

2020年度

修士論文発表会

論文要旨集

2021年2月4日（木）、5日（金）

ミリ波高解像度観測による Class I 原始星 TMC-1A の星周構造の研究

35-186124 川上知洋

Class I 原始星の研究では原始惑星系円盤の成長や領域に応じた物理環境の変化を調べることが重要であり、そのためには様々な分子種およびその遷移線の観測が必要となる。これには高感度かつ高解像度の観測が必要不可欠であり、近年は ALMA 望遠鏡によりそれが実現されている。その成果の例として、SO 分子が主に円盤とエンベロープの境界をトレースすることが確認された。本研究では、CO およびその同位体の観測データがある程度揃っている Class I 天体 TMC-1A に対して新たに SO 分子が検出されている観測データを活用し、円盤とエンベロープの境界を直接捉えることを目的とした。

使用したデータは ALMA Band6 の波長帯にて約 $0.3'' \times 0.2''$ の空間分解能で観測されたものであり、今回はそのうち 1.3 mm 連続波、 C^{18}O ($J = 2 - 1$) 輝線、SO ($J_N = 6_5 - 5_4$) 輝線の解析を行った。その結果、 C^{18}O は半径 230 au 程度の広がった構造を持ち、かつ回転が支配的な力学構造をしていることが分かった。一方、SO は回転する高速度成分と非軸対称な分布をしている低速度成分が見られた。

これらの輝線観測の結果に対し、Kepler 回転をする円盤成分を同定するため C^{18}O の P-V 図に 2 種類のカーブフィットを行った。その結果、どちらのフィッティング方法でも半径 100 au までが Kepler 回転でよく説明され、対応する中心星の質量が $(0.53 \pm 0.08) M_\odot$ と見積もられた。また、SO に関しては明瞭な放射のピークが 2箇所確認されており、それらの中心星からの距離を計算したところいずれも 102–103 au の距離に位置していることが分かった。これにより、 C^{18}O と SO の両輝線のデータから円盤とエンベロープの境界が矛盾なく ~ 100 au と導かれた。

本研究によって Class I 天体 TMC-1A における原始惑星系円盤とその周囲に広がるエンベロープとの境界が明確化され、円盤への質量供給の現象が捉えられた。

Resonant orbits of the stars in the Milky Way disk

天の川銀河円盤の星の共鳴軌道

朝野哲郎

学生証番号: 35196105

Abstract

Astrometric observations by *Gaia* satellite revealed detailed phase-space distributions for the stars in the Milky Way (MW). They show complex phase-space substructures including the Hercules stream in velocity space. Although their origins are still in debate, most of previous studies have suggested that the observed structures originate from orbits in resonance with the bar and/or spirals, based on static potential models for the MW. However, actual galaxies are time-evolving systems as previous N -body simulations have shown. We analyze a high-resolution self-consistent N -body simulation of a MW-like galaxy and compare phase-space distributions between the simulation and the observation to investigate the origins of the phase-space substructures. Our simulation comprises about 5.1 billion particles in the galactic stellar bulge, bar, disk, and dark-matter halo and is evolved to 10 Gyr. Our model's disk component is composed of 200 million particles, and its simulation snapshots are stored every 10 Myr, enabling us to resolve individual stellar orbits and to classify resonant orbits of representative samples of stars. In the simulation we search for positions in which we observe velocity space distributions similar to that observed in the actual solar neighborhood, using the Kullback-Leibler divergence (KLD). Such velocity distributions are not always observed at the same positions, but are often found at distance from the galactic center of $R \simeq 8$ kpc, the angle with respect to the bar's major axis of $-30^\circ \lesssim \phi \lesssim 30^\circ$, and the inter-arm regions. We perform orbital spectral-analysis for the particles within 200 pc from a position selected from the KLD analysis. These conditions are consistent with the current location of the Sun in the MW disk. Using orbit frequency analysis, we identify stars in resonance of the bar, especially higher-order resonances in a fully self-consistent N -body simulation. We find that they form velocity-space structures similar to those observed in the solar neighborhood such as the Hercules stream and the others. Our results suggest that the Hercules stream is dominated by the 4:1 and 5:1 outer Lindblad resonance (OLRs) and corotation resonance (CR). From the relation between resonances and ridges in phase space, our model favours a slow pattern speed of the MW bar ($40\text{--}45 \text{ km s}^{-1} \text{ kpc}^{-1}$). The orbital analysis for stars in a wider region shows ridges in radial coordinate R versus azimuthal velocity v_ϕ space and action space. We confirm that the ridges also originate from the resonances. Although the ridges in the observation are ticker than those in the simulation, this is explained by observational errors. Taking account the parallax errors for the action map into the simulation, we show that finely resolved ridges will be observed in future *Gaia* data releases. By identifying CR and 2:1 OLR from the future *Gaia* data, we will be able to determine the dynamical structure of the MW, such as the pattern speed of the bar.

The Physical Origin of the Patchy Reionization (宇宙再電離非一様性の物理的起源)

35-196106

石本梨花子

Cosmic reionization was a key event in the early universe. After recombination at $z \sim 1100$, the neutral hydrogen of intergalactic medium (IGM) was ionized by ultraviolet (UV) radiation from the first generation of stars and galaxies. The observation of Ly α optical depth, τ_{eff} , in high- z quasar spectra is a useful probe of the reionization. Recent observations revealed that τ_{eff} and its scatter rapidly increase at $z > 5.5$, indicating inhomogeneous progress of reionization. To explain large scatter of τ_{eff} , fluctuation of UV background (Γ model) or IGM gas temperature (T model), which predict totally opposite correlations between τ_{eff} with galaxy density, have been proposed. There has been only one example of observational verification of such a correlation between τ_{eff} and galaxy density.

In order to conclude which model can explain observed scatter of τ_{eff} , we search for Lyman α emitter (LAE) around three (J1137+3549, J1602+4228, and J1630+4012) quasar lines of sights with high Ly α optical depth. The Ly α optical depths at $z \sim 5.7$ are estimated by principal component analysis, and they are 5.58 ± 0.62 , 6.05 ± 0.91 , and ≥ 5.06 for J1137+3549, J1602+4228, and J1630+4012, respectively. We perform narrowband imaging at $z \sim 5.7$, using Subaru Hyper Suprime-Cam with r , i , z , and $NB816$ filters. After data reduction and source detection by *hscpipe*, we select LAE candidates from detected objects. As a result, we construct sample of ~ 100 LAEs from ~ 5000 arcmin 2 in each field. The 5σ limiting magnitudes of $NB816$ are down to ~ 25 mag.

We construct LAE map to investigate their spatial distribution by carefully correcting the variation of sensitivity in the field of view. Our sample shows lower surface density than cosmic mean. A deficit of LAEs around a quasar line of sight is found in J1630+4012 field, but density peak around a line of sight is found in J1137+3549 and J1602+4228 fields.

Our results could suggest the following four possibilities: 1) Either fluctuation of UV background or gas temperature is not dominant source of patchy reionization. This is not consistent with previous observational studies at high τ_{eff} quasar sightline. 2) Overdensity in J1137+3549 and J1602+4228 field are contaminated from foreground and background low τ_{eff} region. In this case, our result is consistent with the previous studies and fluctuating UV background model. 3) LAE may be not a good tracer of underlying large-scale structures to distinguish between Γ model and T model, and 4) quasars or AGNs may contribute to the large τ_{eff} fluctuation. At this stage, it is not possible to determine which of these four interpretations is the most promising. Observations of low τ_{eff} region and follow-up spectroscopic observations will give us more conclusive result for the physical origin of the patchy reionization.

ミリ波サブミリ波帯メタルメッシュフィルターの開発

学生証番号：35-196107

宇野慎介

宇宙最大の自己重力系である銀河団を観測してその動的な進化過程を調べることは、宇宙の構造形成史の解明の手がかりになると期待される。この銀河団においてミリ波サブミリ波帯で観測されるスニヤエフ・ゼルドビッチ効果は、銀河団の物理量に関して他波長の観測量とは相補的な情報を持つほか、遠方にあってもその表面輝度が下がらないという特徴から特に遠方銀河団の観測に対して有用である。そこで我々は現在、巨大な構造である銀河団のスニヤエフ・ゼルドビッチ効果を測定することを科学目標に掲げ、広視野かつ広帯域のミリ波サブミリ波帯多色カメラの開発を進めている。

この多色カメラでは 6 色の同時撮像を目指している。2 種類の焦点面検出器アレイでそれぞれ低周波 3 色 (150, 220, 270 GHz)、高周波 3 色 (350, 400, 650 GHz) を受信し、更に検出器基板上のオンチップフィルターにより各 3 色を弁別して検出する。ここで多色カメラの開口からは、観測帯域の天体信号以外にも、観測帯域外からノイズ源となる放射が流入する。そこで観測帯域のみを選択的に通し、帯域外の不要な放射の流入を抑えるために、焦点面検出器アレイの前面に準光学的周波数選択フィルターを設置する。この準光学フィルターには、3 色全体をカバーする広帯域なバンドパス特性が要求される。

