

平成30年度

修士論文発表会

論文要旨集

平成31年2月7日(木)、8日(金)

# 超音速ガス流による初代星の星団形成

金岡 慧 (ID:35-166112)

## [要旨]

ビッグバン元素合成でつくられる重元素を含まない始原ガスから誕生する星は初代星と呼ばれ理論的に存在が示唆されている。従来のシナリオから形成される初代星は大質量の単独星か小質量の集団であり、これらの直接検出は不可能と考えられていた。近年の理論的研究で、それまで考慮されていなかったバリオンの超音速流を宇宙論的初期条件に取り入れることで初代星形成に影響を与えることが指摘されている。特に、超音速流の速度が速い領域では大質量の初代星星団が形成される可能性があり、このような大質量の初代星星団であれば次世代望遠鏡での直接検出の可能性があると考えられる。しかし、こうした星団の観測可能性について議論するためには星形成ガス雲から誕生する初代星の質量分布が必要であるが、大質量ガス雲で形成されるの全ての星形成過程をシミュレーションするには計算コストが高い。先行研究 (Hirano et al. 2018) では宇宙論的初期条件にバリオンの超音速流を取り入れて形成したフィラメント状のガス雲で星形成が起こりやすい一部の領域のみを全ての星形成が完了する前にシミュレーションを終了していた (最初の星形成から 4 万年)。そのため先行して形成した初代星だけが調べられ、星形成時期全体を通しての初代星の質量分布を求めることができなかった。

本研究では、先行研究の宇宙論的シミュレーションより得られたフィラメント状の星形成ガス雲全体で輻射フィードバックが効きガス雲での星形成が完了する十分な時間 (10 万年) まで 3 次元流体シミュレーションを行い、ガス雲で形成される星の数とその質量を求めた。シミュレーション領域と時間を拡張すると計算コストが上昇するが、数値的に分解される上限密度  $n_{H,lim} = 10^7 \text{ cm}^{-3}$  を設定し、この密度上限以上でのガスの重力収縮を止めることで計算コストの問題を解決しシミュレーション領域と時間の拡張を実現した。また、密度構造が複雑で膨大な数の分割領域の時間発展の解析が必要となるため、自己重力不安定クランプの数と質量を簡単に見積もれるようジーンズ質量 ( $M_{Jeans}$ ) を用いた解析を行なった。ある密度以上をもつガスの累積質量 ( $M_{cum}$ ) と平均的なジーンズ質量との比 (重力不安定性) が最大になる密度が優先的に分裂が進む分裂スケールと仮定すると、統計的なクランプの数 ( $M_{cum}/M_{Jeans}$ ) と平均的なクランプ質量 ( $M_{Jeans}$ ) を求めることができる。

その結果、先行研究と同一の領域では星の数が増えクランプ数は約 29 個、平均的な星質量は  $120 M_{\odot}$  と見積もられ、この領域だけでも星形成が継続して起きていることがわかった。また、先行研究では扱わなかった領域でも星形成が起きており 10 万年でクランプ数は約 26 個、平均的な星質量は  $513 M_{\odot}$  と見積もられた。

このように得られた初代星形成の結果は、将来の電磁波、重力波観測で検証することが期待できる。見積もられた星の数と平均的な星質量から、初代星が形成する星団から放出される光のフラックスは先行研究の領域と新たな領域でそれぞれ  $3 \times 10^{-20}$ ,  $2 \times 10^{-19} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ 、と見積もられる。これは JWST で検出可能とされているフラックスにそれぞれ 2.1 桁で及ばず、星団を構成する初代星がより大質量が多数となり光度を稼ぐ必要がある。また、近年観測され始めたスピンの揃わない重力波ブラックホール連星の形成シナリオとして、初代星の集団を同時形成することができるバリオンの超音速流を取り入れた初代星の形成パスを考慮する必要があるだろう。

# スペクトル分類に基づいた Ia 型超新星の多様性を探る研究

学生証番号: 35-176113

有馬 宣明

## 概要

Ia 型超新星は、最大光度においては銀河全体にも匹敵する明るさ ( $M_B \sim -19.5$  mag) を持ち、経験則として知られる光度曲線と最大光度及びカラーの間の相関を用いて補正を行うと、最大光度のばらつきは  $\sim 0.15$  mag 程度までに抑えられるため、遠方宇宙 ( $z \lesssim 1.5$ ) に及ぶ距離測定の物差しとして宇宙論研究に重要な役割を担っている。しかし、世界の大規模な超新星サーベイ観測によって質の高いサンプルが数多く集められるようになると、母銀河の環境の違いによって、出現する Ia 型超新星の性質が本質的に異なるという結果が報告されたり、分光スペクトルに見られる特徴の違い、さらには光度曲線 - 最大光度関係の補正をしても残るカラーの intrinsic なばらつきが示唆されるようになった。Ia 型超新星を用いた距離測定の精度向上のためには、観測から得られる情報の中からこうした多様性を生む原因を探り、homogeneous なサンプルのみを集めたデータセットを構築することが望まれる。

本研究では、Ia 型超新星のスペクトルに特徴的なケイ素 (Si II) の吸収線の等価幅による 4 つのサブタイプ分類 (SS, CN, BL, CL) に基づき、multi-band の可視測光データ、スペクトルや膨張速度といった分光データ、および母銀河の形態分類情報をアーカイブデータからそれぞれ個別に集め、独自のデータセットを作成し、カラーや明るさに関係した観測量に見られる多様性を調べた。結果として、サブタイプごとに  $V - R$  のカラーの分布にオフセットが見られたが、これはスペクトルに見られる特徴を反映した結果と矛盾なく説明ができた。また、母銀河の Hubble 形態分類ごとの超新星のカラー分布からは、E/S0  $\rightarrow$  Sc以降  $\rightarrow$  Sa  $\sim$  Sb という順に赤いカラーを示す傾向がどのサブタイプでも同様に現れており、これは星質量や星形成率が中間的な値を持つ銀河に赤いカラーの Ia 型超新星が現れる、という過去の先行研究と consistent な結果であった。このことから、intrinsic なカラーのオフセットが母銀河の形態の違いによって存在している可能性がある。特異なカラーを示すものが BL サブタイプに多く現れたが、これらはカラー・カラー図を作ることで区別することができる。また、そのうち 2 つはダスト量が少ないと考えられる楕円銀河に現れており、典型的なものとは intrinsic に異なるカラーを持つことが示唆され、それらに影響されて全体としては小さい  $R_V$  の減光則に傾くということが考えられる。

# 太陽フレア中のプラズモイドの成長過程に関する観測的研究

35-176114 石塚典義

太陽フレアは、太陽の磁場エネルギーが熱エネルギーや力学的エネルギーに急速に変換され、太陽大気が加熱され、様々な波長の電磁波が放射される現象である。このエネルギー変換は、磁気リコネクションによって行われていると考えられている。しかし、太陽フレアの時間スケール程度で磁気拡散によって磁気リコネクションが起こるのは、1m 程度であり、実際の太陽フレアの空間スケール  $10^7$ m よりとても小さい。Shibata & Tanuma (2001) では、磁力線がまず小さな領域でつなぎかわって島のようになり（「磁気島」と呼ぶ）、その後それらが融合していくことで、短時間で太陽フレアが起きているというモデルを提案している。太陽表面のプラズマは、磁場に沿って運動するため、磁気島があると、そこにあるプラズマも島の形となる。（「プラズモイド」と呼ぶ。）このようなプラズモイドが、どのように成長するかや、それに伴ってどのような温度や密度がどう変わるかを明らかにすることは、磁気リコネクションの理解につながると期待される。そのため、太陽フレア中のプラズモイドの differential emission measure (DEM) を調べた。

