

2019年度

修士論文発表会

論文要旨集

2020年2月6日(木)、7日(金)

褐色矮星候補天体 L328-IRS の観測的研究：ALMA データの再考察

学籍番号：35-176129、寺澤祥子

2020年1月27日

概要

宇宙の構成要素の中で、星は最も基本的な構成要素であるので、星の形成過程は銀河の形成過程や宇宙の進化過程と強く関連付けされる。また、星形成の中でも低質量星形成過程で生まれる原始感星系円盤(星周円盤)の形成・過程は感星形成の初期条件に深く関与している。しかし、大質量星及び超低質量星の星形成のシナリオは依然として曖昧な箇所が多い上に、理論と観測によって裏付けられた低-中質量星の星形成のシナリオもシナリオの初期段階において今も尚、幾つかの未解決問題を抱えている。星形成のシナリオをより安定させるためには、原始星の観測・解析のサンプル数の増加が鍵となっている。

本修士論文は、高密度分子雲 L328 に存在している原始星 L328-IRS の ALMA 望遠鏡の高分解能観測データを取り扱ったものとなる。先行研究では L328-IRS は一般的な低質量原始星より質量降着率・光度が1桁小さいことが判明し、中心星質量が小さい可能性も浮上した。もし中心星質量が $0.08M_{\odot}$ 未満であれば、L328-IRS は判別が難しい褐色矮星の前駆体と考えられるので超低質量星形成のシナリオの解明に繋がる可能性が浮上する。従って、L328-IRS が褐色矮星か否かを解き明かすことを第一目標とした。

観測データは ALMA Cycle2 の期間において ALMA Band6(211-275GHz, 1.1-1.9mm) で 1.3mm 連続波と $^{12}\text{CO}(J=2-1)$ ・ $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ ・ $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ 輝線の全4種類の波長から構成され、角分解能は約 $0.30'' \times 0.25''$ となった。この内、1.3mm 連続波と $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ 輝線の観測データを主に利用した。

1.3mm 連続波ではガウシアンフィッティングを行い、天体のサイズ、円盤の傾斜角 $i=65.7^{\circ}$ 、天体の輝度温度 $T_B = 2.01 \pm 0.04\text{K}$ に円盤の総質量 $M_{\text{disk}} = 3.8 \times 10^{-2} M_{\odot}$ の導出を行った。この時得られた位置角は合成ビーム $0.30'' \times 0.23''$ の角度より 25° ズれていた。これは円盤の内部に真の構造がある可能性を示している。CO 同位体で観測された line profile には3種類の全輝線で Inverse P Cygni profile が見られた。これは Inverse P Cygni profile は天体の輝度温度が周囲の温度よりも高い時に発生し、発生する。これは原始感星系円盤の連続波の吸収か、赤方偏移のエンベロープガスが原始星に向かって質量降着が起きている時に見られる。よって、L328-IRS は質量降着が起きている可能性が浮かび上がる。

先行研究 Lee et al.(2018) では純粋なケプラー回転のみを行うケプラー円盤をフィッティングして中心星質量を $0.3M_{\odot}$ と求めていたが、このモデルではケプラー回転以外の位置速度図の概形の説明が厳しくなっており、十分な L328-IRS の円盤の速度構造の説明がされていなかった。そこで今回の研究では 1.3mm 連続波で得られた観測パラメータに、任意で代入する二つのパラメータ(中心星質量 $M_{\text{star}}(0.3M_{\odot}$ 、 $0.1M_{\odot}$ 、 $0.03M_{\odot}$)と比角運動量 $j(0.0001-0.0005[\text{km/s pc}^{-1}])$)を用いて、自由落下運動をする質量降着を起こしながらケプラー回転を行うエンベロープのモデルを $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ と $^{13}\text{CO}(J=2-1)$ の2種類の輝線で作成し、1.3mm 連続波の長時間方向に沿った位置速度図でフィッティングを行った。

フィッティングの結果、純粋なケプラー回転モデルと比較するとより広い領域で観測とモデルのフィットが出来、モデルの概形として質量降着しながら回転を行うモデルの方が適切であることが判明した。また、どちらの輝線においても中心星質量が $0.03M_{\odot}$ のモデルよりも $0.1M_{\odot}$ と $0.3M_{\odot}$ のモデルの方が観測データに沿う形となっていた。また、今回は質量降着が自由落下運動という仮定の下でモデル形成を行ったが、質量降着が自由落下運動以外の場合は今回のモデル以上に中心星質量が増加していく。結果、L328-IRS の中心星質量は $0.1-0.3M_{\odot}$ の範囲内になったため、L328-IRS は褐色矮星候補としては不適切であるという結果を得ることが出来た。

A Systematic Search for Galaxy Proto-cluster Cores at $z \sim 2$

($z \sim 2$ における原始銀河団コアの系統的探査)

35-186117

ANDO Makoto

安藤 誠

Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo

A proto-cluster core is the most massive dark matter halo (DMH) in a given proto-cluster. To reveal the galaxy formation in core regions, we search for proto-cluster cores at $z \sim 2$ in $\sim 1.5 \text{ deg}^2$ of the COSMOS field. Using pairs of massive galaxies ($\log(M_*/M_\odot) \geq 11$) as tracers of cores, we find 75 core candidates, among which 54% are estimated to be real. A clustering analysis finds that the average DMH mass is $2.6_{-0.8}^{+0.9} \times 10^{13} M_\odot$, and $4.0_{-1.5}^{+1.8} \times 10^{13} M_\odot$ if contamination is corrected. The extended Press-Schechter model shows that their descendant mass at $z = 0$ is consistent with Fornax or Virgo-like clusters. Moreover, using the IllustrisTNG simulation, we confirm that pairs of massive galaxies are good tracers of DMHs massive enough to be regarded as proto-cluster cores. We examine the properties of member galaxies of the cores in terms of the stellar mass function (SMF) and the quiescent fraction. It is found that the cores have a more top-heavy SMF and a higher quiescent fraction than field galaxies. These properties are qualitatively similar to those of mature clusters at $z \lesssim 1.5$. The environmental quenching efficiency is calculated to be $0.18_{-0.06}^{+0.06}$ for galaxies with $\log(M_*/M_\odot) > 10.3$, which is comparably low to that of mature clusters at $z \sim 1.5$ in the literature, suggesting that cluster environments have not quenched galaxies significantly until down to $z \sim 1.5$ although excess quenching is already seen in cores.