本研究では、金属膜にサブ波長の周期的パターンを設けたメタルメッシュフィルターと呼ばれる準光学フィルターの開発を行った。従来の天文観測用途のメタルメッシュフィルターは、特殊な製造装置や設計手法が必要であるために、入手性が非常に限られていた。そこで我々は低コストかつ短時間で製造できる方法として、商用のフレキシブルプリント基板 (FPC) 製造技術に着目した。まず、ミリ波サブミリ波帯のフィルターが FPC で製造できることを検証した。FPC の製造条件で製造可能なメッシュパターンの最小線幅が決まっており、これにより帯域幅が制約を受けるが、本研究では最小線幅 50 μm に対して広帯域に適したメッシュ形状を用いることで十分に広い帯域を実現できることがわかった。またフィルターを実際に試作して製造上の効果を調査した。試作品の光学測定を実施し、寸法から予想される透過特性に一致することが確認できた。

本研究の目的とする広い透過域と急峻な減衰を持つバンドパス特性を得るために、フィルターを積層することが必須となる。本研究では、FPC の基材による誘電損失の影響を抑えるために、積層を 3 段程度として多段フィルターを設計した。ここで、設計時の積層の組み合わせに高い自由度を持たせれば、より要求仕様に合致するフィルターが設計できると見込まれる。一方、段数を増やすほどに設計は大規模化し、電磁界シミュレーションを用いた透過特性計算にかかる計算量が増大してしまう。更に積層の組み合わせ数も膨大となるため、電磁界シミュレーションのみに依存した設計解の探索は困難となる。そこで本研究では計算精度を保ったまま計算コストを削減するため、フィルターの積層を等価回路上で行う「散乱行列カスケード方式」の透過特性計算を採用した。我々はこの方式に基づいて電磁界シミュレーションと回路シミュレーターを併用した高速な設計最適化手法を開発し、現実的な計算時間内に最適な設計を抽出できるようになった。

この設計最適化手法を適用して、多色カメラの低周波 3 色に対して高い透過率を持つバンドパスフィルターの最適設計を得ることができた。そしてこの最適設計に基づいて FPC を製造、積層することにより 3 段のメタルメッシュフィルターを試作した。光学測定の結果、要求仕様を満たす広帯域バンドパス特性が得られることを確認した。以上のメタルメッシュフィルター製造手法および設計手法は、広帯域バンドパスフィルターに限らず多種多様な特性の準光学フィルター開発に対して応用が期待される。

太陽フレアの高密度領域の研究

学籍番号 35-196108 大野望海

太陽は我々に最も近い恒星である。これは天文学にとって非常に重要である。太陽は幅広い波長の光を放射しており、その放射過程は宇宙の様々な現象と共に通している。近く明るい太陽であれば空間分解能と時間分解能を容易に稼ぐことができ、より詳細に観測することができる。太陽は宇宙の物理を知る上で非常に都合の良い実験場なのである。本研究で扱った太陽フレアは磁気リコネクションによって磁場エネルギーが粒子の運動エネルギーや熱エネルギーに変換される現象であり、観測されるフレアループの電子密度を知ることはフレアへの理解に重要である。本研究では特に規模が大きかった 2017 年 9 月 10 日の X8.2 フレアについて、ループに沿った密度の空間分布を調べること、フレアの白色光強度を利用した密度測定の先行研究 (Jejčić et al., 2018 [1]) の結果の確認をすることを目的とした。Jejčić et al. が報告した電子密度 $n_e \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ という値はそれまで報告されていた値の 10 倍という異常な値である。

Jejčić et al. は観測されたフレアループの白色光強度 $I_{WL,obs}$ が電子密度 n_e 、温度 T 、有効厚み D_{eff} から決まるとして ($I_{WL,obs} = I_{WL}(n_e, T, D_{eff})$)、 T と D_{eff} を仮に与えることで n_e を求めている。この方法では数千 K から数百万 K という幅広い温度成分の密度が求められる。

別のアプローチとして、Hinode/EIS [2] で観測された電子密度に感度のある Fe XII, Ar XIV 輝線ペアを使った。観測された極端紫外線スペクトルを直線状の連続成分と複数の輝線（ガウス関数）で説明するモデルへフィッティングし、純粋な輝線強度を計算した。輝線強度比の電子密度依存性は原子モデルデータベース CHIANTI で計算されるモデルを参照し、観測された輝線強度から密度を求める。この方法では Fe XII ならば 160 万 K, Ar XIV ならば 320 万 K の成分のみについて密度を調べることができる。

結果として、Hinode/EIS の観測データからループに沿った密度分布が得られた。ループ足元ではない場所に周囲と比べて数倍程度密度が大きい領域があり、そこにプラズマを圧縮するプロセスがあることが示唆された。また、手法の改善策として、Hinode/EIS のデータにサチュレーションが現れるような激しいフレアについては、密度を求められる領域を確保するためにスペクトルフィッティングを行う波長域を Ar XIV の現れる波長域に絞るべきであることが示された。Jejčić et al., 2018 [1] の方法では確かに 10^{13} cm^{-3} という値が白色光強度から得られたが、それを実現するフレアループの温度、有効厚みが限られていることを指摘した。

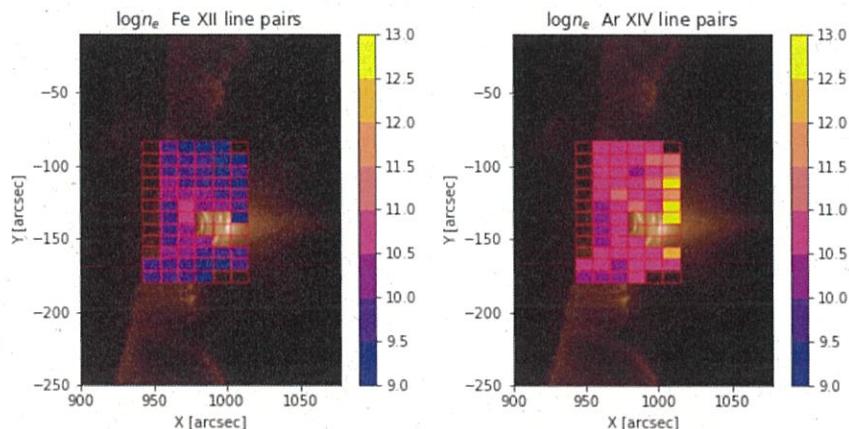


Figure 1: 18:39:08 UT に観測された Hinode/EIS のデータから求めた密度分布。SDO/AIA 193 による観測データをバックグラウンドとしてプロットしている。左 : Fe XII 輝線強度から求めた分布。右 : Ar XIV 輝線強度から求めた分布。

References

- [1] Jejčić et al., 2018, ApJ, 867, 134
- [2] J. L. Culhane et al., 2007, Sol. Phys., 243, 19

概要

フレアは恒星の外層大気において発生する現象であり、太陽の場合は数分から数時間の間に $10^{29} \text{ to } 10^{33} \text{ erg}$ のものの大規模なエネルギーが発生する場合がある。それらは熱・運動・粒子加速エネルギーなどに変換され、大型の太陽フレアは地球近傍の環境に影響を及ぼす。このような事情から、ハビタブルプラネットの調査において恒星のフレア現象の研究は重要な意味を持っている。

本研究では、東京大学木曾シュミット望遠鏡のカメラであり、CMOS センサーによる広視野による高速撮像を特徴とした Tomo-e Gozen のサーベイの内、Northern Sky Transient Survey with Tomo-e Gozen のデータを用いて、フレアデス星団から変光星の発見が可能かどうかデータ解析を行った。Gaia Data Release3(DR3) から選出した候補星の座標を元に Tomo-e Gozen の 2018 年 10 月から 2021 年 1 月までのアーカイブデータをリクエストし、その天体の等級の変動の RMS を 1σ として 5σ 以上の変光を検出した。最初の解析では明らかに異常な検出割合の高さとなつたため原因を探ったところ様々な変光星以外由来のエラーが見られたが、今後大きな課題となるのが、2 つの重なった像をデブレンディングする測光ソフトウェアの能力面だろう。本研究では更に厳しい条件付けを行い、10 個の M 型フレア星の検出に成功した。変動の大きなフレア ($\Delta V \sim 0.75 \text{ mag}$) の検出能力に限ってみれば ASAS-SN といった全天サーベイの先行研究とほぼ同じであり、Tomo-e Gozen の通常サーベイでも充分強力な変光星検出能力があると言える。

Gaia DR3 と Tomo-e の広視野を組み合わせれば今後さらなる変光星の検出が期待される一方、本来ならば多く存在するであると期待される変光の小さなフレアの検出には大きな課題が残る。今後、測光ソフトウェアに大きな進歩があれば、Tomo-e でも暗い星の小さな変光の検出が可能になることが期待される。

赤外線位置天文衛星 JASMINE の観測画像の既存観測データからの推定

35_196110 桶屋誠人

JASMINE は国立天文台と宇宙科学研究所が中心となって 2020 年代の打ち上げを目指している赤外線位置天文観測衛星である。JASMINE のミッションの主な目的は銀河中心領域の天体の年周視差と固有運動、位置の位置天文パラメータを調べ、カタログとして提供することである。銀河中心領域が観測できるのは春秋に限られる。年周視差と固有運動を求めるためには、最低でも 1.5 年 (1.5 周期) の観測が必要であるが、信頼性を上げるために、3 年間を春分、秋分を挟んだそれぞれ 3 ヶ月間観測を行う。