観測には、太陽観測衛星 Solar Dynamics Observatory (SDO 衛星) に搭載された観測装置 Atmospheric Imaging Assembly (AIA) を利用した。AIA は、狭帯域フィルターを使用し複数の波長帯において、12 秒間隔で常に太陽全面の撮像観測を行なっている。2010 年 8 月 18 日に、太陽の西側の縁で発生した太陽フレアでは、磁気リコネクション領域において電流シートのような構造が観測され、その中では数秒角程度のプラズマの小さな塊が列になって発生し、互いに衝突・合体し、鉛直方向に噴出する過程が観測された (Takasao et al. 2012)。これはプラズモイドであると考えられている。Kumar & Cho (2013) では、このプラズモイドの DEM を、温度軸で対数をとったときに単一のガウス関数で表されると仮定して、SDO/AIA の観測値から推定したところ、DEM がピークとなるときの温度は 150–240 万度で周囲のコロナよりも低温であるとされた。しかし、過去に太陽観測衛星「ようこう」により X 線で観測されたプラズモイドの温度は、600–1300 万度であり (Ohyama & Shibata 1998)、大きく異なっている。今回の観測では、コロナ中にプラズモイドが発生しているため、プラズモイドの DEM は複数の温度構造を持つとしたモデルの方が妥当であると考えられる。

本研究では、温度軸で対数をとったときに複数のガウス関数などの和によって DEM を推定する Cheung et al. (2015) のコードを使用した。ただし、このコードも、コード性質上、系統的な誤差を持っているため、まずは正確性の検証を行ってから、実際のプラズモイドに適用した。

プラズモイドが発生する前に起きた噴出によって、プラズモイド発生領域のコロナには 1000 万度を超える温度成分が存在していて、その DEM は、1000 万度と 200 万度にピークを持っていた。プラズモイドは、周囲のコロナと同様に、1000 万度と 200 万度にピークを持っているほか、50 万度付近にも小さなピークを持っていることがわかった。また、プラズモイド同士の衝突の前後で DEM がどう変化するかを調べたところ、衝突直後に 250 万度–500 万度のエミッションメジャーが急激に増加する様子が観測された。

天の川銀河 (または、単に銀河系) は大量の星と星間物質などから構成されており、それらの天体は銀河系の重力により支配された運動をしている。したがって、銀河系の天体の運動を理解することは、銀河系の重力場を理解することに繋がる。また、銀河系内での太陽系の運動を調べることは、太陽系が銀河系のどこで誕生し現在の位置に至ったのかという、太陽系の起源のヒントにも繋がる。さらに、全ての観測で得られる天体の速度情報は、太陽系を静止基準とするときの情報である。そのため、他の座標系に変換するときには太陽運動が必要不可欠となる。そこで、本論文では、銀河系速度場の物理的性質を表すオールト定数 ( $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $K$ ) と太陽運動を同時に得られる「Oort-Lindblad モデル」を利用して、最新の *Gaia* データから銀河系の速度場と太陽運動の解析を行うこととした。

しかし、Oort-Lindblad モデルは、速度分散を無視した「力学的に冷たい系」を前提としている一方で、実際の銀河系の星は年齢 ( $\tau$ ) に依存して大きくなる速度分散を示すため、平均回転速度が質量分布により決まる円運動速度よりも遅くなることが知られている。この現象は asymmetric drift と呼ばれる。従って、従来の Oort-Lindblad モデルを用いた解析では星の年齢が大きいほど間違った値を得てしまうと予想される。

そこで、asymmetric drift の効果が Oort-Lindblad モデルによる解析において、asymmetric drift の影響を模擬データを用いて定量的に評価した。その結果、予想通り asymmetric drift の効果は星の年齢が大きくなるほど特にオールト定数  $A$ ,  $B$  と太陽運動の銀河回転成分  $V_{\odot}$  の 3 つのパラメータに影響することを確認した。そして、この効果を補正すべく、asymmetric drift を含むように拡張した Oort-Lindblad モデルの定式化を行った。

この拡張した Oort-Lindblad モデルを太陽近傍の観測データに適用し、オールト定数と太陽運動を解析した。解析には *Gaia* Data Release 2 (DR2) のデータと APOGEE などの地上分光データをクロスマッチした約 100,000 個の星の 6 次元位相空間データを用いた。その結果、従来の Oort-Lindblad モデルでは  $dV_{\odot}/d\tau \simeq 0.86 \text{ km s}^{-1} \text{ Gyr}^{-1}$  であったが、拡張した Oort-Lindblad モデルでは大幅に年齢依存性が改善された。ただし、asymmetric drift の効果は速度分散だけではなく密度分布と速度分散分布のスケール長 ( $h_R$ ,  $h_{\sigma}$ ) にも依存するため、仮定する  $h_R$ ,  $h_{\sigma}$  の値に応じて、 $dV_{\odot}/d\tau \simeq -0.14 \text{ km s}^{-1} \text{ Gyr}^{-1}$  ( $h_R = 2.1 \text{ kpc}$ ,  $h_{\sigma} = 4.2 \text{ kpc}$  の場合)、 $dV_{\odot}/d\tau \simeq 0.3 \text{ km s}^{-1} \text{ Gyr}^{-1}$  ( $h_R = 2.6 \text{ kpc}$ ,  $h_{\sigma} = 5.2 \text{ kpc}$  の場合)、 $0.1 \text{ km s}^{-1} \text{ Gyr}^{-1}$  ( $h_R = 3.1 \text{ kpc}$ ,  $h_{\sigma} = 6.2 \text{ kpc}$  の場合) であった。

この結果を踏まえ、星の年齢に依存する密度分布のスケール長の Toy モデルを作成することで、年齢に依らずに  $V_{\odot} \simeq 11 \text{ km/s}$  という値を得ることができた。この結果は、天の川銀河円盤において古い星ほど中心集中度が高い分布 (スケール長が短い分布) をしていることを示唆している。星の種族毎のスケール長の違いを調べるには空間分布を解析するのが通例であるが、空間分布の解析は星間減光などのバイアスを影響を強く受けるため、解析には困難を伴う。それに対して、本研究では、星間減光のバイアスを受けづらい運動学情報からスケール長の種族毎の違いを示唆した点において重要性があると言える。今後、*Gaia* や地上分光観測サーベイの進展、そして近赤外線位置天文観測衛星 JASMINE 計画が進むことにより、天の川銀河広域に渡る星の種族毎に分布の理解が進めば、本研究の示唆が検証されるとともに、より正確な太陽運動の評価が可能となるだろう。

