

平成29年度

修士論文発表会

論文要旨集

平成30年2月8日(木)、9日(金)

Diverse chemical compositions of UV-irradiated interstellar molecular gas investigated with emission and absorption line observations

(輝線と吸収線で探る紫外線に照らされた星間ガスの多様な分子化学組成)

学籍番号：35-156115

氏名：安藤亮

Abstract

Observational study of interstellar molecular gas provides us a lot of information about the nature of galaxies, and especially diffuse and dense molecular gas components are of great interest. In this thesis, we investigate the physics and chemistry of diffuse and dense molecular gas in two contrastive ways; absorption and emission line observations. Making the best use of the power of Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA), we conduct (1) the search for molecular absorption lines of diffuse gas on the line-of-sight toward ALMA calibrator sources and (2) the multi-transition analyses of molecular absorption lines in Galactic diffuse media, while we also look into dense molecular gas by (3) the molecular-cloud-scale observation of emission lines from various molecules in the heart of the nearby starburst galaxy NGC 253.

In (1), we search the spectra of the bandpass and complex gain calibrators of ALMA for new molecular absorption systems, in which molecular absorption occurs along the line-of-sight toward a radio-loud-quasar. Out of the 36 calibrator sources we analyze, we successfully detect absorption lines originated from Galactic diffuse molecular gas toward four sources, three of which are newly-detected molecular absorption systems. In addition, we find the absorption lines of HCO and the elevated HCO to H^{13}CO^+ column density ratios toward two objects, suggesting that the observed diffuse media are in photodissociation regions (PDRs), which observationally illustrates the chemistry of diffuse gas driven by ultraviolet (UV) radiation.

In (2), we conduct the follow-up observations of three newly-detected molecular absorption systems in the search above, which result in non-detection of any absorption line. Combining the upper-limit of higher transitions ($\lambda = 1.2$ mm) and the data in lower transitions ($\lambda = 3$ mm), we constrain the excitation temperatures of multiple molecules in Galactic diffuse medium to below 10 K, in spite of their PDR-like chemical states. From above, we confirm the validity of widely-accepted assumption that such diffuse molecular gas is in equilibrium with the cosmic microwave background. The molecular abundance patterns seem to be similar in Galactic diffuse gas and nearby active galaxies observed with a kpc-scale beam, suggesting that such a large-scale view of external galaxies would be smeared out by the diffuse molecular gas component therein.

In (3), we present an $8 \text{ pc} \times 5 \text{ pc}$ resolution view of the central $\sim 200 \text{ pc}$ region of the nearby starburst galaxy NGC 253, based on ALMA $\lambda = 0.85$ mm band observations. We resolve its nuclear starburst into eight dusty star-forming clumps, 10 pc in scale, for the first time. Despite the similarities in sizes and dust masses of these clumps, their line spectra vary drastically from clump to clump although they are separated by only $\sim 10 \text{ pc}$. Specifically, one of the clumps exhibits line confusion-limited spectra with at least 36 emission lines from 19 molecules and a hydrogen recombination line, while much fewer kinds of molecular lines are detected in some other clumps where fragile species completely disappear from their spectra. We demonstrate the existence of hot molecular gas in the former clump, which suggests that the hot and chemically rich environments are localized within a 10-pc scale star-forming clump.

In addition to the physical and chemical states of diffuse and dense molecular gas we reveal in the absorption and emission studies above, we claim the significance of the observations of external galaxies with a molecular-cloud-scale resolution, namely pc-scale beam. Considering the similarity of molecular properties in Galactic diffuse gas and nearby active galaxies observed with a kpc-scale, and the drastically diverse star-forming activities among the 10-pc-scale clumps in the heart of NGC 253, observations of external galaxies have to be performed with a pc-scale resolution, which can resolve an individual molecular cloud, if we are to look into the detailed nature of molecular gas therein.

ALMAによる原始星 L1448-mm の星周構造の観測

学籍番号 35156121

黒瀬一平

平成 30 年 1 月 29 日

原始惑星系円盤は星形成における副産物であり、円盤の力学的進化の過程を明らかにすることは、星形成から惑星系、ひいては我々の太陽系の形成過程を理解する上で重要である。原始星における円盤形成過程に関しては、Class I 段階では既に 100AU を越えるケプラー円盤が存在することが観測されるなどして徐々に明らかになってきたが、Class 0 に関するサンプル数はまだ多くなく、回転円盤の発生過程は観測的には明らかになっていない。そこで本研究は原始星初期段階の L1448-mm (Class 0, $T_{\text{bol}}=69\text{K}$) を ALMA Cycle 1 にて観測した。L1448-mm はペルセウス座分子雲内に存在する非常に強力な分子流が特徴の原始星である。本研究は 1.3mm 連続波, $\text{C}^{18}\text{O}(J=2-1)$ の観測結果と、それらより導かれる原始惑星系円盤の回転に関する力学に関する報告から成る。空間分解能は $\sim 0''.4$ 、速度分解能は 0.17km/s である。

1.3mm 連続波は中心星から半径 20AU の東西に引き伸ばされた構造を検出することができた。このような円盤の形状に由来する構造の他にも、南北に延びた構造も見られ、分子流の影響を受けていることも確認できる。又この天体は連星系であることが知られ、本観測でも主星から南東方向に $7''$ 離れた伴星を確認することができた。連続波から見積もったダスト質量はそれぞれ $M_{\text{dust}} = 1.9 - 5.8 \times 10^{-2} M_{\odot}$, $1.7 - 5.0 \times 10^{-3} M_{\odot}$ である。

