

2013 年度 第 43 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

次世代観測に備えた重力理論・宇宙論研究の最先端

日時	7月29日 17:00 - 19:00 7月30日 9:00 - 11:15, 16:00 - 17:00 (招待講演: 黒柳 幸子 氏) 7月31日 11:30 - 12:30 (招待講演: 大内 正己 氏), 16:00 - 19:00 8月1日 11:30 - 13:30
招待講師	黒柳 幸子 氏 (東京理科大学) 「重力波で探る初期宇宙」 大内 正己 氏 (東京大学) 「銀河形成と宇宙再電離が織りなす初期の宇宙進化」
座長	山田 慧生 (弘前大学 D2)、岡 アキラ (東京大学 D1)、島袋 隼士 (名古屋大学 D1)、 根岸 宏行 (大阪市立大学 D1)、久木田 真吾 (名古屋大学 M2)、嵯峨 承平 (名古屋大学 M2)、 多田 祐一郎 (東京大学 M2)
概要	<p>我々の宇宙は一体どのようにして生まれ、どのような進化を経て、どのように終焉を迎えるだろうか？これら人類の普遍的な問いに対し、重力理論・宇宙論の発展は着実にその答えを明らかにしつつある。宇宙が初期にインフレーションを経験し、ビッグバン期を経て、大規模構造等の天体を形成したとするシナリオはCMB等の数々の観測から強く支持されている。一方で、現在の宇宙の加速膨張やインフレーションの機構、宇宙再電離等の未解決問題も多く残されている。これらの問題に対し、修正重力理論やより精密な理論テンプレートの構築・数値シミュレーションを用いた研究等が盛んに行われている。これら理論の発展と将来の21cm線電波観測、CMB偏光観測等の観測の発展により、我々の宇宙に対する理解は飛躍的に深まるだろう。Einstein重力は宇宙論に限らず、天体物理や力の統一理論等の様々な分野に登場する。Einstein重力ではブラックホール、重力波は多くの天体現象を説明するために必要だが、未だこれらの直接的証拠はない。現在その検証に関する実験・観測はKAGRAに代表されるように着々と進行しており、これらの結果を前にEinstein重力における基礎研究の重要性はますます高まっている。これらの現状を踏まえ、本分科会では重力理論・宇宙論の各分野から講師を招待し、研究分野の最新の研究結果についての講演を予定している。また、広く重力理論・宇宙論に関心のある学生を募り、各自の研究や勉学の成果発表と議論を行う。本分科会が今後の重力理論・宇宙論の発展を担う我々若手研究者間の活発な交流の場となり、新たな研究視点を見出す契機となることを願う。</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>

黒柳 幸子 氏 (東京理科大学)

7月30日 16:00 - 17:00 B(エメラルド)

## 「重力波で探る初期宇宙」

日本の KAGRA を初めとする世界各地の次世代のレーザー干渉計重力波検出器が数年後の稼働を予定している今、これまで長年に渡って待ち望まれてきた重力波の初検出がいよいよ現実味を帯びてきている。重力波実験において、まず検出が期待されるのは天体現象を起源とする重力波であるが、重力波は宇宙論の検証においても非常に有用でユニークな観測手段となる。その強みは何と言っても透過性の強さにあり、電磁波と違って宇宙の晴れ上がり以前も物質との相互作用が弱い重力波は、CMB 以前の極初期宇宙の情報を直接我々に届けてくれる。将来的に eLISA や DECIGO といった宇宙衛星を用いた超高感度の重力波干渉計が実現すれば、重力波実験の宇宙論への応用の幅は大きく広がる。本講演では、新たな宇宙観測の窓として重力波検出実験が初期宇宙に関してどのような情報を提供してくれるのかを紹介し、さらに CMB を初めとする宇宙論的観測と組み合わせることで新しく探れる物理について展望を述べる。

大内 正己 氏 (東京大学)

7月31日 11:30 - 12:30 B(エメラルド)

## 「銀河形成と宇宙再電離が織りなす初期の宇宙進化」

赤方偏移  $z = 1100$  の晴れ上がり後、主に中性水素ガスに満たされた宇宙は暗黒時代を迎えた。一方で、QSO に現れる吸収線を用いて現在の宇宙を調べると銀河間の水素ガスはほぼ電離していることが分かっている。つまり、 $z = 1100$  で一旦中性になった水素が宇宙史のどこかの時点で電離されたことになる。これが宇宙再電離である。宇宙再電離の原因は未だ明らかになっていないが、第一世代星・銀河とそれに続く銀河形成がもたらす大量の紫外線が再電離を引き起こしたと考えられている。一方で、再電離された空間においては強い紫外線背景光があるため、ハロー内のガスが加熱され矮小銀河の形成が阻害される。このように宇宙再電離と銀河形成は強く結びついているため、これらを同時に理解しなくてはならない。QSO の Gunn-Peterson テストや CMB の偏光観測から水素の宇宙再電離は赤方偏移 6-11 程度の比較的初期の宇宙に起こったことが分かっている。しかし、宇宙再電離に関する本質的理解は殆ど進んでいない。例えば、宇宙再電離が比較的短時間で終了する sharp reionization だったのかその逆の extended reionization だったのかといった問題、さらには宇宙再電離の根本的な問題である電離プロセス（大規模構造の中での電離の伝播）に至っては、未だ解決の糸口は見つかっていない。

本講演では、銀河形成を含めて複眼的に宇宙再電離の問題を議論する。その上で未解決の課題を提示し、次世代の 21cm 輝線や CMB 偏光、可視光-近赤外線観測で明らかにされる事柄を概観する。特に、日本の研究者が主導し来春から大規模観測が予定されている可視光超広視野カメラすばる Hyper Suprime-Cam 探査と関連する大規模数値シミュレーションについて詳しく話し、今後進展が期待される初期の宇宙進化の研究について紹介する。

**重宇 01a 宇宙背景放射と銀河形成**  
(J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S のレビュー)  
篠田 智大 (大阪大学 M1)

宇宙を支配する非相対論的成分がバリオンであると仮定した場合、ジーンズスケールの見積もりから、放射優勢期では銀河スケールのゆらぎは音響振動をして成長できないが、物質優勢期には銀河の形成が可能となる。しかし、放射優勢期から物質優勢期へ遷移する際に、光子が脱結合していく過程において、バリオンは光子と相互作用することで、光子の拡散スケール以下ではゆらぎがならされてしまうという現象が起こる。この現象は拡散減衰(またはシルク減衰)と呼ばれる。この現象によって、銀河スケールのバリオンのゆらぎはほとんど消え去ってしまう。このように、バリオン宇宙において銀河スケールの構造を形成することが困難になってしまう。このためシルク減衰は、光子と相互作用しないバリオン以外の物質、ダークマターの存在を予言する。また、最近発表された Planck の CMB 観測結果から、宇宙論パラメータを決めるためには、シルクスケールの見積もりが重要な役割を果たすと考えられる。

1. J.Silk. 1968ApJ, 151, 459S
2. C.W.Misner and D.H.Sharp. 1965, Phys. Letters. 15, 279

**重宇 02a 自己相似な重力凝縮による銀河・銀河団形成**  
辻 雄介 (大阪大学 M1)

本講演では W. H. Press と P. Schechter の論文 (ApJ, 187: 425-438) についてのレビューを行い、今後の研究計画についても触れていく。宇宙の進化により、銀河や銀河団がどれくらいの量だけ形成されるかは重要な問題である。ところが銀河団スケール以下の天体の形成には非線形成長が本質的であるため、解析的取り扱いの簡単な線形理論だけでこれを見積もることはできない。線形理論と非線形モデルを巧みに組合せることによって見積もろうとする試みが Press-Schechter 理論である。今後の展望として、Press-Schechter 理論は次世代観測や修正重力理論にも幅広く応用することが可能である。修正重力理論によって作り出されるボイド数を修正 Press-Schechter 質量関数によって予測し、次世代の弱重力レンズ効果の観測を想定した場合、修正重力理論をどの程度制限できるかを調べていきたい。

1. W.H. Press and P.Schechter. 1974. ApJ, 187: 425-438
2. Y.Higuchi, M.Oguri and T.Hamana. 2013. MNRAS accepted, arXiv: 1211.5966
3. B.Li, G.B.Zhao and K.Koyama. 2012. MNRAS, 421: 3481-3487

**重宇 03a 初期磁場による構造形成モデル**  
渋谷 雄希 (名古屋大学 M2)

宇宙空間には星や銀河、銀河団などの様々なスケールにおいて磁場が存在する。磁場は宇宙の構造形成において大きな影響を及ぼしていると考えられているが、その詳細は未だに十分な理解がなされていない。本研究では球対称崩壊モデルにローレンツ力を取り入れ、宇宙論的な磁場

を含めた構造形成モデルを構築した。さらに、先行研究 [3] に基づいて初期磁場による構造形成について計算を行った。このモデルから求められる臨界過密度  $\delta_c$  とパワースペクトルを用いて、Press-Schechter 質量関数を計算した。その結果、初期磁場による構造形成モデルでは重力のみによる構造形成モデルよりも  $\delta_c$  が増大し、質量関数において大スケールでの構造の形成を抑制することがわかった。このモデルをさらに発展させ、Sunyaev-Zel'dovich 効果や cosmic shear の観測を組み合わせることで、宇宙磁場の起源に対してより強い制限を与えることができると期待される [1]。

1. Fedeli C., Moscardini L., 2012, JCAP
2. Gopal R., Roychowdhury S., 2010, JCAP
3. Tashiro H., Sugiyama N., 2011, MNRAS

**重宇 04a ハローの力学的性質を考慮した非線形摂動論の拡張**

櫻井 祐也 (東京大学 M1)

宇宙の大規模構造から宇宙に関する情報を取り出すためには、大規模構造を特徴付ける統計量の精密な理論テンプレートが必要である。さらに、大規模構造は直接観測できず、銀河などのトレーサーを用いて間接的に観測しなければならない。そのため、理論と観測を比較する際には、密度ゆらぎの重力進化、赤方偏移変形、銀河バイアスの3つの効果を取り入れたモデルが必要である。この3つを整合的に計算することのできる統合摂動論を用いれば、観測量を直接得ることができる。しかし、銀河の力学的な性質を無視できなくなるような非線形性が強い小スケール領域では、統合摂動論は破綻する。一方、ハローモデルは小スケールで密度ゆらぎの統計分布を与える現象論モデルで、摂動論の破綻するような小スケールでも適用出来る。ただし、観測量を直接得ることはできない。そこで、本研究では、この統合摂動論とハローモデルを組み合わせることで、小スケールまで観測量を直接・精密に予言することのできるモデルを構築する。

1. T. Matsubara (2011). *Phys.Rev.D*, 83, 083518
2. C. Hikage and K.Yamamoto (2013). *arXiv:1303.3380v1*

**重宇 05a Sub Halo abundance matting を用いた Subhalo-銀河関係の考察**

山本 幹人 (名古屋大学 M1)

SubHalo Abundance Matching (SHAM) は、バリオンなしの N 体シミュレーションから銀河カタログを得る解析手法である。SHAM はフィッティングパラメータの少ない、シンプルなモデルではあるが、観測とよく合致する結果を得られることが確認されている [3]。本講演では主として “Modeling color-dependent galaxy clustering in cosmological simulations” [1] をレビューする。この研究では、WMAP のデータを用いた DM シミュレーション結果の解析として、Subhalo の年齢 (Subhalo age) を取り入れた SHAM を行った結果、Slone Digital Sky Survey (SDSS) にて得られた観測結果 [2] とよく合致する色ごとの銀河カタログを得ることができた。また、フィッティングの結果、観測された銀河がおおよそどれほどの年齢であるかを推定できた。本講演の

最後には、レビューの結果を踏まえ、SHAM の手法をどのように活用・発展させるのかを議論する。

1. Masaki et al. 2013. arXiv:1301.1217v1 [astro-ph.CO]
2. Zehavi et al. 2011. ApJ,736,59
3. Conroy et al. 2006. ApJ,647,201

## 重宇 06a Mixed Dark Matter and Substructure Problem

原田 了 (東京大学 M1)

構造形成の理論は密度などの平均からのずれの量 (密度ゆらぎなど) を線型化したものについては解析的に取り扱えて比較的良好にわかっている [1] が、ゆらぎが大きくなって線型化した取り扱いができない場合はシミュレーションなどを用いることになる。しかしながら、現在標準的な仮定である  $\Lambda$ CDM モデルにおけるシミュレーションでは、小スケールの構造について累積回転速度関数や質量関数を考えると、観測から得られるものと食い違ってしまうという Substructure 問題が指摘されている [2]。それに対する解の一つとして Warm Dark Matter [3] モデルが提案されている。本講演ではその拡張として Mixed Dark Matter (Cold + Warm Dark Matter) モデルを取り上げ、シミュレーションを実行して Substructure 問題の解として妥当なのは Dark Matter 全体に対して Warm Dark Matter が何割の場合なのかを議論する。

1. 松原隆彦.2010. 「現代宇宙論 時空と物質の共進化」(東京大学出版会)
2. Kravtsov, A. 2010, Advances in Astronomy, 2010,
3. Bode, P., Ostriker, J. P., & Turok, N. 2001, ApJ, 556, 93

## 重宇 07b 弱い重力レンズ効果を用いた 2 点相関関数の解析

小島 由嗣 (弘前大学 M1)

我々が住んでいるこの宇宙はクォークなどの素粒子や我々生命体等の小さなスケールから、銀河や銀河団の巨大なスケールに至るまで、様々なスケールに渡る階層に構造が存在している。これらの構造は宇宙が進化していく過程で形成されたと考えられている。もし、宇宙の初期が全くの均一であったなら、我々は存在してなかっただろう。なぜなら、今日の構造ができるためには、なんらかの非一様性が初期に必要なからである。初期の段階で宇宙の密度の空間分布に少しでもゆらぎがあるとシナリオは、現在の宇宙論では、最も自然なシナリオである。このシナリオが現在の宇宙で正しいか否かを決めるには、観測事実と矛盾がないかどうかをチェックしなければならない。そこですばる望遠鏡を用いた HSC 計画に向けてシミュレーションをし、そのデータを解析した。

今年度から試験運用が始まっている HSC 計画は今後 5 年間で従来の望遠鏡の Suprime-Cam に比較して 7 倍の観測視野、カメラ部には計 8 億 7000 万画素の巨大なデジタルカメラ HSC(Hyper Suprime-Cam) をすばる望遠鏡に設置し大規模な銀河サーベイをする。主な目的は、弱い重力レンズを用いてダークマター分布やダークエネルギーの性質を直接調べるといったものである。

重力レンズとは強い重力レンズ (strong gravitational lens) ・弱い重力レンズ (weak gravitational lens) ・重力マイクロレンズ (microlensing

effect) の 3 つに分類される。そのうち本研究で用いた弱い重力レンズは、銀河 (光源) のゆがみを測定する。本来の銀河の形はわからないが、1 個の銀河を観測しただけでは重力レンズ効果による変形度合いを抜き出すことはできない。そこで今、光源が遠方の銀河にあり、レンズとなる手前の 3 次元密度ゆらぎ、観測量を遠方銀河の形のゆがみを考える。私はこの状況下で銀河の形のゆがみ (コンバージェンス) のパワースペクトルと 2 点相関をシミュレーションデータから調べた。なおコンバージェンスとは銀河のゆがみの程度を表す。

本研究では以下の式を用いて 2 点相関関数  $w(\theta)$  を求めた。ここで  $l$  は多重極モーメント、 $C_l$  は角度パワースペクトル、 $P_l(\cos \theta)$  はルジャンドル多項式である。

$$w(\theta) = \sum_{l=0}^{\infty} \frac{2l+1}{4\pi} C_l P_l(\cos \theta)$$

計算の結果、シミュレーションの値と theoretical-model を比較してみると一致した。これから観測事実と矛盾がなくシミュレーションに用いた値が正しいことがわかり 2 次元球面のデータを正しく解析することに成功した。}

1. L.Fu et al.2008,A&A,479,9 Very Weak lensing in the CFHTLS wide:cosmology from cosmis shear in the linear regime

## 重宇 08b 弱い重力レンズ効果による相関関数の計算

伊勢田 竜也 (弘前大学 M1)

天体などから放出された光は、我々のところへ届くまでに途中にある天体などの重力によってその進路が曲げられ、天体の像を歪ませたり、光が集まるため増光する。これを重力レンズ効果と呼ぶ。重力レンズ現象には 2 種類あり、強い重力レンズ (strong gravitational lens) と、弱い重力レンズ (weak gravitational lens) とに分けられる。強い重力レンズ効果は、天体像が 2 つ以上の像に分離して見えたり、あるいは像が変形しているのをはっきりと識別できるなど、個々の天体像のレンズ効果が明らかかな場合を指す。それに対し、弱い重力レンズ効果は像の歪みや増光はわずかなので、1 つの光源天体を調べても本来持っている明るさや形と区別することはできない。だが、光源天体固有の形やその向きなどの特徴は、多数の天体を平均化することで小さくできる。重力レンズ効果は光源に対して系統的に作用するため、多数の銀河で平均してもその効果が消えることがない。光源天体の手前にある構造が弱い重力レンズ効果を生むことで、複数の光源天体が同じ方向に歪んで見え、また全体的に見かけの明るさが変化する。

ここで本研究に関わりのある HSC 計画について述べる。HSC 計画とは HSC(Hyper Suprime-Cam) を搭載しているすばる望遠鏡を用いた大規模銀河サーベイの計画である。今年度から試験観測を始めており、今後 5 年間で 1500 平方度の面積を観測する。主な目的は、遠方銀河の弱い重力レンズサーベイからダークマターやダークエネルギーの性質を探ることである。

本研究では、HSC 計画へ向けて国立天文台の浜名さんが作成したシミュレーションを用いた。そのシミュレーションは光源を遠方銀河、レンズを手前の 3 次元密度ゆらぎ、観測量を銀河の形の歪み (コンバージェンス) として作成したものである。それを使い、弱い重力レンズ効果によるコンバージェンス  $\kappa$  の 2 点相関関数を計算した。その関数は、観測者を中心に極座標  $(\theta, \phi)$  をとるとき

$$w(\theta_{12}) = \langle \kappa(\theta_1, \phi_1) \kappa(\theta_2, \phi_2) \rangle$$

で表されるものである。ここで  $\theta_{12}$  は天球面上の 2 点  $(\theta_1, \phi_1), (\theta_2, \phi_2)$  の間の角度である。

計算の結果,theoretical model とよく一致していると言える。

1. L.Fu et al. 2008. ,A&A,479,9  
Very Weak lensing in the CFHTLS wide:cosmology from cosmic shear in the linear regime

**重宇 09b すばる HSC サーベイによる暗黒物質モデルの制限に向けたサブハロー質量関数の決定**

黒川 拓真 (東京大学 D1)

現在宇宙論の標準モデルでは、暗黒物質は質量の重い冷たい暗黒物質であると考えられている。しかし標準モデルの予言は大スケールの観測と非常に良く一致する一方で、小スケールにおいては観測との不一致が指摘されている。この問題を冷たい暗黒物質よりも質量の軽い暗黒物質で解決しようとする試みも行われており、暗黒物質が本当に冷たい暗黒物質かどうかは未だ決着していない問題である。

そこで暗黒物質質量に対する新たな制限として、サブハロー質量関数が有効である。サブハロー質量関数はすばる望遠鏡 Hyper Suprime-Cam(HSC) による重力レンズ観測によって正確な測定が期待され、重力レンズという理論的な不定性の少ない手法を用いて測定できるためである。

本研究ではこれに対する理論予言として複数の質量の暗黒物質モデルに対して N 体シミュレーションを行い、サブハロー質量関数を求めた。その結果、HSC によって暗黒物質の質量に対して新たな制限が得られることを示した。

1. N. Okabe, T. Futamase, M. Kajisawa and R. Kuroshima. 2013. arXiv:1304.2399 [astro-ph.CO]
2. A. Schneider, R. E. Smith, A. V. Maccio, B. Moore. 2012. MNRAS 424, 684-698

**重宇 10b Bi-Galileon Gravity Theory and Accelerating Solution**

水島 高志 (早稲田大学 M2)

宇宙論の分野において、2 つの時期の加速膨張に関して盛んに議論されている。宇宙初期 (インフレーション) と現在 (ダークエネルギー) である。

これらの宇宙の加速膨張を説明する試みに、Generalized Galileon Gravity Theory という理論がある。本研究では、まず従来の Generalized Galileon Gravity Theory を拡張し、2 つの独立なスカラー場を考え、宇宙の加速膨張が説明可能かどうか解析した。具体的には、「Inflation Driven by the Galileon Field」 [1] において、安定な加速膨張解があるとわかっている作用を 2 スカラー場に拡張して解析をした。結果として安定な加速膨張解を得ることが出来たが、2 つのスカラー場が相互作用している場合が特に興味深いので、今後も解析を続けていく。特に、高次元理論から導かれる結合定数には制限があるので、得られる理論にどのような特徴が現れるかを解析する。

1. T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. ' i. Yokoyama, Phys. Rev. Lett. 105, 231302 (2010) [arXiv:1008.0603 [hep-th]].

**重宇 11b 主成分分析を用いた修正重力理論への制限**

浅羽 信介 (名古屋大学 M2)

超新星の観測から宇宙は加速膨張をしていることがわかった。しかし、加速膨張の原因については未だわかっていない。加速膨張の理論を決める方法は、銀河分布と重力レンズ効果を観測し宇宙論スケールでの重力テストを行うことである。私は加速膨張の原因として考えられている修正重力理論に対して、欧州で計画されている Euclid[1] という将来の銀河の撮像・分光観測からどの程度制限できるかの予測を行ってきた。本研究では修正重力の理論モデルを仮定せずに、主成分分析を行い S/N 比の高いモードを求めるという方法を用いた [2]。この方法を用いることで観測情報を損なうことなく効率良く解析をすることができる。また、修正重力理論を制限する上で、赤方偏移変形 [3] の重要性を定量的に示した。

1. Amendola, L., Appleby, S., Bacon, D., et al. 2012, arXiv:1206.1225
2. A., Zhao, G.-B., Pogosian, L., et al. 2012, Phys. Rev. D, 85, 043508
3. Kaiser, N. 1987, MNRAS, 227, 1

**重宇 12a Wave optics and image formation in gravitational lensing**

長谷川 創一 (大阪市立大学 M1)

重力レンズはアインシュタインの一般相対論による予言の一つであり、観測による多くのサンプルが得られている。弱い重力による重力レンズでは、その効果が薄いレンズと同じとする近似により光線の経路がレンズ方程式に従うものとして扱われる。しかし、光の波長が重力源となる物体のサイズよりも十分に小さくない場合には経路だけでなく波自体への効果も重要になる。重力源となる物体による散乱波に対して Fresnel-Kilchihoff の回折定理を用いることによってレンズ方程式を使うことなく光の波動関数から直接的に光源の像を得ることができる。この発表は Yasusada.Nambu の論文、Wave optics and image formation in gravitational lensing の review である。

1. Yasusada Nambu,Wave optics and image formation in gravitational lensing arXiv:1207.6846v1 [gr-qc] 30 Jul 2012
2. Sharma K K, Optics: principles and applications (Academic Press, 2006)

**重宇 13a 距離の逆 n 乗項をもつ一般化した静的球対称計量から求める重力レンズの曲がり角**

中島 昂己 (弘前大学 M2)

私は北村隆雄氏と浅田秀樹氏との共同研究である、距離依存性について

て一般化された弱場の静的球対称時空における光の曲がり角について議論する [1]。近年重力マイクロレンズ観測による「負質量」のエキゾチック物質で構成される Eliss ワームホールの探査法が提案された。理論的にその存在が提案されているのみだったエキゾチック物質の存在を検証することは宇宙の構成要素を解明する上でも重要である。そのためにエキゾチック物質が起こす現象について理論予測を行うことは重要であり、重力レンズの基本的な物理量として光の曲がり角が必要である。

そこで我々は重力レンズによる光の曲がり角において、代表的な時空である Schwarzschild ブラックホール (SBH) と Ellis ワームホール (EWH) における光とレンズ天体との距離  $r$  の次数 (距離依存性) がそれぞれ  $1/r$ ,  $1/r^2$  と異なることから、球対称かつ弱重力場な時空において  $r$  の逆  $n$  乗項 ( $n$  は正の実数) によって時空構造が表されるより一般化された光の曲がり角を導出した。この距離依存性についてより一般化された光の曲がり角によって、SBH や EWH などの既に知られている球対称時空の曲がり角を再現することが可能になったと共に、光の曲がり角についてより一般的な議論が可能になった。

1. T. Kitamura, K. Nakajima, and H. Asada, Phys. Rev. D 87, 027501(2013).

### 重宇 14a 重力レンズを用いたエキゾチック物質及びエネルギーの探査法

北村 隆雄 (弘前大学 D1)

現在、重力レンズを用いた天体探査が盛んに行われている。本研究では重力レンズの中でも重力マイクロレンズについて特に議論する。重力マイクロレンズは、通常増光現象しか起こらない (増光率  $A \geq 1$ ) とされていたが、2010 年に、重力マイクロレンズにおいて、エキゾチックなレンズ天体であるエリスワームホールの場合、光源が減光して観測される場合がある事が発見された [1][2]。そこで我々は、レンズ天体がエキゾチックな場合の重力マイクロレンズについてより一般的に議論するために、計量が距離の逆  $n$  べき乗の項を持つような修正時空を仮定し、その時空での光の曲がり角及び増光率について、解析的及び数値的に調べた。この時空は、 $n = 1$  の時シュバルツシルト時空、 $n = 2$  の時エリスワームホール時空を再現する。その結果、減光の起こりうる条件が、光源の位置を  $\beta$  として、 $\beta > 2/(n-1)$  であるという事が、近似的にわかった。さらに数値計算によって様々な  $n$  について光度曲線を得た [3]。これによって、 $n = 2$  (エリスワームホール時空) の場合以外でも減光する可能性があることがわかった。この結果を用いれば、エリスワームホール時空の場合だけでなく、一般的にエキゾチック物質及びエネルギーについて議論することが可能で、エキゾチック天体探査の一助となると考えられる。

1. T.K. and K. Nakajima and H. Asada 2013. Phys. Rev. D 87, 027501
2. Fumio Abe 2010. Astrophysical Journal 725. 787
3. Yukiharu Toki. and Takao Kitamura. and Hideki Asada. and Fumio Abe 2011. Astrophysical Journal 740. 121

### 重宇 15a エキゾチックな物質・エネルギーによる重力レンズの像の歪み

泉 洸次 (弘前大学 D2)

この収録では、シュバルツシルト、またはエリスワームホール等のエキゾチックな物質・エネルギーを持つ天体・時空構造を含んだ、一般的な計量により生ずる重力レンズと、負の質量を持った天体のように光を斥ける重力レンズによる像の歪みを議論した。

結果、上記の一般的な重力レンズでは像は方位角方向 (tangential) に、負の質量等による重力レンズでは像は動径方向 (radial) に、それぞれ歪むことが判明した。

1. F.Abe. 2010. Astrophys.J.725, 787 (2010).
2. T.Kitamura et all. 2010. Phys. Rev. D 87, 027501 (2013).
3. K.Izumi et all. arXiv.1305.5037

### 重宇 16a bi-gravity から予言される重力波振動

小幡 一平 (京都大学 M1)

本発表は以下の論文のレビューである。この論文では ghost-free な bi-gravity 理論に基づき、そこからどのような重力波振動が生じるのかを実際の観測に絡めて議論している。元来この理論からは一般相対論 (以下、GR と略称) が予言する場合にとても似た宇宙論的解を導くことができ、宇宙論的背景を説明する自然なモデルにもなっている。そして massive なグラビトンによる重力波振動は GR が予言するものとは大きく異なることがわかり、その振動が KAGRA や LIGO、Virgo や GEO の検出の対象になると期待される。

1. Antonio De Felice, Takashi Nakamura, and Takahiro Tanaka. April 16, 2013. Phys.Rev

### 重宇 17a 重力波地上観測の chirp time(合体までの時間)

若松 剛司 (新潟大学 M1)

重力波は間接的には存在を証明されているが、今だ直接観測されていない。では、直接観測されると何がわかるのか?例えば連星中性子星が接近し合体するまでの時間で重力波が検出された場合を考えてみる。まず、軌道周期と軌道周期の変化率から chirp mass と呼ばれる連星の質量に関係する量が決り、観測された振幅から重力波源までの距離が決る。この距離の決定は天文学的な距離の決定とは独立である。宇宙物理学では天文学の対象までの距離がわかることは重要である。

重力波は時空の動的な揺らぎを表している。4重極式で表現でき、重力波源のエネルギー放出率が導き出せる。重力波の物理を解いて、様子を詳しく記述することは重力波データ解析のテンプレートを作る上で重要な意味を持つ。連星系は重力波のエネルギー損失があるので、軌道は縮小し、最後には合体する。それでは、合体するまでの時間は観測とどのような関係があるのか?重力波を観測する場合、横軸は時間スケールとなる。合体するまでの時間は連星系の初期半径、質量、離心率に依存しているが、ここでは連星の合体するまで



の時間 chirp time( $t_c$ ) を観測するまでに要するとして、まずは 1yr を基準と考え、地上で観測できる範囲を重ね、観測時間のオーダーを示し、そして、その考察を考える。これは、B.S. Sathyaprakash, Bernard F. Schutz, “Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves”, Living Reviews in Relativity, 12, lrr-2009-2, (2009) のレビューである。

1. 重力波をとらえる 存在の証明から検出へ 著者中村 卓史 and 著者大橋 正健 and 著者三尾 典克 (1998). 発行元 京都大学学術出版会
2. B.S. Sathyaprakash, Bernard F. Schutz “Physics, Astrophysics and Cosmology with Gravitational Waves”, Living Rev. Relativity, 12, lrr-2009-2, (2009)

**重宇 18a NLSM に従うスカラー場から放出される重力波**

堀口 晃一郎 (名古屋大学 M1)

宇宙初期に起きた宇宙の加速度的膨張であるインフレーションの証拠の一つとして scale invariant な重力波があげられる。しかし、実際にはインフレーション以外にも scale invariant な重力波を放出する過程がある。この研究のモチベーションは scale invariant な重力波がインフレーションによるものかそれ以外によるものかを区別するというものである。インフレーション由来の重力波は、インフレーションが空間の歪みを引き延ばしたものである。別の過程で scale invariant な重力波が放出される現象としては、一様等方な宇宙で Non Linear Sigma Model(NLSM) に従う N 個のスカラー場の dynamics が挙げられる。NLSM とはスカラー場の数 N が十分大きい場合に、相転移を起こし真空中に落ちた後の場の運動を記述するモデルである。NLSM ではスカラー場がホライズンに入ると field space 上で配位をそろえ始める。その過程で各時刻のホライズンスケールに対応する波数の重力波を放出する。本研究では NLSM に従うスカラー場と、それに伴って放出される重力波の特性を調べた。結果として NLSM に従うスカラー場が放出する重力波のスペクトルを得た。また NLSM は場の数 N が十分大きいときに正確なモデルなので、場の数が有限の場合についてはスカラー場の dynamics をシミュレーションして場の振る舞いを確かめた。これにより場の数が少ない場合でも NLSM の特性は失われず、さらに場の数が少ない場合の重力波のスペクトルも NLSM の重力波に対して定数倍の関係になることがわかった。

1. E.Fenu, D.Figueroa, R.Durrer, J.Garcia-Bellido, JCAP 10 005 (2009); arXiv:0908.0425
2. L.M.Krauss, K.Jones-Smith, H.Mathur, J.Dent, PhysRevD. 82. 044001 (2010); arXiv1003.1735

**重宇 19a 21-cm 線の重力レンズ効果を用いた原始重力波の検出**

橋本 一彦 (京都大学 M1)

インフレーション理論は、インフレーションにより原始重力波

(IGW: Inflationary Gravitational-Wave) が発生することを予言している。インフレーションの発生機構に関しては様々なモデルが提唱されているが、IGW を検出することができればそれらのモデルに制限を加える可能性があり、大変注目されている。現在、宇宙背景放射 (CMB) の B モード偏光を用いてこの IGW の検出を目指す研究が進んでいるものの、そもそもこの方法では IGW を検出できるほどの感度がない可能性がある。21cm 線の IGW による重力レンズ効果を用いれば、上の方法ではノイズに埋もれてしまうような弱い IGW のシグナルであっても、原理的には検出可能であることが指摘されている。本講演ではこの手法について紹介する。

1. Laura Book, Mark Kamionkowski and Fabian Schmidt, Phys.Rev. Lett.108, 211301 (2011)
2. L.G.Book, M.Kamionkowski and T.Souradeep, Phys.Rev. D, in press (2011)

**重宇 20a CMB と 21cm 線が再電離パラメーターに与える制限について**

星野 華子 (名古屋大学 M1)

本発表では CMB と 21cm 線が再電離を記述するパラメーターに与える制限について 2 本の論文 ([1], [2]) を読み、レビューする。再電離とは水素原子が非一様に電離されていく過程であり、再電離期の光学的厚みは方向に依存するものとなる。光学的厚みが揺らぐことにより CMB がいくつかのメカニズムを通して偏光する。ここでは CMB の揺らぎを作るシグナルの中で再電離によるものだけを取り出すことを考える。それを用いて偏光のパワースペクトルから光学的厚みを見積もる。また、再電離期まで存在していた中性水素が要因となって放射される 21cm 線電波があるが、21cm 線と CMB を組み合わせることにより、CMB 単独の場合より再電離を記述するパラメーターに強い制限を与えることが分かっている。ここでは再電離の進みの様子が光学的厚みによってどのように変わるかを調べた。その結果、光学的厚みが小さいほど再電離が緩やかに進むということがわかった。

1. C. Dvorkin and K. M. Smith, Phys.Rev. D79, 043003 (2009), 0812.1566
2. P. D. Meerburg, C. Dvorkin, and D. N. Spergel, 2013, 1303.3887
3. J. R. Pritchard and Abraham Loeb, 2012, 1109.6012v2

**重宇 21a High-z QSOs の性質から探る宇宙再電離**

尾上 匡房 (総合研究大学院大学 M1)

Quasar (QSO) は活動銀河核の一種であり、中心の大質量ブラックホールからの強い放射により輝く非常に明るい天体である。また、スペクトルを見るとそれより前に存在する IGM の物理状態を調べることができるので、quasar は遠方の宇宙を探る上で非常に大事なツールになっている。近年の SDSS に代表される観測による  $z > 6$  quasar の発見から  $z \sim 6$  の前後で宇宙空間の中性水素の割合が大きく変化したことがわかり、宇宙再電離がいつ完了したのかについて重要な示唆を与えた。今回の発表では high-z quasar の性質 [1]、現在見つかった最遠方の  $z \sim 7$  の quasar [2]、そしてそこから推定される宇宙再電離の描像

[3]について述べ、さらに来年から始まる HSC survey における high-z quasar の研究計画についても言及する。

1. Xiahoui Fan 2006. *New Astron. Rev.* 50:665-671
2. Daniel J. Mortlock et al. 2011. *Nature* vol.474:616-619
3. Xiahoui Fan, C.L. Carilli and B. Keating 2006. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 44:415-62

**重宇 22a Inflation model による CMB 温度ゆらぎの理論値の補正**

鈴木 亨昇 (名古屋大学 M1)

inflation 理論は標準宇宙モデルの抱える問題を解決する有力な理論であると考えられており、様々なモデルが提案されている。また、inflation 時に生成された初期ゆらぎはその後の構造形成の種になると考えられている。inflation 時に、ホライズンの中では量子的なゆらぎだったが、inflation による加速膨張によりゆらぎがホライズンの外に出ると、古典化し凍結する。その後ホライズンが拡大し凍結したゆらぎが再びホライズンの内側に入ると、凍結したゆらぎは宇宙の密度ゆらぎの初期条件となる。

また、観測できる最も古い電磁波である Cosmic Microwave Background (CMB) は初期の宇宙の情報と伝搬した経路の情報を含んでおり、その温度ゆらぎを調べる事で宇宙の状況を知る事が出来る。しかし、現在考えられている CMB の温度ゆらぎの理論値と観測値の間には large scale でのずれが存在する。inflation はゆらぎに対する初期条件を与えるため、large scale でのずれを補正するような色々な inflation モデルが考えられている。

本発表では、そのずれの補正を目的としたいくつかの inflation モデルについてレビューした。その中の一例として [1] をレビューする。[1] は inflation 前に宇宙が収縮する contracting phase が存在するような bouncing inflation モデルである。この phase は inflation のパワースペクトルの形を変え、CMB の温度ゆらぎの large scale に影響を与える。また、その他のモデルについても考察し、inflation モデルが CMB に与える影響を考える。

1. Z.-G. Liu, Z.-K. Guo and Y.-S. Piao, arXiv:1304.6527 [astro-ph.CO].
2. Y.-S.Piao, B.Feng and X.-m. Zhang, *Phys. Rev. D* **69**, 13520 (2004) [hep-th/0310206].

