから、その起源は SD モデルであると考えられている [1]。Katsuda et al.(2015) では、CSM の質量から求めた質量損失率が漸近巨星分枝 (Asymptotic Giant Branch;AGB) 星とほとんど同じであるため、伴星が AGB 星であると示唆された。加えて Kasuga et al.(2021) では CSM の北西部分が観測者方向に大きく青方偏移していることが観測され、それが AGB 星が進行方向に発生する Bow shock の運動に従うため、同様に AGB 星が示唆された [2]。しかし SN 後も残るはずの伴星が見つかっていないなど、確実な証拠は得られていない。

そこで我々は Kepler's SN の伴星の正体を探るべく、XMM-Newton 衛星に搭載されている反射回折分光器 (Reflection Grating Spectrometer;RGS) を用いて CSM の元素組成を調べた。CCD の分解能では分離できなかった N や O の輝線が、RGS では解析可能である [3]。先行研究 [1] では 2001 年のデータのみで N/H 比について言及していたのに対し、我々は 2020 年に観測された 2 つのデータを加えて N/H 比ならびに O/H 比について解析を行った。本講演ではその解析結果を報告し、Kepler's SN の伴星について議論する。

1. Katsuda et al., ApJ, vol808, 14, 2015
2. Kasuga et al., ApJ, vol915, 11, 2021
3. Narita et al., Accepted for publication in ApJ

系外惑星探査における恒星の活動性と視線速度測定精度の関係

池田 圭吾 (東京工業大学 地球惑星科学系 佐藤研究室 D2)

太陽系外惑星探査において視線速度法は現在主流の探査方法であり、質量や周期など惑星を特徴づけるために重要なパラメータを測定することのできる探査方法である。一方、系外惑星探査において注目されているターゲットとしてはハビタブルゾーン内の地球型惑星の発見、探査が期待できる M 型星や惑星形成とも関連がある若い恒星が挙げられる。これらの重要ターゲットに対し視線速度の解析において解決すべき課題として恒星の高い活動性が挙げられる。例えば、West et al. (2015) で

は M 型星の中では晩期になるほど活動性が高いものが増える傾向にあることが報告されている。また、恒星活動が視線速度測定に与える影響の一つとして黒点の磁場による影響が挙げられ、Zeeman 効果によるラインプロファイルの変形が視線速度のシフトを生むことがわかっている [2]。

本研究においては bisector や $H\alpha$ 線などの恒星活動を評価する指標 (activity indicator) とラインプロファイルの変動についての相関を調査し、将来的には視線速度の測定において恒星活動の影響を反映できるモデル構築を目指している。現在は岡山天体物理観測所の 188cm 望遠鏡に搭載された可視高分散分光器 HIDES によって過去に取得されたデータから活動性の高い天体に対して activity indicator と視線速度相関について調査を進めている。本発表では現在の進捗状況についての報告と将来の方針について議論を行う予定である。

1. West, Andrew A., Weisenburger, Kolby L., Irwin, Jonathan et al. The Astrophysical Journal, Volume 812, Issue 1, article id. 3, 12 pp, 2015
2. Reiners, A., Shulyak, D., Anglada-Escudé, G et al. Astronomy & Astrophysics, Volume 552, id.A103, 11 pp. 2013

マイクロクエーサー SS433 によるジェットと星間ダストの相互作用

石川 竜巳 (名古屋大学 M1)

マイクロクエーサーは高密度天体と恒星の連星系で、伴星からの質量降着によって高密度天体に降着円盤が形成され、相対論的な高速のジェットが噴き出している高エネルギー天体である [1]。

W50/SS433 はマイクロクエーサー SS433 とその周囲を取り囲む超新星残骸 W50 から成る複合天体である。W50/SS433 はわし座の方向に存在し、地球から 5.5 kpc の距離に位置しているとされている [2]。SS433 は歳差運動によってねじれた形状を持った [2]、0.26c 程度の速度のジェットを放っている [3]。このジェットは W50 外側まで伸びているため、1.45 GHz の電波連続波はジェットの 2 方向に引き伸ばされた構造をしている [4]。

我々の研究目的は SS433 から放出されるジェットと周囲の星間物質の相互作用に起こる現象を明らかにすることである。本発表では星間物質の中でも特に星間ダストとジェットの相互作用に注目する。分子雲については既に先行研究 [6], [7] にて 4 つの分子雲が発見され、ジェットと相互作用を起こしていることが確認されている。同様に W50/SS433 に付随する星間ダストもジェットから何かしらの相互作用を受け、星間ダストの加熱や破壊、PAH の生成などの現象が起こっていると考えられるが、詳細な議論がこれまでに行われてきていない。

我々は同領域の星間ダストの温度などの物理状態の、遠赤外線から中間赤外線までの観測データを用いた調査を進めている。WISE Band3 (12 μm), Band4 (22 μm) に加え AKARI

WideS ($90 \mu\text{m}$) と N160 ($160 \mu\text{m}$) にて星間ダストだと思われる広がった赤外線放射と、一部に集中した比較的強い赤外線放射を確認した。本発表ではこの領域の分析と今後の発展について論じる。

1. Mirabel & Rodoriguez, *Nature*, 392, 6677, 673, 1998
2. Blundell & Bowler, *ApJL*, 616, 2, 159, 2004
3. Margon et al., *ApJ*, 281, 313, 1983
4. Dubner et al., *AJ*, 116, 4, 1842, 1998
5. Marshall et al., *ApJ*, 564, 2, 941, 2002
6. Lui et al., *ApJ*, 892, 2, 143, 14, 2020
7. Yamamoto et al., *PASJ*, 74, 3, 493, 2022

急速降着期における原始星系円盤の分裂条件の3次元数値パラメータ研究 石田 怜士 (東北大学 M1)

星は高密度なガス雲が重力崩壊することで形成されるが、このときガスは角運動量を持つため、原始星の周りには円盤が形成される。円盤が重力的に不安定となると円盤分裂が起きると考えられており、円盤から複数の星が形成される可能性がある。したがって円盤分裂の解明は星の初期質量関数の解明にもつながるものだが、どのような円盤がどのような星に進化するかは未解決の問題である。また近年、高感度・高分解能の電波・近赤外の観測により、星周円盤の渦巻構造や分裂の様子の観測がなされており、この分野のさらなる進展が期待される [1][2]。

円盤の不安定性には自己重力不安定性 (GI) が重要である。そこで本講演では GI による円盤分裂の基礎的な研究である Kratter et al. (2010) という論文をレビューする [3]。この論文は GI が駆動する降着円盤の最終的な進化の違いを、円盤の温度と円盤に流入する角運動量に対応する2つのパラメータを用いて、3次元流体シミュレーションにより調べたものである。その結果、(1) 重力トルクは高い降着率で中心星へ物質を降着させることができる (2) 円盤への降着率が原始星への降着率の数倍までは、円盤は安定である (3) 円盤質量が中心星の質量を超えると分裂が起こる、ということがわかった。これらの結果は自身の研究である初代星形成に適用することで、大質量星を作る降着率がより高い環境では円盤分裂による集団星形成が重要となることが期待される。

1. Benisty M. et al., *A&A*, 578, L6, 2015
2. Tobin, J., Kratter, K., Persson, M. et al. *Nature* 538, 483–486, 2016
3. Kratter K. M. et al., *ApJ*, 708, 1585, 2010

星形成時のアウトフローが初期質量関数に与える影響

伊藤 茉那 (東北大学 理学研究科 天文学専攻 M1)

恒星の初期質量関数 (以下 IMF) は、多くの環境で普遍的だが、その起源は未だ解明されていない。星形成のメカニズムを理解する上で、観測から得られている IMF を再現できるような理論を構築することは必要不可欠である。

星形成過程で IMF に影響を与える機構の一つに、アウトフローがある。近年、分子雲コアの質量分布関数が IMF と類似しており、ピークの質量の比較から星形成効率が 20% – 40% であると見積もられた [2]。このことから、分子雲コアの形成機構は IMF と密接に関係していると考えられる。また、分子雲コアの質量のうち 80% – 60% は星にならずに進化過程で吹き飛ばされていると考えられるため、ガスを吹き飛ばすアウトフローは星の質量の決定において重要な機構である。

本講演では Machida & Matsumoto (2012) をレビューし、アウトフローが IMF に与える影響について議論する。この論文では、アウトフローの誕生から終焉までの約 $10^3 - 10^5$ 年に渡る進化過程を、様々な質量の分子雲コアに対して、磁気流体シミュレーションによって調べている。その結果、アウトフローによって分子雲コア質量の 10 – 50% が星間空間に放出され、観測で示唆される ~ 50% の星形成効率を再現することができた。また、初期の分子雲質量が大きいほど、アウトフローによる質量放出率も大きくなることがわかった。これらのことから、観測から得られた星形成効率は、アウトフローによる質量放出で説明できると考えられる。

恒星の IMF に加えて、自身の研究分野である初代星の IMF についても、近年盛んに研究されている。本講演では、アウトフローが初代星形成過程に与える影響についても議論する。

1. Machida M. N., Matsumoto T., 2012, *MNRAS*, 421, 588
2. Andre P. et al., 2010, *A&A*, 518, L102

N 体シミュレーションにおける連星計算の困難 岩倉 龍太郎 (神戸大学理学研究科惑星学専攻 M1)

球状星団は、主に銀河ハローに位置する天体で、 10^6 個ほどの恒星からなる天体である。星団は中心部へ向かうほど密度が高くなっており、ブラックホールなどのコンパクト天体が近接作用して連星形成・合体すると、重力波を放出する。そのため近年では、重力波源として注目されている天体である。

球状星団の力学進化の研究は、N 体シミュレーションを用いて行われるが、すべての星の相互作用を直接計算するのはあまりにも時間がかかるため、様々な計算上の工夫が考案されている。その中でも、現状最新の星団向け N 体計算コードは、[1] の PeTar である。PeTar には、連星計算を効率的に行うためのモジュール、Slow-down algorithmic regularization (SDAR) [2] が組み込まれており、特に階層的三体について従来のコードよりも数桁早く計算することができる。しかし、SDAR を適用するには、連星が安定性条件を満たしている可能性がある。特

に、安定・不安定境界にあるものに関しては、系に比較的長い時間とどまるのにもかかわらず、近似的な手法が使えない事態に陥り、必要計算ステップが非常に多くなってしまふ。また、連星計算は並列化を行うこともできないため、やはり将来的な手法の改良が望まれている。

我々は、SDAR を適用できる境界を調べるため、 $N = 9012$ の等質量 King モデルの力学進化をシミュレーションした。結果、1 万粒子に満たない場合でも、SDAR で扱えない階層的三体が普遍的に形成されることがわかった。本発表では、SDAR と PeTar で用いられている近似的な手法と、階層的三体系の安定性条件についてレビューする。また、シミュレーション結果に基づいて、安定・不安定境界に存在する連星に SDAR を適用できる可能性について議論する。

1. Wang, L., Iwasawa, M., Nitadori K. and Makino, J. (2020), PETAR: a high-performance N -body code for modelling massive collisional stellar systems, *MNRAS*, 497(1), 536-555.
2. Wang, L., Nitadori, K., Makino, J. (2020) , A slow-down time-transformed symplectic integrator for solving the few-body problem, *MNRAS*, 493(3), 2298-2411 .

原始星アウトフローの解析的研究と近年の高解像度観測の比較

大村 充輝 (九州大学理学府地球惑星科学専攻 M1)

原始星アウトフロー・ジェットは宇宙ジェットの一つであり、原始星とその星周円盤を貫く磁場によって両極方向に駆動すると考えられており、星形成における角運動量問題を解決する上で重要な現象の 1 つである。磁場の存在がアウトフローの駆動において重要であることは広く理解されているが、広角の低速アウトフローとコリメートされた高速ジェットの詳細な駆動メカニズムについては長く議論されており、解析的なメカニズムの提案だけでなく複数の手法の数値シミュレーションによる解明が試みられてきた。一方、得られる物理量が限られた観測結果から駆動メカニズムについて議論するには、パラメーターの自由度が高いシミュレーション結果から最も近いモデルを探すよりも、適当なモデルの解との比較が容易である。そのため、観測との比較のために重要な解に対して理解を深める必要がある。

Mestel (1968) において示された磁場を持つ星からの磁気遠心力により駆動する星風と同様に、ケプラー回転する降着円盤においても自己相似解として得られること、また同時に角運動量を外部へ輸送することが明らかとなった (Blandford and Payne 1982)。磁気遠心力によって円盤から加速しながらアウトフローが駆動するモデルに基づいて、流線に沿って比エネルギーと比角運動量が保存することを用いて駆動半径を推定する関係式を導出した (Anderson et al. 2003)。これは DG Tau に対する観測結果 (Bacciotti et al. 2002) だけでなく、近年のア

ウトフローにも適用されている。これらの論文について、観測研究の立場からレビューを行う。

また、Anderson et al.(2003) を適用し Disk wind によるアウトフロー駆動を支持する新しい観測例として、ALMA アークデータを用いた HH270mms1-A からのアウトフローについての解析結果も報告する。

地球の水における非理想 MHD 効果の重要性について

大山 航 (京都大学大学院理学研究科 M1)

地球の水の起源は未解明で、系外惑星のハビタビリティを考える上でも重要な課題である。地球の水の存在量を考える上で地球形成時の原始惑星系円盤の温度構造は重要である。特に円盤で水が凝固する、温度約 160 から 170K となる位置 (スノーライン) の外側では円盤において水は氷の状態が多量にある。そのため形成時にスノーラインの外側にあれば氷が集積し、地球の水の存在量は多くなる。従来モデルでは電離度が十分高いとする理想 MHD(電磁流体力学) で考えてきた。円盤温度では主に磁場と電離ガスが結合した乱流による粘性加熱と輻射冷却の釣り合いで決まると考えられてきた。円盤ガスの減少に伴って粘性加熱が弱まり、スノーラインは時間が経つにつれ内側に移動する。ただし地球形成時には 1au より外側にあると考えられ、氷の集積は起こらないとされてきた。