円盤周囲のガスを捉えているとされる C_{18}O は円盤長軸方向に速度勾配が認められ、これより円盤の回転成分をトレースしている。さらに C^{18}O に関して円盤の長軸方向の PV 図を解析した。回転曲線による χ^2 フィットの結果から、L1448-mm では角運動量保存による回転が今回の ALMA による観測可能なスケールまで続いており、中心星周囲 50 AU より外側にはケプラー円盤が存在しないことが分かった。さらにこのガスの分布に関してモデルフィッティングから、観測領域の半径-回転速度から中心星質量の上限を仮定すると、インフォール速度が自由落下のおよそ 0.3 倍と設定することで観測されたガス分布をよく再現できることが分かった。角運動量保存によるインフォールの回転速度が自由落下速度よりも遅い事例は他の原始星周囲でも観測されており、その理由に関しては磁気張力によるブレーキ等が考えられる。

Gravitational Instability of a Dust Layer Composed of Porous Silicate Dust Aggregates in a Protoplanetary Disk (原始惑星系円盤中の多孔質ケイ酸塩ダスト集合体で 構成されるダスト層の重力不安定性)

35-156124

辰馬 未沙子

Planetesimal formation is one of the most important unsolved problems in planet formation theory. In particular, rocky planetesimal formation is difficult because silicate dust grains are easily disrupted when they collide. Recently, it has been proposed that they can grow as porous aggregates when their monomer radius is smaller than ~ 10 nm, which can also avoid the radial drift toward the central star. However, the stability of a layer composed of such porous silicate dust aggregates has not been investigated. Therefore, we investigate the gravitational instability of this dust layer. To evaluate the disk stability, we calculate Toomre's stability parameter Q , for which we need to evaluate the equilibrium random velocity of dust aggregates. We calculate the equilibrium random velocity considering gravitational scattering and collisions between dust aggregates, drag by mean flow of gas, stirring by gas turbulence, and gravitational scattering by gas density fluctuation due to turbulence. We derive the condition of the gravitational instability using the disk mass, dust-to-gas ratio, turbulent strength, orbital radius, and dust monomer radius. We find that, for the minimum mass solar nebula model at 1 au, the dust layer becomes gravitationally unstable when the turbulent strength $\alpha \lesssim 10^{-5}$. If the dust-to-gas ratio is increased twice, the gravitational instability occurs for $\alpha \lesssim 10^{-4}$. We also find that the dust layer is more unstable in disks with larger mass, higher dust-to-gas ratio, and weaker turbulent strength, at larger orbital radius, and with a larger monomer radius.

時間変動する天体现象を研究するタイムドメイン天文学は、可視光ではこれまで分～年単位の現象については様々な観測が行われてきたが、秒単位のタイムスケールは CCD の読み出し速度の限界から技術的に限界があった。そこで東京大学木曾観測所の 105cm シュミット望遠鏡を CMOS カメラで覆う計画 (Tomo-e Gozen) が現在進行しており、これにより 1 フレームあたり 0.5 秒の読み出し時間で約 20 平方度を同時に撮像するという超広視野高速撮像サーベイを実現できる。

視野を約 1.92 平方度に限定した試作観測データのふたご座領域には散開星団 M35 があり、若い主系列星による天体现象が期待される。ふたご座領域を 4 視野、合計約 8 平方度について 200 秒間 (400 フレーム) のデータを 1 セットとして 2 セット分解析した。1 フレームあたり 0.5 秒で撮像されているため、タイムスケールとしては数秒から数十秒の変動が存在した場合、検出が期待される。

検出の手法は相対測光を用いた。画像内で明るさの変動が無く安定していると思われる参照星を決定し、その参照星とオブジェクトのカウント値の比を取ることによってオブジェクトが変動しているかどうかを調べた。1 つの領域はセンサ毎に 8 分割されているため、その 1 センサに対応する ($0.66 \times 0.363 \sim 0.24$ 平方度) ごとに参照星を探した。画像内で大気の影響が距離に依存しなければ、画像内のどこから参照星を選んででもよくなるため、まずは大気の影響が分割領域内で同程度かどうかを調べた。まずは画像内の星を SExtractor によって検出し、その後検出された星から任意の 2 つの星を選び出して 1 セット分 200 秒間におけるカウント値の比の変動 (RMS) を求めた。例えば 500 個の星が画像内にあれば、 ${}_{500}C_2 \sim 12$ 万通りの比の RMS と距離を計算した。これを図示した結果、ほとんどの画像内で RMS と距離の相関関係は小さいことがわかった。また相関関係がある場合は総じて天気が良く RMS が 1% を切るような組み合わせが出現する場合であり、天気が多少悪い場合でもおよそ 1200 秒 (~ 0.33 度) を境 1.5% 程度に止まり、距離が離れても RMS の下限は悪くならないことがわかった。そこでひとまずは距離を考慮に入れず、画像内の星で明るい上位 70 個についての安定性を調べた。こうして画像毎に 3 つを参照星として選び画像内の全ての星に対して相対測光をした。その後、星のカウント値と変動比の相関関係から星自身が変動していると思われる物を個別に調べていった。

結果として約 3 万天体を測光し、そのうち約 1 万の星について相対速攻を行った。数秒～数十秒のタイムスケールで明らかに変動していると思われる天体は見つからなかったが、変動比の RMS が同程度の明るさの星に比べて高く出ているものが複数個あったため分類した。今回の解析から、今回は見つからなかったが 400 フレームの RMS が 0.5% 程度変動した場合 (例えば 10 秒間 10% の変光) を容易に検出できる。また天気などの条件が良い場合は参照星を変えることで、0.1% 程度まで検出できることがわかった。