また JASMINE 計画のバルジのアストロメトリサーベイを行えない期間を利用し、太陽系近傍の晚期 M 型星周りのトランジット惑星サーベイ及び既知のトランジット惑星の詳細観測を行う計画である。特に前者ではハビタブルゾーン内の地球型惑星の検出を狙う JASMINE の主要な科学的目標は、赤外線による超高精度位置天文観測により、地球からの距離 2 万 6 千光年に位置する銀河中心領域の星の距離と運動を測定すること。天の川銀河の中心核構造と形成史を明らかにすること。太陽系や惑星をもつ星の移動を引き起こす原因となる銀河構造の進化の過程を明らかにし、人類誕生にも関わる天の川銀河全体の形成史を探究すること。の 3 点である。

観測手法として、二次元撮像を場所を移動しつつ繰り返す Step Star 方式をとる。観測領域を覆うにはスマールフレーム Frames-link 法を用いる。

本研究では、既存の天の川銀河中心の画像データを用い、赤外線位置天文衛星 JASMINE で実際に観測されると想定される天の川銀河中心のシミュレーション画像を作成し、実際に JASMINE で観測される銀河中心の星の位置の精度が、周囲の天体の影響で明るさによってどの程度影響を受けるのか予備的な検討を行った。使用する画像データは IRSF 望遠鏡に搭載された SIRIUS を使用して 2002 年 3 月から 7 月および 2003 年 4 月から 8 月に所得されたものである。観測領域は銀経おおよそ -2.5° から 2.5° で、銀緯が -1° から 1° までの範囲である。

シミュレーションの結果を用いて、星像の中心位置の推定精度について簡易解析を行った。解析は、星像を 9×9 ピクセルで取り出し、その重心位置を求め、これとシミュレーション画像作成時に与えた星位置との差を比較した。その結果、星の等級に応じて位置推定に誤差が生まれることがわかった。

さらに観測における様々な誤差をシミュレーション結果に加えることで、より正確なシミュレーション画像の制作ができ、より詳しい検討が行えると考えられる。

Shinichi Kinoshita (木下真一)

Student ID: 35196111

Triggered star formation by shocks

衝撃波による誘発的星形成

Abstract

Star formation can be triggered by compression from shock waves due to supernovae, stellar winds, ionization fronts, cloud-cloud collision, and so on. This paper consists of two parts. In the first part, we have studied the interaction of hydrodynamic shocks with Bonnor-Ebert spheres and triggered star formation using the AMR hydrodynamical 3D simulations with self-gravity and sink particles. In the second part, we have presented an observational example of possible shock-induced star formation in a nearby star-forming region M17 SWex.

In part I, We showed that the evolution of the shocked cloud depends on shock speeds and cloud radii. If the Mach number of the shock is too low or too high, the cloud collapse is difficult to be induced by the shock. Only intermediate Mach number shock can trigger cloud collapse. Besides, even in the cases in which clouds collapse, there are differences in cloud evolution such as the presence or absence of rebounding. We derived the condition for gravitational collapse triggered by shocks. The condition is expressed as functions of dimensionless radii. For the case in which cloud can collapse, the higher the Mach number of shock is, the faster the relative velocity and position of sink particles and stripped clouds center increase. As a result, for the higher Mach number of shocks, the final (asymptotic) masses of sink particles become smaller. We also investigated the effect of cloud turbulence on the shock-cloud interaction. It turns out that the turbulence itself prevents rapid cloud contraction and decreases the mass of stars formed. Our simulation can provide a general guide to the evolutionary process of dense cores and Bok globules impacted by shocks.

In part II, using wide-field $^{13}\text{CO}(J = 1 - 0)$ data taken with the Nobeyama 45m telescope, We analyzed the cloud structure of the M17 SWex. At least two large clouds with $\sim 35 \text{ km s}^{-1}$ seem to be located close to the main clouds at $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$ in the galactic longitude-galactic latitude plane. We discussed three possibilities that appear to be consistent with this observed features: (1) overlapping with different velocities, (2) cloud oscillation, and (3) cloud-cloud collision. Judging from the existence of the bridge feature in the P-V map, and the distortion of the magnetic field orientation at the intersections, we think that cloud-cloud collision is the most plausible scenario.

星周物質との相互作用によって輝く IIIn/Ibn 型超新星の親星における爆発的質量放出の研究

35-196112

栗山直人

大質量星の中には、超新星爆発に至る数～数十年前の段階において増光を伴う爆発的で激しい質量放出を経験し、恒星周辺に濃い星周物質を形成するものが存在する。こうして形成された星周物質内で親星が超新星爆発に至ると超新星イジェクタと星周物質が衝突し、散逸した運動エネルギーが超新星の熱源になることが知られている。このような超新星は IIIn 型 (H-rich な場合) または Ibn 型 (He-rich な場合) に分類され、イジェクタに比べて速度の遅い星周物質に由来する狭い輝線が特徴として観測されることが知られている。

このように大質量星での質量放出は、恒星進化と超新星爆発の両側面に関わっている重要な現象である一方で、重力崩壊直前に激しい質量放出が引き起こされるメカニズムは明らかになっていない。質量放出率は定常的な恒星風では説明できないほど高い場合も多く、静水圧平衡を仮定した恒星進化モデルには取り入れられないエネルギー源やエネルギー輸送メカニズムによって動力学的な爆発が引き起こされていると考えられる。

そこで我々は、大質量星の核燃焼が恒星進化末期に近づくほど激しくなることに着目した。核燃焼由来のエネルギーが何らかのメカニズムによって外層に運ばれた場合、外層が静水圧平衡を保つことができなくなり動力学的な爆発によって激しい質量放出が引き起こされることが期待される。そこで我々は、恒星モデルの外層に核燃焼由来と考えられる大きさのエネルギーを短いタイムスケールで注入し、その後の外層の動力学と星周物質の形成のようすを 1 次元の輻射流体力学計算によって調べた。本研究では外層までエネルギーを輸送するメカニズムについては踏み込みず、外層にエネルギーが供給された場合にどのような爆発 (超新星爆発ではなく、外層の一部が吹き飛び星周物質を形成する爆発) が発生し、どのような観測的特徴 (爆発時の光度曲線等) や星周物質の分布が得られるかを調べることに目的を置いている。そのため、本研究は我々が仮定している核燃焼由来の爆発のみでなく、一般に外層にエネルギーが供給された際の外層の振る舞いにも適用することができる。計算の結果、動力学的な爆発によって IIIn/Ibn 型超新星において典型的な星周物質の分布 (位置・速度) を再現できることに分かった。また、得られた結果を質量放出期の親星や IIIn/Ibn 型超新星自体の観測結果と比べることによって、爆発的な質量放出時に恒星内部で起きている現象に制約をつけるとともに観測結果に新たな解釈を与えることを目指した。

さらに、爆発的な質量放出が複数回繰り返し発生した観測例が存在する一方で、恒星外層で 1 度爆発的な質量放出が発生するとその密度構造が大きく変化するという点に着目した。恒星外層に 2 度エネルギーを注入することで 2 度の独立な爆発現象を引き起こし、各爆発間での観測的特徴の差異を調べた。その結果、静止水圧平衡の状態から発生する 1 度目の爆発と、密度構造が変化した状態で発生する 2 度目の爆発では、光度・色・質量放出量等が大きく異なっていることが分かった。突発天体観測の発達により、超新星爆発のみでなく親星段階での爆発的質量放出を捉えた観測例が徐々に増え始めている昨今において、本研究の結果は親星での爆発的質量放出現象の観測結果を解釈するための一つの糸口になりうる。

スペースモデリングを用いた 地球型系外惑星における表面組成の全球マッピング

35-196113

桑田 敦基

概要

地球が太陽の周りを公転しているように、太陽以外の恒星の周りを公転する惑星が宇宙に存在している。このような天体を系外惑星と呼び、1995年に太陽型の恒星の周りの惑星が発見されて以来、これまで4,000個以上にわたる系外惑星が発見されてきた。今や系外惑星科学は惑星の検出だけでなく特徴付けの局面を迎え、その根幹をなす観測手法が惑星を直接観測する直接撮像法である。直接撮像法はコントラストの問題により既存の望遠鏡では実現できず、現在、そのための宇宙望遠鏡ミッションが計画されている。一方、もし惑星の直接撮像が可能になったとしてもそれを空間分解して観測することはできず、惑星表面の直接の探査は困難である。しかし、観測により得られた惑星反射光の時間変動の解析によって惑星表面の分布を推定することができる。この手法を Spin-Orbit Tomography (SOT) と呼び、広く活用されてきた。その中でも SOT にスペースモデリングを適用することで、スペース性を持つ、つまり要素の多くが 0 である解の推定が可能になっている。また、リモートセンシングの手法であるミクセル分解を SOT に導入した Spin-Orbit Unmixing (SOU) においては、惑星の表面分布に加えてその構成要素のスペクトルを同時に推定することが可能になっている。

本研究では以上の 2 つの手法に着目し、SOU へのスペースモデリングの適用による効果を調査した。SOU は最適化問題として記述できるが、その制約に相当する正則化項を変化させることでスペース性を持つ解を誘導できる。このような正則化項として ℓ_1 ノルム正則化、Total Squared Variation (TSV) 正則化、およびトレースノルム正則化を表面分布の推定における正則化として適用し、実験を行った。これらの正則化項においては微分可能でないものが含まれるため、最も単純な最適化アルゴリズムである最急降下法を直接用いることができない。そこで、微分可能でない関数に対しても適用できる近接勾配法を用いることにより最適化を行う。一方、スペクトルの推定においてはミクセル分解における有用性が知られている単体体積正則化を正則化項として用いた。近接勾配法を用いることにより、ミクセル分解に関する制約である推定値の非負性を取り入れることも可能になる。