**重宇 23a k-インフレーションにおける観測的制限**

小林 由規 (東京理科大学 M2)

宇宙は熱い火の玉のような状態から始まったとする標準ビッグバン宇宙論が考えられたが、地平線問題や平坦性問題など多くの問題を抱えていた。これらの問題を解決する為に 1980 年代に宇宙初期に加速膨張期が存在したというインフレーション理論が考えられ、様々な観測からインフレーションの存在を示唆されている。しかし、インフレーションを引き起こす起源は完全に明らかになっていない。インフレーションの起源として考えているものは、スカラー場であり、そのポテンシャルエネルギーによって加速膨張が引き起こされることが標準的なシナリオに

なっている。その一方で、スカラー場が運動エネルギーの非線形項を持つような k-インフレーション模型 [1] でも、加速膨張を起こすことが可能である。

インフレーション中には、量子ゆらぎが急激な膨張により引き延ばされ、それが宇宙背景放射 (CMB) で観測される温度ゆらぎの種となる。Planck の最新の CMB の温度ゆらぎの観測は、インフレーション理論によって予言されるほぼスケール不変な温度ゆらぎのパワースペクトルと整合的である。このパワースペクトルは、インフレーションの模型によって、スケール普遍からのずれの程度が異なる事から、それによって模型の間の選別が可能になる。また、3 点相関関数に関連する曲率ゆらぎの非ガウス性からも、インフレーションの模型に制限を与える事が出来る。非ガウス性は、特に k-インフレーション模型で大きくなりうることから、標準的なスローロールインフレーション模型との区別が可能である。

今回、私は Planck グループ [2] により公表された、CMB の温度ゆらぎの新しい観測データを用いて、k-インフレーション模型の間の選別 [3] を行う。

1. C. Armendariz-Picon, T. Damour and V. F. Mukhanov, *Phys. Lett. B* 458, 209 (1999) [hep-th/9904075].
2. P. A. R. Ade et al. [Planck Collaboration], arXiv:1303.5082 [astro-ph.CO].
3. Shinji Tsujikawa, Junko Ohashi, Sachiko Kuroyanagi, Antonio De Felice, arXiv:1305.3044 [astro-ph.CO]

**重宇 24a Hawking 輻射とブラックホールの蒸発**

山内 健太 (東京理科大学 M1)

J.D.Bekenstein は熱力学でのエントロピー増大の法則との類似から、ブラックホールもエントロピーをもち、その値はブラックホールの表面積に比例するのではないかと考えた。ブラックホールの熱力学系を考えると、温度や内部エネルギー等の熱力学量が定義されなければならない。一般相対性理論ではブラックホールは何も物質を放出せず吸収するだけであり、ブラックホールが温度を持っているとは考えにくい。もしブラックホールが温度を持つならば、ブラックホールから物質へのエネルギーやエントロピーの移動が起こる。これは事象の地平面で囲まれたものがブラックホールであるという定義やブラックホールの面積定理に反する。しかし Hawking はブラックホールの事象の地平面近傍の量子論を考えることによりブラックホールが周りの空間に黒体輻射をすることを示した。座標中心でブラックホールが生成されるとする。その直前に massless 粒子が侵入して中心を通って反対側に抜け無限遠方まで行くとする。この粒子は、場の理論では、クライン-ゴルドン方程式の解が示す量子場として表される。これを解くことによりブラックホールが温度  $\kappa/2\pi$  の黒体輻射をしていることが示される。Schwarzschild ブラックホールの温度は  $T = \frac{hc^3}{8\pi k_B MG}$  となり、これよりブラックホールが蒸発するまでの時間はブラックホールの質量の三乗に比例することが導ける。

1. S.W.Hawking, "Particle Creation By Black Holes". *Commun. Math. Phys.* 43, 199 (1975)
2. S.W.Hawking, "Black hole explosions ?". *Nature* 248,(1974)

.....  
**重宇 25a** Kerr spacetime での scalar 場の不安定性と black-hole bomb の解析

米倉 良一 (大阪市立大学 M1)

Kerr ブラックホールに入射するスカラー場を考えると、反射波はある条件下で、入射波よりも増幅される。この現象は superradiant scattering といい、反射波はブラックホールから回転エネルギーを得る。スカラー場の質量は有効ポテンシャルのように働いて、束縛状態を作り出す。ポテンシャルに跳ね返されて再反射されたスカラー場はブラックホールに入射する。再反射と再入射を繰り返すと、スカラー場は不安定になり、振幅は growth rate を持つようになる。このような現象は black-hole bomb として知られている。

Shahar Hod と Oded Hod は解析手法を用いて、Kerr 時空の元での Klein-Gordon 方程式を調べることで、growth rate を求めた。本発表はこの論文のレビューを行う。

1. Shahar Hod, Oded Hod, arXiv:0910.0734 [gr-qc], Phys. Rev. D 81, 061502 (2010)
2. Dolan, S.R., Phys. Rev. D 76, 084001 (2007)
3. Press, William H.; Teukolsky, Saul A. Nature 238(5368) 211-212 (1972)

.....  
**重宇 26a** Bigravity 理論におけるブラックホール解とエントロピー

桂川 大志 (名古屋大学 M2)

現代の理論物理学の1つの目標として、量子力学と一般相対性理論の統一という問題がある。この問題には、マイクロなスケールでの重力理論が必要となり、この理論は量子重力理論と呼ばれる。

量子重力理論の研究の1つとして、ブラックホールの研究がある。ブラックホールと熱力学の間には対応関係があり、エントロピーという概念が存在するが、このエントロピーの統計的な起源は、超弦理論やループ量子重力理論などの研究から、時空のマイクロな状態数に関係することが知られている。

今回の発表では、Bigravity 理論と呼ばれる重力理論を用いて、ブラックホール解を求め、このブラックホールのエントロピーを評価する。Bigravity 理論とは、2つのテンソル場を含み、massive spin-2 の場と重力の相互作用を記述する理論である。Bigravity 理論の minimal な模型において、2つのテンソル場が比例する場合を調べた結果、静的球対称なブラックホール解を持ち、そのときのエントロピーは、通常の2倍のエントロピーを持つことが分かった。

1. T. Katuragawa and S. Nojiri. 2013. arXiv:1304.3181 [hep-th]

.....  
**重宇 27a** bigravity に対する高次元重力理論の埋め込みによるアプローチ

山下 泰穂 (京都大学 M2)

現在、重力理論そのものを修正する修正重力理論が盛んに研究されている。特に近年、これまでは ghost が現れると考えられていた bigravity と呼ばれる理論において ghost free な action が得られ、多くの研究者から注目されている。しかし、この ghost-free bigravity の特殊な相互作用のみが選ばれる機構は明らかになっていない。本発表は、高次元重力理論の四次元への埋め込みによってこの問題を解決する一つの機構を与えることを目標とし、特に DGP model と呼ばれる高次元モデルを考えることにより bigravity を再現し得ることを示す。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen. 2012. JHEP 1202, 126
2. G. R. Dvali, G. Gabadadze and M. Porrati. 2001. Phys. Lett. B485, 208

.....  
**重宇 28a** Hořava-Lifshitz gravity で考える重力崩壊

池田 大志 (名古屋大学 M1)

Hořava-Lifshitz(HL) 重力理論で星の重力崩壊を考える。[1] 今回考えるのは projectability と任意の結合定数  $\lambda$  を持つ理論である。この理論を持つ対称性は  $U(1)$  と  $Diff(M,F)$  である。はじめに HL 重力の運動方程式と拘束条件を求める。その後球対称な場合に方程式を書き換える。そして星表面での接続 (junction) 条件を一般的な形で導入する。ここでは重力崩壊の計算の際に ill-defined な項が出てこないように各関数の C 級を決定する。その後一様等方な完全流体を用意して重力崩壊を計算する。流体の外部は静的球対称とする。宇宙項  $\Lambda$  と  $\lambda$  の値で場合分けをする。各場合において junction 条件と運動方程式、拘束条件は 6 つの条件にまとめられる。さらに簡単のため、完全流体に圧力がないときを考える。 $\lambda = 1$  の場合のみ拘束条件等が矛盾なく満たされることがわかる。そのとき、外部解は Painlevé-Gullstrand 座標での Schwarzschild (anti)de Sitter 解と一致することが示される。今回使う junction 条件の処方ほほかの重力の理論でも応用することができる。

1. Jared Greenwald, Jonatan Lenells, V.H.Satheeshkumar, Anzhong Wang 2013 arXiv:1304/1167v1[hep-th]
2. P.Hořava, Phys. Rev.D79,084008(2009)

.....  
**重宇 29a** Bigravity 理論における加速膨張宇宙解

岡崎 智久 (京都大学 M1)

本発表では論文 [1] のレビューを行う。観測から現在宇宙は膨張していることが知られている。この事実を説明する試みに、一般相対論に宇宙項を導入する代わりに重力理論そのものを修正しようとするものがある。その一つである ghost-free な bigravity 理論に着目し、可能な宇宙モデルについて述べる。四脚場を用いて理論を定式化し、一様等方な物質分布の下で方程式を解くことで、宇宙論的な解が得られる。この解は graviton の質量に由来する有効的な宇宙項によって加速膨張が起こり、観測結果を自然に説明できる可能性がある。

1. M. S. Volkov, Phys. Rev. D86 (2012) 061502.

**重宇 30a**    bigravity 理論に基づく宇宙論とダークエネルギー問題

青木 勝輝 (早稲田大学 M1)

本研究では bigravity 理論 [1] を用いて、時空がどちらも Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) 計量で表される場合の宇宙論を考える。物質としてはダストを考え、どちらの計量も物質と相互作用する。解析の結果、真空解は最大4つのブランチをもつが、2つの物質の密度比が宇宙が膨張するにつれどの真空解に漸近するかを決定する。また宇宙膨張の途中で特異点をもつような解も発見された。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP 02 (2012) 126.

**重宇 31a**    Lagrange multipliers を用いたスカラー・テンソル理論による宇宙定数問題の理解

小川 達也 (大阪市立大学 M1)

アインシュタインの導入した宇宙項はエネルギー運動量テンソルへの寄与とみなすことができる。この宇宙項から導き出される、真空のエネルギー密度は一定値を持つ。このとき、宇宙定数は空間の持つ体積そのものが持つエネルギー、つまり真空のエネルギーとみなすことができるが、単純に量子場の真空エネルギー密度を宇宙定数の起源であるとする、観測値との間に123桁以上の食い違いが現れてしまう。これが宇宙定数問題である。

この宇宙定数問題を理解するための一つの方法が、Lagrange multipliers を用いたものである。本発表ではこの方法について論じた、Diego Saez-Gomes の論文のレビューを行う。

1. Diego Saez-Gomez arXiv:1110.6033v2 [hep-th] 9 jan 2012
2. S.Nojiri and D.Odintsov, Phys. Rept. 505 59(2011) [arXiv:1011.0544[gr-qc]]
3. 松原隆彦. 2012. 東京大学出版会 「現代宇宙論—時空と物質の共進化」

**重宇 32a**    f(R) 理論における加速膨張を与えるモデルの解析

小川 茂樹 (東京理科大学 M1)

Ia 型超新星の観測によって、現在の宇宙は加速膨張をしていることが分かった。この加速膨張の源は暗黒エネルギーと呼ばれている。暗黒エネルギーの起源を解明するために様々なモデルが提唱されている。その一つとして、長距離において重力理論が一般相対性理論から変更される修正重力理論がある。その代表的な例としては、Lagrangian がスカラー曲率 R の非線形関数で与えられる f(R) 理論、スカラー場が曲率と直接結合をもつような Brans-Dicke 理論などがある。

今回の研究では f(R) 理論における暗黒エネルギーのモデルを考える。これが満たすべき条件を無次元量を導入し、それらの固定点の安定性から導出する。その後具体的なモデルを考えそれらが条件を満たす有効な f(R) モデルかを調べた。

1. Antonio De Felice and Shinji Tsujikawa, Living Rev. Rel. 13

(2010) 3

2. Amendola, L., Gannouji, R., Polarski, D., and Tsujikawa, S., "Conditions for the cosmological viability of f(R) dark energy models", Phys. Rev. D, 75, 083504, (2007)

**重宇 33a**    修正重力理論におけるカメレオン機構の解析

伊藤 仁力 (東京理科大学 M2)

近年の観測により宇宙は加速膨張していることが示されており、その源は暗黒エネルギーと呼ばれている。しかしその起源は未だに解明されていない。最も一般的なモデルとして観測との良い整合性を持つ  $\Lambda$  CDM 模型が挙げられるが、宇宙項  $\Lambda$  の起源を真空のエネルギーとすると、この模型は理論値と観測値に121桁もの差が生じてしまう。そのため、 $\Lambda$  CDM 模型以外にも多くの代替案が考えられており、その1つとして重力項を修正することにより加速膨張宇宙の記述を行う修正重力理論が挙げられる。暗黒エネルギーの起源がスカラー場とする模型では、スカラー場は非相対論的物質と結合するために発生する第5の力の伝搬が起こることが分かっている。しかし、自然界において確認されている力は4つであり、この理論上で発生する第5の力は観測からは確認されていないため、この力を宇宙の局所領域で抑制する機構を考える必要がある。そのような機構の1つとして、場の有効質量が周囲の物質の密度に依存して異なることを利用したカメレオン機構が挙げられる。今回はこのカメレオン機構がどのようなモデルに適用し、場の有効質量の違いにより第5の力を抑えるのか見ていく。またそのときのカメレオン機構が働く条件と太陽系での重力実験における解析していく。

1. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. D 69, 044026 (2004)
2. Radouane Gannouji, Bruno Moraes, David F. Mota, David Polarski, Shinji Tsujikawa, Hans A. Winther, Phys. Rev. D 82:124006, (2010) [arXiv:1010.3769]
3. T. Tamaki and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 78, 084028 [arXiv:0808.2284]

**重宇 34a**    標準ビッグバン宇宙における軽元素合成理論とその問題点 (Alpher, Follin & Herman 1953 のレビュー)

佐塚 達哉 (大阪大学 M1)

現代の宇宙論は精密科学として発展を遂げ、宇宙マイクロ波背景放射の存在やヘリウム、重水素などの軽元素の存在比を見事に説明する。我々は軽元素合成理論に注目し、Alpher, Follin & Herman (1953) をレビューする。この論文は宇宙論における史上最初の定量的な議論であるとされ(ワインバーグ「宇宙の最初の3分間」)、現代宇宙論を学ぶ上で非常に重要である。

現在の軽元素の存在比は、宇宙初期の陽子・中性子の存在比によって決められる。林 (1950) は、それまで曖昧に仮定されていた陽子・中性子比を見直し、物質と放射の相互転換を考慮したモデルを立てこの比を得た。レビューする論文では、その考えを基にして、より定量的に正確な計算を行ない、現代において広く支持されている軽元素合成理論を確立した。

この理論はヘリウム、重水素の軽元素比をうまく説明するが、リチウム7の量は期待されるよりも少なく、理論あるいは観測に対する問題点として残されている。その問題の解決策についても議論する。

1. R. A. Alpher, J. W. Follin, & R. C. Herman, Phys.Rev., 92, 1347 (1953)
2. C. Hayashi, Prog. Teoret. Phys., 5, (1950)

**重宇 35a PBH Baryogenesis**

藤田 智弘 (東京大学 D2)

何故、この宇宙は物質で満たされており、反物質はほとんど見つからないのか？この問題はバリオジェネシスと呼ばれ、宇宙論における最重要未解決問題の1つである。我々は新しいアプローチとして、初期宇宙で作られるブラックホール (PBH) を通じたバリオジェネシスのモデルを議論する。このシナリオでは、インフレーションによって作られたPBHがホーキング輻射で素粒子を放出し、その粒子が崩壊することでバリオン数が作られる。従って、初期宇宙論・相対論・素粒子論にまたがる研究対象として面白い。さらに、PBHバリオジェネシスは既存のモデルでは難しいGUT(大統一理論) エネルギースケールでのレプトジェネシスを達成でき、非常に魅力的なモデルと言える。我々は宇宙論からの制限を包括的に考慮し、シナリオの実現可能性を検証する。

1. D.Baumann et al. 2007. arXiv:hep-th/0703250

**重宇 36c かにパルサーから放出される重力波**

井関 洸太 (弘前大学 M1)

本研究では有力な重力波源である「かにパルサー」について詳しく調べた。その結果、かにパルサーの重力波の振幅は  $10^{-24}$  のオーダー、エネルギー損失は  $10^{31}$  のオーダーであり、それに伴って1秒間に振動数が  $10^{-10}$  のオーダーで減少している事が分かった。今後の課題としては放出される重力波の振幅が大きい星の理論的予測である。ワームホールやエキゾチックな質量を持った星などがもしあれば、そういった天体からも重力波が放出されているかもしれず、加えて新たな発見を人類にもたらしてくれるかもしれない。

1. 重力波をとらえる, 中村卓史, 三尾典克, 大橋正健, 1998, 京都大学学術出版会
2. 相対論入門, BERNARD.F.SCHUTZ, 1988, 丸善株式会社

**重宇 37c ハローモデルにおける銀河の多重極パワースペクトル  $P_\ell(k)$**

金丸 達郎 (広島大学 M1)

宇宙の大規模構造を調べる理論モデルとして、ダークマターハローからアプローチをする、ハローモデルがある [1]。始めに、ハローモデルに基づいた、赤方編移空間における銀河の多重極パワースペクトル  $P_\ell(k)$

をレビューし、 $P_4(k)$  では、サテライト銀河からの寄与が重要であることについて述べる。そして、銀河の多重極パワースペクトルを用いた発展として、 $P_4(k)$  を調べることで、修正重力理論やサテライトフラクションに対し制限をつけることの可能性について議論する。

1. A.Cooray, R.Sheth, Phys. Rep., 372,1 (2002)
2. C.Hikage, K.Yamamoto, arXiv:1303.3380 (2013)

**重宇 38c 修正重力理論で迫る宇宙磁場の起源**

嵯峨 承平 (名古屋大学 M2)

近年、宇宙のさまざまなスケールにおいて磁場が観測されている。例えば銀河や銀河団スケールの領域においては、およそ  $10^{-6}$  ガウスの磁場が確認されている。また、宇宙で銀河がほとんど存在しない領域における銀河間磁場も観測されている。このように、宇宙には多様なスケールの磁場が存在しており、特に銀河以上のスケールの磁場を「宇宙磁場」と呼ぶ。一般的に考えられているシナリオとして、初期宇宙に存在した「種磁場」がダイナモ機構により増幅されたと考えられている。この種磁場の大きさとして、再結合期に  $10^{-30} \sim 10^{-20}$  ガウスの種磁場が存在していると現在観測されている宇宙磁場の候補となりうるという先行研究がある。この種磁場を作ることが非常に困難であることが問題である。

そして今回注目する候補は、初期宇宙のプラズマ中において強結合している光子とバリオンにわずかなズレがありこの効果によって磁場が生成されるという方法である。この手法は宇宙が発展する中で自然に生成されるためよい候補といえる。ところが線形摂動論のもとで、このズレから引き起こされる磁場のソースとなるのはベクトル型摂動である。ベクトル型摂動は、標準的な宇宙論において膨張に従い減少する解しか持たず通常無視されるため磁場は生成されない。

しかし、修正重力理論の候補である Einstein-Aether 理論ではベクトル場である“エーテル場”が導入されており、この新しい場によってベクトル型摂動が存在する。今回は、このベクトル型摂動における磁場の生成に注目し解析を行った。その結果、種磁場の大きさとして最大で  $10^{-22}$  ガウスの磁場が生成されることがわかり、これは種磁場として十分な大きさであると言える。

1. S. Saga *et al.*, Phys. Rev. D87, 104025 (2013), 1302.4189.
2. M. Nakashima and T. Kobayashi, Phys. Rev. D84, 084051 (2011), 1103.2197.
3. T. Jacobson and D. Mattingly, Phys. Rev. D64, 024028 (2001), gr-qc/0007031.

**重宇 39c Relative velocity of dark matter and varionic fluids and the formation of the first structures**

小野間 章友 (筑波大学 M1)

同論文のレビューとなる。宇宙の再結合時、バリオンと光子は脱結合し、この時にバリオンの音速は、相対論的速度から水素原子の熱運動速度まで落ちる。これは、ゆらぎの線形理論におけるバリオンとダークマターの間の相対速度を下回るものである。この相対速度を考慮すると、移流による項に影響を及ぼす。これにより、小スケールでのゆらぎの成長の抑制されることがわかった他、線形理論とは異なるいくつかの結果が出た、という内容の論文のレビューと、その結果を元にしたシミュ

レーション結果のレビューを行う。

1. D. Tsaliakhovich , C. Hirata. Phys.Rev.D82:083520,2010.
2. 松原隆彦. 『現代宇宙論 ——時空と物質の共進化』東京大学出版会 (2010)

## 重宇 40c 銀河団の多波長観測を用いた修正重力模型の検証

照喜名 歩 (広島大学 D1)

宇宙の加速膨張を再現する修正重力模型では、一般に重力以外に第5の力が物質に作用する。この第5の力が銀河団で現れると、銀河団ガスに作用し、その分布観測に影響を与える可能性がある [1]。一方、静水圧平衡を仮定すると銀河団ガスの分布観測を組み合わせて銀河団質量の質量プロファイルを予測することができる。我々は第5の力が存在するとニュートン重力に比べてこの質量プロファイルの見積もりが小さくなることを示した。また、実際にかみのけ座銀河団 [2] の X 線温度、表面輝度観測から質量プロファイルを見積もり、これを重力レンズ観測による質量予測と比較した。その結果、重力レンズ観測の誤差の範囲で修正重力模型のモデルパラメータに制限を与える事が可能であることを示した。本講演では上記の制限について議論する。

1. A. Terukina and K. Yamamoto. 2012. PRD. **86**, 103503.
2. R. Fusco-Femiano, et al. 2013. ApJL. **763**, L3.

## 重宇 41c 連星パルサーから放出される重力波

原田 尚也 (弘前大学 M1)

本研究では二体系のダイナミクスに対する重力波放出の影響を調べた。具体的には楕円運動する2体系の四重極モーメントから、連星系の単位時間あたりのエネルギー損失やそれに伴う軌道周期の減少を求め、その結果から離心率や軌道長半径の時間変化を求めた。また、連星が合体するまでに要する時間を求め、連星パルサー PSR1913+16 の場合で評価した。その結果、参考文献の結果と一致することが確認された。

1. BERNARD F.SCHUTZ (江里口良治・二間瀬敏史 共訳)「シュッツ 相対論入門 I 特殊相対論」丸善株式会社 (1988) 著者 A and 著者 B. 2012. 発行元 1
2. BERNARD F.SCHUTZ (江里口良治・二間瀬敏史 共訳)「シュッツ 相対論入門 II 一般相対論」丸善株式会社 (1988)
3. 中村卓史・三尾典克・大橋正健編著「重力波をとらえる—存在の検出から証明へ」、京都大学学術出版会 (1998)
4. Michele Maggiore「Gravitational Waves Volume1 Theory and Experiments」OXFORD UNIVERSITY PRESS(2008)
5. J. M. Weisberg and J. H. Taylor. Pub. in Binary Radio Pulsars, Proc. (2004).

## 重宇 42c Stable traversable wormholes

国分 隆文 (立教大学 M2)

ワームホールとは我々の宇宙の異なる2点間、又は異なる宇宙同士を繋ぐ時空のトンネルである。通行可能なワームホールの存在は Morris と Thorne によってはじめて提唱された (Morris-Thorne wormhole)[1]。ワームホールが自然界に存在できるかどうかを考えるときには、その安定性を考えればよい。Kuhfittig は Morris-Thorne wormhole (MS-wh) の安定性を調べるため、MS-wh の内部と Schwarzschild BH の外部との接続面を調べ、MS-wh が動径方向の線形摂動に対して安定であるための条件を導いた [2]。本発表では、通行可能なワームホールが動径方向の線形摂動に対して安定である、という Peter K.F.Kuhfittig の仕事のレビューと拡張をする。

1. M.S.Morris and K.S.Thorne,Am.J.Phys.56,395(1988)
2. Peter K.F.Kuhfittig,Cent.Eur.Phys.8(3),364-368(2010)

## 重宇 43c 連星中性子星の合体シミュレーション

諏訪部 宙 (新潟大学 M1)

重力波は物質とほとんど相互作用しない。そのため放射された重力波は、その時の状態を保って地球まで伝わってくる。また、強重力場が激しく変動した時に効率よく放射されるので、検出される重力場の情報が豊富に含まれているはずである。しかしながら、重力波が観測されても、それから直接わかるのは、振幅、振動数及びそれらの時間変化までである。その波源、すなわち強重力天体について知るためには、あらかじめ波源を予想し、放射される重力波の波形を理論的に調べ、観測結果と比べる必要がある。今回は本論文をレビューし、中性子連星が合体するときの数値相対論的シミュレーションにより、予想される重力波とニュートリノ光度を紹介する。それが現在及び次世代の検出器で、どの程度検出可能性を持っているか報告する。

1. Y. Sekiguchi, K. Kiuchi, K. Kyutoku, M. Shibata, Phy. Rev. Lett. 107, 051102(2011)

## 重宇 44c 修正重力理論での短波長重力摂動

西 咲音 (立教大学 M1)

修正重力理論は一般相対性理論で説明のできないダークエネルギーなどを説明する理論であり、様々なものが存在している。ここで挙げる  $f(R)$  重力理論や scalar-tensor 理論はその一種である。[1] 一般相対性理論では Isaacson による手法 [2] でエネルギー運動量テンソルを求めることができるが、修正重力理論ではこれを応用させることでエネルギー運動量テンソルを求めることができる。

1. Keiki Saito and Akihiro Ishibashi, (2013) arXiv:1209.5159.
2. R.A.Isaacson, (1968) Phys. Rev., 166, 1263

**重宇 45c** stochastic inflation における curvature perturbation

多田 祐一郎 (東京大学 M2)

我々の宇宙は大きな scale では非常に一様等方であるが、小さな scale で見れば銀河や銀河団など、実に豊かな構造を持っている。そしてこれらの構造は inflation を引き起こす inflaton 場の量子ゆらぎを起源とすると考えられている。こうしたゆらぎ (curvature perturbation) は通常 inflaton 場を、空間一様な古典場と摂動的量子場にわけて計算されるが、stochastic formalism によれば、量子場の効果を統計的白色雑音として古典場に取り入れることで、完全に古典論として理論を展開できる。我々はこの formalism を用い、inflaton 場に対し非摂動的なゆらぎの計算方法を提唱する。

1. M. Sasaki, Y. Nambu, and K. Nakao, Phys. Lett. **B209**, 197 (1988)
2. K.E. Kunze, JCAP 0607 (2006) 014

**重宇 46c** Massive spin2 粒子に対する ghost-free 微分相互作用について

大原 悠一 (名古屋大学 M2)

零質量の spin2 粒子に質量を与えた場合に、安定な理論が構築できるかという試みは古くから行われている。一般に、スピン 2 の理論に質量を与えると、線形なレベルでも ghost が現れることが知られている。Fierz と Pauli は質量項を適切に組むことで、線形なレベルで ghost を排除することに成功した。その後、理論の安定性を保ちつつ非線形な理論へ拡張する事が試みられたが成功していなかった。しかし、近年、de Rham らが、その拡張の手法が確立した (dRGT 理論)。dRGT 理論では、微分を含まない高次の自己相互作用を導入し、各項の係数を調整することで、ghost を排除する事に成功している。本論文では、線形のレベルで、これらの自己相互作用に、ghost を生じない微分自己相互作用を加える事ができる事を示している。また、その微分相互作用に対応する非線形項が存在し、dRGT 理論を一般化した理論の存在を予想している。

1. Hinterbichler arXiv:1305.7227
2. Hinterbichler arXiv:1105.3735v2

**重宇 47c** 負の質量天体による重力レンズ効果

萩原 千祥 (弘前大学 M1)

重力レンズは現在、系外惑星探査やブラックホールなどの直接検出が難しい天体を観測するうえで重要な役割を果たしている。本研究では特に重力マイクロレンズに注目し、Schwarzschild 時空において、レンズ天体が負の質量を持つ場合について、弱場近似を用いて曲がり角と増光率を導出した。結果、歪められた像がレンズ天体に対して光源側に 2 つ観測され、レンズ天体の近くを光源が横切るときに増光率は発散することがわかった。さらにレンズ方程式から、Caustics を横切ったあとで像

が現れないことも判明した。

1. Frittelli and T.P.Kling and E.T.Newman. 2000. Phys.Rev.D 61,064021
2. K.S.Virbhadra and G.F.R.Ellis. 2000. Phys.Rev.D 62,084003
3. T.Kitamura and K.Nakajima and H.Asada. 2013. Phys.Rev.D 87,027501

**重宇 48c** 宇宙定数問題：人間原理によるアプローチ

表 尚平 (東京大学 M1)

宇宙定数問題とはアインシュタイン方程式の中に現れる定数  $\Lambda$  の観測から得られる値が、量子論から予言される値よりも 120 桁ほど小さいという問題である。この食い違いの原因を基礎物理の立場から説明しようとする試みは現在のところうまくいっていない。一方で、本講演で扱う Weinberg(1987) の論文では宇宙定数の値を「人間原理の考え方」を使って制限することを考えている。人間原理から、重力的に束縛された構造の形成を妨げるくらいに宇宙定数は大きすぎるべきではないという条件を課すことで宇宙定数の上限値を求める。本講演では現代の新しいデータを使った新しい制限も合わせて紹介する。

1. S. Weinberg, Phys. Rev. Lett. 59, 2607 (1987)

**重宇 49c** BigBang 元素合成

佐藤 正憲 (東京工業大学 M1)

通常は数値計算によって扱われる元素合成について、近似を駆使することで解析的に取り扱った、V. Mukhanov. 2005. Nucleosynthesis Without a Computer についてのレビューを行う。解析的に取り扱うことで数値計算ではブラックボックスであった内容を身近に理解することができる。また、近似の精度についても数値計算の結果と比較することによって確かめる。

1. V. Mukhanov. 2005. Nucleosynthesis Without a Computer

**重宇 50c** 宇宙の非一様性がダークエネルギーの状態方程式の測定結果に与える影響

根岸 宏行 (大阪市立大学 D1)

宇宙は非常に複雑な対象であり、素粒子のスケールから宇宙の大規模構造にいたるまで様々なスケールの構造を含むが、宇宙の大局的な構造を調べる場合には細かな構造をすべて考慮する必要は無い。宇宙の大局的な構造を知るには宇宙を理解する上で非常に重要である。しかし、宇宙の大局的な構造を知る為には観測的制限が少ないため、作業仮説が必要となる。現代の宇宙論の標準宇宙モデルでは一般相対性理論が宇宙に適用できることと「我々は宇宙の中で特別な場所にはいない」というコペルニクス原理を作業仮説として採用している。宇宙背景放射の観測より宇宙は等方であることが強く示唆されている。このこととコペルニクス原

理を合わせると宇宙の大局的構造は一様等方と結論付けられる。超新星の距離-赤方偏移関係の観測より、宇宙が一様等方な場合、宇宙が加速膨張していることがわかった (ApJ.517:565-586,(1999))。この観測結果より、我々の宇宙には加速膨張を引き起こす物質であるダークエネルギーが満ちていることになる。ダークエネルギーの状態方程式 ( $p = w\rho$ ) について、近年の観測より  $w = -1.013^{+0.068}_{-0.073}$  と制限されている (ApJ 746, 85 (2012))。この観測結果は  $w$  が  $-1$  より小さい可能性を示唆している。相対性理論が宇宙に適用できる場合、 $w$  が  $-1$  より小さいダークエネルギーは因果律が破れているように振る舞う。我々の宇宙で因果律を保つためには、異なる方法で観測を説明する必要がある。本研究では、宇宙定数がある一様等方宇宙モデルが大スケールで一様等方からわずかにずれている場合に、非一様性がダークエネルギーの状態方程式に与える影響を調べ、因果律の問題を非一様性を用いて回避した。

1. Valkenburg(arXiv:1302.6588)

### 重宇 51c Clustering of quintessence on horizon scales and its imprint on HI intensity mapping

舟田 成登 (立教大学 M2)

ダークエネルギーは宇宙ダークエネルギーは宇宙全体に広がって負の圧力を持ち実質的に「反発」する重力」としての効果とを及ぼしているエネルギーである。ダークエネルギーは主に2種類考えられており、その2つが宇宙項とクインテッセンスである。宇宙項は時間に対して一定のダークエネルギーである。クインテッセンスは時間変化する動的なダークエネルギーである。クインテッセンスはホライズンスケールではクラスターを形成するという点で宇宙項とは異なっているそれをこの論文ではそのことを考慮して、宇宙項とクインテッセンスの異なる3つのポテンシャルを用いて、理論的に物質密度のパワースペクトルを計算している。また、HI Intensity という観測方法で得られたデータを角度パワースペクトルで計算している。この論文の目的は、観測と理論値を合わせることでなく、宇宙項と3つクインテッセンスのモデルでどう違うのかということを示すことである。

### 重宇 52c 最も一般的なスカラーテンソル理論における宇宙論的密度揺らぎのバイスペクトル

宅島 祐一郎 (広島大学 M2)

多くの修正重力理論を包括する理論として、最も一般的なスカラーテンソル理論がある。この理論において、宇宙論的密度揺らぎの進化の過程で生じるバイスペクトルの一般的な表式について議論した。摂動理論の手法により、密度揺らぎの2次のカーネルを用いることにより表式を得られ、また2次のカーネルは3つのパラメータを用いて表されることが分かった。本講演では、バイスペクトルの一般的な表式の導出方法と具体的なモデルへの応用について議論する。

1. G.W.Horndeski .Int. J. Theor. Phys. 10 363-384 (1974)
2. Rampei Kimura et al. Phys. Rev. D85 024023 (2012)



# 宇宙素粒子分科会

宇宙線観測・理論の最前線

日時	7月29日 14:30 - 15:30, 15:30 - 16:30 (招待講演:田島 宏康 氏) 7月30日 15:45 - 17:00 8月1日 9:00 - 10:00, 10:00 - 11:00 (招待講演:田村 忠久 氏)
招待講師	田島 宏康 氏 (名古屋大学)「解き明かされた銀河系宇宙線の起源」 田村 忠久 氏 (神奈川大学)「CALET による高エネルギー電子・ガンマ線観測」
座長	伊藤 司 (名古屋大学 M2)、後藤 昂司 (大阪市立大学 M2)、冨塚 慎司 (名古屋大学 M2)
概要	<p>ガンマ線バーストや超新星爆発、太陽フレアなどにより放出される宇宙線、ニュートリノやガンマ線からは、高エネルギー天体現象を理解する為の手がかりが得られます。また、ダークマターの探索は宇宙の起源の解明に繋がると言われています。近年の観測技術の向上により、これらの粒子について多くの事がわかってきており、現在も多くのプロジェクトが計画、進行されています。高エネルギー電子・ガンマ線観測装置 (CALET)、ニュートリノ検出器スーパーカミオカンデ、ダークマター検出器 XMASS、フェルミガンマ線宇宙望遠鏡、高エネルギーガンマ線天文台チェレンコフテレスコプアレイ (CTA)。さらに、LHCf のように加速器実験から高エネルギー粒子の相互作用を明らかにし、宇宙線物理に応用するという研究も進められつつある今、宇宙線研究は天文学、物理学の中でも注目されています。宇宙素粒子分科会では、これらの観測粒子をひとくくりに「宇宙素粒子」と名付けました。当分科会の特徴としては、扱う範囲が広いとため、様々な分野の学生同士で話し合う事ができるという利点があります。多くの方々の参加をお待ちしています。</p> <p>注) 地球に飛来するニュートリノの観測実験など、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>

田島 宏康 氏 (名古屋大学)

7月29日 15:30 - 16:30 B(エメラルド)

## 「解き明かされた銀河系宇宙線の起源」

宇宙線は宇宙から降り注ぐ高エネルギーの素粒子で、 $10^9$  から  $10^{20}$  電子ボルト以上まで幅広いエネルギー分布を持ち、その最高エネルギーは、人類が加速器で実現できるエネルギーをはるかに凌駕しているため、その加速物理過程は非常に興味深い謎である。宇宙線生成の物理過程を理解するためには、宇宙線の起源となる天体を同定することが重要であるが、荷電粒子である宇宙線は、乱流状態の星間磁場に影響を受け直進できないため、その到来方向を測定しても起源にたどり着くことはできない。一方で、宇宙線と星間ガスの相互作用で放出されるガンマ線は、星間磁場に影響を受けず直進できるため、宇宙線の起源とその伝播を研究する上で最も有力な手段と考えられている。

2008年に打ち上げられたフェルミ・ガンマ線衛星は、これまでに1800以上のガンマ線源を検出し、ガンマ線宇宙物理学に大きな進展をもたらした。宇宙線起源の研究においても、フェルミ衛星の観測によって決定的な証拠を掴むことができた。超新星残骸は、銀河系内宇宙線起源の最も有力な候補と考えられていることから、フェルミ衛星でW44、W51CやIC443と呼ばれる比較的古い(爆発から数万年以上の)超新星残骸からのガンマ線を観測した。これらの超新星残骸では、その衝撃波が周辺の星間ガスと相互作用をしている兆候が見られたため、宇宙線陽子起源のガンマ線を観測することが期待されていたが、我々が開発した画像解析手法によりW44ではガンマ線が超新星残骸の衝撃波領域から放射されていることを確認した。さらに、W44とIC443において $2 \times 10^8$ 電子ボルト以下の領域のエネルギースペクトルを精密に測定したところ、宇宙線陽子起源のガンマ線に特徴的なスペクトルを捉えることに成功し、超新星残骸で宇宙線陽子が加速されていることを明らかにした。

田村 忠久 氏 (神奈川大学)

8月1日 10:00 - 11:00 B(エメラルド)

## 「CALETによる高エネルギー電子・ガンマ線観測」

今年4月にAMSの成果が公表されたのは記憶に新しいところであろう。宇宙線と物質の衝突による二次成分として予想される陽電子の全電子(電子と陽電子の合計)に対する比が、10 GeV以上では予想からはずれて増大することがPAMELA衛星によって発見され、その増大が100 GeVまでは続くことが確認されていた。AMSの結果ではそれがさらに250 GeVまで続いていた。このような陽電子の増大が、暗黒物質の対消滅や崩壊によるものであれば、その質量に応じて、エネルギースペクトルに頭打ちが現れるはずであるが、まだその尻尾をつかんでいない。PAMELAと同時期に、原子核の観測を主目的とした南極周回気球ATICによって600-800 GeV近傍での電子の過剰が報告され、暗黒物質の影響である可能性も示唆されている。これが暗黒物質の質量(崩壊ならこの2倍)なのか?このシナリオはたいへん魅力的だが、ガンマ線衛星Fermiや地上チェレンコフ望遠鏡HESSの結果は、ATICほどの顕著な過剰を示していない。また、パルサー天体が陽電子の過剰の原因である可能性もある。これを解明するには、TeV領域までの高精度なエネルギースペクトルを得る必要があり、日本では、宇宙線としては日本初の宇宙観測となるCALETを宇宙ステーションに搭載する準備が進んでいる。CALETは、超新星残骸での電子加速の直接検証を主目的としており、AMSやPAMELAのようなマグネットは搭載しないので陽電子を選別できないが、電子検出に最適化された観測装置によって高精度のスペクトルを10 TeVまで得ることができる。そのため、暗黒物質やパルサーによる電子過剰の検出も可能である。この講演では、CALETの観測目的や開発状況を他の実験との関連も含めて解説する。

## 宇素 01a Fermi Bubble における Multi-shock モデルによる加速と高エネルギー宇宙線スペクトルの関係

佐々木 健斗 (東京大学 M1)

地上で観測される宇宙線のスペクトルは power-law の分布をしているが、この指数は $\sim 10^{15}$  eV 付近のエネルギーを境に緩やかに変化することが観測から分かっており、このエネルギー領域は”knee 領域”と呼ばれている。knee よりも低いエネルギーの宇宙線については、超新星残骸 (supernova remnants, 以下 SNR) による加速が起源と考えられているが、knee を超えるエネルギーの宇宙線の起源については、明確な理論は得られておらず、銀河系外をその起源とする説などが提唱されていた。

K.S.Cheng らは、Fermi 望遠鏡によって銀河中心に観測された”Fermi Bubble”と呼ばれる巨大構造にその起源を求めることで、knee 付近における指数の変化と、knee を超えるエネルギーの宇宙線のスペクトルを説明できるとした [1]。 ”Fermi Bubble”は、銀河中心において、銀河面から南北にハロー付近まで広がるガンマ線放射の巨大な双極構造である。Cheng らはこの”Fermi Bubble”は銀河中心の巨大ブラックホール ”Sgr A\*”での周期的な質量降着によるエネルギー解放として解釈できるモデル (CCDKI モデル、以下 C-11 モデルとする) を構築した [2]。その上で、”Fermi Bubble”において、複数の衝撃波が次々伝播する”Multi-shock 構造”が形成され得ることを指摘し、この衝撃波の平均間隔  $l_{sh}$  が  $l_{sh} \sim 30$  pc であれば、knee 付近で幕が緩やかになることが自然に説明できるとした。さらに、”Multi-shock 構造”がある場合には、超音速乱流での統計加速によって、knee を超える  $10^{15} \text{ eV} < E < 10^{19} \text{ eV}$  の範囲のエネルギーの宇宙線も説明できるとした。

本稿では、以下の論文のレビューを行い、Cheng らの提唱する”C-11 モデル”及びそこから考えられる加速機構での高エネルギー宇宙線スペクトルの説明に関して、実際の観測事実と照らし合わせることで、このモデルへの議論を深めることにする。

特に、このモデルにおいて、銀河中心における質量降着の割合の仮定が非常に重要な役割をしていることを見出し、この質量降着率の仮定の妥当性検証が、Cheng らのモデルの妥当性の判断に大きな影響を与えられる可能性があることを議論していく。

1. K.S.Cheng et al. 2012. The Astrophysical Journal Letters 746:L16
2. K.S.Cheng et al. 2011. The Astrophysical Journal Letters 731:L17

## 宇素 02a TALE 実験用地表検出器の DAQ エレクトロニクスの開発

後藤 昂司 (大阪市立大学 M2)

テレスコープアレイ (TA) 実験は、米国ユタ州で稼働中の北半球最大の宇宙線観測実験であり、 $10^{18.2} \text{ eV}$  から  $10^{19.8} \text{ eV}$  付近で宇宙線の組成が陽子であるという結果を報告している。さらに  $10^{18.7} \text{ eV}$  と  $10^{19.7} \text{ eV}$  のところで宇宙線のエネルギースペクトルに折れ曲がりの構造がみられ、これらの折れ曲がり構造はそれぞれ、陽子と宇宙背景放射が起す電子対生成によるエネルギー損失と  $\pi^0$  生成によるエネルギー損失によって作られると考えられている。また、他のいくつかの実験から  $10^{18} \text{ eV}$  より低いエネルギーで宇宙線の組成が鉄から陽子に変化しているという

結果も出ており [1]、これは宇宙線起源が銀河系内から銀河系外への遷移していることを示していると期待される。なぜならば、銀河系内起源の加速として最も確からしいと思われているショック加速モデルによれば、磁場による閉じ込め効果は原子核の電荷に比例して強くなり、あるエネルギー領域では鉄の存在比が大きいと考えられているためである。さらに銀河系外起源の鉄は長い伝搬距離のため地球に到達するまでに銀河間の光子と相互作用して核破砕すると考えられているため、銀河外起源の宇宙線は陽子が支配的である。そのため、 $10^{16} \text{ eV}$  から  $10^{18} \text{ eV}$  にかけての宇宙線の組成の移り変わりは、銀河系内の鉄から銀河系外の陽子への遷移によるものだと考えられている。この宇宙線の組成の移り変わりを実験によって明かにするために、地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡によるハイブリッド観測を行っている TA 実験をさらに低エネルギーに拡張する TALE (TA Low Energy Extension) 実験が進行中である。この TALE 実験で使われる地表検出器の DAQ エレクトロニクスとその開発の要点、現状について報告する。

1. J.Blumer et al., Progress in Particle and Nuclear Physics, 63 (2009) 293

## 宇素 03a ガンマ線望遠鏡による Axion-like Particles の探索とパラメータへの制限

高橋 光成 (東京大学 M1)

超高エネルギーガンマ線観測の結果に基づいた、Axion-like Particles (ALPs) の存在およびパラメータの制限に関する議論をレビューする。Axion は強い相互作用の CP 対称性の不自然さから提唱され、その一般化である ALPs とともに理論的に存在が期待されている粒子である。これらはダークマターや超弦理論などとの関連からも関心を集めている。ALPs は標準模型の粒子との間に極めて弱い相互作用があり、特に電磁場との相互作用により光子と Axion が互いへと変化する光子-Axion 振動が起こる。この現象が AGNs などの遠方天体からのガンマ線のスペクトルの歪みとして捉えられる可能性が指摘されてきた。そして近年、実際に ALPs 無しには説明できないスペクトルが観測されており、このデータを用いて ALPs の光子との結合定数の下限が求められた。ただし観測やガンマ線の生成および伝搬に関する現在のモデルが誤っている可能性もあり、ALPs の存在が証明されたわけではない。本講演の最後に種々の制限や予測についてまとめ、今後の観測の戦略について考察する。

## 宇素 04a 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA の概要と今後の展望

小島 拓実 (東京大学 M1)