論文題目

スパースモデリングによる 原始惑星系円盤 HD 142527 の超解像イメージング

学生番号: 35-166122

氏名: 山口正行

概要

近年の ALMA 望遠鏡の観測によって、原始惑星系円盤（以下、円盤）の内部構造に複数のギャップ構造や非軸対称な構造が数多く発見され、惑星形成過程の理解が急速に進んでいる。このような高分解能サブミリ波観測は、ギャップ構造を形成する惑星質量の見積もりや、ダストの集積機構の解明等で必要不可欠である。特に高品質な画像復元の処理を行い、そこから正確な輝度分布やギャップ幅の見積もりを行うことが望ましい。ALMA 望遠鏡をはじめとする電波干渉計では、観測データのイメージングで主に CLEAN(以下、従来法)と呼ばれる手法が用いられてきた。これに対して近年では、電波干渉計の新たなイメージング手法であるスパースモデリングが注目されている。スパースモデリングとは「得られる解がある基底で疎になる」という仮定の下で解を推定する手法で、従来法では解けない電波干渉計の劣決定問題を適切に解くことができる。本手法は従来法の約 3-5 倍という高い実効分解能を達成できることが観測シミュレーションで示されており、ALMA の実効分解能を大幅に改善する可能性がある。一方で、その性能評価は主に観測シミュレーションに留まっており、実観測データを用いた評価は行われていなかった。

そこで本研究は、より詳細な円盤構造に空間分解することを目標として、スパースモデリングを ALMA で観測された円盤の観測データに初めて応用し、従来法との比較も含めて超解像イメージングの性能評価を行なった。検証天体として原始惑星系円盤の代表的天体である HD 142527 を選択した。この天体は ALMA によって様々な観測が行われており、同じ周波数帯で異なる最大基線長(空間分解能)の観測データが存在するため、超解像イメージングの性能の評価に最も適している。検証の結果、超解像領域で従来法は人工的な円盤構造を多く作り出す一方、スパースモデリングは高分解能観測データの円盤構造により近いイメージを復元した。ALMA の装置性能による輝度の測定誤差はおよそ 10% であるが、スパースモデリングの超解像イメージと高分解能観測データのイメージの残差は 10% 未満となり精度内に収まった。従って、本研究はスパースモデリングが従来法の約 3 倍の空間分解能においても高品質なイメージを復元できることを ALMA の実観測データで初めて実証した。さらに高分解能観測データを用いたスパースモデリングの超解像イメージングを行なった結果、外側円盤の $PA = -120^\circ \sim -130^\circ$ 付近に円盤の切れ目を初めて確認し、その先端は円盤内側に向いていることを明らかにした。

重力レンズ効果の高解像像復元と 高赤方偏移爆発的星形成銀河の観測的研究

学生証番号 35-166106 石田剛

宇宙史の中で最も星形成が活発な $z \sim 2$ の時代において、分子雲内で起こる星形成活動のメカニズムを調べるには、強い重力レンズ効果を用いた観測が非常に重要となる。しかし既存の像復元手法では、多重像の区別なく像復元を行なっていたため、ソース平面上で実効的な解像度が落ちていた。これは宇宙論的遠方で分子雲スケールまで空間分解する際に、大きなネックとなる。

そこで本論文では、電波干渉計のイメージングで用いられるデコンボリューション手法の一つ、CLEAN に着想を得て、逐次的に多重像を同定しつつ像復元をする、新しい像復元アルゴリズム GLEAN を開発した。GLEAN は GLAFIC を用いて重力レンズ効果のモデリングをしつつ、多重像を独立に像復元するため、ソース平面上における異なるビームの重なり合いを防ぎ、従来手法の直接変換よりも実効的な解像度が向上する。そこで `glean` を $z \sim 3.0$ にある SDP.81 に適用し、先行研究の像復元結果と比べたところ、無矛盾な結果が得られ、かつ実効的な解像度の向上を確認できた。

また、既存の SDP.81 の Band 7 連続波、および CO(5-4)のデータに加え、2015 年に我々が ALMA に提案した SDP.81 の [CII]データを GLEAN および GLAFIC を用いてモデリングした。Band 7 連続波のデータからソース平面上で 18 のクランプを同定し、それらが Eddington limit に近い爆発的星形成をしていることを明らかにした。一方、連続波および CO では見えてこなかった、[CII]特有の空間/速度構造を見出し、それが球殻上に膨張するアウトフローである可能性を示唆した。

さらに 2016 年に我々が ALMA で観測した、 $z \sim 1.6$ にある重力レンズ効果を受けた銀河、SDP.9 の CO(6-5)データから、前景銀河の質量分布およびソース平面をモデリングした。SDP.9 の CO は ordered rotation で説明可能な一方、HST で見えている星成分とは明らかに異なる空間分布をしていることがわかった。これは CO でトレースされる領域の dust obscuration, あるいは merging による tidal tail によって説明が可能である。星成分とダスト/ガス成分のオフセットは SDP.81 にも見られる特徴であり、この時代の銀河に共通な性質である可能性がある。

本論文中で解析を行なった SDP.81 および SDP.9 を除いて、 $z \sim 2$ で < 100 pc スケールまで分解されている例はほぼ存在しない。近傍銀河と同じスケールで星形成活動を比較し、宇宙史を通じた銀河形成を議論するためにも、今後このようなサンプルを ALMA による観測で構築していくことが重要となる。GLEAN はその観点で非常に強力なツールとなりうる。

可視高速周期変動天体探査のための Crab パルサーの試験観測

一木 真

学生証番号 35-166107

概要

従来の可視光での光度変動天体の探査は、CCD センサの読み出し時間などの制約により数時間スケール以上のものを対象とすることがほとんどである。

東京大学木曾観測所で開発中の Tomo-e Gozen カメラは、CMOS センサで木曾 Schmidt 望遠鏡 (口径 105cm) の焦点面を覆うことで広い視野と高い時間分解能を実現し、可視光による秒スケール以下の光度変動現象のサーベイ観測を可能にする。

本研究では、Tomo-e Gozen カメラの試験機を用いて、パルサーに代表される高速で変動する周期的な天体についての Tomo-e Gozen の観測能力を定量的に調べた。