超新星爆発時のフォールバックと中心天体からの エネルギー供給が決める若い中性子星の多様性

35-186118

岩田 朔

要旨

中性子星は1-2太陽質量ほどの質量をもち、半径が10 km程度である非常に高密度の天体であり、太陽のおよそ10倍以上の質量をもつ大質量星が進化の終わりに重力崩壊型超新星爆発を起こす際に形成される。生まれてから数千年以内の若い単独の中性子星は自転のエネルギーを解放し磁気双極子放射する回転駆動型パルサー、非常に大きな磁場を持ち磁場の散逸で明るく輝いていると考えられているマグネター、そして超新星残骸の中心に存在し、熱的なスペクトルを示す central compact objects という3つの種族に分けられることがわかっているが、その種族の起源についてはいまだ定かではない。

一方で、中性子星が形成される重力崩壊型超新星爆発では、爆発によって放出されたエジェクタが中心天体の重力により中心天体に向かって再び落ちてくるフォールバックという現象が生じる。中性子星の磁場およびフォールバック降着する質量の条件次第ではフォールバック物質が中性子星の磁場を押し込み、中性子星の地殻の中に磁場に埋め込むことが示唆されており、central compact objects の形成シナリオのひとつとなっている。さらに、フォールバックの最中にはスピンドウンによる磁気双極子放射をはじめとする中性子星からフォールバック物質へのエネルギー供給も行われていると考えられており、フォールバック物質の運動は若い中性子星の持つ特徴の獲得に影響を及ぼしている可能性がある。

そこで我々は中性子星からのエネルギー供給を考慮した上で2次元のフォールバック降着流のシミュレーションを実行した。その結果、1次元の先行研究の結果に比べ、Rayleigh-Taylor 不安定性の効果によりフォールバック物質が中性子星に到達しやすくなることを発見した。また、さまざまな磁場及び自転周期の中性子星に対しフォールバック物質が中性子星表面にたどり着くための降着率の条件を得た。中性子星が生まれる時の典型的な磁場および自転周期はそれぞれおよそ $10^{12} - 10^{14}$ G、 $10 - 100$ ms であり、本研究によって求められたフォールバック物質が中性子星表面に到達するための臨界降着率 $\dot{M}_{\text{crit, repel}}$ および磁場が中性子星内部に押し込まれるための臨界降着率 $\dot{M}_{\text{crit, bury}}$ を境にその範囲の磁場および自転周期の新たに生まれた中性子星が回転駆動型パルサー、マグネター、central compact objects の3つの種族に同数程度ずつ分かれることを示す結果となった。

Experimental and observational approaches to understand the properties of organics in space

(実験的及び観測的手法による星間有機物の物性理解)

遠藤いずみ ID: 35-186119

Thanks to the breakthrough brought by the space-based infrared observations unaffected by the atmospheric absorption, it has become clear that the organics ubiquitously exist in the interstellar medium (ISM) of galaxies. Those interstellar organics can potentially be related to the origin of life in our solar system. However, our knowledge of their formation and evolutionary process is quite limited. Especially, the origin of primitive organics in the solar system is still an open question; i.e., solar-origin or pre-solar origin (or both). One possible hypothesis of the pre-solar origin is such that a part of the organics in the ISM originates in evolved stars and that they have been delivered and incorporated as part of the primitive organics in our solar system. Since the interstellar organics cannot be easily caught/handled in hand, this question has to be tackled with the combined approaches between observational studies and experimental studies.

This thesis is composed of four chapters. In Chapter 1, I describe the results of synthesis experiment of laboratory organics QNCC, which are found to be the best ever analogues of organics formed in dusty classical novae. In Chapter 2, I give the science goals and the project status of the space exposure experiment of these laboratory organics using International Space Station (ISS) to investigate the process that organics originating in evolved stars be delivered and incorporated into part of primitive organics in the solar system. In Chapter 3, I discuss how to combine the result of the synthesis experiment of the organics with observational data to investigate the true nature of organics formed around evolved stars. I also provide the preliminary results of mid-infrared observation of a dusty WR star, which is potentially an important source of organics in the early universe. In Chapter 4, the summary and the future perspective are given.

Based on the combined approaches between experimental and observational studies, I will try to demonstrate the properties and formation/evolutional process of interstellar organics.

Collimation of the relativistic jet in the quasar 3C 273 with multi-frequency VLBI observations

(多波長 VLBI 観測によるクエーサー 3C 273 ジェットの収束領域の特定)

学生証番号: 35-186121

沖野 大貴

Abstract

The relativistic jet launched from the supermassive black hole at the center of active galactic nucleus (AGN) is one of the highest energetic phenomena in the universe. A key question to understand its nature is how the collimation occurs, enabling the central black hole to release the accretion and/or rotational energies to a larger scale structure beyond the host galaxy. Recent radio observations for nearby low-powered radio galaxies suggest that the collimation of the jet occurs on a wide range of scales inside the Bondi radius. However, little is known for other AGNs like quasars due to the lack of the angular resolution. Here we present very long baseline interferometry (VLBI) observations with the Global Millimeter VLBI Array (GMVA) of the archetypical quasar 3C 273 at 86 GHz, for the first time including the Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array (ALMA). Our observations achieve a high angular resolution of $\sim 70 \mu\text{as}$, resolving the innermost part of the jet ever on scales of $\sim 10^5$ Schwarzschild radii. Our observations, including close-in-time High Sensitivity Array (HSA) observations at 15, 22 and 43 GHz, suggest that the jet parabolically collimates and has a transition to the conical flow, similar to jets from LLAGNs. These indicate the universality of the collimation process for AGNs with various accretion rates from LLAGNs to active quasars.

Exploring galaxy formation by optical large surveys for Ly α emission

(可視光大規模探査データを用いて Ly α 輝線で探る銀河形成)

35-186122

鹿熊亮太

Abstract

We study intergalactic medium (IGM) and active galactic nuclei (AGNs) at high-redshift based on data taken from optical large surveys for Ly α emission.