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は約 100 台の大気チェレンコフ望遠鏡を用いて、 $20 \text{ GeV}$  から  $100 \text{ TeV}$  以上の領域の超高エネルギー (VHE) ガンマ線の観測を行う国際共同プロジェクトである。今日、大気チェレンコフ望遠鏡は H.E.S.S. や MAGIC、VERITAS などがあるが、CTA 計画では感度を既存のもの 1 桁向上させ、現状では観測されていない、あるいは理解されていない物理現象の発見、解明を目指す。期待される主な物理現象として、宇宙線の起源、粒子加速、ブラックホールから放出されるジェットの性質、宇宙の星形成史の探求や、ダークマ

ター粒子の対消滅ガンマ線、ローレンツ不変性の破れの探索などを行う。4桁に及ぶ広いエネルギーレンジで観測するために、大中小の3種類の口径の望遠鏡が用いられ、感度向上のために、様々な技術が開発されている。本レビューでは、CTA計画の現状及び今後の展望について紹介する。

1. the CTA consortium, Astroparticle Physics, "Introduction the CTA concept", Volume 43, p.3. 2013

## 宇素 05a ガンマ線観測によるダークマター間接探索の現状と CTA 計画における今後の展望

荻野 桃子 (東京大学 M1)

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は、大気チェレンコフ望遠鏡アレイを用いて、20 GeV-100 TeV 以上の領域に及ぶ超高エネルギーガンマ線の観測を行う国際共同プロジェクトである。このプロジェクトにより、高エネルギー天体での物理現象や宇宙の形成史の研究など様々な発展が予想されるが、その一つに、ダークマター対消滅からのガンマ線探索がある。昨年、ガンマ線観測衛星 Fermi-LAT のデータを用いた解析により、銀河中心に質量約 130 GeV のダークマターが存在するという可能性が示唆された。Fermi-LAT の観測は現在も続いているが、このエネルギー領域でのガンマ線探索に対してより大きい有効面積を持つ大気チェレンコフ望遠鏡での検証も有効である。これまでのチェレンコフ望遠鏡による観測では、H.E.S.S (High Energy Stereoscopic System) による銀河中心のガンマ線の観測・解析が、WIMP 質量 1 TeV 付近における対消滅断面積の上限値に対する最も強い制限を与えている。さらに、観測エネルギー領域を広げ、感度を一桁以上向上させた CTA の実現により、ダークマターの検出がより現実的なものとなることが期待される。本レビューでは、イメージング大気チェレンコフ望遠鏡 (IACTs) を用いたガンマ線観測によるダークマター間接探索の現状と、今後の展望について考察する。

1. M. Doro et al.(CTA Consortium) 2013. Astroparticle Physics 43(2013)189-214
2. L. Bergström. 2013. Astroparticle Physics 43(2013)44-49
3. J.Conrad. 2012. [arXiv:1210.4392 [astro-ph.CO]]

## 宇素 06a CTA 大口径望遠鏡に向けた波形サンプリング回路の開発

土屋 優悟 (京都大学 M1)

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は次世代の大規模地上望遠鏡群の国際共同建設計画である。大、中、小口径の合計 100 台近くの望遠鏡を配置することによって 20GeV から 100TeV 以上の超高エネルギーガンマ線の観測を、これまでの 10 倍の感度で観測することを目指す。高エネルギーガンマ線が大気を通過することで放出されるチェレンコフ光を鏡で集光し、大口径望遠鏡では集光面の PMT によって検出を行う。この信号と夜光ノイズを効率的に分離して観測するためには GHz での波形読み出しが求められている。また、大口径望遠鏡のカ

メラは光電子増倍管 (PMT:Photomultiplier Tube)2000 本近いチャンネルから構成されるためカメラの全体での発熱量を抑えるために低消費電力であることも求められる。そこで日本グループは、イタリアのグループと協力しアナログメモリの ASIC である DRS4(Domino Ring Sampler version4) を用いて 1-2GHz(可変) の高速サンプリングを行い、約 2W/channel である低消費電力の大口径望遠鏡搭載用波形読み出し回路を開発した。これまでに、トリガ生成回路などと組み合わせての波形サンプリング等の基本的な動作が確認されている。現在さらなる改良が重ねられており、今回開発中の新たな回路ではより大口径望遠鏡への搭載を意識した形で改良が行われている。本講演ではこれらの回路の構成と開発状況について発表する。

## 宇素 07a CTA 計画に向けた大口径望遠鏡のトリガー開発・試験および望遠鏡シミュレーション

増田 周 (京都大学 M1)

CTA(Cherenkov Telescope Array) 計画は、従来よりも一桁良い感度で 20GeV から 100TeV を超える超高エネルギーガンマ線を全天観測するために大中小合わせておよそ 100 台の望遠鏡群を建設する計画である。CTA 計画は世界 27 カ国の研究者が参加しているプロジェクトで、その中で日本は主に大口径望遠鏡の開発に大きく貢献しており、我々は望遠鏡の焦点面光検出器である PMT(光電子増倍管)からの電気信号読み出しを決定するトリガー回路部分と信号読み出し回路部分を開発している。大口径望遠鏡(口径 23m)では数十 GeV から 1TeV 程度の低いエネルギーのガンマ線を感度良く観測し、GRB 等の突発的な現象や AGN、パルサー等の天体を低エネルギー領域で観測する。ガンマ線は大気で生成される空気シャワーからのチェレンコフ光を捉えることで間接的に観測される。その際にバックグラウンドである夜光と区別して、チェレンコフ光によるイベントを有効に取得するためのトリガー回路が必要とされる。我々は読み出し回路とトリガー回路を接続するためのバックプレーン回路を開発し、トリガー回路と組み合わせ動作するか検証した。この検証で、PMT 7 本一組のクラスター 3 つをまたいだ通信が正常に行われることを確認した。さらにトリガー回路のパラメータを望遠鏡シミュレーションに組み込み、ガンマ線とバックグラウンドのトリガーレートとエネルギー閾値を確認することにより、回路の性能を検証した。このシミュレーションにより、単一望遠鏡でトリガー条件を 3 p.e. 以上の信号が 7 ピクセル以上隣り合う時とした場合、ガンマ線のエネルギー閾値が 50GeV 程度になることなどを確かめた。このことにより、望遠鏡の目標感度とエネルギー閾値を達成するための回路仕様を決めることが目標である。本講演ではトリガー回路の試験結果及びシミュレーション結果について発表する。

## 宇素 08a 宇宙ガンマ線精密観測計画 GRAINE~現状報告~

尾崎 圭太 (神戸大学 D2)

GRAINE(Gamma-Ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) は 10MeV~100GeV 領域において宇宙ガンマ線の精密観測を目指す気球実験である。主検出器に用いる原子核乾板 (Nuclear Emulsion) は荷電粒子の通過位置をサブミクロンの精度で捉えることが出来る 3 次元

飛跡検出器である。ガンマ線が対生成反応をして生じた電子陽電子対 ( $e^+e^-$ ) を電磁散乱の影響を抑えて測定することで、Fermi-LAT に比べて一桁程度良い角度分解能が実現出来る。

ここでは、GRAINE の検出器性能に関するシミュレーション結果及び実証試験結果について紹介する。また、2011 年に大樹航空宇宙実験場で行ったテストフライトの概要を紹介する。

## 宇素 09a GRAINE～次期フライトへ向けた多段シフター動作試験～

水谷 深志 (神戸大学 M1)

NASA の衛星 Fermi-LAT は 2000 近くのガンマ線天体を発見し、ガンマ線天文学を切り拓いた。しかしながら、多くの成果とともに未同定天体など多くの課題が浮かんできている。そこで我々は Fermi-LAT の角度分解能を 1 桁近く上回るエマルジョン望遠鏡を開発し、ガンマ線天体の高分解能観測を目指す GRAINE (Gamma-ray Astro-Imager with Nuclear Emulsion) 計画を推進している。現在は 2014 年に予定されている次期フライトへ向け、エマルジョン望遠鏡の構成要素の一つである多段シフターの動作試験を行っている。本講演では常温常圧環境試験の結果及び低温低圧環境試験の解析経過についての報告を行う。

## 宇素 10a ガンマ線やニューオンなど放射線の到来方向を精度良く安価に測れる装置の開発

猪目 祐介 (甲南大学 M1)

シンチレーターと光センサーを組み合わせることにより高エネルギー粒子の存在を観測する事ができる。この方式を応用してガンマ線やニューオンなどの放射線を安価に観測できる装置を開発できないかと考え、開発を行った。安価でありながら高精度の観測を可能とするために、シンチレーターは感度や大きさの異なる 2 種類を組み合わせ、光センサーに関しては、マルチチャンネルプレートによって高解像度での光増幅を可能としたイメージンシファイアを使用した。また、シンチレーターとイメージンシファイアによって映像化された飛跡を CCD カメラを用いて撮像した後、その飛跡の映像から放射線の到来方向や数を解析して出力するソフトウェアも同時に開発し効率の向上を図った。その結果、実際に宇宙線の観測に成功した。本講演では観測装置の開発と観測結果について発表する。

1. 小田 稔. 1972. 裳華房

## 宇素 11c CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの開発

田中 駿也 (茨城大学 M2)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画は、大・中・小の口径が異なるチェレンコフ望遠鏡を約 60 台配置して、現在稼働している MAGIC, H.E.S.S., VERITAS 望遠鏡よりも広帯域・高感度のガンマ線観測を目的とする国際共同プロジェクトである。日本グループは大口径望遠鏡

(Large Size Telescope, LST) の開発を中心に進めている。

望遠鏡の焦点面には、チェレンコフ光を捕えて電気信号に変換する光電子増倍管 (Photomultiplier Tube, PMT) が一面に配置され、その数は LST 一台あたり 1855 本にも及ぶ。しかし、PMT を一面に配置する際、LST に使用する PMT の入射窓が円形であるため、PMT 同士を隣接させて配置すると、互いの間に隙間 (デッドスペース) ができてしまう問題点が生じる。このデッドスペースに入射したチェレンコフ光は検出することができない。今回発表するライトガイドは、デッドスペースを埋めて効率よくチェレンコフ光を PMT に導き、かつ夜光などのバックグラウンドを低減するために、全ての PMT に取り付けられる光学部品である。ライトガイドの曲面形状としては、ある角度以内で入射した光は 100 % 集光し、それより大きい角度で入射した光は全てカットするという特徴を持つ Winston Cone が代表的である。これまでに、Winston Cone 型ライトガイドを切削加工と 3D プリンタでいくつか試作し、現在その性能評価を行っている。

本講演では、LST 用に試作したライトガイドの性能評価及び大量生産に向けた開発の現状を報告する。

## 宇素 12c Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画における分割鏡の形状評システムの開発

馬場 浩則 (茨城大学 M2)

CTA 計画は、大中小の 3 種類の異なる口径の解像型大気チェレンコフ望遠鏡による大規模望遠鏡群により、現在稼働している同タイプの望遠鏡よりも一桁高い感度で数 10GeV から 100TeV までの広いエネルギー範囲の高エネルギーガンマ線を観測する国際共同実験である。その中で日本グループは、特に口径 23 m を持つ大口径望遠鏡、Large Size Telescope (LST) に重点を置いて開発を行っている。

LST の反射面は六角形で対辺間が 1.51 m、焦点距離 28~28.5 m の大型分割球面鏡 200 枚で構成され、その全ての開発は日本グループが担当する。LST は 8 台建設予定であることから、この大量の分割鏡の形状を高精度かつ効率の良く評価する方法が必要となる。CTA 計画ではこの評価方法として PMD 法という形状測定方法を採用した。PMD 法とは鏡面に位相模様を映し込み、4 台の CCD カメラで鏡全体をカバーするようにステレオ撮影し、形状による位相のずれから、鏡面形状、法線ベクトルを測定する方法である。その後、得られたデータから光線追跡を行い、スポットサイズや焦点距離を評価する。この方法では撮影された画像を合成することにより大型の分割鏡でも全体を測定、評価することが可能で、また最大 28.5 m という焦点距離に対して全長 7m 程度の装置で測定を行うことができる。2012 年の秋に宇宙線研究所内に設計した PMD 法装置が完成し、装置較正を行い、実際に使用する大型分割球面鏡の試測定とその情報をもとに更なる較正を繰り返した。現在では、10  $\mu\text{m}$  近くまでの鏡面構造を確認できるまでになっているが、スポットサイズの形状を評価するためにはまだ不十分であり、今後も更なるデータの解析と装置の較正が必要である。

本講演では LST 用分割鏡の形状測定システムの現状を報告する。

## 宇素 13c KamLAND を用いた GRB からの熱的ニュートリノの研究

大木 悠平 (東北大学 M2)

「KamLAND」は低エネルギー領域 (数 MeV~数十 MeV) に感度を持つニュートリノ検出装置である。GRB からのニュートリノに関する研究はこれまでも他の実験で行われてきたが、それは GRB ジェットの中で粒子加速によって作られる高エネルギーニュートリノについてのものである。GRB ジェットを生成する過程で数十 MeV の熱的ニュートリノが放出されるという予想があるのだが、それについては実験からのアプローチは未だ行われていない。この熱的ニュートリノは KamLAND で検出できる可能性があるため、その解析に向けて現在研究を行っている。

ポスターでは KamLAND 検出器の紹介とそれを用いた熱的ニュートリノの探索の方法、そして解析への前段階として、KamLAND で予想される GRB からのニュートリノフリューエンスの上限値をシュミレーションし、その結果について報告する。

1. Gando, A., et al. 2011, The Astrophysical Journal, 745, 193
2. 著者 C. 2013. 発行元 2

## 宇素 14c 最高エネルギー宇宙線源加速候補天体 2FGL J0939-1734 の電波観測

田中 洋輔 (茨城大学 M2)

陽子や原子核が主である宇宙線の起源問題は、その発見から 100 年過ぎた今でも明らかにされておらず、宇宙物理学における大きな問題の 1 つである。通常、宇宙線は銀河間磁場による影響で到来方向を断定することは困難である。しかし  $10^{18}$ eV 以上のエネルギーをもつ、いわゆる最高エネルギー宇宙線であれば銀河間磁場による影響をほとんど受けることなく、到来方向を大きく曲げられたりすることなく地球上に飛来することができると考えられている。このような非常に高いエネルギーをもつ宇宙線は、銀河系外であれば超新星残骸や活動銀河などの天体における粒子加速によるものであると考えられている。

近年になって、Auger 宇宙線観測所から宇宙線の到来方向と近傍の活動銀河核に空間的な相関が認められるという結果が出された。ただしこの結果は空間的な相関があることを示すだけで、実際に対応天体が宇宙線の加速源であるかは判断できない。最高エネルギー宇宙線のような非常に高いエネルギーまで加速しうる天体では大規模な加速が行われているはずである。そのような領域では、周囲の物質や場との相互作用によって粒子は非熱的な放射をする。特にガンマ線は高エネルギー粒子加速が起こっている直接的な証拠となる。そこで 2008 年に打ち上げられたフェルミ宇宙望遠鏡の 2 年目カタログに注目した。フェルミ望遠鏡は GeV 領域のガンマ線を最高の感度で観測している望遠鏡である。

フェルミ望遠鏡のガンマ線源天体から、平均的な曲り角の範囲内に最高エネルギー宇宙線が複数個あるような天体を選出され、その中の天体に活動銀河核があった。活動銀河核はコンパクトな放射領域で非常に高い放射輝度をもち、電波からガンマ線までの非常に広いスペクトルを特徴としている。 $10^{18}$ eV 以上のエネルギーまで加速しうる天体として、活動銀河核は十分に考えられる天体である。活動銀河核のエネルギースペクトル分布はシンクロトロン・自己コンプトンモデル (SSC モデル) を

考えることができ、これを得るには広い波長における観測が必要である。選出されたガンマ線源天体 2FGL J0939-1734 に対して野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた連続波観測と JVN ネットワークによる VLBI 観測を実施。SSC モデルでの不定性を小さくすることと時間変動を押しさえることを目的に、野辺山の観測では複数波長でモニタリング観測を行った。VLBI 観測では高分解能を利用してジェット構造の検出を目指し、現在データを解析中である。

1. Pierre Auger Collaboration, Abreu, P., Aglietta, M., et al. 2010, Astroparticle Physics, 34, 314
2. NASA Fermi HomePage <http://fermi.gsfc.nasa.gov/>
3. 福田さん修論

# 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30日 11:30 - 12:30 (招待講演: 米徳 大輔 氏), 13:30 - 15:30 7月31日 10:30 - 11:30 (招待講演: 諏訪 雄大 氏), 11:30 - 12:30 8月1日 9:00 - 10:00 (招待講演: 大須賀 健 氏), 10:15 - 12:15
招待講師	米徳 大輔 氏 (金沢大学) 「ガンマ線バーストで探る初期宇宙」 諏訪 雄大 氏 (京都大学) 「爆発的コンパクト天体現象の理論研究: 何がわかっていて何がわかっていないのか?」 大須賀 健 氏 (国立天文台) 「”ブラックホール周囲の降着・噴出流はどこまでわかったか? ~最新の成果と課題~”」
座長	衣川 智弥 (京都大学 D1)、石井 彩子 (東北大学 M2)、川室 太希 (京都大学 M2)、高木 利紘 (日本大学 M2)、中西 俊貴 (早稲田大学 M2)、平井 遼介 (早稲田大学 M2)
概要	コンパクトオブジェクト分科会では、ブラックホール、中性子星、活動銀河核といったコンパクトオブジェクトや、超新星爆発、降着円盤、ガンマ線バーストなどの高エネルギー天体現象に関する研究を扱います。これらの天体は強い重力、強磁場といった極限状態にあり、近年の理論やシミュレーション技術の発展、電波からガンマ線にわたる幅広い波長域の観測により、様々な事実が明らかになりつつあります。また、近い将来コンパクト連星からの重力波の観測が期待されており、天文学は新たな時期に差し掛かり始めました。 現象を多方面から探ることで、天文学を通して新たな物理の発展が予期されており、コンパクトオブジェクトの重要性も高まってきました。コンパクトオブジェクトは基礎物理学を探る上でかかせない存在となりつつあります。 しかし、ブラックホールや中性子連星、活動銀河核からのジェット噴出機構や超新星の爆発メカニズムなど、謎は未だ多く残されている事も事実です。 本分科会では、これらコンパクトオブジェクトに関する研究の進展、最新の成果、将来性について、理論と観測の両面から議論したいと思います。  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。 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。 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。 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う。

米徳 大輔 氏 (金沢大学)

7月30日 11:30 - 12:30 B(エメラルド)

## 「ガンマ線バーストで探る初期宇宙」

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象として知られている。短時間ではあるが極めて明るく輝くため、初期宇宙を探るプローブとして利用されてきている。これまでに分光観測で確認された最高赤方偏移は  $z = 8.2$  で、測光観測では  $z = 9.4$  のイベントが確認されている。今後もより遠方の宇宙を観測できると期待されており、 $z > 10$  という宇宙で最初の星が誕生した頃の物理情報を得られるだろう。

本講演では、GRB を用いた初期宇宙観測について、2つの着眼点で紹介する。ひとつ目は GRB の後に続く残光現象を利用した分光学的なアプローチで、これはいわば王道の攻め方と言える。赤方偏移  $z > 7$  では、水素のライマン  $\alpha$  吸収の効果を強く受け、可視光では観測することができない。近赤外線での分光観測が重要となる。残念ながら  $z = 8.2$  の GRB では、赤方偏移の同定には成功したものの、良質な分光スペクトルが得られなかったため、初期宇宙の物理情報は得られていない。ここでは  $z = 6.3$  で発生した GRB 050904 の例を用いて、GRB を用いた観測的宇宙論の展開方法を説明する。

もうひとつは、GRB の突発的ガンマ線放射の特性 ( $E_{peak}$ -光度関係など) を利用したアプローチである。我々の研究グループは、これまでに  $z > 10$  の星形成率の測定や、宇宙再電離・重元素合成量の議論などを行ってきた。最近では、 $z > 2$  の宇宙における宇宙論パラメータの測定を行い、暗黒エネルギー量は時間に強くは依存しない宇宙項のような性質を持っていることを示してきた。このような手法は新しい試みであり、上記の関係式の物理的な起源や、全ての GRB について成立する普遍的な性質であるのかをきちんと議論しなくてはならないが、将来、暗黒エネルギーの起源 (まずは時間発展) を議論する一つの有効な手法と考えている。

諏訪 雄大 氏 (京都大学)

7月31日 10:30 - 11:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「爆発的コンパクト天体現象の理論研究：何がわかっていて何がわかっていないのか？」

コンパクト天体が引き起こす高エネルギー現象は、極限物理の実験場であると考えられます。そこでは地上実験では到達できない領域の物理が実現されており、これらの現象についての理解を深めることが、高エネルギー・高密度物理の世界に迫るための手段になることが期待されています。特に、超新星爆発やガンマ線バーストといった激しい爆発現象の中心部は、我々の知っている全ての相互作用 (重力・電磁気力・弱い力・強い力) が同時に重要な働きを及ぼす、極めて複雑かつ面白い状態になっています。それゆえ、いまだ爆発がどのように引き起こされているのか、完全にはわかっていません。

本講演では、超新星爆発とガンマ線バーストの中心エンジンについて、いまだどこまで解明されているのか、またどんな謎が残っているのか、についてお話ししたいと思います。

大須賀 健 (国立天文台)

8月1日 9:00 - 10:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「ブラックホール周囲の降着・噴出流はどこまでわかったか? ~最新の成果と課題~」

ブラックホールの周囲では、吸い込まれるガスの重力エネルギーが解放され、強力な放射や高速なガスの噴出現象が引き起こされている。極めて小さな領域で膨大なエネルギーが解放されるため、活動銀河核や X 線連星、ガンマ線バーストといった高エネルギー天体現象のエンジンであると考えられている。また、この膨大なエネルギー放出は銀河の進化に影響を与えるであろうことから、近年話題となっている巨大ブラックホールと銀河の共進化の起源ではないかと期待されている。

ブラックホールの重力に引きつけられたガスが円盤を形成しつつ吸い込まれ、膨大なエネルギーを解放するといういわゆる降着円盤の理論は 1970 年代に構築された。幾つもの観測事実を説明することに成功したことで世界中で信じられるようになったが、あくまで現象論的なモデルであり物理的に解明したとは言い難い状況であった。しかも、近年になって説明できない観測事実も次々に報告されるようになった。

現象論的な研究に甘んじてきたそれまでの状況を打開する鍵は磁場と放射の扱いである。従来の研究では放射や磁場、多次元効果は無視もしくは極めて簡易的に扱われてきた。しかし、それでは問題の本質に迫ることはできない。そもそもガス降着には角運動量輸送が必須であるが、それは磁場によって引き起こされる。磁場は円盤内の乱流を助長するだけでなく円盤表面からのガス噴出現象を引き起こす場合もある。円盤の放射効率が円盤の形状や明るさを決めるし、放射圧でジェットが噴出する場合もある。重力や流体に加えて放射や磁場を空間多次元で正しく扱うこと、即ち多次元放射磁気流体力学計算が必要不可欠なのである。ただし、放射磁気流体力学計算は物理が難解で計算量が膨大なため、実現可能となったのはごく最近である。

本講演では、多次元放射磁気流体力学シミュレーションによって見えてきたブラックホール降着・噴出流の最新の描像を紹介する。そして残された課題と今後の発展についても議論する。

## コン 01a Ultra Long Gamma-Ray Burst の青色超巨星起源シナリオ

仲内 大翼 (京都大学 D2)

近年、Ultra Long Gamma-Ray Burst (ULGRB) と呼ばれる新たな種族の GRB が発見されている。ULGRB の継続時間は  $\sim 10^4$  s であり通常の LGRB ( $\sim 20$  s) より桁外れに長い継続時間をもつ現象である。このような ULGRB の特徴を説明する有力なモデルの一つとして青色超巨星起源シナリオが提案された。通常の LGRB を説明する上では青色超巨星は不適当と考えられるのでこれまでほとんど議論されておらず、観測による検証が必要である。本研究の目的は、ULGRB の多波長電磁波による観測結果を用いて青色超巨星起源シナリオを検証することである。そのため今回は ULGRB のアフターグローに注目した。紫外線 - 赤外線領域における ULGRB アフターグローの観測から、ULGRB には通常の超新星より 10 倍以上明るい superluminous supernova や hypernova が付随する可能性が示唆された。本講演では、青色超巨星起源シナリオに基づいて ULGRB に付随した明るい超新星を説明できることを示す。この結果青色超巨星起源シナリオがより強固なものになると期待される。青色超巨星を起源とした GRB の観測的性質を定量的に議論するのは本研究が初めての試みであるといえる。

1. Nakauchi, D., Suwa, Y., Sakamoto, T., Kashiyama, K., & Nakamura, T. 2012, ApJ, 759, 128
2. Kashiyama, K., Nakauchi, D., Suwa, Y., Yajima, H., & Nakamura, T. 2012, arXiv:1212.6431

## コン 02a Ib 型超新星 SN 2012au - GRB 付随型超新星とのリンク

高木 勝俊 (広島大学 M2)

$8M_{\odot}$  より重い星は、その一生の最期に中心核が重力崩壊して超新星爆発を起こすことが知られている。Ib 型超新星とは親星の水素の外層が、Ic 型超新星とは水素外層に加えてヘリウム外層が、それぞれ剥がされた状態で爆発したと考えられている [1]。Ib 型と Ic 型は観測的な特徴が近いことからよく比較されるが、それぞれの爆発機構の詳細はまだ分かっていない。また、GRB に付随して現れる爆発エネルギーの大きい Ic 型超新星と通常の Ib/Ic 型超新星の関係もよく分かっていない。これらの解明に迫るべく、我々は 2012 年 3 月に発見された Ib 超新星 SN 2012au を、口径 1.5m のかなた望遠鏡を用いて継続的に測光分光観測してきた。

我々の観測から得られた極大での総放射光度  $6.7 \times 10^{42}$  erg  $s^{-1}$  は他の Ib 型超新星よりも有意に明るく、GRB が付随した SN 1998bw に迫る値であった。また、極大での He 外層の膨張速度  $\sim 15,000$  km  $s^{-1}$  から、総エジェクタ質量  $5-7 M_{\odot}$  と爆発エネルギー  $(6-14) \times 10^{51}$  erg を見積もった。我々は、Ib 型超新星の極大での R バンドの絶対等級と He I の線速度の間に正の相関があることを提案する。光度曲線のモデルフィッティングを行うことで、内側に密度の高い領域が存在し、SN 1998bw とよく似た密度構造をもつことが分かった [2]。これらの結果から SN 2012au は、GRB が付随しない Ib 型超新星と GRB が付随する Ic 型超新星を結ぶ重要なリンクであることを示唆する。

1. Filippenko, A. V. 1997, ARA&A, 35, 309
2. K. Maeda, Mazzali, P. A., Deng, J., Nomoto, K., Yoshii, Y.,

## コン 03a 大質量連星系における超新星爆発が伴星に与える影響

平井 遼介 (早稲田大学 M2)

超新星爆発の爆発メカニズムを探るため、詳細な物理を考慮した大規模な数値計算が行われているが、観測に合うような爆発を再現出来た例はまだない。超新星の親星は大質量であると考えられているため、連星系を組んでいる可能性が高い。連星系による影響が超新星の爆発メカニズムに何らかの影響を及ぼしていることも考えられるため、超新星親星が連星系を組んでいるかどうかは重要な問題である。本研究ではそれを観測から制限できるようにするための第一歩として超新星爆発が伴星の質量をどの程度剥ぎとっていくかを計算した。また、その質量が連星の初期パラメータ (公転半径、主星質量、伴星質量) にどのように依存するかを調べた。

## コン 04a 次世代重力波観測器のための初代星連星の進化計算

衣川 智弥 (京都大学 D1)

現在、世界初の重力波観測を目指し、KAGRA, Advanced LIGO, Advanced VIRGO といった重力波観測計画が動き出しており、重力波による天文学の幕開けが期待されている。重力波観測のメインターゲットになっているのは連星中性子星 (NS-NS)、中性子星ブラックホール連星 (NS-BH)、連星ブラックホール (BH-BH) といったコンパクト連星である。コンパクト連星は重力波を発生してエネルギーを失いながら近づきあい、連星合体を起こす。合体時にも強い重力波を放出することが理論的に予測されている。これらの連星合体率は、連星の進化計算によって見積もられる。連星進化を主系列時から追い、どのように進化していくかをモンテカルロシミュレーションで計算し、その統計を取ることで直接観測できない連星ブラックホール等についても合体率を見積もることができる。宇宙年齢以内に合体するパルサーの観測例は少なく、連星中性子星についても星の進化計算から合体率を見積もることは重要である。コンパクト連星が合体するタイムスケールは、数億年のものから宇宙年齢以上のものまであり、非常に長い。そこで、本研究では宇宙で最初にできる星である初代星 (Pop III) 起源のコンパクト連星に着目し、初代星起源の連星がどれだけコンパクト連星に成りうるのかについて研究を行った。

## コン 05a パルサーとマグネター

植松 聖人 (新潟大学 M1)

本発表は論文 (Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1) のレビューである。高エネルギーの X 線パルサーである異常 X 線パルサー (AXPs) や、不規則な間隔で  $\gamma$  線及び X 線の大規模なバーストを放射する軟  $\gamma$  線リピーター (SGRs) はマグネターと解釈される。マグネターは自身の磁気エネルギーを、電磁波の放射エネルギー源とする孤立した中性子星である。他のパルサーの放射のエネルギー源とされる、ガスの降着、自転、残留熱では AXPs/SGRs の放射活動に十分なエネルギー

ギーを供給することができないと一般的に考えられている。このように考えられている理由や現在考案されているマグネターのモデルについて、AXPs/SGRsの観測に基づく特性についても触れながら紹介する。さらに、マグネターについて最近発見された弱い外部磁気双極子場と、AXPs/SGRsと他のパルサーとのいくつかの関連についても述べる。

1. Sandro Mereghetti. 2013. arXiv:1304.4825v1

## コン 06a マグネターの強磁場中での電流シートの時間発展

竹重 聡史 (京都大学 M1)

星の進化の一つの結果として出来る中性子星は一般に非常に短い自転周期と強い磁場 ( $10^{12}\text{G}$  程度) をもつ。この星が磁気双極子放射によってエネルギーを放出すると仮定するとその自転周期の変化率から磁場強度を見積もることが出来る。これによって  $10^{15}\text{G}$  もの非常に強い磁場をもつ中性子星であるマグネターが発見され、以来理論観測の両面から様々な物理が研究されてきた (Thompson & Duncan 1995)。マグネターでは質量放出を伴う爆発現象が起きており、そのエネルギーはおおよそ  $10^{44}\text{erg} \sim 10^{46}\text{erg}$  程度にもなることが知られている (Lyutikov 2006)。この質量放出のエネルギー源はマグネター内部および磁気圏に蓄えられた磁気エネルギーであると考えられており、このエネルギーを短いタイムスケールで粒子の運動エネルギーに変換して放出する物理過程が必要となる。このような機構として、太陽での爆発現象を説明すると考えられている磁気リコネクションを提案する。本研究では反平行な成分をもつ磁場における磁気リコネクションを考えるために磁場中の電流シートがどのように時間発展するかを考察した。太陽での爆発ではこのような磁場構造では、電流シートが種々の不安定性によって薄くなることで散逸が起こり磁気リコネクションが起こることが知られている。しかしプラズマがマグネターと共回転していることを仮定して見積もられる電子数密度 ( $\sim 10^{13}\text{cm}^{-3}$ ) は、電流シートが薄くなったときにそれを維持するのに必要な数密度 ( $\sim 10^{31}\text{cm}^{-3}$ ) よりも非常に小さい。したがって、マグネターで薄い電流シートを得るためには粒子数密度を補う機構が必要となる。このようなものとしては小さな爆発を複数起こしてマグネター表面の粒子を蒸発させて粒子を補うことが出来る可能性が指摘されている (Masada et al 2010)。本研究では別のアプローチを考え全く新しい物理過程として、マグネターの強磁場によって起こる電子陽電子対生成の効果によって粒子数密度を補うことを考えた。このアイデアをもとに方程式系を線形化して解析解を導出し、数値シミュレーションの結果と比較して電流シートが維持されること確認した。本研究は強磁場天体の爆発現象理論の基礎となりうるものである。

1. Lyutikov, M. 2006, MNRAS
2. Masada, Y., Nagataki, S., Shibata, K., Terasawa, T. 2010, PASJ
3. Thompson, C., & Duncan, R. C. 1995, MNRAS

## コン 07b 強磁場における電子プロパゲータの様々な表式

矢田部 彰宏 (早稲田大学 M1)

中性子星の中でも、非常に強い磁場をもつものをマグネターという。

マグネター周辺の超強磁場での現象を理解するためには、超強磁場における物理過程を理解しなければならない。本研究では、磁場中の量子電磁力学的な物理過程にとって必要な電子のプロパゲータ (伝播関数) を複数の表式で表した [1][2]。また、超強磁場特有の物理過程である複屈折の表式に関して考察を行い、最近発表された表式 [3] と従来の表式の関連を理解することができた。

1. Schwinger, J.. 1951. Phys. Rev. **82**. 664
2. Melrose, D. B. and Parle, A. J.. 1983. Aust. J. Phys. **36**. 755
3. Hattori, K. and Itakura, K.. 2013. Ann. Phys. **330**.23. arXiv:1209.2663v1.

## コン 08a ブラックホール候補天体 XTE J1856+053 の X 線観測

田中 結 (青山学院大学 M1)

ブラックホールは単体で明るく輝くことはないが、恒星と近接連星系をなしている時など、ブラックホールの周りに降着円盤が形成され、そこからの放射を観測することができる。

XTE J1856+053 は、1996 年 9 月 17-18 日に RXTE/PCA の銀河リッジ探査によって発見された X 線天体である [1]。RXTE/ASM の観測によると 9 月 10 日に初めて検出され、9 月 15-17 日に X 線フラックスのピークを向かえたことが報告されている。XTE J1856+053 は 2007 年に再増光し、3 月 14 日に XMM-Newton によって観測され中心天体の周りの降着円盤のスペクトルはソフト状態のモデルとよく合っていることが報告されている [2]。今回は、XMM-Newton の再解析を含め、「すざく」、RXTE/PCA、Swift/XRT のデータ計 6 個を解析し、中心天体の質量に制限をつけることを目的とする。すべての X 線スペクトルは、温度約  $0.7\text{keV}$  の降着円盤からの多温度黒体放射で概ね近似でき、得られた放射領域 (内縁半径) から、距離  $10\text{kpc}$ 、軌道傾斜角  $25^\circ$  と仮定すると質量は  $4.6 \pm 0.1 M_\odot$  になる。また、中心天体がブラックホールで銀河系内にあると仮定すると、距離は  $8 - 23\text{kpc}$ 、質量は  $3 - 8 M_\odot$  と制限を付けることができた。

1. Marshall, F. E., Ebisawa, K., Remillard, R., & Valinia, A. 1996, IAUC, 6504
2. Sala, G., Greiner, J., Ajello, M. & Primak, N. 2008, A&A, 489, 1239

## コン 09a Sy1 活動銀河核 IC4329A における新たな硬 X 線成分の発見

三宅 克馬 (東京大学 M1)

活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nuclei) の X 線スペクトルは、光子指数  $\Gamma \sim 2$  のべき関数型の一次成分、一次成分の反射と解釈されるおおよそ  $10\text{keV}$  から盛り上がるハンプ成分、反射成分に付随すると鉄輝線、などから成る。しかし、観測されるスペクトルの中では、これらの成分が混じり合う結果、何らかの仮定や先見なしにそれらを分離することは難しかった。硬 X 線のハンプ成分の解釈もまた、説明可能な様々な解釈が存在し、まだ決着はついていない [1][2][3]。そこで我々は今回、時間変動を利用したモデルに依存しない方法で硬 X 線成分を調べるため、明

るく時間変動のある天体として IC4329A を選び、「すざく」のデータを用いて解析を行った。その結果、差分スペクトルを用いて連続一次成分を抽出し、光子指数として  $\Gamma \sim 1.96$  を決定した。この  $\Gamma$  を固定した一次成分、およびその反射を組み込んだモデルフィッティングを行うことにより、時間変動する連続一次成分とは独立した新たな硬 X 線成分の存在を発見した。

1. Madejski et al. 1995. ApJ
2. Perola et al. 1999. A&A
3. Gondoin et al. 2001. A&A

## コン 10a 「すざく」を用いた LMXB GS1826-238 におけるハード状態のスペクトル解析

小野 光 (東京大学 M1)

中性子星 (NS) には  $\lesssim 2M_{\odot}$  の質量の恒星と連星系を成して、X 線を放射するものがあり、そのスペクトルには 2 つの状態が知られている。一つは 20 keV 以下の帯域が卓越しているソフト状態、もう一つは 20 keV 以上の高エネルギー帯域が卓越しているハード状態である。Sakurai et al. (2012) によると、光度が  $\sim 10^{36}$  erg/s の Aquila X-1 のハード状態の 1-100keV スペクトルが、NS 表面の黒体放射が逆コンプトン散乱されたものと、降着円盤による多温度黒体放射の和によって説明されることが分かっている。これに対して、GS1826-238 はつねにハード状態にある NS 連星だが、光度が  $\sim 10^{37}$  erg/s と高く、そのスペクトルが Aquila X-1 と同様に説明できるか不明だった。そこで「すざく」による GS1826-238 の 0.8 – 200 keV スペクトルを解析したところ、降着円盤の軸が視線方向から十分に傾いていると考えれば、一般的な光度、 $\sim 10^{36}$  erg/s のハード状態の天体と同様の描像で理解できることが分かった。

## コン 11a ガンマ線バーストにおける元素合成

藤林 翔 (京都大学 M2)

中性子連星合体時に作られる元素は、できる核種によっては崩壊によって電磁波を放射する可能性があり、重力波天体のフォローアップ観測のために重要となる。また、そもそも r-process という元素合成の過程がコンパクト連星合体で起こるかを確かめる上で、r-process が起こる場合の光度曲線を予言することは重要である。そこで、中性子星連星の合体時に期待される状況下で元素合成計算を行い、その元素組成を調べた。その結果、できる重元素のでき方が electron fraction  $Y_e$  に非常に依存することがわかった。

## コン 12a ブラックホール・中性子星連星の合体に対するスピンの傾きの影響

川口 恭平 (京都大学 M2)

ブラックホール・中性子星の連星合体は重要な重力波源であるとともに、sGRB のセントラルエンジンの候補としても注目されている天体現象である。ブラックホール・中性子星連星の合体過程のような、一般相対

論的效果が重要となる系では、その物理的振舞いについて解析的な議論をすることは難しい。したがって連星の各質量や、スピンといったパラメータが、重力波波形やその後の質量放出や降着円盤形成にどのような影響を及ぼすかは、系統的に数値相対論シミュレーションを行ってはじめて理解できる。これまでの BHNS 連星合体の数値シミュレーションでは、ブラックホールのスピンの向きと、連星系の軌道角運動量の方向(それぞれの軸の方向)が揃っている場合が考えられてきたが、連星の進化計算 (Population Synthesis) 結果 [1] では、スピンの向きが揃っていない (Tilted な) BHNS 連星が多く存在していることが示されている。しかしながら、こうしたスピンの傾きを考慮した数値相対論シミュレーションは現在世界でも Foucart et al. による限られたパラメータについてしか行われていない。F.Foucart et al.[2][3] による先行研究ではこうしたスピンの傾きが連星合体時に物質の precession を引き起こし、重力波や質量放出などに大きな影響を与えることが確認されている。本研究は、連星の各質量、スピンの大きさ、状態方程式といった、今まで研究されてきたパラメータに加え、スピンの傾きというパラメータを含めた BHNS 連星合体の系統的研究を行うものである。今回はその足がかりとして一般相対論的效果が重要になり、数値相対論が必要になるまでのブラックホール・中性子星連星の軌道進化を PN 近似を用いて調べた。それにより系のスピン傾きはその合体直前まで維持されることを確認した。さらに現在、数値相対論による計算を行っており、本発表ではその研究経過もあわせて発表する。

1. Belczynski et al. Astrophys.J. 682:474-486(2008)
2. F.Foucart et al. Phys. Rev. D 83, 024005(2011)
3. F.Foucart et al. Phys. Rev. D 87, 084006(2013)

## コン 13a 中質量ブラックホール形成の基礎的な数値シミュレーションの紹介

漆畑 貴樹 (東京大学 M1)

相対論的效果が発生する現象を理解する為にはアインシュタイン方程式を解く必要がある。しかし複雑な連立偏微分方程式の型をしており、厳密解はおろか数値的にも解くのが難しい。そこで時空を  $3+1$  形式に分解し、アインシュタイン方程式を数値的に解く事を目的として研究された分野が数値相対論である。当発表では、京都大学の関口雄一郎氏と柴田大氏による 2007 年の論文を通して、中質量ブラックホール形成の基礎となった数値シミュレーションを紹介する。また 2011 年、2012 年の論文を参照し、現在の中質量ブラックホール形成の研究状況の発表を行う。

1. Yuichiro SEKIGUCHI and Masaru SHIBATA. 2007. Progress of Theoretical Physics
2. YUICHIRO SEKIGUCHI AND MASARU SHIBATA. 2011. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL
3. Masaru SHIBATA and Yuichiro SEKIGUCHI. 2012. Progress of Theoretical Physics

### コン 14a 三次元の一般相対論的電磁流体力学 (GRMHD) シミュレーションによる降着する回転ブラックホールのジェットと磁場の幾何について

伊地知 翔真 (京都大学 M1)