# 重力レンズ効果と可視・近赤外深撮像観測で探る 形成初期の低質量銀河の性質

理学系研究科天文学専攻修士課程 2年

35-176116

菊地原正太郎

## 要旨

本研究では、Hubble Frontier Field (HFF) で観測された  $z \sim 6-9$  の Lyman ブレイク銀河 (LBG) と  $z \sim 0$  の低質量かつコンパクトな星系の類似性を、サイズ-星質量のパラメータ平面上で議論した。Hubble 宇宙望遠鏡および Spitzer 宇宙望遠鏡による深い撮像は、銀河団の重力レンズ効果による増光を組み合わせることで、 $M_{UV} \lesssim -14$  にも及ぶ暗い銀河の検出を可能にする。本研究では、Kawamata et al. (2018) のカタログを元に、HFF の  $z \sim 6-9$  LBG を 353 個選び、サンプルとして用いた。HFF 銀河団の質量分布モデルを元に LBG のソース平面における UV 等級  $M_{UV}$  を求め、その値を元に LBG をサブサンプルに分けた。サブサンプルごとにスタッキング解析を行い、S/N の良い画像を作成した。その画像に対して得られた SED を BEAGLE コードによりフィッティングし、星質量  $M_*$  などの物理量を得た。この解析により、 $z \sim 6-7, 8, 9$  における典型的な  $M_*-M_{UV}$  関係が精度良く求められた。この関係は星質量の広い範囲 ( $z \sim 6-7$  で  $6 \lesssim \log(M_*/M_\odot) \lesssim 10$ ) で成立し、過去の研究の結果とも無矛盾であった。得られた  $M_*-M_{UV}$  関係を元に、 $z \sim 6-7, 8, 9$  における星質量関数を求めた。低質量側では、 $z \sim 6-7$  で初めて  $M_* \gtrsim 10^6 M_\odot$  までのデータ点が得られた。同様に  $z \sim 8, 9$  においても、星質量関数が  $M_* \gtrsim 10^7 M_\odot$  まで続いていることが分かった。得られた星質量関数を Schechter 関数でフィットしたところ、Schechter パラメータの赤方偏移進化は有意には確認できなかった。さらに、Schechter 関数でフィットされた星質量関数を積分して、星質量密度を得た。最後に、 $M_*-M_{UV}$  関係を元にサンプル LBG の星質量を求め、サイズ-星質量の分布を得た。この分布は、 $z \sim 0$  で観測されている関係に従っていた。また  $z \sim 6-7$  LBG の中で、星団に準ずるサイズと星質量 ( $R_e \lesssim 30$  pc,  $M_* \lesssim 10^7 M_\odot$ ) をもつ候補がいることを発見した。これらの低質量かつコンパクトな LBG に対して個別に SED フィッティングを行い、改めて星質量を見積もった結果、 $M_*-M_{UV}$  関係を元に見積もった星質量と無矛盾な値が得られた。これは、これらの LBG が真に星団に近いパラメータをもつことを示唆している。今後は本研究で得られた星団に準ずるパラメータをもつ候補天体に対して分光観測を行い、より詳細な物理状態や形成過程を明らかにしていくことが求められる。

# 原始惑星系円盤中における磁気駆動円盤風のダスト成長への影響

桑原 滉

35-176118

## 概要

星の誕生とともに形成される原始惑星系円盤はダストとガスにより構成されている。惑星はその円盤内のダストの合体、成長により形成されていくと考えられている。原始惑星系円盤の散逸時間は、近赤外線観測により $10^6\sim 10^7$ 年であると推察されている。円盤の散逸機構としては、従来より考えられていた、中心星への質量降着とUVやX線放射による光蒸発に加え、磁気回転不安定性により駆動する円盤風の役割が最近注目されているが、いずれの機構においても不確定要素が大きく、実際の円盤散逸がどのように起きるのかは未だ理解されていない。一方で、円盤ガス中での固体成分の成長に目を転じると、こちらも多くの未解明問題が残されている。代表的なものの1つが、ダストが成長する前にガスとの摩擦により中心星に落下してしまう問題(Radial Drift Barrier) が微惑星形成過程の課題となっている。

本研究では円盤の条件を変えることによってRadial Drift Barrierの突破を試みるとともに、円盤風がダスト粒子成長に与える影響について数値計算により調べた。本研究では1+1次元数値シミュレーションを用いて、円盤動径方向に対するガス面密度進化、ダスト面密度進化、ダスト粒子半径の進化の三つの式を同時に解いた。そしてガス面密度の進化では磁気活動が不活性なdead zoneや円盤風による円盤鉛直方向の散逸、ダスト面密度の進化ではガスによるダストの巻き上げの影響や抵抗則の切り分け等も取り入れた。ダスト粒子の成長進化ではOrmel & Cuzzi 2008の代表的なダストサイズで近似したモデルを用いて、破壊せずに成長し続けるモデル式で計算を行った。

結果としてガス密度変化では磁気駆動円盤風やdead zoneの影響が円盤内側で顕著に現れ、ダスト密度変化に大きく寄与した。特に円盤風がある状態であつ乱流粘性が小さいような状態では、円盤風による内側部分のガス面密度の減少を質量降着が穴埋めできずに密度勾配が逆転するような状態になった。またダスト面密度の進化では圧力勾配による動径ドリフトの影響が顕著に現れた。特に円盤内側でのダストはガス面密度勾配の逆転により動径方向にドリフトすることも確認された。ダスト粒子の成長ではRadial Drift Barrierを突破するためには動径ドリフトの向きが逆転する必要がある、円盤内縁部のガスを効率的に減らすことが必要であることがわかった。

## 近赤外線面分光装置 SWIMS-IFU の開発

河野 志洋

学籍番号 35-176119

近年、銀河形成進化の研究において空間分解した波長情報を取得可能な面分光装置による観測が盛んに行われている。特に近赤外線では、可視光に比べてダストによる減光を受けにくいことや、遠方銀河の観測において静止系可視域の輝線が多く観測されることから、銀河形成進化において重要な観測手法となっている。そこで我々は、近赤外線二色同時多天体分光・撮像装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) に面分光の機能を追加する光学ユニットである SWIMS-IFU の開発を行った。SWIMS-IFU は広い視野と広い波長帯を有しており、既存の近赤外線面分光装置の中で観測効率が高いことが特徴となっている。

SWIMS-IFU はイメージスライサー方式の面分光装置となっており、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の3つのミラーアレイを有している。これらのミラーアレイがもつ個々のミラーを個別に製作し組み上げる場合、相対的な位置ずれを抑えるのが非常に困難であり、結像性能の劣化を招く恐れがあるため、SWIMS-IFU ではこれらのミラーアレイの一体加工を行う。一般に鏡面は研磨加工によって作製するが、ミラーアレイは複雑な形状を有しているため研磨による加工は困難である。そのため、超精密加工機による切削加工に目を付け、製作可能性の検証を行った。

平面鏡で構成されるスライスミラーアレイについては刃先形状が平らな回転工具であるフラットエンドミルを用いて加工可能であることが既に実証されている。しかし、瞳ミラーアレイとスリットミラーアレイについては曲面鏡を有しているためフラットエンドミルを用いた加工では製作が困難である。また、ミラーは階段状に並んでいるため、工具とミラーの干渉を避けるために小回りの利く工具を用いる必要がある。そこで、刃先形状が円形となっており様々な角度で加工が可能なボールエンドミルに着目した。本研究で行った試験加工では以下の2点を主な目的とした。