観測対象として、既知のパルサーの中でも極めて明るい Crab パルサー (周期 ~ 33.7 msec) を約 6 分間、時間間隔 ~ 6.45 msec で連続撮像したデータを用いた。Crab パルサーは 1 回の撮像データからも 6 分間の足し合わせの撮像データからも検出が困難であった。そこで時間方向に折り畳んで重ねるのに適切な周期を探査し、実際に重ね合わせることで、 ~ 33.738 msec 周期による 100 回分 (0.6 sec) の折り畳みでパルスの S/N 比=8 を、1000 回分 (約 6 sec) の折り畳みによって S/N=22 を実現した。

ここから、完成した Tomo-e Gozen カメラのサーベイ能力を計算すると、10 晩 \times 4 季節の観測によって、Crab パルサーと同様の明るさや周期を持つ天体に換算した際におよそ 4 kpc の深さまでを 3800 平方度を探査できることがわかった。

Development of a new method to search for proto-clusters 原始銀河団探査における新手法の開発

入倉和志
35-166109

宇宙の中で最も重い自己重力系である銀河団は、宇宙の大規模構造をなす骨格の一つとして、また、銀河の環境依存性のメインファクターとして、古くから精力的に研究されてきた。とりわけ近年では、比較的様々な手法によって銀河団探査を行うことができる $z \lesssim 1$ だけでなく、銀河団そのものや、銀河団に特有のメンバー銀河の進化を追うという観点で非常に重要である $z \gtrsim 2$ でも原始銀河団の探査が行われるようになってきた。

このような遠方における原始銀河団探査は、QSOs, Radio Galaxies (RGs), SMGs (SubMillimeter Galaxies) などを目印にその周辺で銀河の密度超過を探す方法や、単純に LBGs (Lyman-Break Galaxies), LAEs (Lyman-Alpha Emitters) の密度超過に着目する方法によってなされている。しかし、このような原始銀河団探査は、いずれも当時の銀河団の virial 半径よりずっと大きな半径で密度超過を測っており、環境依存性が最も顕著に現れると考えられる、 $z = 0$ で銀河団になっている可能性の高い「その時代における最も重い virial halo」を確実に見出すには不向きだった。

本研究では、原始銀河団探査として「 $z = 0$ でダークマターハローの質量 M_{DH} が $M_{DH} > 1 \times 10^{14} M_{\odot}$ の銀河団になっている可能性の高い、 $z = 2 - 3$ におけるもっとも重い virial halo」を見出す手法を提案し、実際に原始銀河団探査を行った。 Λ CDM モデルによれば、この質量の銀河団の祖先は $z = 2 - 3$ では典型的に $M_{DH} \gtrsim 2 \times 10^{13} M_{\odot}$ である。また、得られた原始銀河団候補がもっともらしいかを3つの側面から確かめた。見つかった原始銀河団の個数密度は、 $z = 0$ の銀河団の個数密度と比較的よく一致し、 M_{DH} はクラスタリング解析から $M_{DH} \sim 2 \times 10^{13} M_{\odot}$ と求められた。原始銀河団候補の銀河の3次元密度超過は $\delta_{3d} \sim 60$ 程度で、不定性の範囲で理論的に予測される virial halo の密度超過と一致した。さらに我々は同じ領域において行われた先行研究と比較し、より complete に原始銀河団を選び出すことに成功していることを確かめた。

miniTAO/ANIR の観測に基づく Wolf-Rayet 星の星風モデルの研究

学生証番号: 35-166110

大澤 健太郎

概要

ウォルフ・ライエ (WR) 星は初期質量が約 $30 M_{\odot}$ 以上の大質量星の終末期であり、激しい質量放出をしている。WR 星の質量放出は、金属量と紫外線光子数が重要な役割を担う line-driven wind によって駆動されると考えられている。WR 星は質量放出によって水素層がほぼ除去されており、ヘリウム・窒素・炭素といった核融合生成物の輝線が現れる特徴的なスペクトルをもつ。スペクトル中に現れる輝線と輝線強度比によって WR 星はサブタイプ (WN 星、WC 星、WO 星) とサブクラス (WNE 星、WNL 星、WCE 星、WCL 星、Ofpe/WN9 星等) に分けられる。星の有効温度によってサブクラスに分けられる主系列星と異なり、輝線強度比によってサブクラスに分けられる WR 星は同一サブクラス内においても K_S 絶対等級に 2 等級程度の大きな分散が存在する。この原因が、星の半径や有効温度等の星自身の物理量の違いに依るのか、質量放出率や星風速度等の星の星風の物理量の違いに依るのかは明らかでない。

本研究では miniTAO/ANIR による銀河中心の 3 つの大質量星クラスターの撮像観測データを用いた。3 つのクラスターは the Galactic Center cluster, the Quintuplet cluster, the Arches cluster であり、WNL 星と Ofpe/WN9 星が多く存在する。そして the Arches cluster の WNL 星に対して $1.87 \mu\text{m}$ フラックス超過と K_S 絶対等級の間に良い相関が得られている。そこで星とその星風の簡単なモデルを作り、 $1.87 \mu\text{m}$ フラックス超過と K_S 絶対等級の間の相関について、3 つのクラスターに存在する WNL 星と Ofpe/WN9 星の 2 つのサブクラスの天体について定量的に議論した。WNL 星と Ofpe/WN9 星はともに、星の半径と有効温度は同一サブクラスでは共通で、質量放出率等の星風の物理量は天体毎に異なるモデルで説明が可能であり、Ofpe/WN9 星の方が WNL 星よりも半径の大きな星であるという結果が得られた。この結果から、Ofpe/WN9 星は WNL 星より進化の前段階にある星であるか、または Ofpe/WN9 星は WNL 星より初期質量が大きいことが考えられる。また、本研究の結果から、WR 星の同一サブクラスにおける K_S 絶対等級の分散は星風の物理量の違いを反映したものであることが示唆される。さらに、ほぼ同一のサブクラスの星が様々な質量放出率をもつという結果から、WR 星の質量放出には紫外線光子数と金属量以外に重要な要因が存在することが示唆される。