回転していて磁場を持つコンパクト天体やその降着円盤は強いトロイダル磁場をつくり、非常に磁化したプラズマを相対論的ジェットに変える。重要なのは、ジェットの形成プロセス自身は non-dipolar 磁場に対して不安定であることだ。三次元の一般相対論的電磁流体力学 (GRMHD) シミュレーションをつくり、dipolar (二極) / quadrupolar (四極) 磁場の降着におけるジェット形成プロセスや成長の安定性を見た。dipolar モデルでは、強い非対称的なディスク乱流にも関わらず、生成されたジェットは  $10^3$  重力半径で角度はおよそ  $\theta \sim 10^\circ$  まで絞られ、Lorentz 因子は  $\Gamma \sim 10$  まで達しており、重要な崩壊や消失は見られなかった。逆に quadrupolar モデルでは、定常的で相対論的なジェット ( $\Gamma \geq 3$ ) は作られなかった。このように、降着する磁場の幾何が相対論的ジェット形成の重要な役割を行うことを議論していく。

1. McKinney J.C., & Blandford R.D., 2009, MNRAS

### コン 15a 相対論的 MHD ジェットの加速機構

杜 駿 (東京大学 M1)

本稿では相対論的 MHD ジェットの効率的な加速についてレビューした。相対論的ジェットは AGN やクエーサー、GRB において発生している相対論的な速度を持つ細く絞られたプラズマの流れであると考えられている。降着流によるエネルギーの供給等とともにこの現象を説明するモデルとして MHD 流れが広く議論されてきたが、軸対称定常流で相対論的な場合には電磁場のエネルギーが流体の運動エネルギーに効率的に変換されず、運動エネルギー優勢な観測結果を説明出来なかった。そのため、軸対称 MHD 流れの中での Poynting エネルギーから運動エネルギーへの変換機構が解析と数値計算の双方で調べられてきた。Komissarov et al.(2009)、Lyubarsky(2010) などより外部からの単純な境界条件でもって流れを制限した場合に Poynting エネルギーが十分に運動エネルギーに変換されることがわかったが、それは観測結果が要求する迅速な変換ではなかった。Fendt & Ouyed(2004) は磁力線の釣り合いを考慮せずに磁場に  $B_p r^2 \propto r^{-q}$  のべき乗の分布を与え、 $q > 0$  の場合に急激な加速が与えられることを示した。さらに、Toma & Takahara(2013) は外部との境界付近において効率的な加速を与える磁力線の形状の具体例を与え、MHD によって相対論的ジェットの運動エネルギー優勢を説明できる可能性を示した。

1. Toma, K., & Takahara, F. 2013, arXiv:1303.2744
2. Lyubarsky, Y. E. 2010, MNRAS, 402, 353

### コン 16a ブラックホール候補天体 4U 1630–47 の very high state での観測的研究

堀 貴郁 (京都大学 M1)

ブラックホール (BH) への降着流の理解は、超強重力場下における物理の検証のみならず、銀河中心核にある巨大ブラックホールの成長メカニズムを解明するために不可欠な、たいへん重要な課題である。このための最適な研究対象が BH 連星とよばれる、恒星と太陽の数倍～10 倍程度の質量をもつブラックホールからなる近接連星系である。

BH 連星からの X 線放射は、質量降着率によって大きく 2 つの状態間を遷移することが知られている。降着率が低いときは low/hard state と呼ばれる状態をとり、硬 X 線の強いべき型のエネルギースペクトルを示す。この成分は、BH 近傍の高温コロナ中の電子が円盤からの光子を逆コンプトン散乱することで生じると理解されている。降着率が高くなると円盤まわりのコロナが少なくなり、円盤からの黒体放射が支配的となって軟 X 線で明るい状態 (high/soft state) へ遷移する。このとき、降着円盤の内縁は最内縁安定円軌道まで伸びている。さらに質量降着率が大きくなり Eddington 限界光度近くに到達すると、very high state (VHS) というコンプトン散乱成分が支配的な状態をとる。しかしこの状態は珍しいためこれまで観測例が少なく、降着円盤やコロナの物理状態や幾何形状がほとんど理解されていない。このような高質量降着率下での BH 降着流の理解は、質量降着による急速なブラックホール成長を理解する上で鍵となるものである。

我々は 2012 年 10 月、X 線天文衛星「すざく」を用いて VHS にあつた BH 連星 4U 1630–47 を観測した。その結果、VHS にある BH 連星としては過去最高精度で、1.2–200 keV という広域にわたる X 線データを取得することができた。このエネルギースペクトルを降着円盤からの熱的放射と、コロナによる逆コンプトン散乱成分からなるモデルを使って解析したところ、円盤の内縁半径が最内縁安定円軌道より大きくなっているという証拠を得た。これは high/soft state からさらに質量降着率が上がると、降着流が新たな状態に変化することを示唆している。本講演ではスペクトル解析の詳細を説明し、VHS の物理状態について議論する。

1. Done, C., Gierliński, M., & Kubota, A. 2007, A&AR, 15,1

### コン 17a Failed SN における降着円盤からの放射の研究

中西 俊貴 (早稲田大学 M2)

ブラックホールなどの高密度コンパクト天体の周りには一般に降着円盤が形成されると考えられている。本研究では Failed SN と呼ばれる現象の後にできる降着円盤からの放射を計算した。これにより、重力波のカウンターパートとしての降着円盤の可能性を探した。基礎方程式を元に円盤の時間発展を追い、観測が可能であるかの考察を行った結果、 $10^{39}$  erg/s ものエネルギーを放出する事がわかり、MAXI での観測は十分に期待されるという結論がでた。この夏の学校では、本研究でのモデルやメソッド等を発表していきたい。

1. Woosley S. E., Heger A., 2012, ApJ, 752, 32

### コン 18c 「すざく」による ULX 天体 Holmberg IX X-1 のスペクトルの時間変動解析

小林 翔悟 (東京大学 M2)

Ultra Luminous X-ray source (ULX) は渦巻き銀河の腕に存在する X 線で明るく点源である。光度は  $L_X = 10^{39.5-41}$  erg/s と恒星質量 ( $\sim 10M_\odot$ ) ブラックホール (BH) の Eddington 限界光度  $L_{\text{edd}} \sim 10^{39}$  erg/s を大きく上回る [1]。撮像分光観測によるスペクトル解析から、中間質量 ( $\sim 100 - 1000M_\odot$ ) BH が  $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているとする説と [2]、恒星質量 BH からの超  $L_{\text{edd}}$  放射であるとすつ説 [3] が存在し、決着がまだついていない。

ULX のスペクトルは BH 連星と同様に Disk 型と Power Law (PL) 型という異なる状態を遷移することが知られている。前者は上に凸なスペクトルで、後者は 10 keV 付近で弱いカットオフを受けたべき関数的に伸びる硬いスペクトルである。特に後者については、降着円盤からの多温度黒体放射と、光学的に厚く  $\sim 3$  keV という比較的低温なコロナによる逆コンプトン散乱モデルでよく再現されることが知られている [4]。しかしながら、平均スペクトルでの議論に限られており、スペクトルの時間変動まで含めた議論はごく少数に限られている。そこで代表的な ULX である Holmberg IX X-1 の「すぎく」での観測データに着目した。2012 年 4 月と 10 月でそれぞれ 180 ks と 320 ks に分けた合計 500 ks の長時間観測が「すぎく」で行われ、過去に類を見ない高統計なデータが得られた。今回このデータから長期/短期スケールでのスペクトル変動が得られたため、光度変化を含めて PL 型スペクトルの解釈が正しいかどうかの検証を行った。結果、観測を通じて「光学的に厚く電子温度の低い」コロナによるコンプトン散乱のモデルは妥当であり、Holmberg IX X-1 が中間質量 BH で、 $L_{\text{edd}}$  程度で輝いているという解釈が時間変動を含めて可能であることが確認された。

1. Fabbiano 1989
2. Makishima et al. 2000
3. Mineshige et al. 2007
4. Miyawaki et al. 2006

## コン 19c 太陽系組成分布から見る重元素合成過程

山田 美幸 (お茶の水女子大学 M1)

私たちが構成する元素は、恒星内の自発的な核融合反応によって起こるものから、超新星爆発などで誘発的に起こるものまでであり、そのでき方は実に様々である。これまで、恒星内の元素合成については、組成分布をもとに様々な計算が行われ、各反応が起こるための具体的なプロセスはほぼ理解されてきた。しかし、鉄より重い重元素の合成過程に関しては、どこで、またどのように進行していったのか、観測データが少ない等の問題もあり、あまりわかっていない状況である。

本研究発表では、重元素が合成されるまでの過程を、組成分布図と照らし合わせ、現在考えられている様々な視点より紹介し、またそれらの過程の問題点についても考察する。

## コン 20c ガンマ線バーストジェット内部における放射輸送計算

柴田 三四郎 (甲南大学 D2)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) は宇宙で最も激しい現象の一つであり、放射されるエネルギーは  $10^{51}$  erg にもなる。そのた

め赤方偏移  $\sim 8$  といった宇宙論的遠方のものでも観測可能である。様々な観測的、理論的研究から GRB は大質量星の重力崩壊に付随して生まれる超相対論的なジェットに起因すると考えられている。しかしその放射メカニズム自体は未だ分かっていない。最近ではその放射メカニズムとして相対論的なジェットからの熱的放射が注目されており、精力的に議論されているが、相対論的なジェットからの熱的放射をきちんと調べるには親星や星周物質中におけるジェットの伝播とジェット中での光子の輸送の両方を考慮に入れ計算する必要がある。そこで我々は相対論的なジェット中での放射輸送計算を行った。その結果ジェット中での放射輸送を考慮に入れた場合には、光子が光学的厚さが 1 となる面 (光球面) から放射されると仮定するような場合とは異なるスペクトルが得られるということが分かった。この事はジェット中での放射輸送計算の重要性を示している。

1. Meszaros, P., 2006, Rep. Prog. Phys., 69, 2259
2. Lazzati D., Morsony B. J., & Begelman M. C., 2009, ApJ, 700, L47
3. Mizuta A., Nagataki S., & Aoi J., 2011, ApJ, 732, 26

## コン 21c 超相対論的流体における衝撃波中の放射輸送シミュレーション

石井 彩子 (東北大学 M2)

宇宙最大級の爆発現象であるガンマ線バースト (GRB) は、発見以来数十年が経過している現在もその発生メカニズムが解明されておらず、宇宙物理学の重要なテーマの 1 つである。GRB の起源となる天体現象として、大質量天体周辺で形成される相対論的なジェットが挙げられている。相対論的なジェットを起源とする GRB の可能性を探るには、相対論的な流体と放射輸送のカップリング計算が必要である。しかし、カップリング計算を行うにあたり、背景が相対論的な流体である場合に放射、吸収、散乱などを評価する共動系と観測者系の変換を矛盾なく行う手法は確立されていない。そこで本研究では、同一の衝撃波について衝撃波が静止している系と衝撃波が相対論的な速度で動いている系でそれぞれ放射輸送計算を行い、結果を同一の系で比較・検討し、相対論的な流体を背景場とする放射輸送計算中での異なる系の変換手法を構築する。

1. P. Meszaros. 2006. Journal of Progress in Physics.
2. H. Nagakura et al. 2011. Astrophysical Journal.

## コン 22c GRB ジェットからの重力波メモリ

中田 めぐみ (日本大学 M1)

ガンマ線バースト (GRB) において、相対論的なジェットにより重力波が放射されることが先行研究によって指摘されている。この放射にとり重力波は、ジェットのエネルギーと速度に応じて振幅が最終的に一定の値をもつので、「重力波メモリ」と呼ばれている。しかし、重力波はジェットの正面方向から角度  $\gamma^{-1}$  以上ずれないとアンチビーミングされることが知られている。なので、GRB と同時に重力波を観測することは難しいと考えられていた。今回私たちは、ジェットから放射されるガンマ線による重力波メモリを考察し、内部衝撃波モデルを用いて GRB ジェットからの重力波メモリの波形およびスペクトルを計算した。



そして、GRB と同時にジェットからの重力波メモリが観測される可能性について考察した。

1. Segalis and Ori, 2001, PRD, 64, 064018
2. Sago, Ioka, Nakamura and Yamazaki, 2004, PRD, 70, 10142
3. Kobayashi, Piran, and Sari, 1997, ApJ, 490, 92

### コン 23c 電波銀河 3C84 の VLBI 観測による電波強度とガンマ線強度の長期変動

千田 華 (東海大学 M1)

本研究の目的は、電波銀河 3C 84 からの電波強度とガンマ線強度それぞれの長期にわたる時間変動の相関を調べることで、電波とガンマ線の放射領域について物理的な考察を行なうことである。そのためにまず、2013 年 1 月 21 日に発生したガンマ線フレアの直前の 2013 年 1 月 15 日に、VERA 22 GHz で観測された 3C 84 のアーカイブデータを解析した。本解析により得られたデータイメージから、既に知られている 3 つのジェットコンポーネントが確認でき、中心核の C1 より 2mass ほど離れた C3 コンポーネントの方が明るい構造が確認できた。また、全フラックス密度は 26.0Jy と得られ、過去の 3 年間の VERA 22 GHz の観測データ (Nagai et al. 2010) と比べると電波強度は増大していることがわかった。一方、Fermi-LAT で観測された 3C 84 の母銀河 NGC 1257 のガンマ線モニターデータによる 2008 年から現在までのライトカーブでは、電波強度の時間変動のような長期にわたる増光は見られないが、2010 年にはその前後より 2.5 倍ほどフラックスが高くなっているのがわかる。1 日という短いスケールのガンマ線フレアに起因した電波変動は確認されていないが、観測開始から現在にいたる長期間でみると、電波とガンマ線の強度変動に何か関係がみられるのではないかと考える。今後はガンマ線フレア後から現在までの VERA 22GHz の観測データの解析を行い、今回のガンマ線フレアに起因した電波変動を調べ、また観測開始から現在までの長期間でのガンマ線と電波の強度変動から相互の関係について考察していきたい。

1. Nagai et al. 2012, MNRAS, 423, L122-L126
2. Nagai et al. 2010, PASJ, 62, L11-L15

### コン 24c VLBI による低光度 AGN M84 の観測的研究

中原 聡美 (鹿児島大学 M1)

低光度 AGN は、 $H\alpha$  輝線光度が  $10^{40} \text{ ergs}^{-1}$  以下で定義される、質量降着率の小さな活動性の弱い AGN である。そして、大多数の AGN はこの低光度 AGN であるため、AGN の普遍的な姿を知るのに重要な存在である。しかし、暗い天体であるため観測的研究が難しく、理解が進んでいない。本研究では低光度 AGN M84 について、VERA 22/43 GHz による 2 周波準同時、2 ビーム位相補償観測を用いて観測した。M84 は比較的我々の銀河系の近くにあり、中心ブラックホールの質量も大きく、視半径が大きいため、光度が低くても中心のコンパクトな領域を見る事ができると期待される。M84 から離角 1.5 度離れた明るい電波源 M87 を位相参照天体とする事で、M84 の検出を試みた。この観測結果を用いて、M84 の構造、輝度温度、スペクトル、ジェット速度といった情報を調べる事が本研究の目的である。本集録では、22 GHz の結果

1 エポックについて報告する。今回初めて VERA を用いて M84 を観測した結果、検出に成功し、M84 のシュバルツシルト半径の 1000 倍まで構造を分解してイメージを作る事ができた。構造については北側に微弱ながらジェット成分が伸びているのを確認できた。構造のサイズは解析結果のイメージでは確認できず、モデルフィットをして定量的に測定する必要がある。また、目的の情報を得るにはさらに多エポックで解析を進めていく必要がある

### コン 25c MAXI で探る Be 型 X 線連星パルサーの星周円盤の密度

高木 利紘 (日本大学 M2)

Be 型 X 線連星パルサーは主星が中性子星、伴星は Be 型星で、既知の大質量 X 線連星パルサーの 70% 以上を占める。Be 型星は、過去に一回でも水素の輝線が観測されたことのある B 型星で、e は可視光輝線を放射するという「emission」の意味である。水素の輝線 ( $H\alpha$ ) は、Be 型星の赤道面上にできる星周円盤から放射されている。星周円盤は粘性で外側へ広がっていくと考えられているが、生成過程やくわしい構造はよくわかっていない。星周円盤と中性子星の軌道が交わるところを中性子星が通るとガスが降着し、X 線の増光 (アウトバースト) が起こる。この X 線や  $H\alpha$  などの観測から星周円盤の構造が探られている [1]。全天 X 線装置 MAXI は 92 分で地球を一周しながら全天の約 90% を観測し続けることで、Be 型 X 線連星パルサーからのアウトバーストを常に監視しており、14 天体から合計 45 回観測している (2013 年 5 月 27 日現在)。

本講演では MAXI の観測から得られたアウトバースト X 線光度から、星周円盤の密度を求めた。観測された A 0535+262、GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 のアウトバーストのピーク光度を用いて、中性子星への質量降着率を求め、降着モデルを Bondi Accretion あるいは Roche Lobe による捕獲と仮定し、推定を行った。推定した A 0535+262 の密度は  $1.4 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  となり、Be 型星の  $H\alpha$  プロファイルによる星周円盤密度分布モデル [2] の密度  $3.0 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  と比較し、同等の値を得た。GX 304-1、GRO J1008-57、4U 0115+63 では求めた密度が、 $6.8 \times 10^{-16} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 、 $2.7 \times 10^{-15} \text{ [g/cm}^3\text{]}$ 、 $1.9 \times 10^{-14} \text{ [g/cm}^3\text{]}$  となり、軌道パラメータに近い A 0535+262 と GX 304-1 では、GX 304-1 のアウトバースト光度が A 0535+262 の半分になるので、密度が半分になり、GRO J1008-57、4U 0115+63 の密度も確からしい値を得ることが出来た。

1. Reig, Ap&SS, 332, 1, 1, (2011)
2. Silaj et al., Ap&SS, 187, 228, (2010)

### コン 26c 全天 X 線監視装置 (MAXI) による SFXTs 観測

榊原 大貴 (日本大学 M2)

全天 X 線監視装置 (MAXI : Monitor of All-sky X-ray Image) は、2009 年 7 月に国際宇宙ステーション (ISS) の日本の実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに搭載された。MAXI では、IGR J18483-0311 等のいくつかの SFXTs (Supergiant Fast X-ray Transients) 天体で受かっている。そこで、その他の SFXTs 天体でも増光現象が起こって

いるのではないかと考えた。その確認のため、SFXT 関連の論文から、SFXTs 候補天体をリストアップし、INTEGRAL や Swift/BAT などの他の衛星の観測をもとに、座標、flux、エネルギー領域を一覧にした。そして、MAXI の on-demand data を利用し、SFXTs 天体の座標近くに、その他の強い X 線源がないかを確認する。また、運用開始からの SFXTs 候補天体の座標の X 線強度変動を確認する。

### コン 27c MAXI/GSC のデータを用いた MAXI J1647-227 のスペクトル解析

小野寺 卓也 (日本大学 M1)

MAXI (Monitor of All-sky X-ray Image) とは、ISS (International Space Station) の日本実験棟「きぼう」の船外実験プラットフォームに設置された X 線観測装置である。MAXI の目的の 1 つは、ブラックホールや中性子星からのアウトバースト、また  $\gamma$  線バーストなどの X 線領域で突然明るく輝く突発現象を捉えることである。本研究では、MAXI が発見した新 X 線天体 MAXI J1647-227 の解析を MAXI/GSC のデータを用いて行った。各エネルギー帯のハードネスレシオを取ることで、本天体が軟 X 線領域 (2-10 keV) でスペクトル変化していることが確認できた。また、中性子星周りの降着円盤の最内縁半径と天体までの距離を仮定する事で、天体のおおよその傾き (視線角度  $\theta$ ) を見積もることができた。今後は、より詳細なスペクトル解析を行い、本天体の半径と質量、そして天体までの距離を算出することを目標としている。

1. 諏訪文俊. 2011.  
日本大学大学院 理工学研究科 物理学専攻 修士論文
2. The Astronomer's Telegram.  
<http://www.astronomerstelegam.org>
3. Mitsuda et al. 1984. PASJ 36,741-759

### コン 28c コンパクト連星の軌道決定に対する統計的手法

山田 慧生 (弘前大学 D2)

私は、浅田秀樹 (弘前大)、郷田直輝および山口正輝 (国立天文台) 諸氏との共同研究である、コンパクト連星の軌道決定に対する統計的手法について議論する。

X 線や  $\gamma$  線連星の伴星の正体は、中性子星なのかブラックホールなのか、未だ確定するに至っていない。この正体をつぎとめるには、連星の軌道要素決定が重要な鍵となる。位置天文連星に対する従来の軌道決定法 [1,2] の、実用上の問題を解決するために考案された統計的手法 [3] は位置測定の標準誤差  $\sigma$  が軌道長半径  $a_K$  より小さい場合に有効である。一方で、 $\sigma > a_K$  の場合には軌道要素の決定精度が悪くなるという問題があった。そこで今回、計算速度をあまり損なうことなく観測時刻の情報を取り入れることで決定精度を飛躍的に向上した。

1. H. Asada, T. Akasaka, M. Kasai, PASJ 56, L35 (2004).
2. H. Asada, PASJ 60, 843 (2008).
3. H. Iwama, H. Asada, K. Yamada, PASJ 65, 2 (2013).

### コン 29c pulsational pair-instability における質量放出

石井 達穂 (東京大学 M2)

pulsational pair-instability は、圧力を支えるために使われていたエネルギーが電子陽電子ペアの静止質量エネルギーに使われることで酸素燃焼の時に不安定を起こすが星全体を飛ばす爆発には至らず、pulsation しながら質量放出を繰り返す。これは pair-instability よりも少し軽い 40 – 60  $M_{\odot}$  の CO コアを持つ大質量星で起こる。放出された質量は互いに衝突し非常に明るく輝く可能性があるが、その光度は放出された質量、爆発エネルギーと pulsation の時間間隔に依存する。そこで本研究では恒星進化計算と流体力学計算を組み合わせて進化を求めることで pulsation 時の放出を詳しく調べた。ここでは 1 回の pulsation における放出質量を求めるために以下の方法をとった。まず、恒星進化計算で 1 回の pulsation の進化を計算し、pulsation 後の星の全エネルギーを求める。次に星の進化計算から得られたエネルギーと等しくなるように星の中心部にエネルギーを与え流体力学計算を行う。星の中心部で上昇したエネルギーは衝撃波となって外へ伝わり、星の表面付近の流体は加速してその一部は脱出速度を超える。そこで脱出速度を超えた質量を放出質量とする。次の pulsation の恒星進化計算は pulsation によって星が十分膨張したところから始め、まず放出質量分の質量を人為的に放出させ、その後星が収縮し始める。

この一連の計算を繰り返すことで我々は金属量が  $Z = 0.004$  で初期質量が 250  $M_{\odot}$  で炭素燃焼後の質量が 61  $M_{\odot}$ 、金属量が  $Z = 0.004$  で初期質量が 140  $M_{\odot}$  で炭素燃焼後の質量が 54  $M_{\odot}$  の 2 つのモデルについて pulsation 時における質量放出を計算した。この 2 つのモデルについてそれぞれ質量放出は最大で 4  $M_{\odot}$  および 1  $M_{\odot}$  であり、爆発エネルギーは最大で  $3.9 \times 10^{50}$  erg および  $3.8 \times 10^{49}$  erg であることがわかった。重力崩壊に至るまでに 3 回および 6 回 pulsation し、合計で 7.9  $M_{\odot}$  および 4.0  $M_{\odot}$  の質量が放出された。

1. Woosley, Blinnikov and Heger. 2007. Nature, 450, 390
2. Chatzopoulos and Wheeler. 2012. ApJ, 760, 154

### コン 30c 加速粒子を考慮した降着流

木村 成生 (大阪大学 D2)

質量降着率が小さい降着流は光学的に薄くなり、移流優勢降着流 (ADAF) が形成されると考えられている [1]。ADAF は非常に希薄かつ高温となるため、降着流内の物質は無衝突プラズマとなる。近年、その無衝突プラズマ中の磁気リコネクションにより、降着流内の粒子が加速されることが示唆された [2]。さらに、その加速粒子を利用して活動銀河核ジェットの形成を説明しようというモデルも提案された (中性子注入モデル [3])。降着流中で加速された陽子が背景の陽子と反応し高エネルギーの中性子を作る。この中性子が降着流から逃走してジェットの起源となるのが中性子注入モデルである。中性子注入モデルでは、降着流内には加速粒子が存在し、高エネルギー中性子が逃走することで降着流からエネルギーが抜き取られる。しかし、加速粒子や中性子の脱出を考慮に入れた降着流の研究はほとんど行われていない。そこで、本研究では加速粒子を考慮に入れて円盤の方程式を定式化し、定常解を求めた。本研究で用いたモデルでは、降着流の構造を決めるのに重要な 2 つのパラメータがある。加速粒子の「平均注入エネルギー」 $\gamma_{inj}$  と、「エネルギー

配分率」 $f_{\text{acc}}$ である。 $\gamma_{\text{inj}}$ が大きいとき、加速粒子は降着流から効率よく抜け出すことができるため、 $f_{\text{acc}}$ を大きくしても熱的粒子が支配的な降着流が形成される。しかし、 $\gamma_{\text{inj}}$ が小さいときは、加速粒子が降着流から抜け出る割合が小さいため、 $f_{\text{acc}}$ を大きくした場合には加速粒子が支配的な降着流が形成される。そして、これらの降着流の構造は移流優勢円盤の自己相似解を用いて理解できることがわかった。

1. Narayan R. and Yi I., 1994, ApJ, 428, L13
2. Riquelme M. A. et al., 2012, ApJ, 755, 50
3. Toma K. and Takahara F., 2012, ApJ, 754, 148

## 銀河・銀河団分科会

GALAXY M@STER —うっうー！てっぺん目指します—と\*’ワ’)と—

日時	<p>7月29日 14:30 - 16:30</p> <p>7月30日 13:30 - 14:00 (招待講演：井上 茂樹 氏) , 14:00 - 14:30 (招待講演：馬場 淳一 氏) , 14:30 - 15:45</p> <p>7月31日 9:00 - 10:15, 14:30 - 15:00 (招待講演：廿日出 文洋 氏) , 15:00 - 16:00 (招待講演：松下 恭子 氏) , 17:15 - 19:00</p>
招待講師	<p>井上 茂樹 氏 (韓国天文宇宙科学研究院) 「円盤銀河の何が問題か？－天の川銀河から遠方銀河まで－」</p> <p>馬場 淳一 氏 (東京工業大学) 「渦巻銀河ダイナミクス理論の進展と天の川銀河」</p> <p>廿日出 文洋 氏 (国立天文台) 「塵に埋もれた宇宙の星形成」</p> <p>松下 恭子 氏 (東京理科大学) 「「すざく」衛星による銀河団外縁部の観測」</p>
座長	<p>馬渡 健 (東北大学 D2)、本間 英智 (東北大学 D1)、大橋 聡史 (東京大学 M2)、嶋川 里澄 (総研大 M2)、世古 明史 (京都大学 M2)、豊内 大輔 (東北大学 M2)</p>
概要	<p>本分科会では、銀河系、近傍銀河、遠方銀河、銀河団全般について、観測・理論の両面において活発な議論を行いたいと考えている。近年、地上の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡の活躍、または SDSS 等の大規模サーベイによりこれまで知られていなかった様々な銀河の描像が明らかになってきた。この流れは、ALMA、HSC の本格運用の開始や GAIA、JWST、TMT、GMT といった次世代望遠鏡の登場によってより一層加速することが期待される。一方で、理論的研究もより効率の良い計算手法の開発と計算機の性能向上とが相まって急速に発展している。これによって様々な銀河の性質を計算機上で再現出来るようになり、理論から多くの観測事実を検証することが可能になっている。このようにこれからは銀河・銀河団を研究する上で非常に恵まれた時代であり、これから研究者を目指す我々に用意された可能性は無限である。だからこそ若い今のうちに近傍・遠方、理論・観測等の垣根を越え、理解を深めることは重要ではないだろうか。本分科会が、参加者にとって銀河・銀河団研究の現状を見つめ直し、自身の研究活動の可能性が広がる場になることを期待する。</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) は銀河・銀河団分科会で扱います。</p>

井上 茂樹 氏 (韓国天文宇宙科学研究院)

7月30日 13:30 - 14:00 A(サファイア)

## 「円盤銀河の何が問題か？－天の川銀河から遠方銀河まで－」

「我々が住んでいる天の川銀河は最も観測しやすい銀河であり、そのため円盤銀河は最も理解の進んでいる銀河の種類である」という文言がよく耳目に触れる。私自身も研究提案書などを書く際には似たような文章をついつい書いてしまう。だが、はたして本当にそう言えるだろうか？例えば、実は銀河中心距離や銀河回転速度の測定は、宇宙年齢や暗黒エネルギー密度などの宇宙論パラメータの測定よりも精度が悪かったりする。天の川銀河のバルジの質量も観測ごとでバラバラだったりもするし、thick disc や球状星団といった、古くから存在がわかっているながら形成プロセスが未だに不明な構造もある。そもそも力学的に低温な構造である銀河円盤は、銀河同士の激しい衝突・合体を基調とする階層的構造形成論とは一見すると相反するものであるとも言えるし、一体どのようにして形成されたのであろうか？

夏の学校は若い学生さんが多く集まる場であり、まだ研究テーマも決まっていような参加者も多いと思います。そんな場ではより多くの人に話題を提供できるような広く浅い内容の方が良いかもしれないと考えました。本講演では円盤銀河研究の現状や今後の展望に関して、天の川銀河から遠方宇宙の銀河形成段階にいたるまで、円盤銀河に関するできるだけ広い範囲をレビューする予定です。出来るだけ新しい話題を紹介し、若い人たち（私もまだ若いはずですが）が今後解決して行くべき円盤銀河形成論の問題点を紹介する予定です。

馬場 淳一 氏 (東京工業大学)

7月30日 14:00 - 14:30 A(サファイア)

## 「渦巻銀河ダイナミクス理論の進展と天の川銀河」

渦巻銀河の渦状腕を形成し維持する物理機構は、銀河物理学の最大の謎の一つである。その最も有力な説に「密度波仮説」がある (Lin & Shu 1964, 1966)。これは恒星系円盤を連続体と見なし、渦状腕を恒星系円盤の表面を伝わる定常的な「疎密波」とする仮説である。Lin & Shu によるきつく巻き付いた渦状腕の局所線形近似による密度波の分散関係の導出を契機に、その後、大局モード解析、減衰や励起機構の解析など、恒星系渦状腕に関する様々な理論研究が行われてきた。しかし、密度波の物理過程については未解決の問題も多く、十分に解明されたとは言いがたい。

一方で、今後、天の川銀河の恒星系の大規模撮像・分光サーベイやアストロメトリが進み、個々の星の位相空間データから、渦状腕構造に関して科学的研究が行われることになるだろう。したがって、古典的な線形・定常・連続体という扱いから脱却し、非線形・非定常・多体系の視点から、渦巻構造の持続性と維持・増幅機構、渦状腕と星間ガスの相互作用などの解明を試みるのが、渦状腕構造の真の解明、そして渦巻銀河ダイナミクスの新展開へと導くと考えられる。

このような研究背景のもと、私は特に渦巻銀河・棒渦巻銀河のダイナミクスに着目し、恒星系円盤の重力多体系ダイナミクスと、星間ガスの自己重力、放射冷却や加熱過程、星形成や超新星爆発といった重要なプロセスを組み込んだ銀河円盤全体の高精度3次元数値シミュレーションを行い、天の川銀河の棒状構造や渦状腕構造や multi-arm 型渦巻銀河のダイナミクスなどに関する研究成果を挙げてきた。本講演ではこれまでの渦状腕研究をレビューしながら、最新の天の川銀河の大規模シミュレーションの紹介や今後の計画を述べる予定である。

廿日出 文洋 氏 (国立天文台)

7月31日 14:30 - 15:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「塵に埋もれた宇宙の星形成」

遠方宇宙における星形成活動の研究は、これまで主に可視光や近赤外線を使って進められてきました。しかし、可視光や近赤外線はダストによって大きく吸収を受けるため、宇宙における星形成活動の多くが見逃されている可能性があります。そこで重要なのがミリ波・サブミリ波です。ダストに吸収された星の光は、赤外線～ミリ波・サブミリ波の波長帯で再放射されます。このダストからの放射を観測することによって「埋もれた」星形成活動を暴き出すことができます。

私たちのグループは、南米チリにあるアステ望遠鏡 (Atacama Submillimeter Telescope Experiment; ASTE) を用いてサーベイ観測を行い、1000 個を超えるミリ波・サブミリ波で明るい銀河「サブミリ波銀河」を検出しました。サブミリ波銀河はダストに厚く覆われた巨大な銀河で、星形成率は数  $100\text{--}1000 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$  という非常に活発な活動を行っています。その激しい星形成や赤方偏移分布 ( $z \sim 2\text{--}3$ ) などの特徴から、現在の宇宙に存在する大質量楕円銀河の祖先ではないかと考えられており、銀河進化を研究する上で重要な種族です。

一方で、サブミリ波銀河は特殊な銀河であり、宇宙に存在する銀河の全体像を捉えるには、ミリ波・サブミリ波で暗い、より「一般的な」銀河を観測する必要があります。そこで期待が寄せられているのがアルマ望遠鏡 (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array; ALMA) です。現在建設と並行して初期科学運用が行われていますが、既に世界最高性能のミリ波・サブミリ波望遠鏡です。私たちのグループは、アルマ望遠鏡を使って従来よりも約 10 倍暗い銀河を検出し、個数密度を測定しました。検出された銀河はサブミリ波銀河と比較して穏やかな星形成活動をしていると考えられます。従来見つけていた爆発的星形成銀河と、一般的な星形成をつなぐ銀河が検出されたことは、銀河の形成過程や宇宙の星形成活動を明らかにする上で大きな前進です。

本講演では、ダストに埋もれた星形成活動のこれまでの研究、および今後の展望についてお話しします。

松下 恭子 氏 (東京理科大学)

7月31日 15:00 - 16:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「「すぎく」衛星による銀河団外縁部の観測」

銀河団は、重力的に束縛されたものとしては宇宙で最大の構造であり、冷たい暗黒物質の重力により形成される。銀河団の力学的進化の時間スケールは宇宙年齢と同程度である。よって、銀河団は現在も、宇宙の大規模構造のフィラメントに沿った銀河団同士の合体や小さな系の降着により成長を続けていると考えられている。銀河団では、バリオンのほとんどは、数千万度の高温プラズマとして、銀河団を満たしている。そのため、銀河団はバリオンが主要な役割をはたす熱的、化学的進化の実験室ともいえる。バリオンが冷えて星が形成され、銀河が形成される。超新星爆発や活動銀河核の放出するエネルギーが銀河の外のバリオンにフィードバックされ、銀河団ガスの温度やエントロピーを増加させる。さらに、超新星爆発によって合成された重元素が銀河間空間に供給される。したがって、銀河団ガスの温度やエントロピー、重元素の分布を調べることで、銀河団の熱的な歴史や星形成史を探ることができる。

銀河団の力学的半径であるヴィリアル半径は、大規模構造と銀河団の境界ともいえる。よって、ヴィリアル半径に近い領域では、最近の銀河団進化の情報を保持しているはずである。そもそも、銀河団のほとんどの暗黒物質と銀河団ガスは銀河団の外縁部に存在している。2005年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星すぎくは低く安定するバックグラウンドを誇る。すぎく衛星を用いて、銀河団のヴィリアル半径までの銀河団全体の高温ガスの物理量を求めることが可能となった。このすぎく衛星の成果を紹介する。

## 銀河 01a NICT 鹿島-小金井基線 VLBI を用いた S/X 帯での Sgr A\* 強度モニター観測

竹川 俊也 (慶応義塾大学 M1)

活動銀河核のエネルギー源は銀河中心の数百万から数十億太陽質量の超巨大ブラックホールが作り出す莫大な重力エネルギーであり、一般にその中心核光度は  $10^{42}$  erg/s 以上と非常に明るい。一方で、我々の住む銀河系も中心に 400 万太陽質量の超巨大ブラックホール Sgr A\* を有するが、その光度は  $10^{33}$  erg/s 程度と桁違いに低い。その原因として考えられるのが異常に小さい質量降着率と放射の非効率性である。近年そのブラックホールに落ちつつあるガス雲 G2 が発見され [1]、最新の予想では G2 cloud が Sgr A\* に最接近するのは来年の 3 月とされている。G2 cloud の落下は銀河系中心ブラックホールの周囲の環境に変化をもたらし、それに伴った激しい活動現象が期待されている。人類は未だブラックホールに物が落ちる様子の一部始終を観測したことがなく、これは極めて貴重な経験である。そこで私は、普段活動性を示さない電波での光度変動を捉えようと情報通信研究機構 (NICT) の鹿島-小金井基線 VLBI システムを用いて 8GHz(X 帯) および 2GHz(S 帯) での Sgr A\* の強度モニター観測を今年 2 月から実施している。Narayan らのモデルに従えば、S/X 帯では G2 cloud 落下に伴った大きな強度変動が期待され [2]、その変動の様子から銀河系中心ブラックホールの構造にある程度制限をつけることができる。DOY129 の時点では 8GHz での Sgr A\* の強度は  $0.49 \pm 0.05$  Jy で安定しており、際立った変化は確認されていない。なお 2GHz ではフリッジが検出できていないが、G2 cloud の落下に伴い今後検出できることが期待される。今後もできる限り多くこのモニター観測を行い、少なくとも来年の 5 月まではこの観測を継続していく予定である。

1. Gillessen, S. et al. 2012, Nature, 481, 51
2. Sadowski, A. et al. 2013, arXiv/1301.3906

## 銀河 02a Sagittarius Stream structure 方向の halo stars による Milky Way oblate halo structure の示唆

鈴木 雄太 (東北大学 M1)

私は銀河系の形状・構造を主としてキネマティックな情報から探求していくことを始めたところである。今回は Newby et al. 2013 が解析に用いた、Sagittarius Stream 構造方向に見える星のうち実際にはその構造に属しておらず銀河系のハロー (恒星ハロー) に属していると判断されるものの空間分布のデータを、疑似的に再現し、彼らがこの分布を得るために用いた Hernquist halo (stellar halo) model と異なる 2 つの halo model にフィッティングのし直しを行った (NFW model, Einasto model)。その結果、信頼性の点において多少の解析結果の不確かさがあるにせよ、halo model の関数形を一意に決定するフリーパラメータを物理的に意味のあるものとしてそれぞれのモデルで得ることができた。とくに、ハローの力学的な形状を表すと解釈される軸比  $q$  の値に関しては、どちらのモデルに対しても  $q=0.5$  がベストフィットし、Newby et al. 2013 が解析の結果見積もった  $q=0.53$  と consistent であると判断されると考える。今後はこの結果を他の研究、より具体的には rotation curve を説明するベストフィットハロー/ディスクモデルを見積もる研究

といったものに生かしていく予定である。

## 銀河 03a 銀河面上からの軟 X 線背景放射の研究

佐藤 寿紀 (首都大学東京 M1)

0.4~1.0 keV の軟 X 線背景放射は、その 40 % が銀河系外由来の成分 (CXB) であり、銀河面領域においては高密度の星間ガス ( $> 10^{21}$  cm $^{-2}$ ) により、その成分からの寄与はほぼ完全に吸収されると考えられた。しかしながら、ROSAT による X 線全天サーベイの結果は、その吸収による減少分はたかだか 20 % であり、むしろその埋め合わせとなる未知の放射源の存在がすることを示唆している (McCammon & Sanders 1990)。

時代は移り 2000 年代、軟 X 線バンドに高い感度を持つ Suzaku による ( $l, b = (235^\circ, 0^\circ)$ ) 方向の観測で、高銀緯にはみられない  $\sim 0.9$  keV の衝突電離平衡プラズマで近似できる bump 状の放射を発見し、この成分が少なくともこの領域においては CXB の減少を埋め合わせていることを示した (Masui et al. 2009)。

そして現在、我々は Suzaku の銀河面領域を観測したアーカイブデータを用いることで、新たに 14 領域から同様の放射を検出し、この bump 状放射が銀河面上に一様に存在する”新たな軟 X 線背景放射”であることを示唆する結果を得た。

1. Masui, K., Mitsuda, K., Yamasaki, N. Y., Takei, Y., Kimura, S., Yoshino, T., & McCammon, D. 2009, , 61, 115
2. McCammon, D., & Sanders, W. T. 1990, , 28, 657
3. McCammon, D., et al. 2002, , 576, 188

## 銀河 04a 2 点相関関数を用いた活動銀河核の住環境への示唆

水野 翔太 (京都大学 M1)