(1) ボールエンドミルを用いたミラーアレイ一体加工の実証：様々な加工条件で鏡面加工を行ったところ適切な加工条件下では要求精度を満たす結果が得られ、ボールエンドミルによるミラーアレイの加工が可能であることが実証された。また、ミラー間の相対位置については、今回の加工試験では加工プログラム原点と加工機の回転軸とのずれにより、最大で  $100\mu\text{m}$  ほどのずれが見られたが、加工前の調整を工夫することにより改善できると見込まれる。

(2) 低温環境下での最適な母材の検討：比較として Ni-P メッキ、RSA6061、A6061 の3種類に対して鏡面加工を行った。Ni-P メッキは鏡面母材として多く使用されているが、ベースとなる金属との熱膨張係数の差が生じてしまうため低温環境において鏡面にひずみが生じる恐れがある。そのため、単一の金属を鏡面加工することが望ましい。表面精度はすべての母材で要求精度を満たすことが確認できたが、A6061 では析出物などによる加工面の荒れが大きく見られた。RSA6061 では Ni-P メッキに比べると若干の荒れが生じているが、大きな差は見られなかったため、RSA6061 を用いて鏡面を加工可能であるといえる。

以上の加工実験からボールエンドミルによる RSA6061 を母材とするミラーアレイの加工可能性が実証された。RSA6061 は他の工具でも同様に使用可能であると考えられるため、SWIMS-IFU は光学素子に RSA6061 を用い、熱膨張係数が等しい A6061 を支持構造に用いることで低温下でも歪みが抑えられることが期待される。



# 木曾超広視野高速 CMOS カメラの性能評価及び 高速移動する地球接近天体の広視野探査

学生証番号: 35-176120

小島 悠人

## 概要

地球接近天体 (以下, NEO) とは, 近日点距離が 1.3 天文単位未満の小惑星又は彗星である. 現在までに Pan-STARRS や Catalina Sky Survey 等の大規模プロジェクトにより, 直径 1km 以上の NEO の 90% 以上が発見された. しかし, 直径 100m 以下の極めて小さい NEO (以下, 微小 NEO) は, 大型望遠鏡をもってしても検出が困難であり, 99% 以上が未検出と考えられている. 微小 NEO は太陽系形成及び進化への理解に重要なだけでなく, 地球に衝突すれば甚大な被害をもたらす天体である. その検出には, 地球に接近し明るさが増した微小 NEO が対象となるが, 小惑星の角速度が大きくなるためトレイルの検出に困難があった. 高速移動天体の信号雑音比劣化の影響は露光時間を短くすれば抑えることができる. 地球に接近する移動速度  $1''/\text{sec}$  以上の微小 NEO を検出するにはサブ秒の露光時間が望ましい. 本研究では, 東京大学木曾観測所で開発を進めている Tomo-e Gozen (Tomo-e) の広視野の高速観測を活かして高速移動 NEO の検出を目指し, 2 ヶ月に渡る試験観測により NEO 候補天体を 8 天体検出した. Tomo-e は 84 枚の CMOS センサにより 20 平方度を 2Hz での動画観測が可能である. 本研究は Tomo-e の開発及び評価, Tomo-e による高速移動 NEO の広域動画観測から構成される.

初めに本研究では, 高速移動天体の正確な位置決定をするための高精度時刻取得システムを開発した. センサへ繋がる信号線の一部を GPS 受信機に接続し, 露光開始時刻を取得する構成とした. 独立な参照用 GPS 受信機により, 本時刻システムの絶対時刻が  $0.5\text{msec}$  以下の精度で一致していることを確認した. 次に, CMOS センサを部分的に配置した Tomo-e カメラユニットを木曾 105cm シュミット望遠鏡に搭載してカメラの性能評価を行った. 筐体温度は外気温の  $+7$  度以内を推移しており, カメラで発生した熱は望遠鏡インターフェースを通じて外気に放熱されていた. 視野全域にかけて典型的なシーイングサイズの星像が得られ, 各センサ両端での星像サイズの差はおよそ  $0.1''$  であり, シーイングサイズの空間分布のばらつき以下であった. CMOS センサの性能評価を行い, 温度  $22^\circ\text{C}$  での暗電流は  $1.4e^-/\text{sec}/\text{pix}$  であり, 年間を通して暗電流が背景光フラックスを下回ることを確認した. 2Hz 連続撮像時での読み出し雑音は  $2.0e^-$  であり, 露光時間 0.5 秒で背景光限界に達していた. センサ端にある参照画素によりバイアス信号を除去し, 約 30 枚のフレームを重ね合わせた場合の固定雑音は  $0.9e^-$  であった. 評価試験の結果を元に, Tomo-e と他計画の感度比較をした.  $10''/\text{sec}$  以上の高速移動天体に対する感度では, 口径 1.8m の Pan-STARRS を上回ることがわかった.

次に本研究では, 移動速度  $1''/\text{sec}$  以上の NEO の検出を目標とする広視野試験観測を 2018 年 11-12 月に行った. 21 枚の CMOS センサを搭載したカメラユニットによる観測では, 一晩あたり 2000 平方度を 2.5 時間間隔で計 6,000 平方度を観測した. 動画データから移動天体を検出する手法を開発し, データ取得と並列に解析を進める構成とした. 移動天体と誤検出の分類には機械学習を取り入れ, 真陽性率 95%, 偽陽性率 0.2% の分類モデルを構築した. 以上の解析システムにより, 19 日間の観測で 13069 件の移動天体候補を検出した. その中の分類器モデルによる出カスコアが 0.9 以上の天体数は 2378 件であった. その中からカタログ化されている人工天体及び人工天体に似た特徴を示す天体を除去すると, 173 件となった. これらの天体の内, 9 件は一晩の内に 3 回以上の検出が確認でき軌道決定を行うことができた. その結果, 高速移動 NEO の可能性が高い 1 件を含む NEO 候補天体を 8 件検出した. 今後, Tomo-e による広域観測により, 年間 160 個の高速移動 NEO が検出される見込みとなった.

# Collective neutrino oscillations under high density environments in failed supernovae and the influence on the observed spectra

(Failed supernovae の高密度環境下でのニュートリノ集団振動とその観測への影響)

Masamichi Zaizen

財前 真理

(ID: 35-176121)

## Abstract:

A failed supernova emits high neutrino fluxes in a short time, while intense accretion proceeds with a high enough electron density to experience recollapse into a black hole. Then, collective neutrino oscillations occur near the neutrino-sphere due to the neutrino self-interactions and have large influences on observed spectra. On the other hand, high matter density prevents the collective flavor instability from growing and neutrino oscillations can be suppressed. We investigate collective neutrino oscillations under the three-flavor multiangle approximation and the multi-azimuthal-angle instability under the linear analysis in a spherically symmetric simulation of failed supernovae. Failed supernovae are environments with both higher neutrino flux and higher electron density than successful supernovae. Our results show that the matter-induced effects completely dominate over the neutrino self-interaction effects and the multiangle matter suppression occurs at all time snapshots we studied. These facts suggest that only Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein resonances affect the neutrino flavor conversions in failed supernovae and simple spectra will be observed at neutrino detectors. We also estimate the neutrino event rate in current and future neutrino detectors from a source at 10 kpc as a Galactic event. The observed neutrino spectra and the time evolution of neutrino detection could provide information about the dense and hot matter and constrain the neutrino mass ordering problem.