本研究では、以上の手法を用いて雲のない地球の観測データのモデルに対し実験を行った。また惑星表面の構成要素として植生、陸地、および海洋を考えた。この最適化により、入力データと比べて誤差の小さい表面分布およびスペクトルを推定できた。特に ℓ_1 ノルムおよび TSV 正則化を用いた推定においては、各構成要素の表面分布において他の構成要素に対応する部分、すなわちピクセル値が 0 である部分を適切に推定できた。SOU の開発において用いられた Tikhonov 正則化を適用した推定では、他の構成要素の部分にノイズを多く含んでいた。これに対し、本研究における推定においてはそのノイズが減少し、さらに値を持つ部分においても連続性を持った、境界線が明確な表面分布を推定することができた。また、表面分布の推定の精度が高くなつたため、スペクトルにおいても先行研究と比べて最も誤差の小さい解を得ることができた。

Abstract

In the past two decades, submillimeter observations of extragalactic sources have revealed a population of dusty star-forming galaxies at high redshift. The submillimeter-selected galaxies (SMGs) are massive and actively forming stars. Detailed studies of their properties such as clustering, size and number density suggest a evolutionary connection between SMGs and massive quiescent galaxies in the local universe. However, SMGs are extremely faint at observed frame optical and near infrared wavelengths due to their dusty nature and high redshift. The faintness and degeneracy between age, metallicity and dust extinction make the Spectral energy distribution (SED) modelling of SMGs difficult and bring large uncertainties to the derived properties. The study is further hampered by rareness of the massive objects which introduces statistical uncertainties. Nonetheless, unveiling the nature of SMG is important to our understanding of galaxy formation and evolution, and provides valuable tests to theoretical models.

In this study we utilize a sample of 289 sources detected in ALMA 1.1 mm observations to build a multiwavelength catalog and perform SED analysis to extract their key physical quantities and properties. Former studies of large SMG sample were mainly based on the MAGPHYS code, while we use the CIGALE code to apply different model assumptions and check the consistency. We also take advantage of CIGALE's high flexibility, which allows us to probe SMG's star formation history (SFH) via SED fitting. We try to identify and categorize SMGs to two groups with normal SFH or sharply rising star formation rates. We attempt to link the SFH variation to physical properties, to investigate whether the SMG is a homogeneous population and search for clues of their evolution.

Our analysis showed consistent results with former studies. The 1.1 mm detected SMGs have median redshift 2.61, stellar mass $10^{10.91} M_{\odot}$, star formation rate $146 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ and dust luminosity $10^{12.21} L_{\odot}$. We find SMGs with a sharp rise in recent SFH are related the most intense starbursts, locating well above the star-forming main sequence and the rising group are less massive and rare, compared with the normal group which are on the high mass end of main sequence. We compared the physical properties of the two groups but could not find robust evidence to put the two groups to different evolution stages, due to small number of galaxies in the rising group and large uncertainties. The near

infrared morphology suggested a lack of major mergers in the normal group. It is possible that SMGs showing sharply rising SFH will grow their stellar mass and evolve towards the dusty star-forming galaxies on the main sequence. Deep and high-resolution observations in future are needed to improve this study.

非対称な原始惑星系円盤を持つ V1247 Ori におけるダスト成長

後藤 光希

学生証番号：35 - 196115

概要

原始惑星系円盤での惑星形成において、ダストが微惑星サイズに成長するまでに中心星に落下してしまう問題が知られている。その解決策として円盤中に局所的な高圧領域が生じることで、圧力勾配によってダストが集められ（ダストトラップ）、中心星への落下が食い止められるという仮説が提唱されている。そのダストトラップではダストの付着成長が促進され、微惑星が形成されやすいと考えられている。しかし、ダストトラップが示唆される原始惑星系円盤で詳細な観測が行われた例は少なく、ダスト成長の確認や高圧領域の発生機構の議論が不足している。

Herbig Ae 型星 V1247 Ori では、ALMA を用いた波長 $870 \mu\text{m}$ 帯の連続波観測により、半径約 54 au でリングと、中心星から約 120 au、方位角 -40° から 80° に位置するクレセント（三日月状構造）とで構成される非対称な原始惑星系円盤が確認されている。この観測に基づき、先行研究 (Kraus et al. 2017) では、リングとクレセントの間のギャップに存在する仮想的な惑星を起因として、クレセント全体とリングの南東側にダストトラップが生じている可能性があると示唆されている。

そこで本研究では、ALMA で取得された V1247 Ori のバンド 7（周波数 344 GHz 帯、波長 $870 \mu\text{m}$ 帯）とバンド 4（周波数 139 GHz 帯、波長 2.1 mm 帯）のアーカイブデータを用いて連続波イメージを作成した。その結果、バンド 7 のイメージはビームサイズが $0.067'' \times 0.054''$ 、感度 (1σ) が $44.2 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ となり、バンド 4 のイメージはビームサイズが $0.091'' \times 0.066''$ 、感度 (1σ) が $7.94 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ となった。バンド 7 のイメージでは観測の追加により、先行研究に比べて約 1.3 倍高いシグナル・ノイズ比を達成した。

また、ダストサイズの評価として opacity Index β を用いた。この β は、ミクロンサイズの星間物質では $\beta \sim 1.7$ 、ダストがミリメートルサイズに成長している場合には $\beta \sim 0.1$ の値をもつ特徴があり、2 波長による観測から算出することができる。そこで opacity Index β を、バンド 7 とバンド 4 の連続波イメージを用いて算出し、空間分解能 $0.091'' \times 0.066''$ の β マップを作成することで V1247 Ori の円盤中のダストサイズ分布を初めて評価した。その結果、円盤全体での β の平均値は 1.3 ± 0.2 となり、ダスト成長の指標となる β の低下 ($\beta \sim 1$) が見られた領域はクレセント北側のみであったため、先行研究でダストトラップが生じていると示唆されていた領域と β によるダストサイズ分布は完全には一致しないことが分かった。

さらに、VLA の Q バンド（周波数 44 GHz 帯、波長 6.8 mm 帯）で観測された V1247 Ori のイメージを用いて、ALMA でのイメージと比較を行った。Q バンドのイメージはシグナル・ノイズ比が低いものの、バンド 4 に見られたクレセント北側のピークと中心星からの距離がほぼ等しく、方位角が西側に約 30° ずれた位置に 3σ 以上の有意なフラックス密度を持つ領域（ノット）が検出された。V1247 Ori の近赤外線による観測で確認されたダスト散乱光によるスパイラルアーム (Ohta et al. 2016) から、円盤のケプラー回転を反時計周りと仮定すると、クレセント上では回転の先頭からピークがバンド 7（波長 0.87 mm 帯）、バンド 4（波長 2.1 mm 帯）、Q バンド（波長 6.8 mm 帯）のように位置するため、サイズの大きいダストが回転方向に対して後方に集積している分布していると考えられる。サイズに応じたダストの集積は、ダストトラップを生じる高圧領域でのダスト成長の傾向として理論的に提唱されており、V1247 Ori におけるダストトラップの存在を支持している。これと全く同じ傾向は、V1247 Ori と同様にリングとクレセントの構造を含む原始惑星系円盤を持つ HD 135344B でも観測されており、普遍的な特徴である可能性がある。しかしながら、統計的な理解には非対称な原始惑星系円盤の観測例の増加が必要である。

Constraints on the Ly α luminosity function and cosmic reionization at $z = 7.3$ with Subaru/Hyper Suprime-Cam

すばる望遠鏡/Hyper Suprime-Cam による

$z = 7.3$ Ly α 光度関数と宇宙再電離への制限

35-196116

Goto Hinako

五島 雛子

Abstract

The Ly α luminosity function (LF) of Ly α emitters (LAEs) has been used to constrain the neutral hydrogen fraction in the intergalactic medium (IGM) and thus the timeline of cosmic reionization. Here we present the results of a new narrow-band imaging survey for $z = 7.3$ LAEs in a large area of $\sim 3 \text{ deg}^2$ with Subaru/Hyper Suprime-Cam. No LAEs are detected down to $L_{\text{Ly}\alpha} \simeq 10^{43.2} \text{ erg s}^{-1}$ in an effective cosmic volume of $\sim 2 \times 10^6 \text{ Mpc}^3$, placing an upper limit to the bright part of the $z = 7.3$ Ly α LF for the first time and confirming a decrease in bright LAEs from $z = 7.0$. By comparing this upper limit with the Ly α LF in the case of the fully ionized IGM, which is predicted using an observed $z = 5.7$ Ly α LF on the assumption that the intrinsic Ly α LF evolves in the same way as the UV LF, we obtain the relative IGM transmission $T_{\text{Ly}\alpha}^{\text{IGM}}(7.3)/T_{\text{Ly}\alpha}^{\text{IGM}}(5.7) < 0.77$, and then the volume-averaged neutral fraction $x_{\text{HI}}(7.3) > 0.28$. Cosmic reionization is thus still ongoing at $z = 7.3$, being consistent with results from other x_{HI} estimation methods. A similar analysis using literature Ly α LFs finds that at $z = 6.6$ and 7.0 the observed Ly α LF agrees with the predicted one, consistent with full ionization.