活動銀河核 (AGN) とは、銀河核中心にある巨大ブラックホールに大量のガスが降着し、明るく輝く現象である。AGN の空間クラスタリングの性質は、AGN の存在するダークマターハローの性質を反映するため、AGN の住環境を理解する上で貴重な情報をもたらす。本発表はまず、X 線で選択された AGN の 2 点相関関数の現状についてレビューする。X 線での観測は、AGN の種族のうち多数を占める「隠された AGN」(2 型 AGN) に対しても、完全性が高く効率的な探査を実現する。cosmic variance の影響を避けるためには、広い面積を十分な深さで多波長探査する必要がある。そのような探査領域として、COSMOS と Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) が知られている。相関関数の大きさが 1 となる距離を「相関長」とよび、クラスタリングの強さを表す指針となる。Gilli et al.(2009) は、COSMOS 領域の X 線 AGN を用いて赤方偏移パラメータ  $z \sim 1$  における相関関数を計算し、その相関長を  $r_0 = 8.6h^{-1}$  Mpc と求めた。これは、同じ赤方偏移における大質量銀河 ( $\geq 3 \times 10^{10} M_\odot$ ) の相関長とほぼ同じであった。また、サンプルを 1 型 AGN と 2 型 AGN にわけて調べたところ、それぞれの相関長は誤差の範囲で一致し、両者を同じ種族とする「AGN 統一モデル」と矛盾



しない結果となった。さらに  $\Lambda$ CDM モデルから得られるダークマター相関関数と AGN 相関関数とを比較することにより、AGN の住むダークマターハローの質量の下限値を  $2.5 \times 10^{12} h^{-1} M_{\odot}$  と求めた。SXDS 領域には  $z \sim 1.5$  に大規模構造が存在し、COSMOS より高赤方偏移側での空間相関の調査が可能である。また分光同定率が高く (Akiyama et al. 2013, in prep.), より大きなサンプルを用いた精度よい議論が可能である。本発表では、我々の進めている、SXDS 領域における AGN 相関関数の研究結果についても報告する。

1. Gilli, R., et al. 2009, A&A, 494, 33
2. Peebles, P. J. E. 1980, The Large Scale Structure of the Universe (Princeton: Princeton Univ. Press)

## 銀河 05a 銀河の激動進化期における分子ガス探査

世古 明史 (京都大学 M2)

銀河は星やガス、ダストの集合体である。星は分子ガスが集まった分子雲内で作られることを考えると、銀河内の分子ガスを調べることは銀河進化の理解に不可欠であると言える。また、ダストも大質量星の超新星爆発に伴って増加していき、水素分子形成や星間空間の冷却を通して星形成に重要な役割を果たすため、銀河進化に大きく寄与する。近年、感度の良い電波望遠鏡により遠方銀河の分子ガスの観測がようやく行われるようになってきている。またハーシェル宇宙望遠鏡の深い観測により遠方銀河のダストの研究も可能になっている。

本発表ではアタカマ大型ミリ波サブミリ波干渉計 (ALMA) と野辺山 45m 宇宙電波望遠鏡を用いて行った、銀河の激動進化期 ( $z \sim 1.5$ ) にある星形成銀河の分子ガス観測の結果を報告する。観測対象の一部はハーシェル宇宙望遠鏡によるダスト放射の観測も行われており、分子ガス質量とダスト質量の比の赤方偏移進化について制限を加えることができた。また ALMA の高分解能観測から、楕円銀河の形成過程と考えられる結果も得られ、それについても紹介する。

1. Tacconi, L. J. et al. 2013, ApJ, 768, 74
2. Inoue, A. K. 2003, PASJ, 55, 901
3. Daddi, E. et al. 2010, ApJ, 713, 686

## 銀河 06a High Redshift における銀河の環境依存性

加藤 裕太 (東京大学 M1)

Spectroscopic identification of a protocluster at  $z = 2.300$ : environmental dependence of galaxy properties at high redshift (Steidel et al. 2005) をレビューする。本論文に述べられている HS 1700+643 という領域について現在行っているの解析についても可能であれば講演で触れたいと考えている。以下に本論文の概要を示す。

銀河形成の過程はラージスケールの環境に強く依存する。たとえばラージスケールの中でも最も高密度な領域は最も早い銀河形成をすると期待される。銀河クラスターの統計的な観測が数多く行われ、より赤く、星質量が大きい銀河は、より強くクラスタリングしているということが示されてきた。近傍宇宙における早期型銀河やクラスターの性質や、中間赤方偏移における“フィールド”(高密度領域ではない領域) に注目する

ことで、これらの銀河の銀河形成の時期や違いを環境の関数として調べようという試みが過去 30 年間続けられてきた。これらの研究は事実上、早期型銀河はそのほとんどの星を  $z > 2$  で作り上げ、その後は穏やかな進化をしているということを示したが、銀河形成の環境依存性という点に着目した結果はあまり得られなかった。

本論文では、まず  $z = 2.72$  の QSO HS 1700+643 フィールドにおいて赤方偏移  $z = 2.3 \pm 0.4$  の範囲で星形成銀河を探索するために行われた赤方偏移サーベイから、 $z = 2.300 \pm 0.015$  に銀河の高密度領域を発見した。分光観測から同定されたこの高密度領域の銀河を含むトータル 72 の銀河の遠紫外線から近赤外線までの詳細な SED モデリングの結果と、我々が得た  $K_s$  バンドのデータと *Spitzer*/IRAC 測光観測データを用いた結果、この領域は  $z \sim 0$  で質量  $\simeq 1.4 \times 10^{15} M_{\text{sun}}$  のピリアライズされたリッチ銀河クラスターになるという結論を得た。またこの高密度領域にある銀河は、高密度領域の外にある銀河と比べて、星の質量と年齢が  $\sim 2$  倍大きいということが分かった。この結果は高赤方偏移において銀河の性質をラージスケールの環境の関数として初めて直接的に比較したものである。今回の結果はラージスケール ( $> 10$  Mpc) において見られる高密度領域における構造形成の加速というシンプルな理論的予測に一致している。この原始銀河団は、 $z = 2.30$  までに  $> 10^{11} M_{\text{sun}}$  を持つような古い星が支配的な銀河を多数含んでいると考えられる。

1. Steidel et al. 2005. *Astrophys. J.*, 626:44-50, 2005 June 10
2. Shapley et al. 2005. *Astrophys. J.*, 626:698-722, 2005 June 20
3. Adelberger et al. 2004. *Astrophys. J.*, 607:226-240, 2004 May 20

## 銀河 07a Abundance Matching による $z \sim 7$ の銀河の性質と進化の研究

川俣 良太 (東京大学 M1)

近年、観測技術が向上してきたことにより、 $z \sim 7$  から 8 の銀河の性質が明らかになってきた。大きさが測られている銀河の中で、最遠方なのは  $z \sim 7$  の銀河である。これらの銀河は、非常にコンパクトで星生成が活発であることが分かっている。この研究では、その大きさが測られた  $z \sim 7$  の銀河についてより詳細な性質を調べていく。この研究で用いる Abundance Matching と呼ばれる手法は、銀河の明るさとそのダークマターハローの質量の間の対応関係を求めるものである。これにより  $z \sim 7$  の銀河のハロー質量を求め、星生成率やハロー半径と組み合わせることによって、この銀河の性質を明らかにした。すると、この銀河は近傍の銀河に比べ、材料となるガスの多くがまだ星となっていないことが分かった。さらに  $\Lambda$ CDM モデルによってハローを進化させることにより、このハローが現在の宇宙で銀河団スケールに成長していることも明らかになった。

1. Oesch.P.A., et al.2010, ApJ, 709, L21
2. Kennicutt. R. C. Jr. & EvansN. J. II Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2012. 50:531
3. Mo.H.J.&White.S.D.M.2002, Mon.Not.R.Astron.Soc., 336, 112

## 銀河 08b SEDS/UDS 領域における $K - [3.6]$ 赤銀河探査 $z > 5$ の passive 銀河? ~

馬渡 健 (東北大学 D2)

我々は Spitzer Extended Deep Survey (SEDS) の観測領域の一つである UDS 領域において、 $K - [3.6]$  の色で赤い銀河の探査を行った。同領域は可視から近赤外にいたるまで多波長に渡って様々なサーベイが行われてきた領域である。特に広視野かつ深い赤外観測の組み合わせ (SEDS と UKIDSS) は、 $z > 5$  の赤い銀河を含む新しい銀河種族の探査を可能にするものと考えられる。我々は  $K - [3.6] > 1.3$  の赤い色を持つ天体を計 65 天体選出し、それらの性質について調べた。これらのサンプルの中には (1)  $z > 5$  の受動進化期に入りつつある大質量銀河 (2) あらゆる赤方偏移のダストで赤い銀河 (3)  $z \sim 5$  の星形成/輝線銀河 (4) AGN の 4 種類の銀河が含まれると予想される。我々は  $[3.6] - [4.5]$  と  $K - [3.6]$  の 2 色図上での分布や MIPS/24 $\mu\text{m}$  検出の有無などを用いて、 $K - [3.6]$  赤銀河の物理性質によるグループ分けを試みた。その結果、比較的信頼性の高い  $z > 5$  の passive 銀河候補を計 10 天体選出した。我々のサンプルは先行研究である  $H - [4.5]$  赤銀河に比べて、数が多い/性質に制限がつけやすい、といった利点があり、重要なサンプルと位置づけられる。

1. Ashby, M. L. N. et al., 2013, ApJ, 769, 80
2. Caputi, K. I. et al. 2012, ApJ, 750, 20
3. Huang, J.-S. et al. 2011, ApJ, 742, 13

## 銀河 09a アンドロメダ銀河のダークハロー構造

林 航平 (東北大学 D2)

アンドロメダ銀河は、銀河系に最も近い大質量円盤銀河である。この質量スケールにおけるダークハロー構造を解明することは、銀河の形成と進化におけるダークマターの役割を知る上で重要になる。

アンドロメダ銀河ダークハロー構造に関する研究では、ハロー領域に分布している球状星団や矮小銀河の視線方向の空間分布と速度情報に基づいて一般的に解析される。ところが、これまでの先行研究ではダークハローの総質量に焦点を当てており、さらに採用するモデルとして恒星系やダークハローの密度分布を最も簡単な球対称と仮定したものしか無かった ([1] など)。一方で、Cold Dark Matter (CDM) 理論に基づく階層的構造形成シミュレーションの結果からは、銀河系スケールのダークハローの形状は非球対称であり、その形状はダークマターの合体・集積の歴史を反映していることが示唆されている ([2] など)。

そこで我々は、Hayashi & Chiba (2012)[3] で構築した軸対称モデルを採用し、それをアンドロメダ銀河における最新の球状星団と矮小銀河の運動データに適用して、ダークハローの形状に対する議論を行った。その結果、アンドロメダ銀河ダークハローは、円盤に対して垂直方向に長軸を持つプロレイトな形状をしている確率が高いことがわかった。さらに矮小銀河がその長軸方向に非等方に分布していることから、その方向にダークマターがフィラメント状に存在し、それに沿って物質降着が行われた間接的証拠を得ることができた。この結果は銀河系スケールにおける CDM 理論の予測と一致しており、アンドロメダ銀河ハローの力学進化に重要な知見を与える事ができた。

1. Watkins et al. 2010. MNRAS, 406, 264

2. Libeskind et al. 2005. MNRAS, 363, 146
3. Hayashi and Chiba 2012. ApJ, 755, 145

## 銀河 10a 棒渦巻銀河における巨大分子雲の形成と進化

藤本 裕輔 (北海道大学 D1)

我々は棒渦巻銀河における巨大分子雲の形成と進化を調べるため、棒渦巻銀河 M83 をモデルとした三次元の高分解能シミュレーションを行った。50kpc のシミュレーション領域に対して、分解能は約 3pc である。我々は棒状構造部、渦状腕、円盤領域などの棒渦巻銀河の各領域における巨大分子雲の性質と、巨大分子雲の進化を追うことで得られる分子雲衝突の頻度などを調べた。分子雲衝突の頻度は領域によって大きく異なり、棒状構造部、渦状腕、円盤領域の順で高いことがわかった。また、各領域における巨大分子雲の性質もわずかに異なり、棒状構造部や渦状腕では分子雲の重力的な束縛が円盤領域に比べてわずかに弱いことがわかった。我々は、観測で示唆されている棒渦巻銀河における星形成活動の違いを分子雲衝突頻度の違いで説明できる可能性があることを明らかにした。

1. Nimori, M., Habe, A., Sorai, K., et al. 2012, MNRAS, 393
2. Momose, R., Okumura, S. K., Koda, J., & Sawada, T. 2010, ApJ, 721, 383

## 銀河 11a ダストによる吸収と再放射を考慮した銀河のスペクトルエネルギー分布モデルの構築

河北 敦子 (名古屋大学 M1)

銀河の構成要素である星は進化の過程で核融合反応により重元素を形成する。そして、星で生成された重元素が宇宙空間に放出されることにより、銀河自体もその化学組成を変化させていく。これを銀河の化学進化と呼ぶが、これは星形成の歴史 (星形成史) に密接に関係しており、銀河進化について理解する上で非常に重要である。星は進化の各段階で星間空間に重元素を放出し、その多くは星間空間で固体微粒子 (ダスト) として存在している。ダストは紫外線や可視光を吸収し、それを赤外線として再放射する性質がある。本研究では、星の放射に対するダストによる吸収とダスト粒子が吸収したエネルギーの再放射を考慮することにより、化学進化と整合的な銀河のスペクトルエネルギー分布 (SED) モデルを作成した。ダストによる吸収のモデルとして Calzetti et al. (2000), Cardelli et al. (1989), Pei (1992) を、またダストによる再放射には Dale et al. (2001), Dale & Helou (2002) の経験的モデルを採用した。作成した SED モデルから、銀河年齢の関数として銀河内の重元素量が求まり、ダストの減光、再放射も重元素量と整合的に計算できる。さらにこれを用いることで、高赤方偏移銀河の星形成率や金属量、ダスト量など、重要な物理量を推定することができる。

## 銀河 12a Baryonic Tully-Fisher relation and star formation rate

小林 将人 (名古屋大学 M1)

We investigated the relation between rotational velocity, baryonic mass, and star formation rate (SFR) for several sample galaxies, and found a fundamental plane in three dimension on which those galaxies are located. In order to understand the galaxy evolution, we first need to investigate physical properties of galaxies. Many discussions have already been made and shown as a form of scaling laws that connect two physical properties of galaxies, such as the Tully-Fisher relation, the baryonic Tully-Fisher relation, star-formation main sequence, the Schmidt-Kennicutt law, and so on. In reality, however, they exist separately. Therefore, when it comes to understanding and determining the galaxy evolution, it is essential to combine those scaling laws to construct a unified theory that explains the galaxy evolution universally in terms of their physical properties. In this study, we compiled observational data for 130 galaxies to confirm the baryonic Tully-Fisher relation (BTFR), star-formation main sequence, and lastly found a fundamental plane in three dimension described by  $\log \text{SFR} = -3.78 \log V_{\text{rot}} + 1.99 \log M_{\text{bar}} - 11.2$ . This would be the first step to see what properties we need to concern primarily to establish the unified theory.

1. Tully, R.B., & Fihser, J.R. 1977, *A&A*, 54, 661
2. McGaugh, S.S., & Schombert, J.M., & Bothun, G.D., & Blok, W.J.G. 2000, *APJ*, 533, L99
3. Ishikawa, H.J. 2013, Master Thesis, Nagoya University

## 銀河 13a ALMA を使った NGC1068 における高密度ガスの物理状態診断

谷口 暁星 (東京大学 M1)

本研究では、ALMA の初期科学観測 (Cycle 0) における 2 型セーフアート銀河 NGC1068 の Band3, 7 での高感度観測によって、高密度ガストレーサー分子である  $^{13}\text{CO}$ , CS,  $\text{C}^{18}\text{O}$  を高い S/N 比で検出した。今回の観測によって得られたのは、 $^{13}\text{CO}(J=1-0)$ ,  $^{13}\text{CO}(J=3-2)$ , CS( $J=2-1$ ), CS( $J=7-6$ ),  $\text{C}^{18}\text{O}(J=1-0)$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}(J=3-2)$  の 6 輝線である。さらに、既存の干渉計では感度不足のため困難であった、NGC1068 の中心領域 ( $\sim 5$  arcsec) をこれらの輝線で 2 つのノットに空間分解することに成功し、各ノットにおける 6 輝線の輝線強度比を求めることができた。東側のノットにおける  $^{13}\text{CO}(3-2)/^{13}\text{CO}(1-0)$  の輝線強度比は輝線温度換算で  $3.7 \pm 0.5$  であった。これは近傍の星形成領域として最大規模の 30 Doradus における比と同程度に高いことが示され、中心領域の数 100pc スケールという広範囲にわたって高い輝線強度比が得られたことは興味深い結果である。この結果の意味する物理状態を解析するために 6 輝線の輝線強度を RADEX を用いて non-LTE 解析した結果、ガスが高密度であり、かつ中心領域内の空間分布が非対称であることが示された。これはガスが高温高密度であり、かつ AGN からのショックのような非対称な加熱機構を示唆するものである。

1. Krips, M., Martín, S., Eckart, A., et al. 2011, *ApJ*, 736, 37
2. Tsai, M., Hwang, C., Matsushita, S., Baker, A. J., Espada, D. 2012, *ApJ*, 746, 129

## 銀河 14a X 線観測衛星「すざく」を用いた低光度 AGN (NGC 1566, NGC 4941) の観測

川室 太希 (京都大学 M2)

銀河中心の巨大ブラックホールを囲むとされているドーナツ状に分布したダスト (ダストトラス) は、降着円盤へのガス供給源であり、活動銀河核 (AGN; Active Galactic Nucleus) の観測的性質を決定する重要な構造物である。また、トラスが中心核からの X 線に照らされて発生するコンプトン反射成分は、10 keV 以上の宇宙 X 線背景放射 (CXB; Cosmic X-ray Background) に大きく寄与することが知られている。CXB の起源を定量的に理解するためには、トラスの形状・水素柱密度が、AGN 光度に対してどのような依存性をもつかを確立する必要がある。X 線観測衛星「すざく」によって得られる AGN の広域同時 X 線スペクトルは、トラスの幾何学構造を探るために非常に有効であるが、低光度 AGN ( $L_X \sim 10^{42} \text{ erg s}^{-1}$ ) については、その硬 X 線サンプルの少なさから、これまで十分に調べられてこなかった。今回、我々は、X 線観測衛星 *Swift*/BAT 58 か月カタログの中から、十分な硬 X 線強度をもちながら、これまで広域 X 線スペクトルの取得がされていなかった低光度 AGN NGC 1566 (type 1;  $z=0.0050$ ) と NGC 4941 (type 2;  $z=0.0037$ ) を「すざく」により追求観測し、両天体から過去最高精度のデータを取得した。「すざく」と BAT 70 か月カタログによって得られた 0.5–195 keV のスペクトルは、(吸収を受けた) 直接成分、周辺ガスからの散乱成分、コンプトン反射成分、および星生成起源と考えられる光学的に薄いプラズマからの放射成分の和でよく説明できた。観測されたスペクトルからはトラス起源と考えられる鉄の K 狭輝線が検出され、Ikeda et al. (2009, *Apj*, 692, 608) による数値モデルとの比較から、NGC 4941 においてトラスの開口角が  $\theta_{\text{oa}}=50\text{--}70^\circ$  であると推定した。この結果は、統計的に示唆されている低光度 AGN では、トラスが小さくなるという結果と一致している。

1. Kawamuro, T., Ueda, Y., Tazaki, F., & Terashima, Y. 2013, accepted for publication in *ApJ*.
2. Burlon, D., Ajello, M., Greiner, J., et al. 2011, *ApJ*, 728, 58

## 銀河 15a X 線と可視光を用いた XMM-LSS 領域におけるクェーサー候補天体の選出

馬場崎 康敬 (名古屋大学 M1)

遠方に存在するクェーサーの探査は、超大質量ブラックホールの進化を理解する上で重要な観測的アプローチとなっている。クェーサー探査によく使われる方法として、光学望遠鏡で得られた等級を用いて候補天体を選出する色選択と呼ばれる方法がある。しかし、この方法で選出した天体には、 $\text{Ly}\alpha$  輝線の強い銀河や星などのコンタミネーションが多い。そこで、本研究では色選択の際に、AGN 探査に有効な X 線の情報も用いて、X 線天文衛星 XMM-Newton と光学望遠鏡 Canada-France-Hawaii Telescope による観測が行われている XMM-LSS 領域からクェーサーの可能性がより高い天体の選出を試みた。X 線スペクトル解析を行うために 0.5–10 keV のカウントが 60 以上であるという条件を課し、CFHT の  $g$ ,  $r$ ,  $i$ ,  $z$  バンドの等級を利用し、 $z \sim 4$  と  $z \sim 5$  のクェーサー候補天体をそれぞれ 17 個、12 個を選出した。選出した天体と既知のクェーサーを (1) X 線スペクトルをべき関数で表したときのべき (光子指数) の値、(2) 天体の X 線光度、(3) クェーサーに知られる  $U_V / X$  線

の光度比と Uv 光度の間にある相関関係、という観点から比較した所、 $z \sim 4$  と  $z \sim 5$  のクェーサー候補天体で、それぞれ 16 個、12 個が既知のクェーサーの性質と合致した。これにより、X 線天体を伴う可視光天体からクェーサー候補天体の選出を行うことはクェーサー探査に対して有効であることが分かった。

1. Ikeda, H., et al. 2011, ApJ, 728, L25 [1]
2. Ikeda, H., et al. 2012, ApJ, 756, 160 [2]
3. Pierre, M., et al. 2007, MNRAS, 382, 279 [3]

## 銀河 16a クェーサー変動の様々な相関

松本 恵未子 (甲南大学 M1)

Sloan Digital Sky Survey(以下 SDSS) で分光器で観測された 25,000 以上のクェーサーサンプルがある。そのサンプルデータを使ってクェーサーの振幅と周期、赤方偏移、光度、X 線、紫外線、電波の相関関係について調べた研究について紹介する。

## 銀河 17a すざく衛星によるケンタウルス座銀河団の重元素分布の決定

阿部 雄介 (東京理科大学 M1)

我々の身の周りには鉄、酸素などの元素は恒星内部で合成され、恒星の超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれ、銀河内だけでなく銀河外にまで広がっている。重力で束縛された宇宙最大の系である銀河団にはこれまで合成された元素が閉じ込められていると考えられているため、銀河団ガスの元素分布を調べることは宇宙の元素合成史を探る手がかりになっている。Ia 型超新星爆発では鉄、ケイ素、硫黄などが合成され、II 型超新星爆発では酸素、マグネシウム、アルゴン、ケイ素、硫黄、鉄などが合成される。

すざく衛星によって観測されたデータを用いて、ケンタウルス座銀河団の約 0.48 ビリアル半径まで銀河団ガス中の元素分布を調べた。ビリアル半径は銀河団の平均密度が宇宙の臨界密度の 180 倍となる半径のことで、ケンタウルス座銀河団において 1 ビリアル半径 ( $= 1.95h_{100}^{-1}\sqrt{kT}/10\text{keV}$ ) (Markevitch et al. 1998) は 1.74 Mpc ( $kT = 3.88\text{keV}$ ) (Furusho et al. 2001) である。本研究において、0.27 ビリアル半径までは酸素、マグネシウム、ケイ素、硫黄、アルゴン、カルシウムの元素分布が求まり、0.48 ビリアル半径までは鉄の元素分布が求まった。元素分布は太陽の元素組成を基準にしており、以後 solar を使い、水素を 1 としたときの元素個数比のことをアバンダンスと呼ぶ。ケンタウルス座銀河団をいくつかの円環領域に区切って各元素アバンダンスの半径分布を描くと、0.1 ビリアル半径から中心に向かって Si, S, Ar, Ca, Fe のアバンダンスは増加していて、酸素、マグネシウムのアバンダンスは一定の値をとっている。0.1 ビリアル半径より外側の領域の元素の分布は、全て 0.5 solar に近づいていく傾向があった。また、超新星爆発の理論モデルと解析で得られた各元素アバンダンス鉄アバンダンス比を比較すると、0.04 ビリアル半径より外側では、太陽組成に近いという事が明かとなった。銀河団ガスに含まれる鉄の質量とその中に含まれる銀河光度の比 (鉄質量-銀河光度比) から、現在の銀河団内の鉄元素の拡散史を知ることができる。他の銀河団との比較を行うと他の銀河団同様、鉄質量-銀河光度比は中心から外側に向かうに連れて増

加し、0.2 ビリアル半径で最大になり、それより外側では誤差の範囲で一定になった。このことから、ケンタウルス座銀河団の銀河の分布は、銀河団ガスに比べて、相対的に中心に集まってきている事がわかる。また、現在の超新星爆発発生率で銀河団が宇宙年齢をかけて鉄を合成してきたと仮定すると、解析結果の鉄質量に満たなかった。これは、過去に置ける超新星爆発発生率が高かったことを示唆している。

1. Matsushita et al. 2007
2. Sakuma et al. 2011

## 銀河 18a AWM7 銀河団外縁部の高温ガスの重元素分布と星形成史

横田 佳奈 (東京理科大学 M1)

銀河団とは、銀河が数百から数千個集まったものであり、宇宙年齢をかけて成長し重力的に束縛されている宇宙最大の天体で、宇宙で合成されてきた炭素より重い元素 (重元素) の多くを閉じ込めていると考えられている。重元素は星の内部で合成され、超新星爆発によって宇宙空間にばらまかれた。Ia 型超新星は、白色矮星の連星系で鉄などの多くの元素を生成する。II 型超新星は、太陽の 10 倍以上重い星で主に酸素などの比較的軽い元素を生成する。このように超新星の種類により合成される元素の組成比が決まるので、どのような元素がどれだけ存在するのかが分かれば、Ia 型と II 型の割合などを考えることができる。つまり、銀河団の重元素を考えると、宇宙全体の重元素、そしてその重元素を合成した星がどれだけできるかを考えることができる。

また、銀河団の高温ガスからの熱放射が X 線で観測される。放射されるエネルギースペクトルは、熱自動放射と元素の特性 X 線からなる。高階電離した元素のイオンに束縛された電子のエネルギー遷移による輝線を見てガスに含まれる重元素量を調べることができる。

今回の講演では AWM7 銀河団の解析結果を報告する。Sato et al. (2008) では X 線天文衛星「すざく」を用いた X 線強度中心から東西におよそ 0.3 ヴィリアル半径の観測の解析が行われたが、「すざく」は低いバックグラウンドが特徴のため X 線で暗い外側領域まで観測され今回初めて銀河団の勢力範囲であるヴィリアル半径まで解析できるようになった。

本研究では AWM7 銀河団の X 線強度中心からヴィリアル半径までの銀河団ガスの温度や含まれる鉄の量の半径分布を調べた。銀河団ガスの温度は中心から上がり 0.1 ヴィリアル半径から外側へ向かって下がる、電子数密度は中心から外側へ向かって下がる、しかし同じ半径でも東西の方が南より高い値であったため、AWM7 銀河団は銀河が連なる東西のフィラメント方向へ広がっていると考えられる。またヴィリアル半径までの鉄と銀河の質量比から、鉄は過去に大量に合成され現在銀河より相対的に広がって分布していることもわかった。Sato et al. (2008) の結果より、Ia 型と II 型の両方の超新星爆発で合成されるケイ素と鉄の比が半径によらず一定であったため、求められた爆発回数比 Ia 型:II 型=1:3 を外側でも成り立つと仮定し、鉄の質量から超新星爆発の回数を算出したところ Ia 型が約 140 億回、II 型が約 420 億回であることがわかった。また、AWM7 銀河団より巨大な Perseus 銀河団と比較すると同様に鉄は過去に大量に合成され現在銀河より相対的に広がって分布しているとわかったため (Matsushita et al. 2013)、どの銀河団でもこれまで同じような過程で鉄を合成してきたと考えられる。今回の講演では、銀河団の重元素分布の解析結果から星形成史について議論する。

1. Sato, K., Matsushita, K., Ishisaki, Y., et al. 2008, PASJ, 60, 333
2. Matsushita, K., Sakuma, E., Sasaki, T., Sato, K., & Simionescu, A. 2013, ApJ, 764, 147

銀河 19a (講演キャンセル)

銀河 20a XMM-Newton 衛星による低表面輝度銀河団 A2328 と A1631 のエントロピー測定

新郷 沙耶 (奈良女子大学 M1)

銀河団は自己重力系としては宇宙で最大の天体である。一般に銀河団は大量のダークマターを含み、その重力ポテンシャルにガスが落ち込んで、次第に中心集中した分布になると考えられている。したがって銀河団は進化するにつれて X 線表面輝度が上昇し、かつガス加熱によってエントロピーが高くなると予想される。

しかし、ROSAT 衛星や XMM-Newton 衛星の観測により、表面輝度が低い一方でエントロピーが高いという特異な銀河団が数個発見された。この過剰なエントロピーの原因は従来の加熱機構のみでは説明が難しく、詳細はまだ解明されていない。

この原因を探るため、本研究では XMM-Newton 衛星を用いて低表面輝度銀河団 A2328 ( $z = 0.1475$ ) と A1631 ( $z = 0.0462$ ) の X 線スペクトル解析を行い、エントロピー分布を求めた。その結果、エントロピーは中心でそれぞれ  $\sim 300 \text{ keVcm}^2$ ,  $\sim 400 \text{ keVcm}^2$  と求められた。これは重力的な加熱を考えた理論予測値と比べて、およそ 2 倍大きい。また、どちらの銀河団もガス密度が低く不規則な形態をしていることから、これらの銀河団は進化の初期段階にあるのではないかと考えられる。このことからエントロピー過剰の原因として、ガスの加熱に対して中心集中が遅れている可能性がある。

1. Ota, N., et al. 2013, A&A, accepted
2. Pratt, G. W., et al. 2010, A&A, 511, A85
3. Trinchieri, G., et al. 2012, A&A, 545, A140

銀河 21a 初代星は銀河ハローのどこにいるのか?

須藤 佳依 (甲南大学 M2)

宇宙初期に生まれた初代星は、理論的研究により、太陽の数百倍の質量を持った巨大な恒星になっていったのではないかと考えられている。しかし、巨大な恒星のみならず、 $100M_{\odot}$  以下の星が複数形成されるという新しいシミュレーションの結果が発表された (Clark et al 2011, Hosokawa et al. 2011, Greif et al. 2012)。この結果は、初代星形成の理論の進展に大きな影響を与え、初代星が現在でも生き残っているかもしれないという可能性を示唆するものとなった。そこで、本研究では宇宙で最初に誕生した初代星のホストであるミニハローが、ハロー同士の合体を通じ、現在の矮小銀河のハローにどのように取り込まれていくのか、その過程を高精度の宇宙論的な N 体シミュレーションを用いて調べることを試みた。その結果、初代星を含むミニハローの中にあるものはそのまま矮小銀河の中に取り込まれ、また一部は潮汐力によって引き伸

ばされて銀河ハローの内部に広がることがわかった。本講演ではこれらのミニハローに含まれている初代星を、次世代の観測装置を用いて観測することが可能なかどうかを検証し、その結果を報告する。

1. Clark, P. C., Glover, S. C. O., Smith, R. J., et al. 2011, Science, 331, 1040
2. Greif, T. H., Bromm, V., Clark, P. C., et al. 2012, American Institute of Physics Conference Series, 1480, 51
3. Hosokawa, T., Omukai, K., Yoshida, N., & Yorke, H. W. 2011, Science, 334, 1250

銀河 22a Overview of the Chemical and Dynamical Evolution of Dwarf Spheroidal Galaxies

平居 悠 (東京大学 M1)

矮小楕円体銀河 (dSph) の化学動力学進化モデルについて、最近の研究成果を紹介する。近年の観測で、天の川銀河周辺における矮小楕円体銀河の星の金属量が明らかにされつつある [e.g., 1]。一方、N 体/Tree-SPH コードにガスの冷却、星形成則、化学進化、超新星フィードバック効果を導入することで、高い分解能で矮小楕円体銀河の化学動力学進化をシミュレーションすることが可能になった。最新の化学動力学進化計算は、矮小楕円体銀河: Fornax, Sculptor, Sextans, Carina, Leo II の金属量を再現し、銀河の初期質量と初期中心密度が化学動力学進化に重要な役割を果たしていることを明らかにした [2,3]。しかし、矮小楕円体銀河の動径方向の金属分布は観測を再現できず、ISM の混合や、銀河の衝突が化学動力学進化に及ぼす影響を調査することが必要である。本講演では、最新の化学動力学進化シミュレーションの成果を紹介し、矮小楕円体銀河の化学動力学進化を考察する。さらに、現在の矮小楕円体銀河化学動力学進化モデルの問題点を指摘し、今後の研究課題を示す。

1. Tolstoy E., Hill V. and Tosi M. 2009. ARA&A 47, 371
2. Revaz Y., Jablonka P., Sawala T., et al. 2009. A&A 501, 189
3. Revaz Y. and Jablonka P. 2012. A&A 538, A82

銀河 23c アウトフローガスの変動とキューサーの光度の時間変動の関係性

堀内 貴史 (信州大学 M2)

キューサーの降着円盤から吹き出すアウトフローガスに見られる時間変動の原因を探るべく、昨年からキューサーの光度と吸収強度の同時モニター観測を、木曾と岡山で行っている。アウトフローを平行に見込む際に観測される BAL キューサーに対しては、連続光と吸収強度の変化に相関が見られないことがすでに確認されているが [1]、降着円盤をより深く見込む際に観測されると考えられている NAL/mini-BAL キューサーについては両者の関係は明らかになっていない。そこで、mini-BAL と NAL をもつキューサーに対する同様な観測を通じ、BAL, mini-BAL, NAL の発生場所に求められる環境の違いを解明する。NAL をもつキューサー 1 天体については、すでに有意な変光傾向を示すことが確認されており、このことは現在最も有力視されている電離状態変動シナリオを支持する可能性が低いことを示している。



$z \sim 1$  の宇宙における星形成率密度は、現在の宇宙に比べて桁ほど高い値であった事が分かっている (Hopkins&Beacon(2006) など)。また、この時代に激しく星形成を行なっているような銀河は、その実に 90% が massive で disk-like な形態を持っていた事が示されている (Konishi et al. 2009)。しかし、このような銀河の星形成領域を数 kpc スケールで調べた仕事はほとんどなく、この時代の銀河の星形成活動が銀河内部のどの領域のどのようなモードで起こっているかはまだ議論の余地が残っている。よって、この時代の星形成を担っていた銀河がその内部のどのような場所で星形成を行なっていたのかを調べることは、銀河の進化を考える上で重要である。この研究では、HST による CANDELS 計画によって得られた  $0.8 < z < 1.8$  の比較的 massive な銀河 ( $M_* > 3 \times 10^{10} M_\odot$ ) の画像に対し、各ピクセルごとに SED fitting をする事で銀河内部の星形成領域の分布を空間分解して捉えた。まず最初に、HST によって得られた GOODS-South 領域の合計 8 バンドの画像を用いて、約 2kpc の分解能で星質量、年齢、E(B-V)、SFR などの map を作成した。次にこの map を元に、銀河中心から 3kpc を境にして銀河の中心部と外縁部での星質量と星形成率を足し合わせることで星形成率密度および星質量密度を計算し、その時間発展を調べた。星形成率密度を見たところ、外縁部は中心部に比べ数倍高い星形成率密度を持っているものの、この redshift の間での時間発展は中心部・外縁部ともにほとんど無かった。一方で星質量密度については、時間とともに中心部・外縁部ともに増加する傾向が見られた。特に星質量密度の増加は銀河の中心部で大きく、その増加量は星形成率密度で説明される質量増加よりも大きいという結果が得られた。講演ではこの結果を踏まえ、この時代の銀河で星質量分布が確立する過程について議論する。

1. Konishi et al. 2011 PASJ 63,363
2. Wuyts et al. 2012 ApJ 753,114

## 銀河 29c $z=3.1$ 原始銀河団の MOIRCS 近赤外線分光観測

久保 真理子 (東北大学 D3)

我々は  $z = 3.1$  SSA22 原始銀河団のすばる望遠鏡 MOIRCS (Multi-Objects Camera and Spectrograph) による深い近赤外撮像データから星質量に基づいて原始銀河団銀河候補を選び、MOIRCS 多天体分光観測を行った。65 天体を観測し、約半数の同定に成功した。[OIII] $\lambda\lambda 5007$  輝線からこれほど大量の天体を分光同定したのは世界でも初の例である。うち 24 天体は  $z_{\text{spec}} \approx 3.1$  であり、確かに原始銀河団銀河であった。これにより原始銀河団で既に大質量銀河が形成されつつあることが明らかになった。また、SSA22 領域の Ly $\alpha$  Blobs、サブミリ源の対応天体のそれぞれ複数の対応天体について  $z_{\text{spec}} \approx 3.1$  だと示した。これらは multiple major merger の途中であると考えられる。

## 銀河 30c MOIRCS Spectroscopy: Scrutinizing over 70 Galaxies in Two Proto Cluster at $z > 2$

嶋川 里澄 (総合研究大学院大学 M2)

Local cluster galaxies have characteristic properties represented by color-magnitude relation and density-morphology relation for exam-

ple. In proto-clusters at  $z \geq 2$ , however, such relations break down because the galaxies are just forming[1]. Therefore those proto-clusters are the unique laboratories to directly investigate the origin of environmental dependency seen in the local universe. With this motivation, we have conducted a spectroscopy of 2 rich proto-clusters, PKS1138-262( $z = 2.16$ )[2] and USS1558-003( $z = 2.53$ )[3] with Subaru/MOIRCS in S13A. We target about 100 star-forming galaxies of selected by our previous narrow-band imaging surveys, and we have newly identified over 72 galaxies as cluster members. In this poster, we will show velocity structures of the 2 proto-clusters, and characteristics of PKS1138 which we have found by line flux and ratio. In PKS1138, the galaxies that locate at intermediate density regions show significantly higher star-formation rates compared to the main sequence. It suggests that they are key populations under the influence of the environmental effects.

