

2015 年度 第 45 回  
天文・天体物理若手夏の学校

講演予稿集

## 重力・宇宙論分科会

一般相対論生誕100周年の今、我々はどれほど重力・宇宙論を解き明かしたか？

|      |  |
|------|--|
| 日時   | 7月27日 15:15 - 16:15(招待講演：大栗 真宗 氏), 16:30 - 17:30, 20:00 - 21:00<br>7月28日 9:00 - 10:00, 13:30 - 14:30, 16:00 - 17:00(招待講演：松原 隆彦 氏),<br>17:15 - 18:15<br>7月29日 9:00 - 10:00, 18:30 - 19:30   |
| 招待講師 | 大栗 真宗 氏 (東京大学)「サーベイ時代の宇宙論」<br>松原 隆彦 氏 (名古屋大学)「宇宙論における非線形構造形成」  |
| 座長   | 池田大志 (名古屋大学 D1) 矢久間司 (大阪市立大学 M2) 小笠原康太 (立教大学 M2) 吉浦伸太郎 (熊本大 M2) 大下翔誉 (東京大学 M2) 打田晴輝 (京都大学 M2)  |
| 概要   | <p>現在の宇宙論によると、我々の宇宙はインフレーションから始まり、ビッグバン元素合成、初代天体形成、銀河形成、宇宙再電離期を経て、現在の色彩豊かな宇宙へと発展してきた。このシナリオは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測や、宇宙の大規模構造の観測によって支持されつつある。一方でインフレーションを含めた初期宇宙や、現在の宇宙加速膨張、宇宙再電離など個々の問題には依然として謎が多い。これらの謎に挑むために、近年では、より精密な CMB 偏光観測、HSC(Hyper Suprime Cam) を用いた SuMIRe プロジェクト、SKA に代表される 21cm 線観測などの次世代の観測が期待されている。また理論的な側面でも、新しい理論モデルの開発や、数値計算を用いた研究なども進められている。</p> <p>一方、こうした宇宙の研究に欠かせない重力理論自体の研究も進められている。その中には、インフレーションや現在の宇宙加速膨張などを説明するために、従来の Einstein 重力理論に変更を加えた修正重力理論といった試みもある。こうした重力理論は、その非線形性ゆえ解析が難しく、現在でも様々なアプローチで研究されている。これらの重力理論の検証のために、ブラックホール周辺などの強重力場での天体現象の観測や、重力波の直接検出が必要である。重力波の直接観測はいまだ実現していないが、現在建設中の KAGRA などによる観測が期待されている。このような重力波観測が実現すると、重力波天文学が拓かれ、今まで知りえなかった初期宇宙の様子も明らかになる。</p> <p>これらを踏まえた上で、本研究会では宇宙論・重力理論の研究の最前線で活躍されている講師を招待し、最新の研究内容などについて講演していただく予定である。また宇宙論・修正重力理論に興味のある学生を募り、研究内容や勉強内容を発表・議論する場を設ける。この機会が、各々の研究をより深め、見識を広める助けとなることを期待する。</p> <p>注) 宇宙線としてのニュートリノは宇宙素粒子分科会で扱います。</p> |

大栗 真宗 氏 (東京大学)

7月27日 15:15 - 16:15 B会場

## 「サーベイ時代の宇宙論」

現在の宇宙論研究は大型サーベイ計画を中心に進んでいる。特に日本でもすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam (HSC) によるサーベイ観測がちょうどはじまったところである。HSC サーベイは日本が主導する初の大規模撮像サーベイとあって、その意味でも日本の天文学、宇宙論研究の一つの転機となるのではないかとと思われる。これらサーベイデータを用いた研究のアプローチは実は非常に多様でありアイデアや頑張り次第で予想外の大きな成果をあげることもできるだろう。本講演では宇宙論の現状と重要問題をごく簡単にレビューしたあと、サーベイ観測を利用した研究を紹介しその可能性を議論する。私自身 SDSS から HSC にいたるまでサーベイデータを使った研究を断続的に行ってきたがその面白さが若手の皆さんに少しでも伝われば幸いである。

松原 隆彦 氏 (名古屋大学)

7月28日 16:00 - 17:00 B会場

## 「宇宙論における非線形構造形成」

宇宙初期に生成された初期ゆらぎの振幅は十分に小さく、初期段階におけるその力学進化は線形近似によって十分に記述できる。線形近似ではゆらぎの発展がフーリエ・モードごとに独立に進化するため、理論的な解析も比較的容易である。ところが、現在の宇宙は小さな波長スケールほど極度な非線形性を持っているし、また、精密なレベルでの観測が可能な現代の宇宙論では、初期宇宙や大きな波長スケールにおいても非線形性の効果が重要な情報源として用いられている。現在の宇宙で我々に観測可能な量には多かれ少なかれ非線形性の影響が入り込むため、精密な宇宙論的解析には非線形効果の理解が欠かせない。本講演では、宇宙論における非線形構造形成の基礎的事項の解説から始め、最近の関連するトピックなどについて解説する予定である。

## 重宇 a1 21cmFAST による再電離期の様子の再現と輝度温度揺らぎの高次解析

久保田 賢志 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

初期の宇宙はインフレーションによる誕生後、ビッグバン元素合成を経て、高温高密度でプラズマ状態にある。その後再結合により中性水素が形成され、宇宙は中性化し、暗黒時代と呼ばれる中性水素で満たされた天体の存在しない時代がしばらく続く。その時代にダークマターとバリオンが重力不安定性により崩壊し、ハローを形成する。やがてハロー内で天体形成が始まり、放射を起こすようになる。この放射によって周りの中性水素がイオン化され、宇宙は再びイオン化した状態になる。これが宇宙の再イオン化であり、この時代を再電離期と呼ぶ。この再電離期を探るのに有効なものとして中性水素の超微細構造由来の 21cm 線がある。21cm 線の観測は輝度温度という量で与えられる。輝度温度には、密度揺らぎや中性率、スピン温度などの情報が含まれるので、観測からこの輝度温度を通して再電離期のこれらの情報を得ることができる。そこで統計量であるパワースペクトルなどを扱うことで再電離期の様子を知らることができる。しかし、この時代の物理は非常に複雑であり、これをシミュレーションで扱うのはかなりの時間的コストがかかる。そこで開発されたのが準数値シミュレーションの 21cmFAST であり、これはいくつかの近似を用いることで比較的簡単に再電離期の様子を再現することができる。今回は、21cmFAST を使って再電離期の様子を再現するとともに、計算して得られた輝度温度をもとにパワースペクトルとより高次の統計量であるバイスペクトルを用いて再電離期を解析する。ここでバイスペクトルを用いるのは、パワースペクトルでは輝度温度揺らぎの非ガウス分布を解析するには不十分であるためである。そしてそこから得られる結果と今後の課題について報告する。

1. SKA-JP Science Book(2015)
2. A. Mesinger, S. Furlanetto, R. Cen, 2011, MNRAS, 411, 955
3. H. Shimabukuro, et al., arXiv1412.3332v1[astro-ph.CO] 10 Dec 2014

## 重宇 a2 Large gauged Q-balls with regular potential

吉持 祐佳里 (大阪市立大学 素粒子論研究室 M1)

大域的な  $U(1)$  対称性を含むスカラー場のモデルでは、Q-balls と呼ばれる球状の非位相的なソリトン解が存在することが知られている。またバリオン数非保存の問題を解決しうるモデルとして、超対称性を課した素粒子標準模型からなる Affleck-Dine 機構があり、スカラー場のゆらぎによって Q-balls が生じる。Q-balls 自身はダークマターの候補であり、Q-balls は宇宙におけるダークマターの正体とバリオン数非保存の問題を解決する糸口として大いに期待されている。

超対称性粒子は電荷や色荷を持つので、Q-balls の拡張例としてスカラー場に局所的  $U(1)$  対称性を持ったゲージ場を入れた研究がなされた。その結果クーロン斥力によってその電荷の大きさは上限が生じるということが知られている。電荷に上限のないモデルとしてよく知られているものに、 $V$  の形をした線形のポテンシャルのモデルがあるが、それは  $=0$  が特異点となってしまう。また先行研究によって、特異点のないポテンシャルとして特殊な形のポテンシャルを考えることで、電荷に上限がなくなることがわかっている。

今回紹介する論文では、特異点のないシンプルなものとして、 $V = (\mu^2/2)\phi^2[1 + K \ln(\phi/M^2)]$  というポテンシャルを持つモデルを考え、そ

のソリトン解について調べた。その結果、電荷が大きくなるにつれてクーロン斥力によって電荷を持ったスカラー場は表面上に集まり、配位は殻型になるだけで Q-balls の球の形環さないことが分かった。これは Q-shells と呼ばれ、殻上に電荷が分布する性質は  $V$  の形をした線形のポテンシャルのモデルのものと類似している。また Q-balls はスカラー場が安定になっている配位だが、ポテンシャルのパラメータ  $K$  に依存しており、不安定解の配位があるという結果も得た。 $|K|$  が大きくなると、安定解と不安定解が漸近し、最終的に  $-1.07 < K < -1.06$  の領域で 2 つの解の再結合が起こることも分かった。

1. T.Tamaki and N.Sakai Phys. Rev. D90 85022 (2014)
2. N.sakai, H.Ishihara and K.nakao arXiv:1011.4828v2 (2011)
3. S.Coleman Nucl. Phys. B262 (1985)

## 重宇 a3 銀河系内超新星爆発候補天体からの重力波について

福田 隼大 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

アインシュタイン方程式によると、質量をもった物質が存在すると、それだけで時空にゆがみができる。その物質が運動すると、時空のゆがみは光速で伝搬する。これが重力波である。そのような重力波が観測できる可能性のある現象として、超新星爆発や、中性子星の連星合体などがある。本研究では、銀河系内の超新星爆発候補天体について超新星爆発を起こした場合に発生する重力波信号が、KAGRA, LIGO, Virgo といった地上レーザー干渉計検出器によって、どのような強度で検出されるかについて調べた。強度の計算ではシグナルノイズ比を計算した。それぞれの超新星からのシグナルノイズ比は時間と検出器の位置と検出器のノイズとそれぞれの星の位置に依存する。候補天体としては、銀河系内の赤色巨星や、ウォルフライエ星を対象とした。シグナルノイズ比が 10 程度であれば、検出できる強度がある。それぞれの星の強度の時間平均を計算すると、数 10kpc の星で 10 のオーダーとなった。本講演では、結果についても議論する。

1. P. Jaranowski, A. Krolak, and B. F. Schutz, Phys. Rev. VOL-UME 58 063001
2. H.Dimmelmeier, C. D. Ott, A. Marek, and H. T. Janka, Phys. Rev. D78 064056 (2008)

## 重宇 a4 cosmic string の kink による重力波の生成

松井 由佳 (名古屋大学 C 研 M1)

本発表では、宇宙に存在する cosmic string の kink から放出される重力波について詳しく説明する。[1] のレビューとその問題点の指摘をし、これからすべき研究の提案をする。

宇宙初期の真空の相転移によって、位相欠陥の一種である cosmic string が生成され、1 次元のひも状の高エネルギー領域が宇宙空間を漂う。String が複数本存在する場合、String 同士は互いに衝突する時がある。その際、ある確率で組み換わり、kink と呼ばれる尖った構造を作る。この kink は消えることなく string 上を伝播していく。String には loop 状のものも存在し、その上に伝播する波の重ね合わせにより、突発的に極めて大きな振幅を持つ構造を作る場合がある。これを cusp と呼ぶ。

kink や cusp は string に四重極の運動を与えるので重力波を放出するが、その放射のエネルギーは string の振動により生じる重力波のエネルギーよりも大きいことが知られている [2]。今回我々は infinite string 上の kink から放出される重力波に注目する。Kink から放出される重力波は、string や kink の分布を考慮することで背景重力波を形成する。[1] では kink から放出される背景重力波のパワースペクトルを計算して、SKA や LISA などの重力波の将来観測での観測可能性を示している。

しかし、[1] での重力波の見積もりには、string が衝突した際に組み換わる確率 (組み換え確率) や、string を生成する機構によっては存在する三本繋がったような構造 (Y-junction) は考慮されていない。例えば、string の組み換え確率を変えると、string と kink の分布が変わり、背景重力波のパワースペクトルも変化することが期待される。今後我々はそのような構造や特質を持った string による背景重力波の計算とその観測可能性について議論を進めていく。

1. M. Kawasaki, K. Minamoto and K. Nakayama, Phys. Rev. D81, 103523 (2010)
2. T. Damour and A. Vilenkin, Phys. Rev. D64, 064008 (2001)

## 重宇 a5 背景重力波の非等方性

米丸 直之 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

重力波検出方法の一つに Pulsar Timing Array(PTA) がある。パルサーとは、安定した周期でパルスを放射する中性子星で、周期の正確性から重力波の検出に利用できると考えられる。重力波により地球とパルサー間の時空が摂動を受けると、パルスの ToA(Time of Arrival ; 到来時刻) が変化する。重力波の signal は小さいが、複数のパルサーで ToA のずれ (timing residual) の相関をとることでノイズから分離することができる。

PTA により検出される重力波の周波数帯は  $10^{-9} \sim 10^{-7}$ Hz である。その周波数帯で検出される signal の大部分は、背景放射を作り出す Super Massive Black Hole Binary(SMBHB) 系からの放射のインコヒーレントな重ね合わせであると考えられている。背景放射が等方的な場合、timing residual の相関は、パルサーの angular separation のみに依存した関数 (Hellings and Downs curve) となる。もし波源が遠方に多く分布しているなら等方的だと考えられるが、波源数は有限で個々の signal の強さも異なるので、非等方性が生じる可能性がある。

波源の分布に非等方性がある場合、その非等方性が signal にどのように影響を与えるかをシミュレーション、考察する。

1. Taylor S. R., Gair J. R., 2013, Phys. Rev. D, 88, 084001
2. Mingarelli C. M. F., Sidery T., Mandel I., Vecchio A., 2013, Phys. Rev. D, 88, 062005

## 重宇 a6 構造成長率を赤方偏移歪みから無バイアスに導く方法論の構築

越前 大輔 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

現在の標準的宇宙理論である  $\Lambda$  CDM 模型は観測されている宇宙膨張を良く再現するが、加速膨張をもたらすと考えられるダークエネルギーの性質については全く分かっていない。また同様の宇宙膨張を予言する修正重力理論も提唱されており、これらを区別するためには一様等方

宙の膨張則だけでは不十分で、そこからのゆらぎに目を向ける必要がある。こうした宇宙論におけるモチベーションのもと SDSS などの大規模サーベイが行われ、日本でもすばる望遠鏡を用いた SuMIRe/PFS などが計画中である。観測から直接わかる銀河の数密度ゆらぎが宇宙論的な物質密度ゆらぎとどう結びついているのかは自明でなく、このバイアスはダークマターハローの質量などに依存することが判明している。一方で密度ゆらぎの成長速度である線形成長率  $f$  はバイアスの影響が比較的小さいことが期待され (Linder 2008)、修正重力理論の制限に適していると考えられる。ここで  $f$  を推定する有力な手段として、赤方偏移歪みを利用する方法が挙げられる。SDSS などの赤方偏移サーベイにおいては銀河の視線方向の運動によって赤方偏移歪みと呼ばれる空間分布のずれが生じることが知られているが、その異方性から線形理論のもとで密度ゆらぎの線形成長率  $f$  を導くことができる (Kaiser 1987)。最近の Okumura, Jing(2010) の研究によってこの方法で求めた  $f$  が非線形領域でバイアスに依存するものの、大スケール・大ハロー質量の線形領域ではほぼ無バイアスであることが数値的に示された。本研究は赤方偏移歪みから  $f$  を推定する際に生じる系統誤差について考察することを目的とし、具体的には Okumura, Jing が考慮したハロー質量依存性に加えてハロー形状がもたらす影響を調べるとともに、非線形領域でも銀河バイアスの不定性によらない統計量を探す予定である。

1. T. Okumura and Y. P. Jing ApJ 726 5 (2011)
2. T. Ishikawa et al MNRAS 443 3359I (2014)

## 重宇 a7 Sunyaev-Zel'dovich 効果で見える宇宙論

堀井 俊宏 (名古屋大学 C 研 M1)

銀河団は、宇宙の構造形成において、自己重力系をなす最大のオブジェクトである。銀河団は、バリオンとダークマターで構成されており、その中のバリオンの大部分が高温プラズマになっている。高温プラズマの観測では、基本的に X 線観測が用いられている。しかし、X 線以外の観測方法もあり、これらの観測を組み合わせたさらなる宇宙論への応用が期待されている。

銀河団の高温プラズマは、Sunyaev-Zel'dovich 効果 (SZ 効果) と呼ばれる効果により観測できる。SZ 効果は、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の光子が銀河団を通る際に、高エネルギーの電子による逆コンプトン散乱によってエネルギーを受け取り、CMB の各波長に対する光子数が変化する効果である。SZ 効果により、銀河団がある方向とその他の方向で CMB のスペクトルが異なる。理論的に、CMB の各波長に対する光子数は、電波領域の中でも短波長側 (サブミリ波) では増加するが、長波長側 (ミリ波、マイクロ波) では減少するという興味深い性質がある。また、光子数の増加、減少があるため、光子数の変化しない波長が存在すると考えられる。このような CMB の光子数の変化は、Planck の観測 [1] で確かめられている。

SZ 効果の観測と X 線観測を組み合わせることにより、銀河団の質量を求めることができる。さらに、距離-赤方偏移関係などの様々な物理量を求めることができる。

今回の発表では、まず、SZ 効果の概要について紹介する [2]。SZ 効果の観測と他の観測を組み合わせることにより、銀河団に関する様々な物理量を求めることができる。求めた物理量を用いて、宇宙論へどのように応用できるのかをいくつか紹介する。

1. Planck Collaboration, (2011) arXiv 1101.2024

2. T. Kitayama (2012) arXiv 1404.0870

## 重宇 a8 弱重力レンズ解析で探る dark matter halo の splashback radius

村田 龍馬 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

弱重力レンズ効果とは、一般相対論の線形近似から導かれる現象である。質量  $O(10^{14} M_{\odot}/h)$  の dark matter halo (以下 halo) が視線方向前景にある場合、後景の銀河からの光の測地線が曲がる。その結果、天球面上の銀河の形が本来の形から少し歪む。stack 解析をすることで弱重力レンズ効果のシグナルを得ることができ、halo の質量密度分布が引き出せる (Miyatake et al.)。

本研究では、弱重力レンズ解析から、halo の物理的半径である "splashback(跳ね返り) radius" を議論する。構造形成に従い、halo の重力ポテンシャルが深くなることで dark matter 粒子は halo を脱出できず、粒子の軌道は halo の中心周りで減衰振動する。splashback radius とは、最近降着した dark matter 粒子が最初の跳ね返りで到達する halo 中心からの典型的な最大半径であり、重力ポテンシャルの深くなる速度を支配する質量降着率  $\Gamma$  と赤方偏移  $z$  に主に依存する (Adhikari et al.)。splashback radius 周辺では質量密度の変化率が大きいので、弱重力レンズ解析が効果的である。

今回は、質量が近い銀河団のデータを銀河の中心集中度で2つのグループに分け、splashback radius の位置が2つのグループ間で有意に異なるか調べる。従来の stack 解析の方法に加え、最新研究の scaled-stack 解析の手法も使う (Niikura et al.)。halo の密度分布の universality、CDM モデルの定性的描像に合うか、また assembly bias の視点で考察する予定である。

1. Miyatake, H. et al., 2013, arXiv:1311.1480
2. Adhikari, S. et al., 2014, JCAP 1411, 11, 019
3. Niikura, H. et al., 2015, arXiv:1504.01413

## 重宇 a9 ブラックホールが見かけの Luminosity に及ぼす影響

大橋 洋平 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

一般相対論は光の軌道が重力場によって曲げられることを予言している。代表的な強重力場源としてブラックホールがある。ブラックホールは光を発することはないため、他の天体のように電磁波による観測を行うことは出来なかった。しかし、ブラックホールの「影」を観測することは原理的に可能である。ブラックホールが観測者と光源に挟まれた位置にある場合、光の一部がブラックホールに吸収されることにより影が発生する。この影の形状とブラックホールの持つ物理量(質量、電荷、自転)の関係が詳しく調べられている。[1]

ブラックホールの直接撮像を実現するには、ブラックホールシャドウを観測することが重要である。撮像の期待がかけられているのは VLBI(超長基線電波干渉法)による観測である。VLBI は、我々の地球の各地に建設された電波観測施設の観測データを総合することによって、地球スケールの基線長を用いた観測を行う。VLBI の解像度は日々進歩しており、ブラックホール候補の中で最も影スケールが大きいと見積もられている、いて座 A\* の観測が可能になると考えられている。い

て座 A\* は降着円盤やジェットなどを伴っていると予想されており、さまざまな光源モデルが提案され、それによってどのような像が観測されるであろうかについて活発に議論が行われている。[2]

私の研究では、ブラックホールシャドウ周辺の見かけの Luminosity が重力場からどのような影響を受けるかについて調べている。簡単のため、光源は無遠に分布していると仮定した。光子がヌル測地線に沿って運動すると仮定し、光源を出発し観測者に到達した測地線束の、観測球面上における密度を調べることにことごとくによって、観測される見かけの Luminosity の視線方向依存性を数値的に解析した [3]。その結果、ブラックホールシャドウと同程度のスケールの解像度で観測した場合でも、見かけの Luminosity の変化が検出できる可能性を示唆する結果を得た。

1. K. Hioki and K. Maeda, Phys. Rev. D80 024042 (2009)
2. R. Takahashi, Astrophys. J. 611 996 (2004)
3. V. Perlick, Living Rev. Relativity 7 (2004), 9

## 重宇 a10 強重力場周りの円軌道の安定性

鈴木 聡人 (弘前大学 浅田研究室 M2)

timelike 粒子の円軌道はその軌道半径に最内安定円軌道 (ISCO:innermost stable circular orbit) と呼ばれる下限がある。この ISCO は天体力学において重要な役割を担っている。例えば重力波天文学では inspiralling phase と merging phase との境界が ISCO とされている。またブラックホールの降着円盤の内側の縁が ISCO と関係していると考えられている。さらに、ISCO 半径はブラックホールの質量や電荷などのパラメータによって変化するため、ブラックホールの無毛定理の検証に有用である。

Schwarzschild 時空では ISCO が存在することがよく知られているが、その他の時空では最外安定円軌道 (OSCO:outer most stable circular orbit) を持つ場合がある。そこで本研究ではこれらのような軌道を marginal stable circular orbits(MSCO) と呼ぶ。Einstein 方程式の厳密解について MSCO が調べられているが、系統立てられた理解は未だに十分ではない。そこで本研究では MSCO を体系的に調べるために、MSCO の半径を導出する方程式を得た。この方程式に Sturm の定理を用いることで、Schwarzschild 以外の時空でもパラメータの変化に応じた MSCO の個数の変化を系統的に調べることができる。

1. T. Ono, T. Suzuki, N. Fushimi, K. Yamada, and H. Asada, arXiv:1410.6265 [gr-qc] (2014)
2. L. Rezzolla, and A. Zhidenko, Phys. Rev. D 90, 084009 (2014)

## 重宇 a11 原始ブラックホールと、LTB 解を用いた重力崩壊の解析

古賀 泰敬 (立教大学 M2)

宇宙初期に形成されたブラックホールを原始ブラックホールという。原始ブラックホールは、強い重力源や量子的な放射源として初期から現在までの宇宙の歴史に影響を与えてきたとされ、その存在量を考えることが高エネルギー物理や量子重力などの間接的な検証につながる期待されている。特に現在、さまざまなインフレーションモデルに制限をかけることができる点が注目されている。[1]

インフレーション中に生成されたゆらぎは宇宙のホライズンを出て長波長ゆらぎとなり、インフレーション終了後ホライズンに入る。このとき、振幅の大きいゆらぎは重力相互作用により収縮し、崩壊して原始ブラックホールを形成する。このようにして原始ブラックホールを形成するゆらぎのスケールは当時のホライズンスケール程度であるが、これは現在 CMB 観測によって調べられているゆらぎよりとても短い。つまり、宇宙の原始ブラックホールの質量分布とゆらぎの小スケールのスペクトルが対応を持つ。この対応を導くための研究がこれまでに数多くなされてきた。

原始ブラックホールの質量分布を調べるには、宇宙論的背景におけるブラックホール形成メカニズムの理解が必要不可欠である。しかし、一般に重力崩壊は解析的に扱うことが難しく、現状では数値相対論による研究がほとんどである [2]。一方で、ある特殊な条件においては重力崩壊を記述するアインシュタイン方程式の厳密解があることが知られており、球対称・塵状物質における解、LTB 解はそのひとつである。

この発表では、今日までの原始ブラックホール研究の進展をレビューし、LTB 解を用いてゆらぎの重力崩壊による原始ブラックホール形成を解析する方法について議論する。

1. B. J. Carr, in *Inflating Horizons in Particle Astrophysics and Cosmology*, pp. 119-149, arXiv:astro-ph/0511743.
2. T. Harada, C. M. Yoo, T. Nakama and Y. Koga, *Phys. Rev. D* 91 (2015), 084057

.....

**重宇 a12** 漸近的 AdS モノポールブラックホールとその熱力学的性質

宮下 翔一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)  
 ブラックホール唯一性定理が提唱された後、それが Einstein-Maxwell 系以外でも成り立つのかを調べるために非可換ゲージ場を導入した系におけるブラックホール解の探究が行われ、実際に非自明なブラックホール解が見つけれられていった。このようなブラックホールを非可換ブラックホールと呼ぶ。その中でも SO(3) ゲージ場を導入した Einstein-Yang-Mills-Higgs 系における非可換ブラックホールはその形成過程まで考慮した、唯一性の反例となる初めてのブラックホールであった。このブラックホールの描像としては、t'Hooft-Polyakov モノポールの内部に事象の地平線が存在する状況で、それ故にこれをモノポールブラックホールと呼ぶ。漸近的平坦な時空におけるモノポールブラックホールは他の非可換ブラックホールと比べると振る舞いが複雑でかつ複数ある結合定数の値によって振る舞いが変わる等の困難があり、当初は結合定数のある極限を取るなどして限定的な解析に限られていたが、後に詳細な解析が成された。[1]

本発表では 4 次元漸近的 AdS 時空におけるモノポールブラックホール解を数値的に示し、宇宙項を導入したことによる影響について言及する。またその熱力学的性質からブラックホール解の安定性について考察する。AdS/CFT の観点からも漸近的 AdS 時空におけるブラックホールの解析は有意義である。

1. T. Tachizawa, K. Maeda, and T. Torii, *Phys. Rev. D* 51 4054 (1995)
- .....

**重宇 a13** ブラックホールによる宇宙のリサイクルは可能か？

大下 翔誉 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M2)

inflation の機構は、scalar 場  $\phi$  が有限の真空のエネルギーを持つ不安定な状態から、安定な真空状態へ slow-roll することで生じると考えられている。この時、安定な真空状態がわずかにでも 0 でない真空のエネルギーを持つ場合 (つまり、de Sitter 時空の場合)、scalar 場  $\phi$  はある確率で再び、エネルギーの高い不安定な状態に相転移することが J. Garriga と A. Vilenkin らによって指摘された [1]。この機構によって、宇宙はたとえ加速膨張によっていずれはビッグリップを起こすとしても、いつかは必ず inflation 期に相転移し宇宙は新しく生まれ変わるようになるため、彼らはこの描像を recycling universe と呼んだ。相転移確率は black hole 周辺ではより大きくなるのが W. A. Hiscock[2] や Ruth Gregory[3] らによって示されている。しかし、black hole を種とした宇宙の生成が起きる前に、black hole が蒸発してしまう場合もあり得る。本研究は、black hole を種とした宇宙の相転移確率と black hole の蒸発率を比較し、black hole による宇宙のリサイクルが果たして可能か否かを議論する。

1. J. Garriga and A. Vilenkin *Phys. Rev. D* 57 2230 (1998)
  2. W. A. Hiscock *Phys. Rev. D* 35 1161 (1987)
  3. Ruth Gregory et al. *JHEP* 03 (2014) 081
- .....

**重宇 a14** 宇宙大規模構造の 3 点統計を用いた原始非ガウス性の制限

橋本 一彦 (京都大学 基礎物理学研究所 D1)  
 近年、インフレーションにより生成される原始密度ゆらぎの統計性により、銀河・銀河団の空間分布に強いスケール依存性が現れることが示された [1]。この効果を用いれば、数多あるインフレーションモデルを検証するための数少ない手がかりである原始密度ゆらぎのガウス統計からのずれ (原始非ガウス性) を制限できる。

実際、最低次の原始非ガウス性を表すパラメータは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を用いた方法よりも将来的に強く制限されることが知られている。最低次のみでなく、高次の非ガウス性のパラメータも組み合わせると同時に強く制限できれば、原始密度ゆらぎの起源が単一スカラー場によるものか否かを解明する手がかりとなる [2]。ところが、従来の銀河・銀河団の空間分布の 2 点統計を用いた方法では、パラメータ間に縮退が生じ、同時制限が難しかった。

現在、世界中で大規模な観測計画が実行されており、これまで大スケールで検出が難しかった 3 点統計の宇宙論への応用が現実的となりつつある。3 点統計は 2 点統計とは独立な情報を持つので、原始非ガウス性の制限に用いることでパラメータ間の縮退を解くことができると予想される。よって、本研究では 2 点統計と 3 点統計を組み合わせることで、複数の原始非ガウス性のパラメータを将来観測計画からどれだけ強く同時制限できるか見積もった。銀河・銀河団の空間分布の統計量を求める際には、重力による密度ゆらぎの非線形成長やダークマターの空間分布との非自明な関係を取り入れた計算が必要となる。本研究では、これらの効果に加え、統計量に現れる原始非ガウス性の影響を系統的に計算できる統合摂動論 [3] と呼ばれる手法を用いた精密な理論計算から 2 点・3 点統計による制限を求めた。その結果、将来的には高次の非ガウス性

のパラメータを CMB よりも数 10 倍強く制限できることがわかった。

1. N. Dalal, O. Dore, D. Huterer and A. Shirokov, Phys.Rev. D 77, 123514 (2008).
2. T. Suyama and M. Yamaguchi, Phys. Rev. D 77, 023505 (2008).
3. T. Matsubara, Phys.Rev. D 83, 083518 (2011).

## 重宇 a15 宇宙の大規模構造を用いたインフレーションモデルの制限

平川 拓実 (広島大学 宇宙物理学研究室 M2)

宇宙の平坦性問題や地平線問題を解決する方法として、初期宇宙でインフレーションという指数関数的な宇宙の加速膨張が考えられている。これは WMAP や Planck 衛星で観測された宇宙背景放射 (CMB) の異方性をうまく説明している理論モデルである。しかしながら、その理論モデルは未だに決定しておらず現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。

そのようなインフレーションモデルの中の一つに False Vacuum Eternal Inflation(FVEI) というものがある。このモデルでは負の曲率を持った宇宙が生じる。また  $\Lambda$ CDM モデルとインフレーションを組み合わせた宇宙論の標準モデルで作られる理論曲線と CMB の温度揺らぎの観測との大スケール ( $\ell < 100$ ) で  $\ell$  の anomaly の問題を解決できる可能性がある。

本研究では FVEI で考えられるような具体的なインフレーションのポテンシャルの形を与えてやることで生じる CMB の温度揺らぎの理論曲線と Planck による観測データなどを MCMC 法を用いて比較することでインフレーションのポテンシャルに制限を与える。

1. Raphael Bousso, Daniel Harlow, and Leonardo Senatore Phys. Rev. D 91, 083527(2015)
2. Jonathan White, Ying-li Zhang, and Misao Sasaki Phys. Rev. D 90, 083517 (2014)

## 重宇 a16 エネルギー輸送を伴うダークエネルギーとその応用

遠藤 隆夫 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙は加速膨張していることが複数の観測から明らかとなっている。宇宙の加速膨張を説明する試みとして二つのアプローチがある。一つは一般相対性理論に変更を加える修正重力理論であり、もう一つは一般相対性理論の枠組みのもとで加速膨張を引き起こすような物質を導入するものである。加速膨張を引き起こす物質は一般にダークエネルギーと呼ばれ、本発表ではダークエネルギーを導入するモデルに注目する。ダークエネルギーに宇宙項  $\Lambda$  を対応させた  $\Lambda$ CDM モデルは宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の温度非等方性や大規模構造といった観測結果を良く再現している。しかしながら、 $\Lambda$ CDM モデルには CMB 観測から得られるハッブルパラメータ ( $H_0$ ) の値よりもハッブル宇宙望遠鏡 (HST) の Ia 型超新星の直接観測による  $H_0$  の値の方が大きいという違いがある。さらに CMB 観測と赤方偏移空間歪み (RSD) 観測による構造の成長率に対する制限にも不一致が存在する。

任意のダークエネルギーは interacting dark energy (IDE)+matter に分離することができる [2]。本発表では、上記のダークエネルギーモ

デルの分離をパラメータ  $\alpha$  で特徴付けられる generalized Chaplygin gas(GCG) に適用した論文 [1] のレビューを行う。GCG は  $\alpha \rightarrow 0$  の極限で  $\Lambda$ CDM モデルに一致し、 $\alpha \neq 0$  の時はスケールファクター  $a$  が、 $a \rightarrow 0$  で物質のように振る舞い、 $a \rightarrow 1$  で宇宙項のように振る舞うという性質を持つ。IDE と相互作用する物質を dark matter(DM) のみとして IDE+DM によって GCG を取り扱おうと、パラメータ  $\alpha$  が正の値では DM から IDE へのエネルギー輸送を表し、この時 CMB と Ia 型超新星の間の  $H_0$  の値の不一致は解消される。 $\alpha$  が負の時には IDE から DM へのエネルギーの輸送を表し、この時には CMB 観測と RSD 観測による構造の成長率の違いを解消する。CMB、Ia 型超新星、バリオン音響振動、RSD の観測を組み合わせた  $\alpha$  の制限は  $-0.083 < \alpha < -0.006$ (95% C.L.) である。

[1] では IDE モデルを GCG のみに応用している。しかし IDE モデルは任意のダークエネルギーモデルに応用可能である。そこで本発表ではスカラー場が引き起こすダークエネルギーモデルへ IDE モデルを応用することについても議論する。

1. Yuting Wang et al., [1404.5706], Phys. Rev. D 90, no. 2, 023502 (2014)
2. David Wands et al., [1203.6776], Class. Quant. Grav. 29, 145017 (2012)

## 重宇 a17 インフレーション中の QED における非摂動効果の研究と原始磁場形成理論への応用

林中 貴宏 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D1)

宇宙観測の進展によって、宇宙磁場の性質が明らかにされつつある。星や銀河などの天体に付随する磁場だけではなく、銀河間領域のような宇宙論的スケールにおいても非常に弱い磁場が存在することや、そのような大規模磁場の強度の下限 ( $B \gtrsim 10^{-15} \sim 10^{-20}$  Gauss) が知られている。しかし、このような大規模磁場の起源についてはよく知られておらず、天体の活動や構造形成によるもの、初期宇宙における物理的過程によるものなどの説がある。特に、インフレーション中の電磁場の量子論的なゆらぎから、大規模磁場の種となる磁場を作るとする原始磁場形成理論には、大スケールにわたって、コヒーレントな磁場を作り得るといった特徴がある。初期宇宙で生成され、ポイド領域に残された磁場は、他の観測では調べることの難しい、初期宇宙に関する貴重な情報をそのまま残していると考えられるため、このアプローチには、他にはない重要な価値がある。しかしながら、原始磁場形成理論では、磁場ではなく電場が急激に成長し、問題を引き起こすことが知られており、十分な種磁場を作るとは理論的に困難であるとされてきた。そこで本研究では、強い背景場が存在する状況下で QED を考え、Schwinger 効果 (荷電粒子の対生成) を取り入れることによって、強い電場を消し去り、原始磁場形成理論の困難を取り除く可能性に着目した。Schwinger 効果は、場の理論における代表的な非摂動的な効果の一つで、通常の摂動論に基づく解析では得ることのできない効果である。近年、パラメータや空間の次元を制限し、解析的になる場合の Schwinger 効果が調べられているが、この結果をそのまま原始磁場形成に適用することは問題がある。本研究では、Laplace-Borel 変換を用いて非調和振動子を解析的に調べた A. Volos のアプローチに着想を得て、これまでよりも一般的な背景場の下での QED 有効作用 (特にその虚部) を計算し、原始磁場形成理論における帰結を探る。

1. A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)
2. J. Martin, J. Yokoyama, JCAP 01 025 (2008)
3. A. Volos, Ann. Inst. Henri Poincare, sec. A 39 3 (1983), p. 211-338

.....  
**重宇 a18** インフレーション理論による原子揺らぎの生成と新しいモデルの提案

寺内 晴輝 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M1)

イントロダクション

インフレーション理論により、宇宙の構造、CMB の非等方性などの観測的事実が説明されるので、宇宙初期にインフレーションがあったことは広く信じられている。しかし、未だインフレーションのメカニズムは分かっていない。そこで、メカニズムによって異なる、生成される原始揺らぎのスペクトルの傾きなどの統計量についての予言と、CMB での観測量を比べることで、正しいメカニズムの峻別ができる。本発表では、インフレーションで原始揺らぎがどのように生成、進化するかを示し、予言する観測可能な統計量を導出する。さらに、新しいモデルを提案し、その予言が Planck2015 の  $n_s - r$  平面の  $1\sigma$  領域内に入ることを示す。そして、我々のモデルの素粒子論的起源について議論する。

我々のモデルでの原始揺らぎの生成メカニズム

宇宙の加速膨張のことをインフレーション、インフレーションを引き起こすスカラー場をインフラトンと呼ぶ。我々が考案したモデルは以下のようなポテンシャルをもつ。

$$V(\phi) = M^3 \left[ \phi \exp\left(-\frac{\phi^2}{2m^2}\right) + \frac{m}{\sqrt{e}} \right] \quad (1)$$

我々のモデルではスカラー場は単一で、重力と minimal-cupple する。このモデルはヒルトップ型に分類されるモデルで、従来のモデルとの違いは、左側に無限に広い平らな丘をもつことである。

これから大まかなメカニズムを説明する。インフラトンが左側から右側に向かって、ゆっくり転がることによって、インフレーションが起こる。このときのインフラトンの転がり方はモデルのポテンシャルに依存するので、生成される揺らぎもモデルのポテンシャルの特徴を反映する。さらにインフラトンが右に向かって転がっていくと、ポテンシャルが急になっていくのでインフラトンが速く転がるようになり、インフレーションが終わる。

観測量と観測的制限

パラメータを調節することで、Planck2015 の  $n_s - r$  平面の  $1\sigma$  領域内に入ることが示せる。さらに、本発表では我々のモデルの素粒子論的起源について議論する。

1. D.Baumann, "TASI Lectures on Inflation," arXiv:0907.5424 [hep-th].

.....  
**重宇 a19** gauge 場と 2-form 場が在るときのインフレーション宇宙の厳密解

伊藤 飛鳥 (神戸大学 素粒子宇宙理論研究室 M1)

gauge 場と 2-form 場が exponential 型の関数でインフラトンとカップリングしている時のインフレーション宇宙について考察します。このような exponential 型の関数は高次元理論におけるコンパクト化において

よく現れることが知られています。

gauge 場と 2-form 場を含まない場合は isotropic power-law solution が存在することが知られており、gauge 場のみの場合は anisotropic power-law solution の存在が示されています。(参考文献 1)

本研究では、2-form 場のみを含む場合についても厳密解 (anisotropic power-law solution) が存在することを見た後、両方の場を含む場合にも厳密解 (power-law solution) が在ることを示し、さらにそのときは等方的な宇宙をつくるのが可能なことを説明します。

さらに解の周りの安定性について議論します。具体的には、fixed point が 4 つ存在することを見て、そのそれぞれが上述の 4 つの厳密解に対応することを示します。次にそれぞれの解の近傍での安定性をみることで、4 つの fixed point のうち安定となるのはただ 1 つだけであり、他の 3 つは鞍点となることが明らかになります。

最後に、どの解が安定点となるかはインフラトンのパラメーターと 2 つの結合定数によって決定されることを説明し、そのパラメーター領域を 3 次元図に描くことによって視覚的に明らかにします。

1. S.Kanno, J.Soda and M.Watanabe arXiv:1010.5307 (2010)
2. J.Ohashi, J.Soda and S.Tsujikawa arXiv:1303.7340 (2013)
3. M.Watanabe, S.Kanno and J.Soda arXiv:0902.2833 (2009)

.....  
**重宇 a20** 真空エネルギーの繰り込みと宇宙定数

塚本 拓真 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

宇宙定数を真空のエネルギーとみなすとき、場の量子論を用いた理論値と観測から得られる実験値の間には大きな差があることが知られている。これは宇宙定数問題と呼ばれ、なぜ観測値が小さくなるのかはわかっていない。

今回の発表では、近年提唱された、宇宙定数問題を解決する新たなモデルについて紹介する。このモデルでは、Einstein-Hilbert 作用に、物質場からの真空エネルギーへの寄与を打ち消す global constraint を与える場を導入することで、宇宙定数の値を観測値に近づけることが可能になる [1][2]。このモデルに基づき計算することで、宇宙定数のオーダーは観測結果と近いものになることが示されるが、framework 自体についての研究は不十分であり、今回の発表ではそれらの問題点についても述べる。

1. Kaloper, Nemanja arXiv:1505.01492(2015)
2. Kaloper, Nemanja, Padilla, Phys.Rev. D90.8(2014):084023

.....  
**重宇 a21** 修正 Teleparallel 重力によるインフレーションの導出

中谷 侑司 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

本発表は論文 [1] の review である。Teleparallel 重力とは時空の並進変換に関するゲージ理論により重力を記述しようとするもので、他のゲージ場との統一理論の構築に使える可能性が示唆されている。この理論における時空には曲率が無く代わりに捩率が存在し、重力は幾何的な性質ではなく単なる力として記述される。基本変数はゲージ原理によって現れる四脚場となるが、局所ローレンツ変換対称性があるため自由度が 16 個から 10 個に落ちている。これは計量の自由度と一致しており Teleparallel 重力が本質的に計量を記述する理論であることを表しており、実際に一般相対性理論と完全に等価であることが示されている。そ

ここでこの四脚場を本質的な量と捉える修正重力理論を考える。具体的には Teleparallel 重力におけるラグランジアンに Born-Infeld モデル [2] を適用することで局所ローレンツ変換対称性を破り 6 個の自由度を復活させるということを行う。この修正 Teleparallel 重力の正当性の検証として空間的に平坦な一様等方宇宙がインフラトンを導入せずにインフレーションを起こすかどうかを考える。結果として宇宙初期において加速膨張が実現できることが分かった。しかしこのインフレーションモデルにおけるゆらぎはまだ計算されていないため今後の課題として自分で試みる予定である。

1. Rafael Ferraro and Franco Fiorini Phys.Rev.D75:084031,2007
2. Barton Zwiebach "A First Course in String Theory" Cambridge University Press

重宇 a22 Horava Lifshitz 重力理論における Lorentz 非対称性の観測的制限

新居 舜 (名古屋大学 C 研 M1)

一般相対性理論はこれまで、太陽系の重力異常のテストや重力レンズ効果など、観測と整合的な予測をすることに成功してきた。しかし、一般相対性理論を量子論的に取り扱うことは深刻な問題をはらんでいる。一般相対性理論は、量子効果が支配的になる高エネルギー領域においてくりこみ不可能であるため、重力の量子補正を有限な値として得ることが出来ないのである。それ故、くりこみ可能な量子重力理論の建設が不可欠となったが、そうした量子重力理論の候補の 1 つに、2009 年に P.Horava によって提案された Horava Lifshitz 重力理論がある [?]。Horava Lifshitz 重力理論は、空間と時間が非対称なスケール則を満たすことで power-counting renormalizable となる [?]。しかし、時間と空間の等価性が失われるため、Lorentz 対称性が破れてしまう。本研究では、Horava Lifshitz 重力理論において重力と結合したスカラー場でインフレーションを起こし、インフレーション中に生成する初期ゆらぎのパワースペクトルに対して Lorentz 対称性の破れが与える影響を調査する。今後は CMB や大規模構造の観測結果から、Lorentz 対称性が破れるスケールに対して新たな制限がつけられるのか議論を進めていく。

1. P. Horava, Phys. Rev. D 79, 084008 (2009) [arXiv:0901.3775 [hep-th]]
2. S.Mukohyama, Class.Quant.Grav.27:223101,2010[arXiv:1007.5199 [hep-th]]

重宇 a23 高階微分重力理論におけるインフレーション：安定化機構と観測に対する予言

秋田 悠児 (立教大学 M2)

ニュートンの運動方程式を初めとして、時間発展を記述する物理法則は、通常、時間について二階の微分方程式の形に書かれる。宇宙膨張などを記述する際の一般相対論も二階の微分方程式により記述されている。一方で、量子重力理論などの基礎物理学から、高階の微分を含む重力理論(高階微分重力理論)が強く動機づけられている。しかし、このような理論は、高階微分項の存在に起因した不安定性(Ostrogradski 不安定性)を示すことが知られている。この不安定性が要因となり、現在まで、高階微分理論から観測に対して物理的に意味のある予言を与えることは出

来ないと考えられていた。

このような背景の下、我々は、「高階微分を含む非常に一般的な形の重力理論が、宇宙論的背景時空の上で安定化可能である」ということを示した。これは、先行研究(特定のモデルにおける、最大対称背景時空上での Ostrogradski 不安定性の除去方法に関する研究)を拡張し、インフレーションやダークエネルギーなど、宇宙論の様々な分野への応用を可能にしたものである。本研究により、高階微分理論による「観測に対する物理的に意味のある予言」を多様な場面で導出することが可能になった。

また、本研究は、高階微分理論の安定化という基礎物理学全般に関わる根幹的な問題に対する「純理論的な研究」と、観測量へ意味のある予言を与えるような「観測との比較に耐えうる研究」とが融合した研究であるという点において独創的であり、種々の分野に利用できる包括的な枠組みを構築するという点を特徴とする。

本講演では、まず、高階微分理論が内在する不安定性という問題を簡単な例を通じて理解する。続いて、理論の安定化の手法をハミルトニアン解析を用いて述べ、先行研究がどのように拡張されたのかを具体的に明らかにしつつ、本研究の結果をまとめる。

1. M. Ostrogradski, *Mem. Ac. St. Petersburg* VI(1850)385
2. T. j. Chen and E. A. Lim, *JCAP* 1405, 010 (2014) [arXiv:1311.3189 [hep-th]]

重宇 a24 プレーンワールドシナリオにおけるインフレーション

徳田 順生 (京都大学 天体核研究室 M1)

Theory of everything の有力候補である string/M theory によれば高次元時空の存在が示唆され、この観点では一般相対論 (GR) は低エネルギー極限の "有効理論" と考えられる。インフレーションは高エネルギー現象であるので、GR からの補正が観測される可能性がある。DECIGO などのスペース重力波観測計画によるインフレーション由来の初期重力波の直接観測が期待されている。従って、高次元時空の存在を考慮に入れて観測量 (テンソルスカラー比など) を計算することは非常に重要である。今回の発表では主に論文 [1][2] のレビューを行い、高次元時空の存在が観測的にどの程度制限されるか、また高次元の存在により観測値が GR の時とどう異なるかについて考察する。ここでは 5 次元 Anti de Sitter ( $AdS_5$ ) 時空上に 1 枚の 4 次元 de Sitter ( $dS_4$ ) プレーンが埋め込まれている状況を考える。また、作用には高エネルギーにおいて無視できないと考えられる高階微分を含まない最も一般的なものと、グラビトンと物質場の量子 1-loop 補正の項を導入する。

このセットアップの下、観測量の計算を行ったところ、インフレーション時のハッブル半径が  $AdS_5$  の曲率半径よりも小さい領域において GR の場合と異なる値が得られた。

一方で、5 次元時空を Schwarzschild-AdS 時空に拡張した時に観測量の値がどう変化するかということは興味深い問題である。特にインフレーション時のハッブル半径が  $AdS_5$  バルクの曲率半径よりも大きな領域において Schwarzschild-AdS ブラックホール質量が観測値に影響を与えることが修正されたフリードマン方程式の形から示唆される。従ってこの一般化は今後研究すべき課題であり、今回の発表ではこの点についても議論する。

1. M.B.López, Y.W.Liu, K.Izumi, P.Chen Phys.Rev.D

89,063501(2014)

2. M.B.López, P.Chen, Y.W.Liu Phys.Rev.D 86,083531(2012)

## 重宇 a25 Bigravity 理論におけるテンソルモード

山本 久司 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

近年、ダークエネルギーの謎を説明するなどのモチベーションから一般相対論の修正について盛んに研究されている。bigravity 理論 [1] は 2 つの計量を含む修正重力理論であり、一様等方かつ宇宙定数なしで加速膨張をする安定な宇宙論解があることがわかっている [2]。

本発表では [3] のレビューを行い、この解に対してテンソル摂動を計算して宇宙背景放射の温度揺らぎ非等方性とインフレーション起源の原始重力波のエネルギー密度を求めた。その結果としてこれらの観測量に対する波数、bigravity の理論パラメータ、そして 2 つの計量に関する摂動の初期値の依存性を示した。またこの初期値がある条件を満たす場合に宇宙背景放射や原始重力波は一般相対論のものと同じであることが分かった。更にインフレーションモデルにおける bigravity 理論について議論し、この初期条件がインフレーションによって自然に満たされることを示した。レビューを行う論文ではテンソル摂動のみについて考えたが、スカラー摂動やベクトル摂動に対して議論することで初期条件について更に詳しく知ることができると思われる

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, Journal of High Energy Physics 2, 126(2012), arXiv:1109.3515 [hep-th].
2. F. Koennig, Y. Akrami, L. Amendola, and M. Motta, and A. R. Solomon, Phys.Rev. D90, 124014 (2014), arXiv:1407.4331 [astro-ph.CO].
3. M. Johnson and A. Terrana, (2015), arXiv:1503.05560 [astro-ph.CO].

## 重宇 a26 Lovelock Black Hole 上のスカラー場の Quasi-Normal Modes

吉田 大祐 (神戸大学大学院理学研究科物理学専攻素粒子宇宙理論研究室 M1)

現在研究を進めているのは、修正重力理論の一つである Lovelock 理論の静的球対称 BH(ブラックホール) が背景時空である場合のスカラー場の QNFs を WKB 近似を用いて計算することである。一般に BH の周囲の重力場は、質量中心の動径方向について、準基準振動と呼ばれる離散的な振動数(Quasi-Normal Frequencies)をもった固有振動(Quasi-Normal Modes) の重ね合わせからなる振動を行う。この時、これらの各固有振動は減衰振動であり、BH の質量や角速度、電荷にのみ依存することが知られる。この振動は主に超重力天体の連星や、超新星爆発などによって BH が生成された時に生じる。この振動の方程式は、適切な座標で Schrödinger タイプの二階の線形微分方程式となり、一般にマスター方程式と呼ばれる。これは重力場について二つの境界条件を課すことによって、離散的な振動をすることがわかる。この離散振動数はマスター方程式の形から WKB 近似を使用することができ、任意の精度で QNFs を計算することができる。これは重力場の場合であるが、BH の背景時空において、スカラー場のクライン-ゴルドン方程式の動径方向は、適切な座標系の下でマスター方程式となっており、同様に QNMs をとる。一

方、高次元時空のダイナミクスを決める作用について、その中に含める幾何学の修正のアプローチを取るものが Lovelock 理論である。この理論には二つの特徴がある。一つは、一般座標変換に対し不変である点。二つ目は、修正された作用の変分により、計量の二階微分の運動方程式を与える点。以上の特徴を持つ修正重力理論である。この理論の中には asymptotic flat な静的球対称解 (以下 Lovelock BH) が存在し、スカラー場のマスター方程式を得る。しかし、次元が大きくなると、そのままでは BH 計量の成分を近似的にしか決定することができない。今回の研究ではその問題を回避し、任意次元の Lovelock BH 計量を決定せずに QNFs を WKB 近似を用いて計算する手法を与えた。また 3 次の WKB 近似による任意次元のスカラー場の QNFs を得た。

1. Phys.Rev.108.1063
2. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL,291:L33-L36,1985 April 15
3. Phys.Rev.D.79.104025

## 重宇 b1 宇宙大規模構造形成シミュレーション

佐々木 さゆり (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

宇宙の質量分布は大規模構造と呼ばれる巨大な構造をもっていることが知られているが、この宇宙構造形成の時間発展を調べるには一様密度からの密度揺らぎを摂動として扱う摂動理論や、質量分布を粒子分布で表し重力多体系として扱う N 体シミュレーションがある。摂動理論は解析的な取り扱いが可能であるが、適用範囲が線形領域・準線形領域に限られる。一方、N 体シミュレーションは密度揺らぎが非線形な領域も扱うことができるため、非常に強力な手法である。しかしながら N 体シミュレーションにおける粒子間の重力計算は計算コストが非常に大きい。そのため、計算コストを軽減するため様々な計算手法 (Particle-Mesh 法・Tree 法・TreePM 法など) が使われてきた。

本発表では、これら宇宙大規模構造形成の N 体シミュレーション手法とそれらの長所・短所をまとめ、レビューするポスター発表を行う。

1. E.Bertschinger, 2001, Multiscale Gaussian Random Fields for Cosmological Simulations
2. R.W. Hockney and J.W. Eastwood1988, Computer simulation using particles, 1988
3. E. Bertschinger, Annu. Rev. Astron. Astrophys. 1998. 36:599-654

## 重宇 b2 Kerr 時空上における波動光学とブラックホールシャドウ

野田 宗佑 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

ブラックホールの存在を観測的に示す方法の一つとしてブラックホールシャドウの撮像が挙げられる。ブラックホールシャドウとは、ブラックホールが外部の光源に照らされた影のことである。まだ観測されていないが、サブミリ波での観測が進められており近い将来の撮像が期待されている。

シャドウの輪郭はブラックホールに光が巻きつく光の不安定円軌道に対応する。しかし、この不安定円軌道はホライズンの外側に位置しており、シャドウの撮像ができたとしてもホライズンの有無は確かめられない。そこで、より波長の長い波による観測を考える。波長の長い波を用いる

利点は次の2つである。

1. 不安定円軌道内部の情報（ホライズンの有無）が得られる。

サブミリ波のように波長がブラックホールのスケールに比べて短い波は光線として扱うことができる（幾何光学近似）が、光線の計算では不安定円軌道の内部を調べることができない。一方、本研究で用いる波に対してはそのような近似を用いることはできず、ブラックホールによる波の散乱問題を考える必要がある（波動光学）。波動方程式の境界条件として不安定円軌道内部のホライズン上の条件を用いることで不安定円軌道の内部にホライズンがあるか否かが判別できるのである。

2. 散乱波の干渉パターンなどの波動効果が得られる。

ブラックホールによる散乱波には散乱体であるブラックホールの情報が含まれる。散乱波の干渉パターンや、位相の情報からブラックホールの質量、角運動量などの情報を調べられる。

さらに、散乱波を2次元フーリエ変換（イメージング）することにより、ブラックホールシャドウのイメージが得られる。

本発表では、Kerr 時空による波の散乱問題の記述、散乱波の干渉パターンとそこから得られる情報、また波動光学を用いたブラックホールシャドウの撮像方法について紹介する。

1. Y.Nambu and S.Noda, arXiv:gr-qc/1502.05468
2. K.Glampedakis and N.Andersson, Class.Quant.Grav. 18 (2001) 1939-1966
3. M. Miyoshi, K. Ishituska, S. Kamenon, and Z.-Q. Shen, Prog. Theor. Phys. Suppl. 155, (2004) 186-189.

### 重宇 b3 QCD 相転移が及ぼす原始重力波スペクトルへの影響について

長谷川 拓哉（総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1）

今回の発表では初期宇宙における QCD(quark-hadron) 相転移がインフレーション時に生成された原始重力波へ及ぼす影響について議論した S.Schettler らの論文 [1] (“Imprints of the QCD Phase Transition on Spectrum of Gravitational Waves”) を取り上げてレビューを行う。

QCD 相転移は、標準的な素粒子論において宇宙初期の GUT 相転移、EW 相転移に次いで起こるとされる初期宇宙で最後の相転移である。それゆえ、QCD 相転移の特徴や性質は、現在の宇宙の構造や様々な宇宙論パラメータの値と密接に関連していると考えられている。そこで QCD 相転移が crossover 転移である場合と一次相転移である場合について、それぞれの場合に起こる原始重力波スペクトルへの影響を理論予測することは、将来の重力波観測から QCD 相転移の性質に関する知見を得るために重要である。

近年の原子核物理における格子 QCD 計算と宇宙の熱的進化の考察から宇宙初期の QCD 相転移 crossover 転移である可能性が高まっている。一方で、初期宇宙におけるバリオン生成のモデルについては未だ不明確なところが多く、そのモデルによっては QCD 相転移が一次相転移となる可能性も指摘されている [2,3]。特に、“little inflation”と呼ばれる宇宙の急膨張を伴った QCD 相転移 (“inflationary QCD transition”) が起こる場合、このようなバリオン生成モデルに基づく宇宙の熱的進化は、CMB や宇宙の大規模構造の観測から得られているバリオンの非対称性と矛盾しない [3]。[1] ではこの “little inflation” を伴う QCD 相転移が原始重力波へ及ぼす影響についても議論されている。

最後に、近い将来に始まる LISA , SKA , PPTA などの重力波検出器

を用いた観測により、[1] で得られた QCD 相転移による原始重力波スペクトルの変化が検証されるかどうかについても触れる。

1. T.Boeckel , J. Schaffner-Bielich , arXiv : 1010.4857v2 [astro-ph] (2011)
2. D.J.Schwarz , M.Stuke , J.Cosmol. Astropart. Phys. , 25(2009)
3. T.Boeckel , J. Schaffner-Bielich , Phys. Rev. Lett. 105,041301(2010)

### 重宇 b4 Gravitational Baryogenesis after Anisotropic Inflation

福島 光博（早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2）  
初期宇宙において物質 (baryon) と反物質 (anti-baryon) の対称性を破り、baryon 優勢宇宙の実現を説明する研究は baryogenesis と呼ばれている。この baryogenesis 機構は少なくとも標準模型を超えた素粒子理論が必要であることがわかっているが、実験や観測による決定的な制限を課すことができないため、未だに決着がついていない。その中でも私は重力的な相互作用を介した Gravitational Baryogenesis[1] と呼ばれるモデルに注目して検証を行っている。Gravitational Baryogenesis は膨張宇宙における実効的な CPT 対称性の破れを考慮することで、従来のモデルでは実現できなかった熱平衡中での baryon 数生成という新たな可能性を提案した利点がある。しかし本モデルは、標準宇宙史と合致しないという問題を抱えている。具体的には、圧力とエネルギー密度の比  $w$  が  $w > 1/3$  となるような特殊な物質で宇宙が満たされている場合のみ、再加熱温度の理論的制限を回避して十分な baryon 量を得ることができると示されている。しかしこの問題は、背景時空を一樣等方宇宙から一般化することで回避できる可能性がある。

実際に一樣等方宇宙からの拡張として、背景時空が平坦で非等方的である Bianchi Type I の宇宙を仮定した場合における Gravitational Baryogenesis の変更点が議論されている [2]。しかし、この先行研究では非等方性の起源やその大きさは言及されていないし、非等方効果が Gravitational Baryogenesis に及ぼす影響も具体的に評価されていない。そこで我々は非等方性の起源を与える具体的なモデルとして非等方インフレーション [3] を考え、得られる baryon 生成量を評価してモデルの妥当性を議論した。時空の非等方性が非等方インフレーションの初期条件からインフレーション終了時までどの程度成長可能であるか解析し、更に従来の等方的インフレーションモデルから得られる baryon 生成量との比較も行った。

1. H.Davoudiasl, R.Kiyano, G.D.Kribs, H.Murayama, and P.J.Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **93**, 201301, (2004).
2. Kh.Saaidi, and H.Hossienkhani, Astrophys. Space Sci. **333**, 305, (2011).
3. M.Watanabe, S.Kanno, and j.Soda, Phys. Lev. Lett. **102**, 191302, (2009).

### 重宇 b5 Bianchi I 型時空での Einstein-Weyl 重力の摂動運動方程式

古谷 有（弘前大学 仙洞田研究室 M2）  
最近、インフレーション機構の解明のために、インフレーション中の等

方化過程の検出が議論されるようになってきている。等方化の過程とは、大きな非等方性を持つ宇宙がインフレーション中に均されるという過程である。これについて Wald の「宇宙の無毛定理」[1] が知られている。

この等方化過程に影響を与える得る要素として、物質と重力理論が考えられるが、本研究は後者に着目し、Lagrange 関数がスカラー曲率と Weyl テンソルの 2 乗項 ( $R + \alpha C^{\mu\nu\rho\sigma} C_{\mu\nu\rho\sigma}$ ) で表される Einstein-Weyl 重力を考察していく。

非等方性を持つ初期宇宙においては Weyl テンソルが大きな値を持ち、非等方性の進化に影響を与え得る。先行研究として、Lagrange 関数が  $R + \alpha C^{\mu\nu\rho\sigma} C_{\mu\nu\rho\sigma} + \beta R^2$  の重力理論における数値計算では、初期条件によって宇宙が等方化もしくは再収縮するという結果が出ている [2]。しかし、より一般の結論を得るためには解析的な手法が望ましい。

また、宇宙初期の非等方性がインフレーションを経た現在でも残されている可能性もある。例を挙げれば、同じ重力理論 (+ 宇宙項) において Bianchi 型の時空で非等方性を保ったまま指数関数的宇宙膨張をする厳密解が発見されている [3]。

上述の背景の下で Einstein-Weyl 重力による等方化への影響を明らかにすることが本研究の目的である。厳密解に摂動を与え、どのように非等方性の進化が修正されるかに着目する。本発表では、その第一ステップとして Bianchi I 型時空での Einstein-Weyl 重力による補正項である Bach テンソル ( $B_{\mu\nu}$ ) を含めた摂動運動方程式を導く。

1. Robert M. Wald. Phys. Rev. D 28, 2118(R) (1983)
2. Andrew L. Berkin. Phys. Rev. D 42, 1016 (1990)
3. John D. Barrow and Sigbjørn Hervik. Phys. Rev. D 73, 023007 (2006)

.....  
**重宇 b6** Chaotic string dynamics in AdS black hole

星野 悠一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

Recently, integrability of string has gathered much attention in the context of AdS/CFT correspondence. It provides us very powerful tools to check its correspondence. Therefore, the integrability is investigated in various backgrounds.

In our work, we focus on the classical string dynamics in asymptotical AdS geometry. Then we quantize the system canonically and consider its level distribution. In general, if the classical system is integrable in the sense of Liouville, the level distribution becomes Poisson distribution. On the other hand, for the chaotic system, it might be Wigner one. When we consider a system which includes the both cases, we can expect a kind of the transition from Poisson to Wigner or vice versa.

Then we can ask what its interpretation on the dual gage side is. As a first step to tackle this question, we discuss whether such system exists or not. The answer is yes. A special string configuration like a winding string on 5 dimensional Schwarzschild AdS black hole realizes such system.

1. T. Igata and H. Ishihara, Phys. Rev. D 81 044024, 2010.
  2. P. Basu and A. Ghosh, Phys. Lett. B 729 5055 2014.
- .....

**重宇 b7** ケーラー多様体の量子変形

原 健太郎 (東京理科大学理学部 4 年 その他)

重力の量子化は(私の知る限り)困難と言われている。

量子化の方法には初期の正準量子化、その拡張である変形量子化や幾何学的量子化、ファインマンによる経路積分量子化や確率過程量子化などがある。

その間に物理学を記述するための数学構造である斜交多様体の研究は進み、斜交多様体を含むポアソン多様体の変形量子化の存在が示された。その中で具体的に計算することの容易なケーラー多様体の量子変形をレビューする。

この変形量子化ではゲージ理論の位相不変量が複素射影空間では影響を受けないことがわかっている。今後はその他の局所対称ケーラー多様体への拡張、作用素環論をベースにした非可換幾何学との関係や量子重力理論への応用が期待される。

1. A. V. Karabegov, "An explicit formula for a star product with separation of variables," [arXiv:1106.4112 [math.QA]].
2. A. Sako, T. Suzuki and H. Umetsu, "Explicit Formulas for Non-commutative Deformations of  $CP^N$  and  $CH^N$ ," J. Math. Phys. 53, 073502 (

.....  
**重宇 b8** ブレインインフレーションにおけるゲージ場の効果

渡邊 健人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

インフレーション理論は宇宙マイクロ波背景放射が極めて等方的であり、また現在の宇宙の曲率が極めて小さいことを整合的に記述することから、初期宇宙の標準モデルとして確立している。近年の観測からインフレーションを支持する結果が得られ、また各モデルに対する制限も与えられつつある。素粒子基礎理論の候補として提唱されている超弦理論に基づくインフレーションモデルに、内部空間にブレインを導入するモデルが考えられている。[1,2] ブレイン間の距離をインフラトンとみなし、ブレインがゆっくり近づくことによってスローロールさせようというものであるが、理論のパラメーターを微調整しないと十分な e-folds が得られないという問題がある。超弦理論にはスカラー場とゲージ場が自然に含まれ、ゲージ場がインフラトンと結合する場合にはインフラトンの運動に影響が出る。それによりスローロール条件を満たしインフレーションを助ける効果が期待できる。[3] 本発表では、KKLMMT モデルにスカラー場とゲージ場が結合した項が付加された場合にスカラー場の運動がどう変わり、インフレーションに影響を与えるかについて議論する。

1. G. Dvali and S. H. Tye Phys. Lett. B 450(1999)72-82
2. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, J. Maldacena, L. McAllister and S. P. Trivedi JCAP 10(2003)013
3. K. Maeda and K. Yamamoto Phys. Rev. D87,023528(2013)

.....  
**重宇 b9** Palatini 形式の Born-Infeld gravity と重力崩壊  
 駒田 翔 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

一般相対性理論は、現在まで非常に成功した理論であるが、いくつかの

問題点も存在する。それらを解決するため、数多くの修正重力理論が提案されているが、本講演では Palatini 形式の Born-Infeld gravity という理論とそれが引き起こす特異な現象について述べる。Palatini 形式とは、重力理論の定式化の方法の一つである。通常、重力理論は計量のみをその自由度として持つが、Palatini 形式では、計量と接続を独立な自由度として取り扱う。また、Born-Infeld gravity とは、電磁気理論の非線形拡張である Born-Infeld electromagnetism の重力理論における類似物であり、重力場が大きくなりすぎないように構造をしている。したがって、一般相対性理論における特異点の出現を回避する可能性がある。私は、これを確かめるためにこの理論で球対称ダスト崩壊を考察した。一般相対性理論では、この重力崩壊は必ず 1 点まで崩壊し black hole と特異点を形成する。しかしこの理論では、重力崩壊は反跳し、特異点や black hole の形成に制限がつくことが明らかになった。また、black hole が形成される場合でも、horizon 内部でダスト球は通常と異なり、特異点に崩壊しない。black hole の内部で反跳したダストは black hole の horizon に内側から近付き、black hole の蒸発後、このダストの残留物が出現ことが示唆されている。このような現象は量子重力の効果を取り入れた重力崩壊でも現れており、これらとも関連させて本講演ではこの特異な現象についても述べる。

1. D. N. Vollick, Phys. Rev. D69 (2004)
2. J. R. Oppenheimer and H. Snyder, Phys. Rev. 56, 455 (1939)
3. M. Komada and S. Nojiri, [arXiv:1409.1663]

## 重宇 c1 降着円盤を形成するブラックホールのスピンの測定

林 峰至 (立教大学 M1)

典型的な銀河は、大質量星の超新星爆発の残骸である恒星質量ブラックホール (BH) や、超巨大 BH を数千個含むと考えられている。両者は周囲からガスを降着させている。周囲のガスが BH に落ち込み降着円盤を形成する。近年、降着円盤からの X 線放射を理論的に予言することにより、両者のスピンを測定することができるようになってきた。スピンの測定は、BH の形成や相対論的ジェットなどの天体現象を解き明かす鍵となる。1980 年代より、連続 X 線による BH のスピンの測定の研究がなされていた。今は DISKBB として知られているシンプルな nonrelativistic multicolor disk model を適用し、内縁半径  $R_{in}$  での color temperature  $T_{in}$  が分かっている [1]。Zhang は relativistic disk model と放射輸送の効果の補正を使い、内縁半径による BH のスピンの観測を明らかにした [2]。熱状態における一定の内縁半径の証拠が熱成分の bolometric 流束がおおよそ  $T^4$  に比例することを示す観測によって提示された。

本発表では [3] についてのレビューを行う。スピンの測定には Fe K $\alpha$  method と continuum-fitting (CF) method の二つの方法が用いられているが、両方とも半径が質量と BH のスピんにしか依存しない降着円盤の内縁半径が重要だ。Fe K $\alpha$  method は、恒星質量 BH と超巨大 BH の両方に適用し、相対論的に広がった鉄輝線のプロファイルモデル化し、重力赤方偏移した鉄輝線の red wing をみる。continuum-fitting (CF) method は、これまで恒星質量 BH のみに適用されていて、降着円盤の X 線の連続スペクトルをモデル化する手法である。発表では、CF method とその恒星質量 BH への適用を強調しながら、両者の方法を議論する。BH のスピンを求める他の方法を調べる基礎として、これらの手法をレビューした。

1. Mitsuda.K Publ.Astron.Soc.Japan 36 741 (1984)
2. Zhang.S.N, Cui.W and Chen.W Astrophis.J.482L155(1997)
3. J.E.McClintock (2011) arxiv:1101.0811

## 重宇 c2 曲がった時空中での光線におけるフェルマーの原理の一般化

安西 悠 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

フェルマーの原理は幾何光学において基礎となる原理である。その内容とは、ある点 1 から点 2 まで光が伝播するとき、その所要時間が最小となるような経路に沿って光は伝播するというものである。形式は解析力学でよく知られている最小作用の原理と同一であり、光はヌル測地線に沿って運動すると考えられる。

フェルマーの原理の重力場中への拡張は様々な人の手によって行われてきた。定常時空中の一般化はランダウとリフシッツによってなされ、コフナーは任意の時空中で成り立つフェルマーの原理の一般化を行った [1]。

(n+1) 次元時空間は n-パラメータ族の時間的曲線で foliate される。n 次元空間での 2 点を結ぶ曲線はその時間的曲線に沿って (n+1) 次元時空間へユニークに持ち上げることが可能である。よって光線の終点への到達時間はこの 2 点間の空間距離の関数として書かれる。フェルマーの原理とはこの関数の最小値を見つけることに等しい。

本発表ではフロロフの論文 [2] のレビューとして、(n+1) 次元時空中でのフェルマーの原理の定式化を行う。そして、得られた結果からヌル測地線方程式を具体的に書き下す。制御工学における最適制御理論で用いられるポントリヤギンの最小原理の観点から、曲がった時空中のヌル測地線における有効ハミルトニアンが従うハミルトン方程式と比較し、その無矛盾性を議論する。

1. I. Kovner, Astrophys. J. 351, 114 (1990)
2. Valeri P. Frolov, arXiv:1307.3291v1 [gr-qc] 11 Jul 2013

## 重宇 c3 パルサータイミングによるダークマター探索

井上 輝 (神戸大学 理学研究科物理学専攻 素粒子宇宙理論研究室 M1)

アインシュタインの一般相対性理論によると、銀河を形成するためには現在知られているバリオン以外の物質が必要となる。その未知の物質のことをダークマターと呼ぶが、ダークマターは電磁波と相互作用しないので観測することが難しい。そこで、パルサータイミングを用いて間接的にダークマターを探索する方法がある。

今回考えるのは、質量が  $10^{-23} \sim 10^{-22}$  eV のスカラー粒子で、その振幅は  $10^{-15}$  程度、振動数は nHz 程度となる。現在はまだそのような領域までパルサータイミングを測定する電波望遠鏡は存在しないが、近い将来 SKA という電波望遠鏡ができるので、将来的に観測が期待される。

1. A.Khmelnitsky and V.Rubakov JCAP 02 (2014) 019

## 重宇 c4 パルサータイミングによる背景重力波の検出理論

加藤 亮 (神戸大学 素粒子宇宙論研究室 M1)  
PTA(Pulsar Timing Array) プロジェクトは、重力波の直接検出が期待されるプロジェクトの一つである。パルサーから放出されるパルスは、極めて安定した周期をもつという特徴があり、重力波によるパルスの到着時間の遅れを検出できると考えられている。現在、PTA プロジェクトが対象としている重力波は、大質量ブラックホールの連星から放出される重力波、宇宙ひもが予言する重力波、インフレーション由来の重力波の三つである。これらの重力波は背景重力波に分類されるものであり、統計的に扱われる。

背景重力波の理論モデルは、定常性・ガウス性・等方性・無偏光を仮定することが一般的である。しかし、これらの仮定はあくまで理想化であり、背景重力波の四つの仮定を満たさないものも考えるべきである。例えば、CMBの偏光を観測することによりインフレーションの検証ができることと同様にして、背景重力波自体の偏光を考えることは自然であり、インフレーションモデルに制限を与えることができる可能性がある。

今後の自分の研究目標は、ストークスパラメータを用いて、背景重力波の円偏光をパルサータイミングで評価することである。本発表ではその準備段階として、パルサータイミングによって、定常性・ガウス性・等方性・無偏光を仮定した背景重力波の検出理論についてのレビューをする。

1. B. Allen and J.D. Romano, Phys. Rev. D 59 (1999)
2. P. Adshead and E. Lim, Phys. Rev. D 82, 024023 (2010)

## 重宇 c5 Blandford-Znajek 機構の起電力について

赤井 祐美 (大阪市立大学大学院 素粒子論研究室 M1)  
活動銀河中心での相対論的ジェットや  $\gamma$  線バーストを説明するメカニズムの 1 つとして、Blandford-Znajek 機構がある。これは Black hole(BH) の回転エネルギーを磁場によって引き抜く機構であるが、この機構での起電力の起源は議論されている。

Kenji Toma と Fumio Takahara の論文 [1] ではプラズマで満たされた Kerr BH の磁気圏内の単極誘導により生じることを示した。またその起電力の起源はエルゴ領域にて電場が磁場に対して卓越することであることを明らかにした。

本発表では論文 [1] のレビューを行う。

1. K. Toma and F. Takahara, Mon. Not. R. Astron. Soc. 442, 2855 (2014).

## 重宇 c6 回転ブラックホール近傍での粒子衝突におけるエネルギー引き抜き過程

小笠原 康太 (立教大学 M2)

我々は回転ブラックホール近傍での粒子衝突における、エネルギー引き抜き過程及びエネルギー引き抜き効率について議論する。

回転ブラックホールには、エルゴ領域と呼ばれる負のエネルギー状態が可能な領域が存在し、この領域で 2 つの粒子の衝突過程を考えると、負のエネルギー状態とエネルギー保存則により、衝突後の粒子は衝突前