In the first half of the paper, we present results of the cross-correlation Ly α intensity mapping with Subaru/Hyper Suprime-Cam (HSC) ultra-deep narrowband images and Ly α emitters (LAEs) at $z = 5.7$ and 6.6 in a total area of 4 deg^2 . Although overwhelming amount of data quality controls have been performed for the narrowband images and the LAE samples, we further conduct extensive analysis evaluating systematics of large-scale point spread function wings, sky subtractions, and unknown errors on the basis of physically uncorrelated signals and sources found in real HSC images and object catalogs, respectively. Removing the systematics, we carefully calculate cross-correlations between Ly α intensity of the narrowband images and the LAEs. We identify very diffuse Ly α emission with the 3σ (2σ) significance at > 150 comoving kpc (ckpc) far from the LAEs at $z = 5.7$ (6.6), beyond a virial radius of star-forming galaxies with $M_h \sim 10^{11} M_\odot$. The diffuse Ly α emission possibly extends up to $1,000$ ckpc with the surface brightness of $10^{-20} - 10^{-19} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ arcsec}^{-2}$. We confirm that the small-scale (< 150 ckpc) Ly α radial profiles of LAEs in our Ly α intensity maps are consistent with those obtained by recent MUSE observations (Leclercq et al. 2017). Comparisons with numerical simulations suggest that the large-scale ($\sim 150 - 1,000$ ckpc) Ly α emission are not explained by unresolved faint sources of neighboring galaxies including satellites, but by a combination of Ly α photons emitted from the central LAE and other unknown sources, such as a cold-gas stream and galactic outflow. We find no evolution in the Ly α radial profiles of our LAEs from $z = 5.7$ to 6.6 , where theoretical models predict a flattening of the profile slope made by cosmic reionization, albeit with our moderately large observational errors.

In the second half of the paper, we present results of the luminosity function (LF) for AGNs at $2.0 < z < 3.5$ based on the integral field spectrograph data taken by the Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment (HETDEX) survey. We make a uniform AGN sample that consists of 480 type 1 AGNs with M_{UV} down to ~ -18.5 from the Subaru/HSC r -band photometric source catalog with the HETDEX spectra. In the optical images taken with the Hubble space telescope and Subaru, we find that a large fraction of faint ($M_{UV} \gtrsim -22.5$) AGNs show spatially extended continua that are components of host galaxies. With the uniform AGN sample, we obtain a UV LF for AGNs at $2.0 < z < 3.5$ that span a wide UV luminosity range of $-26.5 < M_{UV} < -19.5$. At the faint end ($-22.5 \lesssim M_{UV} < -19.5$) of our derived UV LF, we identify a significant hump whose shape is similar to the bright end of the galaxy LF. Our UV LF is well fitted with a linear combination of the double power-law and the Schechter function that describe the galaxy LF. The best-fit parameter of the coefficient of the Schechter function indicates that $10.7^{+2.6}_{-2.6}\%$ of galaxies with $-22.5 < M_{UV} < -19.5$ have faint AGN activities. Our AGN LF at $z \sim 2 - 3$ and the local Seyfert galaxy LF are comparable, which gives a hint that the number density of faint AGN population shows little redshift evolution. Estimating the cosmic SMBH density growth rates from the UV LF for AGN, we find that the cosmic SMBH density growth rates via the bright ($M_{UV} < -22.5$) and faint ($-22.5 < M_{UV} < -19.5$) AGNs are comparable at $2.0 < z < 3.5$, which are caused by the large duty cycle of the faint AGNs.

銀河円盤における星団潮汐テイルの力学的解析

片岡 叡 35-186123

星団とは、お互いの重力によって作られる星の集団である。基本的に銀河系を構成する星は複数個が同じ場所で同時期に星団として形成され、銀河系の重力の影響による星団破壊によって徐々に散逸していく。さらに星団が破壊された後の残骸によって、潮汐テイルと呼ばれる特徴的な構造が形成される。したがって、星団潮汐テイルの銀河系内における振る舞いを理解することは星形成が起きた場所を知る手がかりとなり、太陽をはじめとする星の起源の解明に寄与できることに加え、銀河の力学構造の解明にも繋がる。

2014年から科学運用を開始した位置天文観測衛星 Gaia のデータ公開後、主に星の位置・速度情報に基づく星団残骸や潮汐テイルの研究が飛躍的に進んできた。しかし、星の位置・速度は時間経過とともに変化する物理量であるため、形成から時間が経過した潮汐テイルの星は、これらの空間では広く拡散してしまい同定が難しくなる恐れがある。

そこで本研究では、星の軌道半径や離心率といった軌道パラメータに関連する量である「作用積分」に着目した潮汐テイル探査の検討のために、銀河重力場中を回転運動する星団の自己重力 N 体シミュレーションを行い、星団潮汐テイルの力学的振る舞いを理論的に調べることにした。その結果、軸対称銀河モデルでは予想通り、位置・速度分布を用いた場合と比較した作用積分による星団潮汐テイル探査における十分な優位性が確認された。さらに、軸対称系での作用積分は銀河系の渦状腕などの非軸対称構造の影響により必ずしも保存性が保証されないため、渦状腕の効果を考慮した N 体シミュレーションもを行い、作用空間における潮汐テイルの力学的振る舞いを調べた。その結果、渦状腕による摂動を考慮しても作用積分の分布の時間変化は小さく、優位性が十分に保たれることが示された。これらの結果は、現在までの位置・速度分布を用いた観測では見落としていた潮汐テイルを、作用積分を用いた探査により新たに検出できる可能性が高いことを示唆するものである。

本研究は主に星団潮汐テイルの作用積分の時間変化に着目し、位置・速度空間の分布と比較することでその優位性を定量的に示した点において重要性があると言える。また本研究では、巨大分子雲の影響が本研究の結果に及ぼす影響は小さいという示唆を得ることができた。今後は銀河系バー構造や軌道共鳴といった効果を含めた大局的な検証を行う必要があるが、近年 Gaia による星の位置・速度情報の精度の向上や、地上分光観測の進展による星の化学組成や年齢の情報の精度の向上によって、銀河系に関する観測研究は大幅に進展している。これに加えて将来的な赤外線位置天文観測衛星 JASMINE による銀河系バルジ領域への拡張により、今後さらなる星団潮汐テイルや残骸の振る舞いの評価が可能になると期待される。

近赤外線面分光ユニット SWIMS-IFU の開発と 近傍 LIRG の Pa α 撮像による観測的研究

学籍番号: 35-186125

楠引洸佑

活発に星形成活動を行っている近傍の超/高光度赤外線銀河 (Ultra/Luminous Infrared Galaxies; U/LIRG) を空間分解し詳細に探ることはその星形成活動の原因の理解につながり、例えば $z > 1$ を超えるような遠方宇宙での活発な星形成の起源に迫るためにも重要である。星形成活動に関わる電離ガスの物理状態の空間分布や力学構造などを測定するためには銀河全面の分光観測が必要であり、ダスト減光が $A(V) = 2-6$ mag と大きい近傍 U/LIRG では近赤外線による面分光観測が有効である。既存の近赤外線面分光装置では視野が狭く銀河全面の観測が出来ないため、我々は広視野近赤外線面分光ユニット SWIMS-IFU の開発を行っている。SWIMS-IFU は TAO 6.5 m 望遠鏡の第一期近赤外線観測装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) に面分光機能を追加するイメージスライサー方式の面分光ユニットであり、これを SWIMS 焦点面に導入することで面分光モードに切り替えることが出来る。空間分解能をシーイングサイズに最適化することで $17''.2 \times 12''.8$ と既存装置の 4 倍以上の視野を確保し、SWIMS の広い同時観測波長帯域 (0.9–2.5 μm) と合わせて効率の良い面分光観測を実現する。