An unbiased survey of hot cores in the inner Galaxy with the  
Nobeyama 45m radio telescope  
野辺山45m電波望遠鏡を用いた銀河系内域のホットコア無バ  
イアスサーベイ

Kazuki Sato 佐藤一樹  
学籍番号：35-176123

January 26, 2019

**Abstract**

Hot cores represent an important stage of massive star formation. We have developed a method to make a spectral line-based survey of hot cores by utilizing the data of the FUGIN survey (FOREST unbiased Galactic plane imaging survey with the Nobeyama 45 m telescope). First we select hot core candidates by searching the FUGIN data for the hot core-tracing weak HNCO and CH<sub>3</sub>CN lines by stacking, and then we conduct separate pointed observations on these candidates to confirm and characterize them. We have applied this method to the  $l = 10^\circ - 20^\circ$  portion of the FUGIN data, and identified 22 Hot Cores and 15 Dense Clumps characterized by the line emission of hot core and/or dense gas tracer molecules. The identified Hot Cores are coincident with tracers of massive star formation such as ATLASGAL clumps, WISE H II regions and class II methanol masers. For those associated with ATLASGAL clumps, their bolometric luminosity to clump mass ratios are consistent with the star formation stages centered at the hot core phase. A principal component analysis of the Hot Cores in terms of the line intensity ratios relative to C<sup>34</sup>S suggests a systematic decrease of these ratios toward the later stages of star formation. The catalog of FUGIN Hot Cores provides a useful starting point for further statistical studies and detailed observations of massive star forming regions.

## 概要

人類がまだ実現していない重要な将来ミッションとして、波長 1mm 以下のサブミリ波帯スペース VLBI (Very Long Baseline Interferometry) が挙げられる。サブミリ波帯における長基線観測により、ブラックホールの黒い穴を直接撮像することができると期待されている。我々は、成層圏において電波干渉計が可能であるかを調査するため、気球 VLBI 実験を行っている。

気球 VLBI の技術的課題の一つとして、気球の姿勢と位置の決定・補正がある。我々は気球搭載望遠鏡の姿勢決定のための Star Tracker (STT) の開発を行っている。STT とは恒星を用いて慣性空間における姿勢決定を行う装置であり、撮像して視準方向を決定する。成層圏では昼間に運用することもあるため、地球大気による青い反射光がカメラに入ってきてしまう。また、太陽の迷光が影響し、カメラが saturation を起こしてしまう。昼間に天体を捉えることのできる気球用の STT は過去において問題がたびたび報告されており、NASA においても開発途上にある。本研究では、波長 620nm 以下を減衰するフィルターと、太陽光の迷光を削減するバツフルを備えた STT の開発・試験について報告する。STT のカメラが昼間に天体を捉えることができるかどうか検討をおこなった。成層圏において期待される条件を模擬した試験にて、温度・気圧による影響を調査した。

また本研究では気球ゴンドラを吊るして揺らす「振り子実験」を行った。気球ゴンドラの加速度計・ジャイロデータと通信衛星の信号からの干渉データを得た。これらのデータから気球の位置決定が可能であるかどうかを調査した。

# 星周物質との衝突による相互作用によって 光る超新星における光度曲線の研究

35-176126

武井 勇樹

## 概要

超新星の分類において、幅の狭い水素輝線スペクトルが存在しているものは II<sub>n</sub> 型超新星と呼ばれる。II<sub>n</sub> 型超新星は超新星における平均の明るさと比べて明るく光り輝いていることが特徴として挙げられる。輝線幅の観測から速度は 50 – 1000 km/s 程度と推定され、超新星によって吹き飛ばされた星外層の速度より遅いため、星周物質 (CSM) からの放射であることが考えられる。この観測事実は CSM が極めて大きな密度を有していることを示唆している。CSM の密度が大きいと、エジェクタが CSM と衝突することで衝撃波が発生する。エジェクタの運動エネルギーが熱エネルギーに変換され、放射となることで非常に明るく光り輝いていると考えられる。非常に明るいことから、II<sub>n</sub> 型超新星は遠方宇宙で起きてても観測することが可能であると考えられるため、II<sub>n</sub> 型超新星の理論的な調査は初期宇宙の星形成を理解する上で非常に重要である。しかし、これまでの理論研究ではショック領域の内部構造が十分に解明されてこなかった。II<sub>n</sub> 型超新星はショック領域からの放射で光り輝くため、現在までに得られている光度曲線では II<sub>n</sub> 型超新星の性質を詳細に理解するには不十分である。

著者は本研究において、ショック領域の内部構造を、定常状態を仮定することで計算することに成功し、II<sub>n</sub> 型超新星の理論的な光度曲線モデルを構築した。ショック領域の力学的構造を解明することで内部構造に依存した光度の計算ができるため、II<sub>n</sub> 型超新星が持つ特徴的な光度曲線を再現することが可能となった。また、CSM 内で輻射輸送計算をすることで光度曲線の立ち上がりを再現することができたため、立ち上がりから CSM の構造を推測できる可能性を示した。

Identifying the source of fading events of PTFO 8-8695  
with a young transiting planet candidate  
by simultaneous optical and infrared observations

若いトランジット惑星候補を伴う PTFO 8-8695 の  
可視赤外同時観測による減光イベントの起源の探究

谷本 悠太 (学籍番号 35-176127)

**Abstract**

Observing young exoplanets or planets just being formed would be a key to understand planet formation process. PTFO 8-8695 b is one of such a young planet candidate whose host star is about 2.6 Myr-old T-Tauri star and discussions about the nature of this system have been lasting. In order to reveal the mystery of this object, we observed PTFO 8-8695 for around five years with optical and infrared bands simultaneously using *Kanata* telescope at Higashi-Hiroshima Observatory. Through our observations, we found that reported single fading event split into two (i.e., deeper but phase-shifted “dip-A” and shallower but periodic “dip-B”), and disappeared, and then reappeared. Based on observed shapes of fading events, the wavelength dependence of the depths, and their periodicity, we tested four hypotheses: a cool starspot, an accretion hotspot, a planet, and a dust clump as candidates of these fading events. As a result, we found that dip-B, which has been lasting periodically from before the split is a planetary-origin event. Although the depths of dip-B changed event-to-event, spin-orbit nodal precession could explain such variation of depth. Also finding that a dust clump is the most likely source of dip-A, we constructed “precessing planet surrounded by dust cloud” scenario to explain not only dip-A and B but also the single fading event before the split. This scenario is consistent with the reported change in depth of the single fading event and even with reported results which were thought to be negative evidence to the planetary hypothesis. If the planet indeed exists, we possibly detected the interaction between a planet and another circumstellar dust. Moreover, this planet would be massive relative to its size and therefore it might be rocky due to the atmospheric escape. At least, being the third case of such a very young ( $< 3$  Myr) planet around a weak-lined T-Tauri star, this finding would imply that a planet could be formed generally within a few Myr.