の粒子より大きなエネルギーを持つことが可能になる。これは、回転ブラックホールからのエネルギー引き抜き過程であり、collisional Penrose process と呼ばれている。Banados, Silk, West らは、角運動量が適当に制限されている 2 つの粒子の重心系エネルギーが、回転ブラックホール近傍で発散することを示した [1]。これは B.S.W. 効果 (B.S.W. 衝突) と呼ばれ、重心系エネルギーが発散ということは、衝突後に高エネルギー粒子が生成される可能性を示唆する。collisional Penrose process は、現在観測されている高エネルギー宇宙線の生成メカニズムの候補の 1 つとして研究が行われており、より詳細なエネルギー引き抜き過程の解明により、観測される宇宙線に対して理論的な予言を与えることが期待される。

本研究では、エネルギー引き抜き効率を解析的な手法を用いて導出した。数値計算で行われてきた先行研究 [2,3] との比較を行い、エネルギー引き抜き効率をどこまで高められるかについて議論する。また、我々は B.S.W. 効果がエネルギー引き抜き効率を高める効果があることを明らかにした。これらの関連性についても議論したい。

1. M. Banados, J. Silk, and S. M. West, (2009), arXiv:0909.0169
2. J. D. Schnittman, (2014), arXiv:1410.6446
3. E. Berti, R. Brito, and V. Cardoso, (2014), arXiv:1410.8534

## 重宇 c7 シフト対称性をもつスカラー・テンソル理論におけるブラックホール摂動

小川 潤 (立教大学 M2)

一般相対論 (GR) はこれまで多くの観測的検証をパスしてきており、現在の重力の標準理論として支持されている。一方で、GR では説明できない現象も発見されつつある。例えば、Ia 型超新星の観測により発見された宇宙の加速膨張はその好例である。GR を宇宙論的長距離スケールでも成り立つように拡張した修正重力理論の構築が近年盛んに行われている。

ブラックホール (BH) のような強重力場における修正重力理論の研究にも注目が高まっている。強重力場における重力理論の妥当性は、重力波を観測することで決定できる。そこで、BH が重力波源として考えられるかを事前に検討する必要がある。これは、BH が摂動 (重力波) に対して安定的かどうかを判定することで可能である。ホルンデスキー理論のサブクラスにおける、静的なスカラー場の配位をもつ球対称 BH 解について、安定性を判別する条件が得られている [1]。しかし、スカラー場が静的な場合は、多くの場合スカラー場の配位が自明となってしまう、BH 解が GR の場合と区別がつかないことが大半であった [2]。

本発表では、スカラー場が時間依存すると仮定し、シフト対称性を持つホルンデスキー理論のサブクラスにおける、球対称 BH の安定条件について述べる。スカラー場が時間依存性をもつ場合は、非自明なスカラー場の配位をもつ BH 解が構成されることが知られている。この BH 解は宇宙論的な境界条件に従う解と解釈できる。このような解は、既存の BH 摂動の一般論が使えないため、安定性が不明であった。BH の安定条件は、摂動の従う波動方程式を導出することなく、作用を摂動の二次で展開することで得られる。これにより、サブクラスに含まれるすべてのスカラー・テンソル理論における BH の安定性が判断することが可能となる。今回の発表では、奇パリティモードの摂動に対する BH の安定性について発表を行う。

1. T. Kobayashi, H. Motohashi, T. Suyama, Phys. Rev. D 85 (2012)

084025

2. E. Babichev, C. Charmousis, JHEP 1408 (2014) 106

## 重宇 c8 バリオンの超音速相対速度が宇宙論的観測に与える影響

浅羽 信介 (名古屋大学 C 研 D2)

通常の物質に加えて冷たい暗黒物質と負の圧力を持つエネルギーを考えるモデルは  $\Lambda$  CDM モデルと呼ばれ、宇宙マイクロ波背景放射や宇宙大規模構造の観測を説明することに成功した。しかし、どのように初代天体が形成され宇宙再電離が起きたかということが宇宙論の問題として残されている。

現在計画中の次世代電波干渉計の目的の一つとして、宇宙再電離以前の高赤方偏移中性水素の空間分布を観測することがある。この中性水素の空間分布から、初代天体の形成や宇宙再電離についての情報を得ることができる。さらに高赤方偏移では非線形効果が小さいため、より小スケールでの揺らぎを使った宇宙論の議論ができると考えられている。

その一方で、宇宙の晴れ上がり以前にバリオンと光子がトムソン散乱によって強く結合していたことにより、バリオンはダークマターに対して超音速の相対速度を持っていることが知られている。この相対速度はバリオンの密度揺らぎの成長を抑制する。線形理論において、相対速度による項は圧力のように見なすことができ、スケール長を大きくする。そのため、初代天体の形成や小スケールでの揺らぎを考える上で重要であり、さらに、非線形成長に与える影響を見積もる必要がある。

本研究では、宇宙論的 N 体シミュレーションを用いてバリオンが持つ超音速の相対速度がダークマターの構造形成に与える影響を計算した。特に球対称崩壊モデルを応用することで相対速度がダークマターの非線形成長に与える影響を準解析的に理解することができることを示した。また、ダークマターハローの形成が遅れることやハロー内のバリオンの割合が減少することが観測量にどの程度影響するのかを見積もったので発表する。

1. Tseliakhovich, D., & Hirata, C. 2010, Phys. Rev. D, 82, 083520
2. Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2012, Astrophys. J., 747, 128
3. Naoz, S., Yoshida, N., & Gnedin, N. Y. 2013, Astrophys. J., 763, 27

## 重宇 c9 ボイドの進化と観測的特徴

石原 誠也 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙にはボイド (超空洞) と呼ばれる低密度の領域が無数に存在している。ボイドは宇宙物理学において興味深い構造をしている。例えば、宇宙マイクロ波背景放射のコールドスポットを巨大なボイドによる積分ザックス・ヴォルフ効果によって説明できる可能性が示されている。積分ザックス・ヴォルフ効果とは、宇宙マイクロ波背景放射の特性に影響する宇宙論的な効果であり、CMB 光子が観測者に至るまでの経路で、重力ポテンシャルの時間変化を反映して CMB 光子の温度が変化する効果である。本研究では、ボイドによる積分ザックス・ヴォルフ効果による温度変化を実際に計算し、観測と比較することでボイドの特徴を見ていく。

## 重宇 c10 観測によるダークエネルギーの密度パラメータ・状態方程式の制限付けに必要な宇宙論的摂動論と観測結果

石丸 晴海 (神戸大学 素粒子宇宙理論研究室 M1)

遠方にある Ia 型超新星の距離-赤方偏移関係の観測により、宇宙が一樣等方と仮定すると、宇宙が加速膨張していることがわかった。その起源を説明するための理論として大きく分けダークエネルギー仮説と修正重力理論仮説 (銀河や銀河団スケールになると距離の逆二乗則が破れており、アインシュタインの重力理論を修正する) がある。ダークエネルギーが宇宙のどの程度占めているのかを示す密度パラメータや、ダークエネルギーの性質を示す状態方程式に制限を付けるために様々な観測がなされている。その観測は宇宙年齢や超新星観測、CMB 観測、BAO (バリオン音響振動) の観測などである。それらにより制限をつけるために用いられるものが CMB の温度揺らぎなどであり、宇宙論的摂動論の理解が不可欠である。従って本発表では宇宙論的摂動論について説明し、宇宙年齢や超新星観測、CMB 観測、BAO 観測などによりダークエネルギーの密度パラメータや状態方程式がどの程度制限付けられているか説明する。

1. L. Amendola and S. Tsujikawa Dark Energy (2010).

## 重宇 c11 重力崩壊型超新星の爆発メカニズム

池田 詠甚 (福岡大学 理学研究科 M1)

重力崩壊型超新星爆発とは、太陽のおよそ 8 倍以上の質量を持つ重い恒星がその進化の終盤を迎えると考えられている大爆発現象である。この爆発は自然界の 4 つの相互作用がすべて関与する稀な現象で様々な天体現象の謎を解き明かすために有力だと考えられており、天文学や高エネルギー宇宙物理学分野において最も注目される天体現象のひとつである。また爆発後に残される中性子星、ブラックホールといった最終的な高密度天体の形成過程そのものであり、爆発時に合成される元素組成は銀河の化学進化を決め、膨張する衝撃波は宇宙線加速の要因となっている。重力崩壊型超新星爆発がどのような過程で引き起こされるのか、極めて長い歴史を持ちつつも未だ解明には至っていない。この爆発現象を解明するために最も重要とされるのがコア内部で起きている現象を理解することである。そのために星の進化の過程について議論していきたい。

星は核融合反応で元素合成を行いながら進化していき、それぞれの進化の過程によって星の最終段階が決まっていく。進化の段階で 8 太陽質量以下の星は白色矮星になり、これ以上の星は核合成などによって重い元素ができていき、最も重い元素の鉄まで元素合成が進むと、最も安定になり核融合が進まなくなる。この結果コアの熱的なエネルギーが減少し、重力収縮と電子捕獲反応が進み、内部の圧力と自己重力の平衡状態が崩れて重力崩壊が開始される。鉄コアから放出されるニュートリノだが、原子核との散乱により「ニュートリノの閉じ込め」という現象が起こる。フェルミ縮退も起きていき、ニュートリノの化学ポテンシャルも上昇するため、電子捕獲の逆反応も起こっていく。このように電子捕獲率を決定することが重要であるが、これは同時に原子核物理を解明していかなければならない。今回の夏の学校ではこのような星の進化に注目を当てながら、重力崩壊型超新星爆発とはどのような現象なのか詳細なレビューを行いたいと考えている。

1. K kotake Rep. Prog. Phys. 69 (2006) 9711143

## 重宇 c12 膨張宇宙背景における重力崩壊の臨界現象

池田 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

原始ブラックホール (PBH) は宇宙の初期ゆらぎの重力崩壊で形成されるブラックホールである。PBH の数密度は初期宇宙のゆらぎを反映しているため、PBH 形成の普遍的な性質の研究は宇宙論において重要な位置を占めている。本研究ではその普遍的な性質として近年注目されている重力崩壊の臨界現象に注目する。重力崩壊の臨界現象は massless スカラー場の球対称重力崩壊 (1993, Choptuik) で発見されて以降、様々な系で発見された。

本研究では原始重力波による PBH 形成を念頭に置き、膨張宇宙背景での重力崩壊の臨界現象を扱う。

1. Mon. Not. R. astr. (1971) 152, 75-78, Stephen. Hawking
2. Phys. Rev. Lett. (1993) 70, 9-12, Choptuik, Matthew W.

## 重宇 c13 PBH bias

多田 祐一郎 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D2)

原始ブラックホール (primordial black hole: PBH) は放射優勢期に過密度領域が重力崩壊することで形成され得る理論的ブラックホールである。一方構造形成の文脈で、そのような崩壊天体は背景密度ゆらぎに沿うように分布することが知られており、これをバイアス効果という。我々はこのバイアスの描像を PBH に適用し、特に初期曲率ゆらぎにわずかでも非ガウス性があると、大スケールに PBH 分布のゆらぎができることを示した。さらに、そのような PBH 密度ゆらぎは物質の等曲率ゆらぎとして寄与することから、 $|f_{NL}| \sim \mathcal{O}(0.01)$  の非常に小さな非ガウス性においても、PBH が暗黒物質の主成分である可能性が棄却されることを明らかにした。

1. Y. Tada and S. Yokoyama, arXiv:1502.01124 [astro-ph.CO].

## 重宇 c14 インフレーションモデルにおける初期揺らぎと再加熱の制限

植野 良紀 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

古典ビッグバンモデルは、一様等方性、CMB の存在そしてヘリウム等の軽元素比という 3 つの観測事実を上手く説明する優れた理論である一方、1) モノポール問題 2) 平坦性問題 3) 地平線問題という困難を抱えていた。佐藤勝彦とグースらは、これらの問題を解決する宇宙論モデルとしてインフレーションモデルを提唱した。

そこでまず、インフレーションの物理を考えていく。最初に、背景時空とインフラトン場に対する運動方程式を導出し、そのまわりに線形摂動を与える。次に重力場の正準形式を用いて、スカラー揺らぎとテンソル揺らぎの 2 次の作用を導出する。得られた作用に対して場の量子論を用いると、直接観測量と結びつくスペクトル指数  $n_s$  とテンソル・スカラー比  $r$  が得られる。

次に再加熱過程を考えていく。再加熱とは、インフラトン場の振動に

より放射に崩壊する過程である。宇宙膨張の歴史は 1) インフレーション期 2) 再加熱期 3) 放射優勢期 4) 物質優勢期から構成される。そこで各時期における e-fold number  $N$  と再加熱の状態方程式パラメータ  $r_e$  を導入する。そして再加熱期の持続時間  $N_{re}$  と温度  $T_{re}$  を導出し、 $n_s$  に対してプロットする。さらにプランク衛星の観測から得られた  $n_s$  の値を考慮することで、再加熱過程に制限を与えていく。

1. Liang Dai, Marc Kamionkowski, and Junpu Wang, Phys. Rev. Lett. 113, 041302 (2014)
2. Julian B. Munoz, Marc Kamionkowski, arXiv:1412.0656
3. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters, arXiv:1502.01589

## 重宇 c15 インフレーション中の磁場生成

北脇 理帆 (神戸大学 理学研究科物理学専攻 素粒子宇宙理論研究室 M1)

近年、観測によって様々な天体のもつ磁場が明らかになってきた。その中でも銀河間で観測された磁場は、数 nG の強度で数 Mpc ほどの非常に大きな波長を持っている。しかし、これまで波長の大きい磁場がどのように形成されたのかは明らかにされていない。

大きな波長をもつ磁場を説明するために、Demozzi et al. (2009) の内容を考察する。論文中で用いられた、インフレーション中では電磁場の結合定数が時間依存するというモデルから、現在 1Mpc の波長をもつ磁場の強度を再計算する。再計算の結果、強結合問題や反作用問題があるため  $10^{-30}$  G ほどの強度になった。このモデルで大きな波長をもつ磁場の説明はできるが、再計算した現在の磁場の強度が観測値よりもたいへん小さくなるので、今後は更に磁場の強度が上がるようなモデルを考えていく必要がある。

1. V. Demozzi, V. Mukhanov and H. Rubinstein, JCAP 08(2009)025
2. D. Kanno, J. Soda and M. Watanabe, JCAP 12(2009)009
3. T. Venumadhav, A. OKlopčić, V. Gluscevic, A. Mishra and C.M. Hirata, ArXiv e-prints (2014)

## 重宇 c16 大規模構造から探るインフレーション

秋津 一之 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M1)

現在の宇宙の構造形成シナリオは、初期のインフレーションによって引き伸ばされた量子ゆらぎを種として重力不安定性によって現在の形へと成長したというものである。現在観測されるゆらぎの中でも長波長モードは、量子ゆらぎからインフレーションにより最初の方に古典化されたゆらぎであり、インフレーションの物理をよりクリーンに残している可能性がある。観測範囲を超えるような長波長モードのゆらぎを直接観測することはもちろんできないが、重力の非線形性の影響を利用すると、この長波長モードが如何に我々が観測できる小波長モードと非線形モードカップリングを起こすかを調べることができる。この重力非線形性の影響を詳しく調べ、重力レンズや銀河クラスタリング解析から小波長スケールのモードの観測をすることにより、間接的に長波長モードの情報を復元する新しい方法について紹介する。

1. L. Dai, E. Pajer, and F. Schmidt (2015) arXiv 1504.00351

2. C. Wagner, F. Schmidt, C-T. Chiang, and E. Komatsu (2015)  
arXiv 1503.03487
3. Y. Li, W. Hu, and M. Takada Phys. Rev. D 90, 103530 (2014)

.....  
**重宇 c17** Starobinsky Inflation 模型における複数場の  
 場合の非ガウス性への影響

森 太郎 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究科 M2)

今回の発表では Starobinsky inflation 模型にさらにスカラー場を 1 つ追加したような Two-field inflation 模型において、Non-Gaussianity がどのように計算されるかを議論し、これを評価する。

Inflation とは極めて初期の宇宙で時空が指数的に膨張したと考える理論である。このように考えることで、地平線問題や平坦性問題などの標準ビッグバン理論がもつ問題点は解決される。現在ではこの指数的膨張を実現するような模型は非常に数多く提唱されている。しかし曲率ゆらぎ及び Non-Gaussianity と呼ばれる量を計算し、宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) の観測から得られる CMB の温度ゆらぎを比較することで、模型を選別することができる。

近年の Planck-BICEP2-Keck Array の合同発表の結果によれば、テンソル/スカラー比、スペクトル指数などの量が観測と整合的であり有力視されている模型として、Ricci スカラーとその二乗を足した作用を用いるいわゆる Starobinsky 模型が挙げられる。本研究ではこの模型を拡張した場合を解析していく。¥ ¥

Starobinsky 模型では、共形変換と呼ばれる変換によってインフラトンの運動項とポテンシャル項をあらわに書き下すことが出来る。しかしここで重力場以外の他の場を考えると、各々の場が重力と非最小結合している場合、共形変換によってそれらの場とインフラトン場との結合があらわになる。従ってこの場合、Inflation 及び指数的膨張時に生成される曲率ゆらぎに対し、インフラトン場のみならず複数の場が寄与すると考えなければならない。

本研究では上記のような場合を解析するための第一歩として、Starobinsky inflation 模型にさらにスカラー場を 1 つ追加したような Two-field inflation 模型を考える。特に複数場模型の場合は曲率ゆらぎのほかに等曲率ゆらぎ (isocurvature) も生成される。今回の発表では、曲率ゆらぎと等曲率ゆらぎの間の相互相関 (cross correlation) も考慮にいれた Non-Gaussianity の計算法を紹介し、得られた結果と観測との整合性についても議論したい。

.....  
**重宇 c18** Matter Creation in Generalized Galilean  
 Genesis

西 咲音 (立教大学 D1)

初期宇宙の標準的なモデルとしてインフレーションが広く考えられているが、その代替モデルの一つとして Galilean Genesis というものがある。このモデルには宇宙がミンコフスキー時空から始まるという興味深い特徴がある。これまでの研究では、Galileon 理論を用いて記述されていた様々ある Genesis モデルの Horndeski 理論を用いた一般化と拡張を行った。Horndeski 理論は単一のスカラー場を用いたスカラーテンソル理論を一般化したものである。インフレーションの解決した平坦性問題などの諸問題はこれまでの研究で解決されることがわかったが、次段階としてこの時期が正常に次の時期へと繋がるかについての検討が必

要であると考えられる。そこで、この一般化されたモデルについてさらに Genesis 期から正常に次の時期へ繋がるような拡張を行った。ここで Genesis の次の時期では宇宙がド・ジッター膨張をしている。このうえで Genesis 期から次の時期への相転移において物質がどのように生成されるかの検討を行った。Genesis を引き起こすスカラー場と物質のあいだの相互作用は直接相互作用をするものと重力場を介して相互作用をするものが考えられるが、まずはより単純なものとして重力場を介して相互作用が行われる場合について考える。本発表では以上の内容について現在得られた結果を報告する。

1. S. Nishi and T. Kobayashi, JCAP 1503, no. 03, 057 (2015)  
[arXiv:1501.02553 [hep-th]]
2. G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 363-384

.....  
**重宇 c19** Brane induced gravity in  $d = 6$

平野 進一 (立教大学 M1)

観測技術の進歩により、一般相対論 (GR) の検証を宇宙論的長距離スケールで行うことが可能になりつつある。また、宇宙の加速膨張など GR のほころびが現れた。これを機に  $\Lambda$ -CDM 理論の修正、宇宙項問題のような重力理論の修正が活発に試みられている。Brane induced gravity (BIG) [1] はそのモデルの一つである。BIG は  $d$  次元時空 (bulk) 上に我々の 4 次元時空 (brane) や万物が局在していると考えられるモデルである。 $d$  は無限次元であるが brane 上の十分短い距離スケールでは GR の振る舞いを再現する。これはあるスケール  $r_c$  によって特徴づけられる修正重力理論を導く。一方で、線形レベルの有効 4 D graviton は共鳴してしまう、つまり massive graviton の重ねあわせの状態である。BIG のような余剰次元モデルの構築は、massive graviton における ghostfree な例を考案できる領域を提供できる。また、宇宙定数問題への degravitation approach になっている。

BIG の最もよく知られている例が  $d = 5$  の DGP (Dvali-Gabadadze-Porrati) モデル [2] である。DGP の設定は宇宙論では修正フリードマン方程式にあたり、この方程式の解は、重力の弱体化により特徴づけられ摂動的に安定な normal branch と摂動的 ghost 不安定性をもつ self-accelerating branch の 2 つである。宇宙論的観測から DGP の  $r_c$  には強い制限がかけられる。

本講演では [3] に基づくさらに高次元に拡張した  $d = 6$  の BIG モデルのレビューを行う。Regularization の入れ方や bulk から生じる重力波の存在により、解析的手法には困難が伴う。数値解析により、定量的に異なる 2 つの解が顕になる。degravitating 解は系が静的宇宙ひもの解に近づく解で、source が存在するにも関わらず 4 D ハッブルパラメータ  $H$  が 0 になる。これは、後の議論で現象論的に不適となる。もう一つは superaccelerating 解で無限に成長を続ける。また、これらの解では 6 D 重力の source となるエネルギー密度が負に変わり、DGP の self-accelerating branch に強く類似するので、 $d = 6$  での BIG はうまくいかないと考えられる。簡単のため bulk の宇宙項のない場合が調べられているが、より詳細に調べるには宇宙項を入れて振る舞いを調べることが必要となる。

1. G. Dvali and G. Gabadadze Phys. Rev. D 63, 065007 (2001)
2. G. Dvali, G. Gabadadze, and M. Porrati, Phys. Lett. B 485, 208 (2000).
3. F. Niedermann, R. Schneider, S. Hofmann, and J. Khoury Phys.

Rev. D 91, 024002 (2015)

重宇 c20 宇宙論的ベクトル型 2 次摂動論

嵯峨 承平 (名古屋大学 C 研 D2)

宇宙論的摂動論で取り扱うゆらぎは、スカラー型摂動、ベクトル型摂動、テンソル型摂動の各モードに分解される。線形摂動を考えた場合には、各モードは混ざり合わないことが知られており、単純なインフレーションモデルにおいてはスカラー型摂動とテンソル型摂動が量子的なゆらぎから生成されると考えられている。一方で、ベクトル型摂動は線形摂動論では減衰モードしか存在しないために標準的な線形摂動論では無視される。

しかし、摂動を高次まで展開した際には各モードはもはや独立ではなく、2 次ベクトル型摂動が自然と生成される。ベクトル型摂動は、宇宙論的観測に興味深いシグナルを残すことが知られている。私は、この 2 次ベクトル型摂動が宇宙論の対象に与える影響について解析を行った。

重宇 c21 CMB における原始重力波起源の B-mode 偏光

林田 友利 (東北大学天文学専攻 M1)

今回の発表では CMB の B-mode 偏光が原始重力波によってどのように生成されるかを簡単に説明する。そして BICEP2 や Planck による最近の観測結果を紹介する。

インフレーション理論では、インフラトン場の量子ゆらぎが重力波を生成すると考えられている。この初期宇宙に存在する重力波のことを「原始重力波」と呼ぶ。原始重力波はトムソン散乱を通じて CMB の偏光を引き起こす。偏光には 2 つのモードが存在し、E-mode と B-mode に分けられる。初期宇宙での密度ゆらぎは基本的に E-mode のみを生成するが、原始重力波は E-mode と B-mode の両方を生成する。よって原始重力波起源の B-mode 偏光の存在は、インフレーション理論を裏付ける証拠となりうる。その上この偏光観測から、インフレーション中のエネルギースケールを直接的に求めることができる。

2015 年 6 月現在、CMB 中の原始重力波起源の B-mode 偏光は未だに発見されていない。去年の 3 月に BICEP2 グループが原始重力波起源の B-mode 偏光の発見を発表したが、その後の Planck の観測結果から棄却されてしまった。前景放射であるダストの放射の影響が大きく、「原始重力波起源の B-mode」と判断するのが難しいとされたからだ。この BICEP2 グループは 150GHz 帯で観測を行っていたが、Planck(2015)の結果から、前景放射の影響が最も小さいのは約 80-90Hz の間とわかった。これに近い周波数帯での観測によって、更に精度の高い観測が期待されている。

1. The BICEP2/Keck and Planck Collaborations, Phys. Rev. Lett. 114, 101301, 2015
2. Planck Collaboration XX. 2015, A&A, submitted, arXiv:1502.02114v1 [astro-ph.CO]
3. Planck Collaboration Int. XXX. 2014, A&A, accepted, arXiv:1409.5738v2 [astro-ph.CO]

重宇 c22 CMB 温度揺らぎ観測から探るスカラーテンソル理論への制限と重力定数の進化

大場 淳平 (名古屋大学 C 研 M2)

ビッグバン理論の帰結として存在する宇宙マイクロ波背景放射の精密観測は、現代宇宙論を大きく進展させた。その結果として現在の宇宙の組成は、宇宙の加速膨張を引き起こす暗黒エネルギーが 68%、重力相互作用しにくい冷たい暗黒物質が 27%、通常の物質 (バリオン) が 5% であると考えられている。しかし、宇宙の組成の大半を占めていると考えられる暗黒エネルギーや暗黒物質は未だにその正体が分かっておらず、世界中で盛んに研究されている。その一方で、未知の暗黒エネルギーや暗黒物質の振る舞いを、重力理論を修正することで理解しようとする立場もある。このような理論を修正重力理論という。修正重力理論は一般相対性理論を拡張することで、暗黒エネルギーを導入することなく現在の宇宙組成の観測結果を説明できる理論として期待されているが、修正重力理論のモデルは数多く存在し、現実に応じたモデルを決定することは大変困難である。

修正重力理論のモデルを決めるには様々な観測結果を用いてモデルに制限を与えることが必要不可欠である。そこで、修正重力理論と一般相対性理論とのずれをモデルパラメータを用いて記述し、観測結果を用いて制限を与える。

本研究では、修正重力理論のモデルとしてスカラーテンソル理論 [1] に着目し、Planck による宇宙マイクロ波背景放射の温度揺らぎの観測データを用いて、モデルパラメータへの制限を行った。また、スカラーテンソル理論の大きな特徴として、観測される重力定数が時間発展することにも着目し、現在の重力定数と宇宙マイクロ波背景放射が放射された時代の重力定数との差についても制限を与える。

1. R. Nagata et al., Phys. Rev. D 66, 103510 (2002).

重宇 c23 宇宙マイクロ波背景輻射を用いた宇宙のトポロジーの探索方法

小西 翔太 (近畿大学大学院 宇宙論研究室 M1)

2013 年に観測を終えた Planck 衛星による宇宙マイクロ波背景輻射 (CMB) の観測から宇宙の空間成分はほぼ平坦であるという結果が出ている。しかし宇宙が平坦であるからといって宇宙が無限に広がっているということは必ずしも言えない。

立方体の向かい合う面を平行移動で同一視することで、3 次元トラスが得られる。3 次元トラスの宇宙では、観測者が宇宙を観測すると異なる方向からやってくる同じ天体の光を観測したり、過去に観測者自身が前方に発した光が観測者の後方からやってくる。観測者が有限の大きさを持つ空間の周期的構造のために「宇宙が果てしなく続いている」と錯覚している可能性がある。

宇宙が 3 次元トラスであるかを探るための手法として「空の円」がある。「空の円」は、立方体の境界面と CMB 光子の最終散乱面の交線となる円上で温度揺らぎが同一視できるかを調べる手法である。宇宙が 3 次元トラスであった場合、「空の円」の手法を用いることで同じ温度揺らぎのパターンが観測されるかもしれない。

本ポスターでは 2 次元のモデルを用いて有限性を持つ宇宙モデルを簡単に説明し、3 次元のモデルに拡張して「空の円」の解析方法について述べる。またこれまでに行われてきた過去の研究成果と現在行っている自身の研究について報告する。

1. M. Lachieze-Rey and J.P.Luminet Physics Reports v.254 135 (1995)
2. Inoue, Kaiki Taro PhD Thesis (2001)

## 重宇 c24 線電荷による電場を遮蔽する宇宙ひも

小川 達也 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 D1)

本研究では、宇宙ひも [1] と Q-ボール [2] の配位を融合させ [3]、複素スカラー場の位相が時間的に回転しているような宇宙ひもを考える。この時、ネーターチャージが消えないため、スカラー場がチャージを持つ宇宙ひもとなる。具体的に、スカラー場とゲージ場に円筒対称性と定常性を課し、適切な境界条件の下で場の方程式を解くことを考える。この方程式は非線形連立偏微分方程式から非線形連立常微分方程式に帰着し、解析的に解くのは困難であるが数値的に解くことが容易となる。この位相が回転する宇宙ひもに関して、局所的宇宙ひもを考える。動径方向に変化する時間成分を持ったゲージ場で局所化された、位相が回転する局所的宇宙ひもでは、遠方でスカラー場の位相回転をゲージモードに吸収するような境界条件を課す。これにより、エネルギーが局在化された、位相が回転する宇宙ひもを構成することができる。このとき、ゲージ場の時間成分の発散が消えず、磁場だけでなく、磁場に直交する方向に電場も持った宇宙ひもの解となる。さらに、スカラー場により、この電場もまた宇宙ひも内部で閉じ込められる。この電場の寄与により、エネルギー・運動量テンソルはエネルギー線密度と張力の間にずれが生じ、新たに角度方向のエネルギーフラックスが生じる事になる。本発表では、この位相が回転する宇宙ひもの性質について論じる。

1. H.B.Nielsen and P.Olesen; "VORTEX-LINE MODELS FOR DUAL STRINGS"; Nucl.Phys. B61 (1973) 45.
2. S.Coleman; "Q-Balls"; Nucl.Phys.B262,263 (1985)
3. N.Sakai, H.Ishihara, K.Nakao; "Q-tubes,Q-rings and Q-crusts" (2010)

## 重宇 c25 Cosmic string による初期磁場生成

堀口 晃一郎 (名古屋大学 C 研 D1)

本講演では宇宙論的位相欠陥の一種である cosmic string による初期磁場生成について述べる。

cosmic string は宇宙初期に起きた場の相転移によって形作られる位相欠陥であり、ひも状の高エネルギー領域として宇宙空間に存在することが期待される。string の運動は密度揺らぎの形成や重力波の生成など様々な物理に影響を与える。本研究では位相欠陥の一種である texture からの磁場生成を見積もった [1] に倣い、string が宇宙初期の光子、バリオン流体に与える影響を見積もることで string が宇宙初期に生成しうる磁場を評価する。string による初期磁場生成は以下の過程で行われる。

まず、初期宇宙での string の運動により空間の渦度が生成される。次に、空間の渦度に引きずられて光子流体とバリオン流体が運動を始める。この際、光子と電子がトムソン散乱で、電子とバリオンが電磁気力で結びつき、一つの流体として運動している。ここでは光子がバリオンから電子を引き離し、それに追従するようにバリオンが運動するので、光子流体とバリオン流体の間に電場が誘起される。誘起された電場は

Maxwell 方程式を通して磁場を生成する [2]。この過程を string の分布や速度の時間進化を考慮して解くことで、string によって生成される初期磁場を求めることができる。

本研究により、string が生成しうる初期磁場は  $\sim 1\text{Mpc}$  程度のスケールで  $10^{-20}\text{Gauss}$  程度であることが分かった。本講演では string によって生成される磁場の特徴や進化などについても言及する。

1. K.H, K.Ichiki, T.Sekiguchi, N.Sugiyama, JCAP 04,007 (2015)
2. K. Takahashi, K. Ichiki, H. Ohno, and H. Hanayama, Phys.Rev.Lett. 95 (2005) 121301

## 重宇 c26 $AdS_5 \times M_5$ 時空におけるストリングの運動方程式の可積分性

矢久間 司 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M2)

$p$  次元の広がりを持つ物体は、それが存在する  $D$  次元の時空に  $p+1$  次元の軌跡を描く。

この軌跡に関して適当な作用を定義したとき、作用が最小となる条件が運動方程式であるが、変分を取る方向が複数なので偏微分方程式となる。

これは一般的には積分不可能な方程式で、広がりを持った物体の振る舞いを解析する際に問題となる。

しかし時空が対称性を持つ場合は、そこに存在するキリングベクトル  $\xi^a$  やキリングテンソル  $K^{ab}$  を用いてハミルトニアンを書き換え、今考えている運動方程式をより低い次元の運動方程式へと reduce することができる。特に対称性が高い場合、運動方程式は常微分方程式に変わり積分可能なものとなる。

本発表では  $AdS_5$  時空の対称性についてレビューした後、そこに生えるストリングの解の具体的な導出、及び解の性質について議論する。更に  $AdS_5 \times S^5$  のような、他の 5 次元多様体  $M_5$  が  $AdS_5$  に掛かった場合について、ストリングの解析的な解が導かれるために  $M_5$  が満たすべき性質についても議論をする。

1. Hideki Ishihara and Hiroshi Kozaki arXiv:gr-qc 0506018v2 (2005)
2. Tatsuhiko Koike, Hiroshi Kozaki and Hideki Ishihara arXiv:gr-qc 0804.0084v1 (2008)

## 重宇 c27 電波干渉計による画像作製と CLEAN

杉江 剛典 (近畿大学 宇宙論研究室 M1)

複数の電波望遠鏡からなる電波干渉計は天体から発せられる電波を受信し、相関器から作られたデータを元にビジビリティを求め、逆フーリエ変換することで画像を得る。画像の分解能を決める空間周波数はアンテナ間の距離に比例するので、位置を変更できる電波干渉計は天体の細部を見るのに役立つ。観測されたビジビリティの uv 面における面密度は一律でないため分解能が悪くなる傾向がある。そのため重み付けを行い面密度を調整する必要がある。この調整を行うと合成ビームが変化する。ビジビリティを逆フーリエ変換して出した画像 (ダーティマップ) は真の強度分布と合成ビームの畳み込みであるため、デコンボリューションを行い合成ビームの影響を取り除き真の強度分布を求める。その一つに CLEAN という方法があり、ダーティマップの強度のピークを見

つけ、その位置を中心とする合成ビームを適当にスケールリングしてダーティマップから差し引く。これを行うことでより正確な強度分布を求める。

本ポスターでは、まず電波干渉計で受信した電波から画像を得るまでの過程を大まかに説明する。その後、実際の観測データを用いてシミュレーションソフト CASA で解析を行った結果について報告する。さらに現在行っている観測データの CLEAN についても触れる。

## 重宇 c28 遠赤外線天文衛星 AKARI によるデータを用いたダストマップ作成

梨本 真志 (東北大学天文学専攻 M1)

BICEP2 による原始重力波起源である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) B モード偏光の発見が騒がれたが、これはダストによるものだという決着に落ち着いたのは記憶に新しい。このことから銀河系内のダストについて理解を深め、前景放射を正確に除去していくことが CMB の観測、ひいては初期宇宙の理解において重要な役割を担うことは言うまでもない。

時期を同じくして、昨年末、日本の遠赤外線天文衛星「AKARI」が観測した全天の遠赤外線データが公開された。IRAS 以来 21 年ぶりに刷新される遠赤外線での全天観測画像は、IRAS に比べ十倍以上の解像度を誇り、また IRAS では観測されなかった  $100\mu\text{m}$  より長い波長帯を観測することで、ダストについてより詳細な情報が得られることとなった。AKARI 全天データを利用し、銀河系内に広く分布するダストの全天マップを作成をする。銀河系内のダストマップとして Schlegel、Finkbeiner、Davis (SFD) によって 1998 年に発表されてきたものや、Compiègne による DustEM などが広く知られているが、これらモデルのような既存モデルとの差別化のため、ダスト粒子サイズごとの温度進化をスタカスティックに追って調べることにより、新たなダストモデルとして改良した。現行モデルとの比較によりどのような違いが出てくるかを議論する。

以上のように作られたダストマップを宇宙論に繋げることが本研究の目指すところである。

## 重宇 c29 重力チェレンコフ放射による重力波の速度と分散関係への制限

清田 哲史 (広島大学 宇宙物理学研究室 M2)

重力波の伝搬速度 (音速) は、一般対称理論においては光速であると考えられているが、最も一般的な 2 階のスカラーテンソル理論を宇宙論に応用した模型のように、重力波の速度が光速からずれる理論モデルも存在する。重力波の音速が光速よりも遅くなる場合には、重力チェレンコフ放射と呼ばれる重力波放射が発生する可能性がある。超高エネルギー宇宙線の存在から重力チェレンコフ放射を用いて重力波の速度に制限を与えることが可能であり、重力理論のテストにも有用である。本発表では、初めに重力チェレンコフ放射を用いた重力波の制限についてレビューする。応用として、有質量の重力波模型を含む一般化された分散関係に対して、重力チェレンコフ放射から課される制限を明らかにする。

## 重宇 c30 quantum optimization in estimates for the universe expansion

ROTOND Marcello (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)

We study the optimization of the parameter estimation for an expanding Robertson-Walker universe by use of quantum information considerations. Because of the information that neutrinos can provide us about fundamental epochs in the history of our universe, we will focus especially on Dirac particles. The universe expansion results in the evolution of an initial pure state into a final entangled state and the precision of our estimation of the expansion depends sensitively on the dimensionless mass and dimensionless momentum of the Dirac particles.

1. "Parameter estimation for an expanding universe" J.Wang, Z.Tian, J.Jing, H.Fan, Nucl. Phys. B, 892, pp.390-399

## 重宇 c31 Unruh detector model を用いた「情報」の考察

久木田 真吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D2)

ブラックホールが温度とエントロピーを持つということが理論的に示されて以降 [1]、ブラックホールの統計力学的、更には情報理論的側面に注目が集まるようになってきた。それに端を発して生じた問題のひとつが、「ブラックホールによる情報損失問題」である。これは、ブラックホールがその温度による熱輻射によって蒸発してしまうときに情報を持ち去ってしまうのが量子論的なユニタリ性と反する、という問題だ。この問題を考察するときには「情報とは何か」という問題を真剣に考えなくてはならないのだが、これをまじめに考察した研究はおそらくないといっていい。そこで、今回は「情報」の意味をより直感的かつ測定理論的立場から考え直してみたい。まず、「情報」は最低何らかの観測操作によって直接的あるいは間接的に取り出されるべきものである、ということに着目する。従来の研究では量子場のエンタングルなどを情報と読み替えていたが、量子場は単独で測定可能な存在ではない。そこで測定器のモデルである Unruh detector を用いて、量子場の情報を測定するような状況を考えてみる。detector 系という測定可能な系の情報から、我々はどのような「情報」を得るのだろうか？ このように得られた「情報」の概念を用いて、ブラックホールの情報損失問題を再解釈してみたい。とりあえず今回は detector 系からどのような情報が得られるのかまでを発表する予定である。

1. Hawking, Stephen, "Particle Creation by Black Holes," Commun. Math. Phys. 43 (3):199-220

# 宇宙素粒子分科会

観測、理論から宇宙線研究の最前線に迫る

|      |   |
|------|---|
| 日時   | 7月28日 14:45 - 15:45(招待講演:間瀬 圭一 氏), 16:00 - 17:00<br>7月29日 10:15 - 11:15, 16:00 - 16:30, 17:15 - 18:15(招待講演:戸谷 友則 氏)   |
| 招待講師 | 間瀬 圭一 氏 (千葉大学)「ニュートリノ天文学の幕開け」<br>戸谷 友則 氏 (東京大学)「ガンマ線天体の宇宙論的進化・ガンマ線バーストとブレーザー」   |
| 座長   | 深見哲志 (東京大学 M2)、上山俊佑 (千葉大学 M2)、掃部寛隆 (甲南大学 M2)、堤陵 (甲南大学 M2)   |
| 概要   | <p>地球に降り注ぐ宇宙線は、広大な宇宙空間を横切り、遠くかなたの様々な情報を我々にもたらしてくれます。「宇宙素粒子」とはニュートリノやガンマ線、ダークマターの正体となる新たな素粒子など、あらゆる観測粒子を扱う意味から名づけられています。宇宙線の研究は、宇宙線を発生させる天体についての情報を得られるだけでなく、伝播してきた空間の状態を知る上でも重要な役割を果たします。</p> <p>高エネルギー宇宙線の起源としては、超新星残骸 (SNR) や活動銀河核 (AGN) などが候補に挙げられていますが、非常に高エネルギーの粒子を実現する物理過程については、未だ明確な解が得られていません。また、ガンマ線バースト (GRB) のようにその正体が謎に包まれたままの現象も存在しています。</p> <p>現在、実験の面では、高エネルギー光子、ニュートリノ、ダークマターを観測する多数のプロジェクトが次々と始動されている上、ASTRO-H(X線)、CTA(ガンマ線)、IceCube、Hyper-K(ニュートリノ)等の大型プロジェクトが数年以内の観測開始を予定しています。一方理論の面では、観測事実に基づき未知の宇宙線の発生機構などに対して頻りに新たなモデルが提唱されており、非常に活発な状況にあります。実験と理論の両面での発展により、多くの謎が解明され、宇宙線分野は今後飛躍的な進歩を成し遂げると期待されています。</p> <p>本分科会では、宇宙線に対する理解や興味を深め、観測・理論の分け隔てなく活発な議論や交流を行います。宇宙線に関する知識を今後の研究活動に役立てて頂くことを期待しています。</p> <p>注) 宇宙線としてのニュートリノは宇宙素粒子分科会で扱います。コンパクトオブジェクトからの高エネルギー粒子の放射・伝播・加速機構に関しては宇宙素粒子分科会で扱います。</p> |

間瀬 圭一 氏 (千葉大学)

7月28日 14:45 - 15:45 B 会場

## 「ニュートリノ天文学の幕開け」

IceCube 望遠鏡は主として 100 GeV 以上の宇宙からの高エネルギーニュートリノを観測するために南極に建設された。天体から放射される殆ど相互作用しないニュートリノを検出するのに必要な  $1 \text{ km}^3$  という大きな検出器を実現するために南極の透明な氷を用いるユニークな検出器である。ニュートリノは活動銀河核やガンマ線バーストのような高エネルギー天体中で加速されたハドロン粒子が衝突する事により生じると考えられている。殆ど相互作用しないニュートリノの性質のために検出するのは困難であるが、星間物質に吸収されることもなく、また磁場により曲げられることもないので、深宇宙の天体を探索することができる。また、ニュートリノはハドロン粒子の衝突により生成されるので、IceCube は発見から 100 年経った現在でも完全には理解されていない宇宙線の起源を明らかにする可能性がある。IceCube は検出器内に観測されたエネルギーが約 30 TeV 以上の事象を今までに 54 事象観測した。大気ニュートリノバックグラウンド仮説は  $7\sigma$  水準で棄却され、天体から放射されるニュートリノである事が判明した。IceCube はまた天体内に捕らえられたニュートラリーノ等の SUSY 粒子の対消滅からのニュートリノを捕らえたり、大気ニュートリノ振動の観測により素粒子物理にも寄与できる。これらの最新の IceCube の結果とその意味について講演する。

戸谷 友則 氏 (東京大学)

7月29日 17:15 - 18:15 B 会場

## 「ガンマ線天体の宇宙論的進化・ガンマ線バーストとブレイザー」

宇宙論的な距離から観測されているガンマ線天体として代表的に挙げられるのがガンマ線バーストとブレイザーである。これらは、ガンマ線を出す放射機構もよく似ていると考えられる。また、これらを宇宙論的な情報を得るための「道具」として用いることができる点も同様である。本講演では、これらの天体の基礎的な理解と最近の話題を解説する。

## 宇素 a1 前兆ニュートリノによる超新星爆発の親星の判別可能性

加藤 ちなみ (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

初期質量が太陽の約 8 倍以上の大質量星は、一生の最期に超新星爆発を起こす。しかし、その進化については、爆発機構を含め未だに多くの未解明な点が残されている。爆発前の親星の構造もその一つで恒星進化理論によると、親星の種類は大きくわけて“鉄核型”と“ONe 核型”の 2 種類があると考えられている。爆発した超新星の親星の構造を特定するためには親星の内部を直接観測する必要があるが、電磁波では散乱や吸収を受けてしまうので、直接観測することができない。そこで中心部の情報を担いかつ、観測可能なものとして期待されるのが、物質との反応断面積はるかに小さいニュートリノである。超新星ニュートリノといえば、小柴らがカミオカンデ検出器を用いて、1987 年に大マゼラン星雲で起こった超新星 SN1987A からのニュートリノを検出し、ノーベル賞を受賞したことが想起されるが、このときのニュートリノは超新星爆発に続く原始中性子星冷却時に放出されたもので、ここで述べているものとは異なる。実際、ニュートリノ放出自体は超新星が起こるずっと前の段階から始まっている。この段階のニュートリノを“前兆ニュートリノ”と呼ぶ。前兆ニュートリノは、親星の深部の情報を直接我々に届け、上述の 2 種類の親星の判別を可能にするだけでなく、続いて起こる超新星爆発へのアラートにもなりうる。1987 年の時点では、主として低エネルギー (数 MeV) で放出される前兆ニュートリノの観測はバックグラウンドと区別するのが難しかったが、格段に観測技術が発展した現在のスーパーカミオカンデや KamLAND などの観測装置なら、近傍 (~kpc) からの前兆ニュートリノを検出できる可能性がある。現在も新学術領域研究「宇宙の歴史をひもとく地下素粒子原子核研究」等の支援のもとで低バックグラウンド技術の開発が進んでおり、近い将来に起こるであろう近傍超新星爆発の観測に向けた準備は整いつつある。以上の研究背景を踏まえ、爆発前の親星タイプ“鉄核型”と“ONe 核型”が“前兆ニュートリノ”の観測から判別可能であるかを検証する。

1. Odrzywolek, A., Misiaszek, M., & Kutschera, M. 2004, APh, 21, 303
2. Itoh, N., Hayashi, H., Nishikawa, A., & Kohyama, Y. 1996, ApJS, 102, 411
3. Takahashi, K., Yoshida, T., & Umeda, H., 2013, ApJ, 771, 28

## 宇素 a2 重力崩壊型超新星中の $\nu\nu$ -interaction による Neutrino flavor transition

佐々木 宏和 (国立天文台三鷹 M1)

宇宙、銀河、星の構造形成及び物質の進化過程は超新星やガンマ線バーストなどの高エネルギー天体現象による物質・熱循環に起源をもつ。超新星爆発を引き起こすメカニズムとして一般相対論による効果や流体的不安定性といったマクロな効果、元素合成やニュートリノと物質との相互作用といったミクロな物理過程による効果が考えられる。重力崩壊型超新星の中心付近ではニュートリノがつくられ、衝撃波発生後、中心から表面に向かって  $\nu\nu$ -interaction (ニュートリノどうしの散乱)、MSW 効果、vacuum oscillation の順で flavor transition を起こすと考えられる。先行研究では主に MSW 効果、vacuum oscillation に関する研究がなされたが  $\nu\nu$ -interaction の研究はほとんど進んでいないのが現状である。超新星爆発や宇宙、銀河の進化、さらには元素の起源を解明する上

でコアにもっとも近い flavor transition の詳細を研究することは不可欠であり、研究によってニュートリノの多体系に対する理解も深まるであろう。

ここでは重力崩壊型超新星内部における  $\nu\nu$ -interaction による flavor transition に関する研究を紹介し、今後の展望を述べる。この研究では bulb model というモデルを用い原始中性子星から放出されるニュートリノを中心からの距離 200km までの範囲で考える。簡単のためフレーバーは 2 種類だけ考え、 $2 \times 2$  の密度行列を計算することにより flavor transition を調べる。散乱するニュートリノのなす角度に対する依存性を無視する single-angle approximation という近似を用いて計算すると  $\nu\nu$ -interaction による flavor transition には中心付近から順に synchronization、bipolar oscillation、energy split という 3 つの特徴的な現象があらわれる。角度依存性を考慮する multi-angle simulation では bipolar oscillation の振幅が single の場合よりも小さく、振動が不鮮明となるが synchronization と energy split は確認された。

今回  $\nu\nu$ -interaction として高次の項を無視し平均場近似した一粒子ハミルトニアンを用いたが、今後はこれらの近似を使わない多体系ハミルトニアンを出来るだけ近似なしに計算できるよう、また、3 フレーバーの場合でも計算できるよう現在準備を進めている。

1. G. L. Fogli, E. Lisi, A. Marrone and A. Mirizzi JCAP 0712, 010 (2007) [arXiv:0707.1998 [hep-ph]]
2. Duan H, Fuller G M, Carlson J and Qian Y Z 2006 Phys. Rev. D 74 105014 [SPIRES] [astro-ph/0606616]

## 宇素 a3 解像型大気チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガンマ線の観測原理

稲田 知大 (東京大学宇宙線研究所 M1)

今日宇宙の姿を明らかにするために様々な波長の電磁波を用いて観測が行われている。ガンマ線領域は電磁波の中でも波長が一番短く高エネルギー領域である。さまざまなガンマ線の観測を行う検出器の中でも最もエネルギーの高い TeV 領域の観測を可能としたのが解像型大気チェレンコフ望遠鏡 (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope, IACT) である。現在は H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS といった望遠鏡が稼働しており、次世代計画として Cherenkov Telescope Array (CTA) が現在国際共同プロジェクトとして進められている。これは口径の異なった望遠鏡を合計約 100 台用いることで 20GeV から数百 TeV 領域の超高エネルギーガンマ線の観測を目指すものである。現行の望遠鏡と比べると感度 10 倍かつ 4 桁にも渡る広いエネルギー領域という CTA が持つ特徴により新たな物理が発見されることが期待され、いままさに高エネルギーガンマ線天文学は発展の時期を迎えている。本発表では地球大気を利用することで TeV 領域の高エネルギーガンマ線観測を可能にした解像型大気チェレンコフ望遠鏡の観測原理とそれに付随する観測技術についてレビューを行う。

1. A.M.Hillas, Astroparticle Physics 43(2013)19-43.

## 宇素 a4 超高エネルギーガンマ線観測の現状と CTA の見る宇宙

岩村 由樹 (東京大学宇宙線研究所 M1)

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、100 台近くの大気チェレンコフ望遠鏡からなるガンマ線天文台を建設し、20GeV から 100TeV という超高エネルギー (VHE) ガンマ線領域での宇宙観測を行う国際共同プロジェクトである。VHE ガンマ線の天体観測では、ガンマ線が地球大気と相互作用する過程で生じるチェレンコフ光を地上の望遠鏡で検出する手法が用いられる。いま世界では H.E.S.S.、MAGIC、VERITAS といった大気チェレンコフ望遠鏡が稼働しており、超新星残骸や活動銀河核など銀河系内外に 160 を超える VHE ガンマ線源が発見・観測されている。

CTA では大規模な望遠鏡群を建設することにより、感度を既存の望遠鏡の 10 倍以上に押し上げるとともに高い角度分解能を実現する。また口径 4m から 23m にわたる大中小 3 通りのサイズの望遠鏡を設置することで、観測可能なエネルギー領域も拡大する。これらの性能向上の結果として新たに 1000 以上の VHE ガンマ線天体の発見が期待されており、さらには天体観測にとどまらず宇宙線の起源やダークマターの対消滅、ローレンツ不変性の破れなどをも探ることができると期待されているため、CTA が完成した暁には様々な面から人類の物理学への理解が推し進められるに違いない。本レビューではこうした CTA 計画の概要と CTA で狙える天体について、既存の大気チェレンコフ望遠鏡と比較しつつ紹介する。

## 宇素 a5 宇宙線加速における最高エネルギー問題

野上 雅弘 (青山学院大学大学院 M1)

1912 年に V. F. Hess によって宇宙線が発見された。その発見から約 100 年にわたり宇宙線について多くの研究がなされてきたが未だに宇宙線の起源や加速機構は謎のままである。一般に宇宙線のスペクトルは  $10^8$  eV から  $10^{20}$  eV とエネルギーの範囲が広く、3 つの折れ曲がりを持つべき乗分布であることが知られている。この折れ曲がりには宇宙線の起源によるものと考えられている。1 つ目の折れ曲がりには  $E \approx 10^{15.5}$  eV にあり、これまでの宇宙線は銀河系内が起源であると考えられている。また、2 つ目の折れ曲がりには  $E \approx 10^{18}$  eV のところにある。  $E \approx 10^{18}$  eV のエネルギーの宇宙線は銀河系外の天体である AGN や GRB などの高エネルギー天体現象が起源であろうと考えられている。

本発表では最高エネルギー宇宙線 ( $10^{20}$  eV) における加速機構として相対論的な衝撃波における粒子加速を考え、Simulation を行った Lemonine & Pelletier (2006)[1]、Lemonine & Pelletier (2010)[2] について review を行う。[1] では相対論的な衝撃波を調べる際に下流の磁場構造は上流の磁場を衝撃波面で圧縮したものと仮定した。そのとき上流の磁場の揺らぎの波長が粒子のジャイロ半径よりも大きい場合、粒子は加速されず、小さい場合は加速することができる。[1] また、加速されたとしても加速率が低く AGN や GRB では最高エネルギー ( $10^{20}$  eV) まで加速できないという理論的報告がなされた。[2]

したがって現在の理論的な理解では相対論的な衝撃波では宇宙線を最高エネルギーまで加速できない。しかし、この結論に至るまでにいくつもの仮定がある。この仮定が外れたとき相対論的な衝撃波で宇宙線を最高エネルギーまで加速できるのか議論していく。

1. Lemoine, M., Pelletier, G., Revenu, B. 2006, ApJ, 645, L129
2. Lemoine, M., Pelletier, G., 2010, MNRAS, 402, 321

## 宇素 a6 ブレーザーからの線放射と電子加速

小林 瑛史 (青山学院大学大学院 M1)

本講演では Inoue & Takahara (1996) のレビューを行う。Fermi 衛星やチェレンコフ望遠鏡でブレーザーから検出される高エネルギーガンマ線はジェット中での逆コンプトン散乱によって放出されると考えられている。

この論文では逆コンプトン散乱の種光子として、シンクロトロン放射の光子と外部光子を考えた。高エネルギー電子のエネルギー分布は、衝撃波加速と放射冷却の釣り合いで決定した。これらを基に、広帯域でのブレーザーからの放射スペクトルを計算している。

計算されたスペクトルとブレーザー (3C279 と Mrk421) の観測データを比較し、観測されたスペクトルが、二つの特徴的なピークに分かれていることが分かった。電波から UV または X 線までの低エネルギー成分はシンクロトロン放射であり、X 線からガンマ線の高エネルギー成分は電子による逆コンプトン散乱である。それぞれのピーク振動数は加速された電子の最高エネルギーを反映しており、観測データとの比較によって、電子が予想以上に非効率的に加速されている事がわかった。この電子の加速効率をイオンに適用すると、ブレーザー放射領域ではイオンを宇宙線の最高エネルギーである  $10^{20}$  eV まで加速できない事になる。

## 宇素 a7 パルサー星雲における粒子加速と輸送

石崎 渉 (東京大学宇宙線研究所 M2)

パルサー星雲とは、半径 10km 程度の小さな天体であるパルサーひとつによって作り出された、数光年もの大きさに広がる天体である。パルサー星雲は電波から  $\gamma$  線の広い波長帯で観測される天体であり、その放射スペクトルは非熱的な分布を持った電子・陽電子からのシンクロトロン放射・逆コンプトン散乱によって説明される。

パルサー星雲のエネルギー源は、中心に存在するパルサーの回転エネルギーである。星雲の中心に存在するパルサーは、パルサー風と呼ばれる相対論的速度を持った電子・陽電子プラズマの風を噴き出していることが知られている。このパルサー風が、周囲の星間物質を押しつけてきた天体がパルサー星雲であるとされている。

Kennel & Coroniti (1984)[1] はパルサー星雲の標準的モデル (以下 KC モデル) を与えた研究である。彼らは、球対称・定常を仮定したパルサー星雲について、プラズマ流の空間構造と放射スペクトルを計算した。KC モデルでは、パルサー風が星間物質に流れ込む際、終端衝撃波を形成し、その衝撃波における粒子加速によってエネルギーを得た粒子が、プラズマ流に乗り、移流していくとしてモデル化している。しかし、Reynolds (2003)[2] は、可視光領域のスペクトル指数の空間依存性を、KC モデルを使って計算すると、観測事実と矛盾することを指摘した。さらに、KC モデルで考慮していなかった、高エネルギー粒子の拡散過程の考慮の必要性に言及した。これを受けて、Tang & Chevalier (2012)[3] は、拡散過程を用いて、高エネルギー粒子の輸送過程をモデル化し、可視光領域のスペクトル指数の空間依存性を再現したが、全波長帯の放射スペクトルについて言及していない点等、モデルは不完全である。

本講演では、パルサー星雲のスペクトルモデルに関する理論的研究についてレビューを行い、その上で、より観測事実再現するような、パルサー星雲における粒子加速過程・輸送過程について議論することを旨とする。

1. Kennel, C. F., & Coroniti, F. V. 1984, ApJ, 283, 694
2. Reynolds, S. P. 2003, in Proc. IAU Colloquium 192, 10 Years of SN1993J (arXiv:astro-ph/0308483)
3. Tang, X. & Chevalier, R. A. 2012, ApJ, 752, 83

## 宇素 a8 大型レーザーを用いた磁化プラズマ中の無衝突衝撃波の生成実験

正治 圭崇 (青山学院大学大学院 M1)

銀河系内宇宙線 ( $\sim 10^{15.5}$  eV) の加速源の最有力候補として、超新星残骸における無衝突衝撃波が挙げられる。その加速メカニズムとして、粒子が電磁波で散乱されて衝撃波面を往復することでエネルギーを得る、フェルミ加速などの理論的モデルが考えられている。しかし、フェルミ加速には注入問題や粒子を散乱させるための電磁波の励起方法等の問題が指摘されている。注入問題の解決方法としては、波乗り加速といった加速機構がシミュレーションによって示唆されている。[1]

宇宙線の加速メカニズムの研究として、理論的研究および観測的研究が主な方法として行われてきたが、我々は第三の方法として、大型レーザーを用いた地上実験によって宇宙線加速のメカニズムを解明する。我々の第一目標は磁場中の無衝突衝撃波を生成することである。

実験の準備として、イオンのジャイロ半径・Alfvén マッハ数・クーロン散乱の平均自由行程より無衝突衝撃波生成の条件を考えた。その条件を満たすためのターゲットを決めるために輻射流体シミュレーションである ILESTA1D を用いて計算を行ったところ、Al の  $5 \sim 10 \mu\text{m}$  の厚さが最適であるとわかった。そして考えたパラメータ条件を用いて、実験を行った。昨年度の実験では、無衝突衝撃波の生成には至らなかったが、結果より求めた ejecta の速度が生成条件を満たすことを確認した。また、生成条件を満たすためのターゲットおよびレーザー条件を輻射流体シミュレーション ILESTA1D を用いて調べた。

1. Hoshino & Shimada (2002)

## 宇素 a9 高エネルギーガンマ線で観測する宇宙

加藤 翔 (東京大学宇宙線研究所 M1)

我々は電磁波や宇宙からの高エネルギー粒子 (宇宙線) を通じ、宇宙で起こっているさまざまな現象を知ることができる。電磁波・宇宙線を観測する観測機器の発展にともない、我々はさらに詳しく宇宙を見ることができるようになる。しかし、観測される宇宙、そして現象の中には既存の理論の枠組みでは、理解できないような現象も存在する。宇宙の新たな観測は、往々にして、新しい謎を生んできたといえる。現在、技術の発展に伴い、我々が見ることができるよう宇宙の姿や現象は以前とは比べ物にならないほど広がったが、より多くの、またより深遠な謎が生まれてきている。

本講演では電磁波の中でも、高エネルギーであるガンマ線の観測についてレビューを行う。ガンマ線は主に相対論的なエネルギーを持つ荷電粒子による放射によって生じる。高エネルギーガンマ線の存在はこのような高エネルギーの荷電粒子が存在することを示している。したがってガンマ線の観測は、例えば超新星残骸における宇宙線加速のような、高エネルギー現象を解明する手がかりとなる。近年、宇宙線を加速している超新星の幾つかが特定された。より多くの年齢の異なる超新星残骸を

測定することにより、超新星残骸の加速器としての進化を研究することができる。高エネルギーガンマ線により、今まで他の波長では見ることができなかった様々な現象が見えてきている。当講演では高エネルギーガンマ線を通して見ることができるよう宇宙について概観し、次世代の大規模高エネルギーガンマ線天文台である CTA への期待について述べる。

## 宇素 b1 次世代高エネルギーガンマ線望遠鏡による銀河面サーベイ

DANG VIET TAN (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは口径の異なる大中小 3 種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を配置した超高エネルギーガンマ線天文台で、現在の望遠鏡の十倍深い感度を達成し、観測できるエネルギー帯を 20 GeV から 100 TeV 以上へ拡大することを目指す国際共同実験計画である。現在世界で 31 カ国、1200 人を超える学者達が参加している。CTA 計画で狙う主要なサイエンスは、Key Science Project (KSP) として策定されており、銀河系内・系外サーベイ、銀河中心、大マゼラン星雲などの観測戦略が立案され、議論が進んでいる。その中でも Galactic Plane Survey (GPS) は、重要な観測戦略の 1 つとして検討されている。GPS では、モンテカルロ・シミュレーションで得られた CTA の Instrument Response Functions (IRFs) を用いて銀河面のガンマ線ソースの観測可能性の評価を行い、銀画面を 3 mCrab の感度で銀経  $-60$  度から  $60$  度まで、銀緯  $-3$  度から  $3$  度までの領域を 250 時間でサーベイする計画を立案している。GPS では主に視野の広い CTA 中小型望遠鏡アレイが重要な寄与をすると期待されている。しかしながら、視野が相対的に小さい CTA 大型望遠鏡でも、Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡のエネルギー帯とオーバーラップのある低いエネルギー帯でどのような寄与ができるかを調査し、観測戦略を練る必要がある。私はこの問題をシミュレーションにより調べている。本講演では、GPS 計画についての紹介を行い、日本チームが主に開発を行っている CTA 大型望遠鏡が果たす役割について検討状況を報告する。

1. Surveys with the Cherenkov Telescope Array. arXiv:1208.5686v1 [astro-ph.HE] 28 Aug 2012

## 宇素 b2 宇宙線断層撮像のための基礎研究

岸田 柊 (甲南大学 M1)

地球に降り注ぐ宇宙線を計測して、建物や地中の構造を撮像することを宇宙線断層撮像と呼ぶ。本講演ではその基本的な原理と、装置に用いる光検出器として MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) と PMT (PhotoMulti Tube) について比較した結果について発表する。

## 宇素 b3 LED 光での PMT と MPPC の性能比較

高見 将太 (甲南大学 M1)

高エネルギー宇宙線から生成されるミューオンと電子を用いて建物内部の構造などを撮像する装置を開発するための基礎研究。PMT と MPPC の原理の説明。1p.e. (光電子) の分布を見るために LED を微弱に発光させ、検出器 (PMT, MPPC) で検出し、PMT と MPPC の性能を比較する。

## 宇素 c1 neutrino oscillations in core-collapse supernova

Delfan Azari Milad (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

I am studying theoretical astrophysics with main focus on core-collapse supernovae. Neutrinos are supposed to be the key player in CCSNe. They carry most of the energy relieved by the gravitational collapse of massive star cores. If only one percent of their energy is transferred to stellar matter, CCSNe will be produced. The problem with the supernova theory is: This has not been achieved in the most sophisticated numerical simulations so far. , it is well known that mu- and tau neutrinos have higher energies than electron neutrinos. If the former is converted to the latter and then absorbed by matter, more energy is transferred and may induce successful explosions. The interesting thing is that the neutrino oscillations are modified by the presence of neutrino themselves; then the problem becomes nonlinear and far more difficult than the ordinary oscillation. Our idea is to apply the linear stability analysis to the results of the detailed numerical simulations without neutrino oscillations and see if the so-called collective neutrino oscillations occur at some point in the core collapse.

1. Kei Kotake, Katsuhiko Sato, Keitaro Takahashi, Rep. Prog. Phys. 69 (2006) 9711143
2. Dasgupta, B. et al., 2008, Phys.Rev.D77:113002

## 宇素 c2 ARA 実験における信号転送システムの製作と較正

磯部 晃 (千葉大学院 粒子線物理学研究室 M1)

Askaryan Radio Array (ARA) 実験は、南極における超高エネルギーニュートリノ観測実験であり、氷河中でのニュートリノ相互作用による粒子カスケードから放射される電波の検出による超高エネルギーニュートリノの観測を目的としている。氷河中 200 m に埋設された検出器からの高周波信号を、精度良く氷河表面に転送することが必要となる。私たちは、RFoF 法を用いた信号転送システムを開発し、ARA 検出器 1 ユニット分の装置を建造した。製作したシステムの性能、信号増幅、応答を理解するため、詳細なキャリブレーションを行った。本講演では、製作過程とキャリブレーション測定について説明し、得られた結果について考察する。

1. HOFFMAN, KD, M. RICHMAN, and MA DUVERNOIS. "The Askaryan Radio Array (ARA) neutrino detector: Current status."

## 宇素 c3 太陽中性子観測による粒子加速機構の解明

土屋 暁 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

1912 年に Hess によって宇宙線の存在が確かめられて以来、宇宙線の加速機構の解明は宇宙線研究において重大なテーマの 1 つとなっている。この中で電子の加速機構については、X 線や  $\gamma$  線の観測によって少しずつ解明されてきている。しかし、イオン加速については未だその機

構は理解されていない。本研究は粒子加速の中でもこのイオン加速の加速機構を解明することが目的である。

粒子の加速機構を解明するための情報は地球に到達する宇宙線から得られる。しかし、宇宙線の大半は荷電粒子である。荷電粒子は星間空間における磁場の様々な影響を受けて地球に到達しているため、加速源の情報を正確に取り出すことは難しい。そこで、我々が欲しい情報を持っている粒子として考えられるのが宇宙線に含まれている、ニュートリノ・線・中性子といった中性の粒子である。これらの粒子の中で我々のグループは中性子に着目し、観測・データ解析を行っている。我々が地球で観測する中性子はその寿命の問題から、地球に近い太陽で生成・加速された中性子がターゲットとなる。

本研究で太陽中性子の観測に用いている検出器は、元々 K2K (KEK-to-Kamiokande) 長基線ニュートリノ振動実験の KEK 側の前置検出器として使用されていた SciBar を転用したものである。そのため、中性子に対する感度は十分で、粒子の弁別能力も高い。この SciBar を太陽からの中性子観測に適した低緯度・高い標高のメキシコのシエラネグラ山 (標高 4600m) の山頂に設置し観測を行う。本研究は 2010 年に現在の方針に向け動き始め、2013 年にシエラネグラ山頂に SciBar が設置された。現在はデータ取得を行うのと並行して、中性子検出への最適化の作業を行っている。

現在、私は上記の最適化の作業のソフトとハード両方の改良の手伝いをしながら、システムの理解を深めている。今後は、太陽中性子イベントが起きた時に備えて最適な解析方針を確立したい。

1. Observation of cosmic rays by the new solar neutron telescope, SciCRT

# コンパクトオブジェクト分科会

コンパクトな領域に隠された神秘を探る ～観測・理論研究の最前線～

|      |   |
|------|---|
| 日時   | 7月27日 15:15 - 16:15, 16:30 - 17:30 (招待講演: 堂谷 忠靖 氏)<br>7月28日 13:30 - 15:45<br>7月29日 9:00 - 11:15, 13:30 - 14:30 (招待講演: 久徳 浩太郎 氏)   |
| 招待講師 | 堂谷 忠靖 氏 (宇宙科学研究所)「X線観測で探る中性子星の内部構造」<br>久徳 浩太郎 氏 (理化学研究所)「重力波天文学と電磁波対応天体」  |
| 座長   | 小野光 (東京大学 D1)、岩佐真生 (京都大学 D1)、加藤ちなみ (早稲田大学 M2)、笹平琳子 (総研大 M2)、倉持 一輝 (東京大学 M2)   |
| 概要   | <p>宇宙には、地球上では実現できないほどの高エネルギーを、私達が観測して分かるほどの短いタイムスケールで放出する現象が数多く存在します。これらは、中性子星やブラックホールなどコンパクト天体と呼ばれる、強磁場や強重力をもつ天体によって引き起こされると考えられています。このようなエキゾチックな現象のメカニズムの解明は、私達の全く予想できない新たな基礎物理学の発展につながる大きな可能性を秘めています。</p> <p>高エネルギー天体現象のメカニズムの解明のため、この数十年で様々な理論的なモデルの構築が行われてきました。それと同時に電波からガンマ線までの広い波長領域での電磁波観測やニュートリノ観測の技術の発達により、我々は高エネルギー天体現象の解明へのステップを着実に歩んでいます。近い将来には重力波による観測が開始され、ますます高エネルギー物理学の分野の活性化が期待される分野でもあります。</p> <p>しかしながら、ガンマ線バーストや活動銀河核からのジェット、超新星爆発の爆発メカニズム、そして中性子星、ブラックホールといったコンパクト天体とそれらが起こす合体現象など、未だに多くの謎を残しています。コンパクトオブジェクト分科会では、これらの高エネルギー天体現象について観測及び理論の両側面から最先端の研究結果、観測事実、将来性などを議論したいと思います。</p> <p>注) 超新星爆発や中性子星はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、激変星(新星や矮新星など)や白色矮星は太陽・恒星分科会で扱います。<br/>注) 活動銀河核 (AGN) のブラックホールとしての挙動やジェットに注目する場合はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、AGN ホスト銀河や AGN と銀河の共進化については銀河・銀河団分科会で扱います。<br/>注) 相対論の基礎理論に関する話題は重力・宇宙論分科会で扱います。<br/>注) 重力波についての話題は、コンパクトオブジェクトの天体現象としての重力波に着目したものについてはコンパクトオブジェクト分科会で取り扱います。<br/>注) 高エネルギー天体現象由来の高エネルギー粒子の放射・伝播・加速機構に関しては宇宙素粒子分科会で扱います</p> |

堂谷 忠靖 氏 (宇宙科学研究所)

7月27日 16:30 - 17:30 B会場

## 「X線観測で探る中性子星の内部構造」

中性子星は、重力崩壊型の超新星爆発の後に形成される事がある星で、中性子の縮退圧で支えられたコンパクトな星である。太陽と同程度の質量を持ちながら半径は10 km 足らずと小さく、原子核と同程度の密度を持つ。その意味では、星全体がひとつの巨大な原子核ということもできる。中性子星を構成するような高密度の物質（核物質）の振る舞い、特にどのような状態方程式に従うかは良くわかっておらず、理論および実験の両面から研究が続けられている。核物質の状態方程式として多くのモデルが提唱されており、どのモデルに従うかにより中性子星の質量と半径の関係が異なってくる事が知られている。逆に言えば、中性子星の質量と半径を計ることができれば、核物質の状態方程式に制限を加えることができる。このような観点から、中性子星の質量と半径を求めようと言う試みが長年に渡り続けられている。

現在、2000 近くの中性子星が知られているが、その多くは電波パルサーである。連星をなす電波パルサーについては、質量を正確に求められる場合があり、近年  $2.0 M_{\odot}$  の電波パルサーが見つかり、注目を浴びている。ただし、電波パルサーの観測からは半径に関する情報が得られないため、状態方程式に制限はつきにくい。

一方、X線で輝く中性子星の中には、伴星から質量降着を受けて輝くX線連星や、若い超新星残骸の中にあり熱的放射を出すものなどがある。これらの中性子星を観測することにより、中性子星表面での重力赤方偏移（すなわち質量と半径の比）を原理的に求めることができ、今後飛躍的な精度向上が期待されている。講演では、どのようなX線天体を対象にどのような観測を行うと、重力赤方偏移が計測できるのか、詳細を解説する。また、中性子星の質量と半径の計測に特化したX線望遠鏡の開発も進められており、将来ミッションについても触れる。

1. Lattimer, J. M., Prakash, M. 2007, Physics Reports, 442, 109

久徳 浩太郎 氏 (理化学研究所)

7月29日 13:30 - 14:30 B会場

## 「重力波天文学と電磁波対応天体」

2010年代後半には、第二世代重力波検出器が世界中で観測を始め、多くの研究者は重力波が直接検出されると期待している。重力波は、一般相対論の最も重要な予言の一つであり、その初検出は重力理論の検証に大きな役割を果たすだろう。その先には重力波による天文学 = 重力波天文学、さらに電磁波やニュートリノと協働して宇宙を観測する多粒子天文学の幕開けが控えている。これらの質的に新たな天文学は、宇宙に対する我々の理解を深めるための大きな力になる。本講演では、重力波天文学や多粒子天文学にとって当面最も有望な観測対象である、コンパクト天体連星の合体について紹介する。特に、連星合体からの重力波放射、また合体に付随して起こる電磁波放射 = 電磁波対応天体を中心に議論する。

1. B. S. Sathyaprakash and B. F. Schutz, Living Reviews in Relativity 12, 2 (2009)
2. B. D. Metzger and E. Berger, Astrophys. J. 746, 48 (2012)

## コン a1 collapsar の降着円盤における元素合成

福田 遼平 (九州大学 宇宙物理理論研究室 D1)

鉄より重い元素のおよそ半分は早い中性子捕獲過程である  $r$ -process によって合成される。現在  $r$ -process 元素の起源となる天体現象として、中性子星合体や超新星爆発時のニュートリノ風、磁気回転駆動型超新星が挙げられている。近年、銀河ハローの金属欠乏星の観測や銀河進化のシミュレーションにより、前述の天体現象では説明できないような観測があるとわかった。本研究では、新たに collapsar の降着円盤から粘性加熱によって駆動されるアウトフローを提案する。これは  $M \gtrsim 25M_{\odot}$  の高速回転する星が重力崩壊時にブラックホールと降着円盤の系を作って爆発するというもので、降着円盤内で起きる電子捕獲によって  $r$ -process が進みやすい中性子過剰な環境を作られ、さらに粘性によって加熱されることでアウトフローとして放出される可能性がある。流体シミュレーションで、アウトフロー放出が起きたモデルについてはおよそ太陽質量程度の物質が放出されていた。このうちの 1% の物質が  $r$ -process 元素になると、中性子星合体や磁気回転駆動型超新星 1 回あたりと同程度の量を放出できることになる。放出物質について約 4000 核種の  $r$ -process ネットワーク計算を行い、生成される組成比を調べた。

1. MacFadyen, A.I. & Woosley, S.E. 1999, ApJ, 524, 262
2. Korobkin, O., Rosswog, S., Arcones, A., & Winteler C. 2012, MNRAS, 426, 1940
3. Winteler, C., Käppeli, R., Perego, A. et al. 2012, ApJ 750, 22

## コン a2 Blandford-Znajek process(BZ 機構) の全貌の理解に向けて ~ 起電力の起源について ~

西岡 新平 (京都大学 天体核研究室 M1)