LIRG の空間分解した星形成活動

大橋宗史

(東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻)

35-166111

特定の赤方偏移における銀河の大規模サンプルを構築し、統計的な議論を行うことで銀河の普遍的な性質を探ることは極めて重要な研究手法の1つである。このような研究の中で発見された性質の1つとして、銀河の質量と星形成率の間の相関である Star Forming Main-Sequence (SFMS) がある。SFMS はこれまでに様々な波長、様々な赤方偏移で調べられてきた。そもそも星形成活動とは様々なスケールの物理の組み合わせである。そこで近年、星形成を担う物理機構の解明に向け、近傍銀河を空間分解した観測が精力的に行われている。その結果、銀河を 1kpc 以下のスケールに空間分解した場合でも、星質量面密度と星形成率面密度の間の相関（空間分解した SFMS）が存在していることが明らかになってきた。しかし近傍で最も激しい星形成活動を行っている赤外線光高度銀河 (Luminous Infrared Galaxy, LIRG) では大量のダストが存在するために減光が激しく可視光での観測および解析が困難であり、一方で赤外線などの減光に強い波長帯では空間分解能を稼げないため、これまで空間分解された SFMS についての研究が無かった。そこで我々は水素再結合線の $\text{Pa}\alpha(\lambda 1.875\mu\text{m})$ を用いることでそれらの課題を克服し、LIRG における空間分解された星形成活動を調べた。

結果、LIRG は global な性質として近傍銀河の SFMS よりも SFR の高い側に offset しているだけでなく、空間分解した SFMS もまた、近傍銀河のものよりも SFR の高い側に offset していることが明らかになった。さらに LIRG のサンプルを相互作用を及ぼし合っているものと、単独で存在しているもの (interacting LIRG と isolated LIRG) に分類したときに specific SFR ($=\Sigma_{\text{SFR}}/\Sigma_{M_*}$) が interacting LIRG では $\log s\text{SFR} = -9.35$ であるのに対し、isolated LIRG では $\log s\text{SFR} = -9.58$ と、約 0.2 dex の差が存在していることが明らかになった。また質量光度比の色依存性や減光の影響を考慮すると、その差がさらに 0.5 dex 以上大きくなることが示唆された。さらに、これらの interacting LIRG について、ALMA による空間分解された分子ガス面密度を調べたところ、SFE ($=\Sigma_{\text{SFR}}/\Sigma_{\text{gas}}$) が $\log \text{SFE} = -8.1 \pm 0.5$ と、近傍 normal 銀河の SFE よりも 1 dex 以上高くなっており、normal と starburst という bimodal な star forming law の存在を示唆する結果となった。

また、 $\text{Pa}\alpha$ の電離源を調べた結果、バルジ領域では post-AGB などの星形成活動由来ではない電離源の存在が示唆された。一方で、AGN 銀河については中心部で negative feedback の兆候が見られるものの、中心以外の領域では星形成活動が支配的であることが示唆された。

今後は LIRG に対する可視近赤外線の面分光観測を行うことで、個々の領域における減光量や水素再結合線の電離源を詳細に探り、より正確に星形成活動を捉えるだけでなく、電波干渉計による観測により空間分解した分子ガスの情報を取得することで、激しい星形成を行っている天体における星形成活動の物理を解明していく必要がある。

2005 年 7 月に打ち上げられた X 線天文衛星「すざく」の、2015 年 10 月までに公開された 2516 観測のアーカイブデータ（全天の 0.4% をカバー）を解析することにより、1156 の天体が発見された (Yamasaki 2016)。しかし、これらの天体の特性は不明であり、種別の同定も未だ為されていなかった。

そこで我々は、これらの新天体のうち、特に光度変動が顕著であった 11 天体を対象として、詳細な解析を実行した。X 線ライトカーブにおいて、恒星フレアに特有の急激な増光と指数関数的な減衰が見られた天体については、これに合致する関数形でライトカーブフィッティングを行い減衰タイムスケールを求めた。変動に周期性の徴候が見られた天体については、詳細な周期解析を行い、周期を 2910 ± 70 秒と確定した。また、全 11 天体について冪乗型および熱的モデルによるスペクトルフィッティングを行った。さらに、「すざく」より位置分解能にすぐれた X 線天文衛星 Swift で追観測を行い、検出できた 2 天体については、「すざく」より正確な座標を算出した。また、SIMBAD、2MASS、DSS、SDSS のデータを利用して、可視赤外天体との照らし合わせを行った。また、典型的なフレアとは異なるライトカーブを示した天体のうち一つについては「なゆた」望遠鏡によって地上可視分光観測を行った。

これらの解析から、11 天体の種別同定を試みた。9 天体については X 線ライトカーブの特徴が恒星フレアの場合に見られるものと一致したことから、アクティブな晩期型星であると考えられる。また、1 天体については X 線ライトカーブの特徴がフレアの場合に見られるものとは一致しなかったが、可視分光観測で得られたスペクトルの特徴から早期 K 型の恒星であると考えられる。また、1 天体については X 線光度に周期変動が存在したこと、およびエネルギースペクトルがハードであったことから、強い磁場を持つ白色矮星を含む連星系、中間ポーラーであると思われる。

Observational study of the dust species in a massive star-forming region based on infrared spectroscopy

赤外線分光に基づく大質量星形成領域におけるダストの観測的研究

35-166114

木村智幸

Abstract

In this thesis, we investigate the properties of dust species in a Young Stellar Object (YSO) candidates and a star-forming region based on infrared spectroscopic observations and discuss the interstellar environments of the objects. First we present a study of near- to mid-infrared (2.5–13 μm) spectra of two Galactic YSO candidates, which have been identified in serendipitous spectroscopy in the Galactic plane using the slit-less mode of the InfraRed Camera (IRC) on board *AKARI*.