Development of a Machine learning-Based Object Selection Method for the HETDEX Dark Energy Survey

HETDEX 暗黒エネルギー探査のための 機械学習に基づく天体選択手法の開発

酒井直

35-196117

2021年1月24日

Testing cosmological models by observations is one of the major themes in astronomy today. The Λ CDM model, which successfully explains various observational results, has several theoretical problems such as the coincidence problem and the fine tuning problem. Modified gravity models have been proposed to solve the problems. In order to test the cosmological models that still have not been dismissed, the ongoing blind spectroscopic survey of the Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment (HETDEX) aims at measuring the Hubble parameter at $z = 2.8$ to an accuracy of 1% based on the large-scale clustering of 1 million Ly α emitters. However, the HETDEX pipeline detects a number of contaminants as well as real emission lines.

In this thesis, we present a classification method based on machine learning techniques of convolutional neural networks (CNNs), Uniform Manifold Approximation and Projection (UMAP), and support vector machines (SVMs) to distinguish between real emission lines and contaminants. By making use of our visual classification results for emission line candidates detected in early data products of the HETDEX, we train a CNN model to classify whether the candidates are real or not. By combining a UMAP+SVM classifier as a complementary technique with the CNN model, we develop a machine learning-based classification method that achieves a high completeness value of 95.5% with a small contamination rate of 7.4%. Our classification method significantly reduces the amount of human effort and ensures reproducibility compared to visual classification, which is frequently adopted in previous work. We apply our classification method to the latest HETDEX survey data, yielding a sample of about 1.7×10^5 emission line sources over a 145 deg^2 sky.

2020 年度修士論文

初代星の星団形成における超音速ガス流の効果

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻
35196118 沈有程

2021 年 1 月

概要

宇宙初期におけるダークマター・バリオン間の速度差 (Streaming Velocity; SV) が構造形成に及ぼす影響が、近年再認識された。SV は初代星形成において、ダークマターミニハロー内のバリオンの重力収縮を抑制するため、星形成を遅らせる効果がある。SV が初代星形成に及ぼす影響について、ダークマターミニハロースケールの構造の変化は統計的に調べられてきたが、星形成ガス雲のスケールの構造については十分に調べられてこなかった。

そこで、本研究では、星形成ガス雲にクローズアップしたスケールでの構造形成について、系統的な調査を行った。複数の宇宙論的初期条件について段階的に SV の大きさを変化させて生成した、合計 42 個のダークマターミニハローのモデルについて、長時間の初代星形成をシミュレーションし、星形成ガス雲の構造や、その内部で形成される初代星の質量分布を調べた。計算にあたって、従来の計算コードに改良を加え、より長時間のシミュレーションを可能にした。また、計算結果の解析にあたって、すべてのモデルに対して適用できる統一的な星形成領域の検出アルゴリズムを新たに確立した。

計算の結果、SV の大きさが同じ場合、ダークマターミニハローは高赤方偏移で形成されたものほど大質量に成長する傾向があることが分かった。また、SV が大きいほど、星形成ガス雲内の重力不安定領域の質量が増加し、形成される星質量の最大値も大きくなることが分かった。特に、大質量の単独星を形成した場合、遠方クエーサーの起源である SMBH の始原天体となる可能性がある。さらに、SV が大きいほど、ガス雲の温度進化における、 H_2 分子による冷却の温度下降幅が大きくなり、形成されるガス雲が球対称 → フィラメント状 → より複雑な構造へと変化し、星形成ガス雲は複数に分裂しやすくなることが分かった。分裂した星形成ガス雲は、将来的に複数の初代星や近接連星を形成すると考えられるため、重力波源となる大質量ブラックホール連星を形成する可能性も高まる。また、SV が存在しないモデルと、SV が極端に大きいモデルから、連星系を成している可能性が高い星形成クランプのペアを 1 組ずつ検出した。連星を構成する星質量について、後者は前者の 6 倍程度に大きくなっていた ($182M_\odot$, $131M_\odot$ のペアと $1027M_\odot$, $782M_\odot$ のペア)。将来的に、重力波観測において波長分解能が向上することによって、上記の星質量に対応する低周波の重力波源となる、より大質量のブラックホール連星が観測されることが期待される。

超長基線電波干渉計による狭輝線セイファート1型銀河 1H 0323+342 における超臨界降着流の周辺環境の検証

高村 美恵子 (35-196119)

概要

多くの銀河の中心には、 1pc^3 以内の非常にコンパクトな領域から $L_{bol} \sim 10^{38-48}\text{ ergs}^{-1}$ という莫大なエネルギーを放出し、非常に明るく輝く領域が存在する。この様な領域は活動銀河核 (Active Galactic Nuclei; AGN) と呼ばれる。AGN には多波長の観測や理論シミュレーションにより様々な種族が存在し、それらは主に 3 種類の降着円盤の状態に分類できることがわかっている。しかしこまでの観測的な研究ではブラックホールへの質量降着率が最も高い状態である超臨界降着流の検証が不十分であった。この状態の中心核の環境を明らかにすることは、AGN 統一モデルや多様性を議論するために必要不可欠である。更には宇宙初期における最初の巨大ブラックホール形成の理解につながる。

中心核の環境を検証する最も有効なプローブとして Faraday Rotation Measure(RM) がある。RM はファラデー回転を起こす領域のガスの密度、磁場の大きさ、視線距離をトレースした物理量であり、これを用いることで降着円盤の状態が異なる他種族と直接的に比較することができる。

本研究では、アメリカの超長基線電波干渉計 (Very Long Baseline Interferometry; VLBI) である VLBA(Very Long Baseline Array) を用いて狭輝線セイファート1型銀河 (Narrow line Seyfert 1 galaxy; NLS1) の 1H 0323+342 の高解像度多周波同時偏波観測を行った。NLS1 は可視光の分光観測において $\text{FWHM}(\text{H}\beta) < 2000\text{km s}^{-1}$ で $[\text{OIII}]/\text{H}\beta < 3$ の特徴を持つ。その中心巨大ブラックホールの質量は比較的軽く ($M_{BH} \sim 10^{6-8} M_\odot$)、超臨界降着流を持つ有力候補の AGN である。とりわけ今回は 1H 0323+342 に着目した。1H 0323+342 は VLBI で観測できる NLS1 の中で最も近傍 ($z = 0.061$) に存在し、中心核がよく空間分解されているため (1 ミリ秒角 = 1.2 pc)、中心ブラックホール周辺の環境を検証するには最適な天体である。我々はこの偏波観測データの解析をし、1H 0323+342 のブラックホールから 10 pc 以内の電波構造に有意な偏波フラックスを検出した。近年シミュレーション研究により、超臨界降着流の中心核は高密度なガスのインフロー やアウトフロー に晒されていることが明らかになった。よって本研究では RM が非常に大きくなることを予想して、詳細に偏波角の回転を観測するために各周波数帯内 (インバンド) で RM を求めた。

インバンド RM 測定の結果、12, 15, 23 GHz 帯において 1H 0323+342 のブラックホールから 0.1 pc ほど離れた領域で RM の大きさが $1.2 \times 10^5\text{ rad/m}^2$ と求められた。この RM の値は比較的降着率が低い円盤を持つ AGN の種族 (LLAGN, Quasar, BL Lac) と比較して 10 ~ 100 倍大きい。さらに本研究では 9 周波数の同日観測のデータを用いて放射領域の電波スペクトルを測定し、シンクロトロン放射モデルでフィッティングを行うことで、これまで最も詳細に磁場の大きさを求める成功した。これを用いて電波コア領域の電子密度の評価を行った。その結果、NLS1 とは円盤の状態が異なると考えられている M87(LLAGN) や 3C273(Quasar) と比較して数 ~ 数十倍の電子密度を持つ可能性が示された。これは RHD(Radiation-hydrodynamical) シミュレーションで超臨界降着流の中心核がその他の降着流を持つ天体のものと比較して非常に大きいという示唆とコンシステントである。

本研究により、未だ観測的理理解が進んでいない超臨界降着流を持つ AGN の中心核の環境を明らかにするための第一歩を踏み出すことができた。ただし、本研究ではこのファラデー回転をもたらすスクリーンのより詳細な物理的起源 (降着流自身か、降着流によって駆動されたウインドなのか) を特定するには至っていない。今後、高解像度、高感度のミリ波、サブミリ波の観測によりこれを明らかにする必要がある。

概要

宇宙の主なダスト供給源として考えられている AGB 星は、恒星の脈動を起点としてダストを形成・放出すると考えられているが、そのメカニズムの詳細は未解明である。ダストに埋もれた AGB 星のようなダスト供給量が多い天体は宇宙のダスト供給の面で特に重要であり、脈動の様子を捉え、ダスト供給との関連性を探るためには 1000 日を超えるような長期に渡った中間赤外線領域による変光調査が必要である。本研究では赤外線天文衛星である AKARI および WISE の観測データを組み合わせ、これまで観測的な制限で存在しなかった中間赤外線長期観測データを作成した。このデータは観測期間が 1300 日に及ぶため、変光周期が数百日を優に超えるダストに埋もれた AGB 星の変光調査を可能とする。これらの中間赤外線長期観測データを用い、他波長の変光データも用いることで銀河系内の O-rich AGB 星 176 天体と OH/IR 星 28 天体について、中間赤外線での変光振幅を求めた。このような多くの天体で中間赤外線の変光について調べたのは本研究が初めてである。波長 $18 \mu\text{m}$ 帯の変光振幅 $A_{18\mu\text{m}}$ と星の観測量との相関を調べたところ、ダスト供給量の指標となる $W3 - W4$ 赤外カラーが $A_{18\mu\text{m}}$ に強く依存することがわかった。さらにこの関係は天体の周期や変光モードに依らずに成立つことも判明した。AGB 星の星周ダストに関する輻射輸送計算を実施した結果、 $A_{18\mu\text{m}}$ は中心星の光度変化率に強く影響を受けることがわかった。以上より、AGB 星のダスト供給量を決めるのは光度変化率であるということが示唆される。この依存性を引き起こすメカニズムとして、光度変化率が大きいほど、光度変化時に温度が低下してダストが形成可能になる領域が広くなり、これに伴ってより多くのダストが供給される可能性が考えられる。