ガンマ線バーストや活動銀河核からは相対論的なジェットが放出されていると考えられているが、それを駆動するプロセスやエネルギー源は未だ十分に理解されていない。ジェットの放出を説明するメカニズムの一つとして Blandford-Znajek process(BZ 機構) がある [1]。BZ 機構はブラックホールの回転エネルギーを周囲の磁場により引き抜く Penrose 過程の一種である。ここで考えるプロセスではブラックホールの周りで電流が生じ、回路と見なせるが、電流を駆動する起電力の起源は明らかにされていない。本発表ではその起電力の起源を解き明かした論文 [2] のレビューを行う。ブラックホール磁気圏に無衝突プラズマが満ちており、磁場  $B$  に沿った電場  $D$  を遮蔽する、つまり  $D \cdot B = 0$  と仮定すると、エルゴ層を貫く開いた磁力線は必ず  $D^2 > B^2$  の成り立つ領域を持つ。これによって磁力線に直交して流れる電流が生じ、外向きのポインティングフラックスを生成することを紹介する。この論文で起電力は明らかになったものの、どのようにブラックホールの回転エネルギーがポインティングフラックスに変換されているかは明らかではなく、BZ 機構の完全な理解のためにはエネルギー輸送についてのさらなる考察が必要である。また BZ 機構において、磁場を与える方程式の解法は明らかになっていない。よって私はこのレビュー講演で得た知識をもとにこれらの問題に取り組みたいと考えている。その展望についても時間が許す限り議論したい。

1. R.D.Blandford, R.L.Znajek, 1977, MNRAS, 179, 433-456
2. Kenji Toma, Fumio Takahara, 2014, MNRAS, 442, 2855-2866

## コン a3 宇宙初期における超大質量ブラックホール形成

竹尾 英俊 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超大質量ブラックホール ( $M_{\text{BH}} > 10^{10} M_{\odot}$  程度) は、宇宙初期 ( $z \sim 6.3$ ) にはすでに存在したことが、観測により知られているが、その形成過程はよくわかっていない。有力な説として、初代星が重力崩壊してできた質量  $\sim 10^2 M_{\odot}$  程度のブラックホールに、エディントン限界 ( $\dot{M}_{\text{Edd}}$ ) を超える (超臨界) 球対称降着がおこり、超大質量ブラックホールが形成されたとするものが知られている。しかし、この説には反論が存在し、[1] によれば、球対称降着に伴って、ブラックホール近傍から放射が生じ、降着ガスを加熱する。降着率は、温度の  $-3/2$  乗に比例するため、加熱により降着率が低下する ( $\sim 10^{-3} \dot{M}_{\text{Edd}}$  程度)。結果として成長時間は極めて長くなり、宇宙初期に超大質量ブラックホールができることはほとんどない。

これに対し我々は、放射中でも降着を促進させる機構として、Rayleigh-Taylor(RT) 不安定に着目した。RT 不安定とは、重力場中で密度の異なる 2 層流体の境界面に生じる不安定で、2 層の境界に密度ムラが生じる。ブラックホールへの降着流では、おおまかに、ガスが高密度な内部から、低密度な外部へ向けて、放射力 (重力よりも大きい) がかかっており、放射が不安定を駆動する。不安定によってガスに密度ムラが生じると、密度の濃い部分は、中心からの放射を遮り、その外側の降着ガスの加熱が妨げられる。すると、この部分では降着率が下がらず、密度はさらに濃くなる。これが繰り返されることで、ガス密度が上昇し、降着が促進される可能性がある。放射優勢な状況でも、(放射が駆動する) RT 不安定が起こることは、[2] が、数値シミュレーションにより、平行平板な系では確認している。我々は、球対称な系でも RT 不安定が降着を促進し、結果として超大質量ブラックホールが宇宙初期に形成されるか否かを、シミュレーションを用いて研究している。本講演では、[1][2] を踏まえつつ、その研究の経過を報告する。

1. Wang, J. -M., Chen, Y. -M., & Hu, C. 2006, ApJ, 637, L85
2. Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. 2014, PASJ, 66, 48

## コン a4 MAXI と「すざく」データを用いた?ブラックホール連星の解析と理論との比較

谷治 健太郎 (首都大学東京 宇宙理論研究室 M1)

はくちょう座 X-1(Cyg X-1) などのブラックホール連星のスペクトルには主に、X 線光度が高く熱的放射が支配的なソフト状態と、光度が低く熱的コンプトン放射が支配的なハード状態という 2 つの状態が存在することが知られている。理論的には、前者は多温度黒体放射、後者は熱的コンプトンモデルで大まかな特徴は説明付けられる。その放射源は、ブラックホールの伴星からのガスが形成する降着円盤であると考えられており、それぞれ、標準降着円盤 (SSD) と呼ばれる密度の高い円盤と、移流優勢降着円盤 (ADAF) と呼ばれる密度の低い高温の円盤がモデルとして提案されている。現在考えられている円盤のモデルでは、エディントン光度の約 3% でソフト状態からハード状態へ遷移することが予想されているが、実際の観測と比較すると、必ずしも理論通りにはならないことがある。また、ジェットの組成やメカニズム、ソフト状態における非熱的なベキ型放射成分の起源など、多くの謎が残されており、理論

的研究と観測との大きな差が見られる。私は、このような理論と観測のギャップを埋めるため、観測データを解析し、得られた結果に対する理論的解釈を試み、それが普遍的に正しいかどうかの判定をすることとした。具体的には、国際宇宙ステーションに設置されている X 線全天監視装置 (MAXI) を用いて、代表的なブラックホール連星の強度変動やスペクトルの解析を行い、時間変動や、状態遷移のおこる特徴的なパラメータの探索をし、理論モデルとの整合性について検証した。さらに、「すざく」が取得した Cyg X-1 のソフト状態のスペクトルの中でも、最もソフトな時期に着目して、円盤の内縁半径を正しく測定することを行った。今回は、この結果について報告する。

## コン a5 「すざく」によるブラックホール連星 Cygnus X-1 のソフト状態におけるハードテイル成分の解析

奥田 和史 (東京大学牧島中澤研究室 M1)

ブラックホール連星 (Black Hole Binary; BHB) とは、恒星質量 (5–15  $M_{\odot}$  程度) のブラックホール (BH) と恒星との連星系のことを言う。星風などによって BH に近づいた恒星のガスは、BH の強い引力に引き寄せられ、その周りに円盤状の構造 (降着円盤) を形成し、摩擦により角運動量を失いながら BH に吸い込まれていく。このときガスは重力エネルギーの解放に伴って X 線を放射するため、BHB は X 線で強く光る。

BHB のエネルギースペクトルは、BH への質量降着率が高いときに対応するソフト状態と、低いときに対応するハード状態の、2 つの典型的な形状を持ち、今回のテーマであるソフト状態のエネルギースペクトルは軟 X 線帯域と硬 X 線帯域にそれぞれ特徴的な構造を持つ。軟 X 線成分は、幾何学的に薄く光学的に厚い降着円盤からの多温度黒体放射として矛盾なく理解されているが [1]、ハードテイルと呼ばれる数 MeV まで延びる冪関数型の硬 X 線成分の起源は未だに謎に包まれている。

そこで我々は最も明るい BHB の 1 つである Cygnus X-1 に着目し、0.3–300 keV もの広い帯域を観測できる日本の X 線衛星「すざく」で取得されたデータを用いて、ハードテイル成分の解析を行った。2010 年の中頃に Cygnus X-1 がソフト状態になって以降、2013 年までに行われた計 5 回の観測において、硬 X 線検出器 (HXD) の 10–60 keV のフラックスは数 counts/sec からおよそ 100 counts/sec の間を数時間のタイムスケールで激しく変動している。最も暗い時間帯と最も明るい時間帯に注目して、ハードテイル成分のエネルギースペクトルを比較すると、両者とも冪関数で表したときの光子指数がおおよそ 2.5 であった。強度には 30 倍もの違いがあるにもかかわらずスペクトルの形状に差異が見られないという事実は、ハードテイル成分の放射メカニズムに大きな制限を与える。

1. K. Makishima et al., ApJ, 308, 635 (1986)

## コン a6 ガンマ線背景放射から Ia 型超新星へ

幾田 佳 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

Ia 型超新星 (以下 SNIa) は連星系を成す白色矮星の核爆発が起源だと考えられており、次の 2 つのモデルが提唱されている。白色矮星と主系列星 (若しくは赤色巨星) から生じる Single Degenerate モデル (以下 SD) と、白色矮星同士の合体から生じる Double Degenerate モデル (以下 DD) である。これらのモデルの親星は形成から爆発までの時間に差があり、SD は DD に比べて爆発までの時間が短い。その為、理論的に予

測される赤方偏移方向の発生頻度の分布に差が生じる。しかし、その差は可視領域では観測例が少ない為に誤差が大きく、特に赤方偏移  $z > 1$  では顕著である。

そこで、ガンマ線領域の背景放射 (以下 CGB) に着目した。CGB は様々な赤方偏移の天体からの足し合わせとして観測される。クエーサー等の活動銀河核が主要な光源だと考えられている [1],[2] が、合成された  $^{56}\text{Ni}$  が放射性崩壊する過程でガンマ線を放射する SNIa の寄与もある [3] と考えられる。また、SD と DD では赤方偏移方向の発生頻度分布が異なるので CGB への寄与が異なる。この差を CGB から抽出することで、可視とは独立してガンマ線で SNIa の親星を特定できると考えた。

本研究では、将来的な観測を念頭に、SD と DD の CGB への寄与から必要な観測精度を定量的に考察した。まず SNIa の典型的なスペクトルを理論的に予測される SD の赤方偏移方向の頻度分布で重み付けて足し合わせ、CGB への寄与を評価した。更に SD と DD で異なる寄与を比較評価した。その結果、SD からの CGB への寄与は最低 4% 程度で、特に  $z > 1$  のみの寄与は最低 1.5% 程度となった。また SD に対し DD は 80% 程度となったので、全体で 1% 程度の観測精度があれば、2 つのモデルを観測的に区別出来ることが分かった。更に観測誤差をモンテカルロ法で評価し、理論から予測される精度と合わせて観測への制限を考察した。

本発表では、理論的な計算結果と観測シミュレーション結果を比較考察し、実際に SD と DD を区別する将来的な観測計画に向けて言及する。

1. K.Ahn, E.Komatsu, P.Höflich, Phys. Rev. D71 121301 (2005)
2. P.Ruiz-Lapuente, Lih-Sin The, D.Hartmann, arXiv:150206116v1 (2015)
3. E.Churazov, R.Sunyaev, J.Isern, et al. Nature, 512, 406-408 (2014)

## コン a7 星周物質から迫る Ia 型超新星の起源

長尾 崇史 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

宇宙が時間と共にどのように進化してきたのかという "宇宙の歴史" の理解には、重元素合成に大きな役割を果たす超新星の理解が必要である。しかし、鉄の主な供給源である核反応暴走型 (以下 Ia 型) 超新星は二つの起源が提案されていて、そのどちらが主な起源が分かっていない。白色矮星と主系列星 (あるいは赤色巨星) から生じる SD (Single Degenerate) モデルと白色矮星同士の合体である DD (Double Degenerate) モデルの二つである。モデルによって予想する爆発頻度の時間進化が違い、宇宙の進化の描像が大きく違ってくる。

この問題を解決する方法として、超新星の星周物質に注目した。星周物質は爆発前に親星が放出したものである。SD モデルと DD モデルでは爆発に至る進化の過程が違う為、持っている星周物質の違いが見られる事が予想される。また超新星の光の一部は星周物質で散乱、吸収/再放射されて観測者に届く為、星周物質の分布や量が異なれば観測されるスペクトルが異なる。その為、観測から SD モデルと DD モデルを切り分ける事ができると考えられる。多くの超新星の星周物質を調べる事で、どちらのモデルが Ia 型超新星の主な発生機構であるかを解明する事ができる。

本研究では、観測との比較を想定して、輻射輸送計算を用いて様々な星周物質を持つ超新星がどのように見えるのかを計算した。具体的には、各波長の光度曲線、各波長の減光の時間進化などを計算した。その結果、紫外域で星周物質による散乱の効果、赤外域で吸収/再放射の効果

が顕著に見られる事が分かった。本発表では、その結果について発表する。今後は、この理論予測と観測とを比較し、星周物質の情報から Ia 型超新星の起源の解明を目指していく。

## コン a8 Detectability of surviving companions in type Ia supernova remnants

野田 和弘 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M1)

Ia 型超新星の progenitor system を観測的に決定する手法の一つとして、超新星残骸中に生き残った伴星を探るといものがある。そのような観測の一例として、Hubble Space Telescope(HST) によって観測された Ia 型超新星残骸 SNR 0509-67.5 では  $M_V = +8.4$  の観測限界より明るい天体が見られなかったという結果がある。このような超新星残骸を single degenerate (SD) scenario が説明可能であるかを爆発による伴星への影響を考慮した上で恒星進化のモデル計算によって検証した。結果として、伴星が比較的小さい ( $\sim 0.3M_{\odot}$  以下) 赤色巨星段階において超新星爆発が起こると、HST の観測限界より暗い白色矮星になる可能性があることが分かった。超新星によって伴星の外層が剥離される効果と外層にエネルギーが注入される効果を系統的に扱い、SD scenario が SNR 0509-67.5 の解になり得る条件を求めた。

1. B.E.Schaefer and A.Pagnotta Nature, 481, 164 (2012)
2. E.Marietta, A.Burrows and B.Fryxell ApJS, 128, 615 (2000)

## コン a9 爆発後数日で多バンドで観測が行われた IIP 型超新星 2014cx の測光分光観測

中岡 竜也 (広島大学 高エネルギー宇宙・可視赤外線天文学研究室 M2)

重力崩壊型超新星爆発とは、初期質量が太陽の約 10 倍以上の星が、星の一生の最期に中心核が重力崩壊を引き起こし爆発する現象のことである。超新星においては 1980 年代より地上望遠鏡による可視光での現代的観測が本格化し、観測的性質がまとめられてきている [1]。ただ爆発直後の超新星は 1 万度以上の高温となっており、その放射ピークは紫外線域となることから、早期観測では紫外線域の観測が重要である [2]。現在この帯域では Swift 衛星に搭載されている検出器 UVOT が活躍しており、取得データは自由に閲覧できる。Swift 衛星のデータと、広島大学が所有する口径 1.5m かなた望遠鏡で取得した可視・近赤外の早期、後期データを合わせることで、多波長に亘る長期観測が可能となる。私は 2014 年 9 月に発見された IIP 型超新星 SN 2014cx を、主にかなた望遠鏡を用いて発見から 180 日以上継続して近赤外-可視測光分光観測を行った。この超新星は Swift 衛星でも観測され、UVOT での紫外線・可視光観測も行われている。私はこれら近赤外～紫外線の観測結果から、超新星の膨張速度・光球半径・光球温度の時間変化を求めた。導かれた性質は、典型的な IIP 型超新星で詳細に観測された SN 2012aw とよく似ており [3]、SN 2014cx も典型的な IIP 型超新星であることが伺える。また、光度曲線の立ち上がりを SN 2012aw と比較することで爆発日を推測したところ、この超新星は爆発後 1.6 日で発見され、Swift 衛星の観測が開始されたのは爆発後僅か 2.0 日であることが分かった。これは詳細に観測された IIP 型超新星では最も早く観測されており、IIP 型超新星の爆発直後の光球の物理状態を初めて詳細に知ることができたと言える。本公演では光球の物理状態に加え、分光観測等の結果についても

報告する。

1. Filippenko, ARA&A, 35, 309 (1997)
2. Pritchard et al., ApJ, 787, 157 (2014)
3. Bose et al., MNRAS, 433, 1871 (2013)

## コン a10 超新星コアにおける陽子散乱によるニュートリノのエネルギー変化

堀 雄介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

初期質量が太陽質量の 8 倍以上の大質量星は進化の最後に重力崩壊型の超新星爆発を起こす。しかし多くの数値シミュレーションによる結果では、衝撃波が伝播中のエネルギー損失のため途中で停滞してしまい、爆発を再現できていない。この衝撃波を復活をさせるアイデアとして、爆発の際にコアから放出されるニュートリノの一部が物質を加熱することで、衝撃波回復を補助するとするニュートリノ加熱という機構が考えられており、この量が十分かを明らかにすることが重要な課題である。そしてそのニュートリノが高温高密度の超新星コアにおいて核子等との相互作用により、どのようにエネルギーが変化し輸送されるかが問題の鍵となる。その第一歩として、本発表ではニュートリノと陽子の散乱によるエネルギー変化に注目する。ニュートリノの反応を計算するためには通常、ボルツマン方程式を解く必要がある。しかしそれは複雑で計算には多くの時間がかかる。よって今回は乱数を使うモンテカルロ法を用いて、散乱を確率的に扱うことでボルツマン方程式を直接解くことなくニュートリノ輸送を計算している。本発表ではニュートリノが陽子と十分に散乱し、熱平衡に達するまでのエネルギー分布の様子を示し、どのような分布に近づいていくについて議論する。

1. D.Tubbs,1978

## コン a11 重力崩壊型超新星内部の流体力学的不安定性と重力波の解析

犬塚 慎之介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

本研究では、重力崩壊型超新星の爆発過程において生じる流体力学的不安定性を三次元の流体シミュレーションを用いて詳細に計算し、原始中性子星付近で発せられる重力波を解析することを目的とする。重力波の大半が放出されると考えられる原始中性子星近傍の高密度領域を計算領域に含め、この領域におけるニュートリノ加熱・冷却の効果を考慮している点が本研究の特色である。原始中性子星より外側の領域については既に三次元非軸対称で計算が行われていたが、内側の高密度領域はこれまで計算領域から除外されていた。今回は高密度領域において計算される物理量に optical depth に依存する補正を行うことでより現実的な計算を行った。

まず、高密度領域を含めた計算において、定常解を数値的に求めた。その定常解を初期条件として、重力崩壊型超新星内部の衝撃波上流で擾乱を与え、対流不安定性や定在降着衝撃波不安定性 (SASI) などの流体力学的不安定性を三次元で計算した。これらの不安定性は衝撃波やその内部の流体の非球対称な運動をもたらす。基礎方程式は三次元圧縮性オイラー方程式であり、計算コードは ZEUS-MP/2 コードをもとに作成したものである。時間発展に伴う質量降着率とニュートリノ光度の変化に対応させるため、様々な質量降着率とニュートリノ光度の組み合わせ

でモデルを多数作成した。コアバウンス後の流体力学的不安定性の変化を観察し、不安定性の発現パターンをモード解析により特定した。さらに各モデルについて重力波の計算を行い、フーリエ変換を用いて重力波の偏光状態を調べたところ、SASIが発達したモデルにおいては重力波が円偏光となることがわかった。超新星内部の流体の不安定性の発現パターンとコア付近で発生する重力波の関係を複数のモデル間の比較から検討した。この結果について発表する。

1. W. Iwakami et al. ApJ, 786, 118 (2014)
2. J. W. Murphy et al. ApJ, 771, 52(2013)
3. K. Kotake et al. ApJ, 655, 406(2007)

## コン a12 グラバスター・シャドウ

牧野 芳弘 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

ブラックホールを観測的に証明するにはどうしたらよいだろうか。電磁波観測では、ブラックホールを直接見ることはできず、光の届かない領域が影として観測されると予想される。これをブラックホール・シャドウと呼ぶ。これは事象の地平面ではなく、光円軌道によるものである。光円軌道とは、光がブラックホールの周りでとることができる円軌道であり、その半径は非回転ブラックホールの場合、シュバルツシルド半径の1.5倍である。この半径より中を通る背景光は無遠くの観測者に届かないため、ブラックホール・シャドウとして観測される。これが観測されると、ブラックホールの証明になり得る。

しかしながら、もし、光円軌道を持つ天体（表面より外側に光円軌道が存在する天体）がほかにあれば、ブラックホールと区別することは困難かもしれない。そのような天体の一例としてグラバスターについて調べた論文 [1] のレビューを行う。近い将来、ブラックホールの直接撮像が可能になったとき、このようなブラックホール擬似天体の可能性を排除することがブラックホールの証明につながる。

グラバスターとは、元々 Mazur and Mottola (2004) によって星の重力崩壊の最終段階に、ブラックホール以外の可能性として提案されたものである [2]。この天体は球殻によって構成されており、ブラックホールと違い、事象の地平面を持たないが、光の円軌道半径はもっている。球殻表面が電磁相互作用をしない場合にグラバスターの影がどのように観測されるか、レイトレーシングを行ったところ、グラバスターの内部を通ってくる光により、ブラックホールの時には観測されなかった像が見えることがわかった。これによってグラバスターとブラックホールを区別することができる。

1. N.Sakai, H.Saida and T.Tamaki Phys. Rev. D90,104013 (2014)
2. P.O.Mazur and E.Mottola Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A. 101,9545 (2004)

## コン a13 狭輝線 1 型セイファート銀河から放射される広帯域 X 線スペクトル変動の解釈

楠 絵莉子 (宇宙科学研究所 M1)

活動銀河核 (AGN) には、その X 線放射スペクトル中に「広がったように見える鉄輝線構造」をもつものがある。これはブラックホール極近傍の降着円盤から放射されており、強い相対論的效果によって歪められた鉄輝線だとする解釈がある (ディスクラインモデル)。一方で、この構

造は、円盤周辺に存在する電離吸収体によって、放射源からの連続成分が受ける鉄吸収端に由来するものだと解釈されている (部分吸収モデル)。どちらのモデルでも観測されたスペクトル形状を説明することができ、その正体は明らかになっていない。この論争に決着をつけることは、AGN の X 線放射機構および周辺の物理構造を理解する上で必須となっている。

モデルの妥当性を検証するためには、スペクトルの時間変動に着目することが重要である。狭輝線 1 型セイファート銀河 (NLSy1) は、X 線強度が激しい時間変動を示すことで知られる AGN である。今回、我々は硬 X 線バンド (3 – 79 keV) で過去最高感度を誇る X 線天文衛星 NuSTAR による NLSy1 天体の撮像観測データを統一的に解析した。これによって、鉄輝線構造 (~ 7 keV) よりも高エネルギー側で、最も精度の高いスペクトルを得られた。さらに、他の X 線天文衛星との同時観測データを用いることで、これまで活発に議論がなされてきた低エネルギー側を含め、広帯域に渡るスペクトルに対してモデルの整合性を調べることができた。本講演では、我々の行った NuSTAR データを軸とする解析を踏まえ、ディスクラインモデルと部分吸収モデルとを比較し、どちらのモデルがもっとももらしいか、検証する。

1. Miyakawa, T., Ebisawa, K., & Inoue, H.: 2012, PASJ 64, 140.
2. Mizumoto, M., Ebisawa, K., & Sameshima, H.: 2014, PASJ 66, 122.
3. Marinucci, A. et al.: 2014, ApJ 787, 83.

## コン a14 ブラックホール中性子星連星合体からの重力波:スピンの傾きと状態方程式依存性

川口 恭平 (京都大学 基礎物理学研究所 D2)

ブラックホール中性子星連星合体は有望な重力波源として KAGRA や LIGO、Virgo などの地上重力波検出器のメインターゲットのひとつとされている。ブラックホールや中性子星を含むコンパクト連星の合体の際に放出される重力波の観測は、一般相対論を含む強い重力場の物理の検証となるだけでなく、重力波に含まれる連星の情報を通じて例えば中性子星の状態方程式など高密度、高エネルギーの物理の情報を与えるものとして多に期待されている。重力波の波形からこうした物理を引き出すためには、その波形が連星のパラメータや中性子星の状態方程式モデルにどのように依存するかを調べておく必要があり、特に合体過程において放出される重力波の波形を理論的に予想するためには数値相対論によるシミュレーションが必要である。特にブラックホール中性子星連星合体においてはブラックホールスピン、質量、中性子星の質量、半径 (状態方程式) に依存することが先行研究によって明らかになった。特にブラックホールスピンの方向が系の軌道角運動量の方向からずれている場合、連星の軌道は時空のひきずりの効果により歳差運動を起こすことが知られており、こうしたダイナミクスの変化は重力波波形に影響を与える。今回はスピンの傾いたブラックホール中性子星連星合体の数値相対論シミュレーションによって得られた重力波波形の連星のパラメータ依存性と今後の観測に向けた定量的なモデル化について議論する。

1. K. Kawaguchi, K. Kyutoku, H. Nakano, H. Okawa, M. Shibata, and K. Taniguchi, in prep.
2. P. Schmidt, M. Hannam, and S. Husa, arXiv:1207.3088 (2012).

## コン a15 ショート・ガンマ線バーストのニュートリノ対消滅ジェット

西野 裕基 (京都大学 天体核研究室 M2)

ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst, GRB) は、宇宙論的な距離からのガンマ線が突発的に観測される現象である。光度は太陽の  $10^{17}$  倍を超えて、宇宙最大の爆発現象とも言われる。観測から開き角度が 5 度程度の相対論ジェットが吹き出していることが分かっている。以下で着目するのは継続時間 2 秒以下の short-GRB である。short-GRB は継続時間が短いので、中性子星-中性子星や中性子星-ブラックホール連星が母天体である説が有力である。これらの母天体は合体してブラックホールとコンパクトな降着円盤を作り得る。形成された降着円盤は高温・高密度で、大量のニュートリノ・反ニュートリノを放射する。そこで、ジェット駆動機構としてニュートリノ対消滅ジェット説 [1] が提案されている。放出されたニュートリノと反ニュートリノが衝突すると、電子・陽電子対を生成しジェットを形成すると期待されている。最近の研究 [2] では、Kerr 時空での定常モデルでの解析などが行われている。しかし、ブラックホール降着円盤の進化を考慮しておらず、ジェットのダイナミクスについては解明されていないと言ってよい。

共同研究者の柴田大氏 (基礎物理学研究所) や関口雄一郎氏 (東邦大) が開発した一般相対論的散逸流体コードを用いて GRB ジェットの研究を行う。このコードでは Israel-Stewart 理論 [3] を応用して相対論的な散逸流体を記述している。柴田氏のシミュレーションによると、合体後に、粘性や乱流による効果から降着円盤は次第に厚くなる同時にアウトフローが吹き出す。このようなアウトフローはジェットのダイナミクスに強く影響すると考えられる。これらをふまえ、ニュートリノの生成量と軌道を計算し、どれほどエネルギー放出が起きるのか、時間があれば議論する。

1. Meszaros and Rees, Mon. Not. R. astro. Soc. **257**(1992), 29
2. Zalamea and Beloborodov, Mon. Not. R. astro. Soc. **410**(2011), 2302
3. Israel and Stewart, ANNALS OF PHYSICS. **118**(1979), 341

## コン a16 ニュートリノ冷却優勢円盤における不安定性の成長

木邑 真理子 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

ガンマ線バーストは、宇宙で最も明るい爆発現象である。わずか数秒から数十秒の間に強烈なガンマ線を放出すること、その間数ミリ秒単位の短時間の光度変動を示すことが特徴として挙げられる。ガンマ線バーストの中心エンジンとして最も広く受け入れられているモデルが Hyperaccretion である。このモデルの中では、コンパクト天体同士の合体や大質量星の重力崩壊後に、中心天体の周りに形成される質量降着率が  $0.01 - 1M_{\odot} s^{-1}$  と非常に高い降着円盤が、膨大なエネルギーを生み出すとされている。ここで述べる降着円盤では、光子ではなくニュートリノの放射による冷却が優勢となる [1]。そのため、この降着円盤をニュートリノ冷却優勢円盤と呼ぶ。

最近の研究 [2] により、このニュートリノ冷却優勢円盤の熱平衡曲線に、粘性不安定性 [1] を示すブランチがあることが発見された。しかし、この不安定性が円盤内でどのような構造変化を引き起こすかはわかっていない。本研究では、ニュートリノ冷却優勢円盤の時間進化を世界で初めて解いた。その結果、円盤に流れ込むガスの量を徐々に上げたと

き、(1) ニュートリノの放射が優勢になる領域が広がっていくこと、(2) ニュートリノ冷却優勢への遷移は局所的に起こり、遷移場所へのガス輸送の短時間の変動が円盤全体に伝播すること、(3) 遷移が間欠的に起こるため、ニュートリノ光度は階段状に変化すること、(4) ブラックホールへの質量降着率も間欠的に変化し、間欠的なジェット噴出を起こしうること、などを新しく見出した [3]。これらの結果は、ニュートリノ冷却優勢円盤における不安定性の成長過程を示すものであり、ガンマ線バーストに見られる激しい時間変動を説明出来る可能性を示唆する。

1. Kato, S., Fukue, J. & Mineshige, S., Kyoto Univ. Press (2008)
2. Kawanaka, N., Mineshige, S. & Piran, T., ApJ, **777**, L15 (2013)
3. Kimura, M., Mineshige, S. & Kawanaka, N., PASJ, submitted

## コン a17 超大質量星は Gamma-Ray Burst を起こすのか?

松本 達矢 (京都大学 天体核研究室 D1)

2000 年代以降、赤方偏移  $z \gtrsim 6$  の初期宇宙 (ビッグバンからおよそ 1 Gyr 後) では質量が  $10^9 M_{\odot}$  の超巨大ブラックホール (BH) が観測されている。この超巨大 BH が恒星質量 BH のガス降着によって形成されたと考えると、質量獲得には時間がかかりすぎることが指摘されている。よって、より短時間で観測されている超巨大 BH が形成できるような過程を考えなければならない。近年、このような形成過程の一つとして、超大質量星と呼ばれる天体が注目されている。超大質量星とは、質量  $10^5 M_{\odot}$ 、半径が  $10^{14-15}$  cm の巨大な恒星で、重力崩壊によってほぼ同質量の BH を形成すると考えられている。この大質量 BH がガス降着で成長すると、観測されている超巨大 BH を説明できる。

しかし、超大質量星は  $z \gtrsim 10$  の初期宇宙に存在しているため、現在までに観測された例はない。本研究では、超大質量星を観測的に検証する手段として、重力崩壊時に起こる可能性にある Gamma-ray burst (GRB) に着目する。GRB は大質量星の重力崩壊に伴って、中心部で形成された BH から相対論的なジェットが駆動され、星の表面を突き破って起こす爆発現象である。また、GRB は宇宙一大きな爆発現象として知られており、遠方で起こっても観測可能である。

超大質量星が GRB を起こすにあたり、大きな障害となるのは、超大質量星の半径が非常に大きいことである。超大質量星の半径は太陽のおよそ  $10^3-4$  倍であり、これは GRB を起こせない天体である赤色超巨星に匹敵する。本研究では、超大質量星内でのジェットの伝播計算結果を紹介した後、GRB の可能性について述べる。さらに、今後の展望として、GRB に伴う放射の性質などについても議論する。

1. T. Hosokawa et al. ApJ, **778**, 178 (2013)
2. Y. Suwa, & K. Ioka ApJ, **726**, 107 (2011)
3. T. Matsumoto et al. in prep

## コン a18 GRB collapsar モデルの親星依存性に関する理論的研究

早川 朝康 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

線バースト (以下 GRB) は、線において数秒から数十秒の短時間でエネルギーを放出する全天で最も明るい現象である。GRB は観測的に 2 種類に分けられ、継続時間が 2 秒以上の long GRB とそれよりも短

い short GRB に分けられる。本研究では long GRB に着目する。long GRB の候補になる系としては、大質量星の重力崩壊モデルが考えられている (collapsar モデル)。[1]collapsar モデルは、中心コアの重力崩壊後に中心にブラックホールとその周りに降着円盤を作るモデルである。円盤からの降着のエネルギーを相対論的なジェットとして放出することで、GRB になるとされている。collapsar モデルが long GRB の候補とされているのは、コア崩壊後も、外層から円盤へ降着することで、円盤からブラックホールへの降着率が高いまま維持されるためである。しかし、long GRB の中でも、典型的な継続時間より長いものや、超新星に付随したものも観測されている。それらをどのように説明するのかが未解明である。

先行研究として、Kumar et al. (2008)[2] は外層からの降着、円盤からブラックホールへの降着を単純化した collapsar モデルで数値計算を行った。その結果、高速回転する大質量星で long GRB になりうることがわかった。また円盤からの質量放出や角運動量の損失によって、外層を吹き飛ばし超新星になる可能性があることが示唆された。しかしながら、降着の仕方は親星の状態によって変わるために、この研究で用いられている親星以外でも同じような結果が得られるかは不明である。そこで本研究では彼らのモデルを参考に、親星の質量分布や、角運動量分布、円盤風の強さをパラメータとして変えて数値計算した。これによって GRB の継続時間に違いが出るのか、また超新星になりうるかを調べた。また計算結果より GRB の発生可能性のある親星の状態に制限がかけられるかも調べた。本発表では上記の研究について報告する。

1. S.E.Woosley ApJ 405 273 (1993)
2. Kumar et al. RAS, MNRAS 388 1729(2008)

## コン a19 短時間ガンマ線バーストの X 線領域の解析

加川 保昭 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts:GRB) とは、短時間に  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大の爆発現象である。そのうち、ガンマ線放射の継続時間が 2 秒以内の Short Gamma-Ray Bursts(SGRB) は、中性子連星の衝突・合体時に発生すると考えられており、重力波発生源の有力な候補天体の 1 つである。また SGRB には、直後に Extended Emission(E.E.) と呼ばれる  $\sim 100$  秒まで続く軟 X 線の放射を伴うものが観測されているが、詳しい発生機構は未解明である [1]。SGRB の物理現象を理解することは、将来の重力波天文学の創成にとって重要な課題であり、E.E. のような軟 X 線領域での観測はこの SGRB の理解につながると考えられる。

そこで、本研究では *Swift* 衛星に搭載された、0.2-10 keV の X 線に感度を持つ XRT 検出器で観測した比較的明るい 8 つの SGRB の観測データの統計的な解析を行った。時分割したスペクトルからは、黒体放射よりもべき乗則のモデルがよりよく合うことから、放射は非熱的なモデルが支持された。さらに、4 つの SGRB では光子指数の時間に対する急激な軟化が見られた。また、エネルギーフラックスのライトカーブの減光には、時間に対して急激に暗くなる指数関数的な成分と、時間に対してべき型のように暗くなる X 線残光の成分の 2 種類が見られ、指数関数的な減光が見られた SGRB には光子指数の急激な軟化も見られた。そこで、この急激な光子指数の軟化とフラックスの指数関数的な減光の相関を調べた。curvature effect と呼ばれる、一様に瞬間的に光を放射することを想定した標準モデル [2] と比較した場合、SGRB のエネルギーフラックスの減光はより早いと分かった。このことから、ジェットは幾何

学的に様ではなく、外側が暗い構造を持っていることが示唆された。

1. Nakamura, T., Kashiyama, K., Nakauchi, D., et al. 2014, ApJ, 796, 13
2. Kumar, P. & Panaitescu, A. 2000, ApJ, 541, L51

## コン b1 大質量原始中性子星からのニュートリノ駆動風における特異な元素合成過程

藤林 翔 (京都大学 天体核研究室 D2)

本研究では、膨張速度が非常に速いニュートリノ駆動風における元素合成過程を調べた。通常の原始中性子星からのニュートリノ駆動風における元素合成過程は、triple  $\alpha$  反応が遅いために  $3\alpha \leftrightarrow {}^{12}\text{C}$  の反応平衡が達成されず、Quasi-Statistical Equilibrium (QSE) 組成と呼ばれる核種の分布を経験する。QSE 組成とは、全陽子数と全中性子数、そして  $A \geq 12$  の重元素の数の 3 つを束縛条件として自由エネルギーを最小にする核種分布である [1]。一方で、通常の原始中性子星に比べてニュートリノの光度が 100 倍ほど大きい大質量原始中性子星からのニュートリノ駆動風は、膨張速度が非常に速い。そのために、triple  $\alpha$  反応に加えて更に  $2p + 2n \rightarrow \alpha$  の反応も十分に進まず、通常のニュートリノ駆動風の場合とは異なった組成を介して元素合成が進む。このような元素合成が進むことは過去の研究 [2] で示唆されていた。本研究は、これが実際の天体現象で起こりうること、更にその元素組成が QSE における 3 つに加えて、更に  $\alpha$  粒子の個数を 4 つめの束縛条件とした核種の平衡分布として理解できることを明らかにした。本講演では、その概要について発表する。

1. Meyer, B. S., Krishnan, T. D., & Clayton, D. D. 1998, ApJ, 498, 808
2. Meyer, B. S. 2002, Physical Review Letters, 89, 231101

## コン b2 平面電磁波における真空偏極

矢田部 彰宏 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D1)

本研究では、非線形量子電気力学の基礎的な問題である平面電磁波による電磁場における真空偏極とそれによる屈折率の変化を、平面電磁波の変化を踏まえた形で求める。

非線形量子電気力学は強い電磁場のもとで電子と光子の量子論的な反応を扱う分野で、マグネターの天体現象を扱うためには必須なものである。マグネターは非常に強い磁場をもつ天体で、それ自体の強い磁場をもとにして、放射を行っていると考えられている。また、マグネターは巨大フレアやバーストとよばれる突発的な爆発現象も観測されていて、その原因も強い磁場であると考えられているが、爆発現象に関する理論的な説明は与えられていない。本研究では、非線形量子電気力学的な効果に注目して、爆発現象を説明することを目標としている。

先行研究 [1] によると、爆発現象では電磁場の非一様性による量子効果が重要であると考えられている。しかし、非線形量子電気力学において電磁場の非一様性までを扱った先行研究はほとんどなく、例えば、非一様な電磁場である平面電磁波中の真空偏極に関しても、表式自体 [2] はあるが、定量的に評価できない。そこで、本研究では平面電磁波による真空偏極を定量的に評価し、屈折率を求めることを目的とする。

また、本研究の結果は、将来の高強度レーザーを使った実験において

検証することが可能であると考えられる。そこで本研究では、レーザー実験を想定して、平面電磁波の波長は可視光であるという条件のもとで計算を行い、どれほど検証されるかを求めることを目標とする。この場合には、変化のスケールが変化の量子論的な性質が考えるには大きく、平面電磁波の変化は最低次までを扱えばよい。本研究では、平面電磁波の変化の1次までを考慮に入れて真空偏極を求め、それから屈折率を求める。

1. J. S. Heyl and L. Hernquist *Astrophys. J.* 618 463 (2005)
2. S. Meuren, C. H. Keitel and A. Di Piazza *Phys. Rev. D* 88 013007 (2013)

### コン b3 超巨大星の重力崩壊時に形成されるディスクについて

打田 晴輝 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

我々の住む銀河を含め銀河のほぼ全てには  $10^6 M_\odot$  程度の超巨大ブラックホール (SMBH) が存在することが分かっている。また、 $z \sim 6$  程度の初期宇宙にも  $10^9 M_\odot$  程度の SMBH が存在することが分かっている。しかしこの SMBH 形成機構については未解明である。形成シナリオの一つとして考えられるのが  $10^5 M_\odot$  程度の超巨大星 (SMS) が宇宙初期に形成され、それが重力崩壊を起こし巨大 BH となり、質量降着して SMBH となった、というシナリオである。このシナリオが正しいのかを検証するには SMS の重力崩壊を研究する必要がある。SMS は一般に回転しているため重力崩壊時に一部がディスクとして巨大 BH 周りに残ることが予想される [1]。実際に過去のシミュレーション [2] によりディスクが残ることが確認されている。ディスクは形成後粘性加熱により非常に高温となり電磁波を放出し、SMS のまだ落ちていない外層部との相互作用で明るく輝き、観測できる可能性がある。なので SMS 重力崩壊時のディスクの形成と進化を研究する必要があるが、現在までの研究では重力崩壊そのものに焦点を当てておりディスクについての研究は進んでいない。私の研究では第一歩として SMS の重力崩壊時に形成されるディスクの形状について焦点を当て、核融合、ニュートリノ冷却といった効果も含めて数値相対論を用いてシミュレーションを行う。本発表ではこの研究の途中経過及び得られた結果について紹介する予定である。

1. M. Shibata and S. L. Shapiro, *Astrophys. J. Lett.* 577, 904 (2002)
2. P. J. Montero, H.-T. Janka, and E. Muller, *Astrophys. J.* 749, 37 (2012).

### コン b4 大質量ブラックホールと Extreme Mass Ratio Inspiral における潮汐破壊

岩佐 真生 (京都大学 天体核研究室 D1)

多くの銀河中心には大質量ブラックホール (以下 MBH) が存在することが観測的に示唆されている。現在の宇宙論によると銀河は衝突・合体により成長したと考えられている。従って銀河の衝突に際して MBH 連星が形成され、最終的に重力波放出により合体すると考えられている。

MBH 連星が形成されたときに、太陽質量程度の星が捕獲されると潮汐破壊が起こることによって紫外線/X線の放射が起こることが示唆されてい

る。これは重力波観測におけるカウンターパートになるとともにホスト銀河の特定ができるという点で重要である。

今回は潮汐破壊が起こるチャンネルを検討するために簡単な場合として、合体時に形成される可能性がある MBH- 太陽質量程度の星 (Extreme Mass Ratio Inspiral: EMRI)- MBH の階層的三体系を考えた [1]。階層的三体には古在機構と呼ばれる機構が存在する [2]。この機構は内連星の離心率と軌道傾斜角が時間的に振動する現象である。古在機構が働くと内連星の離心率が1程度まで大きくなるので近点距離が短くなる。その結果星は潮汐力により破壊されることが期待される。

しかし古在機構は一般相対論の効果により抑制される。相対論の効果は外天体が遠いほど内連星に優位に働くので、外天体はある程度内連星に近づかないと古在機構は働かない。

本研究では初期に相対論の効果により古在機構が抑制されており外天体が重力波放出により内連星へと近づいてくる状況を考え、ポストニュートン近似を用いて直接3体計算を行なった。その結果外天体が内連星へ近づくと、内連星の離心率が急激に増加するという現象が起こった。我々はその振る舞いを理解すべく、永年摂動論を用いたモデル化による解析を行ない理解に成功した。また MBH に捕獲されていた星は最終的に潮汐破壊されることがわかった。

1. Chen, X. et al 2009, *ApJ*, 697
2. Kozai, Y. 1962, *AJ*, 67, 591

### コン c1 重力波データ解析における Matched filter 解析

若松 剛司 (新潟大学宇宙物理学研究室 D1)

重力波はまだ、直接検出されていない。そして、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の初期の稼動が始まるようとしている。Matched filter 解析の手法は CBC (Compact Binary Coalescence) の重力波波形に対して使われる。波形の template を用意して、パラメータを逐一変えながらサーチを行う。また、もっともらしい signal と通常のノイズとを区別を行なう。つまり、トリガー探索の評価において Chi squared veto が用いられている。CBC の重力波波形は Chirp signal と呼ばれているが、この Chirp signal 探索のアルゴリズムにおいてデータのトリガー探索の評価とデータサイズの変更の二つのステップがある。

Template に使用される波形は、高次の post-Newtonian の波形が使われ周波数の計算は停状態近似により表すことができる。一般に、CB の合体付近では post-Newtonian の波形は数値相対論波形と一致しない場合がある。

これは、以下の参考文献のレビューである。

1. Jolien D. E. Creighton, Warren G. Anderson "Gravitational-Wave Physics and Astronomy"
2. Bruce Allen et al, *Phys. Rev. D* 85, 122006 (2012)

### コン c2 Quasi-normal modes of Pop III binary black holes can confirm or refute the Einstein theory in the strong gravity region

衣川 智弥 (京都大学 天体核研究室 D3)

Using our population synthesis (PS) code, we found that the typi-

cal chirp mass defined by  $(m_1 m_2)^{3/5} / (m_1 + m_2)^{1/5}$  of Pop III BH-BHs is  $\sim 30 M_\odot$  so that the chirp signal as well as quasi-normal mode (QNM) of the merged BH are interesting targets of KAGRA. The detection rate of the coalescing Pop III BH-BHs is  $262 \text{ events yr}^{-1} (\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})) \cdot \text{Err}_{\text{sys}}$  in our standard model where  $\text{SFR}_p$  and  $\text{Err}_{\text{sys}}$  are the peak value of the Pop III star formation rate and the systematic error with  $\text{Err}_{\text{sys}} = 1$  for our standard model, respectively. To evaluate the robustness of mass distribution and the range of  $\text{Err}_{\text{sys}}$ , we examine the dependence of the results on the unknown parameters and the distribution functions in the PS code. We found that the chirp mass has a peak at  $30 M_\odot$  in most of parameters and distribution functions as well as  $\text{Err}_{\text{sys}}$  ranges from 0.05577 to 2.289. Therefore, the detection rate of Pop III BH-BHs ranges 14.6 - 599.3  $\text{events yr}^{-1} (\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3}))$ . The minimum rate corresponds to the worst model which we think unlikely so that unless  $(\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_\odot \text{ yr}^{-1} \text{ Mpc}^{-3})) \ll 0.1$ , we expect the Pop III BH-BHs merger rate of at least 1 event per year by KAGRA. Since the frequency of the QNM of the merged BH of mass  $\sim 60 M_\odot$  is  $\sim 200 \text{ Hz}$  where KAGRA has good sensitivity, there is a chance to check if the Einstein theory is correct or not in the strong gravity region.

1. T. Kinugawa, K. Inayoshi, K. Hotokezaka, D. Nakauchi and T. Nakamura MNRAS 442 2963 (2014)
2. T. Kinugawa, A. Miyamoto, N. Kanda and T. Nakamura arXiv:1505.06962 (2015)

### コン c3 パルサーのタイミング観測による重力波検出

隈本 宗輝 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

重力波はアインシュタインの一般相対論から予言される。重力波を観測することによって一般相対論の検証のみならず、電磁波観測と相補的な宇宙観測手法を確立することが出来る。重力波の検出において有効な観測方法としてパルサーを用いた Pulsar Timing Array (PTA) がある。パルサーとは強力な磁場 (約  $10^{13} \text{ G}$ ) 持ち、回転している中性子星である。パルサーは磁極付近から電磁波放射を行っていると考えられており、その放射は相対論的ビーミング効果によって細く絞られる。パルサーの最も顕著な特徴はその正確な周期性にある。パルサーは一定の周期で回転しているために、観測される信号は一定の間隔でパルスを持つデータとして得られる。

しかし、実際の観測ではこのパルスの間隔は一定ではなくなる。このずれは重力波によるものだと考えられている。重力波がパルサーと地球の間を通過することによってパルサーと地球間の距離が変化し、ずれが生じるのである。

このため、パルスのずれを観測することは重力波の直接的な検出になる。PTA を行うにあたりパルサーからの通常の信号 (normal pulse) はノイズに埋もれて観測することが出来ない。パルスの周期の分かっているパルサーからの信号を周期ごとに分割し積み込むことでパルス部分は足し合わされて鋭くなり、ガウシアン分布のノイズ部分は打ち消し合っ て小さくなる。また、その信号は星間プラズマからの遅延を受ける。遅延の大きさは周波数によって変化するので図 1 のように周波数ごとに 1 周期内のパルスのある位置が変化してしまう。この遅延を解消する為に、時

間毎に観測したパルサーの信号をフーリエ変換して周波数毎の情報に直す。さらに、遅延を修正し、逆フーリエ変換して時間毎の信号に戻したうえで、パルスを積み込む必要がある。現在、我々は観測したデータを処理し、遅延の効果を除いた上で周期毎に足し上げを行うプログラムを作成し、実際の観測データからパルスの再現することを試みている。講演ではこの原理と結果を紹介する。さらに次世代大型望遠鏡 SKA の重力波観測にいかせるような高速処理を行うプログラムの開発を目指す。

### コン c4 MAXI と Swift/XRT によるブラックホール天体 GRS 1739-278 の解析

須藤 雅之 (芝浦工業大学大学院 M1)

GRS1739?278 は、1996 年 3 月 18 日に Granat 衛星の Sigma 装置によって発見された軟 X 線新星 (BH 連星) であり、1996 年の急激な増光の後すぐに減光した。私が卒業研究に着手した、2014 年 3 月に 2 回目の増光が観測された。当時天体選びで悩んでいたのでは何かの縁と思いい GRS 1739-278 をテーマに解析を行った。卒研では、X 線監視装置 MAXI のみのデータで解析を行っていた。解析の結果 GRS 1739-278 は Eddington で光っていないことが推定された。BH では BH に吸い込まれる光度が存在すると推測し、見かけの Bolometric 光度を調べたら BH に吸い取られる量が出せるのではないかと推測した。そこで、BH の底なし沼に落ち込むエネルギーをテーマに解析を行っている。MAXI では他の天体からの漏れ込みがあり正しく解析を行えないため、今年からは Swift 衛星搭載 XRT のデータを使って解析を進めている。

### コン c5 X 線衛星「すざく」を用いた LMC X-1 ブラックホールの降着円盤による X 線研究

八重幡 幸太郎 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

ブラックホールと恒星が連星を組んだ系では、伴星からのガスがブラックホールに降着する際、降着円盤を形成し X 線を放射する。その X 線スペクトルは、伴星からの降着量によって、high/soft state (HSS) と low/hard state (LHS) の二つの状態があることがよく知られている [e.g. 1]。HSS の軟 X 線スペクトルは、降着円盤からの標準的な多温度黒体放射でよく再現される。このスペクトルモデルを標準降着円盤モデルと呼び [2]、光学的に厚く、幾何学的に薄い円盤からの黒体放射の重ね合わせで説明される。このモデルでは、一般相対論が予想するシュバルツシルト半径の 3 倍より内側では円盤が構成されない。この半径を最内安定軌道 (ISCO) と呼び、多温度黒体放射のうち最も熱い温度から観測的に推測ができる。一方、LHS の X 線スペクトルは、熱的放射よりも非熱的なべき型関数の放射が卓越することが知られている。これは降着円盤周辺にある高エネルギー電子による熱的コンプトン散乱として解釈され、熱的コロナの存在を示唆するが、詳細は物理的に明らかでなかった。そこで、HSS と LHS の遷移状態である Very high state (VHS) に着目し、X 線スペクトルから降着円盤由来の熱的放射と熱的コンプトン成分と呼ばれるべき型放射を区別したのが、Koyama et al. (2015) である。本講演ではこの仕事をレビューする。Koyama et al. (2015) では、X 線観測衛星「すざく」を用いて大マゼラン雲にあるブラックホール天体 LMC X-1 の X 線分光を行い、VHS において一般相対論で予想される限界まで降着円盤が伸展している様子が捉えられた。円盤が内側に伸展するにつれてコンプトン散乱の種光子が増えることで、熱的コンプトンを引き起こす熱的コロナが冷却される様子が観測的に初めて捉え

られた。

1. Gierlinski et al., 1999, MNRAS, 309, 496G
2. Shakura and Sunyaev, 1973, A and A, 24, 337
3. Koyama, S. et al., 2015, PASJ in press (arXiv:1503.05808)

## コン c6 Swift/BAT と Suzaku/WAM を用いたサブミリ/ミリ波残光検出 GRB の特性調査

榎本 淳一 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

ガンマ線バースト (GRB) は、宇宙のある一点から膨大な量のガンマ線が突発的に放出される宇宙最大規模の爆発現象である。放射時間は数ミリ秒から数百秒程度で、その放射エネルギーは  $10^{51}$ – $10^{53}$  erg にも達する。GRB には、ガンマ線放射のあとに数時間から数日にかけてゆっくりと減光していく X 線や電波の放射が付随することがあり、これを残光と呼んでいる。なかでも他の波長に比べ観測例の少ないサブミリ波/ミリ波による残光の観測は、GRB の未解決問題に取り組む上で重要な手段である。Sub-Millimeter Array (SMA) は素早いフォローアップによって reverse shock の観測に成功し、X 線および可視光残光の時間進化が synchrotron self-inverse compton による放射で説明できることを明らかにした (Urata et al. 2014)。また偏光を観測することで、残光偏光に影響を及ぼす低温電子も含めた GRB 総放出エネルギーを再評価でき、親星の質量に制限を付けることも可能となる (Toma et al. 2008)。サブミリ波によるさらなる詳細なフォローアップ観測を行うためには、現在の望遠鏡における検出可能条件の特定が必要である。例えば、サブミリ波で 1-2% の偏光を捉えるには、ALMA でも数ミリ Jy 以上の明るいイベントが要求される。ALMA はすでに偏光観測も可能であり、電波残光を伴う GRB の特徴を分析しフォローアップ観測の方針を立てるのは急務である。

そこで本研究では、サブミリ波観測の方針を定める基盤として、サブミリ波/ミリ波残光が付随する GRB の特性を系統的に調べた。サブミリ波/ミリ波でのフォローアップ観測がなされている GRB うち、22 個をサンプルとして選び出し解析を行った。解析は Swift/BAT と Suzaku/WAM の観測データを用いて広帯域スペクトルを求め、プロンプト放射の特性と多波長における残光の特性、プロンプト放射のガンマ線 Fluence と X 線および可視光残光の明るさの関係、GRB 観測において経験的によく知られている Amati 相関  $E_{\text{peak}} - E_{\text{iso}}$  や、 $E_{\text{peak}} - E_{\gamma}$  相関上での振る舞いを調べた。本発表では、これらの詳細な解析方法と結果について報告する。

1. Urata et al. 2014, ApJ, 706, L183
2. Toma et al. 2008, ApJ, 673, L123

## コン c7 X 線監視装置「MAXI」の観測による Aql X-1 のプロペラ効果について

米田 知司 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M1)

MAXI は 2009 年に観測を開始して以来、多くの X 線天体を観測してきた。X 線強度が強い天体の多くは、中性子星やブラックホールが通常の星と連星系をなしているものである。1 型の X 線バーストは、通常の星と中性子星の連星系で中性子星表面に降り積もったガスが爆発的に核融

合を起こすものである。MAXI は、磁場の弱い中性子星を主星として持つ低質量 X 線連星系 Aql X-1 において、アウトバーストを数回検出してきた。アウトバーストのタイムスケールは、数十秒である。アウトバーストが終わる時の光度の急減はプロペラ効果によるものが考えられている。プロペラ効果は、中性子星の重力と遠心力がつり合う半径  $R_c$  と、降着円盤から落下するガス圧と磁気圧とがつり合う半径  $R_m$  の大小で大きくどうか決まる。 $R_c > R_m$  (降着するガス圧が大きい) のとき、ガスが中性子星の表面まで到達し、X 線を放射する。 $R_c < R_m$  (降着するガス圧が小さい) のとき、高速回転する中性子星によってガスが飛ばされ (= プロペラ効果) X 線放射は弱くなる。X 線天文衛星「RXTE」の XTE J1701-462 に対する観測によって得られた同様の光度の急減と比較して、中性子星表面の磁場の強度を観測から見積もった結果、Aql X-1 の中性子星表面の磁場は  $10^9$  G のオーダーと推定した。

1. K. Asai et al., Astrophys. J., 773, 1 (2013)

## コン c8 クエーサー紫外-可視域多バンド光度曲線から得られる“不均一円盤モデル”への制限

小久保 充 (東京大学 天文学教育研究センター D2)

クエーサーの紫外-可視域放射が光度変動を示すことはよく知られているが、変動を引き起こす物理機構の詳細は明らかになっていない。Dexter & Agol (2011 [1]) は、近年の磁気流体シミュレーションの結果を元に、標準降着円盤 ([2]) の表面温度分布に対して局所的な温度ゆらぎが加わることでクエーサー光度変動を引き起こされる、とするモデル (Inhomogeneous Accretion Disk Model; 以下 IAD モデル) を提唱した。IAD モデルはクエーサー光度変動の振幅を定量的に説明できるだけでなく、クエーサーマイクロレンズ観測によって得られている降着円盤サイズの制限や、クエーサーの FUV-可視域スペクトルの形状など、これまで標準円盤モデルでは説明できないとされてきた観測結果を説明可能であるため、クエーサー降着円盤を説明するモデルとして有力視されている。本研究では、クエーサー光度変動モデルとしての IAD モデルの妥当性を、紫外-可視域光度変動の 2 バンド相関という観点から検討した。光度変動の 2 バンド間の相関の強さを “magnitude-magnitude plot 上での線形相関からの分散  $\sigma_{\text{int}}$ ” として定量化し、SDSS Stripe 82 領域に含まれる約 9000 個のクエーサーの多バンド光度曲線と、IAD モデルによるモデル光度曲線に対して  $\sigma_{\text{int}}$  の値を導出することで、観測とモデルの比較を行った。その結果、Dexter & Agol の IAD モデルでは、クエーサーで観測される強い 2 バンド相関を完全には説明できないことがわかった。この結果は、クエーサー紫外-可視域光度変動の主要因は IAD モデルで仮定されているような降着円盤上の局所的な温度ゆらぎではなく、より大域的な降着円盤状態の変化に起因していることを示唆している (Kokubo 2015 [3])。

1. Dexter & Agol 2011, ApJ, 727, L24
2. Shakura & Sunyaev 1973, A&A, 24, 337
3. Kokubo 2015, MNRAS, 449, 94

## コン c9 準平衡ネットワークによるシリコン燃焼反応

柴田 まさき (甲南大学 M1)

鉄やその周辺の原子核は大質量星のコア崩壊直前や超新星爆発の間、ま

たは熱核反応型超新星で作られる。質量数が 28 から 64 という多様な原子核を作るのは完全、不完全シリコン燃焼である。シリコン燃焼は多くの元素が関係するために、正確なモデル構築には大きな計算コストがかかる。しかし、これまでのケイ素燃焼の研究によって、その元素組成進化は相互平衡にある元素によって支配されているという事が明らかにされた。そこで私たちは新しい混合平衡ネットワークスキームを発表する。このスキームはシリコン燃焼の準平衡状態を活用し独立変数の数を減らしている。これによって元素の質量比や非レプトン化、またエネルギー生成の正確な予測にかかる計算コストを、従来の原子核反応ネットワークに比べて大いに減少させる事ができる。シリコン燃焼の間、この準平衡ネットワークは、1/3 以下の元素質量比の追跡で、精度を失う事なく、従来の完全なネットワークよりも 1 桁程度速い計算を実現する。この計算コスト、必要な元素種の削減が可能な準平衡ネットワークは特に、多次元の流体計算に適している。

1. Hix, W.R., et al.2007,ApJ,667,476

## コン c10 音響メカニズムによる重力崩壊型超新星爆発の系統的研究

原田 了 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

重力崩壊型超新星爆発とは、大質量星 (太陽質量の 8 倍以上) がその最期に爆発を起こす現象である。大質量星は進化の最終段階で中心に鉄のコアを形成する。この鉄コアはやがて鉄の光分解反応によって中心部の圧力が低下し、重力崩壊する。このときに解放される重力エネルギーによって爆発が起こると考えられている。

重力崩壊したコアは中心が原子核程度の密度になると核力により跳ね返され、衝撃波を形成する。この衝撃波が星の表面まで伝搬することで超新星爆発が起こると考えられるが、実際にはエネルギーを失って衝撃波は停滞する。衝撃波を復活させるメカニズムは約 50 年間研究されているが、未だにはっきりとは解明されていない。現在の最有力仮説は、中心に形成される原始中性子星からニュートリノが放射され、それが衝撃波下流側の物質を加熱することで復活するというものである。しかし、この仮説もまだ確かめられていない。

一方で、音響メカニズムという仮説も提唱されている。原始中性子星は周囲の流体から撃力を受けて振動し、音波を放射する。音響メカニズムとは、この音波が二次衝撃波を形成して運動エネルギーを散逸し、衝撃波にエネルギーを与えるというものである。これは発見したグループを除きシミュレーションで再現されておらず、音波が衝撃波を復活させられるのか、そもそも原始中性子星から音波が放射されるのか、詳しくわかってはいない。

そこで、本講演では原始中性子星が振動することを仮定し、それが衝撃波復活に与える影響を調べた。衝撃波の伝搬が止まったところを初期条件とし、中心から原始中性子星振動に由来する音波を境界条件として与え、ニュートリノ加熱も近似的に扱いながら流体シミュレーションを行った。特に、本講演では原始中性子星の振動強度を様々に変えて衝撃波が復活する条件を系統的に調べた結果について報告する。

1. Janka, H.-T., Annu. Rev. Nucl. Part. S., 62, 407 (2012)
2. Burrows, A., Livne, E., Dessart, L., Ott, C.-D. and Murphy, J., Astrophys. J., 640, 878 (2006)
3. Burrows, A., Livne, E., Dessart, L., Ott, C.-D. and Murphy, J., Astrophys. J., 655, 416 (2007)

## コン c11 超新星爆発における放射性元素 $^{26}\text{Al}$ , $^{60}\text{Fe}$ の元素合成

堤 陵 (甲南大学 M2)

100 万年程度の半減期を持つ短寿命放射性同位体核種である  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  は INTEGRAL 衛星などの 線観測によって放射性崩壊時の 線ラインが捉えられ、 $^{26}\text{Al}$  は天の川銀河の中心部に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを明確に示している。これらの核種の生成源は共に大質量星であると考えられており、 $^{26}\text{Al}$  では重力崩壊型超新星、Wolf-Rayet 星、AGB 星などが提案されており、 $^{60}\text{Fe}$  は超新星爆発と考えられている。 $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  の銀河内での生成場所は同じであると考えられることから観測より  $^{60}\text{Fe}/^{26}\text{Al}$  の 線フラックス比が求められており、これら核種の元素合成に重要な制限が与えられている。しかしながら、現在の元素合成の理論予測ではこのフラックス比は高くなる傾向があり、再現するような理論は少ない。私は太陽金属量をもつ  $M_Z/AMS = 25M_\odot$  の星についてジェット誘導超新星爆発モデルを用いた流体計算と元素合成計算を行い、超新星爆発時の  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  の生成量を計算し、このフラックス比を再現するような超新星爆発モデルを試みる。ジェット誘導超新星爆発モデルのパラメーターであるエネルギー供給率とジェットの噴き出す角度をそれぞれ変えてこれらの核種の生成量の変化について考察する。

1. Limongi, M. & Chieffi, A. 2006, ApJ, 647, 483

# 銀河・銀河団分科会

観測と理論から解き明かす銀河・銀河団の謎

|      |   |
|------|---|
| 日時   | <p>7月27日 16:30 - 17:30, 20:00 - 21:00</p> <p>7月28日 9:00 - 10:00, 14:45 - 15:45, 17:15 - 18:15 (招待講演：小野寺 仁人 氏), 18:30 - 19:30</p> <p>7月29日 9:00 - 10:00 (招待講演：行方 大輔 氏) 13:30 - 15:45</p>   |
| 招待講師 | <p>小野寺 仁人 氏 (チューリッヒ工科大学)「恒星種族に刻印された化石情報から紐解く楕円銀河の形成史」</p> <p>行方 大輔 氏 (筑波大学)「活動銀河核トラス研究の現状」</p>  |
| 座長   | <p>山口裕貴 (東京大学 M2) 日下部晴香 (東京大学 M2) 白方光 (北海道大学 M2) 満田和真 (東京大学 D1) 高橋晴香 (東京大学 M2) 仁井田真奈 (愛媛大学 M2) 播金優一 (東京大学 M2)</p>   |
| 概要   | <p>新たな観測装置、大規模サーベイデータ、高性能な計算機により、銀河・銀河団の研究は目覚ましい進展が見られる。ALMA 望遠鏡によって高感度・高分解能のミリ波・サブミリ波のサイエンスが切り開かれ、すばる望遠鏡/HSC の運用開始により稀な天体の統計的解析や効率の良いサーベイが可能となった。TMT や ASTRO-H 等の次世代望遠鏡の運用を控え、銀河・銀河団の理解は今後も急激に進むだろう。</p> <p>このように多種多様な観測によって得られるデータとの比較を行うことができる理論的研究基盤も整いつつある。個々の銀河や銀河内の一部の領域については数値流体シミュレーションを用いて観測では分解が難しいコンパクトスケールの物理や、系の時間発展を予測できる。また宇宙論的流体シミュレーションや準解析的モデルの発展により特定の銀河種族に対する統計的研究も行えるようになってきた。</p> <p>銀河・銀河団の理解が日々深まっていくこの恵まれた時代において、銀河・銀河団全般に関して観測と理論の垣根を越えて知識の共有、活発な議論を行うことは、我々若手にとって大変有意義である。そのため、本分科会では、銀河系、近傍銀河、遠方銀河、AGN 及び銀河団全般を扱う。また、招待講演では、国内外で活躍される理論・観測の研究者の方を1名ずつ招待し、最先端の研究を紹介して頂くので、ぜひ聞きにきて頂きたい。本分科会が参加者 同士の交流の場となり、今後の研究活動を広げる契機となることを願う。</p> <p>注) 降着円盤からのアウトフローは銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) AGN ホスト銀河と AGN と銀河の共進化については銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) AGN のブラックホールとしての挙動やジェットに注目する場合はコンパクトオブジェクト分科会で扱います。</p> <p>注) 球状星団を1つの系としてみる場合などは銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 系外銀河内の星形成あるいは銀河系内の kpc スケールに関連する星形成活動は銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) Gpc 以上の大スケールの構造形成は銀河・銀河団分科会では扱いません。Mpc 以下のスケールの構造形成は、その構造をトレースするものが銀河である場合 (例えば銀河団、銀河クラスタリングなど) は銀河・銀河団分科会で扱います。</p> <p>注) 銀河による宇宙再電離への寄与の議論は銀河・銀河団分科会で扱います。</p> |

小野寺 仁人 氏 (チューリッヒ工科大学)

7月28日 17:15 - 18:15 B 会場

## 「恒星種族に刻印された化石情報から紐解く楕円銀河の形成史」

近傍の宇宙では、恒星の多くは楕円銀河のような星形成活動がほとんど見られない早期型銀河に存在することが知られています。これらの銀河では、いつ、どのような時間スケールで星形成が行われてきたのでしょうか。また、星形成を止めるメカニズムや時間スケールは一体どのようなものだったのでしょうか。銀河の星形成史に関する情報は、銀河を構成する恒星種族に化石のように刻まれています。近傍楕円銀河については、過去20-30年にわたり、銀河を構成する恒星種族の年齢や金属量、そして元素組成比が詳しく調べられてきました。一方で、近年の観測からは、星形成が既に止まった銀河は少なくとも赤方偏移3程度では既に存在していることが知られています。楕円銀河進化における大きな問題のひとつとして、たとえば、これらの銀河は、同じような恒星質量を含んでいても、近傍の楕円銀河に比べて3-5倍程度その有効半径が小さいことが知られています。この進化を説明するメカニズムはよくわかっていません。この謎を解く鍵は、恒星種族に刻まれていると考えられていることから、高赤方偏移での恒星種族パラメータを決定し、その進化を調べることが、活発なトピックになっています。これには、静止系可視光にある吸収線を用いることが必要になります。実際、近年の大型望遠鏡での近赤外線分光器の進歩や、観測結果を解釈する恒星種族合成モデル、また解析手法の発展により、赤方偏移2程度、つまり大質量楕円銀河の主要な形成期での化石情報の発掘作業が可能になってきました。本講演では、このような研究の歴史や現状、そして、遠方で観測が重要な鍵となる楕円銀河進化の問題などについて概観し、今後の展望などについて議論したいと思います。

1. Onodera et al. (2015, ApJ, in press; arXiv:1411.5023)
2. Onodera et al. (2012, ApJ, 755, 26)
3. Thomas et al. (2005, ApJ, 621, 673)

行方 大輔 氏 (筑波大学)

7月29日 9:00 - 10:00 B 会場

## 「活動銀河核トラス研究の現状」

活動銀河核 (AGN) は宇宙の中で最も明るい天体 ( $L_{\text{bol}} = 10^{42} - 10^{47} [\text{erg s}^{-1}]$ ) の一つであり、1960年代の発見以降、AGNに関する理論的・観測的研究が非常に多くなされてきた。現在では年間1000本以上の論文が出版される巨大な研究分野となるに至っている (Netzer 2013)。現在広く受け入れられているAGNの統一モデル (Antonucci 1993; Urry & Padovani 1995) は、AGNを巨大ブラックホール+降着円盤+ダストトラスから成る系と仮定することで多くの観測事実を説明することに成功している。しかしながら、AGNの活動性の詳細 (活動性の発現機構・強さ・持続期間等) については、十分な理解が得られているとは言い難く、これが例えば銀河形成とAGNの関連性を議論するのを困難にさせている。AGNの活動性の詳細を理解するためには、AGN降着円盤と降着円盤へのガス供給過程の理解が不可欠である。後者に関しては、ダストトラスがガス供給源となっていると推察されるが、AGNが強烈に放射している状態でどのようにガス供給が起こるかは自明ではない。本講演では、ダストトラスの理論的研究と関係する観測についてできるだけ幅広く紹介するとともに、我々が取り組んでいるダストトラス内縁部の研究について紹介したい。

## 銀河 a1 「すざく」衛星による Abell 2744 銀河団周辺のミッシングバリオン探査

服部 詩穂 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙を構成する成分のうち、その 4% はバリオン (通常物質) であることがわかっているが、近傍宇宙では半分程度しか検出されていない。宇宙の構造形成シミュレーションから、これらの未検出のバリオンはガスの温度が  $10^6 - 10^7$  K の中高温銀河間物質 (WHIM) として銀河団同士をつなぐフィラメントに沿って分布していると予測されている。WHIM の検出は観測と理論それぞれからのバリオン量の不一致を埋めてくれるだけでなく、その密度、温度分布がわかれば、宇宙論の理解を観測から進めていくことができる。これらは極紫外線や X 線のエネルギー範囲でイオン化された元素の輝線や吸収線による検出が期待されており、中でも酸素が最も検出可能な元素であると思われる。しかし、この領域のガス密度は非常に小さく、現在の観測機器の感度では検出が難しい。

本研究では宇宙の大規模構造のフィラメントへのつながりが発見されている Abell 2744 銀河団の北東領域周辺に注目し、X 線天文衛星「すざく」による解析を行った。フィラメント領域のスペクトルに対して、WHIM 成分を考慮したモデルフィットを行い赤方偏移した OVIII 輝線のフラックスの  $2\sigma$  上限値を求めた。また Gaussian 輝線モデルを加えたときの F 検定や輝線エネルギーの値から 0.5 keV 付近の放射はこの銀河団周辺からのものと考えて矛盾しないことがわかった。本講演ではこの結果と今後の展望について議論する。

1. Cen, R, and Ostriker, J.P. 1999, Ap.J., 514:1-6

## 銀河 a2 Abell 2255 銀河団の電波レリク領域における衝突現象の研究

水野 真梨子 (奈良女子大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河団は宇宙最大の天体であり、衝突合体を繰り返すことでより大きな構造へと成長する。衝突の運動エネルギーは衝撃波を介してガスの加熱や粒子加速に使われる。そのため、X 線や電波の観測から衝突の特性を調べることで、銀河団の形成過程の解明につながる重要な手がかりが得られると期待する。衝撃波をトレースするものとして、X 線を出す銀河団ガスの温度分布や「電波レリク」と呼ばれる円弧状の電波放射がある。X 線観測から衝撃波前後のガス温度を測定し、ランキン - ユゴニオの関係式を適用すると衝突のマッハ数  $M_X$  を見積もることができる。一方、電波レリクが衝撃波加速によって形成されたと考えると、電波スペクトルと統計加速理論から、X 線とは独立にマッハ数  $M_R$  を見積もることができる。以上の二通りの方法から得られるマッハ数を比較することで、衝突過程や電波レリクの起源を考察することが可能である。

本研究では Abell 2255 銀河団 (赤方偏移 0.08) の北東に観られる電波レリクに注目した。この電波レリクは差し渡し約 1.5 Mpc と大きいため、激しい衝突合体の痕跡であると予想される。そこで、すざく衛星で取得した X 線スペクトルを解析し、この領域のガスの温度分布を調べた。その結果、電波レリク領域とその外側の温度はそれぞれ  $4.6 \pm 0.3$  keV,  $4.3 \pm 0.5$  keV と求まり、強い衝撃波で期待されるような不連続的な温度変化は見られなかった。この領域の温度を用いて衝突のマッハ数を求めると  $M_X \sim 1.1$  である。このとき、領域の選び方による系統誤差が約 50% ある。これを電波観測による値  $M_R \sim 2.8$  と比較すると、両者は誤差を考慮しても一致しないことがわかった。 $M_X < M_R$  となる原因として、X 線望遠鏡の空間分解能の影響やプロジェクション

効果、あるいは仮定した理論が単純すぎるなどの可能性が考えられる。本講演では、すざく衛星による観測結果を報告し、マッハ数不一致の問題について議論する。

1. H. Akamatsu, H. Kawahara, 2013, PASJ, 65, 16.
2. R. F. Pizzo, A. G. de Bruyn, 2009, A&A, 507, 639.

## 銀河 a3 銀河団の重力レンズ質量密度プロファイルの普遍性の検出

新倉 広子 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 M2)

銀河団は宇宙最大の自己重力天体である。その質量密度プロファイルは宇宙構造形成の情報を含むと考えられていて、様々な性質が示唆されている。その中でも重要な性質として、質量の大小に関わらず、適切にスケール変換するとパラメータに依存しない、普遍的な関数形 (NFW モデル) でよく表される事が挙げられる<sup>[1]</sup>。これは CDM モデルに基づいた N 体シミュレーションで再現されるハローから示唆される性質で、観測データを用いた検証が試みられている<sup>[2]</sup>。

観測により銀河団の暗黒物質の空間分布を調べるには、弱い重力レンズ効果のデータが強力である。しかし重力レンズ効果から復元した銀河団の質量プロファイルはノイズが大きい。そのため従来の手法では、複数の銀河団の情報をスタックした平均的な質量分布を調べるに留まり、質量の大小による普遍性を検証することが出来なかった。

そこで本研究では、重力レンズ効果を用いて復元した銀河団の質量プロファイルに対して NFW に基づいたスケール変換を試行する事で、「銀河団の質量プロファイルの普遍性」を調べる新たな手法を考えた。手法の検証にはすばる望遠鏡の Suprime-Cam の重力レンズデータと X 線の質量データを組み合わせて、X 線光度で最も明るい、最大質量級の 50 個の銀河団を調べた。検証の結果、この 50 銀河団については、 $4-6\sigma$  レベルで普遍的な NFW プロファイルが存在することが分かった。つまり、銀河団の質量の大小に関わらず、暗黒物質の分布の特徴が相似であることを観測によって初めて確認できた。

本講演では上述した銀河団の質量プロファイルの普遍性の詳細な検証の結果を報告する。

1. Navarro, J. F., Frenk, C. S., & White, S. D. M. 1996, ApJ, 462, 563 - 1997, ApJ, 490, 493
2. Okabe, N., Smith, G. P., Umetsu, K., Takada, M., & Futamase, T. 2013, ApJ, 769, L35
3. Niikura, H., Takada, M., Okabe, N., Martino, R., & Takahashi, R., 2015, ArXiv e-prints:1504.01413

## 銀河 a4 連星中性子星合体による銀河の r プロセス元素分布

平居 悠 (国立天文台三鷹 D1)

鉄より重い核種の多くは r プロセスにより合成される。r プロセス元素の起源天体は未だ明らかになっていない。r プロセス元素の起源天体候補は重力崩壊型超新星爆発と連星中性子星合体である。最近の元素合成計算は、重力崩壊型超新星爆発では、質量数が 110 以上の r プロセス元素を合成するのが難しいことを指摘した<sup>[1]</sup>。一方、連星中性子星合体は、元素合成計算から、r プロセスの有力な起源天体候補である