しかし、これまで軽視されてきた非理想 MHD 効果を入れた full3D の数値シミュレーションの結果、電離度が低くガスと磁場の結合が弱いことが分かった。[1] この場合理想 MHD モデルに比べ粘性加熱の効率が悪く従来の想定より円盤全体が低温になることが分かった。[2]

本発表では [3] をレビューし、非理想 MHD 効果を取り入れた場合のスノーラインについて議論する。[2] では円盤の定常状態を扱った時間発展については考えなかった。[3] では 1D 解析モデルに円盤垂直方向の電離度構造や非理想 MHD 効果を入れ準定常的に解き、動径方向の温度構造の時間発展を求めた。その結果、スノーラインが 1au に到達する時期が一般的に考えられている地球の形成時期より早くなった。この結果は地球形成時に氷の集積を示唆し、現実の地球と矛盾する。形成時期や位置などにおいて地球の形成シナリオの見直しを迫っている。

1. Xue-Ning Bai, ApJ, 772, 96, 2013
2. Shoji Mori et al, ApJ, 872, 98, 2019
3. Shoji Mori et al, ApJ, 916, 72, 2021

低金属量銀河小マゼラン雲における大質量原始星の観測:原始星に付随するフィラメント状分子雲の性質 國年 悠里 (大阪公立大学大学院 電波天文学研究室 M1)

小マゼラン雲は最も近い星形成銀河の 1 つで、金属量が太陽系の約 0.2 倍程度であることから金属量が低い銀河として知ら

れている。ここで、金属量とは水素とヘリウムよりも重い元素の量を指し、星の形成過程に影響を与えるパラメータの1つである。小マゼラン雲は低金属量環境下における星間物質の性質や星形成を探る上で重要な天体である。これまでの銀河系や大マゼラン雲（金属量が太陽系の約0.5倍程度）における研究より、フィラメント状分子雲では活発な星形成が起こることが知られており [1][2]、より金属量の低い小マゼラン雲でフィラメント状分子雲の構造の有無を明らかにするなど、分子雲の性質を調べることが星形成活動の金属量依存性を調べる上で一つの重要な課題であった。

本講演では小マゼラン雲における6つの大質量原始星のALMAデータより、0.87mm帯の連続波及び ^{12}CO 輝線の解析結果を紹介する。空間分解能は $0.''34$ ($\sim 0.1\text{pc}$)であり、銀河系の研究で示されているようなフィラメント状分子雲の有無を判別することが十分可能である。0.87mm帯の連続波は原始星周辺の0.4pc程度のコンパクトな領域でのみ検出され、密度 $\sim 10^6\text{cm}^{-3}$ の分子雲コア領域のみをトレースしている。解析結果より、 ^{12}CO 輝線はそれら分子雲コアに接続するように長さ1-10pc程度のフィラメント状の構造を示すことが分かった。 ^{12}CO 輝線強度より求めたそれぞれの総質量は $\sim 10^4 M_{\odot}$ 程度で、個別のフィラメントの物理量に関しては、線質量が数 $100 M_{\odot}\text{pc}^{-1}$ と求まり、これは銀河系の大質量星形成領域で見られるものと同程度である。

1. Onishi, T., et al., ApJ, 502, 296, 1998
2. Tokuda, K., et al., ApJ, 886, 15, 2019

X線天文衛星すざくによる超新星残骸3C400.2のプラズマ状態と近傍X線未同定天体の調査 小沼 将天 (近畿大学 M2)

超新星残骸(SNR)とは、超新星爆発による衝撃波で星間物質(ISM)やイジェクタが加熱され高温のプラズマ状態になったものである。SNRの多くは電離過程が優勢なプラズマ(IP)状態であり、時間経過とともに電離平衡状態(CIE)になる。近年、いくつかのSNRで再結合過程が優勢なプラズマ(RP)状態が発見された。3C400.2は先行研究でRPが存在すると報告されている([1], [2])。我々はすざくのデータを用いて、バックグラウンドを丁寧に評価した上で3C400.2のプラズマ状態を調査した。その結果、ISM由来の低温のCIEプラズマと、イジェクタ由来の高温のIPの2成分で説明できることを見出した(小沼他, 日本天文学会2022年秋季年会Q37a)。さらに我々は、X線で特に明るい北西領域と、その周囲の比較的暗い領域に分けて解析を行った。各領域のプラズマは、SNR全体と同様に、ISM由来の低温のCIEプラズマとイジェクタ由来の高温のIPの2成分で説明できた。電子温度は、北西領域の方が高い傾向にある一方、アバundanceは暗い領域の方が高い傾向が見られた。加えて、3C400.2の西側にX線未同定天体を検出した。そのスペクトルには中心エネルギーが4.4keVの輝線が

付随していた(有意度 2.8σ)。この輝線を赤方偏移した鉄輝線と仮定し、X線未同定天体が銀河団あるいは活動銀河核である可能性を議論した。

1. Broersen, S., & Vink, J. 2015, MNRAS, 446, 3885
2. Ergin, T., et al., 2017, ApJ, 842, 22

JWSTが検出した系外銀河の泡構造の起源の研究 小野川 絢心 (名古屋大学 M1)

最新の宇宙望遠鏡であるJWSTによる観測で近傍の系外円盤銀河の詳細な構造が明らかにされつつある。その中の1つは、Grand-DesignSpiralGalaxyの渦状腕周辺が泡状の構造で埋め尽くされていることである。このBubble構造ともいえるべき特徴は主にJWSTによる波長 $7.7\mu\text{m}$ や $10\mu\text{m}$ の赤外線観測マップで顕著であり、PAHと呼ばれる有機高分子の輝線だと解釈されつつあるが、その妥当性はまだ調査する必要がある。

一方、銀河系内の星形成活動を理解するための研究において上記と同様の重なりあうBubble構造が分子雲形成の主要な過程であることが提案されていた。また、これらのBubble構造の表面にはFilament状の分子が多数形成され、それが星形成につながるということが理解されている。そこで、本研究では、Bubble構造の起源を探り、銀河系内の分子雲形成理論が系外円盤銀河にどのように適用されるかを検証する。具体的には、Bubble構造を形成すると考えられる1.膨張する電離領域や2.超新星残骸が中間赤外線の観測結果を説明できるかどうかを調べる。そのためには、ダストやPAHの破壊及び輻射冷却を含めた膨張するBubbleの数値計算を行う。

講演では、背景となる事柄を整理し、数値計算結果を予想、解釈することを試みる。

高金属量mid-M型星をトランジットする短周期巨大惑星TOI-519bの質量決定 蔭谷 泰希 (東京大学 博士1年)

短周期巨大惑星形成のためには、主星質量と主星金属量が重要であるとされており、質量の小さいM型星周りでの形成は非常に困難であると考えられてきた[1,2]。しかしながら、2018年に打ち上げられたトランジット系外惑星探索衛星TESSの活躍により、近年M型星周りでも徐々にその存在が確認され始めている。短周期巨大惑星の形成過程を解明するためには、惑星パラメータのみならず、主星に関するパラメータも明らかにしていく必要がある。

TOI-519bはTESSと地上望遠鏡による観測からM型星周りを短周期で公転する木星サイズの天体であることが確認されている[3]。しかしながら、質量に関する制限が弱く、この天体が巨大惑星か褐色矮星かを判断するためには視線速度観測を用いたより厳しい質量の制約が不可欠な状況であった。

本研究では、すばる望遠鏡の近赤外高分散分光装置IRDを用

いたインテンシブ観測の中で TOI-519b の視線速度観測を行った。この観測から質量が木星の半分程度であることを発見し、この天体が間違いなく巨大惑星であると同定した。また、IRDに加え、近赤外中分散分光装置 IRTF/SpEx を用いた分光観測から主星半径、質量、有効温度、金属量を推定した。これらの結果 TOI-519 は短周期巨大惑星を持つ恒星の中で最も温度が低く、質量が小さいことを発見した。

本講演では質量決定までの解析結果と主星の特徴を考慮した惑星形成のシナリオ、そしてこの系を含めた短周期巨大惑星を持つ惑星系の特徴について議論を行う。

1. Ida & Lin, ApJ, 626, 1045, 2005
2. Burn et al., A&A, 656, 26, 2021
3. Parviainen et al., A&A, 645, 12, 2021

NuSTAR を用いた RCW86 北東部の広帯域観測 加藤 辰明 (東京大学 M1)

超新星残骸の衝撃波は宇宙線加速源の有力な候補である。しかし、どのような環境で宇宙線がより高エネルギーまで加速されるかといった定量的問題はまだ解決に至っていない。衝撃波が低密度領域を進む場合減速が起こらず大きい衝撃波速度が保たれるため、加速最高エネルギーが高くなると考えられている [1]。他方では高密度の領域に衝撃波が突入した場合に、乱流が生じ、磁場が強まることで効率的な加速が行われるモデルも提唱されている [2]。

SN 185 の超新星残骸である RCW 86 には熱的 X 線を発する部分、非熱的シンクロトロン X 線を発する部分の両方が存在することから、宇宙線加速が起こる環境を調べるのにふさわしい天体である。特に北東部は分子雲と相互作用する領域としない領域が隣接し [3] 衝撃波速度も場所ごとに急激に変わる [4] 興味深い領域であるにも関わらず、加速電子からのシンクロトロン放射の広帯域 X 線スペクトルの研究は今まででなかった。そこで我々は硬 X 線で撮像分光が可能な NuSTAR で RCW86 の北東領域を 150 ks 観測した。その結果、10–20 keV の硬 X 線を初めて有意に検出した。本講演では、硬 X 線の場所依存や衝撃波速度との関係などについて議論する。

1. V. N. Zirakashvili, and F. Aharonian, Astronomy & Astrophysics, 465.3, 695-702, 2007
2. T. Inoue, Proceedings of the International Astronomical Union, 7.S279, 335-336, 2011
3. H. Sano, et al., Journal of High Energy Astrophysics, 15, 1-18, 2017
4. H. Yamaguchi, et al., The Astrophysical Journal Letters, 820.1, L3, 2016

レプリカ交換法を用いた系外惑星観測の自動スケ ジュールングアルゴリズムの開発 河合 優悟 (東京大学 M2)

太陽系外惑星は 1995 年以来、5,000 個以上発見されており、その候補も同じく 5,000 個以上発見されている。これらは特に系外惑星探査衛星 Kepler や、Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) の宇宙望遠鏡サーベイにより発見されたものであるが、惑星候補が真に惑星であるかを知るためには、地上からの追加観測が不可欠である。さらに惑星候補は Gaia 宇宙望遠鏡などのサーベイからも今後 10 年で数万個以上増える予想されている [1]。よって、地上でどれだけ効率的な追加観測が行えるかは、惑星探査自体の効率を左右する。

本研究では、数千個の惑星候補から、ある日の観測に最適な天体を自動で選択するアルゴリズムを開発している。現在所属する研究室では、MuSCAT2 [2] という撮像装置を用い、地上からの惑星候補の追加観測を年間 300 夜以上行っている。現状、天体はその日観測担当者が手動で選定するが、これには多大な時間を要する上、担当者間での再現性に欠くという問題がある。ここで、選定時に考慮する天体の高度、優先度や、月との距離、などの複合的な要素を一つのコスト関数として表現し、これを最小化することで選定を自動化するという着想を得た。現在はアルゴリズムの試運転を行なっている。

本公演では、まず候補天体が増え続けている系外惑星探査の現状と展望、本研究に関する具体的な着想について紹介し、その後今回コスト関数の最小化に用いたレプリカ交換法 [3] と呼ばれる手法を紹介する。また、このアルゴリズムの現在のパフォーマンスについても述べる。今後この天体の自動選定アルゴリズムが実用化されれば、所属する研究室の観測装置や系外惑星観測だけでなく、異なる装置や分野の観測スケジュールにも応用可能であると考えられる。

1. Perryman et al., ApJ, 797, 14, 2014
2. Narita et al, JATIS, 5, 1, 2018
3. Hukushima, CPC, 147, 1-2, 2002

水の再生反応の考慮による M 型星周りの陸生惑星 における暴走温室状態中の水損失量への新たな制約 川村 陽 (東北大学 M1)

私たちは、G 型星周りの惑星に比べて統計的に数が多く、観測が簡単な現在 M 型星周りの Habitable Zone (HZ) 内に分布する陸生惑星が地球のような温暖湿潤な環境を保有している可能性に期待を寄せている。その一方で、このような惑星は、M 型星の非常に長い前期主系列段階に伴って、非常に長い期間暴走温室状態と呼ばれる状態にあったと考えられている。

惑星が暴走温室状態にある場合、水蒸気に富んだ大気が形成され、さらに、恒星からの強力な UV 放射によって、大規模な水の光解離およびそれによって生じた水素の宇宙空間への大規模な散逸が生じると考えられている。このメカニズムによって、現在 M 型星周りの HZ 内に分布する陸生惑星は初期の暴走温室状態の期間中に大規模な水の損失を経験したと考えられている。

本研究では、水蒸気大気中での光化学反応が水損失に及ぼす影響を見積もるために、暴走温室状態にある惑星の水蒸気大気を1次元光化学モデルによって表現した。

恒星風を考慮した星間物質 (ISM) の降着現象 倉田 昂季 (甲南大学 自然科学研究科物理学専攻 M2)

初代星と呼ばれる宇宙最初期に生まれた星は、現在まで発見されていない。初代星が未発見の理由については、現在まで生き残れるほど長寿命 (小質量) の初代星が生まれなかったと考える説と、小質量初代星は誕生したものの、その後星間物質を降着して表面对流層が重元素に汚染され、金属欠乏星として現在観測されているという説がある。

恒星への星間物質の降着は、星風によって阻害されるためその効果を詳細に調べる必要がある。これまでの研究では星風・降着流ともに電離し、磁場との結合によって流体近似によって降着の可否が議論されてきた。それらの研究では星風と降着流のラム圧の大小関係から降着条件を求め、結論として初代星を金属欠乏星程度まで星間物質の重元素で汚染することはできないことがわかった [1]。しかしながら、例えば太陽に降着する降着流でも電離度はそれほど高くはない。さらに高密度の星間ガスは平均的により低い電離度をもつ。中性成分は平均自由行程が十分長いために星風のラム圧を受けず星風をすり抜けてずっと星の近傍まで到達する。ただしこの中性粒子の流れは星に極めて接近すると、星の紫外線によって電離される。するとイオンとなって磁場と結合し、星風の運動量を受け取る。結果として星間ガスの中性降着流は星のより近くで星風と押し合うことになる。