Absorption bands of molecular species, including solid phase H_2O , CO_2 , CO , and possibly gas phase warm CO at 150 K are seen in the spectra towards both sources. In addition, organic ices and quite large column density of XCN ($2.1 \times 10^{-17} \text{cm}^{-2}$) are detected toward one object. These results from spectral analysis suggest that the objects are unlikely to be background stars, but likely to be YSOs. However, their SEDs are peculiar as YSOs since their peaks are located at around 4 μm , while usual YSOs show a peak at a much longer wavelength. Their spectral energy distributions (SED) are quite blue as YSOs and no FIR emission has been detected. Present SED models of YSOs cannot account for them.

Next, we present the results of the Subaru/COMICS observations of the central area of a Galactic massive star-forming region S106, where a single O type massive star IRS 4 is illuminating the bipolar-shaped HII region and PDR. We have obtained the images with the N-, Q- and narrow-band filters (N8.8, N11.7, Q18.8, Q20.5, Q24.5, UIR8.6, UIR11.2, and [Ne II]) and spatially resolved spectra in the N-band (7.5–13 μm) of the infrared sources of IRS 2, 3, 4, 5, 6, 7, and FIR located within the 30'' from IRS 4. In the N-band spectra, the major emission features are the UIR7.7, UIR8.6, UIR11.2 μm bands and [Ar III] 8.99 μm , [S IV] 10.51 μm , [Ne II] 12.81 μm lines. Since we carried out 2'' \times 40'' long slit spectroscopy, we can extract the spectra every a few pixels along the slit direction and examine the spatial variation of those band profiles within the slit places. It is suggested that the difference of the SED between sources is dominated by the influence from the central IRS 4. In IRS 5, closest to IRS 4, very faint UIR bands are detected compared to other sources probably because the strong hard UV radiation and stellar wind destroys PAHs. In other sources, the exposure to IRS 4 is the dominant factor of the change of UIR bands and atomic lines. On the other hand, the variation within a source is dominated by the local UV environment. The decrease of the UIR band emission and increase of $F_{[\text{Ar III}]} / F_{[\text{Ne II}]}$ at the center of IRS 3 and IRS 6 implies the UV emitter like YSOs are being formed there. The UIR bands can be used as a star-formation tracer.

ALMAによるClass I原始星L1489 IRSの観測的研究

学籍番号: 35-166115

氏名: 崔仁士

概要

低質量星形成過程における星周円盤の形成・進化は、惑星形成の初期条件を決定する上で重要な過程であるが、その詳細は未だよく理解されていない。その理由として、まさに円盤が形成され、成長していく段階にある原始星の周囲の力学構造がまだまだ明らかにされていないことが挙げられる。円盤形成・進化を解き明かすためには、個々の原始星を詳細に観測し、その力学構造を明らかにしていくことが重要である。

本修士論文では、星周円盤をもつClass I原始星L1489 IRSに対してALMAによる高分解能観測を行い、その力学構造の解明に挑んだ。観測はALMA Band 6 (230 GHz), Band 7 (345 GHz)でおよそ $0''.3 \times 0''.2$ の角分解能で行い、そのうち1.3 mm連続波、 $C^{18}O$ (2-1)輝線について詳細な解析を行った。 $C^{18}O$ (2-1)の形状、速度構造から、原始星L1489 IRSに付随する円盤ガスは、非軸対象な構造をしており赤方偏移側がより広がっていること、半径 $\sim 600 - 700$ au程度の広がりをもつこと、半径 $\sim 200 - 300$ auにギャップ構造をもつことが明らかとなった。一方で、1.3 mmダスト連続波は半径 ~ 300 auまで滑らかに連続的に広がっていることが示された。ガス円盤の半径を決定するために、 $C^{18}O$ ガスの回転速度の半径依存性を調べたところ、半径 $\lesssim 600$ auはケプラー回転する円盤であり、 $\gtrsim 600$ auより外側は角運動量を保存しながら落下する回転エンベロープであることがわかった。ケプラー回転速度から、天体の傾斜角を $i = 66^\circ$ を仮定することで、中心星の質量は $\sim 1.4 M_\odot$ と求められた。さらに、 $C^{18}O$ (2-1)輝線の幾何学的な構造から、ギャップを境とした内円盤と外円盤で長軸の方向が 15° 程度異なっていることが示唆された。これらの観測、解析結果から、L1489 IRSに付随するガス円盤は、半径200 au程度の内円盤と半径300-600 au程度の外円盤からなり、内円盤と外円盤で回転軸の向きが異なっている歪み円盤であることが示唆される。上記のようなギャップと歪みをもつ三次元円盤モデルを作成し、観測との比較を行ったところ、観測されたガスの幾何学構造、速度構造がよく再現され、L1489 IRSに付随するガス円盤はギャップをもつ歪み円盤であることが示された。

このような歪み円盤は、後から降着するガスの角運動量の向きが、すでに形成されている円盤の角運動量の向きと異なることにより形成されると考えられる。また、ギャップ構造は、ダスト円盤は連続的に分布していることから、円盤の温度が局所的に下がり、 $C^{18}O$ ガスがダストに凍りつくことで観測された可能性が考えられる。しかし、本研究では円盤の温度を局所的に下げる原因までは明らかにできておらず、ギャップの成因には議論の余地が残っている。観測されたエンベロープの回転速度から、 $i = 66^\circ$ を仮定すると半径600 auに落下するガスの比角運動量は $j = 4.3 \times 10^{-3}$ km/s pcと求まる。この比角運動量の値と、分子雲コアの初期の比角運動量分布を仮定し、重力のみを考慮したinside-out collapseモデルから分子雲コア内の比角運動量分布の進化を計算した結果から、天体の年齢は 8×10^5 yrと推定された。また、inside-out collapseモデルから計算される、 8×10^5 yrでの中心星質量は $1.7 M_\odot$ である。これは今回求められた中心星質量である $1.4 M_\odot$ や先行研究で求められた $1.6 M_\odot$ と大きく違う値である。このことから、L1489 IRSの進化はinside-out collapseモデルでよく説明でき、磁場による角運動量の抜き取りなどを強く受けていないことが示唆される。これは、L1489 IRSの円盤サイズが他のTタウ型星やClass I原始星と比べて大きいこととも矛盾しない結果である。