1. Kodama T., Bower R. G., 2001, MNRAS, 321, 18
2. Koyama Y., et al., 2013, MNRAS, 428, 1551
3. Hayashi M., et al., 2012, ApJ, 757, 15

## 銀河 31c 野辺山 45m 鏡を用いた不規則銀河 IC10 の HCN および CO 分子輝線観測

瀬川 陽子 (北海道大学 M2)

不規則銀河は渦状腕や棒状構造を持たないため、そのような力学的構造による影響を受けない環境下での星形成過程を解明する上で非常に重要である。不規則銀河の中にはこのような星形成を誘発する構造を持たないにも関わらず、非常に活発な星形成活動をしているものがあるが、そのメカニズムについては解明されていない点も多い。

本研究の観測対象は典型的な不規則銀河の 1 つである IC10 で、距離 950kpc という非常に近傍に位置している。IC10 は低金属量である不規則銀河の中でも  $^{12}\text{CO}$  分子輝線で比較的明るく、過去に行われた観測では IC10 内で観測された分子雲のサイズや線幅が銀河系内の分子雲とあまり変わらないことがわかっている。しかし、 $\text{H}_2$  の表面密度に対する星形成率の表面密度 (星形成効率) は近傍にある他の渦巻銀河や不規則銀河に比べ高い。この高い星形成率を支えるためには星のもととなる高密度分子ガスが多量に存在することが期待されるため、本研究では分子雲をトレースすることのできる CO (臨界密度  $10^2 \text{cm}^{-3}$ ) と、分子雲内の密度の濃い領域をトレースすることのできる HCN (同  $10^{4-5} \text{cm}^{-3}$ ) 分子輝線の観測を行い、その輝線強度比を導出した。

観測は国立天文台野辺山 45m 鏡を用いて今年の 3 月と 5 月に行った。観測点は Ohta et al. (1988) および Leroy et al. (2006) をもとに CO の強度が強く、かつ星形成段階の異なる領域を 3 点を選出した。この観測点のうち最も CO の強度が強くと活発な星形成が見られる点では、HCN/CO 比は 0.04 程度となった。一方、CO の強度が強いにも関わらず星形成の指標が見受けられない点では、0.014 という低い上限値を得た。本講演ではこの結果について議論する。

## 銀河 32c 赤外線銀河内の埋もれた活動銀河核の探査

市川 幸平 (京都大学 D2)

赤外線銀河は、赤外線で非常に明るく輝いている銀河であるが、その膨大なエネルギー源が星生成由来なのか、それとも活動銀河核 (AGN) 由来なのかは、ダストに隠されているため、判別することは難しい [1]。我々は、可視光線で活動銀河核の兆候がない近傍の赤外線銀河 ( $z < 0.2$ ) に対して、あかり衛星を用いて 2.5–5  $\mu\text{m}$  スペクトルを取得した。さらに、このバンド内に寄与する成分として、星直接成分の黒体放射、AGN によって温められたダスト (トーラス) 由来の黒体放射を考え、トーラス由来の温度が  $T > 200\text{K}$  となるものを、埋もれた AGN の指標とした。この方法により、赤外線光度があがるにつれて、埋もれた AGN をもつ赤外線銀河の割合が多くなることを、幅広い赤外線光度幅 ( $10^{10}L_{\odot} < L_{\text{IR}} < 10^{13}L_{\odot}$ ) で示すことに成功した。

1. Sanders and Mirabel. 1996, ARA&amp;A, 34, 749S

## 銀河 33c N-body simulation for evolution of spiral arms

熊本 淳 (東北大学 M1)

孤立系の円盤銀河を想定した N 体シミュレーションを行ない、spiral arms の形成と進化の様子調べる。シミュレーションの結果として現れた spairal arms を思わせる構造について、logarithmic spiral を想定したフーリエ解析を行い、その進化の様子を解析する。解析の結果、spiral arms の構造は時間変化していることを発見した。spiral arms は形成されながら徐々にピッチ角を小さくし、さらにピッチ角を小さくしながら消えていった。この進化の過程は swing amplification を思わせる。銀河が数回転するまでの間は形成と消滅を繰り返したが、その後は形成されなくなった。

銀河 34c すばる望遠鏡 FMOS による COSMOS 領域の近赤外線分光サーベイ:  $z \sim 1.6$  星形成銀河の  $\text{H}\alpha$  輝線に基づく星形成率とダスト減光

柏野 大地 (名古屋大学 M2)

本講演ではすばる望遠鏡 FMOS を用いて行った、 $z \sim 1.6$  における星形成銀河の近赤外線分光サーベイの成果を発表する。我々の目的は、 $\text{H}\alpha$  輝線に基づいた星形成率 (SFR) と星質量 ( $M_*$ ) の関係を定量化することである。星形成銀河については、この 2 つの物理量の間にはタイトな関係があることが多くの先行研究により確認されており、**星形成主系列**と呼ばれている [1,2,3]。しかし、用いる星形成率指標やサンプルセレクションにより微妙に異なった結果が得られており、本質的な星形成主系列を明らかにするためにも、指標の影響や互いの関係を明らかにするためにも、異なる指標やサンプルで  $\text{SFR}-M_*$  関係を定量化し、それらを比べることが重要である。さらに、赤方偏移とともに星形成主系列がどのように進化するのかを明らかにすることは銀河の形成と進化の解明においてとても重要なことである。しかし、星形成史のピークである  $z \sim 1.6$  という時代に対しては、よく理解され精度の良い星形成率の指標

である  $\text{H}\alpha$  輝線が分光観測が困難な近赤外領域にシフトしてしまい、これまででは不定性の大きな指標を使わざるを得なかった。しかし、FMOS の本格稼働により、 $\text{H}\alpha$  に基づく星形成率の見積もりが可能になった。星形成率を導くためにはダスト減光を補正する必要があるが、これは同じく FMOS で観測した  $\text{H}\beta$  と  $\text{H}\alpha$  の比 (Balmer decrement) を使って精度よく求めることができる。しかし、 $\text{H}\beta$  は弱く、個々のオブジェクトに対しては有意な検出がほとんど得られないため、星質量でビン分けしてスペクトルをスタックすることで、平均的な  $A_{\text{H}\alpha}-M_*$  関係を求め、これが低赤方偏移の SDSS 星形成銀河と非常によく似ていることを明らかにした。我々は、この関係を用いてダスト補正を行い、約 200 のスペクトルから先行研究とコンシステントな  $\text{SFR}-M_*$  関係を求めた。この研究はこれまで難しかった近赤外分光観測を行い、ダスト減光の補正から星形成の導出までを FMOS で観測した  $\text{H}\alpha$  輝線フラックスに基づいて行った初めての研究である。

1. Noeske, K. G., Weiner, B. J., Faber, S. M., et al. 2007, ApJ, 660, L43
2. Daddi, E., Dickinson, M., Morrison, G., et al. 2007, ApJ, 670, 156
3. Elbaz, D., Daddi, E., Le Borgne, D., et al. 2007, A&A, 468, 33

## 銀河 35c The two-dimensional power spectrum analysis of far-infrared galaxies detected by AKARI

鈴木 智子 (名古屋大学 M2)

銀河の持つ多様な形態・性質は、銀河の存在している環境に大きく影響を受けている。そのため、銀河の存在する環境、つまり銀河がどのような空間分布をしているのかを知ることは、銀河進化を理解する上で非常に重要となる。銀河の空間分布の性質を議論する際には、パワースペクトルという統計量がよく用いられる。パワースペクトルは、波数  $k$  を持つ波が銀河分布の密度ゆらぎに対してどの程度寄与しているのかを表す統計的指標である。本研究では、特に遠赤外線領域の波長帯で観測される銀河に注目し、その空間分布のパワースペクトルを求めた。遠赤外線領域の主な放射源は銀河内に存在するダストであり、遠赤外線領域で明るく輝く銀河は宇宙における星形成活動性のよいトレーサーとなっている。そのため、これらの銀河の空間分布の持つ性質を知ることは、星形成銀河が宇宙空間においてどのように分布しているのかを理解することにもつながる。

本研究では、赤外線天文衛星 AKARI の遠赤外線領域の波長帯で観測された全天探査のカタログを用いて、その空間分布の 2 次元のパワースペクトルを求めた。全天カタログから銀河のデータを選別し、それらを銀河座標で北と南それぞれ 4 つの領域に分けた。各領域について平面近似を用いてパワースペクトルを求め、最終的に北と南でそれぞれ平均をとった。得られたパワースペクトルはべき乗則でよく近似され、そのべき乗の値は北と南でほとんど変わらないことが分かった。本講演では、用いたデータと解析方法に関して詳細に述べると共に、IRAS のカタログを用いた先行研究との比較を行う。

1. Hamiltom, A. J. S., & Tegmark, M., 2002, MNRAS, 330, 506
2. Pollo, A., Takeuchi, T. T., Suzuki, T. L., & Oyabu, S., 2013, Earth, Planets, & Space, 65,273



### 銀河 36c 野辺山 45m 電波望遠鏡を用いた銀河系外縁部における分子雲サーベイ

松尾 光洋 (鹿児島大学 M2)

我々は野辺山 45m 電波望遠鏡およびマルチビーム受信機 BEARS を用いて  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線のサーベイを行い、その観測から銀河系外縁部における分子雲のリストを作成して CO-to- $\text{H}_2$  変換係数 ( $X_{\text{CO}}$ ) を求めた。銀河系における  $X_{\text{CO}}$  についての研究は数多くされており、銀河系半径が大きくなるにつれて大きくなるという研究 (Arimoto et al. 1996) があるが銀河系半径  $R=11\text{kpc}$  程度までしか  $X_{\text{CO}}$  は求められておらず、 $R=11\text{kpc}$  以遠でも動径変化が見られるのかは明らかではない。そこで我々は銀経  $l$  が  $212^\circ 5$  から  $214^\circ 0$ 、銀緯  $b$  が  $-0^\circ 25$  から  $0^\circ 25$  の範囲を野辺山 45m 電波望遠鏡およびマルチビーム受信機 BEARS を用いて  $^{12}\text{CO}(J=1-0)$  輝線の OTF 観測を行った。これにより得られた 3次元マップから CLUMPFIND (Williams et al. 1994) を使用して分子雲のリストを作成し、それぞれの分子雲のサイズや線幅などを求めた。その結果、銀河定数 ( $R_0, \Theta_0$ ) = (8.0kpc, 217km/s) として運動学的距離を求めると  $R = 8 - 15\text{kpc}$  に存在する分子雲を検出できた。また Solomon et al. (1987) よりサイズが小さい分子雲のサイズ線幅関係を得ることができた。求めたサイズと線幅からビリアル質量を計算し、それと分子雲の積分強度を用いて  $X_{\text{CO}}$  を決定した。その結果、 $X_{\text{CO}}$  は Arimoto et al. (1996) の結果と連続的に銀河系半径とともに大きくなる傾向があることがわかった。

### 銀河 37c 銀河の FDF

田代 雄一 (熊本大学 M1)

宇宙での磁場観測の一つに Faraday rotation を用いるものがある。これを応用して、FDF(Faraday dispersion function) という概念が Burn によって導入された。これと Faraday depth を用いると、磁場や放射領域に関する情報を得ることが出来る。従来、Faraday depth 空間における銀河の FDF を簡単のため正規分布としてきたが、我々はここに着目し Faraday depth 空間での銀河の FDF の形を探っていく。

1. M. A. Brentjens (1,2), A. G. de Bruyn (2,1), ((1) Kapteyn Astronomical Institute, (2) ASTRON), arXiv:astro-ph/0507349v2
2. Takuya Akahori (1,2), Dongsu Ryu (3), Jongsoo Kim (1), B. M. Gaensler (2), arXiv:1303.1595 [astro-ph.GA]

### 銀河 38c Hyper Suprime-Cam を用いた銀河団進化の解明

玉澤 裕子 (東京大学 M1)

銀河団は宇宙で最も重い力学系であり、宇宙の構造形成の鍵となる。この銀河団がどのように形成・進化したかは観測的にあまり理解されていない。私は、すばる望遠鏡の次世代超広視野可視光カメラ Hyper Suprime-Cam (HSC) の探査データを用いて形成過程にある銀河団 (原始銀河団) を多数検出し、統計的に銀河団進化を明らかにする。HSC 探査により従来の 30 倍以上の天域を観測して、得られた多色のデータか

ら遠方銀河の空間分布を調べ、密度超過から原始銀河団の候補を見つける。この手法により、1 年目の HSC 探査から原始銀河団の候補が赤方偏移 4 - 5 で数百個得られると期待されている。この原始銀河団サンプルを用いて、次の 2 つの目標を達成する。1) 原始銀河団候補同士の自己相関関数と構造形成モデルを比較することで原始銀河団のダークハロー質量を世界に先駆けて見積もる。2) 原始銀河団と現在の銀河団を比較することで、銀河団の平均ダークハロー質量に対する星質量比の進化を調べる。これにより銀河団の形成過程においてダークハロー質量と星質量のどちらが先に集積したかを明らかにする。本研究の特徴は、HSC 探査の広領域・高感度データによって、初めて高赤方偏移銀河の分布から無バイアスで多数の原始銀河団候補を選び出すことができる点である。これにより得られる原始銀河団候補の数は従来の探査の約 100 倍におよび、上記のような自己相関関数の解析や銀河団質量比の進化を初めて調べることができる。

### 銀河 39c MAXI/GSC の全天 X 線マップを用いた暗い X 線源の調査

鈴木 和彦 (日本大学 M1)

MAXI/GSC の観測によって得られた全天 X 線マップに天体名を追加したものを作成した。作成した全天 X 線マップを見ると天体名が表示されない X 線源らしい増光がいくつかあり、それらの解析を試みた。本研究の目的はそれらが本当に天体起源であるかを確かめることと、対応天体の同定である。実際にいくつか確かめてみると MAXI 公開用カタログには無い既知天体であった。今日、判明した天体について報告する。確認できた天体はほんのわずかであり、今後は残りの X 線源を銀河面付近を中心に解析していく。

1. Kazuo Hiroi et al., 2013, THE 37-MONTH MAXIGSC SOURCE CATALOG IN THE HIGH GALACTIC LATITUDE SKY
2. 谷口義明・岡村定矩・祖父江義明, 2007, 「シリーズ現代の天文学 銀河 I 銀河と宇宙の階層構造」日本評論社

### 銀河 40c コールドダークマターハローのコア-カスプ問題が超新星爆発で解決できるか?

加藤 一輝 (筑波大学 M1)

コア-カスプ問題に関する論文、Navarro, Eke and Frenk (1996) 及び Ogiya and Mori (2011) のレビューを行う。コア-カスプ問題とは、理論で得られたダークマター (DM) ハローの中心密度がカスプ状の分布を示唆しているのに対して、観測ではコア状の分布をしているという矛盾である。Navarro, Eke and Frenk (1996) では球対称な矮小銀河からガスが放出するモデルを N 体計算し、DM ハロー中心のカスプがコアに遷移することを示した。一方、Ogiya and Mori (2011) では、ガス放出の time scale と系の粒子数に注目して計算が行われていて、結果として、Navarro, Eke and Frenk (1996) の計算は十分な精度がないことと、ガス放出の time scale が短いほうが中心密度をより平坦にすることを示した。しかし、どのような time scale の場合でも中心にカスプが残るため、Ogiya and Mori (2011) は、ガスの放出は DM ハロー中心のカスプをコアにする効果的なメカニズムではないと言及している。

1. Ogiya, G. , and Mori. M. 2011, ApJ, 736L, 20
2. Navarro, J. F. , Eke, V. R. , and Frenk, C. S. 1996, MNRAS, 283, L72

## 銀河 44c 衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の「すざく」による観測

加藤 佑一 (東京大学 M1)

2つの銀河団がお互いの重力により引き合い衝突している銀河団のことを衝突銀河団という。衝突が初期の銀河団の観測例は少なく、現在知られているものは Abell399-401、Abell222-223 だけである。我々は、銀河面近くに最近発見された初期衝突銀河団の候補天体 CIZA J1358.9-4750 を、X線衛星「すざく」で観測した。CIZA J1358.9-4750 は南西と北東にそれぞれ銀河団がある。それらが衝突しているかどうかを調べるため、それぞれ銀河団の領域とその2つを結ぶ領域を2つに分け、計4つの領域の解析を行った。南西と北東の銀河団のそれぞれの赤方偏移と温度をみると南西の赤方偏位は0.081、一方北東のほうは0.074であり、温度はそれぞれ6.1 keV, 4.8 keVであった。さらにそれらを結ぶ領域の温度を調べて平均してみると7.7 keV程度になった。この温度は北東と南東の銀河団よりも高くなっており、2つの銀河団が衝突することより起きた衝撃波によるものだと考えられる。これらの事実から、北東と南西にある2つの銀河団は、衝突の初期の段階にあるものと考えられる。

## 銀河 41c 銀河風研究のための流体シミュレーションコード開発

村田 貴紀 (筑波大学 M1)

本研究では、将来的に銀河の形成進化過程における銀河風の影響について調べることを目的としている。現在は銀河風の数値流体シミュレーションを行うため、リーマン近似解法の一つであるHLLC法のコードの開発を行っている。本発表ではHLLC法の概念と空間時間一次精度で実装したシミュレーションコードのテストについて報告する。

## 銀河 42c 局所銀河群における新たな形成シナリオに関する論文紹介

加藤 美保子 (東北大学 M1)

Ibata et al. (2013) によって、M31 (アンドロメダ銀河) の周りに矮小銀河が平面構造 (Vast Thin Disk of Satellites; VTDS) を作っていることが発見された。他にも局所銀河群にはVPOS (Vast Polar Structure) と呼ばれる銀河系周りの平面構造や、潮汐相互作用によるストリームといった構造が見られる。過去の銀河衝突モデルと比較して、このような構造の起源について新たな解釈をもたらした Hammer et al. (2013) による論文 “The vast thin plane of M31 co-rotating dwarfs; An additional fossil signature of the M31 merger and of its considerable impact in the whole Local Group” を紹介する。

1. Hammer et al. 2013
2. Ibata et al. 2013

## 銀河 43c 宇宙初期の構造形成における化学組成の変化

渡辺 拓 (京都大学 M2)

微小な宇宙の初期ゆらぎは徐々に成長して宇宙に構造を形成する。ゆらぎははじめ線形摂動として扱えるが、ゆらぎが大きくなると非線形成長を始める。非線形成長において、十分大きく成長したゆらぎは、自らの重力により崩壊し、いずれビリアル平衡に達する。ビリアル平衡に達したガスが輻射冷却により重力による自由落下時間よりも早く冷えることができれば、さらに重力崩壊が進み、構造を形成することができる。

ここでは輻射冷却の冷却率の計算に必要なビリアル化後のガスの化学組成の変化を、様々な反応経路を考慮して計算する。

1. Rees & Ostriker 1977. 1977MNRAS.179..541R
2. Tegmark et al. 1997. 1997ApJ...474....1T

# 太陽・恒星分科会

誰が為に星は光る

日時	7月29日 17:00 - 17:30 (招待講演: 柴橋 博資 氏), 17:30 - 18:00 (招待講演: 片岡 龍峰 氏), 18:00 - 19:00 7月30日 9:00 - 9:30 (招待講演: 草野 完也 氏), 9:30 - 10:45 7月31日 16:15 - 17:30, 17:30 - 18:00 (招待講演: 須田 拓馬 氏)
招待講師	柴橋 博資 氏 (東京大学) 「星震学の進展」 片岡 龍峰 氏 (国立極地研究所) 「太陽活動現象が地球に与える多彩な影響」 草野 完也 氏 (名古屋大学) 「太陽フレアはいつ起きるか?」 須田 拓馬 氏 (国立天文台) 「恒星進化の理論とその応用」
座長	飯島 陽久 (東京大学 D1)、高橋 沙綾 (お茶の水女子大学 M2)、高橋 卓也 (京都大学 M2)、田染 翔平 (北海道大学 M2)、比嘉 将也 (中央大学 M2)
概要	<p>近年、日本の太陽観測衛星「ひので」による観測は太陽表面の微細構造を明らかにしており、あらゆる太陽活動への理解を深める重要な役割を果たしています。また NASA の「Kepler」やフランスの「Corot」といった系外惑星探査衛星により、多くの恒星の活動も明らかになってきました。特に、多くの太陽型星から検出されたスーパーフレア (太陽で観測された最大級のフレアの 10 1000 倍以上のエネルギーをもつフレア) は、太陽でもスーパーフレアが起きる可能性、系外惑星に対する影響など、ホットな話題を提供しています。このように、太陽と他の恒星を関連付けて理解することがますます重要になっていくなかで、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・恒星の研究を大きく前進させる時期が来ています。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。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 4 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> <p>注) 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。          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。          注) 水素燃焼が始まる前の原始性は星間現象分科会で扱います。          注) 水素燃焼しない褐色矮星は惑星系分科会で扱います。</p>

柴橋 博資 氏 (東京大学)

7月29日 17:00 - 17:30 A(サファイア)

## 「星震学の進展」

星の研究は天文学の基本である。が、望遠鏡で星の観測をしても、星の内部を見ることは出来ない。20世紀前半を代表する天文学者のエディントンは、「一体、どんな装置で星の中を調べられるというのか？」と反語的に書いている。彼の用意した答えは、「理論」だった訳だが、それから4分の3世紀を経た今日の私達は、「星の振動を使って、目では見えない筈の星の内部を見る」、という答えを探し出した。

星の振動というのは、古くから、明るさが周期的に変化する変光星として知られていた。この変光の仕組みは、エンジンや熱機関と似ている。今、星を収縮させたとする。普通の場合には、温度が上がって、星から放出する輻射が増えてしまい、それによるエネルギー損失のために収縮が膨張に転じて元に戻りきらず、振動が長続きすることはない。ところが、収縮の際に温度が上がっても輻射を外に逃がさずに貯めておき、膨張に転ずるときにそれを吐き出すエンジンの様な仕掛けがあれば、星は自励的に振動をしだす訳だ。こうした仕組みは、特定の大気温度の星でしか起らない。それら特定の星というのが古典的変光星という訳である。

古典的には変光星とは看做されなかった星でも、別の仕組みで振動が起きていることが判って来た。表面に対流層があると、乱流から音波が発生する。音波が星の表面層の至るところで常時発生し、それらが星全体を伝播し巡っているのである。二次元的な像を見ることが出来る太陽の場合には、この音波振動を観測することによって、太陽の内部構造を「見る」ことが出来る様になり、「日震学」として目覚ましい進展を遂げた。

この成功を一般の星に進めるべく、今は「星震学」が大きく羽撃こうとしている。ケプラー衛星による高精度長時間に亘る膨大な数の星の観測データは、量的にも質的にも従前の精度を圧倒的に凌駕する、正に革命的なものである。それに伴い様々な研究が進む星震学の様子を伝えたい。

片岡 龍峰 氏 (国立極地研究所)

7月29日 17:30 - 18:00 A(サファイア)

## 「太陽活動現象が地球に与える多彩な影響」

コロナ質量放出やコロナホールは、それぞれ台風や寒冷前線に喩えられるような、太陽風の特徴的な構造をなして地球を数日間包み込み、磁気嵐と呼ばれるオーロラ活動の嵐を引き起こします。磁気嵐が発達する主相ではカラフルなオーロラが地球規模で広がると同時に、静止軌道付近に捕捉されていたヴァンアレン帯の相対論的電子の補足が解かれ一旦消失します。磁気嵐の回復相に入るとオーロラ活動は弱まり、ヴァンアレン帯の電子は複雑なプラズマの波動粒子相互作用によって再生されていきます。コロナ質量放出が、かなり高速の場合に限って、この一連の流れに太陽高エネルギー粒子の嵐が加勢します。これらの、1) オーロラ粒子、2) ヴァンアレン帯粒子、3) 太陽高エネルギー粒子は、磁気流体近似では理解できないプラズマ物理学的な面白さが一番の研究対象ですが、実際問題、宇宙機の様々な障害、宇宙飛行士やパイロットの被ばく、オゾン破壊、ひどいときには停電まで、多彩な影響を地球に及ぼしてきた犯人たちでもあるため、宇宙天気予報と呼ばれる実際的な研究も発達してきました。本講演では、このような身近で複雑な宇宙に関する研究の背景をお伝えしたのちに、A) マウンダー極小期のように極端に弱い時にどうなるか、B) キャリントンフレアのように極端に強い時にどうなるか、C) 分子雲や超新星に太陽系が突っ込むときにどうなるか、について考察します。あとは時間がゆるす限りオーロラ観測の魅力を語るなり、質問に応じて自由に対話するなりできればと思っています。

草野 完也 氏 (名古屋大学)

7月30日 9:00 - 9:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「太陽フレアはいつ起きるか？」

太陽フレアは太陽表面で発生する太陽系最大の爆発現象であり、電力伝送網などの社会システムにも致命的な影響を与え得る。そのため、その発生予測は科学研究としてのみならず社会的にも重要な課題である。しかし、フレア発生のトリガ機構は未だに解明されていないため、いつ、どこで、どれ程のフレアが発生するかを正確に予測することはできていない。本講演では太陽フレア発生のトリガ機構に関する最近の研究について解説し、精密な観測に基づいてフレア発生を予測する試みについて紹介する。

フレア・トリガ機構の理解を阻んできた最大の困難は太陽磁場の複雑さにある。フレアは太陽活動領域において磁気極性が反転する極性反転線 (PIL) を跨いで発生すると共に、複雑な磁場構造を持つ領域で発生しやすい傾向があることが指摘されてきた。しかし、観測された磁場があまりにも複雑なため、どのような複雑さがフレア発生に関係するのかを明らかにすることはできなかった。我々はこの問題を解決するため、約 160 通りの様々な磁場構造について 3 次元電磁流体シミュレーションを実施し、フレアのトリガとなる磁場構造を探った。その結果、強い磁気シアと特徴的な磁場擾乱の組み合わせがフレア発生の条件となることを発見した。この条件を満たすと、PIL に沿ったヘリカル磁束が自発的に形成され、これが不安定化する結果としてフレアが発生することが分かった。

さらにこの結果を検証するため、我々は「ひので衛星」がこれまでに観測したフレアの発生領域における光球面磁場の詳細構造を解析した。その結果、観測条件の良い大型フレア全てについて、フレア発生領域にシミュレーションより予言された磁場構造が存在することを確認した。上記の結果は詳細な磁場観測によってフレア発生を予測し得ることを示唆している。講演では将来におけるフレア予測の展望と、天文学における予測研究の重要性についても言及する。

須田 拓馬 氏 (国立天文台)

7月31日 17:30 - 18:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「恒星進化の理論とその応用」

恒星は宇宙を構成する基本要素の一つであり、可視光で見える天体の大部分を占める。また、恒星からの光のエネルギーは内部での原子核反応によって賄われており、恒星は宇宙の物質を作る現場でもある。従って、恒星の性質を理解することは宇宙の進化を理解するうえで重要である。恒星進化の理論的研究は天文学の中でも歴史が古く、基本的な性質についてはかなり解明が進んでおり、一次元球対称の仮定のもとでは理論はほぼ確立されたと言える。また、恒星の数値シミュレーションでは、一次元球対称に熱対流を考慮した標準モデルが広く使われており、多くの観測を説明するのに成功を取ってきた。恒星の観測は、すばる望遠鏡のような地上大型望遠鏡によって高分解能分光観測が可能となっており、より遠くの星についてより詳細な元素組成分布を知ることが可能となっている。

本講演では、恒星進化理論に基づく数値シミュレーションの現状についてレビューする。さらに、恒星モデルを応用した研究（と関連する観測）についてできるだけ幅広く紹介したい。本講演で取り上げるトピックは以下のものを予定している。(1) 宇宙初期に誕生した恒星の観測と恒星進化モデルによる銀河系化学進化への影響、(2) 連星進化の種族合成モデルで探る銀河系の星形成史、(3) 回転している大質量星の構造と進化、(4) 恒星進化理論によるヘリウム三体反応核反率への制限、(5) 銀河系球状星団中の恒星の観測と恒星モデルに基づく星団の起源と形成のシナリオ、(6) 低金属量 Super AGB 星の銀河系化学進化への影響、(7)  $r$ -過程元素合成で探る銀河系初期の化学進化。なお、講演時間の制限があるので、この中からいくつかを選んで比較的詳しく紹介し、それ以外はごく簡単な紹介に留める。また、恒星進化理論とシミュレーションについて学ぶための文献と、恒星モデルや観測データを活用するためのツールの紹介も行う。

**恒星 01a semiconvective zone での混合**

中村 健太郎 (新潟大学 M1)

太陽質量の10倍程度以上の大質量の恒星では中心での核燃焼中にその核燃焼 core が核反応中の物質のプロフィールを残して収縮する。その収縮した領域には core と core が収縮する前に core を覆っていた領域とを繋ぐように滑らかな平均分子量の勾配ができる。平均分子量に勾配があるためにその領域で overstable oscillation が起こりゆっくりと平均分子量が均され、滑らかな勾配が最終的に一定の平均分子量の領域を持つ構造になると考えられていた。このような混合のことを semiconvection といい、この一定の平均分子量を持つ領域のことを semiconvective zone という。overstable oscillation の効率評価が困難であったため、この領域の理解は進んでいなかった。

この発表では、semiconvective zone での混合に新しいモデルを提案した1992年のH.C.Spruitの論文のレビューを行う。その論文では、断熱的な振動である overturn という現象で一度、安定な境界面により別けられる平均分子量の階層構造ができ、各々の層内部で上下の層との熱的接触により対流が起きると考えている。各々の層の間での熱と溶質のやりとりは境界面付近での拡散により行われるものとしている。こうすることにより、実験と理論の両方で広く研究されている下から温められる安定な階層構造の流体力学の問題として扱うことができる。

1. H.C.Spruit. 1992. Astron.Astrophys.253,131
2. R.Kippenhahn. and A.Weigert. 1994. Stellar Structure and Evolution,3rd ed.(Springer-Verlag,New York)

**恒星 02a 中間赤外線で大きな増光を示した天体**

小野里 宏樹 (東北大学 M1)

IRAS、AKARI、WISE の point source catalogue (PSC) を比較し、これらの衛星の観測時期の差である20-30年間に中間赤外線で大大きく増光した天体を5天体発見した。これらの天体は、1天体を除き先行研究がほとんどなされておらず、正体が不明であるが、中間赤外線では明るいため、ダストを豊富に持つ young stellar object (YSO)、または漸近巨星分枝 (AGB) 星であると考えられる。また、特に正体が AGB 星である場合、星の光度変化では説明できない大きな増光が見られた興味深い天体も発見した。現在のところこれらの天体の正体を議論するにはデータが不足しているので、正体を突き止めるためには今後観測データを増やしていかなければならない。

**恒星 03a 太陽フレアにおける磁気リコネクションと粒子加速の関係**

北川 潤 (名古屋大学 M1)

太陽フレアに関する研究をこれからしようとしているので CHANG LIU の THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE HARD X-RAY SPECIAL INDEX AND THE LOCAL MAGNETIC RECONNECTION RATE という論文を紹介します。この論文は、2005年5月13日に起こった M8.0 フレアと、それに伴い100keVを超えるリボン状の硬 X 線 (HXR) 源が観測された現象について、高分解能を持つ硬 X 線望遠

鏡である RHESSI 衛星を用いてこのイベントの HXR 放射の特徴を調査しているものです。結果として、フレアリボンに沿った形で HXR フラックスとスペクトルの間に反相関関係があり、X 線強度が時間発展に対し作り出す soft-hard-soft (SHS) の空間発展の類の物であるとされています。さらに HXR スペクトルのべきの絶対値とフレア中の電子加速を示唆するリボンに沿った電場との反相関関係があることが発見されました。これは、電場が強いときに高いエネルギーまで効率よく粒子加速が起きていることを示す重要な結果です

1. Chang Liu. et al.2007 THE SPATIAL DISTRIBUTION OF THE HARD X-RAY SPECTRAL INDEX AND THE LOCAL MAGNETIC RECONNECTION RATE
2. Ayumi Asai et al.2004. FLARE RIBBON EXPANSION AND ENERGY RELEASE RATE

**恒星 04a スーパーフレアに伴うコロナ質量放出のシミュレーションにむけて**

平石 平 (京都大学 M1)

太陽と似た星 (自転の遅い G 型主系列星) から、放出されるエネルギーが  $10^{33}$ [erg] を超えるような巨大フレア (以下、スーパーフレア) が多く観測されている。これは太陽でもスーパーフレアが生じる可能性を示しているが、太陽におけるスーパーフレアをシミュレーションで再現した例はまだない。太陽でのスーパーフレアをシミュレーションすることによって、スーパーフレアが可能かどうか、スーパーフレアの形態に制限をかけられないか、地球への影響はどの程度か、といった問いに答えられるだろう。ここでは、太陽でのスーパーフレアのシミュレーションを研究するにあたって、その意味や動機、今後の展望を過去の研究をふまえながら論じる。

1. Maehara et al. 2012. Superflares on solar-type stars. Nature Vol.485 pp478
2. Shiota et al. 2010 Magnethydrodynamic modeling for a formation process of coronal mass ejection:Interaction between an ejecting flux rope and an ambient field. The Astrophysical Journal

**恒星 05a 太陽コロナにおける eruption**

神田 夏央 (名古屋大学 M1)

フレアとは、太陽表面に蓄えられた磁場のエネルギーがプラズマとして開放される現象である。フレアには太陽表面からコロナ中に放出する (eruptive-flare) イベントと、放出しない (confined-flare) イベントがあることはよく知られている。ただ、この二つを分ける原因はよくわかっていない。そこで、太陽フレアの外形に関する論文・RONALD L.MOORE (2001) を紹介する。

その上で、2011年2月18日に観測された小規模な eruption イベントを紹介する。このイベントには4つの特徴がある。

1. eruption 直前に起こる浮上磁場 (emerging flux) から eruption の

- 終わりまでの時間が 10 分程度と短い。
- eruption の規模が小さい。
  - erupt されるプラズマが数万〜数千万度と幅広い温度で存在する。
  - 青色に大きくドップラーシフトしている。
- これらの特徴を軸にこのイベントを見ていくことで、eruption の特性の解明を目指す。

.....

### 恒星 06a CME と EUV 波の統計解析

阿部 修平 (茨城大学 M1)

CME の影響力の大きさは速度に依るところが大きい。しかし、全ての CME を観測することは現状不可能であり、速度を計測することが出来ない CME が存在する。また、次世代の CME 観測衛星が計画されていないという現状もある。そのため、既存の観測手法とは異なる新規の CME 観測手法を確立する必要がある。そこで本研究では EUV 波に着目した。CME と EUV 波の現象そのものにおいては相関が高いことが知られているが、その速度の関係性については不明である。そのため、CME と EUV 波の速度を統計的に解析することにより、その関連性について検証した。

.....

### 恒星 07b 銀河中心部における星変動と GRXE への寄与

川越 淳史 (中央大学 M1)

天の川銀河からほぼ一様に発せられている X 線、GRXE (Galactic Ridge X-ray emission) の存在は 1980 年代から広く知られているものの、その起源についてははっきりとした答えは出ていない。そこで本研究では GRXE の起源はフレアによるものであるという仮説を立て、その寄与を求めることを目的とした。X 線天文衛星 Chandra による銀河中心部の観測データにおいて見られた変動をフレアと仮定し、GRXE の表面輝度と比べたところ約 15% を占めることがわかった

- Ebisawa et al(2008)
- Matsuoka et al.(2011)

.....

### 恒星 08a 太陽型星の恒星風の運動エネルギーの飽和について

西澤 淳 (名古屋大学 M1)

宇宙空間のあらゆる恒星は恒星風を吹き出して質量損失をしている。太陽型星の恒星風駆動には磁気流体波動の一種である Alfvén 波が重要な役割を果たしていると考えられている。本研究では、光球表面での磁場や摂動速度の大きさを変えることにより注入する Alfvén 波の Poynting フラックスを変化させ、恒星風の運動エネルギーがどのように変化するかを磁気流体シミュレーションを用いて調べた。現在の太陽レベルから Poynting フラックスを大きくすると恒星風の運動エネルギーは急激に大きくなるが、これは彩層からコロナの領域の密度上昇による Alfvén 波の反射の抑制による効果で説明できる。しかし Poynting フラックスを大きくし続けると、今度は密度の上昇によりコロナ領域で

の放射損失の効果が大きくなり、エネルギーの大部分が放射損失によって逃げてしまい十分な運動エネルギーが残らなくなる。これより、光球から放出される Poynting フラックスを大きくしても恒星風の運動エネルギーが途中から大きくならずに減ってしまう現象が見られる。すなわち、エネルギー注入の増加と共に恒星風は飽和するということがあり、Wood et al.(2005) で観測されている傾向をよく説明している。

本発表では磁気流体力学を用いて、太陽型星の光球から恒星風へのエネルギー輸送のメカニズムのモデルを構築し、シミュレーションの結果から恒星風の運動エネルギーの飽和について詳しく述べた論文 (Suzuki et al.2013) を紹介する。

- Suzuki, T.K.&Inutsuka, S.2006, J.Geophys. Res., 111, A06101
- Suzuki et al.2013, submitted to PASJ (arxiv:1212.6713)
- Wood et al.2005, ApJL, 628, L143

.....

### 恒星 09a 活動的な太陽型星風における降着相の出現

寺西 恭雅 (名古屋大学 M2)

恒星風は大きく分けて、大質量星や漸近赤色巨星など光度の大きい星の輻射圧駆動型恒星風と、中小質量星の磁気流体波動、乱流などを介した擾乱駆動型恒星風の 2 種類のものがある。太陽程度の質量の恒星の恒星風駆動機構とされる後者は、表面对流層の乱流の持つエネルギーが磁気流体過程など何らかの方法で外層に輸送され恒星風が駆動されると考えられているが、複雑な非線形過程が絡むため、解析的に解くことは困難で数値シミュレーションによるアプローチが必要になる。

活動的な太陽型星風の 1 次元 MHD シミュレーションの中で、表面からエネルギーを注入し続けているにもかかわらず、星風が降着に転じるという現象が見られた。本発表では、この現象が起こるメカニズムを解説し、降着相の出現が恒星の質量放出率に与える影響についても議論する。

- Suzuki, T. K. et al. 2013, arXiv:1212.6713
- Suzuki, T. K. & Inutsuka, S. 2005, ApJL, 632, L49
- Velli, M. 1994, ApJ, 432, L55

.....

### 恒星 10a 近赤外高分散分光器 WINERED による LBV 星 P Cygni の非球対称な突発的質量放出現象の検出

水本 岬希 (東京大学 M1)

高輝度青色変光星 (LBV 星) は、大質量星が主系列星から進化した姿であり、大規模な質量放出により表層の水素ガス等が剥ぎ取られた後、Wolf-Rayet 星を経て超新星爆発を起こすと考えられている天体である。LBV 星の進化においては、特に突発的な質量放出が不可欠な働きをしていることが最近の研究で明らかになっている [1]。一方で、LBV 星は短い大質量星の一生の中でもごく一期間の姿であるため、知られる天体は非常に少なく、その突発的質量放出に関しては不明な点が多く残されている。この現象は衝撃波を伴っていると考えられるが、これには近赤外域の金属の禁制線の観測が適している [2]。そこで、我々は WINERED 分光器を用いて、我々から最も近い LBV 星である P Cygni



の近赤外高分散観測を行った。同分光器は、東大・京産大により開発され、2012年にこのP Cygniでファーストライトを迎えた。解析の結果、[FeII]の輝線が従来の解釈[3]では説明のつかない特徴的なプロファイルを持っていることが明らかになった。この結果は、WINERED分光器の性能を実証するとともに、LBV星P Cygniの突発的質量放出に関して新たな知見を付け加えた。本発表ではこれらの成果を紹介する。

1. Smith, N. 2008, ASPC, 388, 129
2. Smith, N., & Hartigan, P. 2006, ApJ, 638, 1045
3. Stahl, O., Mandel, H., Szeifert, Th., Wolf, B., & Zhao, F. 1991, A&A, 244, 467

### 恒星 11a 矮新星でみられる negative superhump の研究

中田 智香子 (京都大学 M1)

白色矮星を含む近接連星系である激変星では、negative superhump という現象が観測されている。negative superhump とは、軌道周期よりも少し長い周期をもつ光度変動である (positive) superhump に対して、軌道周期よりも少し短い周期をもつ変動のことをいう。negative superhump の起源には謎が多いが、軌道面に対して傾いた降着円盤によりこのような現象が起こるという説が有力になっている。一方で、円盤が傾いているという観測的証拠は今のところはっきりとした形では得られておらず、円盤が傾く機構についても推論の段階である。この研究発表では、negative superhump についてのこれまでの研究をレビューすると共に、Kepler 衛星のデータと食のある激変星を用いて降着円盤の傾きを検証する私たちの試みを紹介する。

### 恒星 12c Kepler を用いた恒星の光度変動の統計的調査に向けて

三舛 慧人 (九州大学 M1)

恒星の光度変動は変動の原因によって振幅や周期の大きさがさまざまである。変動の大きなものとしては脈動変光星、フレア星、食連星などがあり、変動の小さいものとしては非動径脈動、spot などが挙げられる。このような光度変動の性質を統計的に解析するためには、大量の恒星サンプルを持ち、長い観測期間を有する光度データが必要である。系外惑星探査衛星 Kepler は約 16 万個の恒星サンプルと約 4 年の観測期間をもつことからこれらの条件を満たしている。さらには高い時間分解能と角分解能を併せもつため、Kepler の光度データを用いることで恒星のさまざまな大きさの光度変動を統計的に解析できることが期待される。

本発表では、Kepler の性能と光度データの特徴を紹介するとともに、Kepler の光度データに含まれるノイズに関連した論文も紹介する。

1. Jenkins, J. M., et al. 2010. ApJ, 713, 120

### 恒星 13c Dependence of the C/O ratio on the Initial Mass and Metallicity of the Asymptotic Giant Branch Stars

田染 翔平 (北海道大学 M2)

It has been shown that the fraction of carbon enhanced stars is high among metal poor stars observed in our Galaxy. Carbon enhanced metal poor stars have been considered to originate in a binary system by accreting carbon enriched gas injected from the primary star in AGB<sup>[1]</sup> phase. Because carbonaceous dust is expected to form in C-rich AGB stars and to be injected to interstellar space, C-rich AGB stars can be important resource of dust in galaxies in the early universe. But the dependence of C/O ratio on the initial mass and metallicity of AGB stars as well as the dust formation and mass loss in metal poor stars has not yet been investigated systematically.

Atmospheric composition of AGB stars is controlled by the third dredge up (TDU) and hot bottom burning (HBB)<sup>[2]</sup> which, in turn, depend on their initial mass, metallicity and mass loss rate.

In this study, (I) we investigate the dependence of C/O ratio on the initial mass and metallicity of AGB stars employing Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)<sup>[3]</sup> and find that all stars with initial mass  $M_{init} \leq 4 M_{\odot}$  evolve to C-rich AGB stars except the star of  $4 M_{\odot}$  with solar metallicity. (II) By adopting the criterion for realizing dust driven wind derived from the model calculations of dust driven wind, it is found that all stars which encounter the TDU and finish HBB (if HBB occurs) satisfy the criterion for the dust driven wind except stars with  $2 M_{\odot}$  and  $Z \leq 10^{-4}$ . (III) In initial metallicity  $Z = 0$ , where we don't know whether mass loss occurs or not, We compare models including mass loss with ones including no mass loss and found that we should use mass loss rate considering dust formation.