ことが示唆されている。しかし、これまでの銀河の力学進化を考慮に入れない化学進化計算からは、連星中性子星合体の低い頻度（銀河系で  $10^{-6}$ – $10^{-3}$  yr $^{-1}$ ）と長い合体時間（ $\geq 1$  億年）のため、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$  にみられる  $r$  プロセス元素組成比（例えば  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$ ）の分散を説明できないという問題が指摘されている [2]。こうした問題は、階層的構造形成モデルに基づき、銀河系ハローがより小さい矮小銀河の集積によって形成されたとするならば、解決できる可能性がある [3]。そこで本研究では、 $N$  体/Smoothed Particle Hydrodynamics コード ASURA を用いて、矮小銀河の化学力学進化を計算した。 $r$  プロセス元素の起源天体としては、連星中性子星合体を仮定した。その結果、合体時間が 5 億年より短く、銀河系での頻度が  $\sim 10^{-4}$  yr $^{-1}$  の連星中性子星合体で、 $[\text{Eu}/\text{Fe}]$  vs.  $[\text{Fe}/\text{H}]$  の観測値を再現できた。また、矮小銀河の力学的性質、金属量分布、質量-金属量関係の計算値も観測値と矛盾のない結果が得られた。本研究により、 $[\text{Fe}/\text{H}] < -2.5$  における  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$  の分散を再現するには、星形成領域（ $\sim 10$ – $100$  pc）における金属の混合が重要な役割を果たしていることが示唆された。さらに、連星中性子星合体で  $[\text{Eu}/\text{Fe}]$  の観測値を再現するには、銀河ハロー形成初期（ $\lesssim 1$  億年）では、個々のサブハローの星形成率が  $10^{-3} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$  程度である必要があることも示唆された。本研究は、銀河進化の観点から、連星中性子星合体が  $r$  プロセス元素の起源天体であることを強く示唆する。

1. Wanajo, S. Janka, H.-T., & Müller, B. 2011, ApJL, 726, L15
2. Argast, D., Samland, M., Thielemann, F.-K., & Qian, Y.-Z. 2004, A&A, 416, 997
3. Ishimaru, Y, Wanajo, S., & Prantzos, N. 2015, ApJL, 804, L35

## 銀河 a5 Abell262 銀河団外縁部の鉄分布の解析

菅野 祐 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河団は重力で束縛された宇宙で最大の天体である。銀河団中のバリオンのほとんどは銀河団ガス (ICM) として存在し、重力によって数千万度まで加熱されているため X 線で観測することができる。X 線で観測すると、高階電離した鉄原子の特性 X 線から鉄のアバundanceを求めることができる。また、鉄質量を銀河の光度と比較することでどのように ICM へ鉄が供給されてきたのかを調べることができる。今回、これまで中心付近しか観測されていなかった Abell 262 銀河団をピリアル半径程度まで観測を行った。銀河団外縁部は ICM の密度は小さいが銀河団全体に占める割合が大きいため、銀河団全体の鉄質量を調べるためには銀河団外縁部まで観測することが重要となるのである。

本研究ではすざく衛星を用いて Abell 262 銀河団をフィラメント方向とボイド方向の 2 方向について観測し、ICM に含まれる鉄の分布を求めた。Abell 262 銀河団は地球近傍の小規模な銀河団であるが、小規模な銀河団は研究例が数例しかないため銀河団ガスの状態が系の大きさによってどう異なるのかを調べるために重要な天体である。解析の結果、鉄質量銀河光度比は  $3 \times 10^{-3} M_{\odot}/L_{k\odot}$  程度、ガス質量銀河光度比は  $8 M_{\odot}/L_{k\odot}$  程度となった。この数値は巨大な銀河団と比べて小さく中規模な銀河団と同程度である。小さな銀河団のガスや鉄が少ないのは、巨大な銀河団に比べて重力が小さいため銀河団形成時に周囲のガスを集められなかったためと考えられる。また、Abell262 は中規模な銀河団の中でもガスや鉄が多く存在する AWM7 と似たガス質量・鉄質量・鉄質量銀河光度比を持つことがわかった。このことから、Abell262 と AWM7 は同じような成長をしてきたと考えられる。

1. Sato et al.2008

## 銀河 a6 Abell2163 銀河団におけるエントロピー分布の探求

伊東 雅史 (東京理科大学 松下研究室 M1)

冷たい暗黒物質 (CDM) モデルによる階層的構造形成理論では、現在も銀河団の重力場にひかれて質量降着流が大規模構造のフィラメントに沿って起きていると考えられている。X 線観測衛星「すざく」衛星では銀河団の外縁部を観測することが出来、このような銀河団の形成現場を明らかにすることができる。重力による加熱のみを考慮した数値シミュレーションでは、銀河団の加熱指標となるエントロピーは銀河団中心からの距離の 1.1 乗に比例する。しかし、「すざく」の観測結果によるとエントロピー分布は銀河団外縁部で上昇せず一定になると確認された。一方、電波観測による SZ 効果では、視線方向に沿って積分した熱的なガス圧力に比例するため銀河団外縁部のようなガスの比較的低密度な領域の調査に有用である。SZ 効果とは、CMB が銀河団の電子により逆コンプトン散乱し揺らぐ現象である。そのため、Eckert et al. (2013) は電波観測衛星「Planck」による圧力と X 線観測衛星「ROSAT」によるガス密度からエントロピーを求めた。その結果、「すざく」の結果とは異なり銀河団外縁部でも上昇し、衝撃波加熱による予測に従うと主張した。

今回我々は、Abell2163 銀河団 ( $kT = 13.40$  keV,  $z = 0.203$ ) について「すざく」衛星を用いて 6 ケ所の領域、計 330 ks 以上の観測を行った。「すざく」はノイズが他の衛星に比べて低いため X 線強度が弱い銀河団外縁部まで銀河団ガスの温度と数密度を求めることができる。X 線放射は視線方向に沿って積分したガス密度の二乗に比例するため、高温ガスの比較的高密度な領域で有用となる。そのため、電波観測の結果と比較することにより「すざく」衛星の妥当性を調べることができる。解析の結果、ガス温度は銀河団外縁部において  $\sim 3$  keV まで低下していた。また電波観測と「すざく」衛星のガス圧力を比較するとおおよそ一致することがわかった。講演では銀河団ガスの温度や密度分布並びにエントロピーについて報告を行う。

1. Eckert, D., Molendi, S., Vazza, F., et al. 2013, A&A, 551, A22
2. Voit, G. M., Kay, S. T., & Bryan, G. L. 2005, MNRAS, 364, 909
3. Planck Collaboration 2011, A&A, 536, A11

## 銀河 a7 X 線天文衛星 XMM-Newton を用いた近接銀河団 RXC J0751.3+1730, SDSS 117.7+17.7+0.19 の観測

小林 洋明 (名古屋大学 Ux 研 M1)

銀河団は宇宙の階層構造の中で、重力的に緩和した最大のシステムである。そのため、衝突銀河団システムを観測し、その衝突現象を理解することは宇宙の力学進化史の解明にもつながる。また、銀河団中のバリオンの多くは X 線を放出する高温ガスであるため、X 線を用いた観測は銀河団を検出・詳細解析をする上で有用な方法と考えられる。そこで、我々は新たな衝突銀河団システムを探すため、X 線 (ROSAT) により同定された銀河団 2 個、可視光 (SDSS) により同定された銀河団 1 個の計 3 個が近接している領域を選定した。その領域を広視野 ( $30' \times 30'$ ) かつ高角度分解能 ( $\sim 15''$ ) の X 線天文衛星 XMM-Newton を用いて

ポインティング観測を行い、新たな衝突銀河団を見つけようと試みた。

その結果、視野中に 4 ヶ所 X 線で明るい領域を検出し、そのうち 3 ヶ所はカタログから選出した銀河団の存在する領域であり、残りの 1 ヶ所の天体に関してはこれまでのサーベイ観測では X 線源は検出されておらず、本観測にて初めて広がった天体であることが示された。解析の結果、これまで X 線で銀河団と同定されていた天体のうち 1 つが QSO であることを初めて明らかにし、X 線で同定されていたもうひとつの銀河団に関しては初めて温度等の物理量を定量的に求めた。さらに、可視光で銀河団と同定されていた天体が存在する領域に関してはこれまでの X 線観測では広がった天体は検出されておらず、本研究で初めて付随する高温ガスの存在を明らかにし定量的に物理量を求めた。さらに、この銀河団は力学的に不安定な銀河団であることが分かったため本講演では、周辺天体との相互作用を議論していくと共に残りの 3 天体の解析結果も報告する。

## 銀河 a8 宇宙磁場解析における QU-fitting

中川 晶太 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

宇宙空間には、天体を取り巻く磁場が存在している。天体のスケールが様々であるように、磁場のスケールも様々である。このような磁場は宇宙磁場と呼ばれる。宇宙磁場は様々な天体現象に密接に関わっており、その構造を探ることは非常に重要である。磁場の構造を明らかにする上では、ファラデー回転と呼ばれる現象が鍵になる。直線偏波の光が磁化プラズマ中を伝搬すると、その偏光面が回転する。回転の度合いはその光の波長の 2 乗に比例し、比例定数は電子密度と磁場の積を光の道のりで積分したものの (RM) になる。観測で得られた光の偏光角と波長の関係をプロット、線形近似することで、その傾きとして RM が得られる。ただし、RM で解決できるのは、光源が一つのシンプルな状況のときだけで、一般的な状況で磁場の情報を取り出すのは容易ではない。観測対象が複雑になると、積分量で表される RM では磁場の構造を推定できないからである。そこで考え出されたのが RM-Synthesis である。この手法では、磁場の積分量 ( $\phi$ ) とグラフの傾き (RM) を切り離して考える。これにより、 $\phi$  に対する光のスペクトルが定義できる。これをファラデー分散関数 (FDF) とよび、複素偏光強度の逆フーリエ変換から解析的には求めることができる。しかし、実際の観測帯域に制限があるので、逆フーリエ変換で得られる FDF には不正確さが付きまとう。この問題にアプローチする一つの方法が、本研究で取り組む QU-fitting である。この方法では、まず考えられる FDF のモデルを仮定し、それをフーリエ変換した結果を観測結果と比較する。これを一致するまで繰り返し、そのときの FDF は真の FDF となるはずである。仮定する FDF の  $\phi$  に制限は無く、完全なフーリエ変換が可能だからである。当日の発表では、この手法をより詳しく説明し、QU-fitting をシンプルな銀河モデルに適用した結果を示す。

1. Brentjens, M. A., & de Bruyn, A. G. 2005, A&A, 441, 1217
2. Ideguchi, S., Tashiro, Y., Akahori, T., Takahashi, K., & Ryu, D. 2014 ApJ 792 51

## 銀河 a9 Exploring the clustering of star-forming galaxies at $z \sim 1.6$ in COSMOS

柏野 大地 (名古屋大学 C 研 D2)

銀河はダークマターが重力的に崩壊してできるハローと呼ばれる構造の

内部で形成されると考えられている。大規模観測が牽引する昨今の銀河形成・進化の研究において、ダークマターと銀河の関係を明らかにすることは重要な課題となっている。銀河の 2 点相関関数は宇宙論モデルから予言されるダークマターの密度分布 (あるいはハローの分布) と銀河の分布を結びつける強力なプローブである。特に銀河とダークハローの関係を探る手法の一つとして、halo occupation distribution (HOD) モデルにより銀河クラスタリングを解釈するということが広く行われている。近傍宇宙では SDSS などの分光サーベイによる大サンプルデータを用いて精密な研究が行われてきたが、 $z > 1$  の遠方宇宙では、統計誤差、系統誤差ともに大きく、十分な理解ができていない。特に  $1 < z < 3$  は宇宙の星形成史のピーク期、すなわち銀河の質量獲得が急激に進んだ時代であり、この時代の銀河とダークマター分布の関係を明らかにすることは重要な課題である。そこで我々は、すばる望遠鏡 FMOS による近赤外分光サーベイにより得られた COSMOS 領域の  $1.4 \lesssim z \lesssim 1.7$  における H $\alpha$  輝線銀河サンプルを用いて、2 点射影相関関数を用いたクラスタリング解析を行った。  $0.1 \lesssim r_p \lesssim 20 h^{-1} \text{Mpc}$  に於いて優位なクラスタリングシグナルを検出し、相関長  $r_0 \sim 3 h^{-1} \text{Mpc}$  が得られた。また、射影相関関数を HOD モデルでフィットし、サンプル銀河に対する典型的なハロー質量、銀河バイアスなどを制限した。本講演では、得られた結果と解析手法について議論する。

## 銀河 a10 $z=0-3$ の星形成銀河の紫外光脱出率とダストのジオメトリ

日下部 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

銀河の若い星から出る紫外 (UV) 放射の一部は、ダストに減光され、赤外線 (IR) で再放射され、減光されなかった残りの分が UV のまま抜けてくる。この割合を表す UV の脱出率  $f_{UV}^{esc}$  は、銀河の Spectral Energy Distribution (SED) を決める重要な物理量である。しかし、これまで  $f_{UV}^{esc}$  がダストの質量や空間分布によってどのように決まるのか、近傍銀河と遠方銀河を統一的に調べた研究はされてきていない。そのため、銀河進化の理論モデル (シミュレーションや準解析的モデル) では、観測的に裏付けられていない、星とダストが平板状の空間分布をもつという、単純なダスト減光モデルを採用している [1,2]。最新の銀河進化の理論モデルは紫外線光度関数の観測をよく再現できているが、個々のモデル銀河のダスト減光量が正しい保証はないため、減光前のトータルの SFR は数倍見誤っている可能性があった。そこで本研究では、ダスト質量  $M_d$  の求まっている、近傍と遠方の星形成銀河に着目する。近傍銀河は、Herschel Reference Survey から約 110 個、遠方銀河は、重力レンズで増光された銀河を含む、深い IR の観測のある約 30 個 ( $z \sim 1 - 3$ ) を用いた。その結果、私たちは、銀河の  $f_{UV}^{esc}$  と銀河の global な柱密度  $\Sigma M_d$  に強い相関関係が存在することを初めて見いだした。銀河進化の理論モデル用いられている単純な平板分布の減光モデルは、この観測結果を再現できない。そこで私は、ダストの動径方向の分布が、星と同じ指数関数分布に従うとするモデルを提案し、これが観測と合うことを示した。 $z \sim 0 - 3$  で普遍的に成り立つ、観測に基づくダストの空間分布の減光モデルを確立出来たのも、これが初めてである。興味深いことに、この減光モデルを銀河進化シミュレーション [1] に組み込むと紫外光度関数が再現できなくなった。この結果はシミュレーションが予想する各銀河の半径、減光前のトータルの SFR、ダスト質量などの基本量から見直す必要性を示唆している。今後、シミュレーションの見直しを行うことで、観測提案や将来観測装置の計画でも用いられる理論モデルが予想する銀河の性質が変わる可能性がある。

1. Shimizu et al. 2014, MNRAS, 440, 731
2. Makiya et al. 2015 in prep (the successor of Nagashima et al. 2005, ApJ, 634, 26)

## 銀河 a11 ダスト存在下での輻射性フィードバックにおける輻射圧と光電離の役割

一色 翔平 (北海道大学 宇宙物理学研究室 その他)

大質量星からの輻射がアウトフローの加速に与える効果を知る事は、銀河中に存在するガスの量、ひいては銀河の星形成史を理解する上で重要である。

輻射によるアウトフローの駆動過程としては二通り存在する。一つ目は、光電離によって引き起こされる圧力差によるもの、二つ目は輻射圧によるものである。この二つのうち、近年の研究では光電離からくる圧力差の方が輻射圧よりずっと優勢であり、輻射圧による影響はほとんど見えないとされる結果が報告された (Sales et al. 2014)。しかし、この研究では輻射圧を優勢にさせ得るダストの影響が考慮されていない。ダストが存在する場合、光電離を生じさせる紫外線がダストに吸収され、光電離を起こせない赤外線として再放射することによって光電離の影響を減少させる効果がある。加えて、ダストによる散乱過程は輻射のエネルギーを効率良くガスの運動量に変換する。

こうしたことから、本研究ではダストの影響を考慮した一次元数値シミュレーションコードを開発し、ダストが存在する場合輻射圧の優劣は変化するのかどうかを調べた。この数値シミュレーションでは、中心に光源を置き、球対称にガスを分布させた。ガスの成分は H、He、そしてダストとしてグラファイトを使用した。また、光源のスペクトルとしては  $10^5\text{K}$  の黒体放射、または PEGASE.2 (Fioc & Rocca-Volmerange 1997, 1999) から得た星団のものを使用した。これらの条件を元に、散乱入りの一次元輻射流体シミュレーションを行った。

以上のシミュレーションからダストが含まれる時、光電離からくる圧力のみ影響を考えた場合と光電離からくる圧力と輻射圧の両方の影響を受ける場合で、両者の結果が大きく変わる場合がある、つまり先行研究と異なり輻射圧が重要となることがわかった。

1. Sales, V. et al. 2014, MNRAS, 439, 2990
2. Fioc, M., Rocca-Volmerange, B. 1997, A&A, 326, 950
3. Fioc, M., Rocca-Volmerange, B. 1999, astro-ph/9912179

## 銀河 a12 平行平板モデルにおける Ly $\alpha$ 光子の一次脱出確率

久喜 奈保子 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

高赤方偏移天体である LAE (Lyman Alpha Emitter) は、原始銀河であるとしてその物理量を見積もる研究がなされてきた。LAE の星形成率を求めるためのパラメータのひとつに Ly $\alpha$  光子の脱出確率  $f^{esc}$  がある。これを求める計算コードは、解くべき方程式が微積分方程式であるため、輻射輸送計算が非常に複雑であること、要求される計算機リソースが莫大であることから、よりよい計算方法が模索されている。そこで、最終的には LAE での Ly $\alpha$  光子の脱出確率を求める新しい計算方法の開発を目指したい。その第一段階として本研究では、平行平板モデルにおいて、吸収・散乱を免れて出てくる Ly $\alpha$  光子の割合 (一次脱出確率) を輻射輸

送方程式を解いて求めた。

Ly $\alpha$  光子が水素原子に吸収・放射される際、振動数分布は Voigt プロファイルに従う。このプロファイルは、中心振動数付近は水素原子の熱速度による Doppler プロファイル、中心から離れた "wing" 部分は量子力学で決まる Lorentz プロファイルに従っている。

まず、各プロファイルでの平行平板における脱出確率を垂直方向の輻射について求めた。Voigt プロファイルでの脱出確率は、光学的厚み  $\tau$  が小さい部分では Doppler プロファイルに従い、大きい部分では Lorentz プロファイルの影響を受けることが確認できた。次に、半球を立体角が等しくなるように分割し、全方向の輻射輸送を解いて 3 次元的な脱出確率を求めた。斜め方向の輻射を考えると  $\tau$  が大きくなる為、どのプロファイルについても垂直方向のときより脱出確率は減った。垂直方向に対する全方向の脱出確率の比率を見ると、Doppler プロファイルでは 1/2 倍、Lorentz プロファイルでは 2/3 倍になり、Sobolev (1957) の解析と一致した。Voigt プロファイルは  $\tau$  が小さい部分で Doppler に従い、大きい部分では Lorentz に漸近する結果となった。

1. Sobolev V.V., 1957, SvA, 1, 678
2. Tasitsiomi A., 2006, ApJ, 645, 792

## 銀河 a13 SXDF-UDS-CANDELS-ALMA 1.5 arcmin<sup>2</sup> survey: The multi-wavelength analysis of the 1.1 mm sub-mJy sources

山口 裕貴 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

本研究では、ALMA を使った波長 1.1 mm の無バイアスサーベイ (SXDF-UDS-CANDELS 領域; P.I. Kohno) で検出された sub-mJy 天体 (観測フラックス密度 0.1 - 1 mJy 程度) の多波長解析による結果を報告する。宇宙の星形成の進化において、ダストに隠された星形成活動というのは重要な役割を果たしている。これまでに単一鏡による大規模観測で、ダストに隠された爆発的星形成銀河 (サブミリ波銀河: SMG; 星形成率  $\sim 1000 M_{\odot}/\text{yr}$ ) が数多く発見され、その性質が調べられてきた。ところが、単一鏡の観測では source confusion による感度低下のため、宇宙の星形成活動の主役を担っているとされる一般的な星形成銀河 (星形成率  $\sim$  数 10 - 数 100  $M_{\odot}/\text{yr}$ ) の観測は難しい。したがって、隠された星形成の全貌を明らかにするためには、赤外背景光の 50% 以上を占めるこのクラスの天体 (sub-mJy 天体) を干渉計観測によって分解し、多波長データ解析を通して、その性質を系統的に調査する必要がある。そこで本研究では ALMA 無バイアスサーベイで検出された 5 つの sub-mJy 天体について、可視光・近赤外線のデータで対応天体を同定し、SED fitting によってその性質を調べた。結果、4 天体についてはそれぞれ測光赤方偏移 (2.53, 2.53, 1.33, 1.52)、星質量 ( (6.8, 7.9, 3.5, 4.1)  $\times 10^{10} M_{\odot}$  ) として星形成率 (44, 62, 7.9, 30  $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ ) が得られた。これらの値は、この 4 天体が main sequence に位置する星形成銀河であることを示している。残る 1 天体は特徴的な性質を示している。測光赤方偏移が  $z = 3.1^{+1.8}_{-1.5}$  と推察されるこの天体は、数 100  $M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  という高い星形成率を示すにもかかわらず、 $1.6 \mu\text{m}$  よりも短い波長帯では検出されていない。これは、すばる望遠鏡や VLT, Hubble 宇宙望遠鏡による既存の可視光・近赤外線探査で見逃されているダストに隠された星形成活動が ALMA によって見えてきた証拠になっている。

1. Tamura et al. 2009, Nature, 459, 61
2. Ono et al. 2014, ApJ, 795, 5

3. Galametz et al. 2013, ApJ, 206, 10

## 銀河 a14 $z \sim 4$ 星形成銀河のダークハロー質量と銀河サイズの関係

岡村 拓 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

銀河をホストしているダークハローは銀河の進化、形成に大きな影響を与えている。そのためダークハローと銀河の性質の関係性を調べることは銀河の歴史を知る上で重要である。我々はハッブル望遠鏡の ACS、WFC3 で得られたデータを元に作られた 3D-HST カタログの星形成銀河や、SExtractor を使って検出した LBG を利用して赤方偏移  $\sim 4$  の銀河を選択し、ダークハロー質量と銀河サイズの間の関係を調べた。使用した領域は GOODS South の deep, wide, ERS であり、広さは約 100 平方分である。天体の位置を元にして 2 体角度相関関数を計算し、クラスタリング強度を推定することでダークハロー質量を計算した。得られたダークハロー質量は  $1 \times 10^{10} \sim 8 \times 10^{11} M_{\odot}$  程度であり、銀河サイズとよい相関があることが分かった。従来の研究では UV 絶対光度がダークハロー質量と相関があると考えられており、UV 絶対光度が同じであれば基本的に同じ質量のダークハローに属すると考えられてきたが今回の結果は従来のモデルが単純すぎる可能性を示唆している。またこの結果は従来説明できなかった銀河サイズのばらつき (Huang et al. 2013) 説明をできる可能性を示唆しており、本講演ではこれらについて議論していく予定である。

1. Huang et al. ApJ, 765, 68 (2013)
2. H.J. Mo et al. MNRAS, 295, 319 (1998)
3. Skelton et al. ApJS, 214, 24 (2014)

## 銀河 a15 ALMA Calibrator Sources を用いた分子吸収線系探査

安藤 亮 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

分子吸収線系、すなわち遠方クエーサーを背景光源として、手前に存在する星間物質による分子吸収線を生じている系は、銀河系内から遠方銀河までのあらゆる星間物質の化学的性質や進化を探索する上での強力な観測対象である。しかしその半面、強い背景光源が必要であることから、現在知られている分子吸収線系の数は極めて限られており、とりわけ遠方銀河においてミリ波・サブミリ波帯での分子吸収を生じている例はわずか 5 天体しか知られていない。

本研究では、新たな分子吸収線系を探索する対象として、過去に ALMA で観測されている膨大な数のキャリブレーション天体に着目した。ALMA の高感度・高速度分解能によって、短い積分時間でも何らかの分子吸収線を検出しているケースがあることを期待し、ALMA アーカイブデータに含まれるキャリブレーション天体 36 個のスペクトル解析を行った結果、4 天体において銀河系内の星間物質由来の分子吸収線を検出することに成功し、さらにこのうち 3 天体は過去に研究されていない新たな銀河系内吸収線系である。また、2 天体においては HCO ラジカルの吸収線を検出したが、銀河系内の希薄なガスにおける HCO 吸収線は過去に 2 例しか報告されておらず、本研究はそのサンプル数を倍増させた。さらに、HCO が PDR (光解離領域) のトレーサーであること

から、観測された希薄なガスが PDR 的な環境にあり、何らかの熱源による光解離が生じていることが示唆される。本講演では、検出された新たな分子吸収線系についての報告と、吸収線の解析結果を用いた銀河系内のガスの化学的性質に関する議論を通して、ALMA のキャリブレーション天体を用いた分子吸収線系探査が有効な手法であることを示す。

1. F. Combes Ap&SS 313 321 (2008)
2. H. S. Liszt et al. A&A 564 A64 (2014)
3. M. Gerin et al. A&A 494 977 (2009)

## 銀河 a16 等面輝度形状で探る早期型銀河の進化

満田 和真 (東京大学 天文学教育研究センター D1)

本研究では早期型銀河の等面輝度形状に着目し、 $z \sim 1$  から 0 における boxy 早期型銀河と diskly 早期型銀河の比率の変化を調べた。早期型銀河は系の角運動量の小さな Slow Rotator と、大きな Fast Rotator に分類できる。前者は大質量で、X 線・電波放射を伴い、boxy な等面輝度形状で、金属量の大きな古い星で構成される。一方、後者は低質量で、X 線・電波放射を伴わず、diskly な等面輝度形状で、金属量の小さな新しい星で構成される。Slow Rotator と Fast Rotator の分類には吸収線の面分光観測で力学構造を直接調べる方法と、撮像観測から表面測光で等面輝度形状を測定して boxy, diskly に分類する方法がある。見かけで暗い遠方銀河の吸収線の面分光観測には将来の 30m 級の望遠鏡が必要だが、撮像観測では現在の望遠鏡で取得可能な質のデータでも表面測光による分類ができるため、本研究では後者の分類法を用いた。それでも視直径が小さく見かけで暗い遠方銀河の等面輝度形状の測定は難しく遠方銀河に最適化された既存の表面測光ソフトウェアもない。そこで我々は遠方銀河に最適化された表面測光ソフトウェアを開発した。我々は Hubble Space Telescope Cluster Supernova Survey と Sloan Digital Sky Survey のデータを用い、 $z \sim 1$  と 0 それぞれについて銀河団に属する早期型銀河のサンプルを作成し、今回開発した表面測光の手法を用いて boxy と diskly に分類した。どちらの赤方偏移でも星質量が大きいくほど boxy なものの割合が増加する傾向を確認したが、 $z \sim 1$  では diskly 早期型銀河と boxy 早期型銀河の比率が  $z \sim 0$  に比べて高くなる兆候が見られた。

1. J. Kormendy & R. Bender, 1996, ApJ, 464, L119
2. E. Emsellem et al, 2007, MNRAS, 379, 401
3. S. Khochfar et al., 2011, MNRAS, 417, 845,

## 銀河 a17 Keck/LRIS と Subaru/FMOS で探る Ly $\alpha$ 銀河の星間物質の状態

小島 崇史 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河の星間ガスに含まれる金属量がどのように遷移してきたのかを知ることが、天体の形成と進化を調べる上で重要である。金属量の統計的な研究 [1][2] によると、(1)  $z \lesssim 2.5$  の銀河には金属量と星質量と星形成率の間に強い相関 (Fundamental Metallicity Relation) があること、(2)  $z \sim 3$  ではこの関係が成り立たない可能性があることが報告されている。しかし、これらの研究で用いられた金属量の測定方法については不確かな要素が残っており [3]、この相関をより詳しく調べるためには高精度の金属量決定が必要である。

そこで本研究では、Keck/LRIS の 6 時間以上もの露光による観測が

ら得られた OIII]  $\lambda$  1661, 1666Å 金属線を利用することによって、高精度の金属量決定を実現する。この微弱な OIII] 金属線と Subaru/FMOS で得た [OIII]  $\lambda$  4960, 5008Å 金属線との強度比を、電離平衡モデルと比較することで金属量を決定する。対象天体は、COSMOS 領域にある  $z \sim 2$  の Ly $\alpha$  銀河 1 天体 (以下 LG1 と呼ぶ) である。将来的には、この手法を Subaru/PFS による  $z \sim 1.5$  大規模観測に適用することによって、Fundamental Metallicity Relation を高精度に検証することが可能となるだろう。本発表では、LG1 の物理的性質と、OIII]  $\lambda$  1661, 1666Å 金属線を用いた金属量決定法の有用性について議論する。

1. Mannucci, F., Cresci, G., Maiolino, R., Marconi, A., Gnerucci, A., 2010, MNRAS, 408, 2115
2. Lara-López, M. A., et al., 2010, A&A, 521, L53
3. Nakajima K., Ouchi, M., 2014, MNRAS, 442, 900

## 銀河 a18 大規模銀河形成シミュレーションによる ALMA に向けた観測提案への貢献

早津 夏己 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

遠方宇宙の星形成史の観測的な理解は、歴史的には静止波長系での紫外線によって成されてきた。星形成の直接の指標は、寿命の短い大質量星が放射する電離光子や紫外線である。ただし、星形成している領域に星間塵 (ダスト) があれば、紫外線はダストに吸収され赤外線で再放射される。そのため、星形成史の正しい理解には紫外線の観測だけでなく、赤外線でも観測する必要がある。赤外線は、ダスト放射成分の連続光だけでなく、星の種となる冷たい星間ガス起源の輝線も観測される。輝線は星形成領域の描像の理解や、精度よい赤方偏移の決定のために欠かせない。特に [CII] 158  $\mu$ m 輝線は、大質量星からの紫外線に強く輻射された中性水素ガスを主な起源とし、非常に明るい輝線として知られる。また、遠方宇宙の [CII] 輝線の光度分布 (光度関数) が分かれば、検出可能性が議論できる。観測的な [CII] 輝線光度関数の見積もりは Matsuda et al. (2015) らによって成されているが、将来観測の検出可能性を議論できるほど制限は与えられていない。

本研究では Okamoto et al. (2014) による大規模銀河形成シミュレーションを用いて、[CII] 輝線銀河の統計的特徴と検出可能性を議論する。計算コストの制限により、シミュレーションでは [CII] 輝線が起源とするような中性水素ガスを解像していない。このような星間空間のモデル化には中性水素ガスの熱平衡状態を計算したワンゾーン計算の結果を応用する (Nagamine et al. 2006)。現実的な取り扱いのため、加熱過程に寄与する遠紫外線放射場は、シミュレーション中のガス粒子と星粒子間におけるダストによる減光の寄与を考慮する。

結果として得られた [CII] 輝線光度は、近傍宇宙で知られる星形成率との相関を再現した。[CII] 輝線光度関数をもちいた検出可能性の議論を行い ALMA Cycle 3 への 3 件の観測提案に貢献した。優先順位が高ければ、観測は 2015 年 10 月から 2016 年 9 月に行われる。実際の観測結果と比較し、結果の (非) 整合性を議論することにより、遠方星形成領域の理解が深まることが期待される。本講演では、2 件の貢献について詳しく解説する。

1. Matsuda, Y., Nagao, T., Iono, D., et al. arXiv:1505.02244 (2015)
2. Okamoto, T., Shimizu, I., & Yoshida, N. PASJ, 66, 70 (2014)
3. Nagamine, K., Wolfe, A. M., & Hernquist, L. ApJ, 647, 60 (2006)

## 銀河 a19 電波領域を考慮した銀河スペクトルエネルギー分布モデルの構築

永田 拓磨 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M1)

銀河はあらゆる波長の放射源である。例えば OB 型星による紫外線の放射、ダストによる赤外線の再放射がある。これらの放射の波長ごとのエネルギー分布をスペクトルエネルギー分布 (SED) と呼ぶ。SED から、単位時間あたりに形成される星質量を示す星形成率 (SFR) や星質量など銀河の物理量が推定できる。このように、銀河の SED モデルを構築することは物理量を求める上で重要である。

銀河の SED モデルを構築するためには、銀河を構成する星やガス、ダストのスペクトルを足し合わせる必要がある。これらのスペクトルは銀河が形成されてから、銀河がたどってきた進化を仮定することで導出できる。つまり、SED モデルを構築するためには、初期質量関数や星の個々のスペクトルだけではなく、銀河進化を考慮する必要がある。特に銀河の SED に関連して重要なのは化学進化である。これは銀河内の星が内部の核融合反応により金属を形成し、超新星爆発や恒星風により金属が放出されることで銀河の化学組成が変化していく現象のことである。

先行研究で、ダストによる星の放射に対する吸収および再放射を考慮することにより、化学進化と整合的な銀河 SED 進化モデルが紫外線から赤外線までの波長で構築されている。一方、電波領域では超新星残骸の相対論的電子によるシンクロトロン放射、HII 領域のプラズマによる熱制動放射、分子雲内の CO や Fe など金属による線スペクトル、中性水素による 21cm 線があり、銀河にとって重要な要素を含むが、紫外線から電波までの波長の銀河 SED 進化モデルはいまだ構築されていない。シンクロトロン放射や熱制動放射によって得られる電波領域での連続スペクトルも SFR と深い関係があり、紫外線や赤外線と組み合わせることにより正確な SFR を調べることができる。本研究では先行研究で得られた紫外線から赤外線までの銀河 SED 進化モデルを用いて、電波領域まで拡張した銀河 SED 進化モデルを構築した。この結果と観測への示唆について述べる。

## 銀河 a20 AGN feedback to galaxy formation at high redshift

菊田 智史 (国立天文台三鷹 M1)

古い星が楕円状に分布する銀河のスフェロイド成分 (楕円銀河、銀河のバルジ) の中心に超巨大ブラックホールがほぼ普遍的に存在し、両者の質量に相関があるという観測事実は、スフェロイドの星を生成する銀河形成活動と、超巨大ブラックホールへの物質の質量降着によって明るく輝く活動銀河中心核 (AGN) 活動が、互いに関わり合いながら進化してきたこと、および AGN 活動が銀河形成において重要な役割を果たしてきたことを示唆している。AGN がその母銀河へ与える影響 (フィードバック) に関しては、観測的にも、理論的にも多くの研究がされつつあるが、AGN が周囲の別の銀河に与えるフィードバック、特に光度の大きな AGN が周囲の低質量の銀河に与えるフィードバックに関しては、理論的にはあるはずだと定性的には言われているものの、定量的には、観測的にも理論的にもほとんど手付かずの状態のまま残っている。そこで我々は、すばる望遠鏡の広視野の可視光線カメラ Suprime-Cam を用いて、赤方偏移 5 付近の明るい AGN の周囲を、狭帯域フィルターで、広く、かつ、低質量の銀河 (ここでは Ly $\alpha$  輝線銀河、LAE) も検出できる深さで撮像観測し、低質量銀河へのフィードバック効果を定量的に調べることを試みた。AGN の影響の強い近傍領域 (proximity) と、影響の

ない一般領域の低質量銀河を同時に捉えることができる点は、我々の広視野・高感度の Suprime-Cam を用いた手法のユニークな強みである。初期解析の結果、AGN の周囲において実際に暗い LAE の数が一般領域と比べて有意に減っていることが確認できた。本講演では、その初期解析に基づくその他の結果と、銀河形成への示唆について紹介する予定である。

## 銀河 a21 準解析的モデルを用いた活動銀河核におけるダスト減光効果の研究

白方 光 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M2)

我々は準解析的銀河形成モデルである、*New Numerical Galaxy Catalogue* ( $\nu^2$ GC; Makiya et al. in prep, Ishiyama et al. accepted) を用いて超巨大ブラックホール (SMBH) と銀河の共進化について理論的に研究している。準解析的銀河形成モデルでは、ダークマターの空間分布をダークマターのみの  $N$  体シミュレーションで計算し、バリオンが関わる部分については観測や数値シミュレーション・解析解を元にモデル化している。そのため宇宙論的流体シミュレーションによる銀河進化研究よりも格段に広い計算体積を取ることができ、統計的研究に優れている。特に活動銀河核 (AGN) などの空間密度が低い天体の研究には強力な武器となる。

これまで私は、AGN の中で最も明るいクラスであるクェーサーのダスト減光効果を研究してきた (Shirakata et al. 2015)。クェーサーが質量比の大きな銀河合体によってトリガーされるとして、合体後のクェーサー母銀河に存在するダストがクェーサーの減光にどの程度寄与するのかを調べた。その結果、我々の準解析的銀河形成モデルが銀河の観測結果を説明できるのなら、母銀河のダストによってクェーサーは可視光 (B-band) で約 2 等級ほど暗くなるのがわかった。しかし観測はクェーサーにおけるダスト減光の効果は統計的には無視できるほど小さいことを示唆している。

今回はクェーサーだけでなく暗い AGN をトリガーする物理過程も考慮した上で、母銀河のダスト減光が AGN にもたらす影響を調べた。観測と比較する際はダストによる減光は無視できると考えられている硬 X 線と可視光 (B-band) の光度関数を用いた。今回は  $z < 2$  の結果を発表する。また、クェーサーについてはダスト減光を弱めるために必要なプロセスも議論する。

1. Ishiyama et al. accepted by PASJ (arXiv: 1412.2860)
2. Shirakata et al. MNRAS, 450, L6 (2015)

## 銀河 a22 高赤方偏移の低光度クェーサー探索におけるコンプリートネスと光度関数の再評価

仁井田 真奈 (愛媛大学 M2)

巨大ブラックホールの進化を解明するためには、宇宙の様々な時代において広い光度範囲のクェーサーの光度関数 (単位体積・光度あたりの個数密度) を求めることが重要である。クェーサーは AGN の中でも最も明るいクラスの天体であり、先行研究によって幅広い時代の高光度クェーサーの光度関数が求められてきた (Croom et al. 2009)。しかし巨大ブラックホールの成長初期に対応する遠方の低光度クェーサーの光度関数は系統誤差を多く含むなどの理由により、正確な光度関数が得られていない。我々は光度関数を導出する上で重要なコンプリートネス (サンプル選出により選出可能なクェーサーの割合) の導出方法に系統誤

差が生じる原因に注目した。ひとつ目は、低光度のものほど輝線等価幅が大きいというクェーサースペクトルの光度依存性 (Baldwin 1977) を考慮していない点である。ふたつ目は、クェーサーのモデルスペクトルに適用させる銀河間物質の一般的なモデルが吸収を過大評価している点である。

そこで本研究ではこの 2 点を改善し、より正確な遠方の低光度クェーサー光度関数の導出方法の確立を目的とした。我々は SDSS のクェーサーカタログを用いて定量化したスペクトルの光度依存性の情報と、最近の観測結果に基づく銀河間物質の吸収モデル (Inoue et al. 2014) を用いて、COSMOS 領域のデータから  $z \sim 4, 5$  におけるコンプリートネスを導出した。その結果、低光度のクェーサーほど二色図上で選出されやすく、コンプリートネスが影響を受けることが分かった。導出したコンプリートネスを使用することで、従来の導出方法によって生じる系統誤差の除去に成功し、その結果各赤方偏移のクェーサー個数密度に約 25% の増減があった。本講演では導出方法の詳細に加え、導出した光度関数に基づくクェーサーの個数密度進化やすばる望遠鏡の超広視野カメラ (Hyper Suprime-Cam) を用いた今後の展望について議論する。

1. Croom et al. 2009, MNRAS, 399, 1755
2. Baldwin 1977, ApJ, 214, 679
3. Inoue et al. 2014, MNRAS, 442, 1805

## 銀河 a23 近赤外線分光観測に基づくセイファート銀河の狭輝線領域における電離メカニズムへの制限

寺尾 航暉 (愛媛大学 M2)

活動銀河核 (AGN) の狭輝線領域 (NLR) の電離メカニズムは、主に中心核からの電離光子による光電離であると考えられているが、電波ジェットなどに起因する衝撃波による衝突励起が電離に寄与している可能性も指摘されており、議論が続いている。

観測から電離メカニズムを切り分ける方法として、近赤外線の [Fe II] 1.257  $\mu\text{m}$ /[P II] 1.188  $\mu\text{m}$  輝線強度比による診断が有用であると Oliva et al. 2001 (Hashimoto et al. 2011 も参照のこと) で提案されている。鉄はダストに非常によく吸着するが、リンはダストに吸着せずガス中に存在する。ダストは衝撃波によって簡単に破壊されるため、ガス中の鉄の存在量が増加し、[Fe II] 輝線は強くなる。対するリンの [P II] 輝線の強度は衝撃波の有無に寄らないため、[Fe II]/[P II] 輝線強度比が大きいことは衝撃波の影響が強いことを示唆している。しかし、AGN におけるこの輝線比はこれまであまり調査されておらず、サンプル数が少ないため統計的な議論は進んでいない。

本研究では、近傍セイファート銀河 26 天体の中心核領域を岡山天体物理観測所 188cm 望遠鏡の近赤外分光装置 ISLE を用いて分光観測を行った。その結果、下限値も含めて計 19 天体の輝線比のデータを得た。さらに先行研究から 22 天体の輝線比のデータも収集し、合計 41 天体の輝線比を得た。この結果から、多くの天体では光電離が主な電離メカニズムであるが衝撃波が電離に寄与している天体も見つかり、実際に NLR の電離に衝撃波が寄与している天体が一定の割合で存在することが分かった。NLR における衝撃波の起源は、近年話題になっている AGN feedback に対応する現象が考えられ、母銀河の星間物質への feedback が NLR の衝撃波による電離として見えている可能性がある。この衝撃波の起源について電波ジェットの活動性の強弱と輝線比の関係をみると、これらの間に相関は見られなかった。そのため、NLR における衝撃

波の起源には、電波ジェット以外の放射開口角が大きいアウトフロー現象が関与していることが示唆された。

1. Oliva, E., et al. 2001, A&A, 369, L5
2. Hashimoto, T., et al. 2011, PASJ, 63, L7

## 銀河 a24 可視光輝線診断による低金属量 AGN 探査

川崎 光太 (愛媛大学 M1)

多くの大質量銀河中心には超巨大ブラックホール (Super Massive Black Hole; SMBH) が存在することが知られている。特に SMBH へのガス降着により明るく輝く天体を活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) という。AGN の狭輝線領域 (Narrow Line Region; NLR) の金属量が低い天体は進化の初期段階にあると考えられ非常に興味深い天体である。しかし、一般的に AGN の NLR の金属量は太陽金属量と同程度かそれよりも高く、金属量が低い AGN は非常に稀な存在である。低金属量の AGN を選択するために BPT 図と呼ばれる輝線診断図 ( $[\text{N II}]/\text{H}\alpha$  vs.  $[\text{O III}]/\text{H}\alpha$ ) を用いる方法がある (e.g., Groves et al. 2006)。BPT 図内では、左上から右下にかけて星形成銀河が、左下から右上にかけて AGN が多く分布し、星形成銀河と AGN を切り分けることができる。理論モデルによると、NLR の金属量が太陽程度かそれ以下である低金属量 AGN は、天体がほとんど存在しない BPT 図の谷にくることが示唆されている。しかし、高い電子密度や電離パラメータをもつ AGN、高い電子密度・電離パラメータ・ハードな極紫外線 (EUV) をもつ星形成銀河も BPT 図の谷にくるため (e.g., Kewley et al. 2013)、BPT 図の谷にくる天体は必ずしも NLR の金属量が低い AGN だけではないという問題がある。

本研究では BPT 図の谷に来る AGN の NLR の金属量や電子密度、電離パラメータについて調べ、本当に NLR の金属量が低い AGN を選択する。SDSS DR7 データベースから、近傍 ( $0.02 \leq z \leq 0.36$ ) にある  $\sim 340,000$  天体を選択し、その中に含まれる  $\sim 43,000$  天体の AGN のうち BPT 図の谷にくる AGN の候補 85 天体を選択した。それらの候補天体のスペクトルに広輝線が He II が見られる天体を AGN であると判断した。このサンプルに対して、電子密度は  $[\text{S II}]/\text{H}\alpha$  輝線比、電離パラメータは  $[\text{O III}]/[\text{O II}]$  輝線比を用いて調べた。その結果 BPT 図の谷に来る AGN は、ほとんどが低金属量で特徴付けられるものであり、電子密度や電離パラメータの効果で BPT 図の谷に位置する AGN はほとんど存在しないことが分かった。本講演では、解析の詳細および結果の意義について述べる。

1. Groves, B., Heckman, T., & Kauffmann, G. 2006, MNRAS, 371, 1559
2. Kewley L. J., Dopita M. A., Leitherer C., DavéR., Yuan T., Allen M., Groves B., Sutherland R., 2013a, ApJ, 774, 100

## 銀河 a25 AGN トーラスから放出されるアウトフローの 1 次元モデル

寺本 篤史 (鹿児島大学 M1)

本研究では AGN トーラスからの質量流出 (アウトフロー) の 1 次元モデルを作成し、トーラス外縁部における速度、質量を求めた。このモデル

では、アウトフローはトーラス内縁付近で幾何学的に薄いシェルとして発生し、降着円盤が放射する紫外線の輻射圧によって加速される。シェルはトーラス表面に束縛され、光学的厚み  $\tau \approx 1$  を保ち、雪かき式に質量を増しながらトーラス外縁部へ向かって加速すると仮定した。トーラスの形状として、(Wada & Norman 2002) で示された形状を仮定した。結果として、標準的なパラメータの AGN において質量  $5 \times 10^5 M_{\odot}$ 、速度  $210 \text{ km s}^{-1}$  のシェルが放出されることがわかった。トーラス外縁部におけるシェル速度は脱出速度を超えており、シェルが AGN から脱出してアウトフローになると考えられる。この結果から、トーラス内縁部におけるシェルの発生間隔に適切な仮定を置くことでアウトフローの質量放出率及び、質量放出によってトーラスが消滅する時間を得た。また、シェルが加速しきれずにトーラスに再び落下する可能性についても議論した。さらに、結果のパラメータ依存性についても述べる。

1. K. Wada & C. A. Norman, 2002, ApJ, 566, L21

## 銀河 a26 SMBH と母銀河の共進化史解明に向けた小質量サンプルの獲得

木村 勇貴 (東北大学天文学専攻 M2)

銀河と超大質量ブラックホール (Super Massive Black Hole ; SMBH) の共進化史を解明するにあたって、過去の情報、つまり高赤方偏移での銀河と SMBH の関係を知る必要がある。そのような観測は近年活発に行われているが (例えば Sun et al. 2015)、それらは X 線で同定された比較的明るく X 線 AGN といった大質量サンプルだけを用いて議論される場合がほとんどで、小質量サンプルについては全く扱われることはなかった。しかしながら階層的構造形成を考えたとき、高赤方偏移の情報を知るにあたってそのような小質量サンプルは非常に重要な位置づけにあると考えられる。そこで我々のグループでは AGN の変光の性質を用いて高赤方偏移にある小質量 SMBH サンプル獲得に向けた観測を行った。低光度なもの (つまり小質量天体) ほど変光強度は大きいことが知られており (Vanden Berk et al. 2004)、これにより小質量の AGN 候補の獲得が予想される。これに加えて color-selection によって BzK (Daddi et al. 2004) や DRG (Franx et al. 2003)、LBG (Steidel et al. 1996) といった高赤方偏移サンプルの確保が期待される。この変光の性質と color-selection を組み合わせ、X 線でも検出できないような高赤方偏移・小質量サンプル獲得に向けた調査を UKIDSS/UDS 領域で行った。本講演ではこの調査結果について報告する。また獲得されたサンプルの妥当性を確かめるべく実施した分光観測結果についても述べる。

1. Sun et al. 2015, ApJ, 802, 14S
2. Vanden Berk et al. 2004, ApJ, 601, 692V

## 銀河 a27 X 線天文衛星「すざく」・Swift による Compton Thick AGN NGC 1106 の広帯域 X 線観測

谷本 敦 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

銀河中心に存在する超巨大ブラックホール (SMBH : Supermassive Black Hole) への質量降着によって、銀河中心が明るく光り輝く現象が活動銀河核 (AGN : Active Galactic Nuclei) である。SMBH 質量と銀河バルジ質量には強い相関関係があることが知られており、SMBH と

銀河が共進化してきた可能性を示唆している。AGN は質量降着によって SMBH がまさに成長している過程であり、AGN は銀河進化の理解において重要である。

AGN では、銀河中心の SMBH をトラスと呼ばれるドーナツ状のガスやダストから成る遮蔽物が取り囲んでいると考えられている。このトラスを通さずに SMBH を見たものが 1 型 AGN、トラスを通して SMBH を見たものが 2 型 AGN と分類される。2 型 AGN の中でも特に X 線の吸収量が大きく、Compton 散乱に対する光学的厚みが 1 を超えるものを CTAGN(Compton Thick AGN) と分類する。この全 AGN 種族からの X 線放射の重ね合わせが宇宙 X 線背景放射 (CXB: Cosmic X-ray Background) として観測されている。この CXB を分解することによって、AGN の種族毎の存在量を決定し、各種族の SMBH 成長への寄与を調べることが可能となる。

しかし、10 keV 以上の CXB の大部分は未分解のまま残されている。このエネルギー領域において CTAGN が重要な寄与をすると考えられている。その寄与を正確に知り、CXB の起源を説明する為には、CTAGN の広帯域 X 線スペクトルの理解が必要不可欠である。しかし、強い X 線吸収の為に詳細に調べられる近傍宇宙の CTAGN の数は限られていた。本研究では、Swift 衛星による透過力の高い硬 X 線サーベイで見つかった新しい CTAGN 候補である「NGC 1106」を X 線天文衛星「すざく」によって追求観測し、その広域 X 線スペクトル (0.5-100 keV) を初めて取得することに成功した。そして、トラスからの吸収・反射を考慮したモデル (Ikeda et al. 2009) により観測されたスペクトルを再現し、トラス構造に制限を付けることに成功した。本発表では、NGC 1106 の観測結果とこれまでの CTAGN に関する研究を比較し、議論を行う。

1. Ueda et al. 2007, ApJ, 664, L79
2. Ikeda et al. 2009, ApJ, 692, 608
3. Eguchi et al. 2011, ApJ, 729, 31

## 銀河 b1 バルジ形成過程の解明に向けた近傍 LIRG におけるダスト減光の評価

小早川 大 (東京大学 天文学教育研究センター M2)

我々は銀河の形態形成メカニズムに迫るため、形態を良く反映しているバルジに着目し、その形成過程を解明しようとしている。近年では数値シミュレーションなどを用いたバルジ形成の研究が進んできているが (Okamoto et al. 2012)、これらの結果が示唆するモデルを検証する観測的研究はまだ多くはなされていない。そこで、我々は今まさにバルジを形成しつつある銀河として活発な星形成活動を行っている高光度赤外線銀河 (LIRG) に注目し、星形成がバルジにどのように関わっているのかを調べることでバルジ形成のメカニズムを解明することにした。

LIRG は濃いダスト ( $A_V \sim 2 - 6$ mag; Alonso-Herrero et al. 2006) に覆われているため、星形成活動の一般的な指標である UV や H $\alpha$  輝線では減光が大きく、正確な星形成領域の空間分布が得られない。そこで、我々は減光をあまり受けない赤外波長の水素電離輝線のうち最も放射強度が大きい Pa $\alpha$  輝線を用いることで、ダストを見通して星形成領域を捉えた。しかし、LIRG のダストは濃く、Pa $\alpha$  輝線であっても 1mag 程度の減光を受けてしまうため、得られる星形成領域の空間分布には無視できない不定性が残ってしまう。我々は、2 つの水素電離輝線の強度比からダスト減光分布を求めることにより、この不定性を排除することにした。

これまでに H $\alpha$  輝線および Pa $\alpha$  輝線を用いて 9 天体の LIRG について減光分布を求めたところ、中心部に近いほど減光量が多い傾向があることがわかった。本講演ではこの結果に加えて、他の研究で求められている H $\alpha$ /H $\beta$  輝線比から求めた減光量との比較から得られた結果について議論する。

1. Okamoto, T., 2013, MNRAS, 428, 718
2. Alonso-Herrero, A., et al. 2006, ApJ, 650, 835

## 銀河 b2 矮小銀河の回転速度における理論と観測の不一致

畑 千香子 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙マイクロ波背景放射の揺らぎの詳細な観測により、平坦・低密度で宇宙の物質密度の大部分を cold dark matter が占める  $\Lambda$ CDM が宇宙の標準モデルとして確立された。 $\Lambda$ CDM モデルに基づく銀河形成シミュレーションでは、矮小銀河のダークハローの中心密度プロファイルが近傍矮小銀河の回転速度の観測から示唆されるような銀河中心部で密度一定の "core" ではなく密度が半径の累乗の "cusp" 構造を持つ (Navarro et al. 1997) という問題 "core-cusp problem" (Moore 1994) があることが 1990 年代半ばから知られている。

本発表ではこの問題に関する Oman et al. (Submitted to MNRAS) の論文のレビューを行う。この論文では EAGLE プロジェクトと LOCAL GROUPS プロジェクトによる  $\Lambda$ CDM 宇宙論的流体シミュレーションから得られた銀河の回転速度を調査し、矮小銀河の観測によって得られた回転曲線との比較を行っている。その結果から "core-cusp problem" を観測から示唆される銀河の中心密度プロファイルが理論から推測されるような半径の累乗ではなく一定であるという "密度傾斜の不一致" の問題ではなく、銀河の内部領域の質量が理論から推測されるものよりも非常に小さいという "内部質量の不足" の問題であるとみなし、次に述べる三つの事柄の内一つ又はそれ以上が正しくなければならぬと示している。(i) dark matter は現在あるモデルで予想されるよりも複雑である。(ii) 矮小銀河の内部領域のバリオンの効果の再現が現在のシミュレーションでは正しくない。(iii) 運動学のデータから推測される "内部質量が不足" している銀河の質量プロファイルを再評価する必要がある。

1. Oman et al. 2015, arXiv:1504.01437v1
2. Navarro, Frenk, & White, 1997, ApJ, 490, 493
3. Moor, B. 1994, Nature, 370, 629

## 銀河 b3 赤方偏移 $z \sim 0.7 - 0.8$ のバースト的な星形成をする銀河のスペクトル解析

工野 瑞季 (愛媛大学 M1)

個々の銀河の星形成史は、その銀河の進化を理解するための重要な情報である。一般的に、銀河の星形成史は  $\tau$  モデルで近似される。しかし、階層的な形成モデルにおいて、バースト的な星形成を短い時間スケールで引き起こしながら現在に至った可能性が十分に考えられる。銀河の SED から、観測された時点での星形成については比較的详细に分かるが、それよりずっと昔の詳細を知ることは難しい。しかし、遠方の銀河に遡っていくことで、広い時代に渡って星形成の詳細を調べることが

できる。そこで我々は、COSMOS サーベイの中帯域フィルターのデータを用いて、 $0.2 < z < 1.0$  の銀河の中から急に星形成が止まった銀河 (post-starburst) や、古い星ばかりだったところに急に星形成が起きた銀河 (old+burst) を選び出し、その進化を調べた。その結果、 $z \sim 1$  に近づくにつれ、これらの銀河の割合が高くなることが分かった。本研究では、これらの銀河の星形成の詳細やガスの金属量を調べるために、スペクトル解析を行い、輝線や吸収線の等価幅や異なる輝線のフラックス比を、赤くて古い星からなる銀河 (passive) や、連続的に星形成を行っている銀河 (continuous Star Formation) と比較した。

$z$ COSMOS サーベイ (観測波長: 約 5500 – 9700Å) による分光データを使用し、 $z \sim 0.66 - 0.85$  の passive 銀河 303 個、continuous SF 銀河 692 個、post-starburst 銀河 22 個、old+burst 銀河 90 個のスペクトルを解析に用いた。十分な S/N 比で輝線や吸収線の測定を行うために、各銀河種族でスペクトルの足し合わせを行った。

これらのスペクトルの解析から、old+burst 銀河の [O II]  $\lambda 3727$  や [O III]  $\lambda 5007$  の輝線の等価幅が continuous SF 銀河よりも大きいこと、また post-starburst 銀河は passive 銀河と比べ、バルマー吸収線が顕著に強いことが分かった。これらの結果は、old+burst 銀河において活発な星形成が起きていること、post-starburst 銀河はスペクトルにおける A 型星の寄与が大きく、星形成が止まってから間もないことを示唆しており、中帯域フィルターを用いることによって、確かにバースト的な星形成を持つ銀河を選び出せていることを確認できた。

## 銀河 b4 あかりスリットレス分光で見るヒクソンコンパクト銀河群

池内 綾人 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

Hickson Compact Groups(HCG) は local universe において銀河が最も濃い環境にあります。これは 1877 年に HCG の原型となる Stephan's Quintet が発見されて以来、パロマー天文台で行われた掃天観測の撮像乾板に主に基づき 1982 年に Hickson が 451 個の銀河を 100 個のコンパクト銀河群に割り当て、カタログにしたものです。視線方向に沿って見かけ上コンパクト銀河群に混じっている銀河があるものの赤方偏移情報からそれらを除くことが可能であり、HCG の内 43% の銀河は相互作用を受けていると考えられている形状を示しています。私は重力的に相互作用していると考えられている HCG のメンバー銀河の赤外線における特徴を詳しく知りたいという意欲の元、現在あかりの IRC のスリットレス分光画像から銀河の赤外 SED を求めようとしています。あかりは IRTS に続き 2006 年に打ち上げられた口径 68.5cm の日本の赤外線天文衛星で、赤外線による掃天観測を目的として JAXA 宇宙科学研究所が主体となり開発されました。あかりには観測装置として遠赤外線サーベイを担当する FIS と近赤外線での指向観測を主目的とした IRC が搭載されていました。IRC には 1.8-5.3 $\mu\text{m}$  を担当する NIR、5.4-13.1 $\mu\text{m}$  を担当する MIR-S、12.4-26.5 $\mu\text{m}$  を担当する MIR-L の 3 つのチャンネルがあり、それぞれ 10'x10' 程度の視野を持ちます。しかしながらスリットレス分光において広がった天体のスペクトルを得ることは、分光が画像上で始まる位置が視野の中にあること、分散方向に他の天体のスペクトルが混じることがある等の理由で困難です。本講演ではあかり IRC でのスリットレス分光の課題や解決法、現状での成果について紹介します。

1. Bitsakis, T., et al. 2010, A&A, 517, A75
2. Mendes de Oliveira, C., & Hickson, P. 1994, ApJ, 427, 684
3. Onaka, T., et al. 2007, PASJ, 59, S401

## 銀河 c1 低質量ブラックホールの短時間変動

谷口 由貴 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

超大質量ブラックホール (SMBH) は、 $10^{10} M_{\odot}$  以上の銀河の中心に普遍的に存在するとされているが、どのような進化をしてきたのかは解明されていない。ブラックホールと銀河は、互いに関係し合いながら成長してきたと考えられるので、SMBH の進化過程は、銀河進化においても重要である。SMBH も最初は  $10^{4-5} M_{\odot}$  の seed BH から、合体や降着をくり返して成長をしてきたと考えられている。しかし、現在、高赤方偏にある seed BH は直接観測ができないため、近傍の矮小銀河にある low-mass BH を観測することで、SMBH の起源を明らかにできると考えられている。近年、SDSS によるサーベイで低質量ブラックホール探しが行われたが、可視光による観測では、星形成の活発でない領域ばかりで検出してしまうというバイアスがあった。その欠点を補うため、X 線や電波による観測も盛んになってきたが、検出数はまだ少ない。そこで我々は、低質量ブラックホールの可視領域での短時間変動を利用して検出するという方法を使った。低質量ブラックホールは、その系が小さいことにより、降着円盤が不安定で、可視領域での力学的タイムスケールが数時間程度になることが期待されている。(eg., Peterson et al. 2005) 一方で、大きな SMBH だと、数ヶ月~年タイムスケールで変動することが観測的に示されている。このように短時間変動を利用した、low-mass BH を同定する方法が確立できれば、今後の観測も効率化でき、統計的に意味があるサンプル数が得られると考えている。今回は、我々が行った最近の観測 (Subaru/HSC+FOCAS) の結果と今後の展望について紹介する。

1. Peterson et al., 2005, ApJ., 799, 808
2. Tominaga et al., ATel, 6291, 1

## 銀河 c2 Subaru/Hyper-Suprime Cam サーベイを用いた高赤方偏移クェーサー探査

尾上 匡房 (国立天文台三鷹 D1)

初期宇宙に存在するクェーサーは超巨大ブラックホールの形成史や宇宙再電離、さらには銀河と AGN の共進化を探る上で非常に重要な役割を果たす。現在までに赤方偏移が 6 を超えるようなクェーサーは SDSS に代表される大型サーベイ観測によって 70 個程度発見されており (e.g., Mortlock et al. 2011, Venemans et al. 2013, Fan et al. 2006)、これらが宇宙年齢 10 億年未満の時代において 10 億太陽質量程度のブラックホールを持つという観測事実は超巨大ブラックホールの形成モデルに大きな制限を与えている。しかし一方で、これらはこの時代で最も活発で明るい AGN と考えられるため、初期宇宙における超巨大ブラックホールの降着活動の一般的な性質を探るためには現在のサンプルよりも暗いクェーサーを含めた大規模サンプルを構築する必要がある。そこで我々は 2014 年春から観測が開始したすばる望遠鏡・Hyper-Suprime Cam (HSC) 戦略サーベイにおいて高赤方偏移クェーサーの発見数を大幅に増大させ、初期宇宙における超大質量ブラックホールの性質や再電離の進行過程の解明を目指している。HSC は直径 1.5 度という超広視野を誇るすばる望遠鏡の最新鋭の可視撮像装置であり、HSC-Wide サーベイは 5 年間に渡って 1,400 deg<sup>2</sup> もの領域を  $5\sigma$  限界等級:  $r \sim 26$  mag という深さまで撮像することを可能にする為、現段階において世

界で最も強力な可視光サーベイであると言える。ところでキューサーの検出に通常用いられる二色図による色選択法では褐色矮星に代表される混入天体が障害になるが、我々はこの問題を克服するため可視と近赤外線の色データを用いた SED fitting 法を適用することで従来より効率的なキューサー検出を行う。本講演では HSC サーベイの概要や SED fitting 法の有効性を議論した後、HSC 戦略サーベイ初年度データを用いた高赤方偏移キューサー探査の初期結果を報告する。

1. Venemans et al. (2013). ApJ, 779, 24
2. De Rosa et al. (2014). ApJ, 790, 145
3. Miyazaki et al. (2012). SPIE Conference Series, 8446, 84460ZZ

### 銀河 c3 「あかり」と Spitzer を用いた分子トラスの物理状態の推定

馬場 俊介 (宇宙科学研究所 D1)

活動銀河核 (AGN) の周囲には、それを囲むようなトラス型の分子雲 (分子トラス) が存在していると考えられている。しかし、数 pc オーダーという物理的小ささのため空間分解した観測を行えず、分子トラスの構造や物理状態は良く分かっていない。

我々は、分子トラスの物理状態を解明するため、一酸化炭素 (CO) の回転振動遷移 ( $4.7 \mu\text{m}$ ) に着目した。分子雲が視線上で中心核の手前にあれば、中心核とその周辺からの熱放射を吸収する。吸収線のため母銀河からの寄与を受けず、背景光源がコンパクトなため手前の領域を実効的に高い空間分解能で観測できる。先行研究として、Shirahata et al. (2013) がダストに埋もれた AGN IRAS 08572+3915 をすばる望遠鏡を用いて観測し、異なる回転励起レベルごとの強度比から CO 分子ガスの物理状態を調べ、中心核周囲におけるガスの分布を議論している。しかし地上観測では、観測可能な明るさの制約と CO 吸収がバンド内に収まる赤方偏移という制約により、大規模なサンプルを望めない。

そこで本研究では CO 吸収を系統的に解析するため、赤外線天文衛星「あかり」と Spitzer の分光観測データを利用した。ただし、これらの観測では波長分解能が足りず異なる回転励起レベルの吸収線を分離できないため、局所熱平衡を仮定したモデルフィッティングにより解析を行った。回転励起ごとのラインが分離できていないものの、数十%の良好な精度で柱密度と温度を求めることに成功した。典型的な値はそれぞれ、CO 分子の柱密度  $10^{19} \text{ cm}^{-2}$  (水素分子換算  $10^{23} \text{ cm}^{-2}$ )、温度数百 K であった。高温の CO が大きな柱密度で存在することは、星形成領域における光解離領域の重ね合わせでは説明できない。したがって、中心核付近に系統的に分布する分子雲を観測していると考えられる。本発表では、高温かつ大量の分子ガスについて、その加熱機構と分布を議論する。

1. Shirahata, M., Nakagawa, T., Usuda, T., Goto, M., Suto, H., & Geballe, T.R. 2013, PASJ, 65, 5

### 銀河 c4 [OIII] 輝線銀河で探る最盛期前夜における銀河形成の活動性

鈴木 智子 (国立天文台三鷹 D2)

$z \sim 1-3$  において宇宙の大局的な星形成率密度は非常に高く、この時代は銀河形成最盛期と言われている。本研究では、何故この時代に最盛期

を迎えることになったのかを理解するために、最盛期よりさらに時代を遡った  $z > 3$  という時代に注目している。我々は、すばる望遠鏡の MOIRCS と狭帯域フィルターを用いた撮像観測によって、一般フィールドである SXDF において  $z=3.2, 3.6$  の [OIII] 輝線銀河のサンプルを構築した。そしてそれらの星質量や星形成率といった大局的な物理量を調べ、同じフィールドで構築された  $z=2.2, 2.5$  の H $\alpha$  輝線銀河サンプルとの比較を行った。その結果、異なる時代のふたつの銀河サンプル間で星質量や星形成率の分布に明らかな違いが見られることが分かった。この質量分布の差は、異なる指標を用いていることによる選択効果、もしくは  $z > 3$  から  $z \sim 2$  にかけての銀河の進化をみていると解釈できる。本講演では、本研究の一連の結果を紹介するとともに、[OIII] 輝線と H $\alpha$  輝線という指標の違いがもたらす影響についての検証、そして銀河の進化を見ていたと考えた場合に、 $z > 3$  から最盛期にかけてどのような銀河の成長が見られるのかということに関して議論を行う。

1. Tadaki, K.-i., et al. 2013, ApJ
2. Suzuki, T. L., et al. 2015, ApJ

### 銀河 c5 すばる/HSC とハッブル望遠鏡で探る $z = 4-7$ の銀河・ダークハロー関係

播金 優一 (東京大学宇宙線研究所 M2)

銀河の形成を理解することは、現代の天文学の大きな目標の一つである。銀河を取り囲むダークハローは、ガス冷却による星形成や超新星爆発・AGN によるフィードバックなどを通して銀河形成と密接に結びついている。この銀河・ダークハロー関係を表す物理量として、銀河の星質量とダークハロー質量の比である stellar-to-halo mass ratio (SHMR) がある。SHMR は近傍宇宙では議論されているが、 $z \sim 2$  を超える遠方宇宙では詳しく調べられていない。そこで本研究では、すばる/Hyper-Suprime-Cam(HSC) による最新の超広領域撮像データとハッブル望遠鏡の深撮像データを組み合わせて、 $z \sim 4-7$  の銀河を約 7000 個選択し、クラスタリング解析でダークハロー質量を求めた。求められたダークハロー質量から見積もった SHMR は近傍の値から進化を示しており、さらに  $z \sim 4$  から  $z \sim 7$  での進化も示唆していた。本研究ではこれらの銀河・ダークハロー関係から得られる銀河形成への示唆について議論する。

### 銀河 c6 QSO 吸収線と遠方銀河を用いた原始銀河団領域の構造探査

向江 志朗 (東京大学宇宙線研究所 M1)

キューサー (以下、QSO) のスペクトルにみられる Ly $\alpha$  forest と重元素による吸収線は銀河間物質のプロープとなるため、宇宙の広い範囲にわたる物質分布への重要なアプローチとなる。形成過程にある銀河団である原始銀河団の物質分布は、 $z > 2$  では遠方銀河だけを用いて探査されてきた。しかしながら中性水素ガスの分布は調べられていない。

そこで、我々は SSA22 原始銀河団領域 ( $z \sim 3.09$ ) において背景 QSO のスペクトルにみられる吸収線を用いて原始銀河団に付随するガスの有無に迫った。まず、SDSS-III から得た 4 つの QSO スペクトルに見られる吸収線より中性水素の柱密度と赤方偏移分布を求めた。このデータと Magellan/IMACS で分光同定された銀河約 131 天体の分布と合わせることで SSA22 での中性水素と遠方銀河の 3 次元マップを描いた。その結果、銀河の高密度領域に中性水素による吸収の卓越がみられた。

本講演では銀河と中性水素の空間相関を議論することで銀河-銀河周辺物質 (CGM)-銀河間物質 (IGM) の関係を俯瞰する。

1. Yamada et al. 2012, AJ, 143, 79

## 銀河 c7 BCG progenitor candidate at $z \sim 8$ in the Abell 2744 field

石垣 真史 (東京大学宇宙線研究所 D1)

宇宙初期における銀河の形成を調べることは、銀河天文学のみならず宇宙論研究においても、構造形成モデルを検証する観点から重要である (Feng et al. 2015)。しかし、 $z \sim 7$  を超える銀河の観測は今のところ非常に小さな領域に限られ (e.g. Bouwens et al. 2015)、特に個数密度が小さな大質量銀河の性質を調べることは非常に困難である。Hubble Frontier Fields プロジェクトによる Abell 2744 銀河団フィールドの探査の結果、 $z \sim 8$  銀河の個数密度が平均密度の 120 倍を超える領域が発見された。このような高赤方偏移銀河の高密度領域は他には発見されていない。本研究では、Millennium Simulation (Henriques et al. 2014) との比較により、このような高密度領域がどのように進化するかを調べた。シミュレーション内で同じような密度を持つ領域は、 $z \sim 3$  で銀河団中心の明るい銀河 (BCG) に成長し、周囲の銀河を取り込みながら  $z = 0$  で  $10^{14} M_{\odot}$  程度のハロー質量を持つ銀河団に進化することがわかった。この結果をふまえ、本講演では高赤方偏移でどのように大質量銀河が形成されたかを議論する。

1. Feng et al. eprint arXiv:1504.06618
2. Bouwens et al. 2015, ApJ, 803, 34
3. Henriques et al. 2014. eprint arXiv:1410.0365

## 銀河 c8 すばる広領域深探査による銀河団の質量進化

玉澤 裕子 (東京大学宇宙線研究所 D1)

銀河団の形成や一般的な進化は観測的には未解明な面が多い。そこで、銀河団の質量進化を観測的に理解するため、 $z \sim 4.5$  のライマンブレーク銀河で構成される原始銀河団候補を探索した。使用した観測データは、Suprime-Cam で観測された SXDS 天域と、Hyper Suprime-Cam で観測された COSMOS 天域のデータである。探査の結果、SXDS 天域から  $z \sim 5$  において密度超過  $\delta$  が  $\delta = 1.7_{-0.5}^{+0.8}$  で、 $\sim 4\sigma$  の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。COSMOS 天域からは、 $z \sim 5$  において  $\delta = 4.3_{-1.6}^{+2.1}$  で、 $\sim 5\sigma$  の有意性をもつ原始銀河団候補を 1 か所見つけた。そこで、これらの原始銀河団候補の中心に存在するであろうダークハロー質量を、Millennium Simulation に基づく準解析的銀河形成モデルと light cone モデルを用いて推定した。その結果、それぞれ  $1.9_{-0.7}^{+0.9} \times 10^{12} M_{\odot} h^{-1}$ 、 $2.3_{-1.0}^{+1.8} \times 10^{12} M_{\odot} h^{-1}$  となった。さらに、これらの原始銀河団候補は  $z=0$  で、それぞれ  $3.2_{-2.3}^{+4.8} \times 10^{14} M_{\odot} h^{-1}$ 、 $3.6_{-2.6}^{+5.1} \times 10^{14} M_{\odot} h^{-1}$  のダークハロー質量を持つ銀河団規模の構造に進化すると推定された。

1. Chiang, Y.-K., et al. 2013. ApJ, 779, 127
2. Guo, Q., et al. 2011. MNRAS, 413, 101
3. Henriques, B. M. B., et al. 2012. MNRAS, 421, 2904

## 銀河 c9 $z < 1$ の非常に強い [O III] 輝線を持つ銀河の統計的性質

大城 円香 (愛媛大学 M1)

$z < 1$  の非常に強い [O III] 輝線を持つ星形成銀河に着目した、2 つの論文を紹介する。これらの非常に強い輝線銀河 (extreme emission line galaxies, EELG) は星質量が小さい矮小銀河で、活発に星形成を行っていて、ガスの金属量がかなり低い傾向があることがわかってきている。このような天体を詳しく調べることは、過去 80 億年の間に急速に進んだ低質量銀河の星質量集積の様子を明らかにすることに加えて、銀河の質量集積や化学進化の最初期の段階で働く物理機構を理解する上でも非常に重要である。

今回紹介する論文は、COSMOS 天域における分光サーベイのデータを使ってこれらの EELG を見つけて、その性質を調べた研究で、[1] では VIMOS Ultra Deep Survey を用いて比較的低光度の 31 個の EELG について、また [2] では zCOSMOS bright を用いて比較的明るい 165 個の EELG について調べている。これらの分光データに加えて、COSMOS サーベイの多波長データを組み合わせることで、EELGs の形態、星質量、星形成率、ガス金属量を推定し、それらの間の相関関係について銀河の形成・進化の観点から議論する。

1. Amorin et al. 2014, A&A, 568, L8
2. Amorin et al. 2014, arXiv, 1403.3441, v1

## 銀河 c10 wakelets の非線形相互作用による銀河の大局的渦状腕形成

熊本 淳 (東京工業大学地球生命研究所 (滞在) 東北大学天文学専攻 (所属) D1)

円盤銀河に存在する渦状腕構造の形成と進化に対して数値シミュレーションによる研究が多くなされている。孤立系円盤銀河での N 体シミュレーションなどにより渦状腕の振る舞いやパターン (渦状腕の本数や巻き込みの強さ) はよく理解されている。しかし、渦状腕の形成メカニズムそのものについては十分な理解がなされていない。近年の研究では局所的密度揺らぎ (wakelets) が接合することで大局的渦状腕を形成するという提案がなされている。しかし、個々の wakelets が接合するメカニズムの詳細な調査はなされていない。

そこで、本研究では wakelets が接合するメカニズムを詳しく調べる。N 体シミュレーションを用いて、安定な銀河円盤に摂動源を加え、人為的に wakelets を発生させ、それらの相互作用について解析を行う。同様の手法で wakelets を扱った研究も存在するが、分布が乱数的で個々の相互作用の解釈が難しい。本研究では、摂動源の数や配置を工夫することで、wakelets の接合メカニズムを明解にする。摂動源の配置が異なるモデルを比較することで、wakelets の非線形相互作用が大局的渦状腕を形成することを発見した。さらに今回発見した形成メカニズムは先行研究が示唆する渦状腕の振る舞いやパターンと矛盾しないことを確認した。