LiteBIRD 衛星における宇宙線ノイズの影響評価と 機上機器によるデータ処理の検討

35-196122 富永 愛侑

宇宙を過去に遡ると「火の玉」であったとするビッグバン仮説は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を最有力の手段として観測的に検証され、現代の宇宙論のパラダイムの根幹として確立された。しかし、その著しい特徴である地平線問題や平坦性問題は、さらに深遠な物理の存在を示す。それらを説明し、ゆらぎの起源まで解明するのがインフレーション仮説である。この仮説を検証する最有力の手段は、またも CMB の観測である。同仮説が予測する原始重力波が、大角度スケールに渡る四重極放射の B モードパターンとして、CMB 偏光のゆらぎに刻印される。これは現在の技術で観測可能で、仮説の検証と重要なパラメータであるテンソル-スカラー比 (r) の決定ができる。これまで、衛星プラットフォームでこの聖杯に最も近づいたのは、2009 年に打ち上げられた欧州の Planck 衛星 HFI 装置である。同装置は、極低温検出器を用いた高感度の偏光観測を太陽-地球第二 Lagrange (L2) 点で実現し、大角度・広帯域の全天偏光マップを初めて作成した。しかし、HFI 装置による観測データには、地上では見られない宇宙線の信号が想定以上に含まれていた。時系列データから宇宙線信号を除去することで科学成果に繋げたが、これによるデータの劣化が限界となり、大角度の偏光異方性の有意な検出にまでは至らなかった。2020 年代後半に打ち上げ予定である LiteBIRD 衛星は、同じく L2 点で極低温検出器を用いて、大角度スケールの B モード偏光観測を行う衛星計画である。 r の測定誤差を 10^{-3} 以下に抑えるミッション要求は、高い有意度で原始重力波の存在を確認し、インフレーション仮説の検証を可能にする。Planck 衛星の結果から、宇宙線の影響の抑制が最重要課題の 1 つであることは明らかである。現在、LiteBIRD 衛星は設計段階にあり、宇宙線による影響の定量的な評価は行われていない。また、微小な目的信号に宇宙線が混入した観測データをどのように処理すべきか（特にデータの大半を捨てるミッション部の機上デジタル処理器で）は検討されていない。これらを現時点で定量的に行うためには、現実的な観測を模擬した時系列データが必要である。本論文はこれらの課題を取り組む。

具体的には、以下の 4 つの研究を行った。1 つ目は、LiteBIRD 衛星による観測時系列データのシミュレーションである。LiteBIRD 衛星の全ての観測周波数帯域で CMB (双極子成分を含む異方性)、前景放射、検出器ノイズ、宇宙線を全て含んだ時系列データを初めて作成した。最新の衛星設計解に基づき、衛星の全天スキャンや天体信号、各種雑音に対する検出器の応答も含まれた、現時点でも最も現実的なシミュレーションデータである。2 つ目は、宇宙線の影響の定量的評価である。End-to-end で評価するため、L2 点における宇宙線スペクトルから検出器面へのエネルギーデポジット量を計算し、検出器面内の熱伝導を解いた。LiteBIRD 衛星で用いる超電導遷移端検出器は、微小な熱入力に対して電気的な応答をするセンサーである。宇宙線に対する応答を調べるために、新たな熱モデルを作り電熱結合を解いた。これで得た宇宙線による時系列データを、衛星スキャンと偏光変調を逆重畠して全天マップにし、角度パワースペクトルを導出し、原始重力波による信号と直接比較できる物理量で評価した。一部の検出器、観測時間でのみ評価したが、スケーリング則を仮定すると、目的信号より十分小さくなることがわかった。偏光の測定には、直交する偏光方向に感度を持つ 2 つの検出器の差分信号が用いられるが、宇宙線はコモンモードとして乗ることと 2 つの検出器が熱的に強く結合していることから、うまく差し引けていることが重要だと明らかにした。更に、宇宙線の影響を低減するための改善案も提案し、その効果を評価した。3 つ目は、機上データ処理の検討である。1 つ目の研究で得たシミュレーションデータを元にして、ミッション部のデジタル処理器で行うデータのデシメーションと圧縮を検討する。デシメーションでは、目的信号を残し、衛星内で予測されるノイズを除去するようなデジタルフィルタを設計した。アナログ/デジタル変換のダイナミックレンジやテレメトリ帯域幅を検討し、観測データ量の見積もりと機上で必要なデータ圧縮率を設定した。時系列データの情報エントロピーを計算して、可逆圧縮で達成できる圧縮率を求めた。観測データが記憶を持つ情報源であることを利用して、予測との差分を符号化することで、必要なデータ圧縮率を全周波数で達成できることを示した。4 つ目は、機上デジタル処理器のテストモデルの作成である。前 2 つの研究で、ミッション部デジタル処理器が具現すべき機能が抽出されたが、これがハードウェアで実現可能でなければならない。FPGA と CPU が一体化した Zync というデバイスの商用評価ボードを用いて、実装例を示した。

二重バー構造に対する中心質量集中の力学的影響の研究

学生番号 35-196123 中津野侃貴

渦巻銀河の半数以上が棒状構造（バー）を持つ銀河（棒渦巻銀河）であり、そのうちの約 1/3 はバー（外部バー）の内側に独立に回転する内部バーを持っていることが観測的に知られている。また、われわれの住む天の川銀河もバーと内部バーを持つ可能性が観測的に示唆されている。このように銀河に普遍的に存在するバーは銀河の非軸対称構造であり、ガスの角運動量を効率的に抜く事が出来るので、ディスク領域から銀河中心へのガス供給過程において重要な役割を持つと考えられる。特に内部バーは銀河中心へのガス供給過程における、100 pc 領域から 10 pc 以内へ輸送する重要な銀河動力学構造の一つであると考えられるが、内部バーの形成・進化に関する理解は十分に進んでいない。最近の N 体シミュレーションによる研究で、内部バーのガス輸送が銀河中心にある超大質量ブラックホール（Super Massive Black Hole; SMBH）やその周辺の中心核星団などを含む「中心質量集中構造 (Central Mass Concentration; CMC)」の質量増加を促し、質量増加した CMC が内部バーを力学的に破壊することで SMBH の質量に上限を設けるシナリオ（内部バーと CMC の共進化シナリオ）が提唱されている。また、バーが作る重力場中でのテスト粒子を用いた軌道計算により、外部バーと内部バーからなる二重バーを構成する軌道群（以下、二重バー構成軌道群）の規則性や安定性に関する理解が進みつつある。しかし、N 体シミュレーションによる研究と軌道群の研究を関連させた、SMBH の質量増加が二重バー構成軌道群に及ぼす力学的影響や内部バーを破壊する力学的要因は解明されていない。

本研究では、ガス流入によって質量増加した銀河中心の CMC を Plummer 球でモデル化し導入した上で、二重バー構成軌道群の安定性をテスト粒子計算で調査した。先行研究では、バーと内部バーのパターン速度の比が主に二重バー構成軌道の安定性を決めていた。一方、本研究では銀河中心から約 10 pc 程度の小さな領域に質量が集中した CMC を考慮する場合、中心領域に新たな共鳴が発生し、その半径周辺の軌道群のカオス性が増加することが新たにわかった。さらに、CMC の質量増加に伴って共鳴を起こす位置が銀河中心付近から内部バーの大きさに相当する約 150 pc まで移動する事から、CMC が質量を獲得していく過程で内部バーの構成軌道群全体が破壊される事が予測された。

本研究の結果は、先行研究のように二重バーの構成軌道の安定性がバーと内部バーの関係だけで決まるものではなく、内部バーによるガス流入で成長する CMC 質量にも大きく依存することを示すものである。これは「内部バー形成→ガス流入→SMBH 成長→内部バー破壊」といった先行研究の N 体シミュレーションに基づく「内部バー-SMBH 共進化シナリオ」に対して、軌道論的アプローチからそのメカニズムに物理的解釈を与えるものであると言える。また、このように個々の星の軌道の性質に基づき内部バーと CMC 進化の関係を理解することは、JASMINE 計画（国立天文台 JASMINE プロジェクト）による天の川銀河の中心核パルジ領域の星の位置天文観測的研究へ発展させることも可能であろう。

令和2年度修士論文

Pa α 輝線で探る近傍 LIRG の空間分解した星形成活動 および銀河相互作用の影響

学籍番号：35-196124
氏名：中村洋貴

概要

様々な系外銀河研究が行われる中で、特に高光度赤外線銀河 (Luminous Infrared Galaxy; LIRG) は活発な星形成活動を伴うことが分かっている。その要因や LIRG の性質の研究は、銀河進化を理解する上で非常に重要である。