この研究では与えられた星間降着流の条件 (ガス密度、電離度) で上記の中性流を考慮した場合、定常的なパーカー風の解が構成できるかを調べた。その結果、確かに太陽風のパラメーターでは中性流の効果は非常に小さいが、星間ガスの密度がそれよりも数倍大きくなるだけで、定常解が存在しなくなることが明らかとなった。この結果は中性降着流を考慮することによって比較的容易に星風が押しつぶされ、これまで考えられてきたよりも、より低密度の星間ガスが降着できることを示唆している。

1. Shuta J. Tanaka et al., The Astrophysical Journal, 844:137, 11pp, 2017 August 1

星間衝撃波により形成される圧縮層の化学進化 小道 雄斗 (東京大学 M2)

分子雲初期段階に相当する diffuse cloud では、炭素鎖分子や窒素系分子など多様な分子種が検出されている [1]。星間分子の存在度は現在及び過去の物理状態を反映する。つまり、diffuse cloud の化学組成を理解することは、分子雲形成初期の物理化学進化過程の解明に繋がる。

星間分子の形成過程は、ガス雲の典型的な物理パラメータ

(密度、温度、 A_V) の元で化学反応ネットワーク計算を行うことで調べられてきた [2]。しかし、実際のガス雲では非定常な物理進化過程を経験しながら分子の形成が進むため、当モデルは過度に単純化されている。

一方、分子雲形成初期の物理進化に関しては、3次元の磁気流体計算により、星間衝撃波に伴う原子ガスの圧縮による分子雲進化過程が盛んに研究されてきた [3]。その結果、星間磁場と衝撃波のなす角によりガス圧縮の効率が決まることなどが分かっている。しかし、ガス冷却に重要な化学種の組成進化を含む先行研究もある一方で、実際に観測される多様な分子種を考慮するには未だ至っていない。

以上を受けて、本研究では2段階に分けた数値計算を行い、分子雲形成初期における化学進化過程を調べた。まず、3次元の磁気流体計算により、磁場と衝撃波のなす角をパラメータとして、衝撃波により形成される圧縮層の平均的な物理進化過程を求めた。その後、得られた物理進化過程に沿って化学反応ネットワーク計算を行い、圧縮層における星間分子の形成過程を求めた。その結果、炭素鎖分子存在度は圧縮層の密度を強く反映することが分かった。さらに、磁場と衝撃波のなす角が小さく、効率的に圧縮が起こる場合の炭素鎖分子存在度は、diffuse cloud の観測で得られる結果と整合的であった。このことは、diffuse cloud は過去に強い圧縮を経験し、高密度な環境にある可能性を示唆する。

1. Godard et al., A&A, 520, A20, 2010
2. Harada et al., ApJ, 871, 238, 2019
3. Iwasaki et al., ApJ, 873, 6, 2019

位置依存型 Richardson-Lucy デコンボリューションを用いた Chandra 衛星の超新星残骸カシオペア座 A の X 線時間変動解析 酒井 優輔 (立教大学 M2)

高エネルギー現象の空間的広がりや時間発展を研究する上で、高空間分解能の X 線観測は重要である。X 線観測衛星 Chandra は、X 線衛星の中で一番の空間角度分解能 0.5 秒角を誇り、これまでに超新星残骸の時間発展など、様々な高エネルギー現象を明らかにしてきた。しかし、Chandra の観測画像は、主に光学系の収差により光軸から離れるほどが像が畳み込まれて観測され、軸外では桁で角度分解能が落ちているため、観測画像全体での統一的な解析が困難であった。その畳み込みの度合いは、点源を観測したときの像の広がり関数 (point-spread function; PSF) で表される。この PSF を考慮するための一つの手法がデコンボリューション法であり、天文学では特に Richardson-Lucy deconvolution (RL 法) [1],[2] がよく使われる。RL 法は、観測画像に対し、シミュレーションで得た 1 つの PSF を用いて真の画像を推定する手法である。したがって、Chandra のように場所毎に PSF が異なる場合、特に観測画像全体での適用は困難であった。そこで、Chandra の

観測画像全体に適用できるように、RL法をベースにした位置毎の複数のPSFを用いたデコンボリューション法を開発した。その手法をChandra衛星の観測した超新星残骸カシオペア座の2000年から2019年の約20年の観測の全領域に適用し、解析した結果を報告する。

1. Richardson, W. H. 1972, JoSA, 62, 55
2. Lucy, L. B. 1974, AJ, 79, 745

X線天文衛星「すざく」を用いた超新星残骸白鳥座ループ「西の破れ」領域と「南の破れ」領域の観測 佐藤 愛 (埼玉大学 修士1年)

白鳥座ループは、距離約725pc、視直径3°程度の円形で、爆発後1万年ほど経過したシェル型の超新星残骸である。白鳥座ループには、「西の破れ」領域と「南の破れ」領域があり、それぞれ、白鳥座ループの西側、南側のシェルを突き破って飛び出したような半円形(視直径0.5°, 1°)の構造を持つ領域である。破れの原因は、爆発前に恒星風が形成した空洞の壁(cavity wall)に穴が空いていたためか、爆発噴出物が突き破ってできたのか、議論が続いている。後者であるとすれば爆発噴出物が検出されることが期待される。

「すざく」は2005年から2014年にかけて、白鳥座ループ全域の観測を完了した。我々は、「西の破れ」とその根本のシェル、「南の破れ」をカバーする観測に着目し、「すざく」に搭載されていたX-ray Imaging Spectrometers(XIS; 0.2 keV - 12 keVのエネルギー帯域で撮像・分光が可能)が取得したX線スペクトルを解析した。その結果、「西の破れ」と「南の破れ」で異なる結果を得た。「西の破れ」とその根本のシェル部分については、高温成分(~0.4 keV)と低温成分(~0.1 keV)の2成分の非平衡電離衝突プラズマモデルで再現でき、重元素間の相対組成比はファクター2で太陽組成比と一致していた。したがって、「西の破れ」は星間物質が支配的と考えられる。一方、「南の破れ」については、前述の2成分に加え、SiやFeが多い0.5 keV程度の成分の、計3成分の非平衡電離衝突プラズマモデルで再現できた。この重元素が多い成分は、白鳥座ループの中心に向かうにつれて組成比が高くなっていき、「南の破れ」のうち最も白鳥座ループの中心に近い領域ではSi/Mg~30 solarという結果を得た。これは、この成分が爆発噴出物であることを示している。

今回の観測結果から、「西の破れ」は、爆発噴出物がcavity wallを突き破ってできたのではなく、衝撃波がcavity wallの穴を通り抜けてできた構造と考えられる。「南の破れ」の形成シナリオも統一的に解釈すると、「南の破れ」の方がcavity wallの穴が大きく、爆発噴出物が比較的多く流れ込んだために、その影響がより強く観測されると考えられる。

高密度ガストレーサーを用いた分子雲高密度領域のN-PDF(柱密度頻度分布関数)の特徴

柴田 洋佑 (鹿児島大学 M1)

分子雲の密度構造の特徴を調べる方法として、近年、N-PDF(柱密度頻度分布関数)が注目されている。密度構造が乱流などランダムな過程で作られている場合、その形状は対数正規分布(Log-normal=LN)になるとされ、重力収縮など不可逆的な過程が卓越してくると高密度側にべき乗(Power-law=PL)の裾を引くとされている(e.g. [1])。一方、COなど低密度分子ガストレーサーを用いた研究では、複数のLNの組み合わせだけでN-PDFがよく説明出来ることがわかってきた(e.g. [2])。では、自己重力の影響がより強いと予想される、高密度ガストレーサー(NH₃, N₂H⁺, C¹⁸O)ではどうなるのだろうか?そこで、これらを用いたN-PDFを調査した。本研究では、GBT(NH₃: [3])、NRO45m(N₂H⁺, C¹⁸O: [4])で観測されたAquila Liftのデータを使用した。画素データの空間分解能0.1pc程度で分子雲1個ごとのN-PDFを作成した。その結果、全てのN-PDFがLN分布のみを示すことが分かった。一方で、ダスト連続波によるN-PDFは同じ雲に対して、PLの存在が報告されている[5]。この食い違いを調べるために、NH₃, N₂H⁺が十分に強く検出された領域でダスト連続波からN-PDFを描くと、低密度側の成分が抜け落ち、高密度側のLNのみが残ることがわかった。これは、ダスト連続波で捉えた“雲”が複数の密度構造の複合体であったことを示唆する。1つの分子雲内に複数の進化段階が併存すると、複合した成分が見かけ上のPLを生じるとする予想([6])もあり、これに呼応する結果であると考えられる。一方、自己重力優勢な領域は0.1pcスケールで顕著になる[7]とされるが、それがN-PDFに反映されるためには、0.1pc程度の範囲でN-PDFを描く必要があり、0.005pc程度より高い空間分解能での観測が必要である。

1. J. Kainulainen, A&A, 508, 35, 2009
2. T. Murase, MNRAS, 523, 1373, 2023
3. R. K. Friesen, ApJ, 833, 204, 2016
4. F. Nakamura, PASJ, 71, 3, 2019
5. N. Schneider, A&A, 666, 165, 2022
6. R. L. Ward, MNRAS, 445, 1575, 2014
7. S. Khullar, MNRAS, 507, 4335, 2021

ダスト成長における磁場の重要性 下川 貴史 (九州大学 M2)

円盤内では固体微粒子であるダスト同士が衝突・破壊を繰り返して惑星に成長していくがその衝突過程は円盤内のガスの運動と密接に関係している。ダストは一定の大きさまではガスと結合しているため、ガスの運動、ガスによる抵抗、ガスとダストの相互作用による乱流によるダストの巻き上げといった効果を無視して惑星形成の問題に取り組むことはできない。近年Class 0,Iの若い円盤においてもリングギャップ構造がダスト連続波観測で見つかっている。そしてこのリング構造においてダ

ストが集積し、惑星が形成されると考えられている。このような円盤の進化、ダストの進化を考えるのに重要になってくるのが円盤内での円盤磁場を介した角運動量の輸送機構である。弱電離プラズマである円盤ガスが磁場を介して相互作用する磁気回転不安定性 (MRI)[1] によって駆動される乱流、ポロイダル磁場がガスの角運動量を引き抜く円盤風 [2] が角運動量の輸送機構と考えられている。これらの機構がどのように磁場構造の発展とともに円盤に作用してきたのかは長年議論がなされて来たが未だ解決には至っていない。本研究では円盤内での磁場の発展と MRI によって発生した乱流に着目し、それがダストの成長及び円盤構造にどのような影響をもたらすのか 1 次元での数値計算を行った。3 次元のシミュレーションの結果 [3] を用いて円盤磁場によって発生する乱流を α 円盤モデルの乱流粘性として表し、計算コストを減らすことによって、円盤内の磁場、ダストの面密度の分布とサイズ分布の時間進化の計算を行なっている。本研究会ではその結果について報告する。

1. Balbus, S. A., & Hawley, J. F. , ApJ, 376, 214 ,1991
2. Blandford, R. D., & Payne, D. G. , MNRAS, 199, 883 ,1982
3. Bai, X.N. , ApJ , 739 , 50 , 2011

X 線天文衛星すざくによる超新星残骸 G82.2+5.3 の観測

正嶋 大和 (近畿大学 M1)

恒星はその寿命が尽きる時に超新星爆発を起こし、その後には超新星残骸 (SNR) が残る。超新星爆発は白色矮星の爆発による Ia 型と大質量星の爆発による重力崩壊型の 2 つに大別される。これらは、X 線スペクトル解析により得られるプラズマの元素組成量や温度などにより調べられる。また、宇宙のプラズマの多くは電離非平衡状態 (NEI) にある。G82.2+5.3 では ROSAT と ASCA によりその中心に熱的 X 線プラズマが見つかった [1]。このプラズマの密度の見積りはおよそ 0.05 cm^{-3} であり、Mg, Si, Fe の組成比は太陽の 3-4 倍程度と大きく、爆発噴出物 (ejecta) が主であると考えられている。しかし、親星は明らかになっておらず、プラズマ状態の制限ができていないため元素組成量の不定性が大きい。本研究では、スペクトルの質が良い X 線天文衛星すざくのデータを用いて、G82.2+5.3 のプラズマ状態の解析を行なった。バックグラウンドは、近傍の隣接する視野のデータから作成した現象論的モデルを用いた。G82.2+5.3 の北部から抽出したスペクトルでは、既に確認されていた Mg, Si, Fe に加え、Ne や S の輝線を検出した。また、電離平衡 (CIE) と NEI の 2 成分のモデルが再現でき、ejecta と ISM (星周物質) が混合しているプラズマであると推定した。2 つの成分のフラックスから、一様な ISM に ejecta が不均質に広がっていると考えられる。G82.2+5.3 は、Si, Fe の組成比が大きいことや希薄な環境下であり大質量星が形成されにくいことから、G82.2+5.3 の爆発の型は白色矮星を

親星とする Ia 型である可能性が高いと考えられる。本講演では、スペクトル解析の方法と詳細な結果について報告する。

1. Mavromataki, F. et al, A&A, 415, 1051-1063, 2003

動径方向に構造を持つ原始惑星系円盤におけるペブル集積と衝突破壊を考慮した惑星形成 N 体計算 神野 天里 (神戸大学大学院 M2)

太陽系を説明することを指向した古典的惑星形成標準理論では、原始惑星系円盤は軸対称で動径方向に滑らかな構造を持つと仮定されてきた。しかし、近年の観測から、円盤内にはダスト分布の非軸対称性やリング状構造などが普遍的に存在することがわかってきた [1]。古典的標準理論は、このような原始惑星系円盤の多様性を考慮しておらず、標準理論は大幅な修正を迫られている。