また、近年のシミュレーションによる研究は、比較的本数の多い渦状腕 (multiple-armed spiral) について「大局的渦状腕のパターン速度が各半径で星の回転速度と一致する」ことを示唆する。一方で、「大局的な渦状腕はより局所的なモードの重ね合わせである」という主張も存在する。今回の結果は、より高い視点からこれら 2 つの主張を統合する役割

を果たす。

1. D' Onghia, E., Vogelsberger, M., & Hernquist, L. 2013, ApJ, 766, 34
2. Dobbs, C., & Baba, J. 2014, PASA, 31, 35
3. Sellwood, J. A., & Carlberg, R. G. 2014, ApJ, 785, 137

## 銀河 c11 UltraVISTA を用いた赤方偏移 $z \sim 2$ における銀河の星質量関数

市川 あき江 (愛媛大学 D2)

銀河進化を理解する上で、銀河がいつどのように星形成を止めたのかわかることは大変重要である。銀河は大まかに、星形成活動が活発な star-forming 銀河と、星形成が終わり古い星で構成される passive 銀河とに分けることができる。特に、星形成の止まった passive 銀河の星質量関数 (各星質量をもつ銀河の個数密度) の進化に注目することで、いつ、どの程度の星質量を持つ、どれ程の数の銀河が星形成活動を止めたのかわかることができる。先行研究から、 $\sim 10^{11} M_{\odot}$  の星質量を持つ passive 銀河は  $z \sim 2$  から 1 にかけて個数密度が急激に増加していることが分かっている (e.g. Kajisawa et al. 2011)。しかし、passive 銀河は star-forming 銀河に比べ質量光度比が大きいため、高赤方偏移における低質量の passive 銀河ほど観測が難しく、低質量の passive 銀河の星質量関数の進化は明らかになっていない。そこで本研究では、広視野で深い近赤外領域のデータである UltraVISTA (McCracken et al. 2012) の Data Release 2 データと、すばる望遠鏡 Suprime-Cam による非常に深い  $z'$  バンドデータを用いることで、COSMOS 天域における  $z = 1.5 - 2.0$  の銀河の星質量関数を低質量側まで求めた。色選択法 ( $z' - J$  vs.  $J - K_s$ ) を用いて、 $z = 1.5 - 2.0$  の star-forming 銀河 (11146 天体)、passive 銀河 (840 天体)、星形成が終わったばかりで A 型星からの光が卓越している post-starburst 銀河 (406 天体) をそれぞれ選び出し、各々の星質量関数を求めた。得られた  $z \sim 2$  の passive 銀河の星質量関数は、現在のそれとは異なり、低質量側は星質量が軽くなるにつれて銀河の個数密度が減少するが、star-forming 銀河の星質量関数は、現在と同様に低質量ほど個数密度は増加することが分かった。一方、本研究により初めて明らかとなった post-starburst 銀河の星質量関数は、低質量側では銀河の個数密度が星質量に依らずほぼ一定である。従って post-starburst 銀河が時代と共に passive 銀河に加わると考えると、 $z \sim 2$  の時代以降低質量の passive 銀河は急速に増え始めようとしていることが示唆された。

1. Kajisawa et al. 2011, PASJ, 63, 403
2. McCracken et al. 2012, A&A, 544, A156

## 銀河 c12 銀河中心 BH の物質降着による角運動変化

加藤 広樹 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ D2)

銀河中心のブラックホール (以下 BH) の回転軸を調べると、銀河円盤の回転軸とずれている事が多々ある。BH も円盤も元は一つのガス塊等が収縮してできる為に、回転軸は一致しているのが進化過程としては自然である。ずれているのは、何らかの原因でどちらかの角運動量が変化すると考えられ、その為の方法としてガスの降着による角運動量

の流入により、BH の回転軸が変化される可能性を調べる事とした。回転軸の変化を調べる為、三次元シミュレーションを行い、BH へと降着する物質の角運動量の総量を調べる。この時、中心へと物質が落ちるには、物質が持っている角運動量を減少させる機構が必要であり、その為の機構として棒構造を考える。この棒構造はいわゆる棒銀河中の棒構造 (kpc) よりもずっと小さい (100pc) ものであり、観測によって 1/3 程の棒銀河の中に、大きい棒構造とは別に存在している事が分かっている。棒の存在により、物質は角運動量を抜かれて落下する事が知られており、BH への物質の降着はこれにより問題なく生じる。本研究ではこの降着の機構を調べる事によって、中心へと降着する物質の角運動量へ寄与するものとして、主にどのようなものがあるか、どの程度寄与するのかわかる。

1. I.Shlosman, J.Frank and M.Begelman Nature. 338 45S

## 銀河 c13 CFHTLenS/VIPERS を用いた $0.5 < z < 1.0$ の銀河の星質量 - DM ハロー質量比

坂東 卓弥 (愛媛大学 M1)

CFHTLS と VIPERS の非常に広視野の多波長データを用いて、 $0.5 < z < 1.0$  の銀河の stellar-to-halo mass ratio (SHMR) を銀河団スケールを含む幅広いダークマターハロー質量に渡って調べた論文 [1] を紹介する。宇宙の構造形成の枠組みの中での銀河の形成・進化を理解するためには、ダークマターハローの中での銀河形成がそのダークハローの性質とどのように関係しているのかわかることが非常に重要である。それを調べるための最も基本的な指標に、ダークマターハロー質量に対する銀河の星質量の比、SHMR がある。今回紹介する論文では、大規模銀河サンプルを用いて銀河のクラスタリング、galaxy-galaxy lensing、星質量関数を求めて、星質量とダークマターハロー質量の関係性を調べた。 $10^{12} \sim 10^{15} M_{\odot}$  のダークマターハロー質量にわたって SHMR を見ると、 $M_{h,peak} = 1.9^{+0.2}_{-0.1} \times 10^{12} M_{\odot}$  でピーク  $M_{*}/M_h = 0.025$  を持つことがわかった。central と satellite 銀河に分けてみると、ピーク付近では central 銀河が星質量を支配しているのに対して、銀河団スケールでは satellite 銀河からの寄与が星質量を支配していることが分かった。さらにこの SHMR の結果を semi-analytic simulation と比べると、central 銀河の SHMR を過大評価する一方で、satellite 銀河からの寄与を過小評価することがわかった。ポスターではこれらの結果についての考察も行う。

1. J.Coupon et al. ,Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Volume 449, Issue 2, p.1352-1379(2015)

## 銀河 c14 初期宇宙における巨大ブラックホール形成

鄭 昇明 (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

$z \sim 7$  に存在する超大質量ブラックホール (SMBH) が次々と観測されている。 $z \sim 7$  は宇宙が始まっておよそ 8 億年程度に対応しており、このような短い間に観測された  $10^9 M_{\odot}$  の天体を作るプロセスは未だ知られていない。例えば初期宇宙で形成される質量  $100 M_{\odot}$  の BH への降着を考える。このような種ブラックホールへの降着を考えても、観測された SMBH を形成する時間は足りない事が分かっている。これらの困難はより重たい種ブラックホールへの降着を考える事で回避できる。

近年、初期宇宙において非常に特殊な環境下で  $\sim 10^5 M_{\odot}$  もの質量を持つ超大質量星 (SMS) が形成される可能性が指摘された。非常に明るい銀河の近傍に存在するガス雲では、冷却剤の水素分子が解離することで冷却が非常に悪くなる事が知られている。このようなガス雲は高い Jeans 質量を持ち、大質量のガスが直接崩壊して1つの星を形成する事ができる。この星は死後、直接 BH に崩壊すると考えられている。この BH への降着を経て SMBH 形成に至るシナリオを「Direct Collapse (DC) シナリオ」と呼ぶ。

現在のところ、理想的な環境下で DC を検証した研究は数多く存在する。一方で、宇宙論的初期条件から始まって DC が起こりうるかを調べた計算はまだ無い。本研究では宇宙論的初期条件から始まって、星・銀河形成を準解析的に再現した結果から DC 候補ガス雲を見つける。このガス雲に対して、流体計算を行い DC が起こりうるかを調べる。現在のところ、20 個程の DC ガス雲に対して流体計算を行ったところ1つのサンプルについて大質量星が形成される事を確認した。この結果をもとに本講演では、今まで考えられてこなかった大質量星が形成される条件、また、現実的な DC ガス雲で形成される大質量星の性質について議論する。

1. Bromm and Loeb (2003)
2. Dijkstra et al (2008)

## 銀河 c15 Prospects of HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC): a large unbiased distant cluster survey at $z$ 1-1.7

山元 萌黄 (国立天文台三鷹 M2)

銀河団の成長と銀河の形態変化は  $z$  1-2 で最盛期を迎えることがこれまでの観測や理論から考えられている。従って、この時代において銀河団中の銀河の進化を評価することは非常に重要であるが、 $z_{\text{cl}}$  では今まで探し出した銀河団はおおよそ 10-20 個に限られる上、さらに、遠方においてはサンプル出来るものは非常に巨大な銀河団に限られ、得られる情報がサンプリングに大きく依存してしまう。そこで、申請者は上記の問題を克服する  $z$  1-2 の新たな原始銀河団探査として、すばる望遠鏡の新たな可視撮像装置 HSC を利用する。HSC はその広視野による高い観測効率を活かし、非常に広範囲かつ深い観測を行っている。この広視野観測と、2つの原始銀河団探査法を組み合わせた、HSC-HSC (Hybrid Search for Clusters with HSC) サーベイを推進する。2つの原始銀河団探査法とは、1. blue sequence サーベイ：星形成銀河の放つ [OII] 輝線を3枚の狭帯域フィルター (Narrow-Band filter; NB) で捉え、 $z$  1.4-1.7 の星形成銀河を探査する 2. red sequence サーベイ：広帯域フィルター (Broad-Band filter; BB) を用いて、銀河団銀河特有の色等級図における赤色の系列を用いて (Gladders & Yee 2001)、各  $z$  に対応した色選択を行い、 $z$  1-1.7 の星形成を終了した銀河を中心に探査する であり、銀河の密度超過領域を探り、原始銀河団を発見する。これまでのサンプル数が非常に少ないという問題は、HSC サーベイの従来になく広範囲かつ深いサーベイが解決する。BB によるサーベイ領域は 1400 平方度まで上り、red sequence サーベイのみだけで得られる数を考えても、約 5000 個というこれまでにない巨大な原子銀河団サンプルを構築する事ができる。また、2つの手法で星形成銀河と星形成を終えた銀河両方を指標にし、この時代の代表的な銀河種族を網羅できるということも HSC-HSC の非常に強みと言える部分であり、サンプルの種族の偏りも克服出来る。これまでにない銀河団の系統的な研究である HSC-HSC により、銀河

団中の銀河種族の割合の時間進化、銀河の形態が発現してきた赤方偏移 1-2 の銀河団中の銀河の進化と環境への依存性を、統計的に揺るぎなく検証することを目指す。今回はこのサーベイの展望、そしてサーベイのスタートとし部分的に行った red sequence サーベイの結果について報告する。

## 銀河 c16 Hyper Suprime-Cam による $z \sim 1$ の電波銀河探査

延原 広大 (愛媛大学 M1)

活動銀河核 (AGN) の一種である電波銀河は強い電波を放射し、その多くが大質量の楕円銀河を母銀河に持ち、銀河団を伴う傾向にある。そのため、電波銀河は巨大ブラックホールと宇宙の大規模構造およびそれらの進化を研究する上で重要な種族であると認識されている。特に、高赤方偏移の電波銀河 (High- $z$  Radio Galaxy; HzRG) が存在する領域は構造形成が早く進んでいる事が期待され、宇宙大規模構造の進化を研究する上で強い関心が持たれている。

しかし HzRG は稀な天体であり、 $z > 1$  で知られている天体数は数百天体と少ないため、新たな広域探査を行なう必要がある。これまでに行なわれた HzRG の広域探査の中でも特に重要なものとして、全天の約 4 分の 1 の領域を可視光 5 バンドで撮像した Sloan Digital Sky Survey (SDSS) と 1.4 GHz での広域電波観測で、電波源を観測した Faint Images of the Radio Sky at Twenty centimeters (FIRST) とを組み合わせた探査がある [1]。この探査では、SDSS の感度不足により、FIRST の電波源のうち約半分についての可視光対応天体が見つからない。つまり、より深い可視光広域撮像観測と FIRST のデータを組み合わせた HzRG 探査が必要である。

そこで我々は、すばる望遠鏡の超広視野カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC: SDSS より約 3 等級暗い天体まで検出可能) を用いたすばる戦略枠サーベイにより観測される領域 (1400 平方度) で HzRG 探査を検討している。しかし HzRG が稀な天体であるため、HSC による HzRG 探査は注意深く検討する必要がある。そこで本研究で我々は、Old Passive Evolution Galaxy (OPEG) に着目した。この天体に着目したのは、OPEG が電波銀河の母銀河であると考えられる大質量楕円銀河と似た進化過程を示す銀河だからである。また、OPEG は可視光帯の  $R, i', z'$  バンドの色選択だけで選出できることが報告されているためである [2]。以上を踏まえ、まずは HSC で  $z \sim 1$  の OPEG の選出を行い、FIRST とのマッチングを行なった。本講演では解析の評価と今後の展望について発表する。

1. Ivezić et al. 2002, AJ, 124, 2364
2. Yamada et al. 2005, ApJ, 634, 861

## 銀河 c17 分子ガスの観測から探る $z \leq 1$ での星形成率密度減少の起源

青野 佑弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

宇宙の星形成史の理解は銀河進化解明にとって重要である。これまでの研究から、宇宙の星形成率密度は  $z \sim 7$  から増加し  $z \sim 1-3$  で最も高くなり、 $z=0$  になるにつれて減少していることがわかっている (Madau & Dickinson 2014)。しかし  $z \leq 1$  で星形成率密度が下がる原因はまだよくわかっていない。これを説明するシナリオの一つに、 $z \sim 0$  の銀河は  $z \sim 1$  の銀河と比べて分子ガスの割合 ( $= M_{\text{gas}} / (M_{*} + M_{\text{gas}})$ ) が低いた

め星形成率密度もそれに伴って少なくなっているという考えがある。そこで本発表では  $z \sim 1-2.5$  の星形成銀河の分子ガスの割合について調べた Tacconi et al. 2013, ApJ, 768, 74 の紹介を行う。また、今後の研究の展望についても述べる。

Tacconi らは、 $z \sim 1-1.5$ ,  $z \sim 2-2.5$  で  $M_* > 2.5 \times 10^{10} M_\odot$ , 星形成率  $> 30 M_\odot/\text{yr}$  の一般的な星形成銀河 67 天体に対し CO(3-2) 輝線の観測を行った。サンプルセレクションに伴うバイアスを補正すると、平均的な分子ガスの割合が  $z \sim 1.2$  で 33%,  $z \sim 2.2$  で 47% となった。これを現在の値 (8%) と比較することで、分子ガスの割合が現在になるにつれて減少する傾向が見えた。今回の観測から分子ガスの消費時間 ( $t_{\text{dep}} = M_{\text{gas}}/\text{星形成率}$ ) は、 $\propto 1/(1+z)$  となることがわかった。分子ガスの割合  $\propto (\text{星形成率}/M_*)/t_{\text{dep}}$  という関係を用いて、各  $z$  での平均的な分子ガスの割合から星形成率/ $M_*$  の赤方偏移進化を求めると、紫外～赤外の SED フィッティングの結果から求めた星形成率/ $M_*$  と一致した。 $z < 1$  で星質量密度はほぼ一定であるため、これらの結果は分子ガスの割合が  $z=0$  に向けて小さくなったことにより  $z < 1$  において星形成率密度が減少したというシナリオを支持している。

今回の研究では分子ガスの質量の算出に銀河系内の変換係数を使用しているが、変換係数は金属量に依存するため、正しい分子ガス質量の算出には金属量が求まっているサンプルを用いる必要がある。我々のグループでは近赤外線の分光観測により金属量が求まった  $z \sim 1.4$  にある一般的な星形成銀河の大規模サンプルを構築しており、これらに対し CO 観測を行うことを計画中である。

1. Tacconi et al. 2013, ApJ, 768, 74
2. Madau P. Dickinson M., 2014, ARA&A, 52, 415

## 銀河 c18 大規模銀河形成シミュレーションで探るガンマ線バースト発生率の見積もり

加藤 貴弘 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

現在、すばる望遠鏡の Hyper Suprime-Cam (HSC) によって 300 晩に渡る大規模サーベイが計画されており、約 2 万個超の Ia 型超新星 (SN) の発見が予測されている。得られた膨大なデータからは、SN だけでなく継続時間の長いガンマ線バースト (LGRB) などの銀河系外の突発天体の理解が大きく進むことが期待されている。特に LGRB は赤方偏移  $z = 9.4$  で検出されるような (Cucchiara et al. 2011) 非常に明るい突発天体であるので、より遠方の宇宙を知る手がかりとなる。LGRB は SN に付随する現象と考えられ、その母天体は大質量星であることが示唆される。一般に大質量星はその寿命が短いことから、銀河においてその寿命以下の期間に形成された星質量、即ち星形成率 (SFR) の指標となる。これらのことから、LGRB の数をサーベイで見積もることにより遠方の星形成活動を探る試みが始まってきている。Roberson & Ellis (2012) では観測的な単位体積あたりの LGRB 発生率-星形成率密度 (SFRD) 関係が  $z < 4$  において、 $(1+z)^{0.5}$  に比例していることが示唆される。ここでは、ある閾値以下の金属量を持った銀河で LGRB が起こると仮定し、その関係の赤方偏移進化を説明している。しかし、観測的に見積もられた金属量-銀河星質量の関係を用いているため不定性が大きく、 $z > 4$  では既存の観測で得られた SFRD との不一致が生じてしまう。

本研究では Okamoto et al. (2014) による銀河形成シミュレーションの結果を用い、Roberson & Ellis (2012) による手法を参考に LGRB の発生率を算出し、観測的には外挿でしか見積もられていない  $z > 4$  における LGRB 発生率-SFRD の関係を考察する。Okamoto et al. (2014)

は観測的な星形成史を再現することに成功しており、計算された個々の銀河は金属量、星質量、星形成率のデータを持っている。本研究の結果は既存の観測 (Berger et al. 2013) や将来的にすばる HSC によるサーベイ等の結果と比較可能なものになり、LGRB による星形成史の探求の足がかりとなる。

1. Okamoto, T., Shimizu, I., and Yoshida, N., PASJ, 66, 70 (2014)
2. Brant E. Robertson and Richard S. Ellis .Apj.744.95 (2012)
3. E. Berger et al. Apj.779.18 (2013)

## 銀河 c19 空間分解された近傍銀河における星形成則の研究

照屋 なぎさ (名古屋大学、銀河進化学研究室 (研) M2)

銀河の進化を考える上で、星形成に関わる量を正確に評価することは本質的に重要である。単位時間あたりに作られた星の総質量を星形成率 (SFR) といい、星形成の活発さを表す指標の 1 つである。銀河の星形成率を知るためには、寿命の短い大質量星 (寿命  $10^{6-8}$  yr) がよい手がかりとなる。この大質量星は、紫外線 (UV) 領域にピークを持つ光を放射する。そのため、初期質量関数 (IMF) を仮定することにより、観測された紫外線量からその領域の大質量星の数を推測することができる。一方で、星形成を活発に行っている領域ではダストと呼ばれる  $1 \mu\text{m}$  以下の固体微粒子が形成されており、そのダストが UV を吸収し遠赤外線 (FIR) で再放射する。そのため UV の観測データのみから星形成率を推定すると過小評価になってしまう可能性があり、星形成率は UV と FIR の両方の効果を考えて見積もる必要がある。本研究では、GALEX (UV) と Herschel SPIRE (FIR) の撮像データを使用し、空間分解された銀河について星形成率を見積もった。また SDSS (可視光) と 2MASS (近赤外) の撮像データを用いて、星質量の密度と星形成率の密度の関係を調べ、グローバルな銀河の性質 (形態) との比較を行った。今回の夏の学校では、その最新の結果を報告する。

## 銀河 c20 COMING(CO Multi-lines Imaging of Nearby Galaxies) の初期成果:NGC2903 の観測

柳谷 和希 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

銀河の多様性やその進化を理解するためには、星の誕生メカニズムや、銀河の分子ガスの量や物理状態の関係などを調べることが重要である。そこで、我々は野辺山 45m 鏡と新マルチビーム受信機 FOREST を用いた、系外銀河の  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線と  $^{13}\text{CO}(J=1-0)$  輝線の同時観測プロジェクト (CO Multi-lines Imaging of Nearby Galaxies:COMING) を推進している。2015 年 4 月から 5 月にかけて、棒渦巻銀河 NGC2903 の CO 輝線観測を行い、 $^{12}\text{CO}(J=1-0) \cdot ^{13}\text{CO}(J=1-0)$  の両方で良質のマップを取得した。NGC2903 は過去に、IRAM30m 鏡による  $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  輝線観測が行われている。そこで今回取得した  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線のデータと、 $^{12}\text{CO}(J=2-1)$  輝線のデータを用い、銀河の各場所で 2 つの輝線の積分強度を比較した。その結果、NGC2903 では中心から円盤のどの場所においても  $^{12}\text{CO}(J=2-1)/^{12}\text{CO}(J=1-0)$  比がほぼ 1 に近いことがわかった。

1. Leroy et al. 2009AJ, 137, 4670L

## 銀河 c21 H<sub>2</sub>O ice を用いた ULIRG 内部における星形成活動の探索

道井 亮介 (宇宙科学研究所 M1)

一般に、赤外線での光度は星形成率を反映していると考えられている。この赤外線光度が太陽高度の  $10^{12}$  倍を超える天体は Ultraluminous Infrared Galaxy (ULIRG) と呼ばれ、銀河・星形成史において極めて重要な役割を果たす。

しかしながら ULIRG は大量のダストに覆われているため、内部が見通しにくいという特徴を持つ。それはつまり、ULIRG のどこで、どのように星形成が行われているのかを知ることが困難ということである。ULIRG 内部構造を調べる手段としては、これまではダストに含まれる酸化ケイ素 SiO<sub>x</sub> を用いる方法 (Spoon et al. 2006) などが知られている。しかし SiO<sub>x</sub> の昇華温度は  $\sim 1500$  K と高温であるため、星形成の母体である低温分子ガス・ダストの分布の研究には不向きである。

そこで ULIRG 中での星形成の母体を直接捉えるための手段として、氷 (H<sub>2</sub>O ice) に特徴的な  $3.1\mu\text{m}$  吸収線を用いた観測を提案する。H<sub>2</sub>O ice の昇華温度は  $\sim 150$  K であるため、H<sub>2</sub>O ice の分布はまさに低温ガス・ダストの分布を良く反映していると考えられる。

さらに、星形成の結果を反映する指標である多環芳香族炭化水素 (PAH) の観測と組み合わせることにより、ULIRG において一連の星形成活動がどこで、どのように行われているのかを知ることが期待される。

この波長  $3.1\mu\text{m}$  を用いた観測は地球大気の影響を受けやすく、また赤外線天文衛星「あかり」に固有な観測波長域にある。その上「あかり」は PAH の観測もカバーしている。すなわち、H<sub>2</sub>O ice の系統的研究のためには「あかり」を通した観測が最適である。本講演では、H<sub>2</sub>O ice 観測の意義とともに「あかり」を用いた具体的な解析方法について議論し、今後の ULIRG 内部での星形成活動に関する研究への展望を述べる。

1. Spoon, H. W. W. et al., 2006, ApJ, 638, 759

## 銀河 c22 IFU 分光による近傍の重力レンズ検出とレンズ銀河の IMF について

加藤 美保子 (東北大学天文学専攻 M2)

重力レンズの系を探すサーベイには様々な種類があり、分光によるもの、像の形状から検出するものなどがある。この2種類の長所を組み合わせる手法として Integral Field Unit (IFU) 分光による観測がある。IFU を利用し近傍の重力レンズの系を検出、初期質量関数 (Initial Mass Function, IMF) について議論した Smith et al. 2015 の紹介とともに、重力レンズサーベイと IMF について議論する。

1. Smith R. J. 2015, MNRAS, 449, 3441

## 銀河 c23 VERA による銀河系外縁部 HII 領域 IRAS21306+5540 の年周視差計測

手塚 大介 (鹿児島大学 M1)

銀河系回転曲線は、銀河系の構造を語る上で重要な物理量である。詳細な回転曲線を得ることができれば、銀河系の質量分布を議論することができ、ダークマター分布についても議論することができる。しかし太陽

円外の領域である銀河系外縁部の回転曲線は、未だ不定性が大きく、如何にして詳細な外縁部回転速度を測定するかが重要な問題となる。そこで我々 Outer Rotation Curve (ORC) プロジェクトでは、国内 VLBI 観測システム VERA を用いた外縁部天体の年周視差計測を進めている (e.g. Sakai et al. 2012)。

ORC 候補天体の一つである、HII 領域 IRAS21306+5540 (=Sh2-128) は、 $(l, b) = (97^\circ.53, +3^\circ.18)$  に位置する大質量星形成領域である。その北方の S128N 領域から静止周波数  $22.235\text{GHz}$  の水メーザーが検出されており、CO やアンモニア、水メーザーの観測から、2つの分子雲衝突の可能性も考えられている (e.g. Haschick & Ho 1985)。さらにアウトアーム付近に位置することが明らかになっている (Hachisuka et al. 2015)。

本発表では、2012年から2014年までの3年間に渡るモニター観測と、AIPSによる13epochの解析によって得られた年周視差から、導出された太陽-天体間の距離  $D$ 、3次元速度 ( $V_R, V_\theta, V_Z$ ) についてまとめ、さらに天体内部構造についても考察する。

1. Hachisuka et al., 2015, ApJ, 800, 2
2. Haschick & Ho, 1985, ApJ, 292, 200
3. Sakai et al., 2012, PASJ, 64, 108

## 銀河 c24 すばる望遠鏡 HSC で探る天の川銀河周辺の矮小銀河

本間 大輔 (東北大学天文学専攻 M1)

$\Lambda$ CDM 理論は宇宙の構造形成を上手く説明できるが、銀河系サイズの小規模構造で観測との矛盾が見られる。その一つが、銀河系の衛星銀河の数が理論で予測される数に比べて圧倒的に少ないという Missing Satellite 問題である。そこで、すばる望遠鏡の Hyper Suprime Cam (HSC) の観測データを用いて、天の川銀河周辺の新しい衛星銀河としての矮小銀河の発見を試みる。特に表面輝度が暗いものや  $400\text{kpc}$  付近の遠方のもののように、SDSS では発見されなかったものをターゲットにしている。本発表では、矮小銀河を発見するための簡単なアルゴリズムを紹介する。もし未発見の矮小銀河が多数発見されれば、Missing Satellite 問題の解決や、矮小銀河の分布が銀極方向に集中しているという特徴の真否を確かめることができる。

1. S.M.Walsh Ap.137450W(2014)
2. Girardi A&A.422.205G(2004)
3. Belokurov ApJ.654.897(2007)

## 銀河 c25 銀河の衝突合体における星形成フィードバックと星間物質

藤田 彩豊 (国立天文台三鷹 M1)

星は星間物質が重力収縮を起こして作られるが、それらが超新星爆発を起こすとき、星間物質の密度や星形成率に変化を与える。これを星形成フィードバックと呼ぶ。本講演では Hopkins et al. (2013) による、銀河の衝突合体において今まで明らかでなかった星形成フィードバックを考慮したモデルの数値流体シミュレーションとその結果のレビューを行う。このモデルは Hopkins らによる過去の論文で提唱されており、 $\sim 1\text{pc}$  スケールの解像度のシミュレーションにおいて、巨大分子雲で

のより小さなスケールの星形成フィードバックを考慮することができる。高い解像度でシミュレーションを行うことにより、個々の巨大分子雲や星団が形成されたり破壊されたりする様子までカバーすることができる。

星間物質の密度と星形成率の関係を表す Kennicutt-Schmidt 則 (KS 則) と呼ばれる法則がある。KS 則は観測により経験的に導かれている法則であるが、これが表れる本質的な要因はまだ明らかになっていない。KS 則を考えるためには高い解像度のシミュレーションや、星間物質の詳細な物理過程が必要となってくる。Hopkins らによるシミュレーションは今までのものよりはるかに解像度が高く、KS 則を議論することも可能となってくる。本講演ではこの研究によって導かれた様々な結果の中でも、特にこれに着目しレビューを行っていく。

1. Hopkins et.al., MNRAS 430, 1901-1927 (2013)

## 銀河 c26 VLBI を用いた最新の銀河系の構造解析について

倉持 一輝 (国立天文台三鷹 M2)

我々が住む天の川銀河は、宇宙を構成する基本的要素である銀河の基本的性質を理解する上で重要な天体である。特に 2000 年代初頭から、高い空間分解能を持つ VLBI を用いて銀河系内の星形成領域内に存在するメーザー源の三次元位置や運動を測定し、天の川銀河の構造や動力学を調べる研究が国立天文台の VERA プロジェクトをはじめとして精力的に行われている。

本講演では、これまでに測定されたメーザー源の位置や運動を元に銀河系の構造解析をした Reid et al.2009 及び Honma et al.2012、Reid et al.2014 を紹介し、天の川銀河の三次元構造の理解がどこまで進んできたかを概観する。また、永井、坂井、本間らの観測シミュレーションの結果を元に、今後の観測の展望についても紹介する。

現在、講演者は今後銀河系の構造解析上で課題となるメーザー源の位置決定精度の問題に対して、ビーム内位相補償を用いる事で検出出来る位置参照天体を増やす事で克服できるのかを研究している。最後に講演者の研究についても紹介したい。

1. Reid, M. J., et al. 2009b, ApJ, 700, 137
2. Honma, M., Nagayama, T., Ando, K., et al. 2012, PASJ, 64, 136
3. Reid, M. J., Menten, K. M., Brunthaler A., et al. 2014, ApJ, 783, 130

## 銀河 c27 Extremely gas-rich 矮小銀河における HII 領域の分布

高橋 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

銀河は金属元素をほとんど含まないガス雲から誕生し、星生成を繰り返しながら金属量を増加させる形で進化してきた。現在観測されている銀河の金属量には、星質量との強い相関が知られているが (mass-metallicity relation ; Tremonti et al. 2004)、銀河の星質量が少なくなるとつれて金属量が急激に低下することに大きな特徴がある。これは従来、矮小銀河からのアフトラフローによる金属汚染ガスの流出が主なメカニズムであると解釈されてきたが、その明確な観測的証拠は未だ存在せ

ず、それ以外の様々な可能性も提案されてきている。

この具体的なメカニズムの解明には、矮小銀河の中でも進化の初期状態にあると考えられる極端に gas-rich なもののが有効な観測対象になると考えられる。そこで我々は、近傍 (距離 <11Mpc) の  $M_{HI}/L_B$  比が大きな矮小銀河に着目し、銀河内のガス、星生成、並びに金属量の分布など、内部構造の詳細な観測から具体的なメカニズムに迫る研究を進めている。その第一段階として、星形成並びに現在の金属量の指標となる「HII 領域」を、銀河の外縁部に至る広域で探査した。観測には「すばる」望遠鏡 FOCAS を用い、 $H\alpha$  輝線の深撮像データを取得、解析した。今回は、特に近傍にあるため内部構造の詳細を見ることができる gas-rich な矮小銀河 DDO154 についての結果を紹介する。すばる望遠鏡の高感度を活かし、銀河の外縁部にこれまで報告されていない複数の HII 領域を発見した。また、すばるの高分解能によって、HII 領域の今まで知られていなかった詳細な形態も明らかになった。本発表では、HII 領域の広域での空間分布や光度関数を、他波長のデータと比較し議論する。

1. Tremonti et al. 2004 ApJ, 613, 898

## 銀河 c28 ASTE、野辺山を用いた衝突銀河サーベイ観測

道山 知成 (国立天文台三鷹 M2)

銀河と銀河の衝突は宇宙で頻繁に起こっている。銀河同士が相互作用することで潮汐力が働きガスが銀河の中心に落ちる。さらに中心へガスが流入することで、爆発的星形成や AGN のような非常に活発な状況を引き起こすと考えられている。理論シミュレーションでは、衝突の段階に応じて KS 則 (分子ガスの量と星形成率の関係) 上で進化すると考えられている。これまで、銀河の進化段階によって整理されたサンプルにおける分子ガスのサーベイ観測は行われていなかった。そこで我々は 6 個の衝突銀河ペア (12 個の銀河) の CO(3-2) 輝線を ASTE 望遠鏡を用いて 2014 年 11 月に観測した。また、野辺山 45m 望遠鏡を用いて、9 個の衝突銀河ペア (18 個の銀河) の CO(1-0) 輝線を 2015 年 5 月に観測した。これらの観測結果と、さらに 2015 年 6 月に予定されている ASTE 観測の結果を紹介する。

1. Bournaud et al. 2011, EAS, 51, 107
2. Iono et al. 2009, ApJ, 695, 1537
3. Wilson et al. 2012, MNRAS, 424, 3050

## 銀河 c29 銀河中心領域における磁気雲のダイナミクス

柿内 健佑 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

天の川銀河中心のガスの運動は非円運動であることが観測的事実として知られている。その非円運動の起源については未だ解明されておらず、銀河バルジ内の恒星による重力ポテンシャルの形状を非軸対称な棒形状であると考えてモデル化するなど、様々な議論がなされている。

一方で、宇宙空間の平均的な磁場の強さが  $\mu\text{G}$  程度であるのに対し、銀河系中心付近の磁場は  $\text{mG}$  程度であるという複数の観測的示唆がある。近年、観測された銀河系中心方向のガスのループ (Fukui et al. 2006) が、磁気浮力に起因するパーカー不安定性によって説明が可能であるとされており、このことは銀河系中心における動力学に磁場が少なからず

影響を及ぼしていることを示している。これを踏まえると、銀河中心のガスの非円運動の原因を探る上でも、磁場の影響を考慮した解析が必要であることが示唆される。

本発表の前半で紹介する Suzuki et al. (2015) では、磁場の影響を考慮した銀河系円盤のガス運動について 3 次元理想磁気流体での数値計算を行っている。本論文では、棒形状成分を考慮しない軸対称の重力ポテンシャルを考慮した場合でも、磁気活動によりガスの非円運動が励起されるとの報告がなされた。具体的には、銀緯方向のガス密度を積分して得た銀径速度図 ( $l-v$  図) が、観測で得られたガスの  $l-v$  図中の非円運動の特徴をよく再現している。しかし、本論文では、銀河面上のどの高度での磁気活動がこのような非円運動を励起しているのかが、まだ理解されていない。そこで本研究では、非円運動と磁気活動の高度依存性との関係を詳細に解析し、現在までの成果を観測との比較も含めて報告する。

1. T. K. Suzuki, Y. Fukui, K. Torri, M. Machida, & R. Matsumoto, 2015, Submitted to MNRAS (ArXiv: 150408065)
2. Y. Fukui. et al., 2006, Science, 314, 106
3. M. Morris, & E. Serabyn, 1996, ARA&A, 34, 645

## 銀河 c30 銀河衝突で探るアンドロメダ銀河のダークマターハローの外縁構造

楠 尚久 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

コールドダークマター (CDM) 宇宙における銀河形成シミュレーションの結果によると、ダークマターハロー (DMH) の外縁部密度は中心からの距離の 3 乗に反比例して減少すると予言されている。しかしながら、観測的な検証作業はその困難さから立ち遅れている。その一方で、アンドロメダ銀河 (M31) には 120kpc 以上に及ぶステラーストリームや、30kpc におよぶ星の作る殻状の構造等が次々と発見され、これらは銀河衝突の証拠とみられている。この銀河衝突の過程を詳細に調べることで、DMH の構造を知る手がかりを得る可能性がある。

Kirihara et al. (2014) では、M31 の DMH の密度分布をパラメータとした N 体シミュレーションを用いて M31 と矮小銀河の衝突の数値実験を行った。そして、その結果を観測で見られるステラーストリームやシェル構造と比較することで CDM モデルの予言を検証した。また、密度分布の変更が本質的に寄与するのか確認するため、DMH の質量を変化させるシミュレーションも行った。その結果、最も観測をよく再現する密度プロファイルは、CDM の予言である -3 乗の冪よりも、より距離の依存性が急な -3.7 乗であることが分かった。また DMH の質量を変化させた銀河衝突のシミュレーションから、観測された構造の再現のためには質量の大小ではなく密度分布が本質的に重要であるという結果が得られた。このことは CDM モデルの根幹を揺るがす問題かもしれない。

本発表では Kirihara et al. (2014) のレビューを行うとともに修士論文の研究計画について報告する。修士論文の研究では、Kirihara et al. (2014) の数値シミュレーションの検証作業に加えて、Miki et al. (2014) で予言された銀河衝突によって発現する漂うブラックホールの存在とその観測可能性について検討する。

1. T. Kirihara, Y. Miki, & M. Mori, 2014, PASJ, 66, L10
2. Y. Miki, et al. 2014, ApJ, 783, 87

## 銀河 c31 天の川銀河に存在する広大な極構造の形成

善光 哲哉 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

天の川銀河の周りには衛星銀河が存在している。衛星銀河の分布は銀河面にほぼ垂直に突き刺さった円盤状の DoS (Disk of Satellites) と呼ばれる構造を作っていることが知られていた。DoS 形成を説明するシナリオの一つとして潮汐力シナリオが考えられている。潮汐力シナリオとは、質量が大きい銀河がもう一方の銀河を潮汐力で引き伸ばし、ガスや星を剥ぎ取るというものである。先行研究では衛星銀河の観測データから軌道平面を求めて潮汐力シナリオの検証を行ったが、サンプル数が十分ではなかった。

今回紹介する Pawlowski et al. 2012 の論文では、サンプル数を増やすために若いハローに属する球状星団とストリームの観測データを用いてさらに詳しく潮汐力シナリオの検証を行った。潮汐力シナリオが正しければ、若いハローに属する球状星団やストリームも同じ軌道平面に存在すると考えられる。球状星団との分布とストリームの形状から軌道平面を求めた結果、若いハローに属する球状星団もストリームも DoS の軌道平面と極めて近い値をとることが分かった。これから DoS の形成は潮汐力シナリオによって説明できることが分かった。

さらに全く独自の視点から我々は潮汐力シナリオと銀河中心の星形成を結びつけて議論できると考えている。DoS に存在する衛星銀河は銀河円盤に落下し、天の川銀河の構造に影響を与えると考えられている。一方、銀河中心の星形成に必要なガスの流入に天の川銀河の構造が関わっていることが理論的に示唆されている。しかし観測から銀河中心の星形成と銀河の構造の間の関係性を十分に調べられていないので、今後の研究としてガスと同じように銀河中心に入るであろう星の観測を行い、銀河中心の星形成と潮汐力シナリオが関係していることを確かめたい。

1. M. S. Pawlowski, J. Pflamm-Altenburg and P. Kroupa. MNRAS. 423, 1109-1126 (2012)
2. Kroupa P. et al. A&A. 523, A32 (2010)
3. Matsunaga N., et al. Nature. 477, 188-190 (2011)

## 銀河 c32 ALMA を用いた衝突銀河 NGC1614 の CO 分子ガス観測

安藤 未彩希 (国立天文台三鷹 M1)

銀河はその進化過程において衝突を繰り返しながら成長してきたと考えられており、衝突銀河の研究は銀河の形成を考える上で重要である。衝突の影響によってガスが圧縮されて星形成が活発になるということがシミュレーションから示されており、その様子が多くの観測からも明らかにされている。

本研究で扱う NGC 1614 は、衝突の後期段階にあるスターバースト銀河であり、星形成領域 ( $SFR 50M_{\odot}yr^{-1}$ ) は核を中心としてリング状に分布していることが明らかになっている。また最近では、CO(1-0) による観測からアウトフローの存在も示唆されている。我々は ALMA によって得られた高分解能、高感度の CO 分子ガスデータを用いて、アウトフローも含めた星間物質の詳細な物理状態の検証を行っている。今回の観測によって得られたのは CO(2-1)、CO(1-0)、 $^{13}CO(2-1)$ 、( $^{13}CO(1-0)$ ) の 4 輝線である。今後は既存の他の分子ガスデータや他波長データと比較することで、より詳しい物理状態の考察も行っていく予定である。

1. R. Teyssier et al. ApJ. 720 L149 (2010)
2. C. K. Xu et al. ApJ. 799 11 (2015)
3. S. Garcia-Burillo et al. arXiv:1505.04705 (2015)

2. A.D'Ercole et al. 2008,MNRAS,391,825D
3. C.Conroy et al. 2011,ApJ,726,36C

## 銀河 c33 3次元分光サーベイ MaNGA で見た近傍銀河のアウトフロー

菅原 悠馬 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河のアウトフローは、銀河進化において星形成にフィードバックを与える重要な役割を担ったと考えられている。例えば、現在の楕円銀河では星形成が活発ではなく、進化のいずれかの段階で星の起源となるガスを銀河から抜く必要があると考えられる。このシナリオを確かめるためには高赤方偏移においてアウトフローを伴う天体を発見する必要があるが、現在観測されている天体数は十分ではない。これらの天体は次世代望遠鏡により3次元分光観測も含めた詳細な観測がなされると期待される。本研究の狙いは、将来の高赤方偏移におけるアウトフローの研究を見据え、近傍銀河におけるアウトフローの詳細を明らかにすることである。

Sloan Digital Sky Survey IV(SDSS-IV) の一つである Mapping Nearby Galaxies at Apache Point Observatory(MaNGA) は、6年かけて赤方偏移が 0.01 から 0.15 の近傍銀河約 10000 天体を観測する3次元分光サーベイである。我々は MaNGA で得られたデータを用いて吸収線の速度分布について調べている。空間2次元と波長1次元の、合わせて3次元の分光データを用いることより、単スリット分光データでは議論しづらい非等方な現象であるアウトフローの詳細に迫ることができる。本発表では解析の途中経過を報告するとともに、理論研究とも照らし合わせながら銀河のアウトフローについて議論する。

1. Bundy K et al., 2015, ApJ, 798, 7

## 銀河 c34 球状星団形成モデルの発展

荒田 翔平 (東北大学天文学専攻 M1)

球状星団は星のダイナミクスとその進化の関係を調べるうえで良い実験室である。近年、高感度の観測により球状星団中の星々について次々と詳細が明らかになってきた。とくに球状星団の年齢や、内部に様々な金属量の星が存在すること、銀河中心からの距離と metallicity の関係などがよく分かっている。しかし一方で、観測から得られたこれらの条件を十分満たすように球状星団の形成モデルを構築することは、未だ議論の最中にある難しい問題である。Trenti et al. 2015 はハローとハローの merging の結果、球状星団が形成されるというシナリオを提案した。このシナリオでは、まず major merger によって水素原子冷却の閾値を超えたハロー  $M_h \sim 10^8 M_\odot$  の中心で第1世代の星団が生まれる。つづく minor merger によって持続的に供給されるガスが AGB の化学汚染を薄めることで、金属量の様々な第2世代の星団が生まれると予想される。高解像度の数値シミュレーションから、このシナリオで見積もられた最も古い球状星団の年齢は 13Gyr であり、観測より知られている年齢と一致する。また銀河中心の空間分布や DM の剥ぎ取りなど多くの点で観測結果をよく再現する。今回の講演では過去の形成モデルとこの論文を比較検討し、今後の展望を議論する。

1. M.Trenti, P.Padoan & R.Jimenez 2015,arXiv150202670T

## 銀河 c35 宇宙磁場解析における RM-CLEAN 法の評価方法とその指標

宮下 恭光 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

宇宙には恒星、銀河、銀河団など様々なスケールで磁場が存在している。その宇宙磁場を解析する方法として、我々はファラデー回転という現象を用いている。これは、偏波が磁気流体中を通過すると偏波面が回転する現象で、その回転角は波長の二乗に比例し、比例係数 RM は視線方向の電子密度と磁場の情報を含んだ積分値として表される。しかし、RM を用いた手法では、得られる情報が視線方向の積分量であるので、磁場や偏波強度の分布が分からないという問題がある。そこでこの問題を解決するために RM-synthesis という新しい手法を用いる。これは視線方向の積分量でしか得られなかった偏波強度や磁場の情報を断層的に解析する手法である。式としては、偏波強度をファラデー分散関数という磁場の情報が入った関数のフーリエ変換の式で表す。しかし RM-synthesis にも観測帯域の制限が原因で、得られるファラデー分散関数が不正確なものとなるという問題がある。その問題を解決するのが RM-CLEAN による修正である。RM-CLEAN 法は、RM-synthesis によって得られた不正確なファラデー分散関数をより正確に近いものにするものである。現在、ある観測データ P を得たとき、RM-CLEAN を行った結果を評価する指標があまり確立されていない。先行研究では、RM-CLEAN を行ったときに false signal という誤ったシグナルがどういう状況下で発生するか系統的に調べられていた。本研究では、それに加えて二乗検定などで用いられる chi-square を利用し、RM-CLEAN による結果をどのように評価すればよいか、視線上に存在する複数の銀河のように、source が 関数二つで表される簡単な状況でシミュレーションを行った。

1. Brentjens,M.A.; de Bruyn,A.G. 2005, A&A 441, 1217-1228
2. Heald, G., Braun, R., & Edmonds, R. 2009, A&A, 503, 409
3. Kumazaki, K., Akahori, T., Ideguchi, S., Kurayama, T., & Takahashi, K. 2014, PASJ, 66, 61

## 銀河 c36 銀河団の FUNDAMENTAL PLANE

丸橋 美香 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

過去の研究により、X 線で光る多数の銀河団のコア半径、中心のガス密度、温度を三次元対数グラフにプロットすると、それらは FUNDAMENTAL PLANE を形成することが知られている。これは銀河団が二次元パラメータで表現されることを示している。また FUNDAMENTAL PLANE 上のデータ点は帯状に分布し、観測から知られている X 線光度 - 温度関係はこの帯の断面を見たものであることも示されている。しかし、近年では、銀河団の構造はコア半径よりも、NavarroFrenkWhite(NFW) profile でよく表現されることが知られている。そのため私は FUNDAMENTAL PLANE が NFW profile でも再現できるかどうかという問題に注目することにした。具体的には、最新の観測データを用い、NFW profile に基づいた銀河団の観測データが、やは

り2次元の FUNDAMENTAL PLANE で表現できるかどうか調べた。  
また FUNDAMENTAL PLANE のパラメーターから、銀河団の構造と  
進化の関係について検討した。

1. Fujita & Takahara 1999a, 1999b

.....

# 太陽・恒星分科会

For Whom the Stars Shine

|      |  |
|------|--|
| 日時   | 7月28日 10:15 - 11:15, 13:30 - 14:30 (招待講演: 鳥海 森 氏)<br>7月29日 16:30 - 17:00, 17:15 - 18:15, 18:30 - 19:30 (招待講演:高妻 真次郎 氏)   |
| 招待講師 | 鳥海 森 氏 (国立天文台)「シミュレーションと観測から探る太陽活動領域・フレア現象」<br>高妻 真次郎 氏 (中京大学)「連星系の食の周期変動を探る」  |
| 座長   | 加納龍一(東京大学 M2)、野津湧太(京都大学 M2)、兼藤聡一郎(中央大学 M2)、三宅梢子(中央大学 M2)   |
| 概要   | <p>近年の太陽・恒星研究では、数多くの新しい観測が計画・実行されてきています。太陽研究に関しては、2006年から行われてきた日本の Hinode 衛星による太陽表面の微細構造の観測に加えて、SDO 衛星による紫外線から極端紫外線における多波長でのフレア観測、2013年に打ち上がった IRIS 衛星による紫外線分光観測などが多くの成果をあげつつあり、今年の夏には CLASP ロケットも新たに打ちあがります。また恒星研究においても、これまでのすばる望遠鏡や Kepler 衛星、国際宇宙ステーションに設置の全天 X 線サーベイ MAXI の観測に加えて 2013年には位置天文衛星 GAIA が観測を開始し、今後は京都大学の 3.8m 望遠鏡や ASTRO-H による恒星観測も期待されています。</p> <p>このように様々な観測データが得られることにより、太陽と他の恒星を関連付けた研究の重要性も増してきました。新たな観測と理論や数値シミュレーションの総合力をもって太陽・恒星ともに研究を大きく前進させる時期が来ています。</p> <p>本分科会では太陽・恒星の幅広いテーマを取り上げ、広い角度から太陽・恒星の全体像を把握することを目指します。この試みにより専門分野を越えて多くの議論が行われ、知識の共有や新たな発見が生まれることを期待しています。</p> <p>さらに招待講演では太陽・恒星分野の第一線で活躍されている研究者を2名招待し、最新の研究を紹介していただきます。最先端の研究を肌で感じ、参加者のさらなる研究意欲をかきたてられることでしょう。皆が持っている太陽・恒星に関する知識やアイデアを結集し、本分科会が日本における太陽・恒星の研究をさらに加速させるエネルギー源となるよう期待しています。</p> |

鳥海 森 氏 (国立天文台)

7月28日 13:30 - 14:30 B会場

## 「シミュレーションと観測から探る太陽活動領域・フレア現象」

ガリレオが望遠鏡を通して黒点を観測して以来、多くの研究者がその謎に迫ってきた。しかし、400年以上にもおよぶ観測にもかかわらず、未だに黒点の形成過程は完全には解明されていない。また、黒点を含む「活動領域」は、太陽系最大の突発的エネルギー解放現象である「太陽フレア」を通じて地球近傍にも擾乱を引き起こすことが知られており、これらは決して遠い世界の話ではないといえる。さらには、近年、多くの太陽型星においてもフレア現象が報告されており、活動領域形成からフレア発生までをつなぐ一貫した描像の確立には、太陽物理学の枠組みにとどまらない幅広い視野が必要である。このような天体プラズマ現象を理解するためには、観測データ解析と理論研究（おもに数値シミュレーション）という代表的な2つの手法がとられる。両者は密接な相補的關係にあり、現在の太陽物理学においては観測と理論の比較検討がますます重要となっている。講演では自身の観測・シミュレーション研究を紹介しつつ、活動領域やフレア現象についてレビューし、さらに将来の方向性について議論する。特に、専門分野の垣根を越えて多くの議論ができるよう心がけたい。

高妻 真次郎 氏 (中京大学)

7月29日 18:30 - 19:30 B会場

## 「連星系の食の周期変動を探る」

連星系の進化は、2つの単独星の進化を考えればよいというわけではなく、連星間で引き起こされる天体現象や相互作用が、連星系の進化に大きな影響を与えることもある。したがって、連星系特有の天体現象をくわしく調べることは、連星系の進化過程を理解するうえでも重要な役割を果たす。

食連星とは食による光度変化を示す連星系で、その光度曲線には周期的な極小が現れる。しかし、食の現れる周期は一定とはならず、時間とともに変動する場合もある。原因として、連星間での質量移動や質量放出、角運動量損失、磁場の影響、第3の天体による影響などが考えられているものの、各要因の寄与の大きさなどははっきりとは分かっていない点も多い。さらに、周期変動を起こす要因の中には、連星系の進化にも大きな影響を及ぼすものもあり、食の周期変動をくわしく調べることは、変動の原因を究明するのみならず、連星系の進化過程を理解するための糸口にもなり得る。

食の周期変動の精査には、できるだけ時間分解能の高い（少なくとも食の周期以下の）長期間にわたる測光データが必要となる。Kepler宇宙望遠鏡は、トランジット法による系外惑星の探索を主目的のひとつとしており、最長4年ほどにわたる時間分解能の高い測光データを取得している。これは食連星を調べるといっても最適であり、我々はこのデータを利用して、食の周期変動に関する研究を進めている。

講演では、食連星そのものや食の周期変動の調べ方および関連した研究のレビューとKepler望遠鏡のデータを使った食連星の研究について紹介する。

恒星 a1 Detailed analyses of Lithium abundances in ultra metal-poor stars

松野 允郁 (国立天文台三鷹 M1)

銀河系ハローに多く存在する金属欠乏星においては Li の含有量は金属量によらずほぼ一定となっており、星は [Li/H] vs. [Fe/H] 図上で Spite plateau と呼ばれる水平な線に沿って並ぶことが知られている。Spite plateau の存在から金属欠乏星に含まれる Li はビッグバン元素合成起源だと考えられている。しかし、近年の観測結果により、Spite plateau に関連して以下のような問題があることがわかっている。(i) 宇宙マイクロ波背景放射の観測から得られた宇宙論パラメーターを採用するとビッグバン元素合成理論から予想される組成比と比べ、金属欠乏星の Li の含有量は 3 倍ほど少ない。ビッグバン元素合成理論が正しいとすれば、星の表面の Li を破壊するプロセスが必要とされる。(ii) [Fe/H] < -2.5 と、金属量が極端に低い超金属欠乏星の領域では Spite plateau より Li の量が少ない星も多く、Li の含有量には大きなばらつきが生じている。また、金属量が減るにつれ、Li の平均含有量は減っているように見える。ただし現在までのところ、[Fe/H] < -3.5 の星の観測例は限られており、超金属欠乏星における Li の含有量の議論にはより多くの超金属欠乏星の観測が必要とされている。特に金属欠乏星で多くみられる炭素過剰星の Li 組成の調査は必要だと考えられる。

まず現在知られている課題の詳細と現在までに行われている理論的な研究について紹介する。特にデータの少ない超金属欠乏星における Li の含有量については詳細に説明をする。また、超金属欠乏星のスペクトルから Li の含有量を求めるデータ解析の手法についても説明し、恒星の温度や表面重力といったパラメーターが最終的に得られる Li の含有量にどのような影響を及ぼすかについての考察を行っていく。特に大きな影響を及ぼすパラメーターについてはその決定手法についても詳細を述べる。最後に、超金属欠乏星での Li の含有量のデータを増やすことを目的とした研究の今後の展望について述べる。

1. Spite, F., & Spite, M. 1982, A&A, 115, 357
2. Masseron, T., Johnson, J. A., Lucatello, S., et al. 2012, ApJ, 751, 14

恒星 a2 強い X 線放射を示す太陽型星の高分散分光観測

野津 湧太 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

フレアは、黒点周辺の磁気エネルギーが突発的に解放される爆発現象である。私達は、ケプラー宇宙望遠鏡の測光データの解析から、スーパーフレア (最大級の太陽フレア (~10<sup>32</sup>erg) の 10-10<sup>4</sup> 倍のエネルギーを解放する巨大フレア) を起こす太陽型星 (G 型主系列星) を多数発見した ([1] 他)。さらに、発見したスーパーフレア星のうち 50 天体について、すばる望遠鏡 HDS を用いて高分散分光観測を行い、測光観測から推定された巨大黒点の存在や自転速度が、分光観測で確認された ([2], [3])。今後は、建設中の京大岡山 3.8m 新望遠鏡を用いた観測も推進し、スーパーフレア星の特徴や太陽でのスーパーフレアの発生可能性などについて更なる研究を行う予定だが、それにはより明るい天体を全天の様々な領域で多数発見することが欠かせない。そこで私達は、X 線観測衛星 ROSAT による全天サーベイで受かった星のうち、これまで連星の報告はない太陽類似星 49 星について、岡山 188cm 望遠鏡 HIDES で高分散分光観測を行った。フレア活動が活発な天体は、強い X 線を示す事が期

待されるので、X 線源と同定されている星を詳しく調べれば、比較的近傍に存在する太陽型のスーパーフレア星や将来スーパーフレアを起こす可能性のある星の探査につながると期待される。

観測した 49 星のうち 7 割以上が、連星の証拠を示さず、温度等の大気パラメーターも太陽型星で矛盾ないことを確認した。次に、星の彩層活動の良い指標である Ca II 8542 線や H $\alpha$  線の強度を調べた。その結果、X 線強度の強い星は、Ca II 線や H $\alpha$  線で見ても巨大黒点の存在が示唆されると分かった。吸収線の広がりから測定した射影自転速度 ( $v \sin i$ ) の値は大きい傾向にあったが、太陽程度 (~2km s<sup>-1</sup>) の星もあった。今後は、スーパーフレア星の活動性の長期変動探査 (Ca II 線など利用) の候補星として、今回の観測天体を活用していきたい。

1. Maehara, H. et al. 2012, Nature, 485, 478
2. Notsu, Y. et al., 2015, PASJ, doi: 10.1093/pasj/psv001
3. Notsu, Y. et al., 2015, PASJ, doi: 10.1093/pasj/psv002

恒星 a3 X 線天文衛星「すざく」搭載広帯域全天モニター WAM を用いた 太陽フレアカタログの構築

矢部 聖也 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

太陽フレアとは、外層大気において発生する磁気リコネクションにより、磁気エネルギーが、プラズマを加熱する熱エネルギーや、加速させる運動エネルギーなどに変換される過程であり、1 個のフレアで発生するエネルギー量は 10<sup>29</sup>10<sup>32</sup> erg にもなる太陽系最大の爆発現象である。また太陽フレアでは大規模な粒子加速に伴い、電波からガンマ線までの広帯域にわたる電磁放射の発生現場であることが知られている。しかし、硬 X 線放射における加速機構は未だによくわかってはいない。Endo et al. (2010) [1] では、X 線天文衛星「すざく」搭載の広帯域全天モニター (Wideband All-sky Monitor, WAM) により、2005 年から 2009 年までに検出された 108 個の太陽フレアを系統的に解析しカタログにまとめた。そして、広帯域にわたる電磁放射の中でも特に硬 X 線帯域における太陽フレアの特徴を明らかにし、アメリカの気象観測衛星 GOES による軟 X 線帯域の観測結果との比較から、スペクトルの形によらず軟 X 線および硬 X 線帯域での X 線強度の間に正の相関があることを示した。

我々は 2010 年から 2011 年の 2 年間に WAM で検出された 166 個の太陽フレアについても同様の方法を用いて系統的解析を行いカタログにまとめ、今回の観測期間においても Endo et al.(2010) を支持する結果を得た。本講演ではこれらの詳細な解析方法とその解釈について議論する。

1. Endo et al.(2010), A Catalog of Suzaku/WAM Hard X-Ray Solar Flares . PASJ 62,13471348,

恒星 a4 広がって分布する磁場領域における太陽フレアの形成についての研究

吉田 正樹 (国立天文台三鷹 M1)

太陽表面ではフレアと呼ばれる爆発現象が頻繁に起きている。フレアは解放エネルギーによってクラス分けされているが、中でも一番エネルギーが高い X クラスフレアは地球への影響も懸念されている。フレア

は黒点など磁場の強い領域で、様々な波長で明るく観測されている。フレアの形成理論 (CSHKP モデル) としては、接近した 2 つの逆極性の磁場の磁力線がつなぎ変わる磁気リコネクションによって、磁気エネルギーが熱エネルギーに変換され、加速されたプラズマが太陽の彩層でリボン状の構造として見られる。

しかし、実際の太陽の表面では逆極性の磁場は複雑に分布しているので現象を理解することは難しい。2014 年 12 月 20 日 0:11(UT) に起きた X クラスフレアでは離れた逆極性の磁場でも長く伸びたりリボンが観測された。これは接近している逆極性の磁場によって発生するフレア形成理論からは単純に説明出来ない。本研究ではこの磁場が複雑に広がった場合について、フレアリボンの形に注目し、このフレアがどのような原因で発生し、形成されたか解析結果と考察を踏まえて報告する。

さらに、エネルギーを解放する速さを表す reconnection rate も見積もり、単純な構造のフレアの場合と比較することで、複雑な構造をしたフレアでの reconnection rate についても考察する。reconnection rate を見積もることで、このフレアによってどのくらいのエネルギーが太陽大気に散逸されたかが分かる。

1. A. Asai, T. Yokoyama, et al. ApJ, 611, 557 (2004)

## 恒星 a5 彩層衝撃波のスペクトル観測から迫る太陽フレアのエネルギー解放過程

鄭 祥子 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

太陽で全波長域にわたり数分から数時間程度増光する現象を太陽フレアといい、これは磁気リコネクションによって駆動されていると考えられている。磁気リコネクションとは、磁場の散逸により磁場のトポロジーが変化することで磁気張力が生じ、磁場のエネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに急速に変換される現象である。フレアの際、彩層は H $\alpha$  線や Ca II H & K 線などで強く輝き、ラインは輝線となる。これらラインは redshift していることから、次のことが示唆される [1][2]: コロナで磁気リコネクションが駆動され高エネルギー電子が生じるとその一部は磁力線に沿って高密度な彩層に突入し彩層上部を急激に加熱する。その結果彩層ガスは急膨張し、上方への噴出流と下方に向かう衝撃波を形成する。この下降流が彩層ラインの redshift の起源だと解釈されている。つまり、彩層スペクトルの観測からフレアのエネルギー解放の時間発展を推測できると期待できる。またフレアのエネルギー解放領域で微細構造が発見され [3]、間欠的なエネルギー解放が示唆されたが、これが彩層への間欠的なエネルギー注入として見える可能性がある。もしこれを彩層のスペクトルで観測できれば、未だ理解されていないコロナ中のエネルギー解放過程に迫ることができるはずである。

我々は多波長同時高空間時間分解能データを取得し、スペクトルの形と時間空間発展から彩層衝撃波とフレアのエネルギー解放過程について調べようと考えた。観測した太陽フレアは 2014 年 11 月 10 日 23 時 55 分 UT に発生した。IRIS 衛星による Mg II h&k 線などの彩層ラインを使用した。その結果、同じ場所で時間スケールが 9.5 sec 以下の間欠的な redshift が確認され、これにより間欠的なエネルギー解放が実際に起きている可能性を示すことに成功した。本講演では、彩層衝撃波とフレアのエネルギー解放過程の関係について議論する。

1. Ichimoto, K. et al., Solar Phys., 1984, 93, 105
2. Shoji, M. et al., PASJ, 1995, 47, 239
3. Takasao, S. et al., ApJ, 2012, 745, L6

## 恒星 a6 プラズマ噴出現象に絡む磁場の構造について太陽観測がもたらす理解

坂上 峻仁 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

宇宙には様々な高速噴出流 (ジェット) があり、そのそれぞれに加速メカニズムが提案されている。中でも宇宙に普遍的にあるねじれた磁場構造をもつジェットは磁気圧で駆動されることが示唆されている [1]。一方、この加速メカニズムはプラズマの運動が磁場に支配される環境を前提としているにもかかわらず、多くの場合、その環境はジェットの発生源近傍に期待されるばかりで観測的検証が十分に進んでいない。

もっとも、この加速メカニズムには特徴的な空間スケールがないため、ジェットの発生源近傍を観測できずとも、より詳細な観測が可能な太陽でのジェット現象に注目し、それについての理解を応用することはできる。太陽でも、彩層プラズマが上空のコロナに向かって加速、噴出されるジェット現象 (サージ) が H $\alpha$  線などで観測されており、その加速メカニズムにねじれた磁場が関係していることが示唆されている [2]。このことから、宇宙一般のジェット現象の理解を検証するにあたり、サージの観測が極めて有意義であることが分かる。

そこで今回、我々は 2014 年 11 月 11 日に京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡で観測されたサージの解析を行った。観測では、高空間・長時間・高波長分解能のデータを取得でき、これからサージの視線速度場の時間発展を議論できる。特に今回の解析ではサージのねじれの運動や視線方向の構造など、その 3 次元構造を定量的に把握できたほか、サージの中で独立して運動する複数のプラズマの塊に注目し、その加速メカニズムの空間的構造を見ることもできた。同様の議論は幾つかの先行研究でもされているが [3]、これらでは観測的制約などによりサージの 3 次元構造と加速メカニズムの空間的構造を結び付けた考察ができていないため、本発表では特にその点について詳しく議論したい。

1. Meier, Koide, Uchida 2001, Science, 291, 84
2. Shibata & Uchida 1985, PASJ, 47, 239
3. Roy 1973, Sol. Phys., 32, 139

## 恒星 a7 「すざく」による激変星 V1223 Sgr の白色矮星質量の推定

和田 有希 (東京大学牧島中澤研究室 M1)

激変星 (Cataclysmic Variable; CV) は、強磁場の白色矮星と晩期型の低質量星が連星系を構成し、低質量星から白色矮星への質量降着によって可視光から X 線で明るく輝く天体である。CV は白色矮星の磁場の強さによって分類され、 $10^{6-7}$  G 程度のもは Intermediate Polar (IP) と呼ばれる。低質量星の重力ポテンシャル (Roche lobe) からあふれたガスは、降着円盤を形成しながら最終的に磁場に沿って白色矮星の磁極へ降着し、降着柱を形成する (e.g. Yuasa et al. 2010)。速度を持ったガスは降着柱内での定在衝撃波により  $10^{7-8}$  K まで加熱され、熱的制動放射によって硬 X 線を放出する。このプラズマ温度を測定することで重力ポテンシャルを推定でき、白色矮星の質量と半径の比を求めることができる (e.g. Hayashi et al. 2011)。

V1223 Sgr は典型的な IP である。プラズマからの輝線や熱的制動放射の連続成分は、広帯域にわたりエネルギー分解能の高い X 線天文衛星「すざく」での観測が適している。2014 年 4 月に「すざく」衛

星で 150 ksec 観測され、XIS 検出器 (0.5–10 keV) ではスペクトルに He-like、H-like、中性の鉄  $K\alpha$  線が、HXD 検出器 (15–60 keV) では 40 keV まで硬 X 線の連続成分が検出された。降着柱を満すプラズマは衝撃波の直下で最も高温で、白色矮星表面に近づくにつれ放射冷却されると仮定し、得られた 4–40 keV のスペクトルに対し、多温度の光学的に薄いプラズマ放射モデルを適用した。プラズマの最高温度は  $28.4 \pm 3.0$  keV と測定され、白色矮星の質量  $M$  と半径  $R$  の比は  $(M/M_{\odot})(R/R_{\odot})^{-1} = (6.2 \pm 0.7) \times 10^2$  と求まった。白色矮星の  $M$ - $R$  関係より、質量は  $0.70 \pm 0.09 M_{\odot}$  と導出された。この結果は低質量星の質量、連星系の軌道周期、軌道半径からケプラー則によって推定された質量  $0.93 \pm 0.12 M_{\odot}$  (Beuermann et al. 2004) と 25% の範囲で一致している。今後モデルに改良を加えることにより、X 線観測による白色矮星の質量推定精度を向上できると期待される。

1. T. Yuasa et al., A&A, 520, A25 (2010)
2. T. Hayashi et al., PASJ, 63, S739-S750 (2011)
3. K. Beuermann et al., A&A, 419, 291-299 (2004)

## 恒星 a8 動的ペチェック過程による磁気リコネクションの新たな高速化機構

柴山 拓也 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M2)

磁気リコネクションは磁力線のつながりにより磁気エネルギーを運動エネルギーや熱エネルギーに変換する過程であり、Yohkoh 衛星以後の観測結果などから太陽フレアは磁気リコネクションによって引き起こされると考えられている。しかし、フレアが起こる太陽コロナ中は電気抵抗が非常に小さく、Sweet-Parker 理論によると効率的にリコネクションを起こすのは難しい。Petschek 理論では磁気拡散領域が非常に小さくなるため太陽コロナのパラメータでも効率的にリコネクションを起こすことができるとされたが、これまでの数値計算によると Petschek リコネクションは一樣抵抗では安定に存在せず、これを実現するには異常抵抗モデルなどで磁気拡散領域を局所的に維持するためのメカニズムが必要であることが示唆されている。このため、Petschek リコネクションが自発的に発生し得るかという問題は未だに解決していない。

我々は今までよりも大きなシステムサイズで精密な数値計算を行うことで、一樣抵抗モデルであっても非線形発展段階で Petschek 理論で予想されるスローショック構造が自発的に形成することを発見した。この過程では非線形発展により形成した大きなプラズモイドが電流シート内を速い速度で運動することが重要な役割を担っており、スローショック構造は運動するプラズモイドの前面に形成する。プラズモイドは電流シートからの排出と新たなプラズモイドの形成を繰り返すため、この過程は非定常的に繰り返し起こり磁気リコネクションを進行させる。これによりリコネクションの高速化が起こり、太陽フレアを説明するのに必要とされる 0.01 程度のリコネクション率が得られることを明らかにした。

## 恒星 a9 偏光観測により得られた MHD 波動の性質 -Fujimura&Tsuneta(2009) 再考-

加納 龍一 (東京大学地球惑星科学専攻 M2)

磁気流体 (MHD) 波動は、コロナ加熱問題を理解のための重要な役割を担っていると考えられている。これまでに MHD 波動の観測例は多数報告されているが、実際に MHD 波動が散逸して熱化していく様子は観測

された例がない。

散逸過程を検出するためのアプローチとして、波動の Poynting flux を見積もりエネルギーがどれだけ輸送されているのかを知ることは重要である。過去に太陽大気における MHD 波動の Poynting flux を見積もった研究は、Fujimura&Tsuneta (2009) が代表例として挙げられる。この研究の延長として、我々は先行研究から新たに以下の二点を改良し解析を行った。

- (1) 観測の時間分解能を向上し、波形についての情報を得る
- (2) 低空を観測できる Hinode 衛星と上空を観測できる IRIS 衛星で同時観測を行い、高度ごとの情報を得る

本公演では (1) から得られた結果について主に紹介する。時間分解能を向上させた結果、過去の研究で MHD 波動だと考えられていたものは太陽表面の固有振動が引き起こす観測高度の上下変化 (opacity effect) により引き起こされていたものであり、実際に磁場が振動して上空へエネルギーを運んでいるとは一意に示すことができないという結論を得た。

1. D.Fujimura and S.Tsuneta 2009ApJ...702.1443F

## 恒星 a10 太陽プロミネンスにおける弱電離プラズマ乱流の観測的検証

黄 于蔚 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

プラズマ乱流状態の解明は原始惑星系円盤、降着円盤などの天体物理現象の理解にかかわっている。例えば、円盤での乱流は中心星への質量降着に必要な粘性の起源として注目されている。しかし、これら天体プラズマの乱流は非常に遠いので直接観測は困難であり、実験室での再現も難しい。一方で、太陽プラズマは乱流のダイナミクスを空間・時間分解できる数少ない例である。実際、弱電離プラズマの乱流は太陽のプロミネンスと呼ばれる構造で近年発見された (Berger et al. 2010)。プロミネンスの乱流を調べることで、弱電離プラズマの乱流の素過程をより理解できると期待されている。

太陽プロミネンスは、100 万度のコロナの中に浮かぶ 1 万度の低温高密度な弱電離プラズマである。プロミネンス中の中性粒子は磁場からローレンツ力を受けず、イオンとの速度差から生じた摩擦力によって重力と釣り合うことで、コロナ中に浮かんでいる。乱流状態であれば、プロミネンス中の中性粒子とイオンの速度差の視線方向成分は  $10^{-3}$  km s<sup>-1</sup> 程度と推測される (Gilbert et al. 2002)。乱流状態では間欠的な加速によって加速度の確率密度関数の裾野にガウシアンからのずれが見える (Toschi & Bodenschatz 2009)。そこで、我々は太陽プロミネンスで観測的に弱電離プラズマ乱流における中性粒子 - イオンの速度差を検証しようと考えている。

我々は昨年、京都大学飛騨天文台のドームレス太陽望遠鏡を用いて、プロミネンスを中性ヘリウム、中性水素、カルシウムイオンのスペクトル線で同時分光観測した。その結果、イオンと中性粒子の速度差の確率密度関数にガウシアンからのずれが確認され、Gilbert らのモデルでは説明できない大きな速度差 (1 km s<sup>-1</sup>) も見られた。我々は、この大きな速度差は、プロミネンス中の乱流による間欠的な加速の結果として理解できると考えた。今回の観測 (2015 年 5 月 2 - 8 日) では、カルシウムイオンと中性ヘリウム、そしてイオンとの速度差がより出やすい質量の大きな中性酸素を用いた。本講演では、今回得られたデータの解析結果について詳しく紹介する。

1. Berger, T. E. et al. 2010, ApJ, 716, 1288
2. Gilbert, H. R., Hansteen, V., H., & Holzer, T. E. 2002, ApJ, 577, 464
3. Toschi, F. & Bodenschatz, E. 2009, ARFM, 41, 375

.....

### 恒星 c1 全天 X 線監視装置 MAXI を用いた星からの巨大フレアの統計的研究

兼藤 聡一郎 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M2)  
 星表面で起きるフレア現象はいつ起きるかわからない突発的な現象である。このような発生の予測が困難な現象の観測には、全天監視装置によるサーベイが有効である。

MAXI は国際宇宙ステーション (ISS) に搭載された装置であり、2009 年 8 月に運用を開始した。ISS に合わせて 90 分で地球を一周し全天をサーベイする。リアルタイムのデータ転送に優れており、かつてない高感度の全天 X 線モニターである。X 線源の連続監視だけでなく、フレアのような突発的な変動をする X 線現象を捕えることができる。GSC (Gas Slit Camera) と SSC (Solid-state Slit Camera) の 2 つの検出器が搭載されておりエネルギー帯域はそれぞれ 2keV ~ 30keV、0.5keV ~ 12keV である。

我々は 6 年間に渡る MAXI の観測により、24 天体 (RS CVn 型連星:12, Algol 型連星:1, dMe 型星:8, dKe 型星:1, YSO:1, TTS:1) から計 75 発の巨大フレアを検出した。これら巨大フレアのルミノシティーは  $2e30 \sim 5e33$  ergs/s であり、星として最大級のフレアと言える。これらのデータから複数の天体で巨大フレアを起こしている RS CVn 型連星と dMe 型星について比較したところ、巨大フレアの減衰時間が RS CVn 型連星が 2.7 ~ 209 ks に対し、dMe 型星が 0.9 ~ 10 ks とより突発的な傾向を持っていた。

本会では、未だフレアの統計的議論がなされていない dMe 型星の巨大フレアとその特徴について報告する。

1. Pallavicini, R., Tagliaferri, G. and Stella, L. A&A, 228, 403 (1990)

.....

### 恒星 c2 近赤外周期光度関係をもちいた天の川銀河内のミラ型変光星の 3 次元分布

浦郷 陸 (鹿児島大学 M1)

我々鹿児島大学の光赤外線グループは天の川銀河の晩期型星を観測し、天の川銀河内の立体分布を明らかにすることを目指している。国立天文台 VERA 観測グループが、VLBI 観測によりミラ型変光星でメーザーを発している天体の固有運動を計測し、距離を年周視差よりもとめる。我々はその連携し ND (減光) フィルター等を用いて VERA が観測しているメーザー天体を赤外線で観測することによって変光周期、見かけの平均等級を決定し、周期光度関係の構築および高精度化をおこなっている。また銀河内で多くの星の分布を示すため IRAS Point Source Catalogue (van der veen and H.J.Habing, (1988) の 2 色図より、晩期型星が存在していると思われる II, IIIa, IIIb にあたる天体を中心に約 800 天体を 2003 年 11 月から鹿児島大学 1m 光・赤外線望遠鏡を用いて近赤外線 (J,H,K バンド) でモニター観測を行っている。今までに 100 天体について 解析を行い、100 天体で変光周期、K バンドの見かけの平

均等級が得られた。これを上記の周期光度関係に当てはめ、その天体までの距離を決定し分布を得ることができた。

.....