# 超広帯域ミリ波サブミリ波多色カメラに向けたオンチップフィルター開発

東京大学大学院理学系研究科天文学専攻

35-176128 陳家偉

宇宙最大の天体であり衝突合体を繰り返して進化してきたとされる銀河団を遠方にまで渡って探査することは、宇宙の構造進化の歴史を紐解くことにつながる。この遠方銀河団の観測に威力を発揮するのが、遠方でもその表面輝度が下がらないミリ波サブミリ波帯で現れる Sunyaev-Zel'dovich 効果である。銀河団の物理量を導出するためには、その銀河団の占める巨大な領域の 100 GHz から 1 THz の広帯域のスペクトル形状を求めなければならない。そのためには、広い視野を持つ広帯域多色連続波カメラが必要である。

しかし、従来のダイクロイックミラーを用いて光学的に周波数を弁別する手法だけでは、観測装置の巨大化が避けられず 2 色が限界であった。より多色を目指すためには、小型の弁別手法が必要である。究極の小型化の方法として、検出器のシリコン基板上に構成されている超伝導伝送線路に、周波数フィルターを組み込む方法に注目した。例えば、検出器基板上に 3 種類の周波数フィルターを作り込むことで、1 つの焦点面で 3 色の同時観測が可能になる。我々は既に、ダイクロイックミラーで 300 GHz を境に周波数を弁別する 2 色連続波カメラ TESCAM を開発した。その次の段階として、TESCAM の 2 つの焦点面にそれぞれ 3 色検出器を搭載した 6 色連続波カメラの開発を進めている。

本研究では、6 色連続波カメラへの応用を目標に、3 色同時観測のための 150, 220, 270 GHz の広帯域バンドパスフィルターの設計を行った。観測周波数帯を決定し、かつ、観測周波数帯における光子を高効率で検出器に送るために、具体的には以下の要求を満たすフィルターの設計を行った。(1) 40 GHz 以上のバンド幅を持つ。(2) 透過域の振幅の振動 (リップル) は -3 dB 以下である。(3) 他のフィルターの中心周波数の透過率は -20 dB 以下である。

フィルターの段数を増やすことで、より急峻な減衰とより平坦な透過域を持つフィルターを作成することができる。先述の要求を満たすためには、バンドパスフィルターの段数が 150 GHz で 3 段以上、220 GHz および 270 GHz では 5 段以上必要である。それに対して、検出器チップの空間的制約から、 $500 \mu\text{m} \times 1000 \mu\text{m}$  の小さな領域でバンドパスフィルターを作成する必要がある。そこで、弁別特性の良いフィルターを実現するために、材料の物性を考慮した上で、少ない段数で透過率の急峻な減衰を持つチェビシェフフィルターを集中定数素子を用いた集中定数フィルターで設計した。

この集中定数フィルターの設計手順としては次のとおりである。まずは、チェビシェフフィルターであるバンドパスフィルターの回路を設計した。次に、この回路のインダクタ、キャパシタといった受動素子と等価になる構造を平面電磁界シミュレーションで設計した。そして、これらの構造を組み合わせて、フィルターの回路と等価な平面構造を設計した。最後に、平面構造の電圧透過係数、電圧反射係数の周波数特性を確認しながら、平面構造の調整を行なった。

この手法を使うことで、リップルが -0.5 dB 以下で透過域が平坦な、他のバンドの中心周波数の透過率が -20 dB 以下のフィルターを設計することができた。設計したフィルターの物理的な寸法とバンド幅は、150 GHz のものは  $80 \mu\text{m} \times 374 \mu\text{m}$  でバンド幅 55 GHz、220 GHz のものは  $96 \mu\text{m} \times 612 \mu\text{m}$  でバンド幅 52 GHz、270 GHz のものは  $80 \mu\text{m} \times 510 \mu\text{m}$  でバンド幅 66 GHz となった。先述した要求をすべて満たしたフィルターを、十分小さな構造で設計することができた。

# ヘイズの存在が期待されるウォームジュピター WASP-80b の大気観測

学生証番号:35-176130

氏名: 寺田 由佳

1995年に初めて系外惑星が発見されて以来、複数の手法を用いて多種多様な太陽系外惑星(以下、系外惑星)が発見されている。最近では、系外惑星を発見するだけでなく、追加観測によるより詳細な系外惑星の特徴づけも盛んに行われている。その中で、系外惑星の大気の研究に有用なのがトランジット法を用いた多波長観測である。この手法は、多色でトランジットを観測し、波長依存性を調べ、大気スペクトルのモデルと比較することで惑星大気の厚みや組成といった特性に制約を与えることができる。また、この観測は中口径の望遠鏡でも行うことが可能なため、様々なチームがこの手法を用いた観測を行なっている。国立天文台岡山天体物理観測所(OAO, 現ハワイ観測所岡山分室)の188cm反射望遠鏡に搭載されたMuSCAT(Multi-color Simultaneous Camera for studying Atmospheres of Transiting exoplanets)とスペイン・カナリア諸島のTCS1.52m望遠鏡に搭載されたMuSCAT2はこのトランジットの多色同時測光観測のための装置で、豊富な観測時間と精密な測光精度を生かして様々な観測を行なっている。MuSCATは30秒露光で、g,r,z<sub>s</sub>バンドそれぞれ、0.101%,0.074%,0.076%の測光精度が得られており、MuSCAT2の測光精度は、60秒露光で、g,r,i,z<sub>s</sub>バンドそれぞれ0.057%,0.050%,0.060%,0.076%という結果が得られている。これらの装置は、2018年から運用が開始されたTESS(Transiting Exoplanet Survey Satellite)のフォローアップ観測を大きな目的としており、今後多くの成果が期待される。

本研究ではMuSCAT、MuSCAT2のトランジットフォローアップ観測で得られたWASP-80bのトランジットデータの解析をMCMC(Markov chain Monte Carlo methods)とガウス過程の二つの手法を用いて行なった。この惑星は主星が比較的小さく、惑星は比較的大きいため、トランジットの減光率が大きい。また、この惑星の平衡温度が800Kと他のホットジュピターと比べて比較的低温のため、大気の特徴が目立っており、これまで多くの観測が行われてきた。先行研究において、大気スペクトルが可視域から近赤外域にかけてフラットになることが報告されているが、可視短波長のgバンドにおいては十分は制約がなされていない。そこで、今回は、(1)WASP-80bで検出の可能性があるレイリースロープの有無の判断で重要となるgバンドの $R_p/R_s$ の制約(2)MCMCとガウス過程のそれぞれの解析結果の比較(3)MuSCATとMuSCAT2の精度の比較の調査を行なった。