本研究では、原始惑星系円盤内の乱流・層流境界へのペブル集積とそれに伴うダストリング形成 (e.g., [2]) を考慮した惑星形成 N 体シミュレーションを行い、乱流・層流境界への継続的なペブル供給が惑星形成過程に及ぼす影響を調べた。さらに、従来の惑星形成 N 体シミュレーションではほとんど考慮されていなかった微惑星同士の衝突破壊プロセスを取り入れた N 体シミュレーションも行い、破壊や破片の生成が惑星形成過程に及ぼす影響も調べた。その結果、衝突破壊の有無に関わらず、ダストリング内で惑星は非常に効率的に形成されることがわかった。また、ペブル集積終了後の早い段階で、暴走成長により複数個の惑星サイズの天体が形成された。これら惑星の総質量は、完全合体の場合では流入総質量と同程度、そして衝突破壊を考慮した場合でも流入総質量の半分程度を占めることがわかった。

本講演では、我々が行った惑星形成 N 体シミュレーションの結果を示し、動径方向に構造を持つ原始惑星系円盤内における惑星形成過程について議論する。

1. Andrews, S. M., Huang, J., Pérez, L. M., et al, ApJL, 869, L41, 2018
2. Chatterjee, S., & Tan, J. C., ApJ, 780, 53, 2014

銀河系円盤部における星形成史の包括的解明：ハローから円盤へのガス供給機構の理論的研究 瀬野 泉美 (名古屋大学 M2)

銀河系円盤領域に存在する星の材料となるガスの総質量は $\sim 10^9 M_{\odot}$ である。一方、近年の星形成率は $\sim 1 M_{\odot}/\text{yr}$ であることが観測的に分かっている。これらの観測事実から、銀河系内で星形成は $\sim 1 \text{ Gyr}$ も持続することができない。しかし、銀河系内の星形成は $\sim 10 \text{ Gyr}$ もの間、現在と同程度の値で持続していることが観測的に分かっており [1]、なぜ星形成が長期間持続したのか、その理由が未解明であるため、銀河系の時間進化が十分に理解されていない。近年の観測によって銀河円盤領

域の周りの ~ 100 kpc の広がりのある銀河ハローに、 $10^{10} M_{\odot}$ 以上もの金属汚染されたガスの存在が明らかになった (e.g., [3, 4]). このことから、銀河円盤領域と銀河ハローの間でガスの輸送・供給が起こり、銀河円盤領域でガスが枯渇せず星形成が長期的に持続する、と考えられる。これまでの研究によって銀河円盤領域から銀河ハローへガスを輸送する機構については、理論計算が成されており [4]、宇宙線によるガスの加熱が冷却を妨げ、ガスが冷え固まる前に銀河円盤領域から数百 kpc もの高さまで輸送されることが示された。対して、銀河ハローでガスが冷え固まり、銀河円盤領域へ供給される機構については十分に検討されていない。本講演では、熱力学・流体力学的観点から高温プラズマ状態の銀河ハローにおける熱不安定性を考えることによって、銀河ハローから円盤領域へのガス供給について考察した成果について発表する。

1. Haywood, M., Di Matteo, P., Lehnert, M., et al. 2016, Galactic Surveys: New Results on Formation, Evolution, Structure and Chemical Evolution of the Milky Way, 28
2. Tumlinson, J., Thom, C., Werk, J. K., et al. 2011, Science, 334, 948. doi:10.1126/science.1209840
3. Tumlinson J., Peebles M. S., Werk J. K., 2017, ARA&A, 55, 389. doi:10.1146/annurev-astro-091916-055240
4. Shimoda, J. & Inutsuka, S., 2022, ApJ, 926, 8. doi:10.3847/1538-4357/ac4110

高温真空昇温脱離法 (TPD) を用いた模擬星間有機物ダストの化学構造の分析 妹尾 梨子 (東京大学 M1)

未同定赤外 (UIR) バンドというブロードな赤外放射スペクトルの観測から、有機物の分子や塵が宇宙に普遍的に存在することが示唆されている。しかし UIR バンドの担い手である有機物の化学構造や性質はよくわかっていない。近年、QNCC という、新星に見られる UIR バンドの特徴をよく再現する実験模擬物質が作られた。QNCC の分析から、新星の UIR バンドに特徴的な $8\mu\text{m}$ バンドはアミンの含有に起因すると解釈されているが、その詳細な化学構造の理解には至っていない。[1] そこで、炭素材料分野で用いられる「高温真空 TPD」と「X 線光電子分光法 (XPS)」を用いて、QNCC と、QNCC の材料となる filmy QCC の分析を行った。「高温真空 TPD」とは、高真空下で一定温度で試料を加熱し、脱離ガスの種類と量を連続的に計測することで、脱離ガス種と脱離温度から試料の化学構造を調べる手法である。[2] その結果、filmy QCC は、(1) アルキル基 ($C_n H_{2n+1}$) が少なく H で終端された構造を多く持つこと、(2) sp³ (ダイヤモンドのような構造) が多い構造を持つことがわかった。QNCC は、(1) H で終端された構造が多いこと、(2) filmy QCC よりも sp² の炭素が多いこと、(3) 大半の窒素が

sp³ の炭素と結合して存在している可能性があることがわかった。今後、分析を進め UIR バンドと化学構造の対応を明らかにし、TAO/MIMIZUKU を用いた新星の観測へと繋げる。

1. Endo et al., The Astrophysical Journal, 917, 103, 2021
2. Ishii et al., Carbon, vol80, page135-145, 2014

原始地球のマグマオーシャンの理論的研究 高橋 航 (名古屋大学 M1)

原始地球はマグマオーシャンと呼ばれるマグマで覆われた構造をしていた。このマグマオーシャンが固まるメカニズムを理解することは、マグマオーシャンが固まる過程で惑星内部の組成を決定するために必要であり、長期的な熱化学的進化にとって極めて重要である。マグマオーシャンの物理的な挙動は、Rayleigh-Bénard system で考えられる。Rayleigh-Bénard system とは、流体が下から熱せられ、流体上部が冷やされることによって生じる乱流対流である。そして、マグマオーシャンが固まる過程では、マグマ内で生じた結晶の沈降挙動が重要である。よって熱による乱流対流中における粒子の運動を理解する必要がある。しかし、これまでの研究は、運動学的な流れや境界のない乱流、チャンネルやパイプの流れといった理想的な流れ条件での研究が主であり、熱駆動流による粒子の沈降挙動の詳しい研究は限られている。本講演では、これまでの研究について総括し、新しい熱対流の解析の可能性について発表する。

分子雲と相互作用する超新星残骸の流体シミュレーション:体積占有率と衝撃波速度の関係 辰己 賢太 (甲南大学 M2)

超新星残骸 (SNR) と分子雲との相互作用は、乱流磁場増幅による粒子加速の促進や X 線やガンマ線放射の促進等の効果を通して、SNR の性質に大きな影響を及ぼすことが知られている [1]。ガンマ線で明るい SNR 周辺の分子雲観測の結果から RXJ1713.7-3946 の宇宙線陽子の全エネルギーを約 10^{48} erg と見積もっている [2]。この値は SNR が銀河系内の宇宙線エネルギー密度を説明するため加速しなければならない値に比べて 1 桁小さい。しかしながら、この見積もりは分子雲の体積占有率が 100% 近くであることを仮定した時の値であり、体積占有率が低ければ、宇宙線のエネルギーは大きくなり得る。

重力崩壊型超新星の場合、爆発前に発生する恒星風や HII 領域の膨張によって分子雲内部の低密度部分が吹き飛ばされ、密度の濃いクラump 状の分子雲構造が残る。そのような高密度ガス体積占有率が低い分子雲で超新星が発生する場合、衝撃波面はガスクラump の間を通り抜け、球対称を保ったまま広がっていく。我々は高密度ガス体積占有率が異なる複数の状況下で SNR 形成のシミュレーションを行うことで、体積占有率が SNR の進化に与える影響を調べた。その結果、体積占有率が一定以上大きくなると、衝撃波の伝搬速度が観測されるものよりも優位に小さくなってしまふことを発見した。この効果を考慮

したときに RXJ1713.7-3946 の宇宙線加速効率がどのような値を取り得るのかについて議論する。

1. Inoue et al., *The Astrophysical Journal*, 744:71-85, 2012 January 1
2. Fukui et al., *The Astrophysical Journal*, 746, 82-99, 2012 February 10

潮汐固定された地球型系外惑星の気候およびハビタブルゾーン外側境界に関する理論的研究

谷口 啓悟 (東京工業大学 地球生命研究所 博士課程 1年)

ハビタブルゾーン (HZ) とは、恒星周辺において惑星がハビタブルな環境 (表層に液体の水が存在できる温暖な気候) を維持できる範囲を指す [1]。HZ の外側境界は CO_2 の温室効果によって定義され、それよりも遠い軌道では十分な日射と温室効果が得られず全球凍結へと陥る。

M 型星周辺の惑星は中心星近傍を周回するため、強い潮汐力を受けて潮汐固定に陥っている可能性が高い。このような惑星では昼側が常に日射を受ける一方、夜側は寒冷な環境となる。夜側の地表面温度が十分低い場合、大気中の CO_2 などの分子種が凝結し大気中から地表面へと除去される、大気崩壊という現象が発生する [2]。大気崩壊は CO_2 分圧および温室効果を減少させ、気候の寒冷化に寄与すると考えられている [2]。しかし一方で、潮汐固定されている惑星では、昼側の強い恒常的な日射により局所的で温暖な環境を維持できる可能性も考えられる。

大気崩壊がハビタブルな環境の形成・維持に与える影響について、これまで系統的に検証されていなかった。そのため本研究では、惑星大気全体を計算する全球気候モデルを使用し、大気量や組成、日射量を変化させながら大気崩壊およびハビタブルな環境の有無を検証した。その結果、HZ 外側境界付近では大気崩壊によって高い CO_2 分圧と温室効果が維持できない一方、大気が薄くなり大気の熱輸送が弱まることで昼側の地表面温度が上昇し、局所的に液体の水が出現する可能性があることが分かった。本研究の結果は、大気崩壊が寧ろハビタブルな環境の形成に寄与するという、従来考えられてきた効果とは大きく異なるものであり、今後の M 型星周辺の HZ 研究において重要な要素となりうる。

1. Kasting et al., *Icarus*, 101(1), 108-128, 1993
2. Turbet et al., *Astronomy & Astrophysics*, 612, A8, 2018

大マゼラン雲における O 型星の同定と大質量星形成の研究

玉城 磨生 (名古屋大学 博士前期過程 2年)

本研究では、大マゼラン雲 (LMC) において、大質量星の同定と星団形成の研究を行った。大質量星、特に質量 $\geq 18M_{\odot}$ の O 型星は紫外線放射や恒星風などにより周囲の星間物質に多大な影響を与えるが、その形成機構は不明である。LMC では、小マゼラン雲 (SMC) との潮汐相互作用による HI ガス雲の衝突が大質量星団形成を誘発するシナリオが提案されている [1, 2]。しかし、LMC における大質量星のサーベイは限定的であり、これまでの最も包括的な大質量星カタログ [3] は不均一なサンプルであったため、統計的な研究には適していなかった。

そこで、[5] による LMC 全面での Gaia の G, G_{BP}, G_{RP} バンド測光データを利用し、O 型主系列星のカラーテーブル [4] と 10mag に及ぶ減光を考慮して O 型星候補天体を同定した。748338 個の O 型星候補天体のうち、減光量が 0.53mag 以上の領域で同定された天体には、赤化した大質量星に加え、pre/post-MS の中小質量星のコンタミネーションが存在した。これらを分離するために、Gaia で選定した O 型星候補天体に対して IRSF の点源カタログ [6] のクロスマッチを取り、J バンドのデータを組み合わせた二色図による解析を行うことで、コンタミネーションを除いた約 4000 個の O 型星カタログを得た。これらの結果から、星団を同定し、周囲の環境との物理的情報を比較することで、大質量星形成のシナリオについても考察した。

1. Fukui et al, *PASJ*, 269, 5, 2017
2. Tsuge et al, *Apj*, 871, 44, 2019
3. Bonanos et al, *AJ*, 138, 1003, 2009
4. Pecaut et al, *ApJS*, 208, 9, 2013
5. Gaia Collaboration et al, arXiv, arXiv:2208.00211, 2022
6. Kato et al, *PASJ*, 615, 641, 2007

ファラデーモグラフィを用いた複合超新星残骸 MSH15-56 の偏波解析

田村 一稀 (熊本大学 M1)

宇宙に存在する磁場は天体やガスの運動に強く関わりを持ち、これまでの宇宙の変遷の歴史に大きく関わってきた。そのため、宇宙磁場を解明することは宇宙を理解する上で有効な手段の一つである。

磁場の観測に用いる現象にシンクロトン放射とファラデー回転がある。この 2 種の現象を偏波で観測することで磁場の視線に垂直な成分、並行な成分を得ることができる。しかし、これらの情報からは視線方向に積分された値を知ることができるが、視線方向をも含めた三次元的な構造を読み解くことはできない。そこでファラデーモグラフィという手法を用いると、ファラデー深度空間における偏波強度、別名ファラデー分散関数 (FDF) を得ることができる [1]。ファラデー深度とは熱的電子密度と視線に平行な磁場の視線積分を視線方向座標を変数と

して表す関数であり、FDF は三次元空間の情報を含んでいる。本研究では複合超新星残骸 MSH15-56 を対象としている [2]。ASKAP にて観測された偏波強度データに対してスクリプトの RM-Tools を使ってファラデートモグラフィを実行し、偏波の振る舞いを解析・描画ツールの CARTA 等で調査した。その際、不完全なフーリエ変換により現れるアーティファクトを軽減し、真の FDF を再現する操作、RM CLEAN、QU fit を利用している。それぞれの操作で得た FDF の分析を行い、その結果を報告する。

1. Takahashi K, PASJ, 75 Special Issue Supplement_1, 50, 2023
2. Temim T et al, ApJ, 768, 61, 2013

近傍渦巻き銀河 M74 における巨大分子雲の進化 出町 史夏 (名古屋大学 M2)