### 恒星 c3 ミラ型変光星てんびん座 Y 星の距離・変光周期・平均等級の決定

村上 琴音 (鹿児島大学 M1)

天の川銀河内のミラ型変光星の近赤外線 K バンドでの周期光度関係の高精度化を目的として、ミラ型変光星てんびん座 Y 星 (Y Lib、IRAS15090-0549) の距離、変光周期、平均等級を求めた。Y Lib の観測には 2 種類の観測を行った。1 つ目は VERA による水メーザー (22GHz 帯) の観測で、2008 年 2 月から 2010 年 12 月まで、計 22 回の VLBI 観測を行った。この観測より、Y Lib に付随する水メーザーのスポットを同定し、その固有運動から年周視差を計測した。その結果、年周視差が  $\pi = 0.77 \pm 0.09$  ミリ秒角と決まり、これは距離  $D = 1.31^{+0.16}_{-0.13}$  kpc (1pc=3.26 光年) に相当する。2 つ目は鹿児島大学 1m 光赤外線望遠鏡による近赤外線 K バンド ( $\lambda = 2.2\mu\text{m}$ ) の測光観測で、2005 年 2 月から 2015 年 1 月まで、計 29 回のモニタリング観測を行った。この観測より Y Lib の変光周期、平均等級を決定することができ、変光周期は  $P = 278 \pm 16$  日、見かけの平均等級は  $m_K = 3.22 \pm 0.14$  等と決まった。以上の結果より、絶対等級は  $M_K = -7.36^{+0.27}_{-0.29}$  等となった。この結果は今まで VERA で求めた周期光度関係とほぼ一致することがわかった。

.....

### 恒星 c4 ヘリウム激変星の進化経路の検証

磯貝 桂介 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

激変星は白色矮星を主星に持つ近接連星系であり、軌道周期は数時間程度である。伴星から主星へと質量輸送が行われており、主星の周りには降着円盤と呼ばれる円盤状のガスが形成されている。激変星のサブグループ、ヘリウム激変星 (AM CVn 型星/りょうけん座 AM 型星) は伴星が進化してヘリウム白色矮星となっている天体と言われている。伴星が縮退してコンパクトになっているため、連星の軌道周期は数分 ~ 1 時間程度と、他の激変星では有り得ない超短周期となっている。ヘリウム激変星の形成シナリオは存在するが、まだ発見数が少ない天体であり、統計的に議論できるだけの情報が無い。そこで現在求められているのが、高精度な質量比推定である。激変星は伴星から主星へと質量が流れているため、質量比 (=伴星/主星) は単調減少していく。そのため、質量比は連星進化の度合いを表す最重要パラメータとされている。

激変星のサブグループ矮新星はアウトバーストと呼ばれる突発現象を示し、円盤が突如数等級の増光をする。大規模なものはスーパーアウトバーストと呼ばれ、このとき、同時にスーパーハンプという現象を起こす。スーパーアウトバーストが数等級の増光をして数週間続くのに対し、スーパーハンプは 1 時間ほどの周期で 0.1-0.5 等の光度変動を行う。スーパーハンプは、連星の潮汐力が降着円盤に作用し、円盤を歪めることで発生すると考えられている。近年、スーパーハンプ周期と軌道周期が分かれば単純な力学的な計算から連星の質量比が得られることが発見された。現在、ヘリウム激変星の質量比を推定し、カタログ化を進めることで進化シナリオの検証に向けた研究を行っている。本発表においては、これまでの研究成果について紹介を行う。また、この 1 年間で解析を行った他の激変星についても紹介する予定である。

## 恒星 c5 惑星間空間における CME の伝搬についての研究

石田 敏洋 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

太陽表面では、日々突発的なエネルギー開放が起きている。このエネルギー開放に伴って太陽大気(太陽コロナ)内のプラズマの塊が惑星間空間へ飛び出すことがある。これをコロナ質量放出(CME)という。CMEが地球に到達すると、地球磁気圏に影響をあたえ、磁気嵐や様々な宇宙天気擾乱現象を引き起こす場合がある。特に激しい宇宙天気擾乱現象は人工衛星の損傷や通信障害、宇宙飛行士の被曝、送電システムの障害といったような人類に悪影響を与える原因になり得る。つまり、CMEの形成とダイナミクスを理解することは人類にとっても大変重要な課題である。本会では今後の研究の足掛かりになるような CME の惑星間空間の「伝搬」に焦点を絞り、B.Vrsnak の Propagation of Interplanetary Coronal Mass Ejection: The Drag-Based Model(2013) という論文を紹介する。この論文では、CME の伝搬は、周囲の太陽風から力学的抗力を受け惑星間空間を進んでゆくモデルを提唱している。太陽風の速度や初期速度などの input を様々変え、さらに実際に ACE 衛星が L1 点で観測した太陽風の速度との比較を行い、そのモデルの妥当性を議論している。この論文発表を通して、現在の CME 伝搬の理解と今後の課題を考察する。

## 恒星 c6 CME の形成過程に関する MHD シミュレーション

代田 真輝 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

太陽表面の近傍ではしばしば爆発的に磁気エネルギーが運動エネルギーや熱エネルギーに変換される現象が起きる。これらは、磁気リコネクションを伴う電磁流体力学(MHD)不安定性の結果として発生すると考えられており、フレアや Coronal Mass Ejections(CME) として観測される。CME が惑星間空間を伝搬し、地球軌道に到達して地球磁気圏と相互作用することで磁気嵐等の宇宙天気擾乱現象が発生する。磁気嵐の影響で例えば地上の電力網に障害が発生する可能性があることがこれまで報告されている。太陽活動に起因するこうした擾乱現象を予測する取り組みは宇宙天気予報と呼ばれている。本研究では宇宙天気予報への応用を念頭に置き、CME の形成に焦点を当て、議論を行う。CME の形成の研究を進めるにあたり、今回は Shiota, et al. (2010) の論文を紹介する。この論文では、フラックスロープの放出と周りの磁場との相互作用(リコネクション)の MHD シミュレーションを行うことで CME の形成過程を考察している。3つの異なる磁場の条件(1, 磁場なし 2, 平行磁場 3, 平行でない磁場)を考えることによって、フラックスロープの放出と周りの磁場の相互作用が、磁気嵐を起こすのに大事な要素となっている磁場の南北成分を決めるために重要であることを説明している。また、この相互作用がフラックスロープの回転にとっての重要な役割を担っている。この過程はスフェロマックプラズマ閉じ込め実験における"tilting instability"に似ていることが指摘されている。

# 星間現象分科会

どんと来い、星間現象

|      |  |
|------|--|
| 日時   | 7月27日 17:45 - 18:45(招待講演:立原 研悟氏)<br>7月28日 16:00 - 17:00<br>7月29日 14:45 - 15:45(招待講演:水野 恒史氏), 16:00 - 17:00   |
| 招待講師 | 立原 研悟氏 (名古屋大学)「星間物質の進化と星形成」<br>水野 恒史氏 (広島大学)「宇宙ガンマ線を用いた宇宙線と星間ガスの研究」  |
| 座長   | 濱畑秀峰(鹿児島大学 M2)、切通僚介(大阪府立大学 M2)、鷲野遼作(京都大学 M2)   |
| 概要   | <p>星間空間には、原子ガス、分子ガス、電離ガス、ダストなど様々な状態の物質が存在しています。これらは加熱と冷却、磁場、乱流、重力相互作用、衝撃波、天体からのフィードバックなどの物理過程を経て、高温希薄なガス、低温高密度な分子雲、惑星状星雲、超新星残骸といった多彩な姿を見せます。さらにその過程で化学進化も生じることが考えられます。したがって、星間現象を理解することは物質の進化過程を理解することにつながります。そのため、系内を中心に電波、赤外線、可視光、X線、<math>\gamma</math>線など、多波長で観測を行うことで星間現象を理解する試みがなされています。今後はTMT(可視光、赤外線)、SPICA(赤外線)、ALMA(サブミリ)、SKA(電波)、ASTRO-H(X線)、CTA(<math>\gamma</math>線)などの次世代望遠鏡によってさらに進展することでしょう。さらに、理論分野からは高性能計算機を用いて、磁場の影響や分子雲の衝突、不安定性の非線形解析などの複雑なシミュレーションが行われています。</p> <p>多波長観測と理論を総合的に結びつけて考察することで、星間現象についての理解が深まり、さらにそれらは銀河や星のようなスケールの異なる現象の理解にもつながります。</p> <p>本分科会では、一般講演では多岐にわたる星間現象についての理解を目的に活発な議論や異分野との相互理解・交流を行います。招待講演では星間現象の分野の最先端で活躍されている講師の方々を招き、この分野の面白さや最新の成果、問題点などについて講演していただく予定です。</p> |

立原 研悟 氏 (名古屋大学)

7月27日 17:45 - 18:45 B会場

## 「星間物質の進化と星形成」

星の形成と死は銀河進化の主なドライバーであるが、形成される星の初期質量関数、大質量星の形成メカニズムなどの未解決問題が存在する。加えて銀河の物質循環を考える上で重要なのは、原子ガスからの分子雲形成である。電離ガス・中性原子ガス・分子ガスの分布は、80年代に主に研究された光解離領域の平行平板モデルでは、うまく説明できないことが示されてきた。原子ガスの直接観測は、HI 21 cm 輝線によるものか、CI 微細構造線によるものが主なものであるが、高分解能かつ広範囲をサーベイする観測は困難であった。そのためこれまで原子ガスは数百 K の高温で、かつ目立った構造をもたず、分子雲周囲に数 10 pc 以上に広がって分布していると考えられてきた (Warm Neutral Medium; WNM と呼ぶ)。温度が高いため、その定量には光学的に薄い近似が用いられてきた。しかし HI 吸収線の観測から Cold Neutral Medium (CNM) と呼ばれる低温の中性原子ガスが存在することが示され、またそれらは複雑かつ小さな構造を持っているという予想も提案されてきた。近年、星間ダストのデータと比較することにより、実際に原子ガスの温度と光学的厚みをそれぞれ求めることが可能となり、その結果低温 ( $T_s \sim$  数十 K) かつ高密度で、光学的に厚い CNM が大量に存在することが分かってきた。このことにより銀河における星間ガスの総量を見直すことが求められている。また原子ガスから分子の形成反応はこのような CNM 中で起こることから、分子雲形成のメカニズムや、星間乱流の初期条件を理解する上でも重要である。今後のサブミリ波による広範囲の観測や、SKA などの次世代望遠鏡による HI 21cm 輝線の高分解能観測によって、星間物質の理解は大きく発展すると期待される。今後の展望も含め、最新の研究成果を紹介する。

1. C. Heiles & T.H. Troland, 2003, ApJS, 145, 329
2. T. Inoue & S. Inutsuka, 2012, ApJ, 759, 35
3. Y. Fukui et al. 2015, ApJ, 798, 6

水野 恒史 氏 (広島大学)

7月29日 14:45 - 15:45 B会場

## 「宇宙ガンマ線を用いた宇宙線と星間ガスの研究」

星間空間には星の材料である星間ガスに加え、星間ダスト、星間磁場、星間光子、宇宙線が存在する。これらは互いに影響を及ぼし合っているため、天の川銀河の星形成や星間現象の理解には、多波長観測や理論計算、地上実験、宇宙線の直接観測などを用いた総合的な研究が必要となる。中でも重要な役割を果たすのが、宇宙ガンマ線観測である。特に GeV 帯域のガンマ線は、宇宙線の主成分である陽子が星間ガスと反応して生じ、ほとんど吸収を受けずに観測者まで届く。またガンマ線発生率は星間ガスの状態 (温度、組成) にほとんどよらない。つまり宇宙ガンマ線観測は、宇宙線研究の観点では主成分 (陽子) に高い感度を持ち、星間ガスの観点では「無バイアスに」ガス分布を探索することができる、ユニークなプローブである。この宇宙ガンマ線観測の重要性は以前から指摘されていたが、観測の難しさや星間ガスの様相の複雑さのため不定性が大きかった。しかし 2008 年に打上げられたフェルミ衛星搭載 LAT 検出器は、広い視野 (全天の約 20%) と優れた空間分解能 (10 GeV で 0.2 度程度) を活かして全天サーベイ観測を行い、宇宙ガンマ線の全貌を捉えることができる。加えて宇宙線伝搬モデルや星間ガスの研究の進展により、銀河宇宙線および星間ガスの全体像が明らかになってきた。本講演では、宇宙線の伝搬やガンマ線生成素過程の基礎にも触れながら、フェルミ衛星 LAT 検出器による銀河宇宙線と星間ガスの研究について紹介する。宇宙線加速源天体や、X 線および TeV ガンマ線観測による関連研究についても適宜触れる。

1. Ackermann et al. 2012, ApJ 750, 3
2. Ferriere 2001, Rev. of Mod. Phys. 73, 1031
3. Strong et al. 2007, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.

## 星間 a1 大速度分散コンパクト分子雲の起源:大質量ブラックホールによる重力散乱過程についての理論的研究

郭 岩松 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

銀河系中心の分子雲領域 (CMZ) で高速度コンパクト雲 (HVCC) と呼ばれる雲が多数発見されている。そのような雲は衝撃波らしき構造や膨張シェル速度構造を伴うことからその起源としては高密度分子雲内での超新星爆発などが予想されているが、いまだ定説は無い。

最近、慶応大学・岡朋治らの観測グループにより、SgrC 領域において爆発起源に特徴的な膨張シェル構造を持たない HVCC が観測された (日本天文学会 2015 年度春季年会)。その HVCC は非常に広い速度幅を持ち、かつ低温 (10K) であることが明らかになった。このような温度が低かつ構造も非常に乏しい HVCC の大きな速度分散の生成機構については大質量コンパクトな構造による重力散乱が考えられている。岡らは、このような奇妙な構造を説明するには、Impact parameter が 1pc で質量が  $10^5$  太陽質量の点状天体による分子雲の重力散乱が必要であることを示唆しており、実際、そのパラメータで観測データを説明することができることを報告している。サイズが 1pc 以下程度の重力源で質量が  $10^5$  太陽質量のものとしては、非常にコンパクトな星団という可能性も考えられるが、重力源自体の発する光子・電磁波が観測されておらず、光度が極めて低いことから、その可能性は低いと考えられる。そのため、重力源の正体としては  $10^5$  太陽質量程度のブラックホールである可能性が示唆されている。しかしながら、ブラックホールの重力により散乱される分子雲のダイナミクスはまだほとんど研究されていないため、観測された条件 (低温かつ大きな速度分散) を再現できるかどうかについてはまだわからない。

そこで、本研究においては、大質量分子雲が点状重力により散乱される過程についての数値シミュレーションを行い、上記の仮説を検証することにした。観測事実をもとにして、粒子法を用いる流体計算コードを作成し、詳細な数値シミュレーションを実行する。その際、ガスの衝撃波による加熱や冷却機構を考慮しながら数値模擬観測を行うことにより、観測データを再現することを目指している。また、シミュレーションの初期パラメータ分布を振ることによって、このような現象の発生頻度についても議論する。

1. Tanaka, K., Oka, T., Matsumura, S., Nagai, M., and Kamegai, K. 2014, ApJ, 783, 62

## 星間 a2 AKARI 衛星を用いた系外銀河のスタック解析

岡部 泰三 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

我々の銀河内にはダストと呼ばれる物質が広く分布しており、あらゆる銀河系外の観測はこのダストを通った光を見ることになる。ダストは可視光線を吸収し遠赤外線 (FIR) を放射している。そのため、銀河系外の観測においては、銀河系内のダストによる減光の補正が本質的となる。現在最も広く使われているダストの減光マップは、1997 年に Schlegel, Finkbeiner, Davis(SFD) により発表されたもので、COBE と IRAS という二つの赤外線観測から作成された。SFD マップは FIR の放射量から作成されており、本来必要とされる可視光の吸収量を直接測定している訳ではない。これは SFD が可視光の吸収量と FIR の放射量に線形の関係性を仮定し FIR の放射量から可視光の吸収量を見積もるという構成

方法をとっているからである。従ってこの仮定が妥当なものであるか検証することが重要となってくる。Yahata et al. (2006) は SDSS という可視光観測を用いて、SFD マップの信頼性を検証している。ここでは SDSS の観測領域を細かい小領域に分け、その小領域を SFD のダスト減光の値によって分別した。その結果 SFD マップはダスト減光が小さい領域で、僅かながら系統誤差が存在することを示した。このダスト減光が小さい領域は SDSS 観測領域のおよそ 7 割を占めており、系統誤差が小さいとはいえ精密宇宙論では有意に効いてくる可能性がある。この論文では系統誤差の原因を系外銀河の FIR フラックスによるものだと結論しているが、状況証拠のみで直接的な証拠は示されていない。

Kashiwagi et al. (2012) ではスタック解析を用いてこの系外銀河の FIR フラックスを直接測定している。ここでは SDSS の銀河がある点を中心として SFD マップをスタックしていくことで有意なシグナルをとらえているが、分解能が悪く定量的な解析は難しかった。そこでこの講演では系外銀河のフラックスをより詳しく見るため、より分解能のいい AKARI 衛星を用いて解析した結果を発表する。

1. Schlegel, D., Finkbeiner, D., & Davis, M. 1998 AJ, 500, L525
2. Kashiwagi, T., Yahata, K., & Suto, Y. 2013 PASJ, 65, L43
3. Yahata, K., Yonehara, A., Suto, Y., Turner, E.L., Broadhurst, T., & Finkbeiner, D. 2007, PASJ, 59, L205

## 星間 a3 チャンドラ X 線観測衛星を用いた超新星残骸 RX J1713.7-3946 の解析

辻 直美 (立教大学 M1)

恒星は核融合反応が進行した結果として、重力型崩壊を起こすか、または伴星からの物質降着により、超新星となる。このとき引き起こされる超新星爆発の噴出物質は、高速で星間空間中を膨張するため、表面に衝撃波が形成され、まわりの物質を掃き集めていく。超新星爆発の後に中心天体の周辺に形成される高温プラズマのことを超新星残骸という。超新星残骸は自由膨張期、セドフテイラー期、雪かき期、消滅期を経て進化していくが、その進化過程のモデルは噴出物質のエネルギーや質量、まわりの物質の密度によって決定される。

本研究では、空間分解能の良いチャンドラ X 線観測衛星の観測を用いて、RX J1713.7-3946 のイメージ解析を行う。超新星残骸 RX J1713.7-3946 は、非熱的 X 線放射が支配的であり、TeV ガンマ線の放射も確認されるなど、多波長に渡って研究が進んでいる非常に興味深い天体である。一方で、この天体の衝撃波速度は正確に測定されておらず、年齢もはっきりと知られていない。本研究では、RX J1713.7-3946 のシェルの表面や内部のフィラメント構造において、衝撃波速度や見かけの移動速度を測定する。今までの解析から、衝撃波速度が 4,000 km/s~5,000 km/s であることが測定された。さらに、この結果を良く表現する超新星残骸の進化モデルを探り、この天体の年齢に迫ることが目的である。

1. S. Katsuda et al., ApJ. 709.1387K (2010)
2. J. K. Truelove & C. F. McKee, ApJS. 120, 299 (1999)

## 星間 a4 超新星残骸 Cassiopeia A の熱プラズマ X 線解析

池田 拓馬 (立教大学 M1)

太陽の約 8 倍以上もの重さを持つ星は内部の核燃料が尽きると自身の重力により収縮し、その反動で起こる重力崩壊型の超新星爆発を引き起こす。超新星残骸外層には飛び散る爆発物と星間物質との間で衝撃波が形成され、若い超新星残骸ではその衝撃波面にフェルミ加速により加速された非熱的電子のシンクロトロン放射がフィラメント状に分布する。その内側に数 keV の温度をもつ熱電子からの熱制動放射や高度に電離したイオンからの特性 X 線のような熱的な放射も観測される。これは自由膨張する物質が逆行衝撃波を通過する際、断熱圧縮され衝撃波の運動エネルギーの一部が熱エネルギーとして移行する衝撃波加熱によるものである。希薄な宇宙空間では粒子間の衝突による平均自由行程は超新星残骸のスケールよりも大きいため、衝撃波近傍での相互作用は粒子同士ではなく電磁場を介してのものが支配的であり、このような衝撃波は無衝突衝撃波と呼ばれる。また衝撃波で熱エネルギーを得るのは主に電子よりも重たいイオンであり、若い超新星残骸では熱平衡には至らないため電子と各イオンは異なる温度を持つ。電子はそのイオンから熱を得た後、イオンの電離を進める。したがって電子の加熱は重要であるが、無衝突衝撃波における電子加熱についてはまだよく理解されていない。本研究では銀河内でも特別に明るく、複雑な内部構造を持つ Cassiopeia A を解析することで、無衝突衝撃波によるプラズマの加熱過程や元素の分布など仔細に探る。

## 星間 a5 分子雲衝突による銀河スケールでの巨大分子雲質量関数の進化

小林 将人 (名古屋大学 C 研 D1)

Colombo et al., 2014 に代表される近傍銀河の観測から、巨大分子雲の質量関数の傾きが渦状腕においてきつくと、それ以外の領域では緩やかであることが報告されている。一方で磁気流体シュミレーションから、巨大分子雲の形成には中性水素分子雲を多数回衝撃波によって圧縮する必要があることが示唆されている (Inoue & Inutsuka 2008; Heitsch et al., 2009 など)。これらの結果を踏まえ Inutsuka et al., 2015 では、膨張する HII 領域表面において中性水素シェルや中性水素分子雲が相互作用することで、多数回の衝撃波圧縮やその結果である分子雲形成を再現するモデル構築が行われた。このモデルでは、巨大分子雲の質量空間における連続の式を解いて得られる定常解が、観測されている分子雲質量関数のべきを再現している。しかしこの定式化には、大質量星形成や星団形成の起源として近年示唆されている分子雲同士の衝突が考慮されていない。そこで本発表では、分子雲同士の衝突を表す項を Inutsuka et al., 2015 のモデルに導入し、巨大分子雲質量関数の時間発展を銀河の様々な環境に応じて解いた結果を紹介する。我々の結果は、大質量星形成や星団形成として重要である分子雲衝突が、60Myr 程度のタイムスケールで見えた場合巨大分子雲質量関数を大きく変動させることはない、ということを示唆している。

1. Colombo, D., Hughes, A., Schinnerer, E., et al. 2014, ApJ, 784, 3
2. Heitsch, F., Stone, J. M., & Hartmann, L. W. 2009, ApJ, 695, 248
3. Inutsuka, S.-i., Inoue, T., Iwasaki, K., & Hosokawa, T. 2015, ArXiv e-prints, arXiv:1505.04696

## 星間 a6 JCMT 望遠鏡と野辺山 45m 望遠鏡によるコンパクト HII 領域の CO 分子輝線観測

河野 樹人 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

太陽の 8 倍以上の質量の星は、大質量星と呼ばれる。大質量星は、紫外線を多く放射し周囲の星間ガスを電離して HII 領域を形成する。また、進化段階の最後には、超新星爆発を起こし、重元素を星間空間に放出する。大質量星の形成過程については、これまで小質量星と同様の質量降着や恒星同士の合体による形成が議論されてきたが、その形成過程は未解明であり、現代天文学のもっとも重要な課題の 1 つである。近年我々は、NANTEN2 望遠鏡の観測により一酸化炭素分子 CO による分子雲の観測を行い、分子雲同士の衝突が大質量星の形成を誘発したことを提案している。(Furukawa et al. 2009, Fukui et al. 2014) 大質量星が分子雲同士の衝突によって形成された直後には、形成初期段階のサイズの小さい HII 領域が存在すると考えられる。このような HII 領域は、コンパクト HII 領域と呼ばれ、サイズが 0.1-0.5pc であり、やがて膨張し通常の HII 領域になると考えられている (Kurtz 2002)。したがって、コンパクト HII 領域を調べることは、分子雲衝突による大質量星形成のプロセスを解明する上で非常に重要である。本研究では、コンパクト HII 領域と分子雲衝突の関係を考察することを目的とし、コンパクト HII 領域が存在する大質量星形成領域 W33 の解析を実施した。W33 は、距離 2.9kpc にある Spitzer Bubble N7 を伴う大質量星形成領域である (Immer et al. 2013, Churchwell et al. 2006)。観測データは、ハワイにある JCMT 望遠鏡で得られた  $^{12}\text{CO}(3-2)$  と、国立天文台野辺山 45m 電波望遠鏡で得られた  $^{12}\text{CO}(1-0)$ ,  $^{13}\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(1-0)$  である。解析の結果、2 つの速度成分 (30km/s と 45km/s) の分子雲を検出し、コンパクト HII 領域の存在する場所で、速度幅が 5km/s から 10km/s に拡大していることがわかった。本講演では、これまでの解析結果と NANTEN2, Mopra, ASTE 望遠鏡を用いた今後の研究計画について述べる。

1. Furukawa, N., Dawson, J. R., Ohama, A., et al. 2009, ApJ, 696, L115
2. Immer, K., Reid, M. J., Menten, K. M., et al. 2013, A&A, 553, 117
3. Kurtz, S. 2002, in ASP Conf. Ser. 267, Hot Star workshop III: The Earliest Phases of Massive Star Birth, ed. P. A. Crowther (San Francisco, CA: ASP), 81

## 星間 a7 W43 における分子雲衝突と大質量星形成の関係

切通 僚介 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M2)

W43 は太陽系から距離約 6 kpc に位置し、大質量星を含む星団を持つ活発な大質量星形成領域である。我々は大阪府立大学の 1.85 m 電波望遠鏡と名古屋大学の NANTEN2 望遠鏡で得られた  $^{12}\text{CO}(J=1-0, 2-1)$ ,  $^{13}\text{CO}(J=2-1)$  輝線のデータを用いて、W43 の 2 つの代表的な星形成領域 W43-Main と W43-South それぞれにおいて、HII 領域への付随が示唆される二つの異なる速度を持つ分子雲を同定した。これらは互いに反相関的な分布を示しており、HII 領域とも相関、または反相関的な

分布を示している。いずれの分子雲も  $J=2-1/1-0$  輝線強度比が高く、W43-Main, W43-South それぞれに存在する星団からの影響を受けていると考えられる(切通 2014 年秋季年会)。今回、 $^{13}\text{CO}(2-1)/^{13}\text{CO}(1-0)$  輝線強度比、 $^{13}\text{CO}(2-1)/^{12}\text{CO}(2-1)$  輝線強度比を用い、同定した分子雲に LVG 解析を行った結果、星団方向で相対的に温度が高くなっていることがわかった。さらに、IRAM や JCMT の高分解能なアーカイブデータを用いて、同定した分子雲の分布を  $8\ \mu\text{m}$  の赤外線と比較すると、赤外線源の構造に沿った分布をしていることがわかった。これらの結果から我々は、同定した分子雲は互いに大きな速度差を持ちながらも、大質量星を含む星団に付随していると結論付けた。W43 における今回の結果は最近報告されている大規模な分子雲衝突による大質量星形成(鳥居他 2014 年秋季年会)と類似しており、W43 に存在する星団は分子雲衝突をトリガーとして形成された可能性が高い。

1. P. Carlhoff et al. 2013
2. J. T. Dempsey et al. 2013

## 星間 c1 グリシン前駆体の化学進化

鈴木 大輝(総合研究大学院大学天文学専攻 D2)  
近年大型干渉計 ALMA によって、最も単純なアミノ酸であるグリシンが星間空間で初検出されることが期待されている。一方でグリシン前駆体と考えられる分子の化学進化の理解は乏しい。前駆体の化学進化を明らかにして将来的なグリシン探査を行う有力な情報を得るためには、実験・理論的に提案されているグリシン前駆体分子を複数の星形成領域で探査し、化学反応ネットワークシミュレーションによる研究との比較を通じて理論的に提案されている分子の進化過程を検証していくことが重要である。実験的・理論的には星間塵の表面で HCN に水素が付加して  $\text{CH}_2\text{NH}$  や  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  が形成され、 $\text{CO}_2$  と  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  が反応してグリシンが形成されると提案されている。しかし、実際の星間空間での化学進化は  $\text{CH}_2\text{NH}$  と  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  の観測例が少ないため理解されてこなかった。そこで私の研究グループでは、これらの前駆体分子  $\text{CH}_2\text{NH}$  と  $\text{CH}_3\text{NH}_2$  の多天体探査を行ってきた。その結果、 $\text{CH}_2\text{NH}$  は 8 つの大型星形成領域で検出され(Suzuki et al.(2015) in prep)、 $\text{CH}_3\text{NH}_2$  はそのうちの 2 天体で検出された(Ohishi et al.(2015) in prep)。 $\text{CH}_2\text{NH}$  の存在量は天体ごとに異なっていた。 $\text{CH}_2\text{NH}$  が豊富な天体では、電離領域の指標と考えられる水素の再結合線が非常に弱いことから、これらの天体は非常に早期の進化段階にあるという仮説を立てた。講演ではこれまでのグリシン前駆体の観測結果を紹介するとともに上記仮説に至った経緯と、この仮説を検証することの重要性を解説する。また、今後観測で得られた結果を化学反応ネットワークシミュレーションと比較して星間空間のグリシンの化学進化を明らかにしていくためのアイデアと課題を紹介する。

## 星間 c2 銀河系内ダストの減光を用いた宇宙近赤外線背景放射の絶対値測定

大西 陽介(宇宙科学研究所 D2)

宇宙背景放射は空の明るさから太陽系内、銀河系内の放射を差し引いても、なお残る拡散光のことである。特に可視光から近赤外線にかけた、背景放射の源が何であるかは現在も理解には至っていない。最近浮上した 1 つの候補として、小さな銀河が合体成長する事で、大きな銀河に成長していくことはよく知られているが、その合体の際に、銀河周囲の「ハ

ロー」と呼ばれる領域に星がはじき出され、その星々が宇宙近赤外線背景放射に多く寄与しているとの考え(ハロー-浮遊星説)が最近の観測から有力視されている。

宇宙近赤外線背景放射の明るさの絶対値を測定することによって、その起源がハロー-浮遊星説で説明できるかどうかを確かめることができる。しかしながら、背景放射より 10 倍も明るいと推定される黄道光の差し引き不定性のため、背景放射の絶対値が正確にわかっていない。したがって、黄道光による不定性がない背景放射の測定が今後必要とされる。

そこで私は、銀河系内のダストの減光を用いた背景放射の観測を試みた。これは、銀河系内のダストクラウドを観測し、その周囲のダストがない領域との差を取ることで、ダストに遮られた背景放射を負の信号として検出すると同時に、クラウドより前方にあるような黄道光がキャンセルされるため、黄道光差し引きの不定性に依存しない、背景放射の観測を行うことができる手法である。この手法において重要なことは、銀河系内ダストによって星の光が散乱された銀河系内拡散光をどれだけ精度よく分離できるかである。本講演では、上記した手法における銀河系内拡散光の分離方法と現状得られている宇宙近赤外線背景放射の観測結果について示すものとする。

## 星間 c3 星形成領域 IRAS01123+6430 の年周視差測定および分子雲衝突の観測的研究

小出 凪人(鹿児島大学 M1)

我々は、ORC(Outer Rotation Curve) プロジェクトの一環として、VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) による IRAS01123+6430 の VLBI 位置天文観測データの解析を行った。IRAS01123+6430 は銀河系外縁部に属する星形成領域で、赤道座標  $(\alpha, \delta) = (1^{\text{h}}15^{\text{m}}40.8^{\text{s}}, +64^{\circ}46'40.8'')$ 、視線速度  $V_{\text{LSR}} = -55.0[\text{km s}^{-1}]$  に観測された。解析結果から、年周視差は  $\varpi = 0.140 \pm 0.015[\text{mas}]$ 、固有運動は  $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-0.818 \pm 0.023, 0.321 \pm 0.006)[\text{mas yr}^{-1}]$ 、距離は  $D = 7.13 \pm 0.87[\text{kpc}]$  と求められ、銀河中心距離と回転速度は  $(R, \Theta) = (13.50 \pm 0.41[\text{kpc}], 222.68 \pm 14.80[\text{km s}^{-1}])$  となった。距離と赤外線フラックス密度から光度は  $L_{\text{Bol}} = (3.62 \pm 0.93) \times 10^3 L_{\odot}$  となり、スペクトル型は B1-B2 であると見積もられた。また、FCRAO(Five College Radio Astronomical Observatory)14m ミリ波望遠鏡による銀河系外縁部  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線サーベイデータから、IRAS01123+6430 の方向に分子雲が速度  $V_{\text{LSR}} = -56.9 \sim -50.4[\text{km s}^{-1}]$  の範囲で存在していることが確認され、距離と視直径から、そのスケールは(銀経方向)×(銀緯方向) =  $37.3 \times 49.8[\text{pc}]$  と見積もられた。その分子雲は  $V_{\text{LSR}} = -52.8 \sim -50.4[\text{km s}^{-1}]$  に円弧状の構造、 $V_{\text{LSR}} = -56.9 \sim -56.1[\text{km s}^{-1}]$  に速度勾配を持つ直線状の構造を持ち、その中間  $V_{\text{LSR}} = -55.3 \sim -53.7[\text{km s}^{-1}]$  で衝突が起こったと考えられる。

1. Habe, A. & Ohta, K. 1992, PASJ, 44, 203
2. Heyer, M.H., Carpenter, J.M., & Snell, R.L. 2001, Apj, 551, 852
3. Honma, M., et al. 2012, PASJ, 64, 136

## 星間 c4 「すざく」を用いた大マゼラン雲内超新星残骸 B0532-675 の元素組成の決定

中谷 創平(埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

数百万度という高温のプラズマからなる超新星残骸 (SNR) は重元素の合成や星間物質のアバンダンスの決定、さらに宇宙の化学進化に関して重要な役割を担っている。そのため、これまでに多くの SNR が観測されてきたが、星間物質による吸収の影響に加え、天体までの距離が不明瞭であるためにプラズマの状態を正確に決定するのは容易ではない。そこで、我々は伴銀河である大マゼラン雲 (LMC) に注目した。LMC は銀河系からの距離が 48 kpc であり、銀河系と Face-on の位置にある。この位置関係のため、銀河による星間吸収が少なく、プラズマのアバンダンスを正確に決定するのに適している。また LMC は重元素量が銀河系の 4 分の 1 程度と少ないことが知られている。重元素は、恒星内部で核融合によって作られた元素が超新星爆発を通して銀河内に供給されているため、LMC アバンダンスを正確に決定することで、より宇宙初期に近い環境下での化学進化を知ることができるかもしれない。

我々は LMC のアバンダンスをより正確に決定するためのサンプルを加える目的で、低バックグラウンド観測が可能なすざく衛星搭載の XIS で観測された B0532-675 のデータ解析を行った。解析の結果、B0532-675 から 0.2 - 3 keV の X 線の放射の存在を確認した。我々は、その放射スペクトルを非平衡電離プラズマモデルでフィッティングすることで、プラズマの O, Ne, Mg, Si, Fe の元素組成比を決定し、その値が Hughes et al. 1998 等で求められている LMC アバンダンスパターンに近いふるまいを示すことを突き止めた。また、B0532-675 は Hughes et al. 1998 d で解析されている SNR よりもフラックスが一桁程度暗い天体であることがわかった。この解析によって、B0532-675 アバンダンスを決定し、LMC アバンダンスを見積もるための暗い天体のサンプルを追加することができた。本講演では、この解析結果について議論する。

## 星間 c5 Chandra 衛星を用いた Tycho の超新星残骸における衝撃波の解析

岩崎 啓克 (立教大学 M1)

超新星爆発によって放出された物質は星間物質や星間磁場の影響を受けながら  $\sim 10^4$  年に渡って膨張を続ける。これを超新星残骸 (SNR) と呼ぶ。SNR は宇宙線の加速などの物理現象の場であり、高エネルギー天文学の重要な研究対象となっている。Tycho の SNR は 1572 年に地上で観測された Ia 型超新星である。

本研究では、空間分解能の高い米国の Chandra 衛星による X 線観測を用いて、衝撃波のプロパーモーションと X 線スペクトルを求め、同一天体中での膨張速度と X 線放射との関係性を調べることを目的としている。

Chandra 衛星ではこれまでに、2003 年、2007 年、2009 年に Tycho の SNR を X 線撮像検出器 ACIS-I (Advanced CCD Imaging Spectrometer) を用いて観測している。Tycho の SNR の現在の視直径は  $\sim 8.5'$  であり、ACIS-I 全体の視野  $16.8'$  に収まっている。

観測された Tycho の SNR の外縁部に沿って、 $25'' \times 25''$  の正方形領域を計 38 個定義した。それぞれの領域について、各観測データの一次元投影を行った。次いで、1 組の投影データを、観測年の若い方をモデルとして  $\chi^2$  フィッティングをし、衝撃波の移動距離を求めた。領域ごとの移動距離から、Tycho の SNR における順行衝撃波の速度を場所ごとに求めることができた。今回得られた結果から、衝撃波速度の位置ごとのばらつきが先行研究での値より小さいことが示された。この結果は Tycho の SNR の円形に近い形状とも矛盾しない。

また、Tycho の SNR では、内部のイジェクタと外縁部の衝撃波がはっきりと分かれている。しかし、外縁部の衝撃波の一部からはイジェクタ

と同じ熱的な輝線が見られる。スペクトル解析のため、衝撃波面にはっきりとしたフィラメントが見られ、スペクトルに輝線が現れている領域を選んだ。それぞれの領域で、衝撃波面から前後に幅  $1.5''$  ずつに区切り、衝撃波の前後での X 線スペクトルの変化を求めた。

1. S. Katsuda, R. Petre, J. P. Hughes, U. Hwang, H. Yamaguchi, A. Hayato, K. Mori, and H. Tsunemi, 2010, ApJ, 709, 1387

## 星間 c6 大マゼラン雲における孤立した中大質量原始星に付随する分子ガス観測

原田 遼平 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M2)

大質量星のほとんどは巨大分子雲 ( $10^5 M_\odot$  以上) の中で形成されると考えられている。しかし、巨大分子雲から大きく離れた場所に存在する孤立した OB 型星は、銀河系においても観測されているがその起源は未だ知られていない。本研究の目的は大マゼラン雲 (Large Magellanic Cloud : LMC) において孤立した若い中大質量原始星に付随する分子ガスの物理的性質と分布を調べることである。

LMC における SAGE Spitzer Legacy program において、我々は 1800 個の原始星をカタログした。原始星となんてんサーベイによって見つけれられた CO ( $J=1-0$ ) との空間的な一致を調べることによって、CO 分子雲の付随していない、「孤立した」中大質量原始星を 100 個以上同定した。「なんてん」で検出された分子雲から 200 pc 以上離れているという条件の下で、LMC の孤立した大質量原始星方向を Mopra 22m 電波望遠鏡 (beam= $30''$ ) で高感度観測を行った。その結果、LMC の 4 つの領域で CO ( $J=1-0$ ) の放射を検出し、そのうち 2 つの領域は原始星のある場所のみで放射が見られた。このことから、これらの原始星に付随している分子雲は 7 pc 以下、 $10^4 M_\odot$  以下の小さな分子雲であることがわかった。さらに、これらを含む 12 個の「孤立した」OB 型星原始星方向の ALMA による CO、連続波観測 (PI: T. Onishi) を行った。 $13\text{CO}(1-0)$ ,  $\text{C}18\text{O}(1-0)$ ,  $\text{CS}(2-1)$ ,  $12\text{CO}(2-1)$ ,  $13\text{CO}(2-1)$ ,  $\text{C}18\text{O}(2-1)$ , 100/230GHz 帯連続波、H30, H40 による観測データが現在までに配布された。検出できなかった 2 個を除いて、10 個の原始星の方向に、典型的な質量が数千太陽質量のコンパクトな分子雲が付随していることを確認した。いくつかの分子雲の方向では複雑な速度構造が見られており、それが大質量星の形成につながった可能性も考えられる。

## 星間 c7 VERA を用いた S76E の年周視差計測

濱畑 秀峰 (鹿児島大学 M2)

光領域のレーザーと同じ原理で電波領域で放射されるものにレーザーがある。レーザーは温度が 400K の比較的高温高密度な領域で励起されるため、ジェットがディスクや周囲のガスと衝突する衝撃波領域で発生すると考えられている。特に水レーザーは、大質量原始星をとりまくガスと、大質量原始星に由来する分子流やジェットとの境界領域に位置すると考えられている。レーザーの増幅は特定の物理条件の領域でのみ起こり、ピーミングにより非等方的に放射され、強く偏波しているという特徴がある。放射領域はサイズが 1AU 程度とコンパクトであり、レーザー源を VLBI の高分解能で観測して固有運動を測定することにより、ジェットの運動やディスクの回転を直接測定することが可能である。そこで我々は VERA を用いて Sharpless76 の水レーザーの VLBI 観測を行った。S76 は *Aquila Rift* 方向、星形成領域に付随している HII 領域である。S76 は様々な分子輝線観測が行われており、2 つの水レーザーがある

ことが知られている。その1つ Sh2-76E はアンモニア輝線でも検出され、温度の局所的な増加が見られる。我々は、この水メーザーを国立天文台 VERA(VLBI Exploration of Radio Astrometry) を用いて 2010 年 12 月から 2011 年 2 月まで計 5 回の VLBI 観測を行った。検出した視線速度  $28 \sim 33 \text{ km/s}$  の水メーザースポットを用いてクエーサーに準拠した位相補償解析を行い、位置を測定した。その結果  $0.430 \pm 0.063 \text{ mas}$  の年周視差を測定することに成功した。これは、 $2.09^{+0.15}_{-0.13} \text{ kpc}$  の距離に対応し、固有運動を含む 3 次元運動についても測定した。

1. T.M.Dame et al. 1984
2. Zinchenko et al. 1994,1997
3. S.Ramirez Alegria et al. 2014

求めると、太陽系の回転速度と  $10 \text{ km/s}$  以内で一致した。これは銀河系の回転曲線が銀河中心距離  $R=13 \text{ kpc}$  までフラットであることを示唆する。

1. John M. Carpenter, et al. 2000, ApJS, 130, 381
2. M. J. Reid, et al. 2014, ApJ, 783, 130

## 星間 c8 VERA を用いた銀河系中心領域の水メーザー源の位置天文観測

酒井 大裕 (国立天文台三鷹 D1)

銀河系中心領域は円盤部とは異なり、円運動から大きく外れた特異な速度構造を示している。この運動の実態を解明する事は、銀河系の中心にある超大質量ブラックホールへのガス供給メカニズムや活動性を理解する上で非常に重要である。我々はこの領域の速度構造をより直接的に理解するために、あらゆる波長帯で最も高い空間分解能を達成可能である VLBI 技術を用いた観測を行った。この領域に付随する水メーザー源の三次元位置を長期間に渡って VLBI で正確に測定する事で、水メーザー源の三次元速度情報を得る事が出来る。領域全体の運動を解明するためには、より多くのメーザー源に対して位置を測定する必要がある。しかしながら、銀河系中心領域は明るいメーザー天体の数が少なく、通常の方法とは異なる観測方法を用いる必要がある。本講演では、我々が既に行った観測結果と、新たに考案したより効果的に銀河系中心領域の観測を行うための新しい観測方法について議論する。

1. J. Binney, et al., MNRAS, 252, 210, (1991)
2. M. Reid, et al., ApJ, 705, 1548, (2009)
3. P. Bhattacharjee, et al., ApJ, 785, 63, (2014)

## 星間 c9 VERA による星形成領域 G135.28+02.80, G137.07+03.00 の年周視差測定

永野 将之 (鹿児島大学 M1)

我々は VERA を用いて、銀河系内の星形成領域 G135.28+02.80, G137.07+03.00 の観測を行った。その結果から、それぞれ年周視差 (距離) が  $0.160 \pm 0.048 \text{ mas}$  ( $6.25^{+2.68}_{-1.44} \text{ kpc}$ ),  $0.171 \pm 0.071 \text{ mas}$  ( $5.85^{+4.15}_{-1.72} \text{ kpc}$ ) で、固有運動が  $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-1.23 \pm 0.09, -0.05 \pm 0.08)$ ,  $(\mu_{\alpha} \cos \delta, \mu_{\delta}) = (-0.55 \pm 0.19, 0.29 \pm 0.17)$  と求めることができた。この結果は、視線速度から求めた運動学的距離と一致し、2 天体の銀河系内での位置を調べると、外縁部の Outer Arm に付随していることが分かった。

また、同方向の大質量星形成領域 W3(OH) との位置関係を調べると天球面上で 4 度以内にあるのに対し、興行きは  $4 \text{ kpc}$  ほど距離に差があり、異なった Arm に付随していると分かった。

さらに、測定した距離と固有運動を用いて、2 天体の銀河回転速度を

# 星形成・惑星系分科会

理論と観測が紐解く、星と惑星たちの物語

|      |   |
|------|---|
| 日時   | 7月27日 15:15 - 16:15<br>7月28日 9:00 - 10:00, 18:30 - 19:30 (招待講演: 関根 康人 氏)<br>7月29日 10:15 - 11:15 (招待講演: 深川 美里 氏), 17:15 - 18:30  |
| 招待講師 | 関根 康人 氏 (東京大学)「太陽系氷天体の起源、進化、ハビタビリティ」<br>深川 美里 氏 (国立天文台)「見えてきた惑星形成」  |
| 座長   | 上赤翔也(東京大学 D1)、芝池諭人(東京工業大学 M2)、杉浦圭祐(名古屋大学 M2)、<br>野津翔太(京都大学 M2)  |
| 概要   | <p>本分科会では、分子雲コアからの星や原始惑星系円盤の形成、円盤内で起こる惑星形成を代表とする物理現象、太陽系内惑星 &amp; 衛星、系外惑星の観測とその大気・表層環境に迫る理論研究といった、幅広い領域を取り扱います。</p> <p>これらの分野では近年観測技術・手法の進歩が著しく、赤外線・電波観測による円盤の非軸対称構造の検出や、多種多様な系外惑星の発見、系外惑星大気分光観測、木星・土星の衛星の表層・内部構造の解明などの驚くべき観測結果が報告されています。特に昨年には、ALMA(アタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計)による超高解像度観測でおうし座 HL 星 (HL Tau) 周りの円盤の鮮明なリング上構造が報告されたのも、記憶に新しいところです。</p> <p>一方で近年の理論研究の進展も見逃せません。例えばアウトフローや輻射フィードバックを考慮した星形成の 3D シミュレーションや、高空隙率ダストを経由した微惑星形成過程の解明、惑星の軌道進化・重力不安定などを考慮した円盤進化・惑星形成モデルの構築、中心星進化の効果なども取り入れたハビタブルプラネット (生命居住可能惑星) の存在条件の探索などが挙げられます。</p> <p>これら観測・理論の目覚ましい成果は相互の進展に大きく寄与すると期待されるため、これからの星形成・惑星系分野において、観測と理論の緊密な情報交換が必要となることは疑いようがありません。ALMA の本格的な稼働を控え、また地球型惑星の直接撮像を見据えた光学赤外線・次世代超大型天体望遠鏡 (TMT) の建設が本格的に開始された今、星形成・惑星系研究は新たな時代を迎えつつあります。本分科会に参加される新時代を担う皆様には、夏の学校での発表や議論を通じて観測や理論といった枠に囚われず視野を広げ知識を深め、今後の研究の発展と自身の成長のために役立てて頂くことを期待します。</p> <p>注) 水素燃焼する質量の星は太陽・恒星分科会で扱います。<br/>注) サブ pc スケールの分子雲コアは星形成・惑星系分科会で扱いますが、pc スケールの星形成領域や分子雲などは星間現象分科会で扱います。</p> |

関根 康人 氏 (東京大学)

7月28日 18:30 - 19:30 B会場

## 「太陽系氷天体の起源、進化、ハビタビリティ」

氷衛星や準惑星などの探査によって、これらの天体の起源や進化のみならず、地下海におけるハビタビリティまで議論されるようになった。本講演では、これら氷天体への探査の最新結果と、その意義について議論する。

深川 美里 氏 (国立天文台)

7月29日 10:15 - 11:15 B会場

## 「見えてきた惑星形成」

近年、系外惑星の人口調査は急速に進展し、惑星系は（少なくとも太陽近傍では）普遍的な存在として認識されている。それら惑星がどのように誕生するのかを理解し、その理解の元で太陽系や地球の形成および存在をとらえ直すことは、天文学における最重要課題の一つである。形成を理解するには、惑星誕生の現場となる原始惑星系円盤の物理・化学的性質を理解することが必須となる。問題は、密度や温度分布といったごく基本的な情報についてさえ、観測的な理解が不足していることである。原始惑星系円盤の観測には、0.1 秒角（近傍星形成領域を対象にすればおよそ 10 AU）を切る高い空間分解能がまず重要となり、また波長によっては円盤に比べて非常に明るい星の光を低減する工夫が必要となる。

この講演では、原始惑星系円盤の近赤外線・サブミリ波観測の結果を紹介する。近赤外線撮像においては、すばる等の大口径望遠鏡と補償光学、さらに観測手法の工夫の組み合わせによって、またサブミリ波においては干渉計によって、0.1 秒角程度かそれを切る空間分解能での観測が可能になっている。すばる等による近赤外線撮像においては、年齢 100 万年程度のいくつかの円盤において、スパイラルや溝状の構造が顕著な非軸対称性とともに見出されている。これらの結果は、年齢 100 万年程度で既に惑星や伴星が円盤内に存在する可能性を示唆する。また、ALMA による観測では、円盤の中で塵が集まって成長し、惑星が形成されていく兆候が見え始めている。さらに、年齢 10 万年程度の HL Tau をとりまく円盤に、複数の溝構造が見出されたことは記憶に新しい。これら最新の結果を概観し、今後取り組むべき課題についても述べる。

## 星感 a1 低金属度環境における大質量星原始星からの 輻射フィードバック効果

福島 肇 (京都大学 天体核研究室 M2)

銀河は現在の宇宙において多種多様な構造をしている。銀河内の構成要素である星や星間物質の進化を理論的に追うことによって、それらを理解する試みがなされてきた。その中で、星の初期質量関数や星形成率といった銀河内での星形成を特徴づけるパラメーターは上記の議論に必要な。特に、大質量星は膨大な輻射による H II 領域の形成を行う。また、寿命が尽きることで超新星爆発とそれに伴う重元素放出をする。これらにより、大質量星は銀河環境全体をコントロールしその後の星形成過程に決定的な影響を与えるため、その形成率は重要である。始原ガスからの星形成過程は理解が進んできていて、形成される星の多くは太陽の数十倍から百倍の大質量星になることがわかってきた [1]。しかし、低金属度領域における星の初期質量分布や星形成率は不明であるため、大質量星の形成率がわからない。このため、低金属度銀河進化を議論する際に課題となっている。本研究では、大質量星の質量決定に重要と考えられる、原始星の降着成長における輻射フィードバックを調べた。降着流とともに原始星内部の進化を計算することで放出される輻射の量を求めた。これにより、ダスト層 (ダストによって降着流が光学的に厚くなっている層) への輻射圧によって降着が止められる条件と H II 領域の膨張により降着が止まる条件を議論する [2]。ダスト層における光学的厚みや降着流の大きさは金属度によって変化するため、金属度ごとに調べた。本講演では上記の内容を説明した後、得られた結果を発表する。

1. Hirano, S. et al. ApJ, 781, 60 (2014)
2. Hosokawa, T. & Omukai, T. ApJ, 691, 823 (2009)

## 星感 a2 大質量星への質量降着率とアウトフローの 関係

松下 祐子 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

一般に大質量星とは  $\sim 8M_{\odot}$  以上の質量をもつ星を指す。大質量星からの輻射は、銀河進化や重元素合成、星形成の過程に多大な影響を与える。そのため、大質量星形成を理解することは、宇宙の進化を考える上で重要である。しかしながら、大質量星の形成過程は明らかになっていない。

Beuther et al. (2002) は、大質量星形成領域で  $^{12}\text{CO} J = 2 - 1$  の輝線を用いてアウトフローの観測を行った。彼らの結果では、原始星アウトフローの質量や運動量は、中心星質量と共に増加することを示している。そのため、大質量星のアウトフローも小質量星の場合と同様の機構で駆動されると考えられる。我々は数値シミュレーションを用いて、大質量星形成の計算を行った。この中で、初期の分子雲の安定性 ( $\alpha_0$ : 熱エネルギーと重力エネルギーの比) をパラメータとした。  $\alpha_0$  の値が小さいほど、初期のガス雲は、重力的に不安定で、星への降着率が大きい。解析の結果、大降着率を示すガス雲ほど、アウトフローの質量や運動量は増加した。また、降着率とアウトフロー率の比は一定になるという関係性が得られた。

1. Beuther, H. Astronomy and Astrophysics. 383, 892 (2002)
2. Tan, J. C. Protostars and Planets VI, University of Arizona Press. 914, 149 (2013)

## 星感 a3 ALMA 観測から見る原始星の力学進化

麻生 有佑 (国立天文台三鷹 D2)

星形成初期にあたる原始星では動的降着 (インフォール) するエンベロープが特徴的である。一方で、原始星より進化した段階にある古典的 T タウリ型星 (CTTS) の周囲にはインフォールするエンベロープは見られず、ケプラー回転している円盤 (原始惑星系円盤、ケプラー円盤) が卓越している。惑星系形成の現場としても注目される原始惑星系円盤は、この原始星と CTTS の間の進化段階で形成されると考えられているが、その形成過程はよく理解されていないのが現状である。円盤形成に代表されるような力学的進化を調べる目的で、3 つの原始星 (L1527 IRS, TMC-1A, L1489 IRS) に対して ALMA を用いてミリ波の分子ガス輝線を観測した。さらに、過去にケプラー円盤が同定されている 11 個の原始星も含めて、原始星段階における力学の進化を調べたので報告する。進化段階の指標として赤外域も含む SED から決まる Class、 $T_{bol}$  及び  $L_{bol}/L_{submm}$  を用いた。まず、取り上げた 14 天体の中心星質量には進化とともに増大する傾向が見られた。14 天体中 6 天体に対してはケプラー回転に加え、円盤へインフォールする成分も検出されており、これら 6 天体のケプラー円盤半径は中心星質量と正の相関を示した。この相関は、時間を追うごとに円盤へ大きな角運動量が持ち込まれるという古典的なシナリオ (Terebey, Shu, and Cassen 1984) に定量的にも矛盾しないが、磁場を含むシミュレーションでは、中心星質量は増え続けながらも円盤の成長が止まるという予想もある (Machida et al. 2014)。取り上げた原始星のうち 4 天体は自由落下よりも遅いインフォールを示すのに対して、最も進化している L1489 IRS では円盤の上下から自由落下する成分が検出されたので、インフォールについても考えられる仕組みを議論する。

1. N. Ohashi et al., ApJ, 796, 131, 2014
2. H.-W. Yen et al., ApJ, 793, 1, 2014

## 星感 a4 星間アミノ酸の合成シミュレーション

加藤 貴大 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

現在、星間雲で複雑な有機物が多数発見されている。しかし、そのような複雑な有機分子がどのような化学反応を経て形成されているかは解明されていない。今までの観測では、有機分子の 1 つであるアミノアセトニトリルの発見が報告されている。これは、最も単純なアミノ酸であるグリシンの前駆体の 1 つと考えられていて、宇宙空間での有機物合成を考える上で重要な手がかりとなる。しかし、隕石中ではグリシンの存在が確認されているにもかかわらず、観測によるグリシンの検出例は現在報告されていない。

本研究では、星間空間でグリシンがどの程度の確率で合成されるかを、DUmode (参考文献 1) を応用したコンピュータシミュレーションによって調査した。その結果、グリシンの合成経路候補として多く議論がなされているストレッカー反応以外の方法で、グリシンが生成されているということがわかった。また、グリシンとアミノアセトニトリルの生成率の温度依存性を調べたところ、以下のことがわかった。

- 1) 数百 K 以下では両方とも生成されなかった。
- 2) 数千 K 以上では、両方の生成率はほぼ同じであった。しかし実際は、そのような高温状況ではアミノ酸は分解してしまい、存在できない。

3) 数百～数千 K の温度領域においては、グリシンよりもアミノアセトニトリルの方が生成率で桁が大きい。

星間分子雲は通常、10～数 10K であるが、局所的に紫外線加熱を受けることがあり、1000K 程度になっている領域があることがわかっている。そのような領域において、複雑有機物が生成されたとすれば、本研究の結果は、アミノアセトニトリルが検出されているのにグリシンが検出されていないということを説明可能である。

1. J. Dugundji, I. Ugi, *Top. Curr. Chem.* 1973. 39. 19.

## 星惑 a5 原始太陽系星雲における同位体比均質化の可能性

竹石 陽 (東京工業大学地球惑星科学専攻 M1)

### 序論

太陽系は分子雲コアの重力崩壊を経て形成された。分子雲の構成物質に複数の超新星爆発や赤色巨星から放出された物質が含まれると推定されるため、分子雲コア内の固体物質の同位体比は互いに不均質と考えられる。一方、分析によると地球・月・火星・隕石などの固体物質の主要元素の同位体比は互いに均質である。これは太陽系が形成される過程で、全ての固体物質(ダスト)がガスになるほどの高温を経験したことを示唆するが、どのようにして生じたかは分かっていない。

### 目的

本研究ではそのような高温プロセスが分子雲コア崩壊から原始太陽系星雲形成および進化の過程で実現可能であるかを調べる。

### モデル

1 太陽質量の剛体回転している分子雲コアの崩壊を考え、中心への降着は Shu(1977) モデルを用いる。降着を考慮した原始太陽系星雲の形成および進化は Cassen & Moosman (1981) のモデルを用いる。つまり分子雲コアの物質は降着開始前の角運動量に応じた遠心力半径内に落下する。原始太陽系星雲内のダストは乱流による影響を受ける。これを加味したモデル (Wehrstedt & Gail 2002) で、ダスト面密度の時間発展を計算する。熱源は粘性加熱とし、ダストが 2000K 以上を経験することで同位体比の均質化が起こるとする。本研究では分子雲コアの温度と角速度をパラメーターとし、分子雲コア崩壊開始から 3Myr 後の原始太陽系星雲内の全ダストの均質化が生じる場合を調べた。

### 結果

原始太陽系星雲の温度は中心星に近いほど高温となった。このため、形成された原始太陽系星雲内の全ダストの同位体比が均質となるのは、分子雲コアの初期温度が高く、角速度が小さい場合であった。

### 結論

分子雲コア崩壊から原始太陽系星雲形成および進化の過程で全ダストが蒸発・再凝結し、同位体比の均質化が起こりうるということが分かった。ただし、そのようなことが起こるのは分子雲コアの初期温度が高く角速度が小さい場合である。そのときに形成される円盤は、半径が比較的小さいものとなる。

1. Cassen, P., & Moosman, A. 1981, *Icarus*, 48, 353

2. Shu, F. H. 1977, *ApJ*, 214, 488

3. Wehrstedt, M., & Gail, H.-P. 2002, *A&A*, 385, 181

## 星惑 a6 ダスト・ガス比の高い場合の衝撃波シミュレーション：コンドリュール形成モデルへの応用に向けて

勝田 祐哉 (東京工業大学地球惑星科学専攻中本研究室 M1)

コンドリュールは隕石の主成分である mm サイズのケイ酸塩組成組織である。コンドリュールは岩石学的検証から、ダストの急激な加熱と冷却によって形成されたことが分かっている。また、同様に周囲の環境についても様々なことが推定されているが、具体的な形成プロセスについては未だに議論がなされている。しかし、コンドリュールが形成されたと考えられる太陽系初期の情報を知る為に、この形成プロセスを決定することが重要な課題である。

検討されている形成プロセスの中で、有力なモデルとして我々が注目しているモデルが衝撃波モデルである。これは衝撃波後面でダストとガスの間に相対速度が生じ、ダストがガス摩擦を受けて加熱されるというモデルである。また衝撃波の発生源も問題となるが、我々は楕円軌道を回る微惑星に注目している (cf. Boley et al. 2013)。このモデルの問題点として上げられているのはコンドリュール形成時の酸素分圧で、太陽組成よりも酸素分圧の高い状況が説明されない。

そこで、我々はダストの割合が高い場合についての衝撃波の振る舞いについて調べることにした。これはダストが蒸発することで気相に酸素が供給され、ガス・ダスト比  $\sim 1:1$  の場合に問題点が解決されることが見込まれるためである (Jones et al. 2000)。また、今後コンドリュールの形成について詳細に議論するために、ダストの多い場合についての計算コード開発を行った。

解析結果として、ダストの割合が高い場合には温度が上昇するという結果が得られた。これは、酸素分圧の高い状況が形成されやすいことを示している。また、数値計算の結果も解析的な手法によって得られた値と一致し、計算コード開発にも成功したと言える。今後はこの計算コードを改良して、よりリアルなコンドリュール形成の議論を行っていきたい。

1. Boley et al., *The Astrophysical Journal*, 776 (2013)

2. R. H. Jones et al., *Protostar and Planets IV* (2000)

3. J. M. Stone and M. L. Norman, *The Astrophysical Journal Supplement Series* 80, 753 (1992)

## 星惑 a7 液滴の衝突による合体と分離

荒川 創太 (東京工業大学地球惑星科学専攻中本研究室 M1)

コンドリュールはコンドライト隕石に多量に含まれる 1 mm 程度の球形のシリケート構成物である。多くのコンドリュールは単体で隕石中に含まれているが、コンドリュール全体の 5% 程度は 2 つ以上のコンドリュールが付着合体したかたち (複合コンドリュール) で隕石中に取り込まれている。コンドリュールは形成時に溶融され、その後冷却することで球形となる。複合コンドリュールは、この冷却時に、独立なコンドリュールが衝突することによって形成されたのではないかと考えられて

いる (Yasuda et al. 2009). 複合コンドリュールの形成過程を理解することは、コンドリュールの形成条件、ひいては微惑星形成期の原始太陽系の状況を明らかにすることにつながると期待される。

複合コンドリュール形成を理解するためには液滴 (非圧縮性流体) の衝突に関する物理を理解することが必要である。水の液滴に関しては Ashgriz & Poo (1990) によって実験的および理論的な研究が行われ、衝突の性質は2つの液滴のサイズ比、インパクトパラメータ、そしてウェーバー数 (慣性力と表面張力の比を表す無次元数) によって決まり、反射的分離、伸張的分離、合体などのいくつかのパターンに分けられることが明らかになった。

今回の発表では、この2つの論文のレビューを行い、複合コンドリュール形成のメカニズムとその基礎となる物理について議論することで、今後の研究課題を示す。

1. Ashgriz, N., & Poo, J. Y. 1990, *J. Fluid Mech.*, 221, 183
2. Yasuda, S., Miura, H., & Nakamoto, T. 2009, *Icarus*, 204, 303

## 星惑 a8 原始惑星系円盤の化学反応と、H<sub>2</sub>O スノーラインの分光観測による検出可能性

野津 翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

太陽質量程度の前主系列星周りの原始惑星系円盤 (以後、“円盤”) の場合、円盤赤道面における H<sub>2</sub>O スノーラインは、中心星から数 AU の位置に存在する。しかし、撮像観測によって H<sub>2</sub>O スノーラインを検出する事は、空間分解能が足りない為に困難である。一方で円盤はほぼケプラー回転している為、輝線のドップラーシフトの解析から輝線放射領域の中心星からの距離の情報が得られる。そこで高分散分光観測を行い、得られた H<sub>2</sub>O 輝線のプロファイル形状を解析すれば、円盤内の H<sub>2</sub>O ガス分布に制限をかけ、H<sub>2</sub>O スノーラインの位置を同定できると考えられる。

我々はこれまで、円盤中の H<sub>2</sub>O の存在量とその分布を化学反応計算 [1] で調べてきた。またその結果を用いて、近赤外線からサブミリ波までの多数の H<sub>2</sub>O 輝線プロファイルの計算を行い、分光観測による H<sub>2</sub>O スノーライン決定の可能性を調べてきた。その結果、アインシュタインの A 係数が小さく励起エネルギーが高い複数の輝線プロファイルを高分散分光観測で調べる事で、H<sub>2</sub>O スノーラインを同定できる事を報告した [2],[3]。

本研究では、新たに化学反応計算においてダスト表面反応を導入した場合と、ダストサイズを成長させた場合について H<sub>2</sub>O の存在量とその分布を調べ、その結果を元に H<sub>2</sub>O 輝線プロファイルを計算した。まずダスト表面反応を導入した場合は、円盤赤道面のスノーライン内側では H<sub>2</sub>O ガスの存在量が増加する一方、円盤表層部の高温領域では減少した。その結果、輝線の放射強度が数倍程度増加し、かつその増加量は波長が短い輝線ほど多い事も分かった。また、円盤表層部の高温領域からの寄与が小さくなった事で、A 係数がより大きな輝線も H<sub>2</sub>O スノーラインの決定に使える可能性が示された。一方ダストサイズを成長させた場合は、円盤表層部の高温領域での H<sub>2</sub>O ガス存在量が、増加する事が分かった。講演では将来の分光観測との関係についても議論する。

1. Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H., *ApJ*, 722, 1607 (2010)
2. Notsu, S., et al., *ASPACS*, in press. (2015)
3. Notsu, S., Nomura, H., et al. in prep.