1. Herwig F. 2005, ARA&A, 43, 435
2. Iben I., Jr, Renzini A., 1983, ARA&A, 21, 271
3. Paxton, B., Bildsten, L., Dotter, A., et al. 2011, ApJS, 192, 3

### 恒星 14c MAXI が捕えた星からの巨大フレア

比嘉 将也 (中央大学 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 4 年間に渡る MAXI の観測により、21 天体 (RS CVn 型連

星:11, Algol 型連星:1, dMe 型星:7, dKe 型星:1, YSO:1) から計 56 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  $6e30 \sim 5e33$  ergs/s であり、星として最大級のフレアと言える。中でも、2012 年 4 月 18 日に検出された AT Mic(dMe 型星) からの巨大フレアは、dMe 型星として最大級の、ルミノシティーが  $6e32$  ergs/s であり、ボロメトリックルミノシティーの 4 倍もの明るさを誇っていた。また、フレアが減光するまでに放射する全エネルギーは、 $1e36$  ergs であり、これは dMe 型星からのフレアとしては過去に報告例が無い程の巨大なものであった。

本会では、これら MAXI で検出された巨大フレアと星の特徴について報告する。

### 恒星 15c スーパーアウトバーストサイクルを通した VW Hyi の多波長観測

和田 師也 (東京大学 M2)

矮新星は数ヶ月おきに可視光で 2-5 等の増光 (アウトバースト) を起こす激変星である [1]。アウトバーストが起きると約 1 日で最大光度に達し、数週間かけて元の明るさに戻る。このアウトバーストは降着円盤の熱不安定性によって引き起こされることが知られている [2]。矮新星のうち SU UMa 型は、通常のアウトバーストに加え光度が約 1 等級明るく増光期も 5 倍程度長い「スーパーアウトバースト」を起こす。静穏時と通常のアウトバースト時における降着円盤内縁の詳細な構造が明らかになってきた [3]。その一方でスーパーアウトバースト時の X 線観測はほとんど例がなく、X 線放射領域の構造はいまだ不明である。

我々は、スーパーアウトバースト時の X 線放射領域の構造と降着円盤内縁のプラズマ構造の時間変化を明らかにするために、SU UMa 型矮新星 VW Hyi のすざく衛星による ToO 観測を行った。VW Hyi は (1) ビジビリティが良い、(2) アウトバーストおよびスーパーアウトバーストの間隔がほぼ一定でかつ短い、(3) 天体までの星間吸収が  $N_H \sim 6 \times 10^{17} \text{ cm}^{-2}$  と小さい、(4) 天体までの距離が 65 pc で非常に近い、という特徴を持つ。そのため様々なパラメーターが高い精度で求められており、スーパーアウトバースト時に焦点を置いた研究に最適である。すざく衛星による ToO 観測は、X 線放射領域の構造と、白色矮星への質量降着率の時間発展を明らかにするためにスーパーアウトバースト時 1 回と静穏時 3 回の計 4 回行った。我々は cooling flow モデルを仮定したスペクトル解析の結果から、スーパーアウトバースト時の降着円盤から白色矮星への質量降着率  $\dot{M}$  が静穏時に比べて上昇することを初めて観測から明らかにした。本講演ではこれら X 線での解析結果に加え、南アフリカ IRSF/SIRIUS 望遠鏡を用いた近赤外線での観測結果もまとめ、VW Hyi について新たにわかったことを報告する。

1. Warner, B. 1995, Cataclysmic variable stars (Cambridge University Press)
2. Osaki, Y. 1996, PASP, 108, 39
3. Ishida, M., et al. 2009, PASJ, 61, S77

### 恒星 16c 熱不安定による太陽フィラメント形成の 2.5 次元磁気流体シミュレーション

金子 岳史 (東京大学 M2)

太陽フィラメントは、高温のコロナ (100 万 K) 内に出現する低温高密度プラズマ雲 (温度は 1-10 万 K、密度はコロナの 10-100 倍程度) である。低温高密度プラズマの生成機構については、長いコロナループの足元に局在化した加熱を与えることで、熱不安定により低温高密度プラズマが形成されることが熱伝導、放射、重力を考慮した 1 次元流体シミュレーション [1]、2 次元磁気流体シミュレーション [2] によって調べられている。一方、これらの熱不安定モデルは観測で示唆されているようなフィラメントの磁束管型磁場構造の形成過程が考慮されていない。そこで、本研究では、磁束管の形成から低温高密度プラズマ生成までを一括して理解する新たなフィラメント形成メカニズムを提案し、非等方非線形熱伝導、放射冷却、重力を考慮した 2.5 次元抵抗性磁気流体シミュレーションによる実証を試みた。結果、磁束管構造の形成は、熱不安定が励起されるために、以下のような本質的な役割を果たすことが分かった。まず、形成された磁束管の磁力線は閉じているため熱伝導の効果が制限される。さらに、コロナ底部の高密度プラズマが磁束管にトラップされて上昇するため、背景加熱に対する磁束管内の放射冷却が強まり、放射の典型時間が熱伝導の典型時間よりも短くなることで熱不安定が生じる。これにより磁束管内に低温高密度プラズマが生成される。

1. J.T.Karpen, S.K.Antiochos, and J.A.Klimchuk 2003. ApJ
2. C.Xia, P.F.Chen, and R.Keppens 2012. ApJL

### 恒星 17c 大振幅プロミネンス振動の励起過程を用いたコロナ衝撃波としての EUV 波の性質の研究

高橋 卓也 (京都大学 M2)

2012 年 3 月 7 日に発生した巨大フレア \*1 に伴い、コロナ \*2 中を伝搬する擾乱現象が観測された。これは EUV 波として知られる現象である。EUV 波はフレアを引き起こした活動領域から 70 万 km 離れた太陽極域のプロミネンス \*3 に衝突し、大振幅のプロミネンス振動を引き起こした。我々は、EUV 波の衝突によって振動が励起される過程で、5 万度の EUV 波長帯においてプロミネンスが強く増光することを発見した。いくつかの観測的性質から、観測された EUV 波はコロナ中を伝わる磁気流体ファストモード衝撃波であると結論した \*4。さらに、観測されたプロミネンス振動の励起過程を用いて、定量的な議論が困難であるコロナ中の衝撃波の性質について定量的に議論する新しい方法を提案した。

- \*1 多波長での突発的増光現象
- \*2 高温希薄な太陽の高層大気
- \*3 コロナ中に磁気力によって浮かぶ低温高密度なプラズマ雲
- \*4 EUV 波には現在 2 つの物理解釈が対立している。磁気流体 (MHD) ファストモード衝撃波であるとする解釈と、そうではないとする解釈である

**恒星 18c 非対称反平行磁場における磁気リコネクションと波の発生**

佐藤 龍伍 (茨城大学 M2)

太陽のコロナ加熱問題について、Alfvén 波加熱説とマイクロフレア加熱説が有力視されている。しかし、非対称な反平行磁場におけるリコネクションでも Alfvén 波が発生するので、両者を明確に区別して議論することは難しい。そこで我々の研究グループは数値シミュレーションを用いて、そのようなリコネクションにより発生する波の Flux を定量的に調べている。本研究は、2.5次元の数値シミュレーションを用いて、非対称反平行磁場による磁気リコネクションを行う。これにより発生する波を定量的に見積もり、コロナ加熱を議論する。また、重力を考慮しない一様大気の場合と重力を考慮して太陽大気を模した場合について議論する。

1. Kigure et al. 2010, PASJ, 62, 993
2. K. Galsgaard and I. Roussev. 2002 A&A, 685, 383

**恒星 19c 惑星トルクによる太陽活動への影響**

新井 信乃 (お茶の水女子大学 M1)

太陽黒点数は太陽の活動性の指標として観測され続けている。19世紀のシュワーベ (S.H.Schwabe) は約 11 年周期で増減を繰り返すという法則性を見出した。この 11 年周期の活動性を引き起こす要因は自転や磁場など太陽内部であると考えられている。近年、銀河宇宙線に含まれる放射性核種から太陽活動データが復元され、数千年ものデータを取得することが可能になった (2)。データを解析すると 11 年周期だけでなく、より長期的な周期があることが分かった。J.A.Abreu ら (1) はその周期性の要因として、太陽外部からの惑星運動が影響するのではないかと考え、太陽が惑星から受けるトルクを計算したところ、復元したデータと周期に高い一致が見られた。本発表では、J. A. Abreu らによって立てられた惑星トルクによる太陽活動への影響についての論文について発表する。

1. Abreu, J. A., Beer, J., Ferriz-Mas, A., McCracken, K. G., & Steinhilber, F. 2012, aap, 548, A88
2. Steinhilber, F., & Beer, J. 2011, AGU Fall Meeting Abstracts, A903

**恒星 20c 磁気リコネクションによる二重スピキュール発生モデル**

須田 武憲 (京都大学 M1)

スピキュールとは彩層からコロナへと噴出する高速 (~25km/s) で低温 (数千度~1 万度) のプラズマジェットであり、太陽表面上に常に多数存在している。その存在は 100 年ほど前には知られていたが、スピキュールの幅が 300km~1500km と非常に小さいため、スピキュールの詳細な構造は長い間謎に包まれていた。しかし、近年の目覚ましい太陽観測衛星の発達によりスピキュールの微細構造が次第に明らかになり、

そして我が国の太陽観測衛星「ひので」によって多くのスピキュールはベア (二重構造) で現れることが示唆された [1]。我々はこの二重構造を自然に説明できる可能性をもつ、スピキュールの磁気リコネクションモデルを提唱する。磁気リコネクションは反平行な磁場で生じる場合の議論が多いが、シア構造をもった 3 次元的な磁場構造でも起こりうる。そしてシア構造をもつ磁場の磁気リコネクションによって発生する擾乱がスピキュールを発生させる可能性があると考え、磁気リコネクション後の磁場構造を想定した初期条件から 1.5 次元 MHD シミュレーションを行い、磁気リコネクション後に発生する fast-shock がスピキュールを発生させることを確かめた。

1. Suematsu, Y. et al., 2008, ASP Conf Ser

**恒星 21c 磁場構造が引き起こす太陽フレアとコロナ質量放出について**

板橋 佑典 (名古屋大学 M1)

太陽系においてもっとも甚大な爆発である太陽フレアや CME は地球周辺環境や経済基盤に影響を与える場合がある。しかしこれらの引きがねになるメカニズムは未だに議論中であり、これらの爆発を引き起こす磁場構造は未だ不透明である。Kusano et al (2012) では 3 次元の電磁流体力学 (MHD) シミュレーションを用いて多様な磁場構造における非線形ダイナミクスを体系的に調査することにより、この問題を考察した。

その結果として彼らは 2 つの異なる磁場構造が太陽面爆発の発生を促進することを突き止めた。加えて彼らは 2 つの大きなフレア (2006 年 12 月 13 日の X クラスのフレア、及び 2011 年 2 月 13 日の M クラスのフレア) について、ひので衛星から得られた画像を用いた解析を行った。本講演では、この論文の内容を紹介し、太陽フレア問題について議論する。

# 星間現象分科会

電波から $\gamma$ 線まで - 多波長から探る星間現象

日時	7月29日 17:00 - 18:00, 18:00 - 19:00 (招待講演:井上 剛志 氏) 7月30日 9:00 - 10:15 7月31日 9:00 - 10:00 (招待講演:信川 正順 氏), 10:00 - 11:15 8月1日 12:30 - 13:30 (招待講演:立原 研悟 氏)
招待講師	井上 剛志 氏 (青山学院大学)「星間衝撃波の物理と天文学的応用」 信川 正順 氏 (京都大学)「天の川銀河中心領域の X 線観測:巨大ブラックホールの過去の大爆発の証拠を捉えた!」 立原 研悟 氏 (名古屋大学)「NANTEN 望遠鏡の見た宇宙」
座長	亀崎 達矢 (鹿児島大学 D2)、工藤 祐己 (千葉大学 D1)、菅原 隆介 (京都大学 M2)、高平 謙 (北海道大学 M2)
概要	<p>星間空間には、原子ガス、分子ガス、ダスト、電離ガス、高温プラズマなど様々な状態の物質が存在しています。これらは磁場、衝撃波、重力相互作用、輻射、乱流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、超新星残骸などの多くの天体を形作ります。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、系内を中心に可視光、赤外線、電波、<math>\gamma</math>線、X線など、多波長で観測が行われていて、幅広く理解することができます。今後は TMT(可視光、赤外線)、SPICA(赤外線)、ALMA、SKA(電波)、CTA(<math>\gamma</math>線)、ASTRO-H(X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。一方、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> <p>注) 星形成領域、分子雲は星間現象分科会で扱います。 注) 分子雲コア、アウトフローは星形成・惑星系分科会で扱います。 注) 超新星自身の研究はコンパクトオブジェクト分科会で扱います。</p>

井上 剛志 氏 (青山学院大学)

7月29日 18:00 - 19:00 C(広瀬鳴瀬)

## 「星間衝撃波の物理と天文学的应用」

天体現象の多くは非常に動的であり、衝撃波と呼ばれる小さなスケールで物理量が突然変動する構造が普遍的に発生する。通常の流体力学とは異なり、星間媒質に代表されるような宇宙プラズマ中では磁場の効果や輻射過程を介した加熱冷却、宇宙線による非熱的効果、自己重力等の様々な物理を考慮しなければならない。これらの効果を考えると、例えば超音速飛行機が発生させるソニックブームの様な空気中では安定に伝搬する衝撃波も場合によっては不安定となり、その不安定性が様々な天体現象にとって本質的に重要になる場面が多々存在する。本講演ではなぜ衝撃波が発生するのかという基本的なところから出発して、宇宙プラズマ中での様々な衝撃波の不安定性やそれによって引き起こされる天体現象のダイナミクス (例えば星間雲の形成、大質量星形成、超新星残骸、ガンマ線バースト等) を著者の最近の研究成果を交えながら解説する。

信川 正順 氏 (京都大学)

7月31日 9:00 - 10:00 B(エメラルド)

## 「天の川銀河中心領域の X 線観測: 巨大ブラックホールの過去の大爆発の証拠を捉えた!」

天の川銀河の中心領域 (銀河中心) には X 線を放射する分子雲が存在している。低温 (10-100 K) の分子雲が自ら X 線を放射することはないので、銀河中心の巨大分子雲が高強度の高エネルギー粒子に照らされているという驚くべき事実を示すものであった。その起源として、巨大ブラックホール射手座 A\* の過去の X 線フレア (Koyama et al. 1996; Murakami et al. 2000) や、低エネルギー宇宙線電子 (Yusef-Zadeh et al. 2002; 2007) が提案されていたが、これまでに観測的決定打はなかった。

そこで、我々は X 線天文衛星「すざく」を用いた観測を行い、(1) 鉄以外の中性元素輝線の発見 (Nobukawa et al. 2010)、(2) X 線を用いた分子雲の分布の測定 (Ryu et al. 2009)、(3) 分子雲からの X 線放射の時間変動の発見 (Inui et al. 2008; Nobukawa et al. 2011)、という成果を挙げてきた。これらの観測事実から、射手座 A\* が数百年前に現在の 100 万倍以上の大フレアを起こし、分子雲を X 線で照らしていること以外に考えられないことが分かった。本講演では「すざく」によるこれまでの研究の経緯とその詳細な成果を報告する。

本研究成果は主に私が大学院在学時に行ったものである。天文・天体物理学のみならず広い分野から高い評価を受け、第 1 回日本学術振興会育志賞を受賞している。

立原 研悟 氏 (名古屋大学)

8月1日 12:30 - 13:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「NANTEN 望遠鏡の見た宇宙」

名古屋大学の電波天文学グループでは、チリ・アタカマ砂漠に設置した口径4 mのNANTEN2望遠鏡を使い、南の空にあるさまざまな天体に対し、ミリ波・サブミリ波の波長で観測を行っています。特に広視野をいかしたCO輝線の大規模サーベイでは、銀河面や大小マゼラン銀河の分子ガスの姿を明らかにしてきました。最近の成果をご紹介します。

大質量星は周囲の星間物質に対し大きな影響を及ぼしますが、その形成のメカニズムはあまり研究がすすんでいませんでした。大質量星形成領域の分子雲に、あまり初期条件が保存されていないという困難があるためです。外的要因による誘発モデルがいくつか提案されてきましたが、観測的に確立されるには至っていません。私達は分子雲の衝突で大質量星形成が誘発されている証拠を見つけました。銀河系内では少なからぬ頻度で分子雲が衝突し、大質量星形成が誘発されていると考えられます。Spitzer宇宙望遠鏡で同定された多くのシェル状構造を網羅的に観測し、定量的分析を始めています。

星間ガスの運動は、超音速乱流的であると言われています。ガスの音速より大きな線幅をもつ分子スペクトルが至る所で観測されるためです。この乱流が長時間維持されることの理論的説明は、なかなか成功しませんでした。しかし非常に有望な二相乱流モデルが提唱され、分子雲の縁の微小な構造の発見も、このモデルをサポートしています。すなわち高温低密度の原子ガスから、低温高密度の分子ガスができ、両者が共存しているのです。

他にもガンマ線の観測との共同研究から、超新星残骸において高エネルギー陽子が高効果的に加速され、星間物質中の陽子と衝突することで、高エネルギーガンマ線の起源となることを突き止めました。多波長の観測データや理論モデルと組み合わせることで、星間現象の理解は近年飛躍的に進んだと言えるでしょう。

## 星間 01a 高銀緯天体 MBM53, 54, 55 の分子雲と原子雲

服部 桃 (名古屋大学 M1)

高銀緯分子雲 (High Latitude Clouds: 以下 HLCs) は典型的に銀緯  $-b > 20$  度に位置する天体である。現在までに Magnani et al. 1985 をはじめとする様々な研究が行われてきた。MBM53, 54, 55 領域の分子雲は、Magnani et al. 1985 により発見されており、「なんてん」望遠鏡による観測でその全体像が明らかにされている Yamamoto et al. 2003。しかし、「なんてん」の観測はビームサイズ 2.6 分角に対し 4 分角グリッドであったため、アンダーサンプリングであったこと、比較に用いた水素原子データの分解能が 35 分角であったことなど、現在改善可能な点が多い。そこで、Kaji 修士論文 (2013) では、新しくフルサンプリングの機能を得た NANTEN2 のデータと、GALFA-HI survey (Peek et al. 2011) の 4 分角のデータ、更に IRAS100 $\mu$ m のデータを用いて分子雲、原子ガスとダストについて、空間分布と存在量の比較を行っている。この研究結果から、原子ガスに付随するダストからの放射強度と、分子ガスに付随するダストからの放射強度の違いが、ダスト温度の違いで説明できることを示し、CO と  $H_I$  の観測量からダストの物理量 (100 $\mu$ m の放射強度) を表すことができるようになった。

1. Yamamoto et al. 2003. ApJ

## 星間 02a NGC3603 に付随する母体分子雲の観測的研究

服部 有祐 (名古屋大学 M1)

大質量星は、一生の最期に超新星爆発を起こし周囲の環境に多大な影響を及ぼすなど銀河の進化において重要な役割を果たすが、その形成課程は明らかとなっていない。Furukawa et al.(2009) や Ohama et al.(2010) は、多数の大質量星を含む大規模 星団 (SSC) の 1 つである Westerlund2 の観測結果を用いて、分子雲同士の衝突による大質量星形成の説を提案した。三列星雲 (M20) においても同様の観測成果が報告されている (Torii et al. 2011)。以上の研究により、大質量星の形成において分子雲同士の衝突が重要であると考えられる。NGC3603 は、太陽系から約 7 kpc 離れた場所に位置する大規模星団 (SSC) である。星団近傍については観測がなされていたが、広範囲かつ高分解能な観測はされていない。そこで、NANTEN2 電波望遠鏡を用いて同領域の広範囲観測を行った。その結果、視線速度のことなる 2 つの分子雲を検出した。両分子雲は星団の中心方向で重なり、輝線強度比は星団周囲で高いため、2 つの分子雲は星団に付随すると考えられる。本研究では、NGC3603 が分子雲同士の衝突による結果であることを提案する。

1. Furukawa, N., Dawson, J. R., Ohama, A., et al. 2009, *ApJL*, 696, L115
2. Ohama, A., Dawson, J. R., Furukawa, N., et al. 2010, *ApJL*, 709, 9755
3. Torii, K., Enokiya, R., Sano, H., et al. 2011, *ApJ*, 738, 46

## 星間 03a MHD 乱流を用いた星形成シミュレーション

奥山 美奈 (新潟大学 M1)

本発表では論文 Padoan & Nordlund 2012 ApJ 759 L27 についてのレビューを行う。星形成過程の研究において、巨大分子雲 (GMCs) 内における星形成率 (SFR) の数値シミュレーションは様々なものが行われている。しかしながら実際に観測されている SFR に近い値を得ることは難しく、概して観測値よりも高い値となっているのが現状である。計算に比べ実際の SFR が異なる理由としては磁場と乱流の影響があると考えられており、実際分子雲内で超音速乱流の観測がされている。この研究では sink particle を導入して超音速 MHD 乱流及び自己重力のもとで AMR シミュレーションを行うことで、GMCs で観測されたのと同程度の SFR を得た。また SFR を表す関係式として銀河内での星形成によく用いられる Schmidt-Kennicutt 則があるが、これに含まれる係数を free-fall time と dynamical time を用いた簡単な式で表すことを提案する。

1. Padoan P. and Nordlund Å. 2012. ApJ, 759, L27

## 星間 04a すざく衛星で探る超新星残骸 3C 397 の鉄周辺元素組成

菅原 隆介 (京都大学 M2)

宇宙において鉄やその周辺元素 (マンガン、ニッケルなど) はほとんどが Ia 型超新星によって作られる。これらの元素は爆発の直前に合成されると考えられ、したがってその組成は爆発寸前の星の内部状態を反映していると考えられる。しかしマンガンやニッケルはその合成量の少なさから個別の超新星について組成量を測定した例は今まで一例しかなかった (Park et al. 2013[1])。

我々は X 線天文衛星「すざく」を用いて超新星残骸 3C 397 のデータを解析し、その結果今まで発見されていたクロム、マンガン、鉄の他にニッケルの輝線を発見した。プラズマモデルを用いてフィッティングを行ったところ、星間物質由来の電離平衡プラズマと高温低電離/低温高電離な 2 つの ejecta 成分で再現できることがわかった。Ejecta においてはシリコンやアルゴンに対する鉄のアバundanceが高く、このことから 3C 397 は Ia 型超新星起源である可能性がある。

さらに、鉄に対するマンガンとニッケルのアバundanceも 5 倍程度と非常に高かった。これらの値は Kepler (Park et al. 2013[1]) や銀河中心 (Koyama et al. 2007[2])、銀河団 (Matsushita et al. 2013[3]) における値に比べても非常に多かった。

1. Park et al. 2013. ApJ, 767, 10
2. Koyama et al. 2007. PASJ, 59, 245
3. Matsushita et al. 2013 ApJ, 680, 33

## 星間 05a すざく衛星を用いた超新星残骸 G337.2-0.7 の観測

高田 明寛 (京都大学 M1)



G337.2-0.7 は天の川銀河内に存在するシェル型超新星残骸である。過去にあすか衛星 [1] と Chandra 衛星、XMM-Newton 衛星 [2] で観測され、元素量から爆発噴出物 (エジェクタ) が豊富な超新星残骸 (SNR) であることが発見された。また Ca の元素量が太陽組成の 12 倍であることや Fe 輝線の欠乏が報告されており、Ia 型超新星起源の SNR であることが示唆されている。今回我々はすざく衛星を用いて G337.2-0.7 の長時間観測を行った。その結果、この SNR に対して初めて Fe-K 輝線を確認した。今後は新たに得た Fe-K を中心に、SNR プラズマの詳細解析を行う予定である。

1. Cara E. Rakowski et al. 2006. ApJ,646:982-1000
2. Cara E. Rakowski et al. 2001. ApJ,548:258-268

### 星間 06a X 線天文衛星「すざく」による超新星残骸 RCW86 での宇宙線加速の系統的研究

坪根 義雄 (青山学院大学 M1)

超新星残骸の衝撃波は宇宙線の加速源の候補として重要である。しかし、どのような環境で粒子が加速しやすいかは解明されていない。その鍵になるのが X 線である。残骸の衝撃波面で加速された粒子は、磁場により軌道を曲げられシンクロトロン X 線を放射する。一方、衝撃波周囲のガスは加熱され高温プラズマとなり、熱的 X 線を放射する。これらを観測すれば、加速粒子とその周辺環境を調べることができる。

超新星残骸 RCW86 は、衝撃波面でのシンクロトロン X 線放射から高エネルギー電子の存在が知られる若い残骸である。我々は、X 線天文衛星「すざく」による合計 6 観測のデータを用いて、残骸全面を 44 の小さな領域に分割し、領域ごとにスペクトル解析を行った。その結果、残骸全域にわたり熱的放射とシンクロトロン X 線放射の強度分布を得た。

### 星間 07a 超新星残骸における乱流と磁場増幅

岡本 良太 (名古屋大学 M1)

一般的に星間媒質 (ISM) は高温側に warm neutrals medium(WNM; $n \sim 0.5 \text{ cm}^{-3}, T \sim 8000 \text{ K}$ )、低温側に cold neutral medium(CNM; $n \sim 50 \text{ cm}^{-3}, T \sim 100 \text{ K}$ ) の熱的に安定な相を持ち、等圧下でこれらの相は共存することができる。Inoue et al.2009 は、この非一様性を持つ ISM と超新星爆発による衝撃波の相互作用を 2 次元磁気流体力学シミュレーションを用いて調べた。結果として、最大磁場強度はプラズマのベータ値が 1 あたりとなる条件まで増幅し、超新星爆発の典型的な衝撃波速度である  $10^3 \text{ km s}^{-1}$  程度の衝撃を伝搬させた場合においては数 mG のオーダーまで増幅された。この磁場増強機構は、ISM の非一様性によって Richtmyer-Meshkov 不安定である。その結果生じた乱流によるダイナモ効果により磁場が増幅されたと考えられる。また近年の X 線放射の観測で、いくつかの超新星残骸 (SNR) では数 mG 程度の磁場を帯びた  $0.05 \text{ pc}$  程度のスケールの X 線強度変動領域が発見されており、この空間スケールと磁場強度はシミュレーション結果と非常に良く一致している。

本講演では非一様性を考慮した ISM と衝撃波の相互作用の 2 次元磁気流体力学シミュレーションの結果から磁場増幅機構の説明と観測結果との対応を詳しく述べた論文 (Inoue et al.2009) を紹介する。

1. I Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., Apj, 695, 825 (2009)
2. Inoue, T., Yamazaki, R., Inutsuka, S., & Fukui, Y., Apj, 744, 71 (2012)

### 星間 08a 銀河中心ローブにおける電波連続波と電波再結合線の分布の差

名越 遥 (山口大学 D2)

天の川銀河の中心領域には、銀河中心ローブと呼ばれる電波で明るい構造が存在する。銀河中心ローブは観測から、熱的な放射と非熱的な放射が混在していることが示唆されているが、詳細な構造については明らかになっていない。山口 32 m 電波望遠鏡を用いて銀河中心ローブの大部分を占めると考えられる電離ガスが放射する電波再結合線の観測および銀河中心ローブ周辺の電波連続波の観測を行った。得られた電波連続波と電波再結合線の強度分布から、銀河中心ローブの熱的放射成分と非熱的放射成分を分離した。また、熱的放射の強度から銀河中心ローブの電離ガスの電子密度・質量・エネルギー・冷却時間を求めた。本講演では、これらの結果から、銀河中心ローブの構造について議論する。

1. Y. Sofue, Handa 1984 Nature, 310, 568
2. M. Tsuboi. and M. Inoue. and T. Handa. 1986 AJ, 92, 818T
3. C. J. Law 2010 ApJ 708, 474

### 星間 09a 6.7 GHz メタノールメーザの視線速度ドリフト現象

下村 忠資 (山口大学 M1)

我々の研究グループは、山口 32m 電波望遠鏡を用いたメタノールメーザの観測を行っている。2011 年に視線速度ドリフトを調査するために 13 天体を対象とした単一鏡モニター観測を行った。その結果、11 天体の 18 成分でドリフトが検出された。そして 2012 年度に同 13 天体及び MonR2 を対象に再び視線速度ドリフトのモニター観測を行った。今回は 2012 年度の結果を示し、2011 年度とさらに過去の観測データとを比較をした結果、過去データと 2011 年のドリフトにおいて違う傾向が見られたことに関して報告する。

### 星間 10a 星形成領域領域 NGC2264C で見つかった Class0 天体に付随する X 線

亀崎 達矢 (鹿児島大学 D2)

NGC2264C は、Mon OB1 巨大分子雲複合体の東に位置する CO のアウトフローが観測された星形成領域である。NGC2264C には合計で 13 個のコンパクトな高密度コア (ミリ波連続波源 CMM1 - 13) が見つかった [1][2]。この領域には水メーザが付随しており、我々は VERA 入来局の単一鏡観測でそのメーザの増光を確認したため、VERA4 局による VLBI 観測で NGC2264C の年周視差計測を開始した。2009 年 9 月から 2010 年 12 月まで約 1 ヶ月おきに計 13 回のモニター観測を行い、得られた年周視差は  $1.365 \pm 0.098 \text{ mas}$ 、距離に換算すると  $738_{-50}^{+57} \text{ pc}$  であった。これまでは測光学的距離に基づいて  $\sim 700 -$

800 pc とされており、今回得られた距離はそれと一致する。VLBI によるマッピングの結果、検出された 2 つの水メーザー源はそれぞれミリ波連続波源 CMM4 の南のダストコア (CMM4S) とセンチメートル連続波源 VLA3 に付随することがわかった。センチメートル連続波源 VLA3 に付随するメーザーは  $150 \text{ km s}^{-1}$  程度の高速度の特異運動を持つことがわかった。もう一つのメーザーは CMM4S に付随する事がわかった。CMM4S の中心星は中間・近赤外線で見ることができないことから Class 0 天体である。この中心星からの X 線も観測されていることが今回わかった [3]。CMM4S の質量、光度、柱密度はそれぞれ  $\sim 1-4 M_{\odot}$ ,  $\sim 4.8 L_{\odot}$ ,  $\sim 5.4 \times 10^{23} \text{ cm}^{-2}$  であった。この質量と光度から  $M - L_{bol}$  図上にプロットすると CMM4S は低質量の Class 0 天体だと考えられる。減光量は  $A_V = 160 (81 - 290) \text{ mag}$  とかなり大きかった。

1. Peretto, N., André, P., & Belloche, A. 2006, A&A, 445, 979
2. Peretto, N., Hennebelle, P., & André, P. 2007, A&A, 464, 983
3. Flaccomio, E., Micela, G., & Sciortino, S. 2006, A&A, 455, 903

## 星間 11a Tornado Nebula に付随するミリ波分子輝線の観測

酒井 大裕 (東京大学 M1)

Tornado nebula (G357.7-0.1) は太陽系から 12 kpc の距離にある双極的構造をもつ特異な電波天体であり、発見以来その起源は永らく不明であった。最近、X 線天文衛星「すざく」により、電波で見える双極構造の両端に、ほぼ同じスペクトルを呈する 2 つの熱的拡散 X 線源が検出された。加えて野辺山 45 m 望遠鏡による分子スペクトル線観測によって、2 つの拡散 X 線源の外側に隣接する分子雲 (MC1, MC2) が検出されたことから、Tornado の正体は双極構造の中心部分にある中性子星またはブラックホールを含む近接連星系から放出されたジェットに駆動された構造と考えられるようになった。さらに我々は CO スペクトル線データの解析を進め、分子ガスの圧力が熱的拡散 X 線源のそれとほぼ同程度である事を見出した (酒井他、2012 年秋季年会 Q42a)。さらに、VLA のアーカイブデータの検索を行い、Tornado nebula 方向の OH 1720 MHz 輝線データの入念な解析を行った。その結果、その観測の PI が報告した強力なメーザー・スポットの他に、微弱かつ空間的に拡散した OH 輝線放射を確認した。この放射は 20 cm 電波連続波で見える Tornado nebula の形状に沿って分布しており、強度パターンも強く相関していることから物理的に付随している事は間違いないと考えられる。この拡散 OH 1720 MHz 輝線放射は、 $V_{LSR} \cong -12 \text{ km s}^{-1}$  と  $+4 \text{ km s}^{-1}$  の二つの速度成分から成り、どちらも“head”部分に分布している。特に“head”部分だけに限るならば、拡散 OH 放射の速度構造は膨張運動と解釈する事も可能であるが、“tail”部分も含めた大局的な運動を記述するモデルは今のところ見出されていない。

1. Sawada, M., Tsuru, T., Koyama, K., & Oka, T., 2011, PASJ, 63, 849
2. Shaver, P. A., Salter, C. J., Patnaik, A. R., van Gorkom, J. H., & Hunt, G. C., 1985, Nature, 313, 113

## 星間 12c オリオン星雲における近赤外 DIB とフラレーンの関係

岡本 理奈 (信州大学 M2)

星間物質によって生じる多数の未同定吸収線のことを、「拡散星間バンド (Diffuse Interstellar bands; DIBs)」と呼ぶ。DIBs の起源は高分子有機化合物であると考えられているが、厳密な吸収物質は未解明のままである。これまでの観測と地上実験により、フラレーンが DIBs の起源の候補として大きく注目されている。 $\lambda_{sim} 9577, 9632 \text{ \AA}$  の DIBs をはじめとする複数の DIBs が  $C_{60}^+$  の吸収線の候補として検出されており [1]、2010 年以降には中性状態のフラレーン  $C_{60}, C_{70}$  の存在が宇宙空間で確認されている [2][3]。このように、フラレーンが DIBs をもたしている可能性は非常に高い。本研究では、星形成領域を含むオリオン星雲付近の星 16 天体を観測したデータを用い、フラレーンに起源をもつ可能性がある DIBs と、その物理環境の関連について考察する。

1. Misawa, T., Gandhi, P., Hida, A., Tamagawa, T., and Yamaguchi, T. 2009. ApJ, 700, 1988
2. Cami, J. et al. 2010. Science, 329, 1180
3. Sellgren, K. et al. 2010. ApJ, 722, L54

## 星間 13c 近赤外線域における宇宙背景放射と銀河拡散光

佐野 圭 (東京大学 M2)

銀河拡散光とは、銀河系内の星の光が星間空間のダストによって散乱された成分である。銀河拡散光のスペクトルを測定することにより、その散乱/放射源であるダストの性質についての情報を得ることができる。可視光での銀河拡散光の測定例はあるが、近赤外線域での銀河拡散光は測定されていない。

銀河拡散光は宇宙背景放射の前景光になりうるが、これまでの近赤外線域での宇宙背景放射を測定した研究では、銀河拡散光は無視できると考えられて除かれていない。しかし、近赤外線域でも銀河拡散光が無視できない強度を持つならば、銀河拡散光を除いた上で、宇宙背景放射の強度を再測定する必要がある。そこで我々は遠赤外線域の diffuse map を利用する手法を用いた。星から出た光は、ダストに散乱されて銀河拡散光になるだけでなく、ダストに吸収もされる。吸収された光はダストを暖め、遠赤外線として再放射される。したがって銀河拡散光と遠赤外線放射の間には相関関係があるはずである。この相関関係を利用することで銀河拡散光と宇宙背景放射を分離した上で、宇宙背景放射の強度を測定できる。

我々は COBE 衛星の DIRBE (拡散赤外背景放射実験装置) によって作られた近赤外線域の J, K バンドにおける全天マップを用いて、銀河拡散光の成分を除いた上で、宇宙背景放射の強度を再測定した。本講演では、その結果得られた銀河拡散光のスペクトルと宇宙背景放射の強度について報告する。

## 星間 14c 数値シミュレーションで探る遠方銀河の分子雲質量推定法

早津 夏己 (東京大学 M2)

本研究では数値シミュレーションによって得た銀河カタログを用いて、遠方銀河の物理的特徴を予測する [1]。今後の ALMA による高感度ミリ波・サブミリ波観測によって銀河進化への理解が深まると期待される。このような観測に先立って理論予測を行うことは非常に重要である。銀河を特徴づける物理量のうち、とくに分子雲質量は銀河進化の段階を知るために重要な物理量である。そのトレーサーとしては CO 輝線が挙げられるが、一方で分子雲質量を CO 輝線から見積もる為の変換係数は環境依存性がある [2]。本講演の目的は、遠方銀河の分子雲質量をより正しく観測で見積もる方法を見つけることである。基本的な手順は次のようになる。まず分子雲質量と CO 輝線を銀河カタログから独立に計算する。つぎに変換係数と分子雲の環境を表す物理量の関係を調べる。最後に分子雲の環境を特徴づける物理量を観測量で表現する。これらの具体的方法を探るべくいくつかの論文のレビューをし、夏の学校の時点での研究成果を示す [3]。また ALMA Observing Tool を用いて現実的な観測条件に従った疑似観測を行い、その場合に観測される銀河の定量的予言を示す。さらに CO のみでなく、特に強い輝線である [CII] 輝線観測の具体的なストラテジーを提供する。また CO 輝線が起源としない dark gas の有力なトレーサーとして注目されている [CI] 輝線についても考察を与える予定である。

1. Shimizu et al. 2012. MNRAS, 427,2866
2. Tacconi et al. 2008, ApJ, 680,246
3. Vallini et al. 2013,MNRAS, in prep.

## 星間 15c 分子雲衝突による大質量星形成過程の数値シミュレーション

高平 謙 (北海道大学 M2)

大質量星は重元素の供給や UV 光による星間空間への影響により銀河の進化に多大な影響を及ぼすが、その形成過程については未だに解明されていない点が多い。本研究の目的は分子雲衝突による大質量星形成メカニズムの解明に寄与することである。大質量星形成の困難は分子雲コアへの質量降着の時間と Kelvin Helmholtz 収縮時間の関係で理解できる。分子雲コアの重力崩壊により星が形成される過程で、分子雲の中に高密度コアが作られ、その質量が大きくなると Kelvin Helmholtz 収縮時間が短くなり質量降着が十分に行われる前に原始星となり降着が止まってしまう。そのため大質量星を形成するためには分子雲コアの (1) 乱流速度が大きく質量降着率が大きく、かつ、(2) 質量の大きな分子雲コアが重力収縮する必要がある。分子雲衝突はこの二つをクリアする可能性がある。我々は Enzo code を用いて高解像度流体シミュレーションを行っている。乱流状態にある大きさの異なる分子雲の正面衝突の場合、分子雲衝突により (1),(2) の大質量星形成の条件を満たす高密度コアが形成され、Core Number の時間変化や分子雲の衝突による Probability Density Function の変化を調べ、分子雲衝突が大質量星形成を引き起こすメカニズムである可能性が高いことが示した。

1. Habe and Ohta. 1992. 発行元 PASJ

2. Kainulainen. J., Beuther. H., Henning. T. & Plume. R. 2009. A&A

## 星間 16c M17SW の NH<sub>3</sub> 輝線と H<sub>2</sub>O メーザーの観測

馬場 達也 (鹿児島大学 M1)

M17SW 分子雲は OB 型星のクラスターからの紫外線放射により、分子雲が圧縮され、誘発的な星形成が進む領域として注目されている。M17SW 分子雲内の H<sub>2</sub>O メーザー、コンパクト H<sub>II</sub> 領域、ダストに埋もれた赤外線星の存在から、北東方向の広がった H<sub>II</sub> 領域により、M17SW で 2 次的な星形成が起こっていることが示唆されている。我々は星形成と高密度分子ガスのトレーサーである H<sub>2</sub>O メーザーと NH<sub>3</sub> 輝線を観測し、この領域の星形成について調べた。

情報通信研究機構鹿島 34m 電波望遠鏡を使用して M17SW の NH<sub>3</sub> ( $J, K$ ) = (1, 1), (2, 2), (3, 3) 輝線のマッピング観測を行った。その結果、8'×12' に広がった NH<sub>3</sub> を検出した。NH<sub>3</sub> ( $J, K$ ) = (1, 1) のサテライトラインとメインラインの比  $R_{s/m} = 0.362 \pm 0.021$  から光学的厚み  $\tau = 0.79 \pm 0.20$  が得られた。この光学的厚みと (2, 2)/(1, 1) 輝線強度比から求められた領域内の回転温度は平均で  $T_{rot} = 24.0 \pm 0.8K$  であった。各観測点ごとの回転温度マップと、8.7GHz 連続波源のマップを比較すると、電離境界面で約 2K 高くなっていることがわかった。また、オルソ/パラ比と関係する (3, 3)/(1, 1) 輝線強度比は電離境界面で高いことがわかった。オルソ/パラ比は衝撃波が発生する領域で高くなる傾向があることからこの場所で活発な星形成が行われていることが示唆される。

さらに 2010 年 1 月から 2011 年 12 月まで国立天文台 VERA により、H<sub>2</sub>O メーザーの VLBI モニター観測を行った。視線速度 16 から 23km/s で、約 100 ミリ秒角に広がった H<sub>2</sub>O メーザースポットを検出できた。本講演では M17SW の NH<sub>3</sub> と H<sub>2</sub>O メーザー観測の結果について報告する。

## 星間 17c 超新星残骸の電波偏光観測：効率的宇宙線粒子加速の証拠か？

霜田 治朗 (青山学院大学 M1)

粒子加速の現場である若い超新星残骸では磁場が動径方向を向いていることが、電波シンクロトロン放射の偏光観測によって確認されている [1]。しかしながら、放射の偏光度は 20-30% 程度と低いために、乱流状態でありながら動径方向にバイアスされた磁場構造が必要であると考えられている。

最近の理論的研究の進展から、非一様な媒質中を伝搬する衝撃波の下流は強い磁気乱流状態となることが知られている [2],[3]。我々はそのような超新星残骸形成のシミュレーションデータが実際の偏光観測を再現することを、擬似的な電波シンクロトロン放射の偏光観測によって明らかにした。

この乱流生成機構は、衝撃波が非一様な媒質中を伝搬する際に、上流の密度の揺らぎから伝搬速度に差が生まれ、下流に衝撃波進行方向に対して非等方な乱流が駆動することによる。これによって衝撃波進行方向に磁場が選択的に増幅され、磁場は動径方向を向くことができる。

特に垂直衝撃波において、磁場が下流で動径方向に遷移するまでの遷

移長は、ISM 乱流を仮定した場合、現在の観測と同程度か少し長いくらいである。将来、ALMA などの高分解能電波観測によってさらに短いスケールでの磁場の遷移を確認することが出来れば、上流の密度揺らぎの起源として ISM 乱流を排除できる。代わりに Drury Instability や非線形段階の Cosmic-Ray Streaming Instability といった、宇宙線が効率的に加速される際に発生する不安定性を起源とする密度ゆらぎが起源だと考えることができ、若い超新星残骸における効率的な宇宙線加速の新しい証拠になり得る。