銀河の星質量と星形成率の間には非常に強い相関が存在することが知られており、これを Star Forming Main Sequence (SFMS) と呼ぶ。また近年銀河を空間分解し、星質量面密度と星形成率面密度の間にも同様の相関があることが分かってきた (resolved SFMS)。LIRG の星形成率や星質量を一般の星形成銀河と比較することは、LIRG の特徴を探る重要な手掛かりとなる。

星形成活動が活発化する主な要因のひとつとして、銀河同士の相互作用が考えられている。実際、相互作用銀河の比星形成率が孤立銀河に比べて高いことを示す観測結果もあり、シミュレーションによても同様の結果が得られている。これは銀河同士の相互作用によって分子ガスの流入が引き起こされ、それによって星形成活動が活発化される可能性が示唆されている。LIRG の星形成率および銀河同士の相互作用の影響を調べるために、本研究では Pa α 輝線を用いて銀河の星形成率を算出し、さらに銀河を形態によって merger 段階に分類し、その傾向を調べた。

Pa α 輝線 ($\lambda = 1.875 \mu\text{m}$) は、大質量星の高エネルギー光によって電離された水素ガスの再結合線である。大質量星は寿命が短いため、再結合線を観測することは星形成活動を直接的に観測することに繋がる。同様に水素の再結合線である H α 輝線と比較すると、Pa α 輝線は放射強度は劣るが減光量は小さいため、LIRG のようなダストに埋もれた星形成活動を調べる指標として非常に優れている。本研究では Pa α 輝線の Subaru/IRCS による狭帯域撮像観測サーベイである、PARADSISES の 26 天体のデータを用いた。

このデータ解析の中で、データセット内で時間変動する電流「パーシステンス」の存在が確認された。これは強い露光や長時間露光など、検出器内に蓄積された電子数に比例して生じるものだと考えられている。形状が必ずしも一定ではないことにより、既存のパーシステンステンプレートのみでは完全な補正を行うことができなかったため、本研究を行うにあたって新規テンプレートを作成し、2 種類のテンプレートを用いた解析手順を確立した。

得られたデータから K' バンド連続光成分、および Pa α 輝線成分を抽出し、銀河全体の開口測光から銀河の星質量および星形成率を求めた。他の研究と比較すると、本研究でターゲットは比星形成率が高い傾向にあり、これは銀河相互作用の影響によるもの、もしくは LIRG 内の分子ガス量が多いことによるものだと考えられる。しかし銀河を形態によって merger 段階に分類してもそれらに傾向は見られず、後者を支持する結果となった。また銀河を分解した星質量面密度と星形成率面密度の関係に関しては銀河相互作用による影響は見られなかったが、特に銀河の中心部で星形成率が他の研究よりも高い結果となり、銀河中心部における多量な分子ガスが示唆される結果となった。

今後の課題としては、銀河内の分子ガス量を調べるため他の波長での追観測や、天体数を増やすこと、より定量的な merger 分類を行うことなどが挙げられる。

リング・空隙構造をもつ原始惑星系円盤の物理構造と化学組成分布

35-196126 平田 圭佑

ALMA によるダスト連続波の高空間分解観測によって、原始惑星系円盤の多くは空隙・リングといったサブストラクチャーを持つことが明らかになった。このサブストラクチャーが形成されるメカニズムによってはガスの分布にも影響を及ぼすはずである。つまり、ダストの空隙が重い惑星によって形成されたのならば、周囲のガスも惑星に獲得されている。したがって分子輝線でも空隙が観測される可能性がある。サブストラクチャーを持つ円盤の化学状態を調べることは円盤の構造や惑星系形成の多様性理解にも必要不可欠な研究である。従来の原始惑星系円盤に関するモデル計算は一般的な性質・構造を解明しようとするものであった。一方で、高空間分解能観測が可能になったことで天体個別の構造が明らかになってきた。したがって、個別天体の構造に着目してモデル化することも惑星系形成理解につながる研究である。

本研究では ALMA Large Program "MAPS"で観測対象となる 5 天体のうち 2 天体を対象として、典型的な粘性降着円盤からガス質量、宇宙線電離率、元素存在度のパラメータを変えた影響を見る。パラメータを変えたモデルの分子柱密度が MAPS で観測された分子輝線から推定される柱密度を再現することを基準としてモデルが個別天体を再現するよう調整することを目標とした。原始惑星系円盤のダスト温度、紫外線・X 線輻射場を輻射輸送コードを用いて計算し、それらの物理状態に基づいてケミカルネットワークコード (Furuya et al. 2013) で化学組成とガス温度に関する計算を行った。

結果としては、時間的制約があり当初の目標を達成するようなモデルの構築には至らなかった。しかし、上記でパラメータとしたものは従来用いられてきた値から、天体の環境に合わせて変える必要があるだろうと考えられる。特に、原始惑星系円盤中の分子ガスのうちダスト表面に氷つき、ダストの中心星方向への降着によって円盤の局所的な元素存在度が変化する現象がケミカルネットワークに与える影響は大きいことがわかった。

木曾 Tomo-e Gozen を用いた高速移動天体検出システムの開発及び 即時追観測による微小地球接近小惑星の観測的研究

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻修士課程 2 年
学生証番号 35-196127 紅山仁

2021 年 1 月 25 日

地球に接近する軌道を持つ地球接近小惑星 (Near Earth Objects, NEO) は太陽系内の物質を地球にもたらしうる天体であり、その組成、強度、軌道進化過程やサイズ頻度分布の理解は、地球の水や生命の起源を解明する上で非常に重要である。多くの NEO は火星-木星間のメインベルトから軌道進化した天体であることがわかつており、その軌道進化過程では太陽や惑星の重力に加え、太陽の輻射に起因して小惑星の軌道や自転状態が変化する非重力効果が重要となる。非重力効果は天体の直径、密度、熱慣性など多くの物理量に依存する複雑な作用であり、観測的に非重力効果を検出することは小惑星の物理量の制限にも繋がる。非重力効果は直径が小さい天体により強く作用するため、非重力効果の検出には直径が小さい小惑星 (微小小惑星) の観測が有用である。また非重力効果により変化する小惑星の自転周期は非重力効果の物理量依存性を明らかにする上で有用な情報となる。微小小惑星の観測を行うには地球近傍に接近した見かけの明るさが明るい天体を観測する必要があるが、地球に接近した天体は見かけの移動速度が大きくなることで観測時に星像が伸びて感度が低下するという問題が生じてしまう。また見かけの速度が大きいために観測可能時間が短く、微小小惑星の組成や自転周期などの物理量を得るために追観測を行うことが難しい。このような理由から微小 NEO の発見率は低く、例えば直径 30m 以下の NEO の約 98% が未発見であり、物理量を得るために追観測は限られた天体にしか行われていない。近年では分以下の自転周期をもつ高速自転小惑星が見つかりつつあるが、10 秒以下の自転周期を持つ小惑星は発見されていない。各観測装置で推定可能な自転周期は電荷の読み出しなど露光時間のオーバーヘッド時間に依存するため、分以下の高速自転小惑星の周期を推定するためには高速撮像観測を行う必要がある。これまで得られている小惑星の自転周期は多種多様な装置で推定された値であり、どの自転周期までが真の小惑星の自転周期分布を正しく再現しているのか、また 10 秒以下の高速自転周期を持つ小惑星が存在しないのかは明らかではない。このような観測的困難を解決するため本研究では (1) 高速移動天体検出システムを開発し、それを用いることで Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データ中の NEO の探索を行った。また、(2) 微小 NEO の高時間分解光度曲線を取得することで自転周期と形状を推定した。

(1) ではまず Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測データの中から高速移動天体を検出するシステムの開発を行った。20 平方度の広視野で約 7000 平方度の空に対し 2 fps の動画観測を行う Tomo-e Gozen の全天サーベイ観測では毎晩約 20 TB の膨大なデータが生成される。そのため従来の移動天体検出方法ではデータ量に比例して多くの誤検出が発生し、真の移動天体の検出が困難となる。しかし高速移動天体の観測可能時間は短いため、真の移動天体であるかの即時判断は不可欠である。そこで本研究では誤検出と真の移動天体の分類をより正確に行うため、ランダムフォレストアルゴリズムを用いた機械学習モデルを作成した。さらに移動天体の中に存在する NEO 候補天体に対し即時追跡観測を行うために必要な機能を実装したウェブビューアーを開発した。開発した高速移動天体検出システムを用い、Tomo-e Gozen 全天サーベイ観測データ中の NEO を探索した。約 1 年 4 ヶ月の全天サーベイ観測において NEO 候補天体に対し 2752 回の追跡観測を実施し、新たに 18 天体の NEO を発見することに成功した。これまでに Tomo-e Gozen が発見した NEO の平均移動速度は 2.8 arcsec/s、平均直径は 20 m であり、今まで困難であった高速移動する微小 NEO の発見に成功しているといえる。