解析の結果、gバンドの先行研究以上の制約はできなかったが、先行研究と一致する結果が得られた。また、その結果から、WASP-80bの大気は太陽と同程度の金属量の雲のない大気モデルが棄却され、高高度の雲の大気モデルや大気の金属量が太陽よりも多い大気モデルがより合っていることが確認された。また、二つの手法を用いた解析は、MuSCAT2ではほぼ結果が一致し先行研究と同様の結果となったが、MuSCATのデータの解析結果では二つの手法による結果に差があり、ガウス過程を用いた解析で先行研究と一致する結果が得られた。これは、MuSCATがMuSCAT2に比べて地球大気の影響を受けており、ガウス過程を用いてその影響を取り除いているためと考えられる。また、MuSCATとMuSCAT2の解析結果は、MCMCによる解析ではMuSCATの方が誤差が小さい結果が得られており、ガウス過程による解析ではMuSCAT2の方が誤差が小さい結果が得られた。したがって、地球大気由来の誤差はMuSCATの方が大きい、ガウス過程を用いることによりその影響はある程度取り除くことが可能で、MuSCATとMuSCAT2で同程度の精度が得られる。



## Destruction of circumstellar disks by surrounding stars during star cluster formation

星団形成期の周囲の星による星周円盤の破壊

長谷川 大空 35-176131

Over 3500 planets have been discovered since first detection of the exoplanet. Most planets are hosted by field stars, and only dozen of planets have been found in star clusters. In clustering environment such as star clusters, circumstellar disks can be broken by their surrounding stars due to external far-ultraviolet (FUV; 6 eV–13.6 eV) radiation from their surrounding O, B-stars (photoevaporation) and dynamical disk truncation by stellar encounters in clustering environments. The efficiency of these disruption effects is still debatable. Recent improvement of the resolution of observations enables us to investigate the efficiency of the dissipation of circumstellar disks by the two effects in detail. In addition to that problem, initial distributions of star clusters are one of the still discussed issues. Recent theories and observations showed that initial states of star clusters are dynamically cool and clumpy, but not spherical. In this study, we performed  $N$ -body simulations of star clusters with the clustering initial conditions, constructed from the results of hydrodynamic simulations of the turbulent molecular clouds and investigated the destruction of circumstellar disks due to photoevaporation and stellar encounters in clustering environments. We regarded the clumps with the number of stars  $> 300$  and the half-mass density  $> 100 M_{\odot} \text{ pc}^{-3}$  as clusters. We classified them into the two types of clusters, young massive clusters and open clusters, and investigated the influence of the two disk dissipation effects. We found that photoevaporation is dominant for disk dissipation in young massive clusters, especially in the central region, but in open clusters, most of disks are destructed by stellar encounters. This is due to the mass and the number of O-stars in star clusters. In young massive cluster model, more massive clusters contain more massive stars. We also compared our results with observations and found that the observed relation between the fraction of the stars with disks and current FUV flux could be a result of disk destructions mainly due to past stellar encounters.

# Swift 衛星で選択された近傍超臨界降着活動銀河核の低温分子ガスに関する観測的研究

学生証番号：35-176133

山下 祐依

近傍宇宙で確認されている超巨大ブラックホール (SMBH) の質量と母銀河のバルジ質量との間の強い相関は、銀河とブラックホールの共進化関係を示唆しているが、両者間に働く相互作用の具体的な物理過程は未だ解明されていない。この共進化の物理過程として近年有力視されているのが、活動銀河核 (AGN) からのフィードバック (AGN フィードバック) である。AGN フィードバックとは、SMBH へのガスの質量降着現象によってエネルギーを得て明るく輝く AGN の強力な輻射圧に駆動されたガス流 (アウトフロー) が、星生成の材料となる分子ガスを圧縮または吹き飛ばし、母銀河の星生成活動を促進または抑制することである。この AGN の活動性を議論する上で鍵となるのが、SMBH へのガスの質量降着率を表すエディントン比 ( $\lambda_{\text{Edd}}$ ) と呼ばれる物理量である。特に、理論限界を超えるほどの極めて高いエディントン比 (i.e.,  $\lambda_{\text{Edd}} \geq 1$ ) を示す天体では、その激しい質量降着 (超臨界降着) によって AGN がアウトフローを駆動しやすいことが期待されるため、共進化の観測的研究において非常に重要なターゲットとなる。このような天体 (超臨界降着活動銀河核) は比較的稀ではあるが、ブラックホール成長史の中で非常に重要な進化段階にあることが理論的にも示唆されている。さらに、Izumi 2018 では、PG クエーサー等のクエーサーサンプルに対して  $\lambda_{\text{Edd}}$  とガス質量/星質量比  $f_{\text{gas}} (\equiv M_{\text{gas}}/M_{\text{star}})$  の相関を調べ、両者の間に弱い正の相関が見られたことを報告している。この結果は、超臨界降着活動銀河核のような降着率の高い AGN は、星生成の材料となる分子ガスを豊富に含む銀河に選択的に存在しており、母銀河の成長とも深く関係している可能性を示唆している。しかし、この先行研究では比較的高光度のクエーサーサンプルが選択されており、AGN 由来の光と星由来の光を分離して母銀河の星質量を推定する上で、誤差が大きくなると考えられる。

そこで本研究では、Swift 衛星/BAT で選択された AGN 分光カタログをもとに比較的低光度の AGN サンプルを新しく構築し、Izumi 2018 で示唆された  $\lambda_{\text{Edd}}$  と  $f_{\text{gas}}$  の相関関係を検証した。本研究サンプルは、Izumi 2018 で用いられたクエーサーサンプル ( $z \sim 0.0\text{-}0.3$ ) に比べてより近傍 ( $z \sim 0.0\text{-}0.15$ ) に位置するため、様々な物理量の推定における誤差が小さいことが期待される。さらに本研究サンプルは、Izumi 2018 のサンプルに比べてより小さな  $M_{\text{BH}}$  をもつなど、パラメータスペースを広げた相関の検証が可能となる。

本研究では、サンプルの  $M_{\text{gas}}$  推定のために CO 輝線観測を実施し、野辺山 45m 電波望遠鏡による観測では 6 天体で CO(1-0) 輝線を検出し、ALMA Band6 による観測では 4 天体で CO(2-1) 輝線を検出した。さらに ALMA サイエンスアーカイブで利用可能な CO 輝線観測データについても解析し、3 天体で CO(1-0) 輝線を、1 天体で CO(2-1) 輝線を検出した。そしてそれらの結果を他サンプルの既に文献値等で利用可能な CO 輝線観測値と合わせてサンプルの  $f_{\text{gas}}$  を推定し、 $\lambda_{\text{Edd}}$  との相関を検証した。その結果、本研究サンプルでは  $\lambda_{\text{Edd}}$  と  $f_{\text{gas}}$  の間に相関は見られなかった。この全体の相関を弱めているサンプルについて個別に確認したところ、そのほとんどが等価幅の小さい ( $< 50\text{\AA}$ ) H $\alpha$  広輝線の観測値によって  $M_{\text{BH}}$  が算出されており、 $M_{\text{BH}}$  が過小推定されることで  $\lambda_{\text{Edd}}$  の値が本来よりも大きく推定されている可能性が示唆された。