銀河を構成する大質量星は巨大分子雲 (GMC) で形成されるため、銀河進化の理解には GMC の星形成への理解が不可欠である。Fukui et al. (1999) [1] は大マゼラン雲 (LMC) 全面の均一な GMC カタログを用いて、GMC を HII 領域と星団との付随関係に基づいて 3 つの Type に分類した。そして、これらを GMC の進化段階として解釈した [2]。このモデルは直接測定できない GMC の進化の Timescale を、付随する星団の年齢に基づいて 20-30 Myr と導出した点でも画期的であった。同様の研究は M33 に拡張され、Type 分類による GMC 進化モデルの有効性が示された ([3],[4], Konishi et al. in prep)。しかし、LMC と M33 は矮小銀河であるため、赤方偏移 0 の宇宙を代表するグランドデザインスパイラル銀河に Type 分類を拡張し、その普遍性を検証する必要があった。

そこで本研究では、ALMA, VLT によって得られた ~ 50 pc 分解能の CO と H α の観測データ ([5],[6]) を用いて、距離が 10 Mpc のグランドデザインスパイラル銀河 M74 に Type 分類を拡張した。Type I は星形成の兆候を示さないもの、Type II は H α 光度 ($L_{H\alpha}$) $< 10^{37.5}$ erg s $^{-1}$ の HII 領域が付随するもの、Type III は $L_{H\alpha} > 10^{37.5}$ erg s $^{-1}$ の HII 領域が付随するものとして分類したところ、Type I が 65 個、Type II が 203 個、Type III が 164 個同定された。その結果、1) GMC の質量は Type I $<$ II $<$ III であること、2) Type III のピリアル比が最も小さいこと、3) Type III には 4 Myr より若い星団が付随し、 $L_{H\alpha}$ と星団質量に相関があることが分かった。これらの結果より、GMC は Type I \rightarrow II \rightarrow III と質量を獲得しながら重力的に緩和した系に進化し、活発な星形成を行っていると解釈した。さらに、付随する星団の年齢に基づいて GMC 進化の Timescale を求めると 10-20 Myr となり、LMC, M33 と矛盾しない結果が得られた。このような Type 分類による GMC 進化段階はグランドデザインスパイラル銀河で初めて提案された [7]。講演では、今後の Type 分類の拡張性も踏まえてこれらの結果を議論する。

1. Fukui et al., PASJ, 51, 745, (1999)
2. Kawamura et al., ApJS, 184, 1, (2009)
3. Gratier et al., A&A, 542, 108, (2012)
4. Corbelli et al., A&A, 601, 146, (2017)
5. Leroy et al., ApJS, 257, 43L, (2021)
6. Emsellem et al., A&A, 659, 191, (2022)
7. Demachi et al., submitted to PASJ, arXiv: 2305.19192, (2023)

OB アソシエーションにおける連鎖的なサブグループ形成 富井 耀 (新潟大学大学院 自然科学研究科 M1)

本講演では、分子雲の電波・赤外線観測を考慮して、OB アソシエーションの形成と構造について再考した論文 [1] のレビューを行う。

分子雲の端で形成されたモデルの集団は、電離 (I)-衝撃波 (S) 面を形成し、分子雲を内部へ圧縮する。高密度な中性物質層が I 面と S 面の間に蓄積され、最終的に重力不安定となることが期待されるので、このプロセスを解析する。この層の温度と質量に関する議論は、そこで新しい OB サブグループが形成されることを示唆する。これらの星は、母体になった衝撃波圧縮層である星形成層を破壊する。そして、新たな衝撃波によって周囲の残った分子雲で新たな星形成が始まるだろう。このように、分子雲の複合体を通過する電離と衝撃波を伴ったプロセスによって OB サブグループが連鎖的に形成されると考えられる。

観測された OB アソシエーションから、OB サブグループの空間的分離、年齢の差異、質量の規則性、銀河面に沿った配列などの性質がこのよう一連の星形成メカニズムに由来することが示されている。I 面、メーザー、赤外線源、分子雲の詳細な観測とこのモデルは整合的である。

1. Elmegreen et al., ApJ, 214, 725, 1977

土星リング内小衛星が作るギャップ構造のグローバル N 体シミュレーション 鳥居 尚也 (東京工業大学 理学院地球惑星科学系 M2)

カッシーニ探査機の土星リングの観測により、リング内の小衛星が作る様々な構造が明らかになった [e.g. 1]。特に、A リング内に埋め込まれた小衛星ダフニスとパンは、密度波を伴った、ギャップ端がシャープに切れた特徴的なギャップ構造を形成していることが知られている。過去に解析的な議論によって、シャープに切れたギャップ構造を維持するメカニズムが提案されており [e.g. 2]、衛星-リング粒子間の相互作用についての local な計算領域における N 体計算により、そのメカニズムの妥当性も示唆されている [e.g. 3]。

先行研究では local な領域での計算に限られており、粒子の非弾性衝突や自己重力を全て考慮した global な N 体計算はこれまで行われてこなかった。しかし、衛星が作るギャップ構造は

local な領域内での計算だけでは記述し切れない可能性がある。また、粒子間相互作用はリング内の粘性を決め、衛星のギャップ構造に大きな影響を与える。そこで我々は、これまで local な領域で個別に議論されてきた土星リング内の物理を統一的に再現することを目的に、衛星が作るギャップ構造の global な 3 次元 N 体シミュレーションを実施した。公開 N 体計算コード n-body-with-center を用い、リング粒子間の自己重力・非弾性衝突を全て考慮して、衛星との重力相互作用によるリング粒子群の構造形成を、衛星質量・光学的厚さなどを様々に変えて計算した。

その結果、シャープに切れたギャップ端や衛星とリング粒子の重力相互作用によって誘起された密度波の構造を再現したばかりでなく、ギャップ端の密度波面の部分に山脈のようにそそり立つ鉛直構造も再現されていることを発見した。これらは全て、カッシーニの観測によって実際に確認されているものである。本講演ではこれらのシミュレーションの結果を紹介し、円盤質量や光学的厚さなどのパラメータのギャップ構造への依存性について議論する。

1. Porco et al., Science, 307, 1226, 2005
2. Borderies et al., Nature, 299, 209, 1982
3. Lewis & Stewart, AJ, 120, 3295, 2000

弱い磁化ディスクにおける磁気回転不安定性 中里 紘大 (新潟大学 自然科学研究科 M1)

磁気回転乱流の存在は原始惑星系円盤の進化、天体の形成、成長に大きな影響を与える。乱流は磁気回転不安定性により発生することが明らかになっている。乱流により角運動量が内から外へ輸送され、ガスが中心星に落下することや、ダストや微惑星の衝突頻度の高さの獲得にも寄与する。また、ALMA による観測では、多くの円盤にリングギャップ構造があることが明らかになった。リングギャップ構造についても形成メカニズムとして磁気回転不安定性が考えられている。

本講演では論文 [1] に基づき、磁気回転不安定性について議論する。この論文では垂直方向に有限の広がりをもつ軸対称円盤を仮定し、幅広い種類の降着円盤が弱い磁場の存在下では軸対称の擾乱に対して動的に不安定であることを示した。磁場は遍在しているため、この結果は、ガスの差動回転系に一般的に当てはまる。磁場のエネルギー密度が熱エネルギー密度より小さい場合に限り、最大成長速度は回転角速度とほぼ同じであり、磁場の強さには依存しない。軸対称の外乱にはポロイダル場成分の存在と角速度が外側に向かって減少していることが必要である。不安定性に関連する流体運動は、ポロイダル場成分とトロイダル場成分の両方を直接生成する。

1. Steven A. Balbus and John F. Hawley, ApJ, 376, 214, 1991

ALMA 望遠鏡による OMC-3 MMS 5 から駆動する アウトフローとジェットの観測と駆動機構の解明 中村 優梨佳 (九州大学 理学府地球惑星科学専攻 修士 1 年)

Matsushita et al. (2019)[1] に基づき、ALMA で観測された OMC(Orion Molecular Cloud)-3 の MMS 5 周辺のアウトフローとジェットの駆動メカニズムについてのレビューを行う。星形成過程で現れるアウトフローとジェットの駆動を説明するために、nested wind シナリオと jet entrainment シナリオという 2 つの異なるシナリオが提案されている。ALMA を用いた MMS 5 の観測により CO、N₂D⁺、SiO、C¹⁸O という 4 つの分子輝線と 1.3mm 連続波を取得し解析を行なった。その結果、1.3 mm 連続波において、ディスクを示すと考えられるコンパクトな構造を検出した。また、C¹⁸O も中心集中型構造を示し、PV 図は円盤状構造の回転を示している。C¹⁸O とは対照的に、N₂D⁺ は原始星周辺では非常に弱く、OMC-3 フィラメントの方向に伸びている。CO は、アウトフローとジェットの典型的な構造を示した。傾斜角を考慮してフローの物理量を導出したところ、ジェットの大きさはアウトフローよりも短く、力学的タイムスケールは 3 倍ほど短いことがわかった。また、アウトフローとジェットの位置角の差から、両者の駆動領域と駆動を開始した時間が異なると考えられる。SiO と CO の両方に 6 つのノットが確認され、これらは周期性を持つことが示唆された。全体としてジェットはサインカーブで近似することができ、ウィグル構造を持つ。これはジェットとディスクの歳差運動を示唆する。

これらの解析結果は nested wind シナリオを支持する証拠を示している。以上から、フロー駆動メカニズムについて、jet entrainment シナリオを完全には否定できないものの、今回の結果は nested wind シナリオで良く説明できると考えられる。

1. Matsushita et al., The Astrophysical Journal, 871:221 (12pp), 2019 February 1

QSO を背景とした銀河系内吸収線で探る、分子雲の化学的・物理的条件と詳細構造 成田 佳奈香 (東京大学 理学系研究科天文学専攻 M2)

QSO J1851+0035 ($l=33.498^\circ$, $b=+0.194^\circ$) の ALMA 校正データを用いて、銀河系分子ガスによる吸収線を探索した。合計 14 種 (CO, ¹³CO, HCO⁺, H¹³CO⁺, HCO, HCN, HNC, CN, C₂H, *c*-C₂H₂, CS, SO, SiO, C) が検出された。C¹⁸O、HC¹⁸O⁺、H¹³CN、¹³CN、ND、N₂H⁺、HCS⁺、CCS、CH₃OH については、全く吸収されないかわずかな吸収しか検出されなかった。銀河系中心から 4.7~10.2 kpc に位置する 16 以上の独立した速度成分が、¹²CO、¹³CO、HCO⁺ 線に確認された。¹³CO の $J=1-0$ と $J=2-1$ 吸収線の同時マルチガウスフィッ

ティングにより、これらは「線幅が広く励起温度の低い連続成分」と「線幅の狭い分離成分」で構成されていることがわかった。高い $N(\text{HCN})/N(\text{HNC})$ 比 (~ 4) から推定される運動温度は 40K に達し、それに対応する熱幅が狭い成分の線幅を説明する。また、また、CN グループ間のカラム密度 (HCN-HNC-CN) には、非常に密で直線的な相関があることが確認された。また、炭化水素グループ ($\text{C}_2\text{H-c-C}_2\text{H}_2$) にも同様の相関が確認された。CO/ HCO^+ の柱密度比は、3 桁もの大きなばらつきを示した。いくつかの速度成分は、シングルディッシュの CO 輝線と ALMA の HCO^+ 吸収で検出されるが、対応する ALMA の CO 吸収は検出されていない。これは、シングルディッシュビームで分解されない塊状の CO 輝線 (~ 1 pc) と、CO/ HCO^+ 存在比が非常に低い広がった成分 (すなわち CO-ダークガス) の混合によって説明できる。また野辺山 45m 鏡のフォローアップ観測の結果も報告し、母体となる分子雲の物理状態についても論じる。

原始惑星系円盤の形成・進化に対する宇宙線電離の影響

西尾 恵里花 (東北大学理学研究科天文学専攻 M2)

原始惑星系円盤の進化において磁場は重要な役割を果たす。磁場は円盤内の角運動量を外に輸送し、円盤を小さくする。この効果はガスの電離度に依存する。低電離度では磁場とガスとの相互作用が弱まり、磁場が拡散し弱まる。その結果、円盤は大きくなる。従って原始惑星系円盤の構造や進化を考える上でガスの電離度を決めることは重要となる。

本講演では宇宙線による電離率の違いが円盤の形成・進化に与える影響を論じた論文である Kuffmeier et al. 2020[1]を紹介する。星形成領域のガスを主に電離するのは低エネルギーの宇宙線である。分子輝線の観測から、星形成領域のガスの電離率は $10^{-16} - 10^{-18}\text{s}^{-1}$ 程度と見積もられている [2]。Kuffmeier et al. 2020 は宇宙線による電離率を 10^{-18}s^{-1} から 10^{-16}s^{-1} の間で変化させ、電離率を一定として分子雲コアから円盤形成・進化を約 10^5 年まで三次元非理想磁気流体シミュレーションを行なった。その結果、 10^{-17}s^{-1} では円盤が形成されたが、 10^{-16}s^{-1} では磁場による効果が強く働き円盤が消滅した。

本講演では以上の先行研究を踏まえ、今後我々が行なう研究についても紹介する。我々が行う宇宙線とガスの相互進化を取り入れた円盤形成シミュレーションによって、はじめて宇宙線電離の時間、空間進化、またそれに伴う現実的な円盤形成・進化を追うことが可能となる。

1. Kuffmeier, M., Zhao, B., & Caselli, P., A&A, 639, A86, 2020
2. Padovani, M., Galli, D., & Glassgold, A. E., A&A, 501, 619, 2009

乱流中での分子雲コアの形成・進化過程

野崎 信吾 (九州大学 M2)

星間分子雲で特に高密度な領域は分子雲コアと呼ばれ、そのガス塊が自己重力によって収縮することで星が誕生する。そのため、分子雲コアの進化過程を理解することは、様々な質量の星がどのように形成され進化するのかを解明することに繋がる。実際に分子雲コアスケールの数値計算では、分子雲コア周辺の密度分布の違いが星質量の決定に大きく寄与することが分かっている [1]。また、より大きなスケールでの数値計算によって、様々な分子雲での星形成が統計的に調べられている [2] もの、分子雲の環境の違いによる分子雲コアの物理的性質は未解明である。分子雲コアの多様性を詳細に理解することは、星形成過程を分子雲から原始星まで連続的に解明する上で重要となる。