(2) では本研究で発見した NEO を含む計 29 天体の微小 NEO に対し、Tomo-e Gozen を用いた 2 fps の動画観測を行い 20 分間の光度曲線を取得した。その結果、過去に Tomo-e Gozen を用いて観測した NEO を含めた計 34 天体のうち 19 天体の自転周期が求まった。先行研究との自転周期の比較から、本研究で推定した自転周期の分布には 100 秒以下の短周期に超過傾向が見られることがわかつた。これは露光時間や読み出し時間が無視できない従来の観測では小惑星の高速自転を正しく検出できていなかったことを示唆する結果である。また重要な結果として、2 fps の観測を行っても自転周期 10 秒以下の NEO は検出されなかつた。微小 NEO の系統的な高速観測により高速自転小惑星が存在しないことを示したのは本研究が初めてである。次に推定した微小 NEO の自転周期と YORP 効果を考慮した自転加速モデルを用いることで NEO の年齢を推定した。その結果微小 NEO の年齢は、NEO に関連する典型的な力学進化過程のタイムスケール (~ 10 Myr) に比べて若いことがわかつた。この若さはメインベルトから時間をかけて NEO へと軌道進化する一般的な力学進化過程では説明できず、微小 NEO が生成したばかりの天体であることを示唆する。微小 NEO の年齢の若さは 1) 微小 NEO は地球近傍領域でより大きな母天体が自転加速、潮汐力および熱疲労により破壊されることで生成した天体である、2) 微小 NEO の内部強度は小さく、高速自転する NEO は破壊されるため年齢が若い天体しか観測されない、という二つの解釈により説明できる。

赤方偏移 4.6 付近での明るいサブミリ波銀河の性質

学籍番号: 35-196128 三橋 一輝

遠方宇宙で爆発的に星形成を行っており、形成された星の残骸からできる塵（ダスト）を多量に含む銀河はサブミリ波銀河と呼ばれる。これらサブミリ波銀河は、形成された星からの紫外線を銀河内のダストが吸収し、遠赤外線によって再放射する機構が卓越しているため、遠赤外の放射が非常に明るいことがわかっている。加えて、サブミリ波銀河が主に観測されるサブミリ波帯では、遠方銀河観測においても遠赤外のダスト放射の見かけの明るさが暗くなりにくい利点がある。ゆえにサブミリ波銀河は活発な星形成と遠方までの観測可能性から、銀河進化に迫る上で非常に適した観測目標であると言える。ところがサブミリ波銀河はダストの紫外線吸収によって紫外・可視での検出が難しく、分光観測による赤方偏移同定が非常に難しいため、その性質は未だによくわかっていない。そこで本修士論文では、広域探査性能に優れたサブミリ波カメラである SCUBA-2 と、空間分解能、周波数分解能と感度の面で世界最高峰の性能を持ち、分光観測も可能なミリ波サブミリ波干渉計である ALMA を組み合わせることにより可能となった大規模サブミリ波銀河探査データを用いて、他の輝線に比べて明るく、赤方偏移決定に対し非常に有効である [C II] 輝線を発する赤方偏移が 4.5 付近のサブミリ波銀河を探査し、その性質を議論する。

輝線探査の結果、6 天体から輝線を検出した。そのうち 1 天体からの輝線は観測波長帯の端で検出されたため、詳細な解析から除き、最終的に 5 天体からの輝線を得た。5 天体のうち 3 天体は別の波長帯での観測により CO(5-4) 輝線が検出されたので、赤方偏移 4.6 のサブミリ波銀河と同定した。残る 2 天体は、等価幅の比較と多波長観測データに基づいて考えると、赤方偏移 4.6 のサブミリ波銀河である可能性が高いことがわかった。積分強度図と速度図から、5 天体はすべて回転ガス円盤を持っていると思われることがわかった。得られた輝線幅がダークマターハローの回転速度を反映していると仮定して 5 銀河のダークマターハロー質量を見積もると、 $2\text{--}8 \times 10^{12} M_{\odot}$ 程度であった。推定したダークマターハロー質量をもとに、理論モデルから得られるハロー質量関数と比較すると、大質量ハロー ($M_h > 4 \times 10^{12} M_{\odot}$) において非常に高確率でサブミリ波銀河が存在している可能性が示唆された。これは単一の銀河合体などによる短期的星形成ではなく、継続的銀河合体やガス降着による長期的星形成を支持する結果であると言える。加えて今回検出した [C II] 輴線により制限した [C II] 光度関数からは、非常に高い ($\epsilon \sim 0.1$) 星形成効率（星形成率を全ガス降着率で割った値）が示唆された。この値は先行研究で示された、赤方偏移 0（現在の宇宙）において $M_h \sim 10^{15} M_{\odot}$ のような大質量ハローを持つ銀河団が赤方偏移 4-5 で持つ最大の星形成効率と一致している。検出したサブミリ波銀河同士の典型的距離がシミュレーションで得られた原始銀河団のスケールとおおまかに一致していることを加味すると、我々が検出したサブミリ波銀河は赤方偏移 0 で大質量ハローを持つ銀河団に成長する原始銀河団メンバーの、最も星形成が効率的な時代を観測したと考えられる。

銀河渦状腕形成の素過程 -重力散乱による軌道位相同期-

学籍番号：35-196129

氏名：吉田 雄城

渦状腕形成は銀河天文学における大きな未解決問題の一つである。渦状腕形成モデルの一つとして、スウィング増幅機構が考えられている。しかし、スウィング増幅機構の素過程については、直感的な考察がよくなされるが、未だ明らかにされていない部分が多い。理論や数値シミュレーションにより、スウィング増幅機構の過程で渦状腕重力によって星のエピサイクル運動の位相が同期することが示唆されており、この重力散乱がスウィング増幅機構の素過程であると考えられている。しかし位相同期が起こる際の詳しい物理的な研究は行われていない。

本研究は、星と渦状腕の重力相互作用を、星が銀河円盤中の摂動源からの重力散乱を受けるという制限問題に還元することで、スウィング増幅機構の素過程の物理現象を解明することを目的とした。銀河円盤中の星の運動にはエピサイクル近似を適用し、摂動源は質点と長楕円体の2つの場合について考えた。そして重力散乱前後のエピサイクル位相に注目して、位相同期の円盤物理量や星の軌道要素、摂動源パラメータに対する依存性や位相同期が起こる条件を調べた。また、初期条件に一様分布な星の集団を用意し、摂動源の重力散乱によって生じる構造について調べ、さらに摂動解析から予測できる構造と比較を行った。まず、質点摂動源の場合に円盤パラメータや星の軌道要素に対する依存性を調べた。星の軌道やエピサイクル位相の時間進化を調べると、初期エピサイクル振幅が小さい場合には重力散乱時に星の軌道が変化して位相は収束する振る舞いが見られ、位相同期が起きた。そして物理量に対する依存性について、初期エピサイクル振幅が小さい時や銀河円盤シアレートが大きい時に位相同期が起りやすいことが示された。この条件は摂動源重力が効率良く働く条件であり、重力散乱によって位相同期が引き起こされることが確認できた。次に一様分布な星の集団を用意してその時間進化を調べると、摂動源周辺にトレーリング構造が生じることが確認できた。このトレーリング構造は渦状腕の形状をしており、渦状腕の一部であると考えられる。そして生じた形状は星の軌道と一致しており、星の運動の位相が同期することによって渦状腕状の構造が生じることがわかった。また面密度の増幅度合いを調べると、初期エピサイクル振幅が小さい時やシアレートが大きい時ほど面密度はよく増幅されることがわかった。そして最後に、摂動源を長楕円体として近似し、その形状パラメータへの依存性について調べた。長楕円体の形状は位相同期に影響を与えることが示され、ピッチ角が $\pi/2$ 付近でよく位相同期が起き、また長楕円体の長軸の大きさが位相同期現象に影響を与えることが示された。ピッチ角や長軸の大きさは、長楕円体と星の軌道との最接近距離を決定する物理量であり、摂動源重力が大きく働きやすい状態が位相同期の条件となることがわかった。

今後の展望としては、本研究の結果とN体計算の結果を比較し、スウィング増幅機構の物理を素過程の観点から説明することで、スウィング増幅機構の全貌を解明する。

Abstract

We investigate supermassive stars as part of the direct collapse black hole hypothesis aimed at solving the early universe supermassive black hole problem. Population III supermassive stars in the mass range $3.5 - 6 \times 10^4 M_{\odot}$ are simulated from hydrogen burning to the point of dynamical collapse using a post-Newtonian stellar evolution code. A helium core forms which is unstable due to the general relativistic instability. At that time, the star begins to contract, but is stabilized for a further $\sim 10^5$ years by subsequent nuclear burning. At dynamical collapse, a general relativistic hydrodynamics code is employed to determine the fate of the supermassive star. One of our models explodes due to rapid alpha process nuclear burning. We identify the criterion for this explosion to be the amount of helium present in the core at dynamical collapse. The rest of the models collapse to black holes. For the last few seconds of the collapse, a version of the hydrodynamics code with neutrino transfer is used to determine the neutrino light-curve prior to black hole formation. We find that a diffuse neutrino-sphere forms for all models, as well as an apparent horizon. The neutrino-sphere forms well above the apparent horizon, which only encompasses a few percent of the supermassive star mass when it forms. The early formation of the apparent horizon is due to the contribution of trapped neutrinos to the gravitational mass of the core. We identify entropy as the primary parameter for determining the characteristics of the collapse. In particular, the neutrino luminosity and neutrino-sphere radius both increase with entropy, and this result is in opposition to that found by previous works which examined higher mass supermassive stars ($\sim 5 \times 10^5 M_{\odot}$).