SWIMS-IFU の光学系はサイズが数 mm の鏡面が複雑に並んでおり、従来の研磨加工では加工が難しく位置較正も困難である。そこで我々は nm オーダーでの制御が可能な超精密加工機とボールエンドミル工具を用い、特殊アルミ合金 RSA6061 を切削加工することで必要な精度を持った鏡面の加工を実現し、一つの母材に複数の鏡面を加工することで位置較正の負担をなくした。SWIMS-IFU はそれぞれに 26 個の鏡面が加工されるミラーアレイを 3 つ有する (スライスミラーアレイ、瞳ミラーアレイ、スリットミラーアレイ)。そのうち 26 個の球面鏡をもつスリットミラーアレイの本加工を完了し、各鏡面の面粗さ RMS ~ 7.4 nm (要求 < 10 nm)、形状誤差 P-V ~ 169 nm (同 < 200 nm)、ミラー間相対位置誤差 \sim 数 μm (同 < 20 μm) と要求精度を満たすことを確認した。これによって、ボールエンドミル工具を用いた超精密切削加工でミラーアレイ形状の加工が要求精度内で出来ることを初めて実証した。次に球面鏡と楕円面鏡からなる瞳ミラーアレイの試験加工を行い、要求精度内の面粗さ RMS ~ 8.2 nm、形状誤差 P-V ~ 141 nm を達成した。ミラー間相対位置誤差は測定の系統誤差が大きいものの、測定精度の範囲内では問題ないことを確認した。

また、SWIMS-IFU での観測に向け、SWIMS の試験観測で取得した近傍 LIRG 二天体の Pa α 撮像データを用いて空間分解した星形成活動を調べた。二天体のうち一方は銀河相互作用をもち、他方はない。どちらの銀河についても先行研究と同様に銀河内部での星質量面密度 $\Sigma_* [M_\odot \text{kpc}^{-2}]$ と星形成率面密度 $\Sigma_{\text{SFR}} [M_\odot \text{yr}^{-1} \text{kpc}^{-2}]$ の間には相関が見られた。また、銀河相互作用を示す銀河は中心集中した Σ_* 、 Σ_{SFR} を持ち活発な星形成活動を行っていたが、銀河相互作用のない銀河では中心部の高 Σ_* 領域で相関の傾きが緩やかになり、すでに星形成を終えたバルジが存在していることが示唆された。これに SWIMS-IFU による力学構造、AGN や超新星爆発のフィードバックの情報を追加することで近傍 U/LIRG の活発な星形成活動の原因とその銀河相互作用の進行具合による変化をより詳細に探ることができると期待される。

Far-sidelobe and Polarization Measurement of LiteBIRD Low Frequency Telescope

using a 1/4-scaled Model

(1/4 スケールモデルを用いた LiteBIRD 低周波望遠鏡の広角サイドローブと偏光特性の測定)

Hayato Takakura (35-186126)

Polarization of the Cosmic Microwave Background (CMB) has crucial information on the inflationary universe. To detect these signals, we need a telescope with a broad frequency coverage and a wide field of view. On the other hand, development of such a telescope has difficulties in the calibration of far-sidelobes and polarization angles. Far-sidelobes contaminate the weak CMB polarization signals with strong radiation from the Galactic plane coming outside of the pointing direction. Errors of the polarization angles result in the generation of pseud polarization.

LiteBIRD is the only funded CMB observation satellite for the 2020s, and the Low Frequency Telescope (LFT; 34–161 GHz) is one of its telescopes. To verify its optical design, we carried out near-field antenna pattern measurement of a 1/4-scaled LFT at scaled frequencies between 140–220 GHz, which correspond to the lowest bands of the full-scale LFT. We investigated the antenna patterns up to 60° from the boresight, not only at the center but also at the edges of the focal plane to cover the 20° field of view. The measurements were consistent with simulated far-sidelobe patterns down to –50 dB level, and indicated that far-sidelobes for two orthogonal polarization directions are consistent with each other down to –40 dB level. We also measured the cross-polarization patterns and confirmed that their peak levels are less than –20 dB, most of which originates from the feed.

On the other hand, near-field measurement takes impractically long time at higher frequencies and for polarization angle measurement. Therefore, we developed another measurement system with compact antenna test range method. Because the ground calibration of the LFT is planned to be conducted at its operation temperature of 5 K, we designed the setup as small as possible to implement in a cryogenic chambers. The measured antenna patterns are consistent with those measured by near-field measurement down to –40 dB level. We also measured the polarization angles with wire grid polarizers and a goniometer stage. The measurements were well explained by a simple Jones calculus, and the statistical error of the determined polarization angles was less than ± 5 arcsec.

A Method of Measuring Chemical Abundances of Red Supergiants and the Application to the Objects near the End of the Galactic Bar

(赤色超巨星の組成解析法の開発と銀河系棒状構造終端部付近にある天体への適用)

谷口大輔 35-186127

銀河系は我々の最も近くにある銀河であり、銀河系の星々を観測することで銀河の性質や銀河化学進化理論を詳細に調べることができる。銀河系を構成する種々の恒星のうち、我々は非常に明るい光源である赤色超巨星 ($L \gtrsim 10^4 L_{\odot}$, $T_{\text{eff}} \lesssim 4000 \text{ K}$) に着目した。近年の観測により、銀河系中心や棒状構造終端部付近といった特徴的な場所に位置する赤色超巨星も多数見つかっている。これらを高分散分光で追観測することで、我々は銀河系全体に広がった若い星種族の金属量分布を調べることができる。また、近年開発された近赤外線高分散分光器 WINERED は非常に高い感度を持つため、近傍銀河の赤色超巨星を観測可能なポテンシャルまで持ち、これを活用すれば銀河系以外の金属量も決定できる。

これまでに幾つかの先行研究が赤色超巨星の金属量を決定してきたが、大気パラメーター、とりわけ有効温度が正確に決定されていないことから、未だに赤色超巨星の組成解析手法が確立されているとは言い難い。その主因は、赤色超巨星のスペクトルがどの波長帯でも分子吸収線による強い影響を受けていて、この分子のモデルスペクトルを正確に合成できない問題にある。それゆえ、分子吸収線の影響を避けることで、赤色超巨星の正確で精度も高い大気パラメーターを決定する手法を開発することが有効である。