本研究では、分子雲での様々な分子雲コアの形成・進化過程を詳細に調べるために、3次元輻射磁気流体力学数値計算コード SFUMATO-RT[3, 4] を用いて分子雲スケールでの星形成に関する計算を行った。その後、計算領域で形成した原始星と分子雲コアを統計的に調べるとともに、個々の分子雲コアについて詳細な解析を行った。特にコア間距離を調べることで、個々の分子雲コアが孤立した星形成領域と密接した星形成領域のどちらに存在するかを判別した。その結果、密接した星形成領域では、分子雲コアの動径方向の密度分布の半径ごとの密度分散が大きくなる傾向にあることが分かった。これは星形成領域によって形成される分子雲コアの性質が異なることを示唆している。講演では、各進化段階での分子雲コアの重力不安定性についても議論する。

1. Nozaki S., Machida M. N., MNRAS, 519, 5017, 2023
2. V.-M. Pelkonen et al. MNRAS, 504, 1219, 2021
3. Matsumoto T., Dobashi K., Shimoikura T., ApJ, 801, 77, 2015
4. Fukushima H., Yajima H., MNRAS, 511, 3346, 2022

ハビタブル惑星の存在確率について

長谷川 龍 (京都産業大学 理学研究科 物理学専攻 M1)

近年、系外惑星の発見数が飛躍的に増加し、それらの中に第二の地球を探す研究も大きな進展を見せている。第二の地球探し、あるいは、アストロバイオロジーの研究において重要視される概念の一つに「Habitable Zone」がある。Habitable Zone とは、惑星の表面に液体の水を安定して維持できる中心星からの距離の範囲である [1][2]。現在、Habitable Zone に位置する惑星 (ハビタブル惑星) の検出とその特徴付けが試みられているが、そうした個別のハビタブル惑星の検出とともに重要な研究課題として、この宇宙にハビタブル惑星がどれほど普遍的に存在するのかという問いが挙げられる。この問いに対して、私は統計的研究手法により理解を深めたいと考えている。本発表では、関連する先行研究である Bryson et al.(2021)[3] のレ

ビューを中心として、ハビタブル惑星の存在確率に関する最新の研究動向の整理を行う。

Bryson et al.(2021) は、銀河系におけるハビタブル惑星の存在確率に焦点をあて、Kepler および Gaia 宇宙望遠鏡によって取得されたデータを用いて、主系列星におけるハビタブル惑星の存在確率を導出した。彼らは、Kepler 望遠鏡系外惑星候補天体カタログに対して、Gaia による中心星の物理量に基づいて星からの放射フラックスを計算し、ハビタブル惑星の定義に見合う惑星を推定した。その結果、1 恒星あたりハビタブル惑星の存在確率は 0.37-0.60 であり、さらに温度に幅を持たせた推定では 0.58-0.88 である事が示された。この結果は、従来考えられていた確率よりも大きな値であり、ハビタブル惑星がより普遍的である事を意味する。

1. Kasting et al., Icarus, 101, 108-128, 1993
2. Kopparapu et al., ApJ, 765, 131-147, 2013
3. Bryson et al., AJ, 161, 36-68, 2021

系外惑星 2 次食観測による熱放射の波長依存性と惑星昼面温度の推定

林 優哉 (東京大学 M1)

太陽以外の恒星の周りを回る系外惑星のうち、トランジット惑星 (恒星面を惑星が横切る惑星) は、その軌道離心率が 0 であれば、恒星の背後に惑星が隠れる、2 次食 (Secondary Eclipse) が必ず起きる。2 次食はトランジット惑星の観測と同様に、一時的な星の明るさのわずかな減光として捉えられ、その減光の深さは惑星の昼面の明るさ (反射光 + 熱放射) に一致する。2 次食の減光幅は惑星の半径が大きく、表面温度が高いほど大きくなるため、観測にはホットジュピターと呼ばれる主星に近接した高温の木星型惑星が適している。現在までに TESS や Spitzer, CHEOPS 等の宇宙からの測光観測によって得られた 2 次食深さから、多くのホットジュピターの昼面温度が求められているが、これらの観測はいずれも広い観測波長域で積分された値であり、2 次食深さの波長依存性にほとんど言及できていない。

一方、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の Wide Field Camera 3(WFC3) を用いた観測では、惑星の熱放射が単純な黒体放射とは乖離していることがわかっている [1]。ただし、HST のシステムティクス補正による影響で、HST から求められる昼面温度の値には数百 K 程度の不定性があることには注意が必要である [2]。

本研究では、現在見つかった系外惑星の中で最も高温な惑星である KELT-9 b[3] の惑星 2 次食を可視から近赤外にかけての複数バンドに分けて観測し、HST/WFC3 より短波長側での熱放射の波長依存性を探った。今回はこの観測結果と、KELT-9 b 惑星昼面温度に関する考察を発表する。

1. Changeat & Edwards et al. 2022, ApJS, 260, 3
2. Jacobs et al. 2022, A&A 668, L1

3. Gaudi et al. 2017, Nature, 546, 514-518

ALMA を用いた星団形成領域 Corona Australis 分子雲内部のフィラメント状構造の解析

深谷 直史 (名古屋大学 M2)

Corona Australis 分子雲は、 $\sim 400 M_{\odot}$ の質量を持つ高密度ガス塊から 5 pc 程度の細長く伸びた構造を持つ head-tail 形状を有し、最近傍 ($d = 149$ pc) の小質量星団形成領域として知られている。孤立的な星形成と比較して星団形成においてはどのように分子雲が高密度コアに分裂するかについて未だ理解されていないため、その理解を目的として、Corona Australis 分子雲 head 部の ALMA データを解析した。

ACA 観測の $C^{18}O$ データから *FilFinder* を用いて観測領域内 (~ 0.4 pc²) に 91 本のフィラメント状構造 (幅 ~ 0.007 pc) を同定し、それらの構造の物理量は柱密度 $0.5\text{--}5 \times 10^{22}$ cm⁻²、線質量 $0.7\text{--}7 M_{\odot}$ pc⁻¹ と critical line mass よりも小さい値であること、フィラメント状構造間の速度分散として ~ 1 km s⁻¹ を持つことを確認した。この構造内の $C^{18}O$ 輝線は、典型的に ~ 1 km s⁻¹ の線幅を持ち、乱流が卓越している。さらに、同定されたフィラメント状構造の分布と *Spitzer* で同定された約 50 個の YSO の分布 [1] を比較したところ、星形成しているフィラメント状構造は 10 本程度であった。これらの結果から同定されたフィラメント状構造のほとんどは重力的不安定性では分裂せず一時的な構造の可能性がある。また、Corona Australis 分子雲は 2 つの HI シェルの縁が重なる位置に分布している [2] ことから外的な擾乱を受けている系と推測される。このようなフィラメント状構造は、両極性拡散を考慮したガス衝突流によるフィラメント形成数値シミュレーションで良く再現されており、slow-shock 不安定性によって形成されたと解釈される。

1. Peterson et al. ApJS, 194, 43, 2011
2. Bracco et al. A&A, 644, A5, 2020

X 線観測による超新星残骸候補天体 G0.61+0.01 からの重元素輝線の測定

福嶋 陽子 (奈良教育大学 M1)

X 線天文衛星すざくによる 2005 年の観測から、いて座 B 領域に超新星残骸候補天体 G0.61+0.01 が発見された [1]。この天体の X 線スペクトルは強い Fe 輝線を持ち、高温のプラズマであることが分かった。スペクトル解析の結果、プラズマは温度 $kT = 3.2_{-0.9}^{+2.3}$ keV、電離進行タイムスケール $nt = 1.9_{-0.8}^{+4.7} \times 10^{11}$ cm⁻³ s、元素組成量 $Z_{Ca} = 3.5_{-2.4}^{+3.1}$ 、 $Z_{Fe} = 5.1_{-1.1}^{+1.2}$ solar であることが明らかになった。これらのことから、G0.61+0.01 は超新星残骸であると考えられたが、その爆発の型は制限できていない。

2005 年以降、すざくは 2006 年から 2013 年にかけて 4 回の観測を行なっている。そこで本研究では、これらの全データを用いてスペクトル解析を行った。加えてバックグラウンドのモ

デル化を行い、得られる結果の精度の向上を図った。その結果、先行研究 [1] で報告されていた Ca と Fe の輝線に加えて、Ar と Mn の輝線を初めて検出した。元素組成量は $Z_{Ca} = 16 \pm 3$ 、 $Z_{Fe} = 16 \pm 2$ 、 $Z_{Ar} = 40 \pm 10$ 、 $Z_{Mn} = 150 \pm 50$ solar が得られ、Mn は Fe に比べて 10 倍程度も過剰であることが分かった。またプラズマの温度 $kT = 1.34^{+0.04}_{-0.03}$ keV、電離進行タイムスケール $nt = 5.1(\pm 0.5) \times 10^{11} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ と精密な値を得ることができた。本講演では解析結果を基に、G0.61+0.01 の親星について議論を行う。

1. Koyama et al., PASJ, 59, S221, 2007

M 型矮星周りを短周期で公転する高離心率サブネプチューン TOI-782b の質量推定

福田 生鵬 (東京大学大学院 総合文化研究科 M2)

ケプラー宇宙望遠鏡やトランジット探査衛星 (TESS) により、数多くの太陽系外惑星が発見され、その多様性が明らかになってきている [1]。その一つに、M 型星周りを短周期で公転する海王星よりも小さな半径 (1.7~4.0 地球半径) で高離心率な惑星 (サブネプチューン) の発見が挙げられる [2]。

離心率の大きな ($\sim 0.1 < e$) 短周期惑星はこれまで主に太陽型星周りで発見されてきた。これは次のようなシナリオで形成されたと考えられている。1) まずコア降着と円盤内の移動により短周期惑星が形成する [3]。2) 原始惑星系円盤の金属量が豊富だと、惑星形成に必要なダストが多いため、コア降着により複数の巨大惑星が形成されやすくなる。3) その後、惑星-惑星散乱 [4] や古在機構 [5] などの惑星間相互作用により公転軌道が歪み、高離心率の惑星が誕生する。しかし近年、金属量の少ない M 型矮星周りで短周期の高離心率な惑星が発見されており、その形成過程は未だに解明されていない。

本研究では、TOI-782b の質量を推定することで、その形成過程を解明することが目的である。質量が推定できると惑星の内部構造を予測でき、原始惑星系円盤に含まれる金属量がわかることで、離心率をもつ原因を解明することができる。当該惑星の質量は 8 地球質量程度 (6/11 現在) であることがわかっており、今後の観測および統計的解析からより高い精度の質量推定をしていく予定である。

1. NASA Exoplanet Archive
2. Fulton and Petigura, AJ, 156, 15, 2018
3. Pollack et al, AA, 590, 12, 1996
4. Wu and Murray, ApJ, 589, 11, 2003
5. Kozai, AJ, 67, 8, 1962

太陽系内天体に含有される放射性同位体を用いたガンマ線強度予想と銀河宇宙線の推定

藤原 立貴 (大阪大学 宇宙進化グループ M1)

月の表層や、地球に飛来する小惑星由来の隕石に含有される半減期 70 万年の ^{26}Al は、太陽系内天体に広く分布し、微惑星形成の熱源とも考えられている。月隕石や隕石といった限られたサンプルでは ^{26}Al の含有量が測定されている [1][2] が、太陽系内天体における ^{26}Al の真の存在量は不明のままである。ここで、 ^{26}Al が崩壊時に放射する 1.8 MeV ガンマ線を太陽系内天体から捉えることができれば、そこから天体の ^{26}Al の含有量が推定できる。本研究では、月隕石・隕石での ^{26}Al 含有量を月・小惑星帯で仮定することでこれら天体から期待される 1.8 MeV ガンマ線強度を見積もった。この結果、The Compton Spectrometer and Imager (COSI) [3] といった次世代 MeV ガンマ線計画であれば、月を計測可能と期待できる。

太陽系内天体における ^{26}Al などの同位体は、宇宙線が天体岩石中の安定核種と非弾性散乱を起こすことで生成されている。この事実から逆算することで、半減期分ほど過去の宇宙線量が推定できる。本研究では ^{26}Al と ^{10}Be (半減期 150 万年) といった、隕石中の宇宙線由来の同位体の含有量を用いて、1 GeV 以下の低エネルギー銀河宇宙線量とそのスペクトル指数も見積もった。

本公演では、主にガンマ線量の見積もりについて紹介し、後半で宇宙線量の見積もりについて報告する。また、時間が許せば小惑星帯からのニュートリノ強度についても触れる。

1. K. Nishiizumi, J.R. Arnold, C.P. Kohl, M.W. Caffee, J. Masarik, R.C. Reedy, Geochimica et Cosmochimica Acta, 73, 2163-2176, 2009
2. Kunihiko Nishiizumi, International Journal of Radiation Applications and Instrumentation. Part D. Nuclear Tracks and Radiation Measurements, 13, 209-273, 1987
3. Tomsick J., et al., Bulletin of the AAS, Vol. 51, 2019

再結合優勢プラズマを持つ超新星残骸 G346.6-0.2 のスペクトル解析と形成過程について

古瀬 愛実 (奈良女子大学 M2)

一般的な超新星残骸 (Supernova Remnant: SNR) のプラズマは電離が再結合よりも支配的である電離進行プラズマ状態 (Ionizing Plasma: IP) から、時間経過と共に電離と再結合が平衡の電離平衡状態 (Collisional Ionization Equilibrium: CIE) となる。しかし近年、再結合が電離より支配的な再結合優勢プラズマ (Recombining Plasma: RP) を持つ SNR が発見されている。この RP の形成過程や起源は未だ議論が続いており、熱伝導や断熱膨張により電子温度が下がる電子冷却説や、近傍光源からの X 線放射や低エネルギーにより電離が進行する電離促進説などがある。G346.6-0.2 は放射性再結合連続放射を持つことから、初期電離温度が 5keV の RP モデルでスペクトルを再現できることが報告されている [1]。