さらに前述した内容に加えて本稿では、超臨界降着活動銀河核をもつ天体における AGN フィードバックの母銀河へ与える影響の調査を行うために、電離ガスアウトフローが HST や VLT/MUSE 等によって観測されている NGC 5728 の、ALMA による CO(2-1) 輝線観測データに対して CO 輝線速度場の詳細な解析を行った。その結果、電離ガスアウトフローが検出されている領域の周りに、単純な銀河の回転運動とは異なる速度成分  $\Delta v \sim 150 \text{ km/s}$  が確認された。棒渦巻銀河であるこの天体の、銀河面のディスクの向きと銀河の回転運動方向から、この速度成分は棒渦巻銀河の動力学に由来するものではなく、分子ガスアウトフロー成分であることがわかった。この検出は、超臨界降着活動銀河核のように降着率の高い天体では AGN によってアウトフローが駆動されやすいという仮説を支持するものである。本稿で構築した AGN サンプルに対して ALMA を用いたさらなる観測を行い、分子ガスアウトフローの検出率を  $\lambda_{\text{Edd}}$  の値と照らし合わせることでこの仮説を検証することが期待される。

# Near-infrared monitoring of Mon R2 IRS3 and Development of target acquisition software for TAO/MIMIZUKU (Mon R2 IRS3 の近赤外線変光観測と TAO/MIMIZUKU 用天体導入プログラムの開発)

東京大学理学系研究科天文学専攻 吉田 泰  
学生証番号: 35-176134

2019年1月27日

## 要旨

天体の時間に対する光度変動を追うことは、直接中心天体付近を観測することができない天体に対して、温度や accretion rate などといった天体に直接関係する情報の取得につながる。変光観測は可視光ではよく行われているが、近赤外線に変光観測がされている例は大質量原始星 (Massive Young Stellar Object: MYSO) のような埋もれた天体ではまだ少なく、系統的な観測が望まれる。さらに、現在開発中の中間赤外線観測装置 MIMIZUKU の運用が開始されれば、中間赤外線波長帯で新たな高精度モニタリング観測を行うことができ、より埋もれた天体に対しても天体に関する情報を取得できることが期待される。

そこで本研究では二つの研究を行なった。第 I 部では、MYSO である Mon R2 IRS3 の近赤外線 (J, H, Ks band) でのモニタリング観測を 2 年半かけて行った。結果、Mon R2 IRS3 から  $\Delta J \sim 0.9$  等、 $\Delta H \sim 0.7$  等 and  $\Delta Ks \sim 0.3$  等の変光及びカラー変化 ( $\Delta J-H \sim 0.35$  等、 $\Delta H-Ks \sim 0.3$  等) を初めて検出した。また、近赤外線変光と同時期に観測されていた 6.7GHz Class II メタノールメーザーの変光との間の相関を初めて系統的に捉えた。これらの結果から、変光の原因として、星自体の構造変化を挙げ、有効温度変化や半径変化を起因とする星自体の変光を考えた場合、有効温度は 4,000-10,000 K、半径は  $52-94R_{\odot}$  というモデルで説明できることがわかった。これは中心天体への質量降着率が  $> 10^{-4} M_{\odot}/\text{yr}$  を考えれば説明できる。変光の要因は不明であるが、質量降着率の変化によって起きている可能性がある。

第 II 部では、MIMIZUKU の二視野同時観測用のソフトウェア開発を行った。具体的には、MIMIZUKU の視野の離れた二つの天体を一つの検出器上に導入するのに必要な望遠鏡およびフィールドスタッカーの駆動量の計算を行う天体導入アルゴリズム、および検出器上に写っている二天体の位置微調整に必要な駆動量を求めるアルゴリズムの開発および実装を行った。実装したプログラムを用いて、離れた二つの視野の天体の導入および検出器上での天体の位置の微調整を行えることをプログラム上および 2018 年 7 月および 12 月に行われたすばる望遠鏡での試験観測で確認した。試験観測では、天体導入においては検出器上での目標位置と実際の観測位置とのずれ量が 16 秒角の範囲内で導入できること、天体位置微調整は 1.1 秒角のずれ量の範囲内で微調整ができることがわかった。これは上記で述べたアルゴリズムを用いて、天体導入および天体位置微調整が行えることを示す結果である。

# The radio-loud fraction of $z \sim 4 - 6$ HSC-selected quasars and its dependences on redshift and luminosity

(HSC で選択された赤方偏移 4 – 6 のクエーサーにおける強電波比率と  
その赤方偏移および光度への依存性)

学生証番号: 35-176359 李 建鋒

## Abstract

It has been known that about 10–20% of quasars in the low-redshift universe ( $z < 1$ ) have been classified as ‘radio-loud’, which means that the majority of quasars are ‘radio-quiet’. Since this dichotomy can be related to the fundamental parameters of the supermassive black hole such as its mass, the mass accretion rate, and spin, it is important to understand the physical origin of the bimodality of radio-loudness and the radio-loud fraction (RLF) of quasars. Some previous studies showed that the RLF tend to depend on both redshift and optical luminosity, while it has been argued that the result is biased by the apparent magnitudes. To clarify this problem, we investigate a sample of  $z \sim 4 - 6$  HSC-selected quasars with the FIRST survey data and our JVLA observations. In order to estimate the RLF, we divide our sample into three bins of redshifts,  $z \sim 4$ ,  $z \sim 5$  and  $z \sim 6$ , and divide each of the subsamples into further two bins of luminosity based on the characteristic luminosity of their luminosity functions. We also stack the radio images of those without radio counterpart to measure the mean radio-loudness.

As a result, nine of 1666  $z \sim 4$  quasars, one of 224  $z \sim 5$  quasars, and none of 64  $z \sim 6$  quasars are classified as radio-loud. Based on that, the RLF with radio-to-optical flux ratio  $R_{\text{cri}} = 10$  of luminous samples at  $z \sim 4$ ,  $z \sim 5$  and  $z \sim 6$  are 3.2 – 92%, 0.0 – 91% and 11 – 31%, respectively; that of faint samples at  $z \sim 4$ ,  $z \sim 5$  and  $z \sim 6$  are 0.4 – 100%, 0.5 – 100% and 1.4 – 97%, respectively. We also constrained the mean radio-loudness of quasars at  $z \sim 4$ ,  $z \sim 5$  and  $z \sim 6$  to  $R < 2.1$ ,  $R < 3.9$ , and  $R < 11.1$ , respectively. Comparing with previous studies, our constraint on mean radio-loudness of  $z \sim 4$  sample, which is predicted to be high, is actually similar with that of  $z \sim 1$  quasars, and even about five times lower than that of  $z \sim 2$  quasars with the same luminosity. This may solve the problem of the apparent opposing trend of the RLF and the mean radio-loudness, which has been argued. Therefore, the evolution of RLF is likely to be existent, implying that the radio-loud and radio-quiet quasars do belong to different populations and evolve differently.

Although our constraints on the evolution trend of the quasar RLFs in the early universe is not stringent, we propose two possible scenarios here. One is that the RLF is high at  $z \sim 6$ , while it declines until  $z \sim 2 - 4$  and then rise again until the present; the second one is that the RLF evolution is following the best fitting that Jiang et al. (2007) derived. Two scenarios of evolution are discussed with a number of assumptions related to spin, accretion and the possible formation history of supermassive black hole.