我々は近赤外線 YJ バンド ($0.97\text{--}1.32 \mu\text{m}$) の高分散分光スペクトルを用いて赤色超巨星の大気パラメーターと金属量を決定する手法を開発した。 YJ バンドは可視赤外線波長域の中で最も分子吸収が弱いというメリットを持つ。まず最初に、最も重要な大気パラメーターである有効温度 (T_{eff}) をライン強度比 (LDR) を用いて決定する手法を開発した。低励起と高励起な吸収線間の LDR は、 T_{eff} に敏感でかつ他のパラメーターに鈍感な指標となっている。これまでの LDR と異なり、我々は初めて Fe I の吸収線同士のペアのみを用いて近赤外線の多数の LDR- T_{eff} 関係を赤色巨星で校正した。同じ原子の吸収線同士のペアの LDR は表面重力への依存性が非常に弱いため、我々は赤色巨星で校正した LDR- T_{eff} 関係を表面重力が異なる赤色超巨星にそのまま適用することができる。続いて、表面重力を Stefan-Boltzmann の法則と Geneva 恒星進化モデルを用いて決定した。この方法は波長を問わずしばしば使われる方法である。最後に、各 Fe I 吸収線のモデルフィットに基づいた手法で金属量とマイクロ乱流を同時に決定した。また合わせて、本手法を用いて金属量を決定するために必要な一式の関数を含むソフトウェアも開発した。我々は以上の全てのステップにおいて分子吸収線の影響を受けにくい Fe I 吸収線のみを丁寧に選んで活用したため、本手法は分子に起因する系統誤差の影響を受けにくいことが期待できる。

我々は本手法をテストするために、WINERED を用いて観測された太陽近傍の 6 つの赤色超巨星の組成解析を行った。その結果、本手法によって得られる赤色超巨星の T_{eff} は典型的な統計的誤差が $\sim 40 \text{ K}$ で、Geneva 恒星進化モデルが予想する赤色超巨星の T_{eff} とよく一致することが示された。また、最終的な金属量の典型的な統計誤差が $\sim 0.04 \text{ dex}$ と非常に高い精度となることが分かった。得られた金属量を文献値や銀河系の若い恒星の金属量勾配と比較したところ、最大で $\sim 0.2 \text{ dex}$ 程度の系統誤差の存在を否定はできないものの、各文献値と無矛盾に金属量を決定できていることが確認できた。現在の 6 天体のみの観測データでは 0.2 dex より高い精度で系統誤差を評価することが難しいため、更なる観測が望まれる。

最後に本手法の応用として、銀河系棒状構造終端部に位置する 2 つの赤色超巨星を WINERED で観測した。これらの赤色超巨星の金属量 $[\text{Fe}/\text{H}]$ を決定したところ、それぞれ $-0.115_{-0.101}^{+0.119}$ と $-0.021_{-0.117}^{+0.113} \text{ dex}$ であった。これは金属量勾配から予想される金属量 ($\sim +0.3 \text{ dex}$) より非常に低く、先行研究での棒状構造終端部付近の低金属量を支持する結果となった。

The rate of iPTF 14gqr like ultra-stripped supernovae and
binary evolution leading to double neutron star formation
(iPTF 14gqr と同種の ultra-stripped supernovae の
発生率と、NS 合体との関係)

理学系研究科天文学専攻 学籍番号：35186129
聖川昂太郎

Recently, the gravitational wave signal from a double neutron star (DNS) merger event was detected. DNS systems play important roles in various fields of astronomy and astrophysics. For example, using GW signals, we can constrain the equation of state of a highly dense nuclear matter. DNS systems are produced from massive binaries and must experience twice supernovae (SNe). When a canonical core-collapse SN whose envelope is $\sim \mathcal{O}(1) M_{\odot}$ occurs, a pulsar kick ($\sim \mathcal{O}(100) \text{ km s}^{-1}$) is imparted onto a binary system, and thus the binary system is widened and might dissociate. If a binary system has large orbital separation or already dissociated, it never cause a merger event. Therefore, a SN with a small kick is considered to be essential to form a DNS system that will merge within a Hubble time. On the other hand, it is suggested that a SN explosion of an extremely stripped star (envelope mass $\lesssim \mathcal{O}(0.1) M_{\odot}$) might occur with a small kick ($\sim \mathcal{O}(10) \text{ km s}^{-1}$). This type of SN is called an ultra-stripped SN (USSN). In addition to that, from a perspective of binary evolution, a USSN is expected to occur at the final stage of DNS formation. Recent research revealed that a type Ic SN, iPTF 14gqr (SN 2014ft), has low ejecta mass ($\approx 0.2 M_{\odot}$) and its progenitor has a helium envelope with its mass $\sim 0.01 M_{\odot}$. This SN is interpreted as a USSN, and thus this is the first discovery of a USSN. Furthermore, the observation of iPTF 14gqr provides us with some information about its formation history, such as common envelope (CE) phase. Therefore, we can investigate the binary physics such as a CE phase by observing USSNe. Additionally, the observation of USSNe leads to the observational verification of the theoretically proposed formation scenario of DNS systems. Thus, the observation of USSNe has an astrophysical significance. However, how many USSNe occur in the Universe, and how many of these we can detect have not been investigated in detail. Here, we perform rapid population synthesis calculations so as to estimate the detection rate of iPTF 14gqr like USSNe with optical transient surveys: the intermediate Palomar Transient Factory (iPTF), the Zwicky Transient Facility (ZTF), and the Large Synoptic Survey Telescope (LSST). We find that iPTF, ZTF, and LSST can observe iPTF 14gqr like USSNe at the rates of 0.3, 10, and 1 yr^{-1} , respectively. The iPTF can detect 1 iPTF 14gqr like USSN during its four year observation. We also investigate effects of mass-loss efficiency during Roche-lobe overflow on formation channels. Additionally, we estimate the explosion site of USSNe in order to investigate the origine of USSNe.

Abstract

Recent exoplanet surveys revealed that for solar-type stars close-in super-Earths are ubiquitous and most of them are in multi-planet systems. These systems are more compact than the solar system terrestrial planets. Ongoing and future exoplanet observations will find more of them around low-mass stars. However there are not many theoretical studies on the formation of such planets around low-mass stars. Now is the time to clarify the effect of the stellar mass on planet formation. In the standard model the final stage of terrestrial planet formation is the giant impact stage where protoplanets gravitationally scatter and collide with each other, to evolve into a stable planetary system. We investigate the effect of the stellar mass on the architecture of planetary systems formed by giant impacts. We perform N -body simulations of the giant impact stage around the star with mass of 0.05 - 1.0 times the solar mass. Using the isolation mass of protoplanets, we distribute the initial protoplanets in 0.05 - 0.15 au from the central star, and follow the evolution for 100 million Kepler periods. We find that for a given protoplanet system, the mass of planets increases as the stellar mass decreases, while the number of planets decreases. The eccentricity and inclination of orbits, and the orbital separation of adjacent planets increase with decreasing the stellar mass. This is because as the stellar mass decreases the relative strength of planetary scattering becomes more effective. We also discuss the properties of planets formed in the habitable zone.