Galaxy Formation and Unsolved Problems in Cosmology:
the Cosmological Constant and Very High Energy Neutrinos
(宇宙論の未解明問題と銀河形成 – 宇宙定数と高エネルギーニュートリノ)

須藤貴弘 (学生証番号:35-166117)

In this thesis two topics of astrophysics and cosmology are studied, utilizing a cosmological model of galaxy formation and evolution. The first topic is the origin of the cosmological constant (Λ). The anthropic principle is one of the possible explanations for the Λ problem. In this work, the probability of finding the observed small cosmological constant, $P(<\Lambda_{\text{obs}})$, is calculated for the first time by using a realistic galaxy formation model. Assumption the standard flat distribution of prior probability per unit Λ , and proportionality between the number of observers and stellar mass, $P(<\Lambda_{\text{obs}})$ is found to be 6.7%. The effect of metallicity is also investigated; $P(<\Lambda_{\text{obs}}) = 9.0\%$ is found if life exists only in galaxies whose metallicity is higher than the solar abundance, and $P(<\Lambda_{\text{obs}}) = 9.7\%$ if the number of observers is proportional to metallicity. These probabilities are not extremely small, which indicates that the anthropic argument is a viable explanation. The second topic is gamma-ray and neutrino emission from star-forming galaxies by cosmic-ray interactions. In this work a new theoretical modelling of gamma-ray and neutrino emission from a star-forming galaxy is presented, in which physics of cosmic-ray production and propagation is taken into account, and the observed gamma-ray luminosities of nearby galaxies are reproduced well for a wide range of various galaxy types. Then this model is combined with the cosmological galaxy formation model to predict the cosmic background flux of high-energy gamma-ray and neutrinos. It is shown that star-forming galaxies produce about 20% of isotropic gamma-ray background unresolved by *Fermi*, and only 0.5% of high-energy neutrinos detected by IceCube. Even with extreme model parameters, at most 22% of the IceCube neutrinos can be explained. These results indicate that star-forming galaxies are disfavoured as the source of the IceCube neutrinos.

概要

自身の内部で水素燃焼を起こさない天体、「超低質量星」の理論的な研究は1960年ごろから行われてきた。ただし、その暗さから観測は困難であり、観測による発見は1990年代まで待つ必要があった。超低質量星は大きく分けて、質量が約13M_j以下の「浮遊惑星」と、質量が約13M_jより大きく約73M_j以下の「褐色矮星」に分類できる。褐色矮星は恒星ほどの質量を持たないためその内部で水素を燃焼できないが、年齢が若いうちに重水素を1次的に燃焼するため誕生後しばらくは明るく、観測がしやすい。また、浮遊惑星は重水素の燃焼も引き起こさないが、生まれてしばらくは重力収縮によって明るいため観測が比較的容易である。そのため、若い星形成領域や散開星団等での撮像観測が活発に行われている。燃焼超低質量星の形成過程は大きく分けて現状2つほどのプロセスが提唱されている。1つは惑星形成と同様に、原始惑星系円盤から形成され、重力散乱を経験して浮遊するに至ったというもの。2つめは、星と同様に分子雲コアから形成されたというもの。これらのうちどちらのプロセスが支配的であるのか、またこれらのプロセスがどのように複合的に作用しあって形成されてくるのかは現在でも多く議論が行われており、形成過程に決着は未だ付いていないのが現状である。潜在的にサンプル数が少ないことがこれらの原因であり、この議論に将来的に決着をつけるためにも、多数の領域でサンプル数を増やしていくことは重要である。先行研究 (Boundrealt et al. 2012) では、UKIDSS のデータリリースを用いて、散開星団 Praesepe の Mass Function を調査した。ただし、ここで用いられた天体は、質量が比較的大きなものに限られ、褐色矮星質量程度の質量関数までは求められていない。また、W.Wang et al. 2011 では、Praesepe 星団の中心付近のごく狭い領域で深い撮像観測を行っており、40M_j 程度の天体の質量関数までが求められている。そこで、今回はすばる望遠鏡主焦点搭載の撮像装置、Hyper Suprime-Cam を用いて、これまででない、視野の広さ (約 5.25 平方度) と撮像の深さを兼ね備えた観測を行うことで Praesepe のメンバー天体の mass function を求めた。その結果、褐色矮星領域の mass function は low-mass に向けて数が増加するような傾向を示すことが示唆された。今後 SED fit や分光観測を行うことによって、コンタミを取り除き、より正確な mass function を求めることが可能になる。

Quantum Mechanical Constraint on Carbon Fusion Reaction and Its Impact on Type Ia Supernovae

35-166120 森寛治

Abstract

Type Ia supernovae (SNe Ia) are a thermonuclear explosion of a carbon-oxygen white dwarf (CO WD). They play important roles as a standard candle in cosmology and a major source of iron group elements (IGEs) in the history of the Universe. In spite of their importance, the nature of progenitors of SNe Ia is still unclear. The most popular models of the progenitors are the single-degenerate (SD) and the double-degenerate (DD) scenarios. In the SD scenario, the progenitor is a binary system which consists of a CO WD and a non-degenerate companion. On the other hand, the DD scenario attributes the progenitors to WD-WD binary mergers.

Among the nuclear reactions which occur in CO WDs, carbon fusion is one of the most important reaction because of its lowest ignition temperature. However, cross sections in astrophysical energy of this reaction have not been measured. If there is an unknown resonance in the low-energy region, reaction rates will be enhanced.