本解析では、すざく衛星の X 線データを使用し、銀河面 X

線放射を考慮したモデルを用いてバックグラウンドの寄与を見積もり、元素ごとに初期電離温度が異なるモデルを導入して解析を行った。その結果、元素ごとに初期電離温度が異なっており、初期状態は CIE 状態でなくてもよいことがわかった。また原子番号との関係は、[2] で確認された傾向と無矛盾である結果が得られた。複数の IP-SNR、RP-SNR を用いた研究 [3] では同様のモデルを適用して系統的な調査を行い、この傾向は IP-SNR でも見られること、IP-SNR よりも RP-SNR の電離温度の方が高いことから電離促進により IP から RP へ変化したシナリオを提案している。さらに G346.6-0.2 から低エネルギー宇宙線陽子起源と考えられる中性鉄輝線が発見されている [4] [5]。解析結果から、低エネルギー宇宙線陽子による電離促進によって RP へ変化したシナリオが説明可能かをエネルギーの観点で検討する。

1. Yamauchi, S. et al. 2013, PASJ, 65, 6
2. Hirayama, A. et al. 2019, PASJ, 71, 2
3. Yamauchi, S. et al. 2021, PASJ, 73, 3
4. 森川朋美, 日本天文学会 2022 年 秋季年会 Q34a
5. Saji, S. 2018, Ph.D.thesis

水素大気-マグマオーシャン相互作用に基づく岩石惑星の形成シナリオ

前田 悠陽 (京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 M1)

地球に海洋をもたらした水の起源は、生命の起源だけでなく、惑星形成のシナリオを探るという点で、惑星科学における重要な課題のひとつである。この課題を議論する上で鍵となる、惑星形成過程 (特に、原始惑星の形成後) における特徴が 2 つある。ひとつは、降着に伴う重力エネルギーの解放により、原始惑星の表面ははじめ熔融状態にあったことである (マグマオーシャン)。もうひとつは、質量 $\gtrsim 0.2M_{\oplus}$ の岩石惑星は、形成中に自身の重力で原始惑星系円盤中のガスを捕獲し、水素に富む原始大気を獲得することである。この原始大気は $10^8 \sim 10^9$ 年で宇宙空間へ散逸し、やがて失われる [1](円盤ガス由来の一次大気から、惑星内部からの脱ガス由来の二次大気へ)。

Young et al.(2023) では、この水素に富む原始大気とマグマオーシャンの間で起こる化学反応に注目し、地球をモデル化した系の化学平衡を数値的に計算した。その結果、原始大気中の水素が、マグマオーシャン中の酸素と結びついて水を生成すること、鉄コアの密度、酸化状態といった化学的特徴が現在の地球とほぼ一致することを示した。このモデルは系外惑星への適用も可能なため、普遍的な惑星形成シナリオに基づく統一的なモデルを構築するのに非常に有用である。

一方で、Young et al.(2023) で提案されているシナリオは、原始惑星を取り巻く状況について、より詳細で慎重な検討が必要である。たとえば、系が平衡に到達するまでの間にも、円盤から原始大気に水素が供給されうること、また円盤ガスの散逸に

よってその供給が途絶えること、さらに、系が平衡に達してマグマオーシャンが固化しても、その後 別の原始惑星との巨大衝突が起これば、再び惑星表面は熔融し、新たな平衡が実現すること、などがある。

本発表では、Young et al.(2023) のレビューを行う。続いて、惑星形成のシナリオについて、主に上に述べた観点から検討を行う。

1. Young, E. D., Shahar, A. & Schlichting, H. E., Nature, 616, 306-311, 2023

HI 雲の相分離による分子雲進化の研究 松月 大和 (名古屋大学 M1)

分子雲の主成分である水素分子は中性水素原子雲 (HI 雲) から形成される。HI 雲には温度や密度の異なる相が存在し、熱的な不安定性により高温低密度の Warm Neutral Medium (WNM) 相から不安定相の Lukewarm Neutral Medium (LNM) 相を経て、低温高密度の Cold Neutral Medium (CNM) 相へ進化し、CNM 内で水素分子になると考えられている [1]。従来の HI 相研究の多くは吸収線観測に基づいて行われており、HI 相の空間的な分布は分からなかったが、近年では輝線の相分離をすることで空間分布を明らかにする試みもなされている (e.g., [2])。本研究では HI 輝線の相分離により HI 相の空間分布を明らかにし、各相の性質について調べた。

観測される HI 輝線は複数成分の輝線の和であり、複数のガウシアンに分解することができる。私は、多重解像度マルチガウシアン分解アルゴリズム ROHSA [3] を用いて CO 形成途上の分子雲が存在する HLCG92-35 領域の HI データに対してガウシアンフィッティングによる相分離を行った。

ROHSA ではフィッティングの際に 5 つのパラメータを設定するが、本研究では 48 パターンの分離モデルを計算し、モデルが元データを再現できているか、相分離が適切か等の観点からモデル選定を行った。採用したモデルでは線幅で大きく 3 つの成分に分かれており、線幅 2.5 km s^{-1} , 6.0 km s^{-1} , 12.5 km s^{-1} を中心とした成分がそれぞれ CNM, LNM, WNM に対応するという結論を得た。さらに、CNM の周りを LNM が取り囲むように分布していることも分かった。また、HLCG92-35 領域では CNM45%, LNM43%, WNM12% と CNM と LNM の質量分率が大きく、全天の HI 雲の相分離を行った研究 [2] で示されたフィラメント状 HI 雲における質量分率とも類似していることから Cold HI ガスが豊富であることが明らかになった。CNM のクランプを同定し、物理量を求めたところ、大半が質量 $2.0 M_{\odot}$ 以下であり、線幅が 3.0 km s^{-1} 以下であることが分かった。講演ではこの結果の詳細と今後の展望について述べる。

1. Inoue & Inutsuka, ApJ, 759, 35, 2012
2. Kalberla & Haud, A&A, 619, 58, 2018
3. Marchal et al., A&A, 626, 101, 2019

原始惑星系円盤への外部輻射の影響

松本 凜 (筑波大学 大学院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム 宇宙理論研究室 M1)

本研究の目的は原始惑星系円盤の外部輻射による光蒸発について調べることである。星は多くの星と同時に誕生する。紫外線光度を上昇させる大質量星が近くにどれほど存在するかによって形成環境が変化する。

外部から FUV・EUV 光子の放射を受けると、原始惑星系円盤のガスは光蒸発する。光蒸発において最初は FUV 光子のほうがよりガスの内部まで到達することができるため円盤のガス蒸発を主に担う。しかし、蒸発する円盤の半径がその重力半径よりも小さくなると EUV 光子の影響が大きくなる。[1]

以上をふまえて、外部から FUV・EUV 光子を放射した3次元輻射流体シミュレーションを行う。具体的には [1] での議論を3次元に拡張する。計算の初期条件として、Bonner-Ebert 球を仮定し、外部輻射の降着円盤への影響を計算する予定である。なおこの計算では化学進化や熱進化も考慮されている。円盤回転軸に対する外部輻射の照射角度依存性も調べていく予定である。

本講演では、数値計算の進捗状況と、降着円盤への外部輻射の影響について議論する。

1. PHOTOEVAPORATION OF PROTOSTELLAR DISKS. V. CIRCUMSTELLAR DISKS UNDER THE INFLUENCE OF BOTH EXTREME-ULTRAVIOLET AND FAR-ULTRAVIOLET RADIATION (RICHLING et.al 2000)
2. The external photoevaporation of planet-forming discs (Andrew J. Winter et.al 2022)
3. The first multidimensional view of mass loss from externally FUV irradiated protoplanetary discs (Haworth et.al 2019)
4. The FRIED grid of mass-loss rates for externally irradiated protoplanetary discs (Haworth et.al)

分子雲衝突による大質量星形成の数値シミュレーション

水野 勝広 (北海道大学理論宇宙物理学研究室 M1)

大質量星は強い輻射によって周囲の星間ガスを加熱し、星形成を抑制する。また、超新星爆発によって重元素を生成し、宇宙全体の化学進化の中心的役割を果たす。このため、大質量星の形成過程を理解することは宇宙物理学において非常に重要である。近年、大質量星形成のシナリオとして分子雲衝突が有望視されている。

分子雲衝突に関する研究は、観測と理論の両面から盛んに行われている。例えば、近年の観測によって、様々な星形成領域において分子雲衝突による大質量星形成の証拠が得られている [1]。また近年の数値シミュレーションでは、内部乱流をもつ分子雲同士の衝突によって、大質量星形成を引き起こすような大規模な分子雲コアが形成された [2]。さらに、電磁流体力学シミュレーションにより、衝突軸に垂直な強い磁場が大質量星形成に有利に働くことも示されている [3]。しかし、このシミュレーションでは衝突する二つの分子雲の磁場の向きは等しいと仮定している。我々は、より現実的な状況を考えるには二つの分子雲の磁場の向きが異なる場合の分子雲衝突のシミュレーションが必要だと考え、現在シミュレーションを準備中である。本講演では、先行研究と本研究のテスト計算の結果を用いて、分子雲衝突による分子雲の形態の進化や、衝突によって形成された分子雲コアの累積質量分布などを紹介し、衝突速度や磁場の大きさが大質量星形成に与える影響について議論する。

1. Fukui et al., PASJ, 73, S1, 2021
2. Takahira et al., ApJ, 792, 63, 2014
3. Sakre et al., PASJ, 73, S385, 2021

異なる金属量環境における星形成雲の熱・化学進化 村社 伊樹 (九州大学 M1)

今回の発表では Omukai et al. (2005) の論文をレビューし、星形成雲の熱進化・化学種の進化について議論する。

重力崩壊する星形成雲の熱・化学進化は金属量に依存していることが知られており [1]、本研究では Omukai (2000) のモデルを宇宙マイクロ波背景放射 (cosmic microwave background 以下, CMB) や重水素の分子輝線放射の影響を考慮して更新し、異なる金属量ごとに星形成雲の進化段階でどの化学種が熱進化に大きな寄与を及ぼすのかを調べている。今回新たに追加した重水素の輝線放射は金属量が $Z = 10^{-5} Z_{\text{sun}} - 10^{-3} Z_{\text{sun}}$ の範囲で中心密度 $n_{\text{H}} \sim 10^5 \text{cm}^{-3}$ で星形成雲の冷却機構で支配的になる。CMB は低金属量環境において星形成雲の温度が輻射温度以下にならないようにする効果があるが、熱進化を変化させることはほぼない。また、今回は重水素の寄与を Omukai (2000) のモデルに追加したモデルを規準モデルとして、そこから熱進化で重要な役割を担う化学種のみを含めた最小限モデル、規準モデルとのほぼ完全に一致させるために最小限モデルに化学反応や輝線放射のある程度含めた縮小モデルを構築した。さらに熱進化とコアの伸長分布から形成される分裂片の質量スケールを見積もった。

1. Kazuyuki Omukai, ApJ, Vol.534, p 809-824, 2000
2. Kazuyuki Omukai et al., ApJ, Vol.626, p 627-643, 2005

超新星残骸 G304.6+0.1 と G346.6-0.2 からの中性鉄輝線放射の起源

森川 朋美 (近畿大学 M2)

エネルギーが $10^6\text{--}10^8$ eV の低エネルギー宇宙線は、宇宙線加速や星形成過程を理解する上で重要であるが、太陽磁場の影響のため太陽系内での直接観測は困難である。星間物質中の鉄原子が低エネルギー宇宙線によって電離され放射する中性鉄輝線は、低エネルギー宇宙線の新たな観測方法である (Tatischeff 2003[1])。実際、これまでにいくつかの超新星残骸で、低エネルギー宇宙線起源の可能性が高い中性鉄輝線が見つまっている (e.g., Saji et al. 2018[2], Nobukawa et al. 2018[3])。我々は、低エネルギー宇宙線起源の中性鉄輝線を系統的に調査するため、すざく衛星のアーカイブデータを用い、銀河面上かつ銀河中心の西側領域に位置する 8 つの超新星残骸の解析を行なった。その結果、G304.6+0.1 と G346.6-0.2 からおよそ 3σ の有意度で中性鉄輝線を検出した。付随する分子雲が観測されている G346.6-0.2 (Sano et al. 2021[4]) については、光電離による中性鉄輝線である可能性は低く、低エネルギー宇宙線による電離の可能性が高いことも分かった。低エネルギー宇宙線が分子雲に衝突すると、中性鉄輝線に加えて連続 X 線 (電子の場合は制動放射、陽子の場合は逆制動放射) も放射される。陽子は電子より連続 X 線が放射されにくいため、陽子起源の場合は電子起源の場合より中性鉄輝線の等価幅が大きくなる。本講演では、G304.6+0.1 と G346.6-0.2 の中性鉄輝線の等価幅を測定し、起源を議論する。

1. Tatischeff, EAS, vol7, 79, 2003
2. Saji, PASJ, vol70, 23, 2018
3. Nobukawa, AJ, vol854, 87, 2018
4. Sano, ApJ, vol923, 15, 2021

X 線天文衛星「すざく」を用いた Tuttle 彗星のコマの化学組成

森本 大輝 (東京都立大学 宇宙物理実験研究室 M1)

1996 年 X 線天文衛星 ROSAT によって彗星からの軟 X 線が発見された [1]。冷たい彗星から何故 X 線が放射されるか、その理由として現在まで確立しているのが太陽風電荷交換反応である。これは太陽風に含まれる酸素や窒素などのイオンが彗星大気の中性物質から電子を奪い、奪われた電子が基底準位に落ちる際に X 線輝線を放出する機構である。

我々は彗星 X 線を用いたコマの大気組成診断に着目した [2]。電荷交換反応は電子の移動するイオン中のエネルギー準位が中性ターゲットによって異なるため、X 線の輝線分布からコマの化学組成に制約をつけることができる。先行研究として、73P/Schwassman-Wachmann3 彗星の X 線天文衛星「すざく」のデータから水素原子が支配的であるという制約をつけた [2]。