σ Orionis Cluster の Ks band 広域高頻度観測

に基づく惑星関連現象の探索

35-186131 松田一真

概要

私達の住む太陽系の成立を理解するために、惑星形成に関する研究は理論の構築、シミュレーション、太陽系内外の関連天体の観測など、幅広い方法で行われている。これらを発展させるためには、若い(10Myr 以下)星を公転する系外惑星あるいは関連現象について理解することも重要であるが、そのような系外惑星は発見例が少ない。特に若い系外惑星の transit 現象は 2020 年 1 月現在 2 例しか報告されていない。そこで、本研究では年齢が 2~3Myr の散開星団である σ Orionis Cluster について、OAOWFC の Ks band による広域高頻度観測を行い、系外惑星あるいは関連現象を発見することを目標とした。既存の変光星の発見方法は transit 系外惑星あるいは関連現象の発見に必ずしも最適ではないので、本研究では transit 系外惑星あるいは関連現象を発見するための新たな解析手法を考案し、解析を行った。

その結果、まず残念ながら系外惑星あるいは関連現象の発見には至らなかった。しかし、SO638 という過去の文献で質量が 1.9 太陽質量の weak line young star であり、分光連星であることを示されていた天体が、周期約 16 日の長周期 eclipsing binary であることを発見した。

OAOWFC によるこの観測結果を受け、SO638 についてのフォローアップ観測として、HONIR による可視赤外光同時観測と Subaru High Dispersion Spectrograph による分光観測を行った。その結果、まず HONIR の観測結果から通常の eclipsing binary とは異なり、主極小の深さに波長依存性が存在するイベントがあることが分かった。この波長依存性は伴星の周囲に塵の集合体が存在すると仮定すると説明可能である。次に Subaru による分光観測結果から、過去の文献で示されていた weak line young star の分光連星であることが確認できた。また連星の軌道離心率は 0.15~0.20 程度、合算質量は 3~3.4 太陽質量程度であることが推測された。

X線天文衛星 XRISM の 初期観測データ解析に向けた地上試験 — 極低温検出器に用いる真空蓋の X 線透過率校正 —

35-186132 御堂岡 拓哉

2016年に打ち上げられた X 線天文衛星「ひとみ」に搭載された分光装置 (Soft X-ray Spectrometer; SXS) は、デュワー容器内で 50 mK の極低温に制御された X 線マイクロカロリメータ検出器を動作させることにより、 $\Delta E_{\text{FWHM}} \sim 5 \text{ eV}@6 \text{ keV}$ の超高エネルギー分解能を達成した。デュワー容器の X 線入射部には、地上での真空保持と打ち上げ後初期の衛星内アウトガスの影響を避けるため、約 3 cm 径の真空蓋 (=ゲートバルブ) が設置された。ゲートバルブは厚さ約 270 μm の Be 窓が溶接され、ステンレスメッシュで機械的強度をもたせている。「ひとみ」衛星は姿勢制御の不具合により 1 ヶ月ほどで運用を断念したため、全ての観測がゲートバルブを通して行われた。打ち上げ前にはゲートバルブの透過率測定は行われなかったため、運用終了後にフライトスペア品の Be 窓の透過率測定を行い、校正データベースファイルが作成された。この際、ステンレスメッシュの測定はなされていない上に、Be 窓の透過率モデルにも物理的に原因の特定できない不連続な構造が存在した。そのため、SXS で得られた「かに」星雲のスペクトルには、特に 2.0–4.0 keV 帯域において、ゲートバルブ由来の系統誤差が顕著に含まれており、高エネルギー分解能スペクトルを用いた天体物理学の解釈に大きな不定性が残った。

2022 年打ち上げ予定の X 線撮像分光衛星 XRISM に搭載される分光装置 Resolve は SXS とほぼ同じ設計であり、高分解能 X 線分光で新たなサイエンスを切り拓くことが期待されている。XRISM 衛星打ち上げ後 3 ヶ月ほど行われる初期観測のデータは全てゲートバルブを通して得られるため、これらのデータから科学成果を得るにはその X 線透過率を精密に測定しておく必要がある。

本研究の目的はゲートバルブの構成要素であるステンレスメッシュと Be 窓の透過率測定を独立に行い、高精度の透過率モデルを構築することである。これにより、ゲートバルブ起因で系統誤差の大きかった 2.0–4.0 keV 帯における X 線分光研究の発展が期待される。我々は宇宙科学研究所 X 線ビームラインにてステンレスメッシュの透過率測定を、KEK フォトンファクトリーと広島大学放射光科学研究センターの 2 つの放射光施設にて Be 窓の透過率測定を実施した。また、Be 窓の透過率カーブに現れる不連続構造をモデル化するため、首都大学東京にて Be 窓の X 線回折測定を行なった。これらの透過率測定データを元に、各要素の透過率モデルを作成した。ステンレスメッシュにおいては、構成元素である Fe, Ni, Cr の光電吸収、干渉性散乱、非干渉性散乱及びメッシュ形状をモデル化した。ステンレスメッシュの開口率は、これまでは設計図から 71.0% と仮定されていたが、実際には数 % の系統誤差を持つことがわかった。Be 窓においては、(1)Be の光電吸収の効果、(2) 微小元素 (Cr, Mn, Fe, Ni, Cu) の光電吸収の効果、(3)Be 結晶面に応じた干渉性散乱成分をモデル化した。本研究では、透過率不連続構造の物理的描像を理解し、干渉性散乱として透過率カーブ全体に取り込むことで、低エネルギー側の Be 窓が実効的に薄くなる効果をモデル化することに成功した。さらに Be 窓透過率には 2% ほどの空間非一様性があることを確認した。

本研究で得た Be 窓の透過率モデル構築方法に基づき、SXS フライトスペア Be 窓の透過率測定データから再モデリングを行なった。得られた透過率モデルを用いて、SXS で観測された「かに」星雲のスペクトルを再解析したところ、顕著な改善が確認できた。そのため、ここで作成した SXS ゲートバルブの透過率モデルは新たな校正データベースとして更新予定である。