## 星惑 a9 HiCIAO を用いた赤外線偏光観測による IM Lup の星周円盤の観測

辰馬 未沙子 (国立天文台三鷹 M1)

惑星は前主系列星である T タウリ星やハービッグ Ae/Be 星の周りにある原始惑星系円盤から形成される。この惑星形成過程を知るためには星周円盤の観測が必要であり、今まで数多くの円盤が観測されてきた。その中でも特に、おおかみ座星形成雲にある M0 型 T タウリ星の IM Lup は、過去の観測から典型的な T タウリ星であるが比較的大きな星周円盤を持つことが知られている。しかし、円盤の全体像はわかるが細かい構造はわかっていなかった。そのため、高いコントラストで円盤の中心領域を見る必要がある。

そこで今回、我々は SEEDS プロジェクトの一環として、すばる望遠鏡 HiCIAO カメラの偏光差分撮像モードを用い、H バンド (1.6 $\mu$ m) で IM Lup の星周円盤の偏光強度 (偏光度  $\times$  全強度) を観測した。中心星やそのスペckルノイズは無偏光 (偏光度 = 0) なので、今までの観測とは違いこの方法では完全に中心星の影響を取り除くことができ、円盤の中心領域まで見ることができる。その結果、円盤の楕円によるフィッティングや動径方向、方位角方向の輝度分布から、偏光強度が短軸に対して非軸対称であることがわかった。一方、過去の観測による全強度の画像からは、このような短軸に対する非軸対称性は見られていない。

この非軸対称性の起源としては二つの可能性が考えられる。一つ目としては全強度に時間変動がない場合、偏光度に非軸対称性があるということであり、これは性質の異なるダストが非軸対称に分布しているということを示している。二つ目としては全強度に時間変動がある場合、全強度に非軸対称性があるということであり、これは非軸対称な内縁円盤の shadowing 効果によるということを示している。この非軸対称性の起源を探るために、円盤モデルとのフィッティングや追加観測を予定しており、本講演ではその結果の紹介とともに今後の課題についても議論する。

1. C. Pinte, D. L. Padgett, F. Ménard, et al., *A&A*, 489, 633 (2008)

## 星惑 a10 原始惑星系円盤におけるダストと乱流場の相互作用

古谷 眸 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

原始惑星系円盤において、ダストがサブミクロンサイズからセンチメートルサイズへ成長するにあたり、衝突破壊問題が指摘されている。衝突破壊は乱流渦に追従することによって加速されたダスト同士の相対速度が、限界付着速度を超えてしまうため生じる問題である。しかし、乱流渦中のダストの運動は、ダストサイズに依存するため、相対速度は乱流渦とダストの運動を整合的に解いて決めなくてはならない。ダストとガスの相対速度の緩和時間を乱流渦の時間スケール (コルモゴロフ時間) で規格化した無次元量を Stokes 数といい、乱流渦に対するダストの追従性を表す指標となる。Stokes 数が 0 の時、ダストは乱流渦と共に運動する。Stokes 数が 0 から大きくなるにつれて、ダストは乱流渦から弾き飛ばされ、渦度の小さい領域に集中し、強い空間相関が誘起される。Stokes 数が 1 のオーダーにおいて、もっとも極端な空間相関が現れることが示唆されている (Pan et al. 2011)。Stokes 数が 1 になるダストサイズは、原始太陽系円盤の場合、太陽から 10AU の距離でおよそ 10 $\mu$ m

である。一方、Stokes 数が大きすぎるとダストは完全に乱流渦とは独立に運動する。

しかしながら、先行研究では、乱流のカスケードと散逸について、粘性流体の正しい支配方程式 (Navier-Stokes 方程式) は解いておらず、格子サイズで決まる数値粘性によって疑似的に扱っているため、この結論が正しいか否かはわからない。そこで我々は、Navier-Stokes 方程式を直接解く 3 次元大規模直接数値計算 (DNS) を行っている。この計算により、Stokes 数が 0 から 10 まで変化した場合のダストの運動の違いを明らかにし、Stokes 数に依存したダストの相関関数を計算することができる。これによって、ダストの相対速度と衝突確率を正確に見積もることが可能となる。

本講演では先行研究との比較を行い、ダストの衝突破壊問題を解決する可能性について議論する。

1. Liubin, P., et al. ApJ, 740, 6 (2011)

## 星惑 a11 磁気乱流により駆動される原始惑星系円盤 風中でのダストの動力学

三宅 智也 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

星が新たに誕生すると同時に、その若い星の周りにガスとダストから成る原始惑星系円盤が形成される。惑星は、その原始惑星系円盤中で形成されると考えられている。原始惑星系円盤進化の上で、未だ理論的に解明されていないことの一つに円盤の散逸機構がある。近赤外線観測から、原始惑星系円盤の散逸時間は  $10^6 - 10^7$  年であると推察されている。円盤の散逸機構の候補として、中心星からの UV や X 線放射による光蒸発が幅広く研究されている。しかし、Suzuki & Inutsuka (2009) では、磁気回転不安定性 (MRI) を引き金とした、磁気乱流により駆動される円盤風もまた、光蒸発と同等以上に円盤散逸の効果があることがわかっている。

ガスの散逸はダストの運動に影響を与えるため、この円盤風を考慮したダストの動力学を研究することは非常に重要である。そこで本研究では、磁気乱流により駆動する円盤風を考慮した原始惑星系円盤の鉛直方向に対して、ダストの密度分布の時間進化を数値シミュレーションすることにより、さまざまなサイズのダストの動力学について研究を行った。

その結果、ガスと同様に運動する比較的小さいダストは、円盤風により円盤外部へと流れ出す。一方、大きいダストは、円盤内部に留まる。面白い事に、中間サイズのダストは、重力と円盤風によるダストを持ち上げる力が釣り合い、最小質量円盤 (MMSN; Hayashi 1981) を仮定した場合、1AU で  $20 - 40\mu\text{m}$  サイズのダストが、赤道面から  $5 - 10$  スケールハイトの位置に浮いて滞留するという結果を得た。また、中心星からの距離に対する依存性を考慮すると、比較的小さいダストは円盤外側の領域にのみ残る。一方、大きいダストは計算領域内に収まるといった結果を得た。

これらの結果は、円盤内のダストが円盤内側領域から、そして小さいサイズから消失していくということを暗示している。また、若い天体まわりのダストを含む物質の観測結果を本研究結果で上手く説明できる可能性がある。

1. Miyake, T., Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2015 submitted to ApJ (arXiv:1505.03704)

2. Suzuki, T. K., & Inutsuka, S.-i. 2009, ApJ, 691,L49
3. Hayashi, C. 1981, Progress of Theoretical Physics Supplement, 70, 35

## 星惑 a12 赤外線天文衛星「あかり」と近赤外線地上望遠鏡 IRSF により検出したデブリ円盤の特性

渡邊 華 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

デブリ円盤とは、年齢 1 千万から 10 億年の主系列星が保持するダストの円盤を指す。これらの円盤では、惑星の元となる微惑星が衝突合体を繰り返す際にダストを供給していると考えられ、定常進化モデルで説明されてきた。しかし、これまでのデブリ円盤のサンプルは、数十 ~ 百 AU に位置する冷たいダストから構成されるものが多く、数 AU 相当の円盤の研究には、暖かいダストの放射を検出する中間赤外線での探査が必要である。本研究では、赤外線天文衛星「あかり」の中間赤外線全天サーベイデータを用い、デブリ円盤を無バイアスに探査することでサンプルを増やし、円盤の特性を議論する。

デブリ円盤は、主星の放射に対し赤外域で超過を示す。「あかり」全天サーベイデータと照合できた主系列星 681 天体に対し、赤外超過の有無を調査した。先行研究にない 2MASS 近赤外線カタログを用いたが、検出器飽和により、明るい天体の測光精度が悪かったため、近赤外線地上望遠鏡 IRSF で近傍の明るい 325 天体を追観測し、測光精度を一桁改善した。波長  $18\mu\text{m}$  での観測値と主星放射の比の頻度分布に、正規分布を仮定し、 $3\sigma$  以上の超過放射を持つ天体をデブリ円盤とした。検出したデブリ円盤に対し「あかり」の波長  $9\mu\text{m}$ 、WISE の波長 11、 $22\mu\text{m}$  の測光値を加え、円盤スペクトルからその特性を導出した。

探査の結果、新検出の 9 天体を含む、53 天体のデブリ円盤を検出した。主星放射の見積もりに IRSF の観測結果を用いたことで、近傍で明るい主星のデブリ円盤の検出精度を向上することに成功した。検出確率は ~8% で、先行研究と矛盾がない。また、検出したデブリ円盤の年齢とダスト量を比較したところ、定常進化モデルでは説明できないほど、年齢に対して大量のダストを保持する天体が存在した。これらは、巨大衝突など突発的なイベントの寄与を示唆する。

## 星惑 a13 多体惑星系における軌道の長期的安定性と その進化

佐藤 雄太郎 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

太陽系の地球型惑星は火星程度の大きさの原始惑星同士の衝突によって形成されたと考えられており、これは巨大衝突ステージと呼ばれる。このことは理論的な研究からだけでなく、地質学的な証拠からも支持されている。このステージが起こるまでの時間は原始惑星の軌道間隔に非常に強く依存しており、間隔が広がるほど不安定時間が急激に長くなる。本講演では、この物理現象を発見した Chambers et al.(1996) のレビューをまぜ行う。

離心率と軌道傾斜角が十分小さい 2 つの原始惑星が太陽の周りを公転するとき、初期の軌道長半径の差を相互ヒル半径で規格化した無次元の長さ  $\Delta$  が  $2\sqrt{3}$  より大きい場合は軌道不安定にならないことは解析的に

も数値計算からも知られている。しかし、3つ以上の原始惑星が存在する系の不安定性については解析的には解けないため、数値計算によって調べられた。 $\Delta$  をパラメータとして  $\Delta = 10$  まで彼らが数値計算した結果、数値計算を行った時間内で系は必ず不安定になり、不安定時間  $t$  は  $\Delta$  の指数関数になることがわかった。火星程度の原始惑星が隣の原始惑星と衝突を繰り返し地球ができる、大きくなるにつれて惑星が間引かれるため軌道間隔は広がる。地球ができる直前の軌道間隔は約13倍のヒル半径となり、その不安定時間を見積もると太陽系の年齢を超えてしまう。これは、 $t$  が  $\Delta$  の指数関数になっているため、軌道間隔をすこし変えただけで不安定時間が劇的に増加するからである。もちろん、不安定時間が太陽系の年齢を超えることはないことがその後の研究で確認されている。(e.g., Kominami & Ida 2002)

本講演ではさらに、不安定になった後の衝突・合体を取り扱い、その後の原始惑星の軌道進化について数値計算を行う予定である。そして、この研究をさらに発展させ原始惑星系円盤の消失過程が巨大衝突ステージに与える影響についても議論したい。これにより、太陽系の地球型惑星の軌道分布やそれらの形成年代や形成メカニズムについて理論的に迫りたいと考えている。

1. J. E. Chambers, G. W. Wetherill, and A. P. Boss 1996, *Icarus*, 119, 261
2. J. Kominami and S. Ida 2002, *Icarus*, 157, 43
3. K. Nakazawa and S. Ida 1988, *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 96

#### 星惑 a14 負の圧力への応用に向けたゴドノフ SPH 法の改良

杉浦 圭祐 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

固体惑星は天体衝突の繰り返しによる合体成長で形成されたと考えられている。従って惑星の起源を詳しく理解するにあたって、小天体同士の衝突による破壊及び合体の効果を詳細に理解することは極めて重要である。しかし小天体は km 以上のサイズを持つため、室内実験で衝突を再現することは不可能である。よって数値計算を用いて小天体の衝突破壊・合体の効果を評価する必要がある。近年小天体の衝突計算が、Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法という流体の数値計算方法を弾性体に応用することで行われている (e.g. Benz and Asphaug 1999)。しかしこの標準 SPH 法には、固体が引き伸ばされた時に生じる張力を表す負の圧力の状態において、Tensile Instability という粒子同士がくっついてしまう不安定性が存在する (Swegle et al. 1995)。Monaghan 2000 ではこの不安定性を人工圧力という項を導入して解決したが、この解決方法は元の方程式にない非物理的な項を導入した不自然なものである。さらに Mehra et al. 2012 では、この人工圧力の項では高速衝突計算における Tensile Instability を防ぐことができなかったと報告されている。従って天体の衝突計算を SPH 法で行うにあたって、より自然で堅牢な解決方法が必要である。SPH 法における Tensile Instability の起源はその離散化誤差である。標準 SPH 法では離散化をする際に荒い近似を使用しているため、一般の粒子配置では空間 1 次精度すら達成できない。一方でゴドノフ SPH 法 (Inutsuka 2002) では離散化を注意深く行い、空間 2 次精度を達成している。よってこの高精度なゴドノフ SPH 法を用いれば Tensile Instability を自然に解決することが可能であると考えられる。そこで本講演ではゴドノ

フ SPH 法の安定性を線形安定性解析で評価した結果を紹介し、ゴドノフ SPH 法を用いた Tensile Instability の自然で新しい解決方法について論ずる。(Ref.) "An Extension of Godunov SPH: Application to Negative Pressure Media", Sugiura and Inutsuka 2015 submitted to JCP (arXiv: 1505.05230)

1. S. Inutsuka, *J. Comp. Phys.*, 179, 238-267, 2002
2. J. W. Swegle, D. L. Hicks and S. W. Attaway, *J. Comp. Phys.*, 116, 123-134, 1995
3. J. J. Monaghan, *J. Comp. Phys.*, 159, 290-311, 2000

#### 星惑 a15 WPH 法による月形成シミュレーション

河瀬 哲弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

最も有力な月形成のモデルとしてジャイアント・インパクト説がある。この説では、原始地球に火星サイズの原始惑星が衝突したと考えられている。その結果、衝突物のマントルが飛び散り、差動回転円盤が形成される。その後、この円盤物質が自己重力で集積し、合体成長することで月が誕生したとされる。この説は月のコアが他の太陽系天体のコアと比べて小さいなどのいくつかの観測事実をうまく説明できる。

実際にジャイアント・インパクト説で月形成が可能かどうかを確かめるため、月形成のシミュレーションが多くの先行研究でなされてきた。しかし、それらはジャイアント・インパクトから円盤形成までを粒子法流体スキームの 1 つである SPH 法 (Smoothed Particle Hydrodynamics) [1]、円盤内での月形成を N 体計算 [2] で行うといった 2 段階のものであった。このため、段階間で多くの仮定を必要とし、最終的な結果に不定性が残っている。ジャイアント・インパクトから月形成までの一貫した流体シミュレーションが行われてこなかった理由は、差動回転円盤の長時間の計算に SPH 法が適していないからである。近年、この問題を克服した新しい粒子法流体スキームである WPH 法 (Weighted Particle Hydrodynamics) が開発された [3]。これにより差動回転円盤の流体シミュレーションが長時間可能となった。

本研究では、N 体計算で行われた円盤内での月形成を WPH 法で計算し、両者の結果を比較する事を目標とした。その結果、まだ簡単なモデルではあるが、WPH 法による周地球円盤の数値計算の結果、N 体計算と同様に一個の重い天体が形成され、WPH 法を用いた月形成シミュレーションが有効である可能性が高い事が確認できた。今後は WPH 法でジャイアント・インパクトから月形成まで一貫したシミュレーションを行う予定である。

1. Benz, Slattery, & Cameron, *Icarus* 66, 515-535 (1986)
2. Ida, Canup, & Stewart, *Nature* 389, 353-357 (1997)
3. Gaburov & Nitadori, *MNRAS* 414, 129 (2011)

#### 星惑 a16 周期解析を用いたケプラー光度曲線からの惑星系シグナルの抽出

逢澤 正嵩 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

宇宙望遠鏡ケプラーによるトランジット (主星の蝕による減光) 観測によって、1000 を超える系外惑星が検出されている。トランジット惑星は、ケプラーから得られた光度曲線を解析することで検出されるが、光度曲線には統計誤差の他に、装置由来の誤差やフレアや黒点等の星の活

動による系統誤差が含まれている。そうしたノイズの除去は、スーパーアースやまだ検出されていない系外衛星 [1]、リング、トロヤ群 [2] (惑星のラグランジュポイント L4, L5 付近の小惑星群) 等の微弱なシグナルの検出に不可欠である。

従来、ノイズ除去のための光度曲線のデータリダクションには、phase folding というトランジットの何周期分ものデータを平均する手法が取られてきた。phase folding による解析は、データの増加による統計誤差の減少は望めるが、系統誤差を取り除くためには誤差の性質をモデル化した解析が別個必要となる。そこで [3] では、光度曲線をフーリエ級数近似した後、トランジットの周期に対応するフーリエ係数のみを抜き出してデータを再構成する手法を提案した。この手法を用いると、惑星の公転周期と同期したシグナルのみを光度曲線より抜き出す事ができるため、結局惑星や衛星の情報を保ったまま星の活動等の系統誤差の除去が期待できる。またこの手法は系統誤差のモデル化の必要が無いため簡便であり、解析速度も phase folding に比べ早い。

本講演では、[3] に基づいた周期解析と phase folding の二つの手法の長所、短所について考察したのち、周期解析をケプラーで得られた光度曲線 (e.g. HAT-P-7) に適用して、系外衛星やトロヤ群を探索した結果を報告する。

1. Hippke, M. 2015, arXiv:1502.05033
2. Janson, M. 2013, ApJ, 774, 156
3. Samsing, J. 2015, arXiv:1503.03504

## 星惑 a17 惑星内部の対流シミュレーション：二重拡散対流の理解に向けて

大野 由紀 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

惑星の進化の理解において、惑星内部の構造や熱の輸送は重要である。惑星内部では全体に対流現象が起きていて熱を外に逃がしていると考えられてきたが、それでは説明のできない半径を持つ惑星が数多く存在している。例えば、太陽系外にはホットジュピターと呼ばれる中心星の近くを回る巨大なガス惑星がある。収縮による重力エネルギーの解放が中心星から受ける放射の効果で遅れていることが計算されているが、それでは説明できないほど大きな半径を持っているものもある。また、太陽系内の惑星についても土星や天王星においても現在の光度が説明できていない。これらの問題の解決方法として、惑星内部の組成勾配によって、対流による外部への熱の輸送効率に変化していることが挙げられている。

一般に対流現象は重力下で温度勾配が断熱温度勾配よりも急である場合に発生する (Schwarzschild の条件)。組成 (平均分子量) に勾配がある場合には、組成的に下の方が重ければその分安定化、逆であれば不安定化し、この場合の安定条件は Ledoux の条件で表される。実際の現象では熱や組成の勾配に加えて、これらの拡散の効果も加わるため、非常に複雑になる。例えば、組成的に不安定で熱的に安定なときに、拡散の影響で二重拡散対流と呼ばれる現象が起こることが知られている。

本研究では、熱と組成の勾配と拡散のそれぞれを考慮した場合の対流現象について、熱フラックスを定量的に評価し、観測結果と整合性のある惑星形成の理論の構築を目指す。SPH 法を用いて 2 次元の対流の数値シミュレーションを行い、熱フラックスを計算する。流体の数値計算手法の中でも SPH 法は粒子を用いたラグランジュ的な計算手法であるので、拡散の効果を完全に取除いた計算をすることができ、拡散が結

果に与える効果をはっきりと確認できるというメリットがある。本講演では、数値シミュレーションの結果を紹介し議論する。

1. Baraffe, Chabrier and Barman 2010, Rep. Prog. Phys. 73 016901
2. Leconte and Chabrier 2013, Nature Geoscience, 6, 347-350
3. Rosenblum et al. 2011, ApJ, 731, 66

## 星惑 a18 系外惑星雲モデルの構築と観測との比較

大野 和正 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

透過スペクトルから分子の吸収線が読み取れない系外惑星が発見されつつある。その原因として、大気に存在する雲が透過光を遮ってしまっていることが示唆されている。このような現象が発生するか議論するには、系外惑星に形成される雲の光学的性質を推定することが重要となる。雲の光学的性質は雲を構成する粒子のサイズ分布、数密度分布によって決定される。しかし、従来の系外惑星雲モデルはサイズ分布や粒子成長の物理仮定をパラメーターで表現しており、環境条件に十分な制約がかけられないモデルとなっている。そこで、本研究では雲粒子成長過程のパラメーター任意性を最小限に抑えることを目指し、雲形成の物理を無矛盾に計算する 1 次元雲モデルを作成した。

本モデルでは地表から見て上昇する粒子を雲粒、落下する粒子を雨粒として 2 種類の粒子のサイズ分布、数密度分布の進化を計算する。また粒子成長の物理は衝突成長と凝縮成長の 2 種類を考慮し、雲粒と雨粒の相互作用も考慮して計算する。本モデルのテストとして、地球海上での雲粒の粒径を計算し、海上での観測データと矛盾のない結果が得られることを明らかにした。

1. Rogers, R. Yau, M. 1989, International Series in Natural Philosophy. Pergamon Press
2. Rossow, W. B. 1978, Icarus, 36, 1
3. Zsom, A. Kaltenecker, L. Goldblatt, C. 2012, Icarus, 221, 603

## 星惑 a19 X 線天文衛星「すざく」と惑星分光観測衛星「ひさき」による木星の同時観測

沼澤 正樹 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

本講演では X 線天文衛星「すざく」による 2014 年の木星の観測結果について発表する。木星は太陽系最大の惑星である。地球の約 10 倍もの磁場強度 (木星表面) と数百木星半径にも及ぶ磁気圏を持ち、さらには衛星イオをプラズマ源としてその軌道にイオプラズマトラス (IPT) を形成している。これまでの先攻研究で、木星の磁極領域からの制動放射 (Bhardwaj et al. 2007) や、1-5 キロ電子ボルトの硬 X 線で木星の放射線帯やイオの軌道に一致する領域に広がった放射 (Ezoe et al. 2010) が確認されている。様々な高エネルギー現象を内包した木星の研究を進めることは宇宙物理学を紐解く上で有意義である。

「すざく」の特徴である低いバックグラウンドは、木星やその周辺の広がった X 線の観測に優位であるといえる。私たちは 2014 年 4 月 15 日から同 21 日まで、合計 140 キロ秒、14 個の観測データを取得した。本データのスペクトル解析を行った結果、スペクトルは 3 つの輝線と制動放射、巾開度で再現することができた。制動放射は 0.4 キロ電子ボルト

ト程度、巾関数の光子指数は 0.37 程度と非常にフラットで、非熱的放射を強く示唆するものである。

次にイメージ解析として、まず木星の軌道に沿った天空イメージを作成し、これにより木星の軌道に沿って X 線が検出できていることがわかった。さらに木星と地球の移動を補正した静止座標系イメージを作成し、木星からの放射の検出を確かめた。「すざく」の 2006 年で観測された木星周辺に広がった放射については現在解析中である。

名古屋大による木星付近での太陽風シミュレーションによると、本観測前半 (4 月 15 日から 17 日の間) に密度の高い太陽風が木星近辺を通過しており、更に X 線放射の時間変動にも注目して検証を進めている。本発表ではこれらの解析結果について述べる。

1. Bhardwaj et al. 2007
2. Ezoe et al. 2010

## 星惑 b1 R CrA 分子雲の原始星の短期、及び長期的 X 線時間変動

矢吹 健 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

原始星は星間ガスの動的降着期にある中心天体で、星の芯が急激に成長しつつある星の誕生の動乱期にあたる。分子雲コアと降着ガスは原始星そのものを厚く包み、原始星本体はすべての波長領域で検出不可能であった。赤外から電波では原始星が観測されるが、それらは原始星本体ではなく、星本体を包む周辺物質及びジェットである。

あすか衛星はこの検出不可能だとされていた原始星本体から硬 X 線を初めて検出した。その線のルミノシティは太陽のものと同くらべ 103 106 倍と桁違いに大きく、主系列星として安定に輝いている星よりも高エネルギー活動において活発であることが明らかになった。

R CrA 分子雲はあすか衛星で最も初期に原始星からの X 線が発見された記念碑的な領域の一つである。距離は約 130pc と非常に近い。あすかによる観測では原始星 IRS7 のフレアの際に鉄ラインのスプリット (6.81keV と 6.17keV) がみられた。6.17keV のラインは 6.7keV に観測される He-like の鉄輝線はもちろん、6.4keV の蛍光鉄輝線のドップラーシフトと考えてもオーダーが大きすぎる。また、XMM-Newton の観測では、Class 0 という原始星初期段階に近い原始星からも X 線が検出されている。私はこの領域の原始星の短期、及び長期的な時間変動を追うため、チャンドラ、及び XMM-Newton 衛星の全てのアーカイブデータを解析した。そして大きな時間変動を確認した。それらについて報告する。

1. Hamaguti et al. 2005 APJ 623,291

## 星惑 b2 全天 X 線監視装置 MAXI を用いた近傍の Young Stellar Object のフレア探査

鈴木 涼太 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

恒星として安定に核融合反応を起こすよりはるか前から星は活発なフレア活動を行なっている。我々のグループは全天 X 線監視装置 MAXI でそのような天体から X 線フレアを数例検出しており、若い星からの大規模フレアを MAXI で確かにスタディーできる感触を得ている。私は太陽系近傍の若い星に着目し、それらの X 線時間変動を打ち上げ直後からの MAXI のデータを使って探査した。その結果について発表を行う。

また、原始星段階のように未だ塵が降着している段階の星は、塵に埋もれ、誕生のプロセスを直接観測できるのは X 線帯域のみである。原始星のフレアにおける偏光を測定することにより、中心星及びその周辺の構造に迫ることができる。この偏光を観測する装置の開発についても発表する。

1. Adric R. Riedel, et al., arXiv:1401.0722 (2014)

## 星惑 b3 電子加熱が磁気乱流に与える影響

森 昇志 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

原始惑星円盤内の乱流はその角運動量を外側へ輸送する一方で、サブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星までその成長に影響を及ぼす。円盤で乱流を起こす機構の一つとして磁気回転不安定性が考えられている。この不安定性は電離度に依存しており、低電離度では不安定は発達しない。円盤内ではダストが荷電粒子を吸着し、低電離度になるために乱流が起きない場所があり、デッドゾーンと呼ばれる (Gammie 1996)。これまでデッドゾーンの外側では激しい乱流が起きていると考えられていた。しかし、その発達した磁気乱流によって作られる強い電場が電子を加熱し (電子加熱)、加熱された電子がダストに効率よく吸着され、電離度が減少し、磁気乱流が弱まる可能性が指摘されている (Okuzumi & Inutsuka 2015)。我々は、電子加熱が原始惑星系円盤中のどの領域で起こりうるかを調べ、どの程度磁気乱流が抑制されるかを推定した。その結果、デッドゾーンの外側の 20 AU から 80 AU という広い領域で電場加熱が起きうることを明らかにした。また、磁気乱流は従来の理解に対し、著しく弱まることを示唆された。さらに、負に帯電したダストが静電反発力によってダスト同士が衝突しにくくなる影響についても議論する予定である。

1. Gammie, C. F. 1996, ApJ, 457, 355
2. Okuzumi, S., & Inutsuka, S. 2015, ApJ, 800, 47
3. Mori, S., & Okuzumi, S., submitted to ApJ

## 星惑 b4 pebble accretion 過程を考慮した新たな衛星形成モデルの構築に向けて

芝池 諭人 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

木星と土星の衛星が、地球に次ぐ第二の生命存在環境として近年注目されている (e.g., Hsu et al., 2015)。特に、エンケラドスとエウロパは内部海を持ち、プリュームが噴出している。また、エンケラドスの内部には、生命誕生の場として有力な海底熱水系が確認された。さらに、タイタンは窒素とメタンから成る厚い大気を持ち、有機物が豊富に存在すると考えられる。しかし、これらの衛星の形成過程はまだよくわかっておらず、現在の衛星の環境も不明な点が多い。

一方で、近年、惑星形成論において従来とは描像の異なる「pebble accretion モデル」が提唱された (Lambrechts and Johansen, 2012)。このモデルは、円盤外側で形成された 10cm ほどの固体物質 “pebble” が (原始) 惑星に大量に集積し、惑星が急成長するモデルである。この pebble accretion 過程は、衛星形成過程においても重要となる可能性がある。

本研究では、原始惑星系円盤と周惑星円盤の条件設定を変えつつ以下

を計算し、pebble accretion 過程を考慮した衛星形成モデルを構築する。すなわち、まず大規模数値流体計算 (Tanigawa et al., 2014) を用いて、ガスにトラップされて周惑星円盤流入する pebble のモデルを作る。そして、両円盤内での pebble の移動と成長の同時計算を行い、各衛星の pebble 集積量の推移と各衛星の成長を計算する。

なお、この衛星形成モデルは、土星 (と木星) より優位に高く彗星に等しい、エンケラドスの D/H 比を説明できる可能性がある。つまり、氷 pebble は彗星同様円盤の外側で形成され高い D/H 比を持つと考えられるため、これら氷 pebble により D/H 比を保ったままエンケラドスを形成すれば良い。また、円盤外側にて氷 pebble にクラスレートとして捕獲された揮発性元素は、タイタン大気やエンケラドスなど氷衛星の内部海の元素組成に影響を与えたと考えられる。各衛星の集積した揮発性元素量、特に有機物量は生命存在可能性にも示唆を与えるだろう。

本発表では、これまでの研究経過を報告し、今後の見通しを紹介する。

1. H.W. Hsu, F. Postberg, Y. Sekine, T. Shibuya, S. Kempf, M. Horányi, A. Juhász, N. Altobelli, K. Suzuki, Y. Masaki, T. Kuwatani, S. Tachibana, S. Sirono, G. Moragas-Klostermeyer and R. Srama, Nature, 519, 207-210 (2015)
2. M. Lambrechts and A. Johansen, A&A, 544, A32 (2012)
3. T. Tanigawa, A. Maruta and M.N. Machida, ApJ, 748, 109 (2014)

## 星惑 c1 低い磁気プラントル数でのスモールスケールダイナモ

望月 星那 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙初期の磁場はおそらく極端に弱かったが、現在の宇宙は強く磁化されている。この何桁にもわたる磁場の強さの成長を説明するために、速い増幅プロセスが働く必要がある。今日知られている最も効果的なメカニズムはスモールスケールダイナモとよばれるもので、乱流の運動エネルギーを磁場のエネルギーにかえるものである。その効率は、乱流スペクトルのべきに依存する。この研究では、非圧縮のコルモゴロフ乱流から、圧縮性の高いバーガーズ乱流までの乱流スペクトルを調べ、低い磁気プラントル数  $P_m$  (磁気レイノルズ数  $R_m$  とレイノルズ数  $Re$  の比) のために起こる乱流の特性を分析した。我々は、カザンツェフ方程式 (乱流の進化を記述する方程式) を WKB 近似を用いて解いた。低い磁気プラントル数の極限で磁場の成長率は  $R_m$  の  $(1 - ) / (1 + )$  乗に比例する。ここで、 $\alpha$  は乱流スペクトルのべきである。我々はさらに、臨界磁気レイノルズ数  $R_{m,crit}$  についても議論する。 $R_{m,crit}$  の値はだいたいコルモゴロフ乱流では 100 でバーガーズ乱流では 2700 である。また、もし磁気レイノルズ数が十分大きければ、低い磁気プラントル数のもとでスモールスケールダイナモが働くことがわかった。小さいスケールでの磁場の増幅は幅広い範囲の天体物理的環境で起こり、弱い磁場を短い時間のスケールで増幅することができる。

## 星惑 c2 宇宙初期の星形成と磁場の効果

樋口 公紀 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初期宇宙の磁場強度は非常に弱く、 $1nG$  未満であると考えられている (Barrow et al. 1997; Schleicher et al. 2008)。そのため宇宙初期の天体形成の研究では、多くの場合磁場の効果が無視されてきた。しかし

宇宙の構造形成に伴い磁場は局所的に  $\mu G$  程度まで増幅されることが示唆されている。近年の研究では、初代星が誕生する環境でも磁場は small-scale turbulent dynamo と呼ばれる機構によって、星や他の天体形成に影響を与える程度まで増幅することが認識され始めてきた (e.g., Schleicher et al. 2010)。以上の事実から初期宇宙の星形成を考える場合でも磁場を考慮する必要があると考えられる。

Susa et al. (2015) では、宇宙線と放射性元素によるイオン化を考慮し、異なる金属量を持つガス雲の熱・化学進化を計算した。また計算結果を用いて磁場とガスの結合の度合いを評価した。その結果、金属量が低いほど、または宇宙線やガスに含まれる放射性元素量が多いほど、磁場はガスとよく結合していることを示した。さらに磁場の散逸が星形成雲のダイナミクスに与える影響と  $Z = 0$  の初期宇宙の small-scale dynamo action に与える影響について議論を行った。

本発表では Susa et al. (2015) に沿って磁場を考慮した様々な環境における星形成過程を議論し、今後自分が行う研究について述べる。

1. Susa, H., Doi, K., & Omukai, K. 2015, ApJ, 801, 13
2. Nakano, T., & Umebayashi, T. 1986, MNRAS, 218, 663
3. Turk, M. J., Oishi, J. S., Abel, T., & Bryan, G. L. 2012, ApJ, 745, 154

## 星惑 c3 ファーストスターの進化と最終的な質量

宮首 宏輝 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初期宇宙においてファーストスターは重要な役割を担っている。ファーストスターによる超新星爆発によって合成された重い元素は二代目や三代目の星形成を促進する。また、ファーストスターは高赤方偏移で観測される超質量ブラックホールの形成にきっかけを与える。ファーストスター形成の理解はそれゆえ、宇宙初期の歴史について知るうえで必要不可欠である。どのようにしてファーストスターが原始ガス雲から形成されたかということについては近年急速に理解されてきている。しかしファーストスターの質量分布については依然として解明されていない。この講演では先行研究についてのレビューを行った後、今後に行う研究について述べる。先行研究については、宇宙論に基づいて原始星形成の輻射流体力学計算を行ったものを紹介する (Hirano et al. 2014)。この計算では、100 のミニハローの統計サンプルを用いて、第一世代の星は 10 太陽質量から 1000 太陽質量までの幅広い質量分布を持つことが示された。まず最初に、この研究では原始星形成ガス雲を生み出す宇宙論的シミュレーションを実行した。そして、星の輻射フィードバックによって初代星へのガス降着が止まるまでの星形成や、その後の原始星進化を計算している。最終的な星の質量を決定する降着率は、原始ガス雲ごとに著しく異なる。降着率が低い場合は、輻射フィードバックによって原始星の成長は抑えられている。そして最終的な質量は数十太陽質量になる。降着率が高い場合は、原始星の外層は拡大し続けていて、原始星の表面温度は低いままである。このような初代星には強い輻射フィードバック効果が働くことはなく、100 太陽質量にまで成長できる。この研究で得られた幅広い質量範囲によって、初期宇宙でファーストスターがさまざまな役割を果たすことを示された。また最終的な星の質量と星形成ガスの物理的特性の間に確かな相関性があることが見つけられた。この相関性から、詳細に原始星の進化を辿ることなしに、ガス雲の物理的な特徴や母体であるハローの特徴からファーストスターの質量を見積もることができる。

1. S.Hirano et al., Apj 781, 60 (2014)

al.,PASJ,63,105(2011))

## 星惑 c4 化学進化から調べる星団形成

大橋 聡史 (国立天文台三鷹 D2)

分子雲コア (~0.1 pc,  $10 M_{\odot}$ ) は乱流場が卓越し、安定平衡状態であることが知られている。分子雲コアがどのように不安定になり、どのように星形成を始めるのかは、星形成研究において最も重要な課題の一つである。そこで我々は化学進化と力学進化の両方の観点から分子雲コアの進化を調べている。特に、銀河系のほとんどの星は巨大分子雲の中で星団として誕生することが知られているので、太陽系から最も近い巨大分子雲である Orion A GMC で研究を行っている。現在までの研究によって CCS, HC<sub>3</sub>N 分子は分子雲コアの初期で豊富になり、N<sub>2</sub>H<sup>+</sup> や NH<sub>3</sub> は後期段階で豊富になることが明らかになった。つまりこれらの分子の柱密度比を計ることで分子雲コアの進化が判別できる。また、化学進化とコアの乱流の散逸には相関があることも、新たにわかった。乱流の散逸が分子雲コアを不安定にし、星形成を始める上で重要な役割であることを示している (Ohashi et al. 2014, Tatematsu et al. 2014)。本公演では、分子雲コアに対するガスの運動も議論し、星団形成の様子について示唆する。

1. Ohashi, S., Tatematsu, K., Choi, M., et al. 2014, PASJ, 66, 119
2. Tatematsu, K., Ohashi, S., Umemoto, T., et al. 2014, PASJ, 66, 16

## 星惑 c5 Star Formation in the Orion A Molecular Cloud

佐々木 一成 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

オリオン A 巨大分子雲 (Orion A Giant Molecular Cloud, Orion A GMC) では活発に星形成がおきていると考えられている。論文「New Panoramic View of 12CO and 1.1mm Continuum Emission in the Orion A Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation (Shimajiri, Y., Kawabe, R., Takakuwa, S., et al)」による Orion A GMC 北部の 12CO 及び 1.1mm 連続輝線広域観測の結果を紹介する。1.1mm 波はチリの Atacama Submillimeter Telescope Experiment (ASTE) 10m 望遠鏡に搭載された AzTEC カメラで観測した。また 12CO 輝線は野辺山国立天文台 (NRO) 45m 望遠鏡及び 25 ビーム受信機 BEARS を用いて観測した。AzTEC では 12pc\*17pc の領域を空間分解能 ~40" で、NRO45m 鏡では速度分解能 ~1.0km・空間分解能 ~21" でデータを得られた。観測の結果 Orion A では 2 つの要因による星形成が起きていることがわかった。1) OMC-2,3 東部との衝突による乱流 2) フィラメント構造への UV 照射

この結果から Orion A での星形成を包括的な視点から研究する。また今年 10 月末から NRO45m 望遠鏡及び 4 ビーム受信機 Forest を用いた Orion A の星形成レガシプロジェクトに参加・研究する予定なので、今回の講演をそのときにいかしたいと思う。

1. New Panoramic View of 12CO and 1.1 mm Continuum Emission in the Orion A Molecular Cloud. I. Survey Overview and Possible External Triggers of Star Formation (Shimajiri, Y., Kawabe, R., Takakuwa, S., et

## 星惑 c6 へびつかい座 分子雲の構造析

神 貴志 (新潟大学自然科学研究科数理物質専攻 M1)

暗黒星雲は一般的に低温かつ高密度であり、ガスが主として分子の状態である星間雲を分子雲と呼ぶ。この分子雲が自己重力によって収縮することで分子雲コアが形成される。へびつかい座 分子雲は近傍にある暗黒星雲であり、星形成の現場として非常に良い研究対象である。Maruta et al の研究では、へびつかい座 分子雲の 68 個の分子雲コアを同定し、オリオン A 巨大分子雲と距離の補正を行い比較した結果、物理的な特性が類似していることが分かった。また同定したコアをピリアル解析を適用することでコアの大部分は重力的に束縛された状態にあるが重力エネルギーより外圧の効果が重要な役割を果たしていることを示している。このことからクラスター形成環境下でのコアの形成と進化は外圧が重要であることが示される。今回は以上について発表を行う。

1. Maruta, H et al 2010, Apj 714 680

## 星惑 c7 周期的な強度変動を示すメタノールレーザー放射源 G9.62+0.20 のモニター観測

佐藤 宏樹 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

6.7GHz メタノールレーザーは大質量星形成領域のみから検出される非常に明るい放射で、HII 領域形成より前に多く見られる。これより、レーザーは大質量星の進化・形成を明らかにする上で良い観測プローブとなり得る。今回の研究では大質量原始星周辺では珍しい周期的な強度変動レーザーが初めて観測された G9.62+0.20 を対象とした。Goedhart et al. 2004 においてレーザー強度の変動周期は約 246 日とされている。

この天体は日立 32 m 電波望遠鏡 (以下、日立局) で 2012 年 12 月 30 日から 2014 年 1 月 10 日、及び 2014 年 5 月 7 日から現在まで毎日観測を行っている。16 のスペクトル成分を検出し、そのうち 4 成分の周期的強度変動を確認した。日立局のビーム半値全幅が 4.6 分角のため、対象天体から 10 秒角南に位置する G9.61+0.19 のスペクトル成分を同時に受信してしまっているが、日立局の観測結果の各スペクトル成分に、過去の VLBI 観測による空間分布を対応させた結果、4 つの周期的強度変動成分は対称天体に付随していることが判明した。これらの周期的強度変動成分のうち 3 成分は新検出で、変動周期は 4 成分ともおよそ 246 日であった。

今後は新検出成分についての空間分布の把握と、各強度変動成分の周相位相のずれと空間分布の関係を明らかにするための解析などを行っていく予定である。

1. Goedhart et al., 2014, MNRAS 355, 553G
2. Fujisawa et al., 2014, PASJ 66, 31
3. Walsh et al., 1998, MNRAS 301, 640W

## 星惑 c8 IC1848 における変光・移動天体サーベイ

蓮岡 克哉 (岡山理科大学 M2)

IC1848 (W5) は大質量星形成領域の一つで、Spitzer 宇宙望遠鏡や Herschel 宇宙望遠鏡によって早期のターゲット天体として観測されている。銀経  $+137^{\circ} 51'$ 、銀緯  $0^{\circ} 55'$  であり、ほぼ銀河面に位置するカシオペア座の星形成領域である。IC1848 に連なる W3 の距離は Hachisuka et al. (2006) の VLBA 観測により  $2.04 \pm 0.07$  kpc と見積もられている。研究室では検出例の少ない若い変光天体で激変を示す FU Ori 型星の探査を行っている。

本研究では IC1848 を対象に 2 つの時期が異なる画像 (POSS1 と POSS2 の R バンド) を用いた R-GB 法により、変光天体と移動天体のサーベイを行った。解析データは The STScI Digitized Sky Survey (DSS) から取得した。1 領域を  $5 \times 5$  として、260 領域調べ、変光天体 16 個、移動天体 210 個を検出した。発見した変光天体のうち 9 天体は SIMBAD に対応天体があるが、既知の変光天体は LW Cas (FU Ori 型と推定) のみであった。変光天体は追観測をする予定である。

今回は、IC1848 方向に多くの移動天体 (中速度の固有運動星と考えられる) を発見したため、主に移動天体について報告する。発見した天体は  $1.5 - 9.6$  の移動が見られ、平均的に  $3.5$  すなわち固有運動の速度は  $0.1$  /yr だった。また、移動方向は銀河面に対して平行に移動する天体が多い傾向が見られたが、銀河面に対して上方向に移動する天体も 4 個見られた。

## 星惑 c9 長いタイムスパンを持つオリオン・トラペジウムクラスターの赤外線撮像観測

伊藤 綾香 (国立天文台三鷹 M1)

オリオン・トラペジウムクラスターは、地球に最も近い大質量星形成領域にある若い星団である。このクラスターは明るい星雲 (オリオン大星雲) に埋もれており星間塵による吸収が大きいため、可視光では観測困難である。さらに若くても低質量の天体は低温であるため、年齢の若い (100 万年程度の) 低質量恒星・褐色矮星・浮遊惑星の観測には赤外線波長が最も有効である。

本研究では南アフリカ天文台に設置された IRSF 望遠鏡で 2000 年・2005 年・2014 年に取得された赤外線画像 (JHK バンド) を解析する。観測装置は、2000 年は SIRIUS, 2005・2014 年は SIRPOL を使用している。約 15 年の長いタイムスパンによる取得画像の比較は、これらの装置を使用した観測において初めての試みである。

現在、2000 年と 2005 年のデータの処理を完了した段階である。測光誤差が 0.05 等以下の星を解析の対象とする。キャリブレーションは 2MASS のデータで行い、41 星に対する等級差の標準偏差は J, H, K に対してそれぞれ、0.085, 0.048, 0.071 等であった。観測時間が異なるため、誤差 0.05 等に対応する概略の限界等級は 2000/2005 年で、 $J=14.5/13$  等、 $H=13.5/12$  等、 $K=13/11.5$  等であった。

二色図上で塵によって赤化を受けた背景の星と、塵の円盤からの熱放射によって赤い色をしている若い星団の星を区別することができる。2000 年と 2005 年の二色図から数 10 個の塵円盤を持つ可能性のある星が同定できた。今後、2014 年のデータも加えることで得られるデータの長いタイムスパンを利用して、色-等級図の解析から得られる明るさと変光の情報、さらに、固有運動のデータも合わせて、これらの星の性質を詳しく調べる。

1. J.Koornnef. et al, Near-infrared photometry, Astron,Astrophys.128,84-93, 1983

2. John M.Carpenter et al, Near-infrared photometric variability of stars toward the orion a molecular cloud, The Astronomical Journal,121:3160-3190, 2001

## 星惑 c10 低質量原始星における化学組成の多様性

今井 宗明 (東京大学理学系研究科物理学専攻山本研究室 M1)

これまで、原始星天体の化学組成の特徴として Hot Corino 化学と呼ばれる現象が知られていた。原始星が誕生する前の分子雲コアの段階で CO 分子が星間塵に吸着し、水素化されて  $\text{CH}_3\text{OH}$  などの飽和有機分子に変化する。それが星形成に伴って蒸発して飽和有機分子に富む環境を作ることで説明される。これに対し、近年原始星近傍に  $\text{C}_4\text{H}_2$  のような炭素鎖分子が多く存在し、飽和有機分子が少ない天体 (L1527) が観測され、この化学組成を説明するため、WCCC (Warm Carbon-Chain Chemistry) という概念が提案された。WCCC では、分子雲コアの時代に C が CO に変化する前に星間塵に吸着される場合を考える。この C が H と反応し  $\text{CH}_4$  となり、それが原始星の誕生に伴う温度上昇によって蒸発し、 $\text{C}^+$  と反応することにより炭素鎖分子が生成されるとされている。この WCCC の考え方を支持する証拠の一つとして、実際に L1527 では、 $\text{CH}_4$  が蒸発する 25K 以上に対応する原始星の周りの領域に、炭素鎖分子が豊富に存在している観測結果が得られている。その他にも Hot Corino で激しく起こる重水素濃縮が L1527 では顕著でないことも、WCCC の考え方に矛盾しない結果である。これらの結果は、星形成を考える上で、今までの物理的な観測では見えてこなかった原始星の進化過程が、化学的な見方で見えてくることを示唆する点で興味を持たれる。今回特に、Hot Corino と WCCC の重水素を含んだ分子の組成の違いについての観測結果を紹介するとともに、今後の原始星の統計的な観測によって見えてくるのが期待される、Hot Corino や WCCC の違いを生み出す物理や、また、それぞれの惑星系のその後の進化についてなど、将来の研究の展望を述べる。

1. 坂井南美,2013, 天文月報 106,780

## 星惑 c11 星周円盤の分裂と進化に与える非局所的な輻射の影響

山本 貴宏 (京都大学 天体核研究室 M1)

本発表は論文 [1] のレビューである。

近年、大きい軌道半径 ( $10 \sim 10^3$  AU) を持つガス惑星が発見された。こうした惑星の形成モデルとして、原始星を取り巻く星周円盤の重力不安定性に基づくモデルが提唱されている。これは円盤が重力不安定性によりガス球を形成し、このようなガス惑星に進化したというシナリオである。本論文では、特に大質量円盤 ( $\sim 0.1 M_{\odot}$ ) が原始星 ( $\sim 10^{-3} M_{\odot}$ ) を取り巻いている状況に注目して、ガス球の形成条件およびガス球の進化について研究した。具体的には、原始星が形成されてから約  $10^4$  年までの円盤の分裂・ガス球の形成・進化を SPH 法によりシミュレーションし、その結果を解析した。

円盤の冷却については、粘性加熱と局所的な輻射輸送が釣り合うモデ

ルが主流であった。しかし、本論文のシミュレーションの結果、実際には鉛直方向の輻射よりも動径方向の輻射のほうが卓越していることがわかった。これにより今まで円盤の分裂条件とされてきた Gammie の条件は成り立たない。さらに初期条件を変えてシミュレーションした結果、ガス球の形成条件が質量降着率と回転エネルギーに依存する形で与えられた。また本論文では、渦状腕上の Toomre の  $Q$  や渦状腕の腕の長さも形成条件に寄与すると示唆している。さらに、円盤内で形成されたガス球は、原始星の第一コアと同様に、断熱的な進化をすることもわかった。これにより円盤中のガス球に対しても、普通の星形成と同様の進化過程を想定することができる。私は本論文の結果を受けて、ガス惑星だけではなく、褐色矮星や連星系の形成に対してもこのシナリオが適用できるかを研究しようと考えている。

1. Y.Tsukamoto, S.Z.Takahashi, M.N.Machida and S.Imutsuka, MNRAS, 446, 1175 (2015)

## 星惑 c12 赤外線天文衛星「あかり」全天サーベイによるデブリ円盤のスタック解析

小島 拓也 (宇宙科学研究所 M1)

可視光の星カタログの位置に基づいて赤外線天文衛星「あかり」の全天画像のスタッキングを行い、デブリ円盤と中心星の年齢との関係を調べた。

デブリ円盤とは、主系列星の周りのダスト円盤であり、星形成時の原始惑星系円盤が残存したものではなく、微惑星同士の衝突などによって二次的に形成されたものと考えられている。ダストが赤外線を放射するため、デブリ円盤は赤外線領域で観測される。Rieke et al.(2005) による赤外線天文衛星 IRAS の  $25 \mu\text{m}$ 、ISO、Spitzer の  $24 \mu\text{m}$  の観測から A 型星のデブリ円盤と中心星の年齢との関係が調べられ、星の周りのダスト量を示す赤外線超過比の最大値が星の年齢に反比例し、150 Myr のオーダーで減衰することが明らかにされた。

ただし、Rieke et al.(2005) は、A 型星のみで、かつ  $24 \mu\text{m}$  のみでの調査であったが、他の星のスペクトル型、他の波長についても調べる必要がある。他の星のスペクトル型であれば、中心星の温度が異なるので、デブリ円盤の様子が異なると予想される。また、ダストの中心星からの距離とダストが放射する光の波長には相関があるので、他の波長で解析することで中心星から異なる距離に存在するダストについて議論できる。そこで、他の星のスペクトル型、他の波長についてデブリ円盤と中心星の年齢との関係を調べる。

赤外線天文衛星「あかり」は 9, 18, 65, 90, 140,  $160 \mu\text{m}$  の 6 バンドで全天サーベイを行っており、これを利用してデブリ円盤を調査する。解析手法として、可視光の星カタログの位置に基づいて赤外線天文衛星「あかり」の全天画像のスタッキングを行う方法をとる。「あかり」の全天サーベイは大規模なデータサンプルを持つものの個別の星を解析しても S/N 比が足りずデブリ円盤を見ることができない。そのため、スタッキングを行うことによってデブリ円盤の統計的な性質を調べ、その星のスペクトル型依存性、波長依存性を見ることができると期待される。

1. Rieke, G. H., Su, K. Y. L., Stansberry, J. A., et al. 2005, ApJ, 620, 1010.

## 星惑 c13 分光観測によって発見された連星系 HD139461 における「惑星」の存在について

中島 健太 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

近年、系外惑星が大量に見つかるようになってきており、その多くは太陽系の惑星とは様相が異なっている。そのため、標準的なコアアクリションモデルや古典的な重力不安定性モデルで簡単には説明できないことが議論されている。また、これまでの惑星形成理論であまり考えられてこなかった連星系をなす星の周りでも系外惑星は発見されている。HD139461 は分光観測により連星系であることが分かり、連星系の軌道長半径  $2.05 \text{AU}$ 、離心率は  $0.83$  と求められた (Katoh et al. 2013)。この HD139461 の連星系の視線速度の変化には、二体問題では説明できないようなズレが存在する。このズレは周期的に変化しており、その周期は  $24.685$  日である。そのため、主星 (HD139461A) の周りには三つ目の天体、「惑星」が存在することが示唆されている。さらに加藤らはこのズレを「惑星」が主星の周りをケプラー軌道で公転しているとの仮定の上で解析し、この「惑星」は連星系の主星の周りを軌道長半径  $0.179 \text{AU}$ 、離心率が  $0.31$  の軌道で公転しており、質量が最低でも  $0.7$  木星質量程度と見積もった。しかし、この結果に従うと「惑星」と伴星の軌道が非常に接近するため、力学的に不安定なことが予想される。つまり、視線速度のズレを解析する上で行ったように、伴星の重力を無視したケプラー軌道での解析から「惑星」の軌道は大幅に変更されるだろう。本研究では、伴星の重力も考慮した数値シミュレーションを行うことで、視線速度のズレを説明するにはどのような「惑星」が必要なのか制限をつけることを目指す。また、このような連星系での惑星形成は惑星形成理論においても非常に興味深く、この HD139461 の「惑星」がどのように形成されたかについても議論したい。

1. Katoh, Itoh, Toyota, and Sato, Astrophys. J. 145:41 (2013)

## 星惑 c14 高速自転星と超短周期惑星からなる系外惑星系 PTF0 8-8695 の光度曲線の解析

上赤 翔也 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

系外惑星系 PTF0 8-8695 は、年齢が 300 万年ほどの T タウリ型星とホットジュピターからなる系である。この系に対しては、2009 年と 2010 年に 2 回観測されているトランジット (惑星による主星の食) の際の光度曲線の形状が互いに大きく異なるという特異性が指摘されている [1]。この光度曲線の時間変化は、 $0.671$  日以下という主星の高速自転と  $0.448$  日という惑星の超短周期軌道に起因した、主星の自転軸と惑星の公転軸の歳差運動によるものと考えられている。先行研究 [2] では、歳差運動の力学モデルを通して惑星の半径や質量、軌道傾斜角などといった系のパラメータを決定しているが、そこでは「主星の自転周期が惑星の公転周期と等しい」という、この系においては非自明な仮定が課されている。そこで本研究では、その仮定を除いた上でデータを再解析した結果、歳差運動の周期がそれぞれ 200 日、500 日、800 日に対応する 3 つの解が存在することを発見した。加えて、2014-15 年にかけて京都産業大学・神天文台においてこの系の追観測を行い、200 日の歳差周期に対応する解が支持されるという結論を得た。本発表ではこの結果の報告に加え、他の高速自転星の光度曲線に対する本モデルの応用可能性についても議論する。

1. van Eyken, J. C., et al., ApJ, 755, 42 (2012)
2. Barnes, J. W., et al., ApJ, 774, 53 (2013)

### 星惑 c15 系外惑星の高解像度直接撮像観測

石塚 将斗 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

系外惑星の発見数は近年急増しています。系外惑星の観測方法としては、ドップラー法やトランジットなどの間接観測と、直接惑星を捉える直接観測があります。直接観測は今まで技術的に困難でしたが、近年の技術の進化で可能になってきています。今回は系外惑星の直接観測の紹介(主に SEEDs)と、SEEDs で得られた T タウリ型星 GQLup の直接観測のデータの解析結果を紹介しようと思います。

1. D Lafreniere et al. 2007

### 星惑 c16 ガリレオ衛星食を用いた分光観測による木星上層大気の構造解析

山門 峻 (東北大学天文学専攻 M1)

木星の縞模様の形成メカニズムや上層大気の構造などは完全には解明されていない。Tsumura et al.(2014) では、ガリレオ衛星が木星の影の中で太陽光に直接照らされていないにも関わらず、予想に反して明るくという結果が得られた。この原因として、木星上層大気のヘイズ (haze) で散乱された太陽光がガリレオ衛星を照らしている可能性が最も高いと判断された。通常こういった希薄な大気は、反射光を観測することは極めて困難で、大気の透過光を観測する必要があるが、そのためには木星の影側に回って観測しなければならず現実的ではない。そこで、ガリレオ衛星食の分光観測を行い、スペクトルの時間変化を解析することにより、地上での観測で木星上層大気の構造を解明することが本研究の目的である。更にこの観測は大気透過光を観測するという共通点から、トランジット観測による系外惑星大気の観測にも応用が期待される。

本研究では、東広島天文台のかなた望遠鏡に搭載されている HONIR を用いて、 $1.5\mu\text{m} - 2.4\mu\text{m}$  の近赤外領域の分光観測を行った。観測の結果、エウロパが影から出現してくる瞬間の分光スペクトルを得ることが出来た。このデータから各波長のライトカーブ及びスペクトルの時間変化を求め、希薄な木星上層大気の構造解析を行う。

1. K. Tsumura et al. 2014 ApJ 789 122

# 観測機器分科会

今後の天文学を担う

|      |   |
|------|---|
| 日時   | 7月27日 17:45 - 18:45, 20:00 - 21:00<br>7月28日 9:00 - 10:00, 10:15 - 11:15(招待講演：柏川 伸成 氏), 17:15 - 19:30<br>7月29日 13:30 - 15:45, 16:00 - 17:00(招待講演：國枝 秀世 氏)  |
| 招待講師 | 柏川 伸成 氏 (国立天文台)「TMT」<br>國枝 秀世 氏 (名古屋大学)「X線天文学の観測的研究」  |
| 座長   | 花岡美咲 (名古屋大学 M2)、佐藤真柚 (首都大学東京 M2)、竹村泰斗 (京都大学 M2)、<br>今谷律子 (大阪大学 M2)、中谷創平 (埼玉大学 M2)   |
| 概要   | <p>観測に用いる手段によって、宇宙の様々な描像を観る事ができます。今日の天文学は、電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、<math>\gamma</math>線、重力波、ニュートリノといった様々な観測手段を用いて、盛んに研究がおこなわれています。宇宙を様々な角度から観測し、理解を深めるためにも、その手段となる観測装置や解析ソフトウェアの発展は必須となります。これらの観測装置や解析方法の発展が、様々な角度から宇宙を観ることを可能とし、新たなサイエンスを明らかにします。その解明の過程には装置や解析方法の仕組みの理解は欠かせません。本分科会では、将来の天文学を支える観測機器の最先端の開発について、ハードウェアとソフトウェアの両面から理解を深め、議論する場を設けます。また、衛星開発と地上観測装置の開発に携わる講師を招き、参加者が装置開発の現状と今後について理解を深め、自らの開発のモチベーションを高める機会を提供します。様々な分野の今後の天文学を担う研究者同士が交流し、有意義な議論ができることを期待しております。</p> <p>注) 装置開発に関するものは基本的に観測機器分科会で扱います。開発する装置が目指す科学目標に話の重点を置く場合は、それに該当する分科会で扱います。</p> |

---

柏川 伸成 氏 (国立天文台)

7月28日 10:15 - 11:15 B会場

## 「TMT」

TMT 計画の現況と運用方針、および TMT の切り拓くサイエンスについて紹介する。

---

國枝 秀世 氏 (名古屋大学)

7月29日 16:00 - 17:00 B会場

## 「X線天文学の観測的研究」

1963年のX線天体発見そして1965年の日本で最初のX線観測以来100年になります。大気吸収を避けるために軌道上の衛星からの観測が主流になって来ました。宇宙観測に伴う、超軽量化、耐振動・耐衝撃性、と言う厳しい制限の中で、放射線技術、衛星搭載技術が磨かれました。検出器では比例計数管から半導体検出器、そしてマイクロカロリメータへの進化がありました。一方で、コリメータ、Coded Mask、そして集光結像光学系への進歩がありました。これに伴い、X線の撮像分光観測が可能になり、他波長では見られない高エネルギー天体现象を明らかにしてきました。本講演では宇宙観測機器開発の進展を紹介し、これまでにない検出器でこれまでにない精度や波長域で新しい物理現象を探ると言う講師の基本的姿勢を伝えます。

## 観測 a1 次世代を切り開く近赤外面分光ユニットの開発 –A new near-IR IFU for Subaru–

北川 祐太郎 (東京大学 天文学教育研究センター D2)

本講演では、面分光 (Integral field spectroscopy) と呼ばれる観測手法をキーワードに挙げ、前半はその観測原理と装置コンセプトの説明を、後半では現在私が開発を進めている近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU について紹介する。

面分光とは、“視野内の空間情報を保持したまま、その波長情報も同時に取得できる”観測手法であり、8–10 m 級望遠鏡の登場に伴い、可視赤外天文学で急速に発展してきた。その特徴として、通常の撮像やスリット分光観測が 2 次元のデータ構造 ( $X$  vs  $Y$ 、又は  $X$  vs  $\lambda$ ) を有するのに対し、面分光観測では一度の露出で 3 次元のデータキューブ ( $X$  vs  $Y$  vs  $\lambda$ ) が取得可能であることが挙げられる。このような観測を実現する光学系は IFU (Integral Filed Unit) と呼ばれ、特に近赤外 IFU は遠方宇宙 ( $z > 1$ ) における銀河形成進化を解き明かすうえで重要な装置のひとつとなっている。実際に次世代超大型望遠鏡 TMT や Hubble 宇宙望遠鏡の後継機である JWST にも近赤外 IFU の採用が予定されており、今後の装置開発において日本の天文学が競争力をもつ装置提案をおこなうためには、IFU の要素技術開発が重要な鍵を握っているといえる。

そこで現在、私はすばる望遠鏡で観測可能な近赤外面分光ユニット SWIMS-IFU の設計、開発をおこなっており、2016 年度内のファーストライトを目指している。他の近赤外面分光装置と比べて広視野 ( $14'' \times 5.2''$ )、広波長帯 ( $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$ ) のデータキューブを取得できるという特徴を有し、その開発にはイメージスライサー方式と呼ばれる光学設計やスライスミラーアレイと呼ばれる特殊な光学素子の超精密加工技術による製作など前述の次世代天文観測装置につながる重要な要素技術が取り込まれている。講演ではこれらの要素技術の解説に加え今後の展望についても述べる予定である。

1. Kitagawa *et al.*, Proc. SPIE 9151 (2014)
2. Konishi *et al.*, Proc. SPIE 8446 (2012)

## 観測 a2 近赤外多天体分光カメラ SWIMS の開発

寺尾 恭範 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

本発表では、近赤外多天体分光カメラ SWIMS の概要と開発状況、SWIMS が可能にするサイエンスについて紹介する。

現在、東京大学天文学教育研究センターでは、南米チリ共和国アタカマ高地のチャナントル山頂に 6.5 m 赤外線望遠鏡を建設する TAO (The University of Tokyo Atacama Observatory) 計画を進めている。TAO サイトは天文台として世界最高標高 5640 m にあり、良好なシーイング、高い晴天率、高い赤外線透過率などの特長がある。中でも近赤外領域における連続的な大気窓は他に類を見ず、他サイトでは困難な  $\text{Pa}\alpha$  輝線 (静止波長  $1.8751 \mu\text{m}$ ) の観測が可能な地上望遠鏡である。

SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Multi-object Spectrograph) は、TAO 望遠鏡の第一期観測装置として我々が開発している近赤外多天体分光カメラである。SWIMS 有する特徴のひとつとして挙げられるのが、短波長 ( $0.9 - 1.4 \mu\text{m}$ ) と長波長 ( $1.4 - 2.5 \mu\text{m}$ ) の 2 色同時撮像/分光観測である。入射光はダイクロイックミラーによって分割され、それぞれの波長帯で天体の像、あるいはスペクトルが得られる。観測モードは撮像、多天体分光、面分光の 3 つであり、これらのモードは、多天体分光マスクと面分光ユニット (Integral Field Unit) を収納した多天体分

光マスク交換ユニット (Multi-Object Spectroscopy Unit) によって一晩の観測中に迅速に切り替えられる。SWIMS と TAO 望遠鏡を組み合わせることで、赤方偏移により近赤外の波長域に入った静止系可視域の輝線を用いた遠方銀河の研究や、ダスト吸収を受けにくい  $\text{Pa}\alpha$ 、 $\text{Pa}\beta$  輝線を用いた高光度赤外線銀河の研究などの進展が期待できる。

1. 藤堂颯哉：修士論文「近赤外多天体分光カメラ SWIMS における検出器読み出しシステムの開発と評価」、東京大学 (2015)

## 観測 a3 InGaAs 近赤外線検出器 FPA640x512 の性能評価

都築 晃子 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

昨今の近赤外線天文装置には、高性能で大規模な二次元アレイ検出器が不可欠であるが、そのような検出器は非常に高価なため、容易に入手できない。そこで、安価に入手可能な、中華立鼎光电社製 FPA640x512・InGaAs 近赤外線検出器 (有効感度波長帯  $0.9 \mu\text{m}$ – $1.7 \mu\text{m}$  の半導体検出器) の、天文用途としての性能を評価する。評価すべき性能として、暗電流、Full Well、量子効率、読み出しノイズがある。これらを適切に評価するには、光電子の数 [ $e^-$ ] と、A/D 変換後に出力されるカウント値 [ADU] の換算係数 CF [ $e^-/\text{ADU}$ ] を正しく知る必要がある。本研究では、まずこの CF を実験で評価した。光子由来の電子の数が、その数の平方根で揺らぐことを利用して、検出器の出力値と、その時のノイズの大きさから CF を求める。検出器に光を照射し、出力値と分散を測定した。検出器出力が、ピクセル毎に大きくばらつくため、同じ状況で複数回測定を行い、ピクセル毎に出力の平均値および分散を求めた。また、さらに出力値を安定させるために、検出素子に印加するバイアス電圧を調整した。バイアス電圧を調整し、複数回測定を行った結果、CF は  $36 e^-/\text{ADU}$  となった。これは、仕様値の約 3 分の 2 である。また、検出素子に印加するバイアス電圧を約 3 倍にすることで、ピクセル毎の出力のばらつきは、出力値の数 % から数 % 程度に低減した。検出素子に印加するバイアス電圧を変化させると、検出素子内部の、光を検知する空乏層の厚さが変化する。バイアス電圧が大きい場合、空乏層の厚さが大きくなるため、出力値がピクセル毎でばらつかなくなると考えられる。今後は、今回求めた CF の値を用いて、上述した評価項目について調査する。

## 観測 a4 京大岡山 3.8m 望遠鏡計画：主鏡支持機構・ワーピングハーネスによる鏡面歪みの補正

細野 俊介 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

京都大学が中心となり、岡山にナスミス式 3.8m 光赤外線望遠鏡を建設する計画を進めている。日本の望遠鏡としては初の分割鏡方式を採用しており、全 18 枚の分割鏡を 1 枚の主鏡として成立させるためには、各分割鏡の傾きや鏡面の歪み等を高精度で補正可能な支持機構が必要となる。今回取り上げるワーピングハーネス (WH) は、鏡面歪みを補正するための装置である。各分割鏡は 3 つのホイップルツリーと呼ぶ機構により計 9 点で支持されており、各ツリーには WH が 2 つずつ設置されている。

鏡の形状誤差が原因で鏡面に生じた歪みにより、主鏡で光が反射する際に波面揺らぎが形成され、星像の乱れにつながるため、これを補正することが不可欠となる。WH はその誤差から生じると考えられる、

±500nm 程度の歪みの補正を目標とする。

具体的な補正の仕組みは、まず、ホイップルツリーに設置された計 6 つの WH を駆動させることで分割鏡に荷重がかかり、鏡面を変形させる構造になっている。シャックハルトマン波面センサーで波面のローカルな傾きとして鏡面の歪みを検出し、その歪みを打ち消すような変形を WH で与える。

そこで、補正に必要な鏡面変形を発生させるために適切な各 WH の駆動量を算出する必要がある。分割鏡とホイップルツリーの簡略化したモデルを作成し、有限要素法を用いて WH 駆動のモデル解析を行った。これにより、各 WH を駆動させた際の鏡面変形を変位データとして得た。そのデータを用いて逆解きを行うことにより、鏡面の歪みを補正するために必要な各 WH の駆動量を求める。

本講演では、WH のさらに詳細な仕組み・役割や、有限要素法解析を中心として WH の運用に必要なアクチュエータへの指令部を構築するために行ったこと、今後行うべきことを説明する。

## 観測 a5 岡山 3.8m 望遠鏡用可視高分散分光器の開発

高本 昌弥 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

これまでケプラー衛星の測光観測によって、スーパーフレアを起こす太陽型星が発見されてきた。今回の研究では光度変化だけでなく、どのような条件でスーパーフレアが起こるのか、またその太陽型星がどのような物理的特性を持つのかを解明する。これにより太陽でスーパーフレアが起こるのか、またどのような前兆現象があるのかという謎に迫る。そのためには精密な分光観測をする必要があり、我々は広い波長帯を高分散で一度に取得でき、そして 2 天体を同時に観測することで観測精度を高めた可視相対高分散分光器を開発している。

これまでの高分散分光器は、各次数の回折スペクトルの重なりを分離する動きをもつクロスディスペルザにも回折格子を使用していた。回折格子は原理的に観測波長の半分の波長を持つ光の分離ができないため、広い波長帯を同時に観測するにはダイクロミックミラーが必要とされる、また波長帯の端で効率が低下するなどの問題がある。一方、高分散分光器でクロスディスペルザにプリズムを使用すると、一般的に十分な波長分散を得るためにプリズムのサイズと個数が増加する。

それらの問題を踏まえて今回の分光器はファイバーで離散スリットを作っている。そうすることで各スリットから得られるデータの重なりをずらすのに必要な波長分散を抑えられ、クロスディスペルザに頂角の小さなプリズムを使うことができる。プリズムは回折格子に比べて分散が小さいのだが、その材質によって透過率が決まってくるので材質を最適化することで高効率で観測することができる。また回折格子の場合得られる波長範囲が、最小波長の 1.5 倍から最大でも 2 倍までであるのに対して、プリズムの場合はその範囲に制限がなくなる。

ただ問題として広い波長帯で色収差をなくす必要がある。そのため反射光学系を使用し、さらに自由曲面のみを用いることでその設計を可能にしようと開発を進めている。

発表の際には、この開発している分光器の設計と問題について報告する。

## 観測 a6 FMLO: オフ点不要の新しいミリ波サブミリ波分光法の開発と性能評価

谷口 暁星 (東京大学 天文学教育研究センター D1)

我々は、ヘテロダイン受信機の局部発振器 (Local Oscillator; LO) の発信周波数を変調 (Frequency Modulation; FM) することで単一鏡分光

観測の感度を向上させる、新しいミリ波サブミリ波分光法 “FMLO” の開発を行っている。本手法では従来のポジションスイッチ観測や周波数スイッチ観測で取得すべきオフ点 (参照スペクトル) の観測が不要なため、観測効率の大幅な改善による感度の向上が可能である。これは、分光計出力を高頻度 ( $\sim 10$  Hz) で取得しつつ、LO 周波数を変調させて天体信号を時間空間上で高周波に変調することにより、低周波成分が卓越した  $1/f$  状の相関雑音と天体信号とを時系列データ上で分離することで実現している。これにより、観測効率および感度の向上とともに、ベースラインのうねりの低減、サイドバンドの分離が可能となり、線幅の広い系外銀河の輝線探査やオフ点観測が難しい銀河面サーベイなどに、絶大な威力が発揮されることが期待される。

本講演では FMLO の原理に加え、正確かつ高速な相関雑音の分離を可能にする解析パイプラインの開発、野辺山 45m ミリ波望遠鏡へ搭載された FMLO による系内分子雲 Ori-KL の性能評価観測について紹介する。解析パイプラインの開発では、連続波多素子カメラの反復モデリングを応用するとともに、相関雑音の分離に主成分分析 (PCA) に確率モデルを導入することで、天体信号スペクトルの再現性を大幅に改善が可能となった。また性能評価観測では、周波数変調の速度と幅のパターン (FMP) を最適化、および FMLO を併用したマッピング観測を試験し、オフ点不要な天体画像が取得できることを実証した。

1. Y. Tamura et al. 2013, ASPCS, 476, 401
2. E. L. Chapin et al. 2013, MNRAS, 430, 2545
3. T. P. Minka et al. 2000, NIPS, 15, 598

## 観測 a7 自作断熱消磁冷凍機を用いた TES 型 X 線カロリメータの開発

海道 司 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

X 線マイクロカロリメータは入射する X 線光子 1 つ 1 つのエネルギを素子の温度上昇として計測する検出器であり、0.1 K 以下の極低温で動作させることにより優れたエネルギー分解能を実現する。中でも TES 型は、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用することによりさらなる分光性能が期待できることから、X 線天文学における次世代精密分光装置として最も注目されている。我々は将来の X 線天文衛星への搭載を念頭に置き、微小重力下で  $< 0.1$  K の極低温を実現できる断熱消磁冷凍機 (ADR) をカロリメータと一体で開発している。昨年は 5.9 keV の X 線に対して  $3.8 \pm 0.4$  eV (FWHM) の分解能を実現したことを報告した。その後、安定した素子評価環境の実現を目指して、さらなる ADR の改善に努めてきた。

我々の ADR が抱える問題の一つは、リサイクル過程において磁化熱の排熱に時間がかかり ( $\sim 7$  時間)、運転効率を下げていることである。私は使用している部材の熱容量や排熱経路の熱伝導度の測定を行い、ヒートスイッチの接続部で熱伝導度が小さくなっていることを突き止めた。現在、ヒートスイッチ接続部の改良を進めている。またセンサ動作時の温度制御ロジックを見直し、温度安定度の改良も行ってきた (伊東他, 本研究会)。

本講演ではこれらの改良について報告する。また、現在進めている新しいアレキソ子の性能評価結果についても述べる。

1. 高倉奏喜, 修士論文 (2015)
2. 田沼静一, 低温, 共立出版株式会社 (1974)
3. Frank Pobell, Matter and Methods at Low Temperatures

Springer(1992)

### 観測 a8 Double-SOI 層を用いた X 線天文観測用 SOI ピクセルの性能評価

大村 峻一 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

X 線天文衛星で現在主流の検出器である X 線 CCD の時間分解能は数秒なので、ブラックホールやパルサーなどの X 線天体の激しい時間変動 (msec) の観測が出来ない。そこで、私達は Silicon On Insulator (SOI) 技術を用いて、検出部と読み出し回路が一体型の X 線天文衛星用 SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。XRPIX は、新たに「イベント駆動」という、X 線の入ったピクセルのみを読み出す方法を用いることで、数マイクロ秒という時間分解能を達成できる。これまでの開発で、一体型の検出部と読み出し回路の間で電気的な干渉があり、その結果読み出しノイズが下がらない問題が明らかになっている。そのため、検出部と読み出し回路の間に新たに silicon 層を挟むことで両者の干渉を切ることを目的に、新たに Double-SOI ピクセル検出器を開発した。これまでに Am-241X 線源を用いた常温での X 線照射実験を行い、X 線スペクトルの取得に成功した。今講演ではその結果を中心に、Double-SOI 型の XRPIX 素子の性能について述べる。

### 観測 a9 X 線観測用 SOI ピクセル検出器における裏面照射での軟 X 線性能の評価

伊藤 真音 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

X 線天文衛星の標準的な検出器である CCD には、問題点が 2 つある。1 つは時間分解能が数秒程度と低いので、ミリ秒パルサーやブラックホールなどの短い時間変動の観測が不可能であるという点である。2 つ目は 10keV 以上の領域において非 X 線バックグラウンドが占有的であるので、エネルギー帯域が 0.5-10keV に限られてしまう点である。そこで、私たちは Silicon On Insulator(SOI 技術)を用いて、SOI ピクセル検出器「XRPIX」を開発している。この素子は時間分解能が数  $\mu$  秒であるので、激しい時間変動の観測が可能である。また、非同時計測法を用いることで、10keV 以上の非 X 線バックグラウンドを下げる事が可能となり、0.5-40keV といった広帯域での撮像分光を行うことができる。XRPIX の表面には 10 $\mu$ m 程度の回路層が存在するため、表面照射型の観測方法では低エネルギーの X 線観測が不可能である。そこで、不感層厚が薄い裏面照射型の XRPIX の開発を開始した。これまでに、LBNL によって開発された「Pizza process」と呼ばれる方法と、イオンインプラ + レーザーアニーリングによる方法の 2 種類の素子を試作し、これらの素子における軟 X 線の感度を調べた。本公演ではその結果を述べる。

### 観測 a10 電子飛跡検出型コンプトンカメラによる偏光検出

吉川 慶 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

高エネルギー天体では偏光を生成するプロセスが多数存在する。数百 keV から上の MeV ガンマ線では、超新星残骸の磁場構造、ガンマ線バーストの放射機構、分子雲トラスの幾何構造といった情報が偏光を検出することで分かる。しかし、MeV ガンマ線では宇宙線との相互作用により多量のガンマ線・中性子・荷電粒子を生じ、高雑音環境になっ

てしまうため検出が難しい。また、MeV ガンマ線ではコンプトン散乱が優位に起こるのだが、従来の撮像技術では散乱ガンマ線の方向、エネルギー、反跳電子のエネルギーを測定し、反跳電子の方向が測定できていない。そのため入射ガンマ線を再構成することができず、撮像精度が悪い。今、強力な雑音除去能力および高精度な撮像能力を持つ偏光検出器が必要とされている。

そこで、次世代の MeV ガンマ線偏光検出器として電子飛跡検出型コンプトンカメラの開発を行っている。シンチレーション検出器により散乱ガンマ線のエネルギーと吸収位置を検出し、ガス飛跡検出器により反跳電子のエネルギーと三次元飛跡を検出する。入射ガンマ線の再構成することができ、偏光と撮像を同時に行える世界初の検出器となる。

偏光観測の性能評価をするために SPring-8 BL08W で実験を行った。182keV 直線偏光ビームを 10mm 厚のアルミ板に照射し、その 90° 散乱光を測定した。検出器全体を方位角方向に回転させることで、入射ガンマ線の偏光方向を変えて、方位角依存性を見た。性能指標であるモジュレーションファクターが 0.6@130keV という高い値を示した。偏向角の検出も誤差の範囲内で、シミュレーションによって得られた値と一致した。

今後は、撮像を活かした偏光測定実験、より偏光検出に適したジオメトリの考案をして電子飛跡検出型コンプトンカメラを改良していく。そして、未知の高エネルギー現象の解明を目指す。

### 観測 a11 データステッチングとアルゴリズム開発

石井 遊哉 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

望遠鏡の開発にあたって、鏡の表面荒さが要求仕様を満たしているかを調べるためには、表面形状を測定する必要がある。直線経路上の高さを測定する機器を使用すると、鏡面を網目状に測定することで表面形状が得られる。しかし測定データには各経路ごとに異なる偶然誤差が乗っているため、本来同じ値であるはずの経路の交点でも異なる値を示し、真の表面形状とは見なせない。そのため、従来は交点部分の偏差が最小となるように、各経路データ一本ずつの並進・回転を調整して処理していた。しかしこの手法では交点の不一致は依然残ったままであり、知りたい精度を確保するにはより高精度の測定機器を必要とした。これはデータを「剛体」として扱っていると言える。

これに対してデータステッチングは、各経路のデータ一本ずつを「弾性体」として扱い、交点部分の値が完全一致するように強制変位を与えて貼り合わせていく(ステッチング)。この処理によって、物理的意味を保ったまま交点部分の不一致を解消することができる。実際、鏡の形状を計測したデータを本手法で処理すると、表面粗さの指標となる RMS が 84 nm から 28 nm に改善するなど、偶然誤差の影響を大幅に軽減することが実験的に確かめられている。この技術は、画像のモザイク合成など重複領域を持つデータに対して広く応用でき、非常に汎用性が高い。

今回、よりコンパクトな行列計算でこの処理をアルゴリズムを開発した。本発表では、データステッチングの概念とその計算アルゴリズム、実際に処理し誤差の影響を小さくしたデータを紹介する。

### 観測 a12 Suzaku/WAM で検出されたガンマ線バーストの数値計算による位置決定法の開発とその系統誤差の評価

藤沼 洸 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

X 線天文衛星「すざく」に搭載されている硬 X 線検出器の外周を取り

巻く非同時計数用のシンチレーションカウンタは、50–5000 keV 帯域で全天のほぼ半分の視野を持ち、広帯域全天モニタ (Wide-band All-sky Monitor; WAM) として役立てられる。WAM は、硬 X 線帯域で大きな有効面積 (800cm<sup>2</sup> at 100 keV) を持つため、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) をはじめとする突発天体を年間 300 イベントあまり検出する。しかし現状では、WAM だけを用いた位置の決定ができず、光子の到来方向に依存する応答関数が作成できないため、スペクトル解析できる GRB は他衛星と同期し位置決定できた約 1 割のイベントに限られる。残りの 9 割の GRB を解析するためには、その到来方向を独自に求める必要がある。そこで我々は、まず衛星全体を構成する物質やその密度、空間分布を再現したマスモデルを作成、モンテカルロシミュレーションを行い、光子の入射角度ごとに WAM の応答を詳細に調べた。この結果を、実際の観測結果と比較する事で WAM 単独で到来方向を推定する方法を開発した。この方法を検証するために、他衛星の観測により到来方向が既知の 32 の GRB について、このシミュレーションツールを用いて推定した到来方向と比較した。その結果、物質が多い冷媒タンクなどがある方向を除けば、両者の方位角方向の差分の平均は約 6 度の精度であった。さらに、推定した到来方向で応答関数を作成、スペクトル解析を行い、その結果を他衛星によって決定された到来方向で求めた応答関数による評価と比較した。GRB によく合うモデルである Band Function の場合、系統誤差はそれぞれ、低エネルギー側の光子指数に約 11%、高エネルギー側の光子指数に約 2%、ベキが折れ曲がるエネルギーに約 10%、フラックスに約 21% と評価された。

### 観測 a13 電気パルスで駆動できる可搬型 X 線発生装置の基礎開発

西田 和樹 (東京理科大学 玉川研究室 M1)

検出器のエネルギー較正を行うためには、特性 X 線など既知のエネルギーをもつ X 線を入射させる必要がある。一般には <sup>55</sup>Fe などの放射性同位体か、フィラメントによる熱電子発生を利用した X 線発生装置が用いられる。ただし、これらの X 線の発生過程はランダムなので、Time Projection Chamber を用いたガス検出器の電子ドリフト速度測定など、X 線の発生タイミングが重要な検出器の較正には用いることができない。電気パルスで変調駆動できる可搬型 X 線発生装置 (Modulated X-ray Source; MXS) を使うと、外部の電気信号により高速で X 線を ON/OFF できるので、X 線・ガンマ線天文衛星の分野で、にわかに注目を集めている。

我々は将来の衛星計画への搭載に向けて、様々なタイプの MXS を開発している。一般的な MXS の構造は、外部からの電気パルスで駆動する、光電効果や電界放出を用いた冷陰極電子源と、電子を電場加速し、衝突させることで X 線を発生するターゲット金属から成る。この構造のため、外部電気パルスをトリガーとして、任意のタイミングでパルス状の X 線を発生させることができる。このとき発生する輝線のエネルギーは、ターゲット金属の種類で決まり、制動放射成分は加速電圧によって調整することができる。

我々は、新しく開発した冷陰極電子源を実装し、Ti をターゲット金属に用いた MXS を製作した。電気パルスにより電子源を駆動することで X 線の発生を ON/OFF 制御できることを確認し、エネルギースペクトルやカウントレートの測定を行った。本講演では、MXS の製作と基礎特性調査について報告する。

### 観測 a14 Cherenkov Telescope Array 計画の大口径望遠鏡初号機に用いる光電子増倍管の較正試験結果

松岡 俊介 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

Cherenkov Telescope Array(CTA) 計画とは 20 GeV から 100 TeV 以上のガンマ線を地上の大気チェレンコフ望遠鏡を用いて従来より 10 倍以上の感度で観測する、29 国からなる国際共同計画である。CTA 計画では大中小 3 種類の口径からなる望遠鏡群を用いて観測を行い、日本は低エネルギー側の観測を担う大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope; LST) の開発に貢献している。

LST の光検出器には光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube; PMT) が採用されており、望遠鏡一台につき 1855 本の PMT が取り付けられる。LST の低エネルギー閾値 20 GeV を達成するために PMT にはゲイン、パルス幅、アフターパルス発生確率などに対し要求があり、現在我々はこれら全ての PMT に対しそれらの諸特性の調査を行っている。これらの結果は PMT を LST 初号機に取り付ける際の最適な配置を決定するためにも用いられる。本講演では較正試験の試験系及び、それら諸特性の結果について報告をする。

### 観測 a15 CTA 大口径チェレンコフ望遠鏡初号機に搭載する読み出し回路の設計と性能評価

谷川 俊介 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画は大中小 100 台程度の望遠鏡群を設置することで、従来より一桁良い感度で 20GeV から 100TeV 以上の超高エネルギーガンマ線を観測する計画であり、世界 29 ヶ国の国際協力により進められている。その中で、日本グループは主に大口径望遠鏡の開発に大きく関わっている。低エネルギー側の観測を行う大口径望遠鏡では、超高エネルギーガンマ線が大気中を通過するときに発生するチェレンコフ光を望遠鏡の鏡で集光し、集光面にある光電子増倍管 (PMT) を用いたカメラで検出する。チェレンコフ光によるパルスの時間幅数ナノ秒と非常に短いため、夜光などのバックグラウンドからチェレンコフ光のみを分離して検出するには数 GHz 程度の非常に速いサンプリングスピードを要求される。また、大口径望遠鏡のカメラでは、PMT を 2000 本ほど用いるので、カメラ内の発熱をなるべく小さくするよう、回路の消費電力を小さくすることも求められる。

そこで我々はアナログメモリの ASIC である DRS4 を用いて、このような要求を満たす大口径望遠鏡の読み出し回路を開発した。現在、読み出し回路は大口径望遠鏡の初号機に搭載する版が完成しており、その性能評価が行われている。また、現在までに半数が量産されており、今後残りの 150 枚が量産される予定である。性能評価では具体的に、読み出し回路の周波数帯域の測定と、テストパルスの波高値に対するリニアリティの評価、ノイズレベルの測定、クロストークの測定、トリガーとなる信号がきてからサンプリングするまでの時間の揺れ (トリガージッター) の測定、故障部品の有無の確認が行われている。本講演では、搭載される読み出し回路の設計と、性能評価の進捗状況について発表する。

## 観測 a16 次世代ガンマ線天文台 CTA における波形記録回路 TARGET の時間応答特性の評価

重中 茜 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

次世代ガンマ線天文台 CTA における小口径望遠鏡では、その光学系の 1 つとして、主鏡と副鏡を用いたデュアルミラー光学系を提案している。この光学系は、副鏡により焦点面でのイメージを圧縮することができるため、多チャンネル光検出器を用いたカメラの小型化、コスト抑制が期待できる。

TARGET は、このデュアルミラー光学系用のカメラが検出した信号波形を記録する集積回路である。CTA では、宇宙からのガンマ線が大気中で相互作用して生じる電磁カスケードシャワーからのチェレンコフ光を集光し、望遠鏡の焦点面カメラで観測することで、ガンマ線のエネルギーや到来方向を推定する。観測するチェレンコフ光は数ナノ秒しか光らないため、波形記録はナノ秒単位で行う必要がある。TARGET は波形記録セルと呼ばれるコンデンサを多数並べた構造を持っており、入力信号に対してこの記録セルを次々と切り替えることで、ナノ秒単位の波形サンプリングを行っている。しかしこの周期的なサンプリングは、セル毎に切り替えタイミングの揺らぎ(ジッター)が存在する。CTA では、チェレンコフ光子の観測時間と光子数の関係からガンマ線の到来方向を推定することで、望遠鏡の観測精度を向上させる研究を進めている。カメラから取得した波形データをこの解析に使用するには、ジッターによる波形記録タイミングのずれを補正することが必要である。

本研究では疑似的に作成したジッターを用い、その測定精度を最適化した。その結果、今回のジッター測定方法では 0.15 ナノ秒の精度でジッターの測定が可能であることを検証した。本講演では、ジッター測定の原理、最適化、期待される精度について概説し、それを TARGET のバージョン 5 におけるジッター測定に適用した結果について報告する。

1. 佐々木美佳 (2011), 茨城大学大学院理工学研究科修士論文
2. B.S. Acharya, M. Actis, T. Aghajani, et al. (2013).