本研究では「すざく」が観測したもう一つの彗星である 8P/Tuttle のデータを解析した。観測は 2008 年 1 月に 2 回行われ、それぞれ彗星の近地点と近日点に相当する。彗星の運動を考慮した補正を行いイメージを作成したところ、近

地点に 0.3 - 2keV で $\sim 50000\text{km}$ に広がる X 線を発見した。近地点では X 線光度は $L_x = (1.4 \pm 0.2) \times 10^{14}$ erg/s であり、可視光度比は $L_x/L_{opt} \sim 10^{-5}$ 程度であった。近日点では $L_x = (1.4 \pm 0.3) \times 10^{14}$ erg/s であった。より光子統計の良い近地点での輝線比は $(\text{OVIII } L\alpha + \text{OVII } K\beta) / (\text{OVII } K\alpha)$ が 0.08 ± 0.05 と求まった。電荷交換反応のモデルである Kronos データベース [3] から H、H2O、CO ターゲットでの輝線比はそれぞれ 0.05、0.11、0.15 であり、誤差の範囲で一致するため、化学組成に制約はつけられなかった。今年打ち上がる XRISM 衛星の初期ターゲットでは彗星が採択されており、明るい彗星を観測することでより精度の高い制約がつけられると考えられる。

1. Lisse et al., Science, 292, 1343, 2001
2. 関口ほか、日本天文学会 2022 年秋季年会 Q40a
3. Kronos v3.1 (<https://www.physast.uga.edu/research/stancil-group/atomic-molecular-databases/kronos>)

Galactic Habitable Zone に関する 2 本の初期論文の紹介と考察

山口 未沙 (筑波大学大学院物理学学位プログラム 博士前期課程 1 年)

Galactic Habitable Zone (GHZ) とは、銀河規模での生命存在可能領域のことである。本発表では、その初期の研究論文である「Galactic Habitable Zone and the Age Distribution of Complex Life in the Milky way」[1] と「On the "Galactic Habitable Zone"」[2] を紹介し、それらの比較を行う。これらの論文では、銀河系内の惑星において複雑な生命体が存在するためには、(1) 主星が存在するか、(2) 地球型惑星を形成できるほどの十分な重元素 (金属量) が存在するか、(3) 複雑な生物が進化するのに要する時間を十分に確保できるか、(4) 超新星爆発という生命を滅ぼす要因となるような脅威に晒されない環境であるか、という 4 つの条件を考慮している。

Lineweaver et al. (2004) では、地球型惑星形成の可能性は金属量に依っており、地球型惑星が形成されやすい金属量の範囲を仮定して理論構築が行われている。その結果、銀河中心近傍は超新星爆発の影響や過剰な金属量のために GHZ に適さず、銀河中心からおおよそ 7-9kpc 離れた環状の領域が GHZ に該当するという結論が出された。

一方、Prantzos (2008) では、地球型惑星形成の可能性は金属量に依らないという仮定を採用して理論構築が行われた。その結果、現在から約 50 億年前までは GHZ は環状であり、時間と共に銀河の外側へと移っていくことを示した。そして現在では、銀河中心近傍も含めた銀河系全体に GHZ が広がっているという結論が出された。

この 2 本の論文は共に、銀河の化学進化モデルをベースにして、生命を滅ぼす要因となり得る超新星爆発や巨大ガス惑星の存在を考慮している。しかし、Prantzos (2008) では超新星

爆発の影響は弱いことが示された。しかしながらこれは、地球型惑星の存在確率が高いモデルを採用したことに依存すると思われる。言い換えると、地球型惑星形成の金属量依存性が、このような結論の相違を招くことになったと考察する。このように、惑星形成の金属量依存性や生命に対する超新星爆発等の影響に起因する不確定性が、GHZ 分野の課題の一つであると言える。

1. Charles H Lineweaver, Yeshe Fenner, Brad K.Gibson, Science, 303, 59-62 (2004)
2. Nikos Prantzos, Space Sci Rev, 135, 313-332 (2008)

PRime-focus Infrared Microlensing Experiment 山 響 (大阪大学 D1)

我々は重力マイクロレンズ法で太陽系外惑星の探査を行なっている。重力マイクロレンズ法による系外惑星の探査は、主星から比較的離れた雪線以遠の地球程度の低質量な惑星まで感度を持つ唯一の方法である。雪線とは、水が氷になる境界のことであり、現在発見されている惑星の多くは主星近傍の灼熱惑星なので、雪線以遠の冷たい惑星の分布はよくわかっていない。惑星形成の全貌を明らかにするには、冷たい惑星の質量、軌道分布を解明することが必須であり、これにより初めて太陽系が普遍的かどうかを解明することができる。

重力マイクロレンズ現象は稀な現象 (10^{-6} [event/star]) であるため、星が多い領域を広視野観測する必要がある。銀河系中心領域は星の数密度が高いため重力マイクロレンズ法に適しているがダストが多く可視光は強く減光されるため、観測波長には近赤外線が適している。そこで我々は世界初の近赤外線による銀河系中心方向の広視野重力マイクロレンズサーベイを行うために、口径 1.8 m の新望遠鏡 PRIME を 2022 年 7 月に南アフリカ共和国 Sutherland Observatory に建設した。現在は光学調整 [1] など定常観測に向けた準備中である。本発表では新望遠鏡 PRIME の紹介と計画の進捗報告をする。

1. H.Yama et al., Journal of Astronomical Instrumentation, Accepted, 2023

Comparison study: the newly developed GDISPH and existing SPH methods 湯浅 拓宏 (筑波大学大学院 数理物質科学研究群 物理学学位プログラム M1)

SPH 法は圧縮性流体を粒子法を用いて解く数値計算手法である。宇宙物理分野では、星形成や惑星形成、銀河形成の数値計算で広く用いられている。しかし、SPH 法にはいくつかのデメリットが存在する。例えば、一つ目は衝撃波を捉えるために必要な人工粘性項に人間が手で決めなければならない任意パラメータが存在すること、二つ目は SPH 法導出の際に密度が空

間微分可能であることを仮定しているために、物理的に密度不連続となる接触不連続面を正しく扱えず、非物理的な表面張力を発生させることである。これら二つのデメリットへの対処法として、粒子同士の相互作用計算の際に Riemann Solver (RS) を用いることで、任意パラメータなしで衝撃波を扱え、接触不連続面での非物理的表面張力を抑えることができるとされている GSPH 法 [1] が挙げられる。二つ目のみのデメリットへの対処法として、PHANTOM [2] で採用されている、SPH に人工熱伝導項を入れる方法や GASOLINE2 [3] で採用されている SPH GDF 法、また密度の代わりに圧力が空間微分可能であることを仮定している DISPH 法 [4] が挙げられるが、これらは依然として人工粘性項を必要とする。

本研究ではこれまで挙げてきた計算手法に加え、過去に我々が考案した、DISPH 法と RS を組み合わせた GDISPH 法を用いて、衝撃波管問題と圧力平衡問題と点源爆発を解かせその性能を比較した。結果、DISPH 法と GDISPH 法が他の手法と比べて接触不連続面の扱いが大きく優れていたことと、RS を組み込んだ手法が通常の人工粘性に比べて強い衝撃波に対して優れた結果を示すことがわかった。

1. Inutsuka, JCP, 179, 2002
2. Price, et al., PASA, 35, 2018
3. Wadsley, et al., MNRAS, 471, 2357, 2017
4. Saitoh, Makino, ApJ, 768, 44, 2013

高密度コアの衝突により誘発されるストリーマ構造の形成

吉野 碧斗 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 修士課程 1 年)

星は分子雲内の高密度領域である高密度コアが重力収縮することにより誕生する。分子雲内の特に密度の高い領域では、コア間の距離も近く、数密度も高くコア同士の衝突が起こる可能性がある。実際、オリオン座 A 分子雲やへびつかい座分子雲などの星団形成領域ではコアの寿命 (星なしコアから Class I 段階まで) の間に数回程度衝突するようである [1]。よって、コアの衝突は星形成過程において進化に影響を与える重要な過程である可能性が高い。しかしながら、これまでコア衝突の過程はさほど詳しく調べられてこなかった。

本研究の目的は、コアの衝突過程を流体シミュレーションを用いて調べ、星周構造に現れる非対称構造が形成されるプロセスを探ることである。

分子雲は乱流が大きいいため、形成されたコアは重力収縮前の角運動量が小さく、その収縮によって原始星とその周囲の回転円盤が形成され、一般にほぼ軸対称の構造となる。しかし、近年のミリメートル以下の高解像度観測により、フィラメント、ストリーマ、スパイラルなど、星周円盤とつながっていると思われる非対称構造を含むことが明らかになってきた [2][3]。コアの衝突を検討した結果、原始星が形成された後、衝突合体し

たコアから降着したガスが回転支持された円盤を作り、コアの間に生じた衝撃圧縮領域が円盤に接続した細長い非対称アームとなることがわかった。つまりそうした非対称構造は、コアの進化過程において周囲の影響を受けて形成された可能性があると考えられる。このような構造は、最近の原始星系の周りでのストリーマやスパイラルの観測結果に似ている [3]。

本講演では、ストリーマの観測に関する論文をレビューし、今後の研究の展望についても議論する。

1. Yuta Yano 2022, 東京大学・修士論文
2. Tokuda, K., Onishi, T., Saigo, K., et al. 2014, ApJL, 789, L4
3. Pineda, J. E., Segura-Cox, D., Caselli, P., et al. 2020, Nature Astronomy, 4, 1158

Tomo-e Gozen NEO 探査の 4 年と今後の展望 和田 空大 (東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 修士 1 年)

小惑星による物質輸送は地球の水や生命の起源に関する有力な説の一つであり、その観測的研究は生命の起源に迫るという科学的意義を持つ。小惑星は火星-木星間に存在するメインベルト小惑星がその多数を占めるが、これらメインベルト小惑星が太陽輻射の天体表面での反射、再放射の非等方性に起因する軌道変化(ヤルコフスキ効果)を受け軌道進化し、地球に近づく軌道をもつ場合がある。[1] これら地球接近軌道をもつ天体を地球接近小天体 (Near-Earth Object, NEO) と呼ぶ。

特に NEO はメインベルト小惑星とは異なり近くで観測できるため、微小な小惑星の観測が可能である。[2] しかし微小小惑星はその小ささゆえ地球近傍でのみ観測できるため、地球から見た移動速度が速い状態の観測が余儀なくされる。つまり、微小 NEO の観測には高時間分解能の装置が特に有用である。

以上の背景を踏まえ我々 Tomo-e チームでは、東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡に搭載されている Tomo-e Gozen カメラを用いた NEO 探査を 2019 年から開始した。Tomo-e Gozen カメラは 2fps という高時間分解能で全天サーベイを行う高視野高時間分解能撮像装置であり、この特徴を活かした微小 NEO の発見を目指し日々観測を続けてきた。

探査開始からおよそ 4 年が経過した今、探査のプロセスや発見の効率化を図るためこの 4 年の観測を振り返ることとした。その結果、分類に用いている機械学習にて特徴的な誤検出が見られることや、マンパワーに依存する部分が多いことが課題として判明した。今後の発見の効率化や微小 NEO の特徴づけに向け、これらの課題を受けて今後は機械学習の改良とプロセスの自動化を行いたい。

1. Bottke et al., Science 288, 2190, 2000
2. Pravec & Harris, Icarus 148, 12, 2000

ALMA を用いたマゼラン雲におけるホットコア化学組成の多様性の調査 渡邊 ひかり (新潟大学 M1)

現在と比べ金属量が大幅に低い過去の宇宙での星形成過程と物質進化過程を知るには、低金属量での星形成領域を調べることが必要である。大マゼラン雲は太陽近傍に比べ $\sim 1/2 - 1/3$ と金属量が少ない (Dufour et al. 1982 など) ため過去の宇宙と近い環境を持っている。さらに $49.97 \pm 1.11 \text{kpc}$ という近い距離にある (Pietrzyński et al. 2013) ため、観測対象として適した天体である。

またホットコアは大質量原始星の進化段階の一つであり、物理的にはコンパクト ($\leq 0.1 \text{pc}$)、高密度 ($\geq 10^6 \text{cm}^{-3}$)、ガス/ダストが高温 ($\geq 100 \text{K}$) と定義されている (van Dishoeck & Blake 1998 など)。ホットコアは星の放射や衝撃波によって氷の状態で存在していた分子が溶け、高温の分子ガスが星の周囲に出現した領域である。ホットコア内ではメタノール (CH_3OH) やアンモニア (NH_3) といった分子が複雑な有機分子になり (Nomura & Millar 2004 など)、またダスト表面でも複雑な有機分子が形成されるため電波領域で豊富なスペクトルを示す。このようにホットコアは、星形成に伴う物質進化によって起こる化学プロセスを理解する上で重要な天体である。

Shimonishi et al. 2020[1] では大マゼラン雲の星形成領域 N119 の近くに位置する大質量原始星 ST16 を ALMA を用いて観測し、新しくホットコアを発見した。

また自身の研究では ALMA データを利用し LMC の複数のホットコアを解析して化学組成を調べ、LMC の領域ごと、また天体ごとなど様々な観点から化学組成の特徴を探ることを試みている。本講演では [1] の論文レビューと、自身が進めているホットコア化学組成の多様性調査についての紹介を行う。

1. Shimonishi et al., ApJ, 891, 164, 2020

Particle motion on a non vacuum solution: study on accreting matter onto a spherically symmetric black hole Palomino Ylla Ariadna Uxue (Nagoya university M1)

Recent theoretical research has investigated the impact of accreting matter on metrics for black hole solutions, such as the Schwarzschild and Reissner-Nordström black holes. One method for studying the motion of particles near black holes involves utilizing a perturbation approach to model and derive particle trajectories.

Observations of the redshift of a test particle orbiting a black hole can unveil crucial information about the behavior and properties of the black hole, such as the strength of its gravitational field. Moreover, graphical representations of timelike geodesics and orbits around black holes can offer

insights into the curvature of spacetime and the influence of the black hole's gravitational field on the motion of light. [1]

1. Harada, T., et al, 2023, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.07516> ,8