SXS 観測データの再解析により透過率モデルの改善が確認できたので、この透過率モデルを Resolve の校正データベースとしても取り込むこととする。その際、測定したステンレスメッシュと Resolve 搭載品は開口率が数 % ほど異なると予想されるため、打ち上げ後に軌道上での天体観測データから開口率を算出する必要がある。そのための軌道上校正計画についても本論文で議論した。

Transmission Spectroscopy of the Atmosphere of TRAPPIST-1g using Subaru/MOIRCS and Gemini/GMOS-N

すばる望遠鏡/MOIRCS と Gemini 望遠鏡/GMOS-N を用いた

TRAPPIST-1g 惑星大気の透過分光観測

3518-6133 森 万由子

2020 年 1 月 27 日

Uncovering the composition of planetary atmospheres is important for understanding the planetary formation, evolution, and habitability. The TRAPPIST-1 system, which has seven Earth-sized planets orbiting around an M-dwarf, provides an exceptional opportunity for the atmospheric characterization of temperate Earth-sized exoplanets (Gillon et al. 2017). Based on the previous studies using Hubble Space Telescope (De Wit et al. 2018), most of the TRAPPIST-1 planets seem not to have clear H₂/He-dominated atmospheres. However for TRAPPIST-1g, the largest planet in the system, the result was not conclusive in the observed wavelengths (1.1-1.7 μ m). In addition, the effect of the stellar surface inhomogeneity on the transmission spectra has recently begun to be considered (Rackham et al. 2017). With this effect, the planetary transmission spectra can be considerably distorted especially in the optical wavelength range.

To study the atmospheric nature of TRAPPIST-1g, we observed a TRAPPIST-1g transit event on the night of UT 2017 September 2 with the Subaru Telescope / Multi-object infrared camera and spectrograph (MOIRCS) at ~ 600 nm and the Gemini Telescope / Gemini Multi-Object Spectrographs (GMOS) at 1300-2300nm, simultaneously. The observed wavelength range is useful to constrain the planetary atmosphere, because it covers strong methane absorption lines around 2.3 μ m and the signatures of Rayleigh scattering in the optical wavelength range.

We model the light curve with the combination of the transit model and the trend model using Gaussian Process technique. We fit the 14 light curves in each wavelength bins simultaneously and estimate the best parameters using the Malcov Chain Monte Carlo method.

The resultant transit depths are consistent with the results of other telescopes, although the derived transit depths have too large uncertainties to constrain the TRAPPIST-1g's atmosphere models. However, our results are important to constrain stellar surface model of the TRAPPIST-1. We compare the validity of several stellar surface models obtained from previous studies and three different planetary atmosphere models. The derived relatively flat transmission spectrum can rule out the existence of large hot spots. We find that it is important to observe transmission spectra simultaneously in a wide wavelength range to constrain the stellar model before the intensive planetary atmosphere studies using next generation large telescopes.

Fermi-LAT ガンマ線源の可視光度変動観測による ブレーザー対応天体推定

35-186134 森田雅大

Abstract

銀河の中心にはおよそ $10^6 - 9 M_{\odot}$ の大質量ブラックホールが存在しており、その一部は中心に極めて明るく輝く活動銀河核 (AGN ; Active Galactic Nucleus 以下、AGN) を持っている。活動銀河核の中でも相対論的ジェットを持つものがあり、その進行方向が我々の視線方向と約 10° 以内で一致してジェット由来の放射が強く観測される天体をブレーザーという。ブレーザーは宇宙に存在する様々な種類の天体の中で、最も高エネルギーな放射をする天体の一つであり、電波からガンマ線まで広い波長域で観測される。ブレーザーはこのジェット由来とされる光度変動を示すのが特徴で、可視光域では数分から数年の様々なタイムスケールで光度変動が確認されている。

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡に搭載された検出器である Large Area Telescope (LAT) の 2008 年から 2016 年の 8 年間分の観測データをまとめた 4FGL カタログでは、全天で 5066 個のガンマ線源が検出されている。ガンマ線源の位置決定誤差はおよそ半径 2.5 分角であり、対応天体の同定には多波長による観測が必要不可欠である。他の波長で対応天体が同定されている 3898 天体のうち約 80% (3137 個) がブレーザーとして同定されており、ガンマ線対応天体の大半を占めている。しかし、未同定線源も 1149 個に上り、ブレーザーの性質を統計的に知るためにも、これらの未同定ガンマ線源のブレーザー対応天体を同定することは重要である。4FGL カタログのガンマ線源の対応天体同定には、主に過去の電波カタログが用いられているため、同定されているガンマ線源は電波で明るく、未同定ガンマ線源の対応天体は電波で暗い可能性が考えられる。そのため、電波以外の波長域でガンマ線対応天体を同定することも重要で、その方法の一つとしてブレーザーの光度変動に注目したブレーザー対応天体の同定がある。しかし、これまで可視光域における全天の高頻度サーベイ観測は少なく、広範囲の天体の光度変動の研究は稀であった。

そこで本研究では、未同定ガンマ線源の対応天体の同定を目標に、高頻度全天サーベイが可能な木曾シュミット望遠鏡に搭載された Tomo-e Gozen による観測を行なった。使用したデータは Tomo-e Gozen で 2018 年 10 月から 2019 年 12 月にかけて観測し取得されたもので、各ガンマ線源の位置決定誤差領域内に検出された天体の光度の時間変動評価を行った。そして Tomo-e Gozen で検出された 599 個の同定済ブレーザーとそのほかに検出された天体の変動の大きさの違いを評価し、ブレーザー候補天体の選定基準を定めた。その上、Tomo-e Gozen で観測された未同定ガンマ線源の位置決定誤差領域 286 領域に選定基準を適用しブレーザー候補天体の選定を行った。光度変動に加えて天体の標準的な明るさや色も加味した結果、未同定ガンマ線源において 5 個のブレーザー候補天体が選定された。これらについて分光スペクトル等を調べたところ、2 つはブレーザーと異なる天体として決定されたが、残り 3 つは決定されておらず、今後分光追観測などによりその天体の正体を決定づけたいと考えている。

Galactic Chemical Evolution of r-process Elements

Constraints of their Astrophysical Sites on Core-Collapse Supernova, Neutron-Star Merger and Collapsar

35186135 山崎 雄太

Abstract

R-process produce a half of heavy elements in the universe. However, its detail process is still not clear since r-process proceed by capturing neutrons so rapidly. Its astrophysical site is also under-debate although some candidates, such as core collapse supernovae, neutron star merger and collapsar, have been discussed for decades. To investigate this open question, many calculation of chemical evolution have been done. Both of observation and theoretical calculation, however, have so large uncertainty that the debate is still not settled. In previous studies, abundance of only Europium is discussed, since all or most r-process elements are assumed to be synthesized by one astrophysical event in order to reproduce r-process 'universality' and they evolve in the same way. We calculated a one-zone galactic chemical evolution of abundance pattern over whole range of r-process elements as a function of time by taking account of two types of core collapse supernovae, neutron star merger and collapsar simultaneously. We suggest that 'universality' can be satisfied even if both of multi-astrophysical sites contribute to r-process abundance. The NSM model dominated by wind-ejecta, where only weak r-process occur, is preferred from our calculation.