## 観測 a17 誘電体 X 線マイクロカロリメータの開発

中山 貴博 (宇宙科学研究所 M1)

宇宙の高エネルギー現象を解明するために X 線検出器のエネルギー分解能や角度分解能を向上させることは重要である。例えば優れた角度分解能をもつ Chandra 衛星の CCD 検出器で銀河団を観測すると内部構造まで鮮明なイメージが得られる。一方、エネルギー分解能が十分でないためその運動の詳細は解析できない。CCD 検出器の素子数を保ちつつマイクロカロリメータで得られる高い分光性能を同時に実現することは困難であった。CCD 検出器の分光能力は原理的に 120eV が上限である。マイクロカロリメータは 100mK で素子の温度上昇を読み出す検出器である。素子には電気抵抗体用いるのが現在の主流であるが衛星の冷却能力を考慮するとその素子数は数千程度からの飛躍的向上は望めない。なぜなら 1 素子に対して読み出し用配線が数本必要となるからである。そのため電気抵抗体では配線からの熱流入が問題となり、CCD 検出器のように素子数を並べることができない。

そこで我々は、温度計素子として誘電体を用いた「誘電体 X 線マイクロカロリメータ (DXMC)」の研究を進めている。DXMC は誘電体素子をキャパシタとした LC 共振回路を伝送路に並列接続して共振周波数の変化を読み出す。並列接続のため読み出し用配線数を抑えることができる。また広帯域の共振周波数を並べることで伝送路あたり 1 万素子程

度の読み出しが可能で、検出器の素子数を飛躍的に向上させることができる。

これまでの研究では、量子常誘電体である  $\text{KTa}_{1-x}\text{Nb}_x\text{O}_3$  (KTN) に不純物をドーピングし 100mK の極低温で誘電体の温度依存性を見出されてきた。極低温では  $\text{SrTiO}_3$  にのみ温度計感度が見出されていたが、KTNの方が感度が高く DXMC の有力な素子材料である。

本講演では、X 線検出に向け誘電体素子として KTN を用いた DXMC の開発について報告する。

1. Kikuchi Takahiro. 誘電体 X 線マイクロカロリメータの GHz 帯読み出しの研究. Master's thesis, University of Tokyo. 2013
2. Sekiya Norio. 誘電体 X 線マイクロカロリメータの概念検討と基礎実験. Master's thesis, University of Tokyo. 2012

## 観測 a18 X 線精密分光に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータのインピーダンス特性測定

中島 裕貴 (宇宙科学研究所 M1)

次世代 X 線観測衛星 DIOS は中高温銀河間物質の 3 次元の空間構造を捉えることが目的である。このため、2eV 程度 @ 0.1 ~ 1.5keV のエネルギー分解能が必要であり、これを実現する検出器として X 線光子 1 つのエネルギーを温度上昇として測定する X 線マイクロカロリメータが開発されている。

我々は DIOS 搭載を目指し、物質が常伝導体から超伝導体へ遷移するときに抵抗が急激に変化することを利用した温度計を用いて TES 型 X 線マイクロカロリメータ (以下、TES) の開発を行っている。TES は ~ 100mK という低温下において定バイアス電圧のもとで動作し、素子の温度上昇による抵抗変化を電流変化として測定するものである。

エネルギー分解能の向上には TES の特性を十分に理解することが必要である。TES の静的な特性は抵抗-温度特性、電流-電圧特性の測定によって行われている。これらの静的な特性はある温度平衡による測定のみであるが、カロリメータとしての動作を考えると実際に X 線が入射したときのように TES の温度が時間変化する場合の動的な特性を知っておくことは必須である。

動的な特性を評価する場合、TES の応答による非線形性から TES は本質的に単純な抵抗ではなく複素インピーダンスをもつ素子であることを考慮する必要がある。従って、実用に向けた TES の特性評価には TES のインピーダンス測定が重要である。インピーダンス測定は交流バイアス電圧によって行うため、配線の寄生インピーダンスの影響や読み出しアンプの周波数特性等を考慮しなければならない。

我々は DIOS の要請する性能に達成すべくインピーダンスの測定を行う。そのために、寄生インピーダンスの影響や読み出しアンプの周波数特性等を考慮した測定系を構築し、実際にインピーダンスの測定を行い、エネルギー分解能の向上を目指す。本講演では、これらの研究結果について報告する。

1. H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda, and R. Maeda. Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter. AIP Conference Proceedings, Vol. 1185, pp. 195-198, 2009.

## 観測 a19 積層配線 TES 型 X 線マイクロカロリメータの表面粗さの研究

黒丸 厳静 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々のグループでは 2020 年頃の打ち上げを目指す小型科学衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Survey) への搭載に向けた TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータを開発している。TES 型 X 線マイクロカロリメータは、超伝導金属の常伝導-超伝導転移時の急激な抵抗変化を利用して X 線のエネルギーを高分解能で分光できる X 線検出器である。我々はこれまでに  $4 \times 4$  ピクセル中の 1 素子について 2.8 eV、 $16 \times 16$  ピクセルアレイ中の 1 素子について 4.4 eV のエネルギー分解能を達成した。

DIOS ミッションでは検出器の性能として 1 cm 角の有効面積と 2 eV のエネルギー分解能が要求されており、我々はその要求を満たすため、200  $\mu\text{m}$  角を 1 素子とした 400 ピクセルの大規模 TES アレイを製作している。その際、従来の配線デザインでは多素子化すると配線スペースの問題が生じることや、密集した配線間でクロストークが発生してしまうことが分かった。そのため我々のグループでは超伝導積層配線と呼ばれる、素子までの行きと帰りの配線を絶縁膜を挟んで上下に配置するデザインの開発に取り組んでいる。これにより配線スペースを確保し、配線間クロストークを減少させることが出来る。これまでに、上部配線に傾斜加工を施し TES とのコンタクトを強化した傾斜付き積層配線基板における上部配線のみを試作で TES 正常な転移を確認している。

現在我々は傾斜付き積層配線による TES アレイの試作中である。基板上で正しく超伝導転移しなかった TES の表面を調査したところ、自乗平均面粗さ (RMS)  $\approx 4.5$  nm の凹凸があることが分かった。この凹凸が転移特性に影響をもたらした可能性は十分に考えられる。そこで TES の下地にある絶縁膜と下部 Al 配線に着目して調査を行ったところ、Al 下部配線の製作プロセスにおいて凹凸が発生していることが分かった。

本講演では、これらの凹凸の発生原因の詳しい調査、改善策とその結果を始めとした、DIOS 搭載用の積層配線 TES 型マイクロカロリメータの開発の現状について報告する。

## 観測 a20 超伝導遷移端検出器の弱結合の理解へ向けた臨界電流測定

鈴木 翔太 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

我々のグループでは小型 X 線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) への搭載に向けた次世代 X 線検出器である超伝導遷移端温度計 (Transition Edge Sensor = TES) 型マイクロカロリメータの開発を行っている。TES 型マイクロカロリメータは入射 X 線光子のエネルギーによる素子の温度上昇による超伝導状態と常伝導状態の急激な抵抗値の変化を利用して、X 線のエネルギーを 2eV の程度の精度で測定可能である。TES カロリメータは冷凍機内で極低温にして動作させることで高い分解能を得る。我々は TES に超伝導金属であるチタンと常伝導金属である金の二層薄膜を用い、近接効果で遷移温度を調節している。

我々は TES の物理について理解を深めることが検出器の性能向上にもつながると考えているが、現状 TES の物理は完全には理解されていない。近年の研究で、超伝導体-常伝導体の 2 層構造を用いた TES において弱結合的振る舞いを示すケース (配線間の超伝導電子による巨視的な波動関数の干渉効果) があることがわかった。そこで、このような弱結合的振る舞いが我々の TES でも現れるかについて検証することにし

た。検証方法として、TES 臨界電流の温度依存性の特性の調査、臨界電流の磁場依存性の測定がある。

我々のグループでは前研究において臨界電流の温度依存性の特性の調査を行った。調査方法は超伝導状態の TES に電流値を変えながら電流をかけ抵抗値を測定し、超伝導状態の破れる電流値を記録、温度を変えながら同様の測定を行った。結果は理論値との比較から、測定した TES において弱結合の可能性が低いことがわかった。今後の課題としては違うデザインの TES での測定や、臨界電流の磁場依存性の測定を行うことが上げられる。本講演では TES の臨界電流における研究の現状と課題を報告する。

## 観測 a21 小型衛星計画 DIOS 搭載 4 回反射 X 線望遠鏡用反射鏡の可視光形状評価

萬代 絢子 (名古屋大学 Ux 研 M1)

現在の宇宙において宇宙論で予測されるバリオンの半分以上は未検出であり、ダークバリオンと呼ばれる。ダークバリオンの多くは、宇宙の大規模構造に沿って中高温銀河間物質 WHIM (Warm/Hot Intergalactic Medium) として分布していると考えられている。小型衛星計画 DIOS は WHIM の空間構造解明を目的としている。WHIM は面輝度が低く、広がっているため、大有効面積かつ広視野の望遠鏡が必要である。この要求を満たすため、我々は X 線望遠鏡として、従来の 2 回反射光学系に代わり、4 回反射光学系を採用することで、短焦点距離 (700 mm) 化し、大口径 (600 mm) かつ大視野 (50 分角) の実現を目指している。

本望遠鏡は厚さ 0.22 mm の薄い反射鏡を同心円状に多数配置した構造を持っており、現在製作中の半径 250 mm 付近の反射鏡 4 段 10 組を X 線を用いて性能を評価したところ、結像性能は  $\sim 8.8$  分角であり、目標の 5 分角には達していなかった。結像性能の主な劣化要因は反射鏡の円周方向の形状誤差であった。円周方向の形状誤差が生じる要因の 1 つは、実際にできた反射鏡の半径が設計値からずれていることであると考えられる。実際製作された反射鏡の半径は設計値より大きくなる傾向にあり、支持機構であるハウジングに搭載する際に自然な形を保持することが難しい。本研究の目的は、反射鏡をハウジングに搭載することによる形状の変化を明らかにすることである。測定の容易性から可視光を用いて反射鏡単体の形状評価と、反射鏡をハウジングに入れた状態での形状評価を行った。本講演では、その結果を比較することで反射鏡をハウジングに入れることによる形状の変化、さらに反射鏡の性能の悪化が許容できる反射鏡の実際の半径と設計値の半径のずれについて議論する。

## 観測 a22 炭素繊維強化プラスチックを用いた次世代 X 線望遠鏡の開発

島 直究 (名古屋大学 Ux 研 M1)

従来の日本の X 線望遠鏡は多重薄板型と呼ばれる種類の望遠鏡を用いてきた。この望遠鏡は薄い反射鏡を同心円状に多数配置することで軽量かつ高い集光力を得ることができ一方、角度分解能が数分角程度に制限されてしまうという欠点を併せ持つ。その要因のひとつに、従来用いられてきたアルミ製の薄板基板では Wolter I 型光学系の二次曲面の形成が困難であり、光学系を円錐近似していることが挙げられる。今後の日本の X 線天文学の発展のためには、高い集光力を保持したまま結像性能を向上させる必要性があり、将来的には完全な Wolter I 型光学系を使用した望遠鏡の開発が必須となる。そこで我々は愛媛大学と共同で、炭素繊維強化プラスチック (以下、CFRP) を基板として用いた望遠鏡

の開発を行っている。炭素繊維に樹脂を含浸させて硬化させた複合材である CFRP は軽量 (比重がアルミの 2/3) かつ寸法安定性がよく (熱膨張係数がアルミの 1/8 以下)、高剛性である (ヤング率がアルミの 2 倍) という利点を持つ。また任意の形状に成型が容易であるため、原理上完全な Wolter I 型光学系を使用した望遠鏡が製作できる。

現在は愛媛大学製作の 1/4 周二段一体 CFRP 基板 ( $\phi$  200 mm、各段 150 mm) を用いて反射鏡の製作を行っている。反射鏡製作手法は、ガラス母型に反射膜を成膜し、それをエポキシを用いて基板に転写させるレプリカ法を用いる。今回、製作した反射鏡 4 枚をハウジングに組み込み、大型放射光施設 SPring-8 のビームライン (エネルギー 20 keV) において性能評価を行った。細く絞った平行 X 線ビームを用いて性能評価を行ったところ、ひとつの反射鏡全面では結像性能 3.0 - 4.5 分角程度であり、この結像性能劣化要因が反射鏡の母線方向と円周方向の形状誤差に切り分けられることが分かった。一方局所的には、最も良い位置で結像性能 20 秒角を達成した。本講演では X 線望遠鏡開発の現状と SPring-8 における測定結果について述べる。

## 観測 a23 マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発の現状

中村 果澄 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

将来衛星搭載に向けて開発を行っている独自の超軽量 X 線光学系について発表する。X 線天文学において、天体からの X 線を集光・結像させる光学系は必要不可欠である。しかし、X 線の物質に対する屈折率は 1 よりわずかに小さいため、全反射を用いた斜入射光学系が主に用いられる。X 線は地球大気で吸収されるため、人工衛星への搭載が必要であり、より軽量で角度分解能の良い光学系が求められている。

私はマイクロマシン技術を用いて光学系の製作を行っている。マイクロマシン技術とは、Si 基板上に 3 次元微細構造を製作する技術のことで、半導体の製作等に応用されている。私はその中でもシリコンドライエッチングを用いて 4 インチ Si 基板に穴幅 20  $\mu\text{m}$ 、深さ 300  $\mu\text{m}$  の曲面穴構造体を製作し、高温アニールで曲面穴の側壁を平滑化し、X 線全反射鏡として利用する。さらに宇宙からの平行 X 線を一点に集光させるため、高温で球面塑性変形を行う。また原子堆積法で Ir 等の重金属を膜付けし反射率を上げる。最後に異なる曲率半径で曲げた 2 枚の基板を重ねて Wolter I 型 X 線光学系として完成する。

この手法では、薄い Si 基板を使用するため、原理的に世界最軽量になる。また、X 線反射鏡を一括して製作することが出来る。我々は本光学系をほぼインハウスで製作しており、Wolter I 型光学系による X 線全反射の実証を行い、X 線の結像に世界で初めて成功した。本発表では本光学系の製作の原理と開発の現状について発表する。

1. 'Ultra light-weight and high-resolution X-ray mirrors using DRIE and X-ray LIGA techniques for Space X-ray Telescopes' Yuichiro Ezoe (2010)

## 観測 a24 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡用反射鏡の M 吸収端付近での反射率測定

倉嶋 翔 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

2015 年度に打ち上げが予定されている日本の次期 X 線天文衛星「ASTRO-H」には、軟 X 線領域 (0.3-15 keV) の X 線の集光を担う軟 X 線望遠鏡 (SXT) が 2 台搭載される。SXT での X 線の集光には、反

射鏡による全反射を用いて集光する斜入射光学系を採用している。反射鏡はアルミニウム基板に金の薄膜を蒸着したものをを用いる。2 台の SXT の内の 1 台である SXT-S の焦点面検出器である軟 X 線分光器 (SXS) は 6 keV の X 線に対し 7 eV 以下という高分解能を誇り、天体が発する輝線の微細な構造を検出することで、天体のより詳細な情報が得られると期待されている。

検出器による出力には SXT の特性が現れてしまうため、実際に天体が発している情報を手に入れるためには SXT の特性を表すような関数が必要であり、それを応答関数という。高いエネルギー分解能を誇る SXS で検出できる天体からの情報を再現する応答関数を構築するためには SXT の性能を十分に把握することが必要である。X 線望遠鏡の性能を表す指標の 1 つに反射鏡の反射率がある。反射鏡に用いられる金には X 線の反射率が急激に変化する M 吸収端が 2-4 keV に存在し、M 吸収端付近の反射率の複雑な構造を把握する必要がある。

そこで、高輝度で安定した X 線が供給され、高分解能の二結晶分光器で X 線の単色化を行うことができる高エネルギー加速器研究機構 Photon factory に反射鏡サンプルを持ち込み、反射鏡の M 吸収端付近の反射率のエネルギー依存性を測定した。測定は、X 線の入射角を金の臨界角周辺の 5 点で固定し、2100-4100 eV のエネルギー領域を 2 eV ピッチでの測定、さらに吸収の深い金の M-IV, M-V 吸収端付近 (2200-2350 eV) を 0.25 eV ピッチという細かいエネルギーピッチでの測定を行った。また測定で得られた反射率曲線から導き出される応答関数へ組み込むパラメーターである光学定数のエネルギー依存性を反射率曲線の Model fit を行うことで算出した。

本発表では実験方法と結果を述べ、その考察を行う。

## 観測 a25 ASTRO-H 衛星搭載 SXS 用波形データ処理器の機上での機能検証

加藤 優花 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1)

X 線天文衛星 ASTRO-H は、2015 年度に打ち上げが予定されている。この衛星には、軟 X 線分光検出器 (Soft X-ray Spectrometer, SXS) が搭載される。SXS は、X 線望遠鏡の焦点面における入射 X 線の光子エネルギーを熱エネルギーに変換して計測する X 線マイクロカロリメータと呼ばれる X 線検出器である。受光素子を 50mK という極低温で動作させることで、0.3-12.0keV の入射 X 線に対して 7eV(FWHM) という高エネルギー分解能を実現する。SXS はすでに ASTRO-H 衛星に搭載され、現在、衛星上での機能・性能試験が行われている。

SXS の一連の信号処理部のうちデジタルデータを扱う部分を Pulse Shape Processor (PSP) という。PSP は、増幅と A/D 変換を施された波形データを受け取り、X 線イベントの検出と光子のエネルギー測定を行う。具体的には、光子を吸収したことによる温度変化のプロファイルに対して、ノイズのフーリエスペクトルも考慮したテンプレート波形を用いた最適フィルタ処理を行うことで、入射光子による温度上昇、すなわち入射エネルギーを精度よく求めることができる。

しかし、PSP で評価する波形の中に複数のイベントが重畳していると、正確なエネルギー計測ができなくなる。そのため、入射イベントは前後の時間間隔によってイベントを分類するグレード付けという処理を行う。このグレード付けとは、時間間隔ごとに 3 種類に分類することであり、長い方の 2 種類に分類された信号にのみ、最適フィルタ処理を行う。間隔が広い順に、H, M, L の 3 種類、信号の前後関係で p, s の 2 種類がある。これらを組み合わせると Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の計 5 種類が存在する。ランダムな信号入力の場合、各グレードの発生する割合は、カ

ウントレートの間数となる。今回の発表では、衛星に搭載され、他の機器も動作している状態で測定することで、PSP の機能・性能評価するとともに、周期的な信号による干渉も評価する。

### 観測 b1 TMT 中間赤外線観測装置冷却チョッパー用ボイスコイルモーターの開発

毛利 清 (東京大学 天文学教育研究センター M1)

中間赤外線における地上観測では大気の放射が非常に大きくこれを取り除くことが課題である。これまで副鏡を動かすチョッピングと呼ばれる技術によって放射を取り除いてきたが、TMT など口径 30m 以上の次世代大口径望遠鏡の時代においては副鏡が大きくなり、副鏡チョッピングは不可能となる。代替案として副鏡を動かす代わりに、光学的に副鏡と共役な位置にあたる冷却された装置内の鏡を動かすことにより、副鏡を動かした際と同じ効果を得る「冷却チョッピング」という手法が考案されている。本課題研究では、冷却チョッピングの導入を検討している TMT 用中間赤外線観測装置 MICHII における冷却チョッパーの具体的な要求性能を明らかにした。またその性能を満たすチョッパーの動力として、ボイスコイルモーター (VCM) に着目し、要求性能を満たす条件についての検討を行った。その結果、VCM に使用する巻き線の電気抵抗率が、チョッパーとしての要求性能を満たす上での重要なファクターであることが明らかとなった。また巻き線として高純度銅線、高純度アルミ線、および超伝導線を使用した VCM のそれぞれについて、原理的には条件を満たし、最終的に要求性能を達成する可能性があることが示された。現在超伝導コイルを用いた VCM を製作中であり、完成後は想定されている VCM 使用環境下での駆動試験を予定している。

1. T. Tokunaga et al., Design Concepts for a Mid-Infrared Instrument for the Thirty-Meter Telescope. SPIE. Vol.7735 77352C (2010)
2. C. J. Fredricksen et al., High field p-Ge laser operation in permanent magnet assembly. Infr. Phys. Tech. Vol44 79 (2003)
3. J.Bährdt. Permanent magnets including undulators and wigglers. CERN. Accelerator Physics (2009)

### 観測 b2 可視光望遠鏡 CAT を用いた分光観測機器の性能評価

山田 宗次郎 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

中央大学坪井研究室では、一昨年から 26cm 可視光望遠鏡 Chuo Astronomical Telescope 通称 CAT を稼働し、自分たちの手による観測手段を得た。今までは測光観測を行っていたが、新たな観測分野を得るために分光観測機器を取り入れ、分光観測を行うこととなった。

天体の写真を得るために使用したカメラは、ATIK CAMERAS 社製の冷却 CCD カメラ ATIK460EX であり、用いた分光器は Shelyak INSTRUMENTS 社製の Alpy 600 である。解析に適したスペクトル領域は 3700-7400Å であり、波長分解能は 6500Å 付近で 600、4500Å 付近で 400 である。

これらの観測機器を用いて実際に天体を観測し、性能評価を行った。本講演では、その結果について報告する。

### 観測 b3 DLC 薄膜蒸着によって立体状に湾曲させたシリコン結晶について

松岡 直宏 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

我々の研究室では、単結晶の X 線集光素子の実現に向け、厚さ 50-100  $\mu\text{m}$  のシリコン結晶に対して、プラズマ CVD 法を用いて DLC 薄膜を蒸着していき、その薄膜の応力を利用してシリコン結晶を回転面状に湾曲させる研究を行ってきた。

私は、結晶構造の対称性に着目し、Si(1,0,0) 結晶をその劈開方向に沿って割ることで作成した正方形の形状の結晶、Si(1,1,1) 結晶をその劈開方向に沿って割ることで作成した正三角形の形状の結晶に対して DLC 蒸着を行うと、蒸着後どちらも球面状に湾曲すると考えた。

そこで、上記のように作成した一辺 2.9cm で正方形の形状をした Si(1,0,0) 結晶及び、一辺 3.5cm で正三角形の形状をした Si(1,1,1) 結晶に対して、DLC 薄膜を蒸着していき、蒸着後の形状をレーザー変位計で調べたところ、2 つともすべての測定ラインにおいて円状に近く湾曲していることが確かめられ、これら 2 つの試料は、立体状に湾曲していることが判明した。

### 観測 b4 地上ガンマ線望遠鏡 CTA 計画での小口径望遠鏡における半導体光電子増倍素子の較正手法

佐藤 雄太 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) は、20 GeV から 300 TeV にわたるエネルギー範囲で超高エネルギーガンマ線を観測するための国際的な次世代望遠鏡計画である。CTA では大・中・小の異なる口径の大気チェレンコフ光望遠鏡を 100 台規模で設置し、従来の望遠鏡に比べて 1 桁高い検出感度の実現を目指す。宇宙線の加速現場、その加速機構は何かという疑問の解決に加え、超新星残骸の衝撃波面からの宇宙線脱出の発見といった、CTA の高い検出感度、角度分解能、観測エネルギー範囲を活かしたガンマ線観測が可能になると期待される。

我々は複数ある小口径望遠鏡の設計のうち、Gamma-ray Compact Telescope (GCT) の焦点面検出器を開発している。GCT では複鏡を用いた Schwarzschild-Couder 光学系を採用することで 8 度以上の視野で結像性能を維持し、空間的に広がる天体の観測や高い角度分解能を実現する。さらに、副鏡を用いて焦点面上での画像を縮小し、カメラの小型化を可能にした。広大な有効面積を実現するための数十台の望遠鏡の設置には、安価かつ要求性能を満たす焦点面カメラの開発が必須である。

GCT の焦点面カメラは半導体を用いた多ピクセルの光検出器と小型の波形記録回路を用いることで、従来の光電子増倍管に比べて小型で多チャンネルの読み出しを可能にし、また高い光検出効率も得ることができる。検出器に用いる半導体光電子増倍素子は、出荷時には暗電流の電圧依存性などの基本特性しか測定されていない。そのため、全てのピクセル (約 7 万) についてゲイン特性と飽和特性を測定する必要があるが、組み立てに割り当てられた期間を考慮してカメラモジュールに組み込み後に較正する方針である。

当講演では、半導体光電子増倍素子のゲイン特性と飽和特性を電子回路の特性込みで較正する方法について報告する。

1. B. S. Acharya, et. al. Introducing the CTA concept APh....43....3A (2013)
2. M. Actis, et. al. Design concepts for the Cherenkov Telescope

Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy ExA...32..193A (2011)

### 3. CTA-japan コンソーシアム "Cherenkov Telescope Array 計画書" (2014)

## 観測 b5 3.8m 電波望遠鏡による S/X バンド観測システムの開発

高橋 諒 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

大阪府大 宇宙物理学研究室は、国土地理院が北海道-新十津川にて測地 VLBI 観測用に運用していた 3.8m 電波望遠鏡を我々の研究室棟屋上に移設した。従来、S(2GHz)/X(8GHz) バンドを用いて観測を行っていたが、我々はより高周波・広帯域での観測を目指し、冷却受信機・広帯域フィードの開発を行っている。

移設の際、主鏡をばらして輸送し、再度組み立てたため、主鏡面の鏡面精度や望遠鏡の指向精度等を再度測定する必要がある。私は、これらの移設に伴った望遠鏡の性能評価測定を中心に行っている。鏡面精度測定には、フォトグラメトリという手法を用いて測定を行い、主鏡の鏡面粗さが 0.969mmRMS であることがわかった。この値を Rutz の式に代入することにより S/X バンド及び 12GHz において鏡面の粗さによる能率の低下を確認した。また、望遠鏡の指向精度測定のために、太陽の十字スキャン観測を行なった。この観測では、太陽を追尾しながら Az 方向・El 方向ともに 0.25° 間隔で 7 点に向けながら電波強度を取得した。El 方向において指向精度はおおよそ問題ないとわかったが、Az 方向においては指向誤差があり、引き続きポインティング観測が必要であることがわかった。

本講演ではこれらの結果及び 3.8m 望遠鏡の現状を報告し、今後の展望を紹介する。

## 観測 b6 NANTEN2 サブミリ波望遠鏡 230 GHz 帯受信機の概要

古賀 真沙子 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々の研究室では、南米チリ・アタカマ高地 (標高 4860 m) に設置された口径 4 m のサブミリ波望遠鏡「NANTEN2」を用いて宇宙電波の観測を行っている。NANTEN2 電波望遠鏡では、2013 年度より 230 GHz 帯受信機を搭載し、一酸化炭素分子の回転遷移輝線  $\text{CO}(J=2-1)$  を用いて銀河系中心部、超新星残骸、分子雲衝突候補天体、高銀緯天体、小質量星形成領域他、多数のプロジェクトの観測を行っている。

天体からの電波はきわめて微弱であるため、受信機自体の雑音を押さえた上で信号を増幅することが重要である。しかしながら我々が観測する 230 GHz 帯の高周波電波を直接増幅できるような低雑音増幅器はまだ実用化されていない。そのため NANTEN2 受信機では、初段部分を 4 K まで冷却し、超伝導ミクサーを使ったヘテロダイン方式 (周波数変換方法の一種) を用いて信号周波数を下げてから増幅を行うことで、受信機雑音温度 30–50 K の低雑音を目指している。また、安定した望遠鏡運用のためには、受信機を望遠鏡に搭載する前に、実験室でその性能やノイズ、長時間安定性の調査等を行って最良の状態を知っておく必要がある。

2015 年度シーズン立ち上げ前の実験室評価では、Hot/Cold 法を用いた受信機雑音温度の正確な測定を重点的に行った。Hot/Cold 法は、受

信機に常温の擬似黒体と液体窒素温度の擬似黒体を見せたときの出力パワーから受信機雑音温度を見積もる評価法で、受信機の性能を定量化する際にしばしば用いられる。この方法を用いて測定した 2015 年シーズンの 230 GHz 受信機の受信機雑音温度は、観測周波数の 226 GHz において 30–40 K となり、当初の目標を達成することが出来た。この結果は望遠鏡に搭載後にも再現したことが確認されており、実験室での事前評価の重要性を再確認することが出来た。

本ポスター講演では現在搭載されている 230 GHz 帯受信機の受信システムの概要および、実験室での受信機性能評価の詳細を紹介する。

## 観測 b7 NANTEN2 マルチビーム受信機の光学系開発と評価

加藤 千晴 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々は南米チリ・標高 4800m のアタカマ高地にて、口径 4m のミリ波・サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を運用している。これまでに一酸化炭素分子の回転遷移輝線  $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ 、 $J=2-1$ ) の観測が行われており、空間分解能はそれぞれ 2.6 分角と 1.3 分角に相当し、広範囲の観測データを用いて分子雲の物理的状態や星間現象の解明が進められている。

現在 NANTEN2 はシングルビーム観測を行っているが、比較的口径が小さい NANTEN2 でマルチビーム観測が可能になれば、広域観測をさらに効率よく行うことができると期待されている。そこで、我々は全天の 70% を観測する超広域分子雲サーベイ NASCO (NANTEN Super-CO as Legacy) を計画している。この計画を実現するために、現在 NASCO 用のマルチビーム受信機に対応した光学系の設計・開発が行われている。この光学系のモデルは、ピラミッド型ミラーによりビームを 4 つに分離し、楕円鏡で絞ったのちホーンに集光するという構成である。ピラミッド鏡各面はそれぞれのビームで開口率 70% 出るよう、設置角度が調整されていた。しかし、物理光学シミュレーション (GRASP) を用いてビームの指向特性の仰角依存性を調査したところ、天球面上で各ビームの感度の位置が、仰角の変化に対し異なる中心点と半径の円弧状にそれぞれ軌跡を描くことがわかった。この複雑な指向特性により、仰角が小さくなるにつれて一部鏡面においてビームが蹴られ、開口率が 50% 程に大きく低下してしまうことも判明した。

この問題と既存の受信機室の空間的制約をクリアするため、マルチビーム光学系の再検討を行った。楕円鏡を上手く組み合わせることでビームがコンパクトに並ぶようにし、開口率 70% とエッジレベル-30dB 達成を目標とした新光学系を設計している。本発表では、ピラミッド鏡光学系における解析結果と新マルチビーム光学系開発の現状について報告する。

1. 黒田 豊 修士論文. 名古屋大学 (2012)

## 観測 b8 NANTEN2 電波望遠鏡の制御システム更新

丸山 将平 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

NANTEN2 は、南米チリ共和国アタカマ高地 (標高 4800m) に設置されたミリ波・サブミリ波望遠鏡であり、南天の分子ガス観測を通して「銀河や宇宙の起源解明」に挑んでいる。今後、世界初の超広域分子ガスサーベイを行うために、新受信機の搭載を計画している。しかし、現

在の NANTEN2 制御システムは、独自に開発された言語で構築されており汎用性が低く、また、7年以上前の計算機や OS を用いているため、新受信機の搭載・運用に適していない。そのため我々は受信機の更新に先駆け、今後のスムーズな運用、長期にわたるビッグデータの取得を目標として、NANTEN2 の制御システムの更新を最優先で進めている。具体的には、大阪府立大学が中心となって運用している 1.85m 電波望遠鏡のシステムをベースに構築を始めている。これらは python とよばれるプログラミング言語で書かれており汎用性が非常に高く、現在 NANTEN2 が抱えている問題点をクリアすることが可能である。計算機も全て一新し、NANTEN2 電波望遠鏡の独自の装置（ミラー、ドームなど）の制御項目の追加や、自動簡易解析などの観測効率向上を目指した機能も新規作成している。名古屋での動作試験を経て、2015 年秋以降の NANTEN2 への搭載を計画している。本講演では、NANTEN2 制御システム更新作業の概要、および今後の開発計画について紹介する。

### 観測 b9 TES 型 X 線マイクロカロリメータ用断熱消磁冷凍機の温度制御の改良

伊東 宏昌 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

X 線マイクロカロリメータは入射 X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器であり、100 mK 以下の極低温で動作させることによって、 $E/\Delta E_i \sim 1000$  の画期的なエネルギー分解能を実現する。さらに、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES (Transition Edge Sensor) 型は、より高い分光性能を実現でき、次世代 X 線天文衛星への搭載が予定されている。軌道上で 100 mK 以下の極低温を実現するには重力依存性のない断熱消磁冷凍機 (ADR) がもっとも現実的な解である。ADR は磁性体に磁場を印加し、断熱状態で磁場を取り去って冷却する冷凍機である。断熱消磁後は超伝導マグネットに流す電流を制御して温度を一定に保つ。カロリメータはわずかな温度揺らぎでも影響を受けるため、その性能を最大限引き出すには精細な制御による高い温度安定度が必要である。

我々は、ADR での温度制御方式として PID 制御を用いている。PID 制御とは、目標値との偏差に比例 (Proportional) した項、偏差を積分 (Integral) した項、偏差を微分 (Derivative) した項により出力を補正することで偏差を無くす制御方法である。我々の ADR での温度安定度はこれまで  $10 \mu\text{Krms}$  程度であり、長期的な温度ドリフトも見られていた。私は温度制御のコードを一から見直し、また ADR の電流減少速度をあらかじめ予想することで PID 制御を補助する、電流減少項の導入を行った。その結果、温度安定度は  $2 \mu\text{Krms}$  程度にまで改善し、長期的に一定の温度で制御することが出来るようになった。

本講演では、これらの内容について詳細に報告する。

1. 高倉奏喜. 修士論文 (2015)
2. 星野晶夫. 修士論文 (2005)
3. 山本重彦, 加藤尚武. PID 制御の基礎と応用. 朝倉書店 (2005)

### 観測 b10 次世代 X 線観測機械 (XRPIX) の基本性能の温度依存性とノイズの評価

玉澤 晃希 (東京理科大学 理工学研究科 物理学専攻 幸村研究室 M1)

我々は、次世代の X 線天文衛星に搭載する SOI 技術を用いた CMOS アクティブピクセルセンサー (XRPIX) を開発している。XRPIX は、各

ピクセルにイベントトリガー出力機能を持ち、ノイズを低減するために CDS 機能を兼ね備え、高い時間分解能 (数  $\mu\text{s}$ ) や、広いエネルギー帯域観測 (0.3 40keV) での観測を実現する X 線検出器である。

XRPIX シリーズは、読み出しノイズ、リーク電流、ゲイン、エネルギー分解能などの基本性能の温度依存性は十分には調べられていない。そこで、我々は、XRPIX シリーズの中の、XRPIX1, XRPIX2b の 2 種類の素子に対して、これらの基本性能の温度依存性の評価実験を行った。ただし、この実験では、イベントトリガー出力機能は用いず、フレーム読み出しモードを使用し、バックバイアスを 5V 印加し、素子温度を常温から -80 まで変更して行った。

実験結果から、読み出しノイズ、リーク電流、エネルギー分解能は、いずれも動作温度に依存していることが分かった。また、読み出しノイズを、リーク電流起源のノイズと回路起源のノイズに切り分け、回路起源のノイズの評価も行った。電子回路起源のノイズは、 $kT/C$  ノイズと考え、容量  $C$  を算出したところ 33fF (XRPIX1)、20fF (XRPIX2b) と求められ、この算出した容量は設計値の電気容量よりも小さく、49fF (XRPIX1)、22fF (XRPIX2b) 程度の寄生容量が存在することが分かった。

本講演では、XRPIX1, XRPIX 2b の基本性能の温度依存性の実験結果と、電子回路由来のノイズの評価について報告する。

1. 中島真也, 修士論文「SOI 技術を用いた広域 X 線撮像分光器 (XRPIX1) の評価試験と性能向上の研究」、京都大学 (2011 年)

### 観測 b11 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD 用のコンタミネーション防止膜 (CBF) の開発

吉野 祐馬 (東京理科大学大学院理工学研究科物理学専攻 幸村研究室 M1)

X 線天文衛星に搭載する X 線観測機器は、衛星内部の有機物から放出されるアウトガスによるコンタミネーションによって、検出効率等の性能低下を引き起こす。特に X 線 CCD のように -100 程度まで冷却する検出器は、アウトガスが吸着しやすくコンタミネーションの影響が大きい。そのため我々は、コンタミネーション防護用の CBF (Contamination Blocking Filter) と呼ぶフィルターを開発している。2015 年度打ち上げ予定の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する X 線 CCD は、我々が開発している CBF を装備する。この CBF はコンタミネーションを防止するだけでなく、地球大気が放射する紫外線や天体が放射する可視光を遮光する役割もある。ただし、CBF は観測対象となる X 線を吸収するため、できるだけ薄くする必要がある。これまでに、我々はポリイミドとアルミニウムを素材とした 2 種類の CBF を開発した。1 つは、厚みが 200nm のポリイミドの片面に厚みが 30nm のアルミニウムを蒸着したもの (CBF-I)、もう 1 つは、ポリイミドの厚みは同じ 200nm で、ポリイミドの両面に厚みがそれぞれ 400nm と 800nm のアルミニウムを蒸着したもの (CBF-II) である。CBF の実用化に向けては、ロケットでの打ち上げ時の振動への耐久性や、CBF の X 線・紫外線・可視光透過率を評価することで必要となる。CBF-I については、Spring-8 の BL25SU において、2.0keV 以下の軟 X 線透過率を測定し、理科大において可視光透過率を測定した。一方、CBF-II については、KEK-PF において X 線・紫外線を評価し、理科大において可視光透過率を測定した。X 線透過率は、窒素を含む、炭素、酸素、アルミニウムの K 吸収端付近の X 線吸収微細構造 (XAFS) を含めた X 線透過率を測定することができ、CBF-I では 0-K で 60 本公演では、CBF-I と CBF-II の X 線・可視

光・紫外線透過率の測定の結果について報告する。

## 観測 b12 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載用 X 線 CCD カメラ (SXI) の Si-K edge 前後のレスポンスの研究

丹野 憧磨 (東京理科大学 理工学研究所 物理学専攻 幸村研究室) M1)

我々は X 線天文衛星搭載 X 線 CCD カメラ (SXI; Soft X-ray Imager) の開発を行っている。X 線 CCD のスペクトルの形 (レスポンス) は入射 X 線のエネルギーによって異なり、特に Si-K edge (~1.84keV) より高いエネルギー帯域では Si の escape peak や Si line があるなど複雑なレスポンスとなる。現在稼働中の Suzaku 衛星搭載 X 線 CCD のレスポンスでは、Si-K edge 前後のレスポンスの不定性が解消されていない問題があり、2015 年度打ち上げの ASTRO-H 衛星搭載 X 線 CCD (SXI) の地上キャリブレーションの重要課題となっている。

我々は、2014 年 2 月、12 月、2015 年 5 月に高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の放射光施設 (KEK-PF) のビームライン BL-11B において 1.73keV ~ 3.00keV の帯域の単色 X 線を用いて、SXI と同じ性能を持つ CCD 素子 (mini 素子) の Si-K edge 前後におけるスペクトルの詳細な測定を行った。さらに、放射性同位体  $^{55}\text{Fe}$  からの X 線を使ったレスポンスの評価も行っている。

今回行った測定では mini 素子のレスポンスは、SXI のフライト品と同様に、2 個のガウシアンからなるピーク成分と、エネルギーに依らない一定成分の、計 3 成分で再現できることが分かった。ただし、ピーク成分と一定成分の比などが、フライト品と異なることも分かり、駆動回路のノイズなどが原因が調査を進めている。

1. 大阪大学 上田 周太郎 修士論文 (2010) : 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 搭載 X 線 CCD カメラ (SXI) に向けた CCD 素子の開発 低エネルギー応答の改善と電荷注入法の確立

## 観測 c1 鹿児島大学 1m 望遠鏡に搭載する近赤外 3 バンド同時撮像装置の開発

西森 健文 (鹿児島大学 M1)

私は、鹿児島大学 1m 望遠鏡に導入する近赤外線カメラ (新赤外カメラ) の開発を行っている。現在の赤外カメラはフィルターホイールを回転させることで J(1.2  $\mu\text{m}$ ), H(1.6  $\mu\text{m}$ ), K(2.2  $\mu\text{m}$ ) の 3 バンドを別々に撮像している。しかし、新赤外カメラでは HAWAII アレイを 3 つ搭載し、ダイクロミックミラーを用いて光束を 3 つに分けることで、J、H、K の 3 バンド同時撮像を行うことができる。よって、この新赤外カメラは、現在の赤外カメラに比べ観測時間が 1/3 になり、さらに、フィルターが固定されるためトラブルも少なくなると考えられる。近赤外観測装置は検出器の暗電流、光学系の熱輻射を減らすために装置内部を冷却する必要があり、そのためには装置内部を真空にする必要がある。そこで私はこれまで、この新赤外カメラにおいて以下の 3 つのことであった。1 つ目は耐圧シミュレーションを行った。耐圧シミュレーションでは装置外壁にかかる応力、変位量を有限要素法を用いて求めた。その結果、応力は降伏の強さを下回り、変位量は 33  $\mu\text{m}$  と非常に小さいため観測装置として問題ないことを確認した。また、変位量は実際に測定し、シミュレーションの結果と 10  $\mu\text{m}$  の差で一致することを確認した。2 つ目は冷凍機を装置内部が無負荷の状態で作動させる実験を行っ

た。その結果、冷凍機コールドヘッドは 27.5 K となり冷凍能力曲線の推定値と 1K 程度の差で一致した。3 つ目は装置内部の熱計算を行った、まず装置外部からの熱流入を 21.1 W と見積もり、その値を用いて、冷凍機稼働時に検出器が 70K、光学系が 100 K を実現できることを確認した。今後は装置内部の設計を進め、来年夏の完成を目指す。

## 観測 c2 鹿児島大学 1m 光・赤外線望遠鏡観測データ解析における等級ゼ口点の決定精度の検証

栄木 美沙紀 (鹿児島大学 M1)

鹿児島大学 1m 光・赤外線望遠鏡では、天の川銀河のミラ型変光星の変光周期と平均等級を求めるため、観測を行っている。観測によって得られたデータは、測光・等級較正の処理を経ることで、星の見かけ等級 (較正済み等級) を求めることができる。現在、この処理は山下卒業研究 (2014) で開発された自動解析システムで自動処理され、等級較正に必要な「等級ゼ口点」も自動処理の過程で求められている。しかし、等級ゼ口点精度よく決定しない場合があるため、私は等級ゼ口点の決定精度の改善を目的として最頻値と一次関数フィッティングを用いて等級ゼ口点を求めた。また、それぞれの等級ゼ口点の値を使用して非変光星の時系列データの等級較正を行い、両者の標準偏差を比較することで優劣を判断した。その結果の一例として、最頻値から等級ゼ口点を求めた場合の標準偏差が 0.095 であるのに対して、一次関数フィッティングの場合の標準偏差が 0.073 であるなど、最頻値から等級ゼ口点を求めるよりも、一次関数フィッティングをすることで等級ゼ口点を求める方法が精度良く等級ゼ口点を求めることができると分かった。

## 観測 c3 遠赤外線天文学における観測装置と検出器

花岡 美咲 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M2)

一般に、赤外線は 1-300  $\mu\text{m}$  に渡る波長の電磁波を指し、その中で遠赤外線は 50-300  $\mu\text{m}$  に分類される。宇宙からの遠赤外線放射は、主に星間固体微粒子 (ダスト) からの熱放射と、星間ガスからの微細構造輝線によるものである。よって、遠赤外線放射を観測することにより、星形成領域などのダスト、ガスが多く存在する星間空間の物理を知ることが出来る。遠赤外線は大気吸収のため、飛行機 (Kuiper, SOFIA) や人工衛星 (Herschel, AKARI など) といった飛翔体を利用した観測が必須となる。また、背景光を少なくするために望遠鏡や検出器を冷却する必要がある。

遠赤外線検出器は、光検出の原理から熱型検出器と量子型検出器に大別される。現在まで活躍してきた遠赤外線検出器は、熱型検出器のボロメータ (Herschel/PACS Photometer など) と量子型検出器の Ge:Ga フォトコンダクター (AKARI/FIS など) である。ボロメータは入射光子の持つエネルギーによる温度変化を利用し、フォトコンダクターは束縛電子が励起されたことによる電流量の変化を利用して光を検出するという違いがある。また、ボロメータは 1 K 以下の温度に冷却する必要があるが、検出できる波長帯が広く、一方で、フォトコンダクターは数 K 程度の冷却温度で運用できるが、検出できる波長帯が狭いという特徴がある。将来の検出器としては、超伝導ボロメータ (SPICA に搭載予定) や、Blocked Impurity Band 型 Ge 検出器の開発が行われている。これら検出器のもつ特徴を把握し、その長所と短所を整理することは、装置開発や観測データの解析を行う際に重要である。本講演では、遠赤外線天文学における観測装置と検出器について、その種類と特徴を紹介する。

1. Kaneda, H., et al. Japanese Journal of Applied Physics, 50, 066503 (2011)

#### 観測 c4 Development of Far-Infrared Image Sensor with Silicon-Supported Germanium Blocked Impurity Band Detector

公地 千尋 (宇宙科学研究所 D1)

宇宙空間における波長 50 – 200  $\mu\text{m}$  の遠赤外線検出には、ゲルマニウム中の不純物 (ガリウム) の光励起を利用した検出器である Ge:Ga 外因性フォトコンダクタが用いられてきた (Kaneda et al., Infrared Phys. Technol., 48, 22, 2006)。しかしこの検出器には、不純物濃度を高くして感度を上げると、同時にホッピング電流による暗電流も増加するという欠点があった。

この欠点を改善するために考案されたのが、不純物を高濃度でドーピングした外因性フォトコンダクタと高純度な真性半導体の層を接合した Blocked Impurity Band (BIB) 型検出器である (Hadek et al., Appl. Phys. Lett., 72, 273, 1992)。この BIB 型検出器では、不純物準位を持たない真性半導体層によってホッピング電流をブロックできるため、高感度かつ低ノイズな光検出を行うことができる。

我々は、Ge:Ga BIB 型検出器を完全空乏型 SOI (Silicon on Insulator) を用いた CMOS 読み出し回路 (ROIC) とパンプを用いて画素毎に接続した構造の大型 2 次元画像センサの開発を進めている。画像センサは約 2 K で運用されるが、その際、ゲルマニウムである検出器とシリコンである ROIC との間の熱膨張率の差によってパンプが破損するという問題があった。この問題の解決のために、我々は検出器をシリコン基板で支持する構造を考案した。この構造をとることにより、検出器部分と ROIC の熱膨張特性の差を小さくし、極低温でパンプにかかる応力を小さくすることができる。我々は検出器の光検出効率と熱・材料力学的な点から考察を進め、シリコン基板に支持された検出器を作成した。さらに、この支持構造に伴う埋め込み透明電極への電気的コンタクト機構を作成し、赤外透過率の評価と金属電極の蒸着状態に関する考察を行った。

#### 観測 c5 南極観測用赤外線カメラの開発および性能評価

中堀 日光 (東北大学天文学専攻 M1)

南極で系外惑星のトランジット観測や CIB の観測を行いたいという背景のもと、赤外線カメラ "tonic" の開発と性能評価を行ってきた。南極である理由は、優れたシーイングや晴天率、低水蒸気量など様々な好条件が揃っているからである。本研究では、赤外線カメラ (と 25cm 望遠鏡) を南極に持って行くことを想定しカメラの開発を行っている。行ってきたことは以下のとおりである。

1. 真空引き・冷却実験
2. カメラ駆動用ボードの作製
3. CCD の駆動実験

1 は赤外線観測するのでカメラ自身の輻射を減らすために行う。2 では既存の基盤を複製するという形で作製した。故障時の代替機になり、さらに故障の原因を解明するのにも役に立つ。3 では実際に画像を撮り、出力値を見ることによってカメラが正しく動いているのかを確認した。

#### 観測 c6 CTA 計画における大口径望遠鏡カメラ窓の促進耐光性試験

本橋 大輔 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、口径の異なる大中小 3 種類の解像型大気チェレンコフ望遠鏡群を設置することで、既存の望遠鏡に比べて 1 桁高感度で、非常に幅広いエネルギー領域 (20 GeV – 100 TeV 以上) をカバーすることを目指す国際共同実験計画である。この計画には現在 29 カ国が参加しており、その中で日本グループは主に大口径望遠鏡の開発に大きく関わっている。

大口径望遠鏡は、高エネルギーガンマ線が大気中を通過するときの電磁カスケードにより発生するチェレンコフ光を鏡で集光し、焦点面にあるカメラで検出する。チェレンコフ光の波長分布は  $1/\lambda^2$  に比例するスペクトル分布を持つが、波長 300 nm 以下は大気中の酸素やオゾンに強く吸収され、およそ 300 nm から 600 nm のチェレンコフ光の検出が重要となる。しかし、そのカメラは湿気やダストから守るために密閉性が要求されており、カメラの焦点面側は透明な窓で覆う必要がある。したがって、その窓は波長 400 nm 以下の紫外線も十分に透過することが要求される。現在、大口径望遠鏡カメラ窓の候補として、「三菱レイヨン」製の UV 透過型アクリル板「アクリライト」が挙げられている。8 mm 厚の「アクリライト」の透過率は、波長 350 nm より長波長側で 90% 以上、波長 300 nm でも 70% 近くの透過率を示しており、カメラ窓として使用できる十分な透過率を有していることが確認されている。しかし、望遠鏡は建設されると長期間に渡って太陽光や風雨などの気象環境に曝されることになるため、高い耐候性も同時に求められる。太陽光の紫外線による影響に焦点を絞り、「アクリライト」に対して紫外線蛍光ランプを用いて促進耐光性試験を行い、劣化による透過率の低下を調査している。

本講演では、促進耐光性試験の概要と「アクリライト」の透過率変化について報告する。

#### 観測 c7 電子飛跡検出型コンプトンカメラにおける飛跡取得の改良

中増 勇真 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

MeV ガンマ線での観測は様々な天体現象を理解するうえで重要なものである。しかし、MeV 領域での全天観測はこれまで COMPTEL のみしか行われておらず、他の波長領域に比べて検出感度もよくない。この原因は、MeV 領域では、物質との相互作用はコンプトン散乱が優位になり、その再構成が難しく到来方向を求めにくいからである。また、宇宙線と検出器との相互作用から生じる大量のバックグラウンドが存在することも原因として挙げられる。そこで、我々のグループは優れたイメージング能力を持つ全く新しい検出器として電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron-Tracking Compton Camera, ETCC) を開発している。COMPTEL では、ガンマ線の到来方向を円環上に制限するのみであったが、ETCC ではコンプトン散乱による散乱ガンマ線のエネルギーや吸収点だけでなく、反跳電子の三次元的な飛跡も測定することでガンマ線の到来方向を絞ることができる。

ETCC で反跳電子に電離された電子雲の信号の持続時間 (Time Over Threshold, TOT) を測定していたが、横方向に走った飛跡や短い飛跡は長方形型に広がって再構成されていたため、反跳電子の三次元的な飛跡を得る際に散乱点と反跳方向の決定精度を上げる余地があった。そこ

で、TOT に補正をかけることでより細かく飛跡の構造を取ることができるようになった。本講演では ETCC での飛跡解析の改善された点について述べる。

### 観測 c8 MPPC を用いた新型 GRB 偏光検出器の開発と性能評価

河合 謙太郎 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

ガンマ線バースト (GRB) は 100 億年以上遠方の宇宙で発生する爆発現象である。数秒～数十秒という短時間に大量のガンマ線を放出し、その総エネルギーは  $10^{52}$  erg にも達する。GRB の標準理論となっている火の玉モデルにおいて、GRB の放射は、衝撃波により加速された電子が、同じく衝撃波により形成された強磁場中で曲げられ発生したシンクロトロン放射によるものとされている。シンクロトロン放射で輝くならば、偏光が観測されるはずである。我々の研究目的は、偏光観測によって GRB 内部の磁場構造や、放射メカニズムを解明することである。2010 年に打ち上げられた IKAROS に搭載した検出器 GAP により強い偏光が検出されており、今後はより詳細な偏光観測が望まれる。

我々は 2020 年代前半に打ち上げが予定されている木星圏探査用ソーラーセイルへの搭載を目指して、次世代の偏光検出器の開発を行っている。MPPC(Multi-Pixel Photon Counter) と散乱体として 36 本のプラスチックシンチレータ、吸収体として 28 本の CsI シンチレータを用いた、マトリクス型偏光検出器を開発した。MPPC は複数のアバランシェフォトダイオードからなるフォトンカウンティングデバイスで、小型、軽量、低電圧動作といった利点を持ち、衛星搭載に適している。本講演では、検出器の製作および、高エネルギー加速器研究機構にて高い偏光度を持ったビームを照射する偏光観測実験を行い、実験とシミュレーションを比較することで性能評価を行った結果について報告する。GAP と比較してモジュレーションファクタで 2 倍程度の向上が確認できている。また、数 keV の低エネルギーからの検出を目指し、MPPC の読み出し回路の改善を検討しているため、その進捗を交えた開発の現状を紹介する。

1. Daisuke Yonetoku et al.(2011).ApJL,743:L30(5pp)

### 観測 c9 NANTEN2 駆動系の開発

岩村 宏明 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々の研究室では、アタカマ高地に設置されている電波望遠鏡「NANTEN2」を使用して一酸化炭素分子の回転遷移輝線 CO(J=2-1) の観測を行っている。この望遠鏡の駆動系に関して、現在研究室で進めている全天の 70% をもカバーする超広域分子雲観測 (NANTEN Super CO Survey as Legacy; NASCO) の「NASCO 計画」を実行するにあたり、大量のデータ取得、及びその処理が必要となるため、それらを可能とするための改修である。具体的な作業として、主鏡や副鏡などの望遠鏡の各種モーターの制御プログラムの一新、観測効率を上昇させるための観測及び解析の自動化と効率化、天候や Az・El 値など各種ステータスの新たな処理プログラムとそのモニタの作成を行っている。ここまでの制御と観測に使用するプログラムは、全て python によって書かれる予定であり、これらの動作を実現するための計算機と OS の更新も同時に行う。本講演では、これらの開発作業の計画及びその進捗について報告する。

### 観測 c10 ROACH ボードを用いた広帯域・高分解能デジタル分光計の開発

江藤 翔太郎 (鹿児島大学 M1)

我々は、ROACH ボードを用いた高性能な分光計の開発に取り組んでいる。ROACH ボードとは、カリフォルニア大学バークレー校を中心としたグループ、CASPER によって作られた天文学者向けの計算機モジュールである。ROACH ボードは FPGA を中心に動作する。そのため何度でも機能を変更することができる。また本来 FPGA の開発には高度な知識が必要であるが、ROACH ボードの開発は GUI ベースで簡単に行うことができるようになっている。これらのことから ROACH ボードを用いれば高度な機器開発の知識を持っていない天文学者でも、自ら目的の機能を持ったバックエンドを開発することができる。我々の目標は野辺山で使用されている受信機、FOREST の帯域をカバーできる分光計を開発することである。FOREST は広帯域であるために、現状のバックエンドではすべての帯域をカバーすることはできていない。ROACH ボードを用いることで、広帯域・高分解能なバックエンドの開発を目指す。計画としては ASIAA(AD コンバータ)16 枚 ROACH ボード (分光計)8 枚を使用して帯域 40GHz、周波数分解能 38kHz、速度分解能 0.1km/s を目標としている。

2015 年 10 月には野辺山で立ち上げ測定が行われる。現在はそのバックエンドとして ROACH ボードを用いた分光計を開発している。特に ROACH ボードにおいて FFT のチャンネル数を上げずに高分解能なスペクトルを得ることができる、FFX というアルゴリズムを組み込む。今回は ROACH ボードによる分光計開発の現状について発表する。

### 観測 c11 POLARBEAR-2 における大型低温光学系のアライメント試験

高取 沙悠理 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

近年の観測により、宇宙が熱い火の玉宇宙から膨張したとされるビッグバン理論が確立された。しかし、ビッグバン理論では説明する事の出来ない問題が宇宙の精密測定から明らかになった。宇宙の初期に加速膨張を仮定する事によりこれらの問題を解決する理論がインフレーション理論である。インフレーション理論の実験的検証は、現代宇宙論における最重要課題の一つである。インフレーション理論は原始重力波の生成を予言する。したがって、原始重力波によって宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) に生成される特殊な偏光パターン (B モード) を直接観測するとインフレーション理論の検証ができる。さらに、宇宙の大規模構造によって生じる重力レンズ効果によっても B モードは生成され、B モードの観測によってニュートリノ質量和に関する制限が可能となる。発表者が行う POLARBEAR-2(PB-2) は B モード偏光の精密観測を行う事でインフレーションモデルやニュートリノ質量和に強い制限を与える事を目的とした実験である。PB-2 実験は 2016 年よりチリのアタカマ高地で観測を開始する。PB-2 実験は以下の 3 点の特徴をもつ。(1) 統計感度を向上する為に超伝導 TES(transition edge sensor) ボロメータを 7588 個用いる、(2) 前景放射の分離能力を向上するために 95 GHz と 150 GHz の 2 波長で同時測定する、(3) 光学系由来のノイズを抑制する為に光学系を冷却する。7588 個のボロメータを用いた検出器アレイを構築する為には大きな焦点面とそれに対応する大型低温光学系が必要である [1]。十分な角度分解能で測定を行う為には、全ての検出器に対して回折限界を満たす位置にレンズを配置する必要がある [2]。PB-2 で用いるアルミ

ナレンズは世界最大の直径であり [3]、大型のアルミナレンズに対するアライメントと観測感度についての先行研究はまだ無い。そこで、発表者は大型アルミナレンズを用いた光学系に対して、観測に十分な性能を持つ光学系を構築する為に必要な条件をシミュレーションによって求め、要求値を満たすアライメントを行った。本講演では PB2 実験の概要と PB-2 の低温光学系に対するアライメント試験について報告する。

1. Tomotake Matsumura et al. Proc. of SPIE Vol.8452,84523E-5(2012)
2. S. Hanany, M. Niemack and L. Page. Springer Science+Business Media Dordrecht, 431(2013)
3. Yuki Inoue et al. Proc. of SPIE Vol.9153,91533A (2014)

## 観測 c12 位置天文衛星 Gaia が抱える問題と今後の展望

井 伊織 (国立天文台三鷹 M1)

Gaia とは、銀河系内部の 10 億個もの星々を  $10\mu\text{as}$  レベルという精度で観測する ESA の位置天文衛星計画である。この超高精度での観測を実現するには極めて厳密な装置の機構の管理を行わねばならないのだが、衛星打ち上げ後、予期せぬ問題により  $1\text{mas}$  の精度でしか観測を行えない事態に陥ってしまった。本講演では、その問題とそれらの原因が具体的にどのようなものなのかを取り上げて最新の Gaia についての報告を行う。

Gaia には二つの望遠鏡が搭載されていて、目標の精度のためにはこの鏡の相対角 (basic angle) のぐらつきを  $0.5\mu\text{as}$  以内に抑えなくてはならない。しかし現状では  $1\text{mas}$  のオーダーでぐらついている。これが今回取り上げる深刻な問題である。BAM(The Basic Angle Monitoring) という basic angle のずれを測定する干渉計システムを用いると、この原因が明らかになってきた。太陽の影響による干渉縞パターンの変化量が予想以上に大きいこと、その信号に不連続な点が見られること、パターンに中 - 長期的変化があること、干渉縞の周期に変化が見られること、の 4 つである。ただ中 - 長期的変化は人工的なものであることが分かっている。いくつかについては引き起こす要因が考えられていて、信号の不連続は衛星内の機器の活動が、干渉縞の周期的変化は BAM に用いるレーザーの温度の変化が要因とされている。しかし改善に向けて何も成されていないわけではなく、周期的変化についてはフーリエ級数展開によるフィッティングが施され、信号の不連続は解決策が目下進行中である。

今回問題を提示してくれたように、今後 basic angle に関する問題の解決には BAM が重要な役割を果たすであろう。全体的な解決がなされた後、basic angle についてのより深い知識が得られると思う。

1. Mora, A., et al., EAS Publications Series(2015)
2. Mora, A., et al., arXiv:1407.3729v1(2014)

## 観測 c13 ドーム型 26cm 望遠鏡のシステム立ち上げ

三宅 梢子 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M2)

2013 年度から当大学屋上にドーム型 26cm 望遠鏡 Chuo university Astronomical Telescope 通称 CAT が稼働を開始した。当研究室はかつて全天 X 線監視装置 MAXI や Swift 衛星などから観測データを転送し、

解析を行っていたが、CAT の稼働により、積極的な可視光観測が可能となり、観測対象やデータ取得の自由度が増えた。昨年までの 2 年間は、人の立会いのもと恒星観測を行っており、観測者個人の予定や時間制限により効率的なデータ収集ができなかったため、システムの自動化を試みた。ドームや望遠鏡を制御するハードウェアは全て ASCOM で統合されているため、ASCOM 準拠のソフトウェアである ACP と、ACP で制御される CCD カメラ制御ソフトである MaxIm DL を導入した。観測スケジュールは、ACP の姉妹ソフトである ACP Scheduler により計算、実行が可能となる。これらにより ACP ソフトウェアを介してドーム、赤道儀、CCD カメラがすべて制御可能となるため、人の立会いが不要となる観測が実現できる。その他自動化の詳細に関してはポスターに掲載する。

## 観測 c14 埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA の現状と課題

柴田 吉輝 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室

M1)

埼玉大学では、口径 55cm の赤道儀式光学望遠鏡 SaCRA を有しており、光赤外線天文学大学間連携事業でのガンマ線バーストや超新星等の突発天体、星形成領域、系外惑星、太陽系小天体の観測を実施している。現在までに架台などの観測装置を 2 台の Windows PC 上の GUI から制御していたが、これを改修し、1 台の LINUX PC を用いたコマンドラインによる遠隔制御を可能にしたことで、観測システムの自動化に向けて前進した。

加えて、観測装置について以下の二つの開発、製作を行っている。

一つ目が、可視三色同時偏光撮像装置である。可視の長波長側の r, i, z バンドを用い、ダイクロックミラーを 2 枚使用して 3 つの光路を分岐させる。大きさは、 $40 \times 40 \times 10[\text{cm}]$ 、重さは約  $10[\text{kg}]$  程度と非常にコンパクトな設計となっている。また F6.5 の明るい光学系で、収差を小さくするように工夫したため、本学の望遠鏡のみならず、様々な望遠鏡に搭載することができる。

二つ目が、可視中分散分光装置である。波長分解能の高いエシェルグリズムを用いて、スリットターレット、コリメータレンズ、クロスディスパーザ、カメラレンズを組み合わせた光学系で設計した。理論上の分解能力は R 3000 を見込み、一般的な分光器よりコンパクトな大きさである。

最終的にこれらの装置を用いて、系外惑星の探査や月の地球衝、変光星、太陽系小天体等の観測を行う予定である。

今後の課題としては、フォーカス調整の遠隔制御や気象センサーとの連携、測光まで含めた自動解析パイプラインの整備が挙げられる。また上述の可視三色同時偏光撮像装置のための CCD カメラ制御システムの構築や光学系での色変換係数の算出、可視中分散分光装置のための高精度な天体追尾などへの対応が課題となっている。

本稿では、埼玉大学 55cm 望遠鏡 SaCRA の自動観測システムの確立に向けた制御環境の構築と、可視三色同時撮像偏光装置、可視中分散分光装置の製作の現状と課題について報告する。

## 観測 c15 高感度ビデオカメラを用いた突発現象に対する観測環境の構築

勝倉 大輔 (青山学院大学大学院 M1)

宇宙最大規模の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) の対応天体を効率よく観測するためには、GRB 観測衛星 Swift に搭載されている BAT (Burst Alert Telescope) の視野を追うことが効率的である。また、

BATの視野は $120^\circ \times 90^\circ$ と非常に広いため、その視野に対応する観測装置が必須となる。そのため、青山学院大学吉田研究室では、広視野観測装置 AROMA-W (AGU Robotic Optical Monitor for Astrophysical object - Wide field) を開発した。現在、この観測装置を使用し GRB や一般相対性理論において予言される重力波イベントの対応天体等の可視光領域で増減光する天体現象の常時観測を行っている。一方、そのような現象の大半は実視等級が非常に暗いものであり、かつ光度変化も数秒から数分単位の短い時間で増減光する。従って、時間分解能が低い現在の AROMA-W のシステムでは、その増減光の様子がはっきりととらえられない可能性がある。高感度でフレームレートの高いビデオカメラを用いることにより、一眼レフカメラを用いたシステムに比べて時間分解能の向上が見込まれ、これまでよりも時間分解能の優れた光度曲線が得られると考えられる。本研究は高感度かつ高フレームレートの Point Grey 社製 Flea3 ビデオカメラと短焦点レンズ (Tokina 12mm F1.4) の組み合わせにより、1 秒間に 60 フレームという時間分解能の向上だけではなく、25 という広い視野を達成できるカメラの試作を行った。これは、GRB の対応天体や重力波イベント等の可視光領域で増減光する天体現象の検出を目的とするものである。これらの目的を達成するためにはビデオカメラを用いた観測をするための環境の整備が必要となる。まず、コマンドライン上で画像を取得できるようにした後、RAW データを解析可能な画像形式 (FITS 形式) に変換するためのスクリプトを作成した。次に、実際の星夜を撮影した画像を解析し、このビデオカメラの限界等級を求めた。その結果、0.1 秒の露出時間で撮影した RAW データを 100 枚積分した画像 (10 秒露出相当) において 3 の限界等級が 9.3 等であった。現在 AROMA-W に同荷し、Swift-BAT の観測可能な視野を追尾している。今回の発表では、Flea3 ビデオカメラを用いた観測環境の整備とその観測性能について報告する。

#### 観測 c16 TES 型 X 線マイクロカロリメータの AC 駆動時のクロストーク減少に向けた研究

前久 景星 (宇宙科学研究所 M1)

我々は次世代 X 線天文衛星、DIOS 衛星に搭載する観測機器の開発を行っている。DIOS はダークバリオンを直接観測し、その空間分布を求めることを目的としている。そのためには数 eV という高いエネルギー分解能を実現できる超伝導遷移端温度計 (TES) を用いた TES マイクロカロリメータ (以下、TES) を  $16 \times 16$  素子ほど並べる必要がある。

TES の信号は超伝導量子干渉計 (SQUID) で読み出し、通常一素子について 8 本の配線が必要となる。TES は  $\sim 100\text{mK}$  で動作させるため、多素子化に伴う読み出し配線群からの熱流入を無視できない。我々のグループでは、複数素子からの信号を 1 つの SQUID で読み出すために、各 TES を異なる周波数 ( $\sim \text{MHz}$ ) の交流で駆動する、周波数分割多重化法の研究を行っている。しかしそれと同時に、高周波数での信号のやりとりは、配線間のクロストークを増加させるという問題がある。

TES は温度計として非常に高い感度を持っているが、感度を持つ温度域が非常に狭いため、動作点を (超伝導) 吸収端中に保たなければならない。これは TES と並列に、TES の動作点抵抗 ( $\sim 100\text{m}\Omega$ ) より十分小さい抵抗 (シャント抵抗) をつなぎ、擬似的に定電圧バイアスとすることで実現している。そのため TES を駆動させるための配線には他の配線に比べて 1 桁以上大きい電流 ( $\sim \text{mA}$ ) が流れており、この配線によるクロストークが最も大きい。よって TES の性能を落とすことなく、配線電流を小さくすることが求められる。

そこで我々はシャント抵抗をインダクタに変更することでこの問題を解決しようと考えた。新しい駆動回路の設計、シミュレーションを行い、

正しく駆動させるための最適なパラメータを検討している。本講演ではその結果を説明する。

1. K.Sakai. A Frequency-Division Multiplexing Readout System for Large-Format TES X-Ray Microcalorimeter Arrays towards Future Space Missions. PhD thesis, University of Tokyo.

#### 観測 c17 ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置の時刻付け機能の検証

久保田 拓武 (埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M2)

ASTRO-H は、今年度に打ち上げが予定されている X 線天文衛星である。この衛星には Soft X-ray Spectrometer (SXS) と呼ばれる、X 線マイクロカロリメータ検出器が搭載される。この検出器は、入射した光子のエネルギーを吸収体の温度上昇に変換して検出することによって、これまでの標準的な X 線 CCD のおよそ 20 倍以上高い、7eV (FWHM) 以下のエネルギー分解能を実現する。この温度上昇として検出された信号は、アナログ/デジタル変換された後に、デジタル信号処理装置である Pulse Shape Processor (PSP) へと送られている。PSP では入射 X 線のエネルギーや到来時刻などの解析の際に、平均波形との相関をとる最適フィルタ処理を行うことでこれらを決定している。この処理により、波形のサンプリングレートの  $1/16$  の精度で、到来時刻 (波形の立ち上がり時刻) を決定することができる。しかし、X 線入射ピクセルの位置や時刻配信による遅延によって、時刻決定精度に偏りが生じる可能性がある。本講演では、この PSP の時刻決定精度について試験で得られたデータをもとに確認した結果を報告する。我々は、つくば宇宙センターで行われた、一定周期で特性 X 線を照射させる衛星搭載装置を用いた試験で得られたデータを取得した。これらを周期で folding し、立ち上がり立ち下りの時間と delay を測った。この検証の結果、照射周期および GPS 時刻に対する位相が、正確に再現できることを報告する。

#### 観測 c18 宇宙マイクロ波背景放射偏光観測実験 POLARBEAR-2 のためのビームマッパーの開発

濱田 崇穂 (東北大学天文学専攻 M1)

近年の観測によって裏付けられているビッグバン理論は、宇宙を構成する物質の起源を説明した。しかしより精密な観測から、ビッグバン理論だけでは説明できない謎が明らかになった。その謎を解決するため、宇宙の誕生間もない時期に加速膨張を仮定するインフレーション理論が提唱された。

しかし、その実証のための観測は未だ達成されていない。インフレーションが実際に起こっていたとすると、原始重力波が発生し、宇宙初期の光である宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の偏光に B モードと呼ばれる特徴的な偏光パターンを作り出す。このパワースペクトルの強度はインフレーションのモデルに対応している。したがって、B モード偏光パターンを精度良く測定する事で主要なインフレーションモデルに制限を与える事が可能である。

発表者は、この偏光を測定するため、POLARBEAR-2 (PB-2) 実験を行っている。PB-2 は、2015 年からアタカマ高地での観測を開始するプロジェクトである。大きな特徴として、250mK で使用する 7588 個の TES ボロメータによって高い統計感度を得ることができる。また、

95GHz・150GHzの2帯域観測による前景放射除去が可能である。

これらの性能を満たす為には、7588個ある検出器のビーム形状の歪みを抑制しなければならない。発表者はこれらのビームの評価が可能なビームマッパーの開発を行っている。このビームマッパーには、以下の条件が求められる。

2つの偏光方向に対する同時測定の実現

95GHz・150GHzの同時測定の実現

安定的な長時間測定の実現

これらの測定によって得られた情報を組み合わせることで、より精度良く検出器を評価できる。こうして評価された検出器を用いることで、インフレーションモデルに制限を与えられる。

本発表では、PB-2実験の概要とこれまでに発表者が行ったビームマッパーの開発および評価について紹介する。

.....

# 全体企画

---

小野寺 仁人 氏 (チューリッヒ工科大学)  
小麥 真也 氏 (工学院大学 / 国立天文台チリ観測所)  
麻生 有佑 氏 (東京大学 / 国立天文台ハワイ観測所)

7月29日 11:30 - 12:40 B会場

## 「海外での研究生活」

皆さんは将来の進路をどのように思い描いているでしょうか？近年は研究者を志す学生の進路として、海外でのポストというのはかなり現実的な選択肢としてあるのではないかと思います。一方で、日本で学生生活を送っていると、海外で研究をしている方の話を直接聞く機会はあまりないかもしれません。「海外に出ることに興味はあるけど、どんな生活になるかわからないしちょっと不安...」なんて思ったりしてしまいますよね。今回は3人の海外での研究経験のある講師の方々をお呼びして、ざっくばらんにお話を聞く機会を設けました。ヨーロッパ・南米・ハワイと場所も様々、身分も院生から研究員の方までいらっしゃいますので、さまざまな視点から経験談を伺うことができると思います。海外での生活ってどんな感じ？キャリアパスとして海外PDをとることはどうなの？メリット・デメリットは？苦労した点は？講師の方々にさまざまな疑問をぶつけてみましょう。

---