In order to constrain an upper limit of the resonance, we adopt the Wigner limit, which is a fundamental limit on partial widths of the resonances. It is found that some of resonances which were introduced in previous works are too strong in terms of the Wigner limit. The largest resonant reaction rate the Wigner limit permits is $\sim 10^3$ times larger than a standard rate.

We adopt the enhanced reaction rate to the WD-WD mergers. Because the enhancement of the reaction rate leads to lower ignition temperature, off-center ignition of carbon fusion in merger remnants occurs more easily. Therefore, more CO WDs are converted into oxygen-neon-magnesium WD due to carbon burning, and accretion induced collapse (AIC) becomes more likely to happen. We estimate the event rate of AIC and SNe Ia that come from WD-WD mergers.

中間赤外線観測装置 MIMIZUKU における検出器システムの性能評価

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻 修士課程

学生証番号 35-166121

山口淳平

中間赤外線は星間空間に存在する固体微粒子の性質などを知る上で重要な波長帯であり、近年では大口径を持つ地上望遠鏡の登場により高空間分解能の観測が行える地上中間赤外線観測の重要性がますます高まっている。我々は TAO6.5 m 望遠鏡の第 1 期装置として中間赤外線観測装置 MIMIZUKU を開発しており、望遠鏡サイトの高い大気透過率と空間分解能を活かした観測を行うことが期待されている。MIMIZUKU は 2–38 μm の広い波長範囲を覆うために 3 種類の異なる検出器を搭載している。この内 6.8–26 μm の波長範囲は米国 Raytheon Company 製の Si:As IBC 型検出器 Aquarius が担当している。Aquarius は 2018 年現在で地上中間赤外線観測用の検出器としては世界最大の画素数を持つが、検出器のブロック層に起因する、入射光強度と周波数に依存する超過ノイズが発生することが知られている。本研究では Aquarius の性能評価試験を行い、超過ノイズを含めた検出器の複雑な特性を理解することで Aquarius の最適な駆動方法の検討を行った。

性能評価試験は Aquarius を MIMIZUKU に搭載して実験室において行い、暗電流、線形性、量子効率、読み出しノイズの各項目における評価を行った。その結果、観測から要求される性能と比較して、読み出しノイズを除いては良好な性能を示していることが分かった。また Aquarius の出力信号量とノイズの関係を調べたところ、出力信号量から予想されるノイズ量よりも実際の値が高くなるノイズの超過が確認され、解析によりこの超過ノイズは入射光強度と周波数に対する依存性を持つことが分かった。実際の観測における超過ノイズの影響を評価したところ、入射光強度の強い撮像観測では超過ノイズが無い場合に比べて感度が 3–6 割に低下すると見積もられた。しかし超過ノイズの依存性を利用し、観測の波長幅を狭くすることによる入射光強度の低減やチョッピング観測によるノイズの低周波成分の除去を行うことにより超過ノイズの影響を軽減でき、感度を 1.25–2 倍に改善することが可能となることが分かった。

本研究により MIMIZUKU での Aquarius の運用における最適な駆動パラメータを確立することができ、また Aquarius に発生する超過ノイズの特性とノイズの影響に対する対応策が得られた。本研究で得られた知見は MIMIZUKU の観測性能の向上に役立つだけでなく、今後の大望遠鏡による地上中間赤外線観測の発展に資するものとなる。

Jerome Pitogo de Leon

35-166337

Multi-color Simultaneous Transit Observations of Low Density Hot Jupiters

低密度ホットジュピターに対する多色同時トランジット観測

Abstract

While the Kepler space mission was responsible for most of planet discoveries, the majority of the ~523 planets with masses $> 0.5 M_J$ were discovered by ground-based surveys that are optimized to find giant planets in short-period orbits such as hot Jupiters. Follow-up observations of several hot Jupiters are required to better characterize the system and search for broad atmospheric features. Hot Jupiters remain prime targets for atmospheric studies thanks to their relatively large scale heights.

For this study, we used OAO/MuSCAT to conduct simultaneous multiband observations of several transiting systems with known low-density Hot Jupiters including HAT-P-12b, HAT-P-14b, and WASP-21b. Our goals are (1) to improve the transit parameters of these systems and (2) to search for broad spectral features such as Rayleigh scattering signature in the optical wavelengths. Our homogeneous analysis of transit light curves uses Bayesian modeling to determine the best estimates and Bayesian credible regions of the transit and systematics model parameters, taking into account the presence of correlated noise in the light curves.

The results of transit modeling are in general agreement with previous results. Careful analysis of transit depth variation in each band show a marked increase in the planetary radius from the red toward the blue ends of the visible wavelength range. In addition, to compare the observed data with a theoretical atmospheric model, we calculate a model spectrum for the first time for each planet considering two cases: (case 1) $1\times$ Solar; and (case 2) $100\times$ Solar metallicity clear atmospheres, assuming thermochemical equilibrium compositions and isothermal structures. Comparing the measured transit depths with the spectrum model for HAT-P-12b and HAT-P-44b help rule out stellar activity and site-specific systematics as the source of this variation. In addition, we obtained a broadband transmission spectrum in agreement with the atmospheric model of Sing et al. (2016) for HAT-P-12b, thus confirming the validity of our transit modeling approach.

To test the significance of (non-)detection of Rayleigh slope, a Monte Carlo fitting routine was performed to compute slopes directly from the marginalized transit depth distributions for each band. Results show that Rayleigh slope detection is marginal (1.5σ) for HAT-P-12b and (1.8σ) HAT-P-44b implying that the achieved photometric precision is not enough to robustly distinguish between the two atmospheric models. However, our modeling is useful to categorically rule out the possibility that the observed trend in WASP-21b spectrum is not atmospheric in origin within 2.8σ . Instead, the observed trend can be explained by unocculted spots on the surface of WASP-21 with a spot coverage of 0.5%.