Development of a new N-body simulation code for globular clusters with binary stars

(連星を含む球状星団のための新しいN体計算コードの開発)

35-186136 吉成 直都

Abstract

Globular clusters are one of possible formation sites of binary black holes (BBHs) which coalesce due to the gravitational wave emission. In dense star clusters, three-body encounters drive the dynamical formation of hard BBHs. However, N-body simulations of globular clusters with a realistic number of particles (more than one million) is still difficult. One reason is the calculation cost of direct summation of gravitational force among stars, because it is $O(N^2)$. In order to solve this problem, we adopt a particle-particle particle-tree (P³T) method (Oshino et al. 2011, Iwasawa et al. 2015, 2017), in which force from distant particles is calculated using a tree code ($O(N\log N)$ calculation cost), while that from neighbor particles is directly calculated. The other reason for the difficulty of globular-cluster simulations is long timescale of globular clusters (>10 Gyr) compared with the orbital period of binaries (< 1 day). To overcome this problem, we developed a new code, "P³T-DENEb," combining P³T scheme with an algorithm for binaries, GORILLA, which treats the orbits of isolated binaries as two-body problem (Tanikawa and Fukushige 2009). Our code is MPI parallelized, and test calculations have been done using a CPU cluster. With 10^6 particles, the calculation speed of P³T-DENEb is about 100 times faster than that of a direct N-body simulation code with GORILLA. The parallelized calculation scaled up to 10^3 cores in the case of 10^6 particles. We also performed N-body simulations of globular clusters with a mass function over core collapse with maximum 4096 particles. We confirmed the energy conservation and the formation of hard binaries in globular clusters.

ALMA を用いた分子吸収線観測で探る希薄な分子ガスの物理・化学状態

学生証番号 35-186137: 吉村 勇紀

星間空間においてこれまでに 200 を超える分子が検出されている。これらの分子の存在量、すなわち分子化学組成は、分子ガスが収縮し星形成に至るまでの分子雲の物理的進化と深く関係している。このことから、特に銀河系内の様々な環境・星形成段階の分子雲に対して、主に電波域の分子輝線観測が行われ、その多様な化学状態が明らかにされてきた。一方で、分子輝線が観測されないような希薄な分子ガス ($n_{\text{H}} \lesssim 10^3 \text{cm}^{-3}$) は、そのような星間空間の分子化学組成進化のいわば初期条件として重要であるにも関わらず、観測的研究は限定的であった。ここでいう希薄な分子ガスとは、分子輝線を出すほど衝突励起が卓越しないため、一般に明るい電波源を背景光源とした分子吸収線系を観測する必要がある。つまり、電波源が存在する非常に限定的な視線方向しか観測できず、またそもそもこれまで知られている分子吸収線系の数自体が非常に限られていることが、観測的研究を困難にしている一因であった。ALMA 本格稼働以前の研究では、希薄な分子ガスは極めて普遍的な分子化学組成を持つことが指摘されていたが、そのような普遍性が実際に成り立っているか否か、より大きな統計で議論する必要がある。そこで本論文では、ミリ波・サブミリ波帯で最も感度が高い望遠鏡である ALMA の観測データを用いて、分子吸収線系の大規模かつ高感度な探査を行った。

まず、ALMA で本天体の観測と同時に頻繁に取得されている、データ較正用のクエーサー観測データに着目し、潜在的な分子吸収線系を検出すべく、大規模な探査を行った。このためにデータ・取得から解析まですべて自動的に行うプログラムを作成し、ALMA 公開データのうち、702 個のクエーサーの 2000 個を超える観測データの解析を行った。結果、これまでに見つかっていなかった新しい銀河系内分子吸収線系を 45 個検出することに成功した。これにより、銀河系内吸収線系の数を 2 倍以上増加させた。検出された分子の柱密度 $N(\text{HCN})$ や $N(\text{HCO}^+)$ は、これまでの先行研究の範囲と一致し、分子化学組成比について、確かに普遍性が成り立っていることが示唆された。一方これまで希薄な分子ガスは全くあるいはほとんど存在していないと考えられていた、 N_2H^+ や CH_3OH といった分子も、特定の分子吸収線系から検出された。この系の近傍には超新星残骸が位置しており、超新星残骸の周囲の宇宙線や星間衝撃波が分子化学組成に何らかの影響を与えている可能性がある。このように希薄な分子ガスの分子化学組成は、ある種の普遍性に加えて、局所的な天体現象や物理環境も影響を与えることが考えられる。

一方で分子吸収線系には、検出感度が天体までの距離とは無関係で、背景光源の明るさのみに依存するという性質がある。これにより銀河系内のみならず、非常に遠方の天体の希薄な分子ガスの研究も可能である。本研究では、宇宙史を直接さかのぼってリチウム存在量の測定を行うという観点から、 $z = 0.68$ にある B0218+357 という分子吸収線系に対して、水素化リチウム分子吸収線の観測を行った。これは論文提出者自らが立案・提案し採択された ALMA 観測プログラムに基づく。結果、水素化リチウム分子の存在量に強い上限値 ($N(\text{LiH})/N(\text{H}_2) < 4 \times 10^{-12}$) を与えた。これは水素化リチウム分子の気相中での生成が非効率であるか、あるいはダスト上に降着し気相中での存在量が小さいか、いずれかの可能性を示唆している。また、同じ観測で検出された H_2S 分子吸収線から H_2S の存在量を求め、宇宙論的遠方において H_2S の ortho/para 比を初めて測定した。得られた ortho/para 比 2.9 ± 0.1 は統計的重みの 3 と一致し、ダスト上での ortho/para 変換反応の寄与が小さいと解釈できる。

本論文では、まず銀河系内の分子吸収線系を新たに多数検出したが、これは希薄な分子ガスの分子化学組成を研究していく上で、ALMA による追観測も見据えた非常に重要なサンプルとなる。また、本論文は ALMA の高い感度を活かし、銀河系にとどまらず、宇宙論的遠方においても様々な分子の物理・化学量の測定を行っている。今後はこのような ALMA の公開データと観測提案を通した PI 観測の組み合わせが、希薄な分子ガスの分子化学組成を調べる上で、鍵となる手法になるであろう。