1. e.g.Reynoso et al. (2013) for SN1006 AJ,145,105
2. Giacalone & Jokipii (2007) ApJ,663,41
3. Inoue et al. (2009) ApJ,695,825

# 星形成・惑星系分科会

切り拓け、星と惑星の新時代

日時	7月29日 14:30 - 15:30 (招待講演：武藤 恭之 氏) , 15:30 - 16:30 7月30日 11:00 - 12:30, 16:00 - 17:00 (招待講演：河原 創 氏) 7月31日 14:30 - 15:45 8月1日 9:00 - 10:45, 11:00 - 12:00 (招待講演：細川 隆史 氏)
招待講師	武藤 恭之 氏 (工学院大学)「原始惑星系円盤の愉しみ」 河原 創 氏 (東京大学)「まだ見ぬ世界と生きているうちが華の系外惑星探査」 細川 隆史 氏 (東京大学)「銀河系と初期宇宙での星形成」
座長	黒崎 健二 (東京大学 D1)、田中 祐希 (名古屋大学 D1)、田崎 亮 (京都大学 M2)、水木 敏幸 (東北大学 M2)
概要	<p>近年の観測技術の発達が目覚ましく、特に系外惑星の発見個数は1年あたり1000個に迫る飛躍的なペースでの発見が続いています。また、これまでは見ることが出来なかった星形成・惑星形成の現場である原始惑星系円盤の直接撮像も可能となり、研究に新たな知見をもたらしています。このような、分子雲コアからの星の形成や原始惑星系円盤、惑星に至るまでの広い領域を取り扱っているのが星形成・惑星系分科会です。星形成は歴史のある分野であり古くから研究が続けられていますが、角運動量や磁場の問題など、今なお未解決の課題が残されています。原始惑星系円盤においては、円盤の進化過程やその振る舞い、惑星の形成メカニズムなどには不明な点が多く、活発に議論が交わされています。最近では直接観測によって円盤が多彩な構造を持っている事が示されています。円盤のスパイラル構造やギャップの存在など、驚くべき程の詳細な情報が得られており、理論の進歩に大きな期待が寄せられています。系外惑星の観測は今までは間接的にその存在を検出出来ている状態でしたが、惑星の直接観測も可能となり、発見例も大幅に増え続けている最も活発な分野となっています。最近では惑星大気分光観測も行われ、研究の進歩によって宇宙生物学などの新たな分野への道も拓かれつつあります。</p> <p>ALMA を初めとした最新鋭の観測機器の登場や TMT を用いた地球型惑星観測の計画 (SEIT) などもあり、星形成・惑星系の分野は新しい時代へと突入しています。本分科会に参加する皆さんは、星と惑星の新時代を担う研究者の卵です。夏の学校での発表や議論を通して知識を広め、今後の研究の発展と自身の成長のために役立てて頂きたいと思います。</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。 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>

武藤 恭之 氏 (工学院大学)

7月29日 14:30 - 15:30 C(広瀬鳴瀬)

## 「原始惑星系円盤の愉しみ」

原始惑星系円盤は、惑星形成の現場として観測・理論の両面から活発に研究がされている。原始惑星系円盤は、ガスとダスト（固体粒子の成分）から成っており、この中でダストが集積し、最終的にガスが散逸することによって惑星系が出来上がると考えられている。しかし、原始惑星系円盤がそもそもどのような姿をしているのか、またその中でどのような物理過程が起こって多様な惑星が形成されるのか（またはされないのか）という基本的な部分で多くの謎が残っている。

本講演では、原始惑星系円盤に関する基礎的な理論や最新の観測結果について、特に「原始惑星系円盤の物理構造と進化」をキーワードとしながら概説する。具体的には：

1. 原始惑星系円盤の基本的な描像
2. 原始惑星系円盤における力学過程と非軸対称構造
3. 最近の観測で明らかになってきた原始惑星系円盤の描像
4. 将来の観測で明らかになると期待される原始惑星系円盤の姿

といった話題を、講演者自身の研究も交えながら簡単に紹介したい。

河原 創 氏 (東京大学)

7月30日 16:00 - 17:00 A(サファイア)

## 「まだ見ぬ世界と生きているうちが華の系外惑星探査」

私が系外惑星に足を突っ込んでから高々数年、その間、第二の地球候補が続々と見つかってしまった。でもその中に、本当に人の心を打つような世界は待っているのだろうか？本講演では、地球型系外惑星探査の方法論や現状をお話ししたい。特に惑星の表層環境をいかに知るか、生命由来と考えられるシグナルは何か、等の課題は、私たちが生命であるがゆえに、何か特別な興味を引き起こす気がする。このような探査法の中には、ちまたで聞かれる予算予算予算や縮小中止廃止のニュースと比して、到底現実味のなさそうに思えるものも含まれているかもしれない。しかし、思い出してほしい。人類は40年以上前に月に降り立ったらしいし、私がかが72歳になる予定の40年先には何が起こるか分からないではないか。それから、検出可能性をうじうじする机上の理論だけではなく、具体的に10年オーダーの未来にできる一歩として、晩期型星周りの地球型惑星の直接観測計画、SEIT計画を主に楽観的な若手で進めている。始まったばかりの挑戦的な装置開発や楽観的すぎる探査計画をより現実近づけることなどに興味を持ってもらえるようにがんばります。

細川 隆史 氏 (東京大学)

8月1日 11:00 - 12:00 A(サファイア)

## 「銀河系と初期宇宙での星形成」

星は様々な天体の中でも最も基本的なものであり、その形成過程についての研究は長い歴史がある。この講演では、これまでのこの分野の研究の進展を踏まえつつ、これからの研究がどのように進んで行くか、どのような研究が大きな成果につながるか、など主として理論研究を中心に将来展望にも重点をおいて紹介する。銀河系の星形成について標準シナリオの受け入れられている低質量星 ( $\sim 1 M_{\odot}$ ) の形成、謎の多い大質量星 (OB型星) の形成過程について触れたのち、後半では初期宇宙での星形成過程について銀河系での星形成過程との類似点、相違点を明らかにしつつ説明する。宇宙の再電離、巨大ブラックホールの起源、初期宇宙から現在の宇宙に至る宇宙論的時間での星形成過程の進化など、関連する話題にも時間の許す限り触れる。

## 星惑 1a 初代原始星システム～形成と進化～

中村 鉄平 (九州大学 M1)

この論文では、宇宙暗黒時代の終わりに最初に誕生する星の形成を研究した。ダークマターハローの中心にできる初代原始星の形成、ガスの収縮について、3次元のムービング・メッシュシミュレーションを使用して計算を行った。今回のシミュレーションでは25桁以上の異なる密度レンジをカバーしており、 $0.05R_{\odot}$ の空間分解能を持つ。この空間分解能は初代原始星の進化を理解するには十分であり、周囲のガスの影響も調べることが出来る。計算の結果、最初に形成する原始星の周りに出来るケプラー円盤がいくつかの原始星に分裂することがわかった。円盤と周囲のガスの重力相互作用によって原始星のシステムは複雑に進化する。また、少数の原始星はN-体インタラクションを通して他の原始星から角運動量を得て、外側の軌道に放出される。しかし、存在する原始星の数は単調増加する。これは、初代原始星のシステムがここでシミュレーションされた限られた時間を越えて成長し続けることを示唆している。

1. Yoshida, N and Omukai, K and Hernquist, L . 2012. Science, 321, 669

## 星惑 2a 天体现象における Rayleigh-Taylor 不安定性

松本 達矢 (京都大学 M1)

重力場中で密度の小さな流体層の上に密度の大きな流体層が存在するとき、Rayleigh-Taylor 不安定性と呼ばれる流体の不安定性が生じる。宇宙では、大質量星や活動銀河核などの大光度をもつ天体からの輻射圧により、このような流体の配位が数多く存在することが知られている。本発表では、輻射流体の基礎方程式に対して線型摂動解析を行い、流体の配位の安定性条件について議論する。特に optically thin な場合では、大きな輻射圧にさらされた HII 領域が不安定性をもつこと、また、optically thick な場合でも不安定化が起こり、[2] での大質量星形成のシミュレーションにみられるような bubble の不安定化を説明することがわかった。これらの特性は例えば、30 Doradus における HII 領域の構造や大質量星形成における物質の降着を説明することができる。本発表は [1] のレビューである。

1. Jacquet, E and Krumholz, M. R. 2011. ApJ, 730, 116
2. Krumholz, M. R., Klein, R. I., McKee, C. F., Offner, S. S. R., and Cunningham, A. J. 2009. Science, 323, 754

## 星惑 03b 降着モデルの違いによる大質量星の進化の変化

加藤 広樹 (大阪大学 M2)

本講演は、Hosokawa, T., Yorke, H. W., & Omukai, K. 2010, ApJ, 721, 478 のレビューである。大質量星 ( $M_* > 8M_{\odot}$ ) の形成には高い質量降着率 ( $> 10^{-4} M_{\odot} \text{yr}^{-1}$ ) が必要であると考えられており、観測においてもこの事を示唆している。今回の講演ではこのような高い質量降着率につ

いて、円盤を形成して中心星に落下する場合と、球状に一樣等方な方向から中心星に落下する場合を考える。これらの降着の仕方の違いによって、中心星へのエントロピーの流入の違いが生じ、その結果中心星は二つの場合で異なる進化を辿る事になる。具体的には  $M_* < 8M_{\odot}$  までの星の進化を見た時に、球状の場合と円盤状の場合とでは、球状の方が半径が一桁程大きいという結果が得られる。更にその後の進化を見た場合には  $M > 10M_{\odot}$  では星の半径は両降着モデルでほぼ等しくなり、その後の進化は同じになる。本講演では、このような違いが具体的にどのようにして起きるかを示し、その理由について考察する。

また、今後の展望としては、星の場所による降着の違い等が考えられる。今回の星形成の条件では円盤状に降着した場合も、最後に星に質量降着する瞬間は、星の表面においてどこでも一様に降着が起きるとしたが、実際には円盤の形状による影響や、星の磁場による影響により、場所によって降着率の違いが生じる可能性があり、そこから予測される事柄について述べる。

1. Hosokawa, T., Yorke, H. W., & Omukai, K. 2010, ApJ, 721, 478
2. Wolfire, M. G., & Cassinelli, J. P. 1987, ApJ, 319, 850
3. Stahler, S. W., Shu, F. H., & Taam, R. E. 1980, ApJ, 242, 226

## 星惑 04b ささまざまな金属量における分子雲の熱進化

井手 良輔 (九州大学 M1)

分子雲の熱的、化学的進化を異なる金属量 Z で調べた。金属量 Z が非常に低い場合には分子雲は主として H しか含まれていない。そのため  $H_2$  や HD の回転と振動による冷却がよく効く。しかし、低温ではこれらの冷却が効率的でないため、金属量 Z が低い分子雲は十分に冷えることが出来ない。金属量 Z が高いときは、様々な元素が存在する。そのため、酸素や炭素による冷却によって分子雲は低温まで冷えることが出来る。また、このときダストも多く含まれるためダストによる放射冷却やダスト表面での  $H_2$  の合成も冷却を促進する。結果として、金属量 Z が多い場合は分子雲は低温まで冷却される。

## 星惑 05b 回転軸と磁力線が一致していない場合の分子雲コア収縮時におけるアウトフローと質量降着

橘田 英之 (九州大学 M1)

アウトフローやジェットは星形成過程において分子雲コアから質量、角運動量、エネルギーなどを再分配するという重要な役割を持っている。この研究では、回転軸と磁力線のなす角  $\alpha$  が  $\alpha \neq 0$  で分子雲コアが収縮する時にできるアウトフローの形成を3次元理想 MHD シミュレーションを用いて行い、 $\alpha$  を変化させた時の時間発展を調べた。その結果、角度  $\alpha$  を増加させると、アウトフローの質量放出の効率は悪くなる事、また  $\alpha \sim 90^\circ$  ではアウトフローは抑制される事がわかった。さらに、アウトフローは  $\alpha \neq 0$  の時、歳差運動をし不安定になる傾向がある事もわかった。



## 星惑 06b すばる 8.2m を用いたへび座分子雲における若い超低質量天体の探査観測

佐藤 太基 (埼玉大学 M1)

褐色矮星は質量が太陽の 8% 以下で中心温度があまり高くなりすぎず水素核融合反応を起こすことが出来ない天体である。また、褐色矮星よりもさらに軽く、質量が惑星程度であるにも関わらず恒星の周りを公転せず単独で存在する惑星質量天体が存在する。褐色矮星は 1995 年、惑星質量天体は 1999 年 (Oasa et al. 1999) と、近年の観測から初めて発見され、その後ペルセウス座分子雲やオリオン座分子雲など (e.g. Oasa et al. 2008) の星形成領域で多数見つかっている。褐色矮星は現在までに 1000 天体ほど見つかり、惑星質量天体は、たとえば S106 において約 100 天体同定されている (Oasa et al. 2006)。しかし、このような超低質量天体の形成過程についての理解はあまり進んでいない。

超低質量天体は非常に暗い天体であるが、誕生した頃には近赤外波長で比較的明るく輝くという点に着目し、我々は国立天文台すばる 8.2m 望遠鏡と MOIRCS (多天体近赤外撮像分光装置) を用いて深い近赤外 (JHKs) 測光観測を行った。観測対象は中質量星形成領域であるへび座分子雲 (赤経 18:30、赤緯 +01:15 付近、距離 ~260pc) である。へび座分子雲 (Serpens Molecular Cloud) には Herbig Ae/Be 型星があり、その近傍に Main Serpens Core と呼ばれる赤い反射星雲がある。また、サブミリ/ミリ波の観測により 2 つのコアがあることが明らかにされている (Gorlova et al. 2012)。今回は 4 領域 ( $8' \times 7'$ ) の解析を行った結果、J バンドの 10 $\sigma$  限界等級 ~23.3 等が得られた。測光結果から二色図を作成し、検出天体のうち、赤外超過が見られる天体を YSO 候補天体と同定した。また、YSO 候補天体についての色等級図から、この領域で褐色矮星や惑星質量天体が多数誕生していることが示唆された。

1. Oasa, Yumiko; Tamura, Motohide; Sunada, Kazuyoshi; Sugitani, Koji. 2008, AJ, 136, 13720
2. Oasa, Yumiko; Tamura, Motohide; Sugitani, Koji. 1999 ApJ, 526, 3360
3. Gorlova, Nadya; Steinhauer, Aaron; Lada, Elizabeth. 2010 ApJ, 716, 634G

## 星惑 07b 重力マイクロレンズ法による系外惑星探査の現状について

手塚 謙次郎 (東京大学 M1)

系外惑星探査の手法の一つであるマイクロレンズ法に関する最新の論文を読み、JASMINE 計画との関係性を検討した。まず、2 体系のレンズの系に注目し、マイクロレンズ法に関する基礎的な物理を紹介する。マイクロレンズ法を用いて惑星の質量と軌道半径を決定するのは難しいが、光度曲線と高解像度の画像の詳細な解析によって決定することができる。地上での観測でも惑星系の物理量を測定することが可能だが、宇宙での観測の方が、より正確に決定できる。マイクロレンズ法では、主星と惑星の距離が遠くても惑星を検出することが可能なので、宇宙での観測から惑星系の軌道長半径の分布を調べた。2 次元的に投影された惑星の個数に対する観測データから、3 次元的なデータを取得する統計的な手法が 2011 年に Brown 氏によって考案されているので、それを用いて軌道長半径密度に対する単純なべき分布を発見した。さらに、地上での観測から惑星形成過程の鍵を握る自由浮遊惑星が多く存在することに

ついて言及し、宇宙での観測によって、自由浮遊惑星の質量分布の測定にどの程度貢献できるのかを示した。

1. Emanuela Giannini and Jonathan I Lumine. 2013. Rep. Prog. Phys. 76 056901

## 星惑 08a フィラメント状分子雲の進化と多様な環境下における最小ジーンズ質量

野口 みな子 (名古屋大学 M2)

最近の観測によって、星はフィラメント構造を持つ分子雲の中で形成されることがわかってきた。また、星が形成されているフィラメントは、安定的に存在できる臨界線密度よりも大きな線密度を持ち、動的に収縮することがわかってきた。Masunaga & Inutsuka (1999) は、フィラメント状分子雲の収縮が止まる時の密度 (臨界密度) と、重力不安定となりえる最小の質量 (最小ジーンズ質量) を解析的に求めた。しかし、彼らは初期の線密度依存を無視しているが、実際は収縮過程は線密度に強く依存する。従って、本研究では、フィラメント状分子雲の収縮過程を定量的に求めるために、詳細な加熱冷却過程を考慮した 1zone モデルを用いて、広いパラメータ範囲 (金属量、初期温度、線密度) で調べた。その結果、収縮が止まる時の密度は、Masunaga & Inutsuka (1999) の予言より 2 桁程度大きい事が分かった。これによって最小ジーンズ質量も小さくなり、低質量星の形成に示唆を与える事ができる。また、Inutsuka (2001) は、静水圧平衡状態のフィラメント状分子雲の重力的分裂によって、形成される分子雲コアの質量関数を Press-Schechter 理論を用いて求めた。フィラメント状分子雲の動的収縮の効果を取り入れることで、現実的な分子雲コアの質量関数を求めることができることから、Inutsuka (2001) のレビューも行う。

1. H. Masunaga & S. Inutsuka. 1999, ApJ, 510, 822
2. S. Inutsuka. 2001, ApJ, 599, L149
3. S. Inutsuka & M. Miyama. 1992, ApJ, 388, 392

## 星惑 09a 散乱光における原始惑星系円盤表層の水氷ダスト分布の影響

高附 翔馬 (東京工業大学 M1)

原始惑星系円盤における水氷の分布を探ることは惑星形成や生命の起源において重要なことである。水氷の半径方向の分布を探ることは一般的に難しいが、2008 年に井上らによって新たな観測手法が提案された。これは K バンド (2.15 $\mu\text{m}$ )、H<sub>2</sub>O バンド (3.1 $\mu\text{m}$ )、L' バンド (3.75 $\mu\text{m}$ ) の 3 色を用いる手法であるが、2009 年に本田らによって HD142527 の星周円盤に初めて適用された。彼らによって、この手法の有効性と HD142527 原始惑星系円盤表層の 140AU 以遠に氷が存在することに成功しているが、散乱光の赤化が説明できなかった。この散乱光の赤化は HD100546 でもみられるが、散乱光の赤化の原因として Mulders らはダストサイズによる散乱の角度依存性を挙げている。一方で、岡らの計算によると早期型 (A, B 型) の原始惑星系円盤表層には UV 光脱離過程により、氷微粒子は安定に存在できないという結果がある (Oka et al. 2012)。HD100546 は若い B 型星であるため、UV 光脱離過程が効いて

いれば HD100546 原始惑星系円盤表層には氷水が安定に存在できないはずである。これと Mulders らのダストモデルに氷水ダストが考慮されていないことから、本研究では氷水ダストと光脱離過程に注目し、これらがどのように観測されるかを K、 $H_2O$ 、 $L'$  それぞれのバンドで 2D モンテカルロ放射輸送計算を使って調べた。光脱離過程の効果により、( $K - H_2O$  と  $H_2O - L'$  のカラー差が 1 等ほど小さくなる結果が得られた。また、氷水の分布が ( $K - H_2O$ 、 $H_2O - L'$  のカラー差から読み取ることができることがわかった。

## 星惑 10a SPH 法の自由表面と接触不連続面への対応

山本 智子 (東京工業大学 M1)

Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法とは数値流体力学における計算手法の一つであり、これまで主に天文学や惑星科学の分野において幅広く用いられてきた。しかしながら、SPH 法には自由表面や接触不連続面の存在する様な問題を解く際、適切な計算ができていないという問題が知られていた。この問題を解決するため、これまで様々な改良が SPH 法に加えられてきた。しかしながら、これまでのところ、両問題を同時に解決するような SPH 法の改良は、存在していない。そこで本研究では接触不連続で発生する問題を解消する SPH 法を開発し、それと Monaghan が 1994 年に開発した自由表面で発生する問題をある程度解消した SPH 法と組み合わせることによって、両問題を同時に解決する SPH 法を開発した。

## 星惑 11a 惑星形成における天体の衝突・破壊の理論と数値シミュレーションについて

加納 孝基 (名古屋大学 M2)

現在の理論では、原始惑星系円盤内において微惑星同士が衝突・合体することにより原始惑星が形成され、原始惑星が 10 倍の地球質量程度まで成長すると、周囲のガスを集積させることによって木星型惑星 (巨大ガス惑星) が形成されると考えられている。ガス集積を起こせるような大きな原始惑星ができる過程では、天体の衝突は合体だけでなく破壊ももたらす。破壊によって生成された小さな破片は、ガス抵抗によって減速されて角運動量を失い、中心星に落下し消失してしまう。その結果、原始惑星の成長できる大きさには限界が存在し、その限界は天体の破壊強度によって決められることになる。この様に、天体の破壊強度は巨大ガス惑星の形成の可否を決めるために非常に重要である。しかし、十分に理解されているとは言い難く、破壊を記述するモデルは各々が独自のものを使っている状態であり、まだまだ発展途上であるといえる。そのため、惑星形成に適用するための破壊モデルを完成させることが私の目標である。本講演では、1km 以上の大きさの自己重力の効いた天体の破壊に必要なエネルギーを簡単に見積もり、その結果と数値シミュレーションとの比較を行い、破壊モデルの構築を目指す。

1. Kobayashi et al. 2011. ApJ, 738:35(11pp)
2. Wada et al. 2005. Icarus, 180, 528-545

## 星惑 12a 磁気回転不安定性による円盤風駆動

小堀内 啓 (名古屋大学 M1)

電離度の大きいガス円盤があまり強くない磁場に貫かれて差動回転している場合を考えると、このときほぼ無条件に磁気回転不安定性 (MRI) と呼ばれる不安定性が成長し、乱流状態になることが線形解析および数値シミュレーションによって知られている。

今回は Suzuki & Inutsuka (2009) をレビューし、降着円盤内の MHD 現象について発表する。この研究では局所シアリングボックス内で 3 次元 MHD シミュレーションを行い、円盤風と呼ばれる上下面からのガスの流出が起こることが示されている。いわゆる Channel Flow が最も成長するのはスケールハイトの 1.5-2 倍の高さの領域であり、そこでの磁気圧はガスの圧力と同程度だがわずかに小さい。Channel Flow がリコネクションによって崩壊することでポインティングフラックスがガスに輸送され、円盤風が駆動される。これらの特徴は初期の磁場の強さを変えても確認でき、原始惑星系円盤の自発的な動的蒸発に重要な役割を果たすと考えられる。また Channel Flow の崩壊によって赤道面に向かう Alfvén 波や (磁気) 音波も発生し、これが赤道面でのダストの集積にかかわっている可能性がある。

1. Suzuki, T.K., and Inutsuka, S. 2009, ApJ, 691, L49
2. Balbus, S.A., and Hawley, J.F. 1998, RvMP, 70, 1

## 星惑 13a ホットスーパーアースの大気構造

伊藤 祐一 (東京工業大学 M2)

現在までに 800 個以上の系外惑星が観測されている。そのなかでも質量が地球の数倍から数十倍程度、半径が地球の数倍程度の惑星はスーパーアースと呼ばれており、岩石が主成分と考えられる惑星も発見されている。岩石主成分のスーパーアースである CoRoT-7b (4.8 $M_E$ , 1.7 $R_E$ , 0.017AU) は、潮汐加熱や強烈な恒星放射により、表面が高温下になりマグマオーシャンに覆われ、シリケート大気を形成すると推測されている (Valencia et al. (2010))。またシリケート大気の揮発性元素の有無について特定することができれば CoRoT-7b の組成の起源について制約ができることが期待されている。現在、このようなシリケート大気の大気構造、透過スペクトルは明らかになっていない。本研究では CoRoT-7b のような高密度ホットスーパーアースの大気構造、組成、起源を特定するため、大気組成の主要成分 Na,  $CO_2$ , SiO の吸収断面積を明らかにした。この吸収断面積を用いて大気モデルから温度構造、透過スペクトルを推定することが可能となる。

## 星惑 14a ホットジュピターの乱流を用いた大気モデル

岩佐 真生 (京都大学 M1)

近年観測技術の進歩とともに、太陽系外の惑星が多く発見されてきた。その観測結果から、中心星を回る軌道に関して、軌道長半径が極端に小さいホット・ジュピターが見つかり、太陽系とは異なる様相を示すものが発見されてきた。ホット・ジュピターのなかには、異常なほど大きな半径をもつものがある。また赤外線観測によりホット・ジュピターの成層圏で温度の逆転が生じていることがわかっており、これらのことが問題として挙げられている。これらの問題を同時に解決する大気モデルに乱流を用いた大気モデルがある。今回は参考文献 [1]、[2] を用いてこの乱流を用いた大気モデルについてレビュー発表を行う。

1. Andrew N. Youdin and Jonathan L. Michell. 2010. ApJ 721:1113-1126
2. David S. Spiegel, Katie Silverio and Adam Burrows. 2009. ApJ 699:1487-1500

## 星惑 15a オーム散逸によるホット・ジュピターの熱進化

荒井 隆志 (京都大学 M1)

恒星に極めて近い位置にあるにも関わらず、木星級の半径・質量を持つ系外惑星は「ホット・ジュピター」と呼ばれている。このホット・ジュピターが何故大きな半径を持つのかは、未だ謎多き問題である。この問題を説明する方法の一つに、オーム散逸による惑星内部の加熱がある。恒星からの強い照射を受けた惑星の大気は、アルカリ金属元素がイオン化する程度まで加熱され高速で循環している。この帯状の気流は、惑星の大気に流れる電流と見なせる。電流と惑星の磁場の相互作用によって惑星内部に誘導電流が生じ、この誘導電流のオーム散逸によって生じた熱で惑星が支えられている。このオーム散逸による加熱と生じた熱による惑星の構造形成を数値的に計算し、有効温度や質量などの境界条件を与えたときに到達しうる半径が導かれている。この数値計算結果から、惑星が現実的な重金属コアを持っている場合、オーム散逸モデルはホット・ジュピターの観測例を十分説明できることが分かった。

1. Batygin, K., Stevenson, D. J., & Bodenheimer, P. H. 2011, ApJ, 738, 1
2. Batygin, K., & Stevenson, D. J. 2010, ApJL, 714, L238

## 星惑 16a ホットジュピターにおける磁氣的活動と質量放出に関する理論的研究

田中 佑希 (名古屋大学 D1)

近年多数発見されている太陽系外惑星の中には様々な種類のものが発見されている。なかでも、中心星に極めて近接した軌道を持つ巨大ガス惑星、いわゆるホットジュピターと呼ばれるものが多く存在することが分かっている。このホットジュピターは、中心星からの強い輻射を受けて大気から大量の質量放出を起こしていると考えられている。また、トランジット観測からも大気の流出の兆候が確認されている。

一方で、ガス惑星は強い固有磁場を持っている可能性がある。この場合は、太陽風のメカニズムと同様な、表面対流による乱流に起因するアルフヴェン波駆動ガス流による質量放出が起きている事が考えられる。ガス惑星からの大気散逸に関する理論的な研究は多く存在するが、磁場を介した質量放出に関する研究は未だ存在しない。本研究では、太陽風による質量放出を計算するコードを用いて、ガス惑星からの質量放出率の計算を行った。

その結果、ホットジュピターに対して典型的と考えられる表面温度や表面での擾乱を与えて計算を行うと、質量放出率の観測値(厳密には下限値)を十分説明する強度の惑星風が噴き出すことが分かった。また、惑星半径や惑星質量によっても質量放出率は大きく変化し、そのパラメータ依存性も導出することが出来た。本発表では、ガス惑星における質量放出率の数値計算の概要とその結果、および惑星半径や質量へのパ

ラメータ依存性について発表する。

1. Suzuki and Inutsuka. 2005. ApJ
2. Suzuki and Inutsuka. 2006. ApJ
3. Vidal-Madjar et al. 2003. Nature

## 星惑 17a 原始惑星系円盤中のリング構造形成過程

高橋 実道 (京都大学 D2)

近年、すばる望遠鏡の SEEDS プロジェクトなどにより、原始惑星系円盤に形成されているリング構造が観測されている。このような構造は、円盤の進化や円盤中での惑星形成を理解する上で鍵となると考えられており、注目を集めている。しかし、これらのリング構造の起源は未だに明らかになっておらず、これらの観測を説明する理論的研究の進展が急務となっている。観測されたリング構造の起源の候補として、viscus overstability [1] による軸対称な不安定モードが考えられる。粘性ガス円盤の線形解析から、原始惑星系円盤において  $10^5$  年程度で軸対称モードが成長することが示唆されている。しかし、この解析は定常な円盤での局所的な不安定の成長を解析しており、非線形段階においてこの不安定がどのように振る舞うかについては未だ明らかではない。そこで、本研究では粘性円盤の一次元流体計算を行った。そして、原始惑星系円盤での不安定性の成長を非線形段階まで計算した。その結果、波は非線形段階でも成長し、面密度は最大で 10 倍程度まで大きくなることが分かった。最大の面密度は円盤のポルトロープ指数  $\gamma$  が小さく等温に近いほど、また、波長が大きい mode ほど大きくなることが分かった。この数値計算の結果から、円盤に観測されている構造がこの不安定性によって形成されていた場合、密度構造が周期的に変化することが示唆される。

1. Schmit, U., and Tscharnuter, W. M. 1995, Icarus, 115, 304

## 星惑 18a ガス巨大惑星の形成と極低質量星の進化に関する論文レビュー

笠 嗣昭 (総合研究大学院大学 M1)

ガス巨大惑星の形成と M 型星、褐色矮星について理解を深めるために、ガス巨大惑星の形成理論について書かれた Spiegel & Burrows(2012) の Spectral and Photometric Diagnostics of Giant Planet Formation Scenario[1] と極低質量星の進化計算について書かれた G. Chabrier et al.(2000) の Evolutionary Models for Very Low-Mass Stars and Brown Dwarfs with Dusty Atmospheres[2] のレビューを行った。

1. Spiegel, D.S., & Burrows, A. 2012. ApJ, 754, 174.
2. Chabrier, G., Baraffe, I., Allard, F., & Hauschildt, P. 2000. ApJ, 542, 464.

## 星惑 19a 惑星移動シミュレーションによる短周期巨大惑星の形成過程考察

小野 智弘 (京都大学 M1)

現在数多くの短周期巨大惑星が太陽系外で観測されている一方で、短周期巨大惑星は太陽系内には存在しない。本研究では、粘性降着や光蒸発、惑星によるギャップ形成等の過程を考慮した原始惑星系円盤ガスの面密度進化、円盤との重力相互作用による惑星移動、及び惑星コアへのガス降着を数値計算することで、形成される惑星の軌道長半径と質量にどのような制限や関係があるか調べた。特に光蒸発過程としては、中心星からだけでなく、近傍の大質量星からの紫外線照射が惑星の最終軌道長半径と質量へ及ぼす影響も調べた。結果として、惑星コアが1 Myr 以内で形成されれば短周期巨大惑星が形成されることが分かった。

## 星惑 20a 海王星の移動

工藤 哲也 (名古屋大学 M2)

太陽から 40-50AU 離れた位置に軌道を持つカイパーベルト天体の中で、海王星との平均軌道共鳴の位置にある天体の軌道分布は海王星の軌道が 20AU 程度から現在の 30AU に移動したことを示している。この外向き移動は、角運動量輸送により移動が引き起こされたと考えられ、ガス円盤、または、微惑星円盤との相互作用により可能となる。現在の海王星は木星や土星のような大量の大気を持っていないため、大質量のガス円盤が残っている状況で形成されたとは考えにくい。そのため、海王星はガス円盤との相互作用による移動ではなく、微惑星円盤との相互作用により移動したと考えるのが自然である。先行研究 (Ida et al 2000) により海王星の移動は自発的なものであり、移動することにより新しい微惑星円盤と出会うことで移動を続けることができることが示された。しかし、そのシミュレーションは海王星周りだけを取り扱った局所な計算であり、正確な移動速度を求めるには大局的な計算が必要になる。本研究では、大局的なシミュレーションを行い海王星の移動速度を求めるとともに、先行研究 (Ida et al. 2000, Ormel et al. 2012) が求めた簡単な解析解がどのような場合に成り立つかについてもシミュレーションと比較することで議論する。

## 星惑 21a 系外巨大ガス惑星周りのハビタブルムーンの形成とその安定性

佐藤 貴央 (東京工業大学 M1)

太陽系外惑星が発見されるにつれて、それらの中に生命居住可能 (ハビタブル) な惑星は存在するの否かという問題は重要なテーマとなってきた。そのなかでも、本研究では、系外巨大ガス惑星周りに存在していると考えられる系外衛星の生命居住可能性について考察した。

系外衛星がハビタブルであるために必要な衛星質量の下限値が先行研究 (Williams et al. 1997) によって見積もられており、ガス惑星の潮汐による熱フラックスを効果的に受ける場合は地球質量の 0.12 倍の衛星質量が必要であると考えられている。そこで、本研究ではガス惑星がハビタブルゾーン内に存在した時、この質量を保持した衛星 (ハビタブルムーン) の形成可能性や軌道安定性を複数の先行研究をもとに検証した。

その結果、形成についてはその起源である周惑星円盤の温度構造から、

衛星が形成される場合、岩石衛星になりやすいことが示唆できた。また、軌道安定性についても恒星からの潮汐力による影響や、ガス惑星のタイプ II 軌道移動の影響を受けることなく、ハビタブルゾーン内で安定して存在していられることが示唆できた。

よって本研究から、ハビタブルゾーン内に巨大ガス惑星が存在した場合、その周りにはハビタブルな衛星が存在している可能性が高いことが示された。

1. Williams, D. M., Kasting, J. F. & Wade, R. A. 1997, Nature, 385, 234

## 星惑 22a スペクトル線の歪みの直接検出による中心星自転軸と惑星公転軸の関係の測定

上赤 翔也 (東京大学 M1)

最初の系外惑星の発見以来、中心星近傍を公転する巨大ガス惑星 (ホットジュピター) が数多く発見されてきたが、既存の惑星形成理論ではこれらを観測された位置で形成することは困難である。それゆえ、ホットジュピターはまず原始惑星系円盤の外側で形成され、その後何らかの機構によって現在の位置に移動したと考えられている。この軌道進化の要因として、円盤との相互作用や惑星同士の重力散乱などいくつかの可能性が議論されているが、未だ理論的な解明には至っていない。これらの機構を観測的に制限する手法として、ロシター・マクローリン効果 (RM 効果) を用いた中心星の自転軸と惑星の公転軸の傾き  $\lambda$  の測定がある。例えば、軌道進化が円盤との相互作用によるものであれば  $\lambda$  は常に小さくなるのに対し、惑星同士の重力散乱によるものであれば大きくばらつくことが予想されている。従来の RM 効果の測定は、トランジット (惑星による中心星の食) の際、惑星が自転している中心星の近づく/遠ざかる側を順に隠すことで生じるスペクトル線の変化 (赤方/青方偏移) をドップラーシフトとして検出することで行われていた。ところが、近年ではトランジットによって生じるスペクトル線の歪みを直接検出し、その時間変化を解析することで  $\lambda$  を求めるという新しい手法が用いられている ([1],[2])。この手法は、従来の手法で波長の精密較正に用いていたヨードセルを必要としないため、スペクトルの広い領域を用いた解析が可能であることに加え、半径の小さい惑星に対する信号の減衰の度合いが小さいといった利点を持つ。そこで本講演では、この新しい手法を [3] に沿って紹介し、XO-3 という惑星系でこの手法を用いて実際に解析を行った結果を示し、従来の方法による解析結果との比較を行う。

1. Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 403, 151
2. Cameron A. C. et al. 2010. MNRAS, 407, 507
3. Albrecht S. et al. 2013. arXiv:1302.4443v2 [astro-ph.SR]

## 星惑 23c スーパーアースの限界質量と限界半径

黒崎 健二 (東京大学 D1)

宇宙望遠鏡 (CoRoT や Kepler) による観測により、多数の系外惑星が発見されており、それらの惑星の質量-半径の多様性から、惑星の組成に対する多様性も示唆されてきた。その中でも、惑星が水を保持できるかどうかを議論することは、観測の面からも形成論の面からも重要な問題である。本研究では、内側から岩石コア、水マントル、水蒸気大気を

持つ、水に富む惑星の構造計算と熱進化、質量散逸を計算し、惑星の質量-半径関係および惑星が水を保持できる限界質量を求めた。本研究では (1) 惑星が水を保持できる限界質量および (2) 理論的に求めた限界質量とその半径を観測データと比較して惑星が水を保持できる領域の制約を行う。本研究により、惑星が水を保持できる限界質量の最小値を求めることができた。本研究から理論的に求められた質量-半径関係と観測された系外惑星を比較すると、水を保持した惑星の質量-半径関係図上における存在可能領域を制約することができる。また、軌道長半径-質量関係図や軌道長半径-惑星半径関係図から、岩石惑星である可能性が高い領域を制約することもできた。本研究の成果は、惑星の組成や起源についての議論や、今後の観測ターゲットを選択する上で有益な情報を与えることが期待される。

1. Lopez, E. D., Fortney, J. J., & Miller, N. 2012, APJ, 761, 59
2. Rogers, L. A., Bodenheimer, P., Lissauer, J. J., & Seager, S. 2011, APJ, 738, 59
3. Valencia, D., Ikoma, M., Guillot, T., & Nettelmann, N. 2010, A&A, 516, A20

## 星惑 24c 惑星大気の透過スペクトルの理論的推定

川島 由依 (東京大学 M1)

1995 年に系外惑星が発見されて以来、現在までに 900 個近い系外惑星が報告されている。系外惑星の代表的な観測手法として、トランジット法と視線速度法がある。前者から惑星半径、後者から惑星質量が検出される。さらに最近では、GJ 1214b や GJ3470b、GJ436b のような系外惑星については、トランジット時における大気の透過光スペクトルを検出することが可能となってきた [1]。この透過光スペクトルは、惑星大気中の気体分子による吸収の影響を受けていると考えられる。よって、透過光スペクトルから惑星大気の組成を制約することが可能である。惑星大気の組成は、惑星表面環境や惑星の熱進化を考える上でとても重要である。本研究では、透過光スペクトルの理論的推定を行った。水、二酸化炭素、水素の気体分子に着目しスペクトルを理論的に計算した。今回の理論スペクトルのピーク位置と透過光スペクトルのピーク位置を比較することで組成の特定につながることを期待される。

1. N.Narita, A.Fukui, M.Ikoma, Y.Hori, K.Kurosaki, Y.Kawashima et al. 2013. arXiv:1305.6985
2. A. R. Howe & A.S.Burrows. 2012. THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 756:176(14pp), 2012 September 10
3. L.S.Rothman et al. 1998. Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer 60 (1998) 665-710

## 星惑 25c 多重トランジット惑星系 KOI-94 における TTV の解析とその惑星食への示唆

増田 賢人 (東京大学 M2)

系外惑星の質量・離心率といったパラメータは、多くの場合、分光観測から求めた中心星の視線速度を解析することで決定される。一方で、トランジット惑星系においては、惑星どうしの重力相互作用によるトランジットの一定周期からのずれ (TTV; Transit Timing Variation) を

解析することで、測光観測のデータのみからこれらのパラメータを推定できる場合もある (e.g. [1])。

このような解析を行う好例として、我々は KOI-94 という系に着目した。KOI-94 は、ケプラー宇宙望遠鏡によって発見された複数トランジット惑星系であり、中心星の近傍およそ 0.3AU 以内に b (周期 3.7 日)、c (10 日)、d (22 日)、e (54 日) という 4 つのトランジット惑星を有する。これらの惑星に対しては、視線速度法による質量・離心率の推定が行われており、いずれの質量も惑星と呼べる範囲にあることが分かっている [2]。ところが、惑星 c、e に対する質量の制限はほぼ上限値のみであるうえ、得られた離心率の値には系の力学的安定性を鑑みると不自然に大きなものも含まれている。そこで我々は惑星 c、d、e の TTV を N 体計算を用いて解析することで、それらの質量・離心率に対して測光観測のみに基づく独立な制限を与えた。この結果、惑星 c、e の質量などのパラメータをより高い精度で決定した。得られた制限は視線速度法によるものと概ね整合的であったが、一方で先に述べたような大きな離心率は現れず、また惑星 d の質量は視線速度法で得られた値よりも有意に小さいという差異もみられた。加えて、惑星 e の TTV は、今回用いた 4 惑星によるモデルでは説明できなかつた。これらの不一致は、視線速度の更なる長期観測などに基づくより詳細な研究の必要性を示すものである。

本講演では、上記の内容に加え、その結果が KOI-94 で観測された planet-planet eclipse と呼ばれる興味深い現象 [3] に与える示唆についても議論する。

1. Lissauer, J. J., et al. 2013, ApJ, 770, 2
2. Weiss, L. M., et al. 2013, ApJ, 768, 14
3. Hirano, T., et al. 2012, ApJ, 759, L36

## 星惑 26c 原子惑星系円盤の化学進化における円盤風の影響

石本 大貴 (京都大学 D1)

本研究の目的は、円盤の散逸機構として近年提唱されている円盤風の効果を取り入れた化学反応計算を行うことによって、円盤風が円盤の化学進化に与える影響を調べ、円盤風が観測的に検証可能であるかを調べることである。化学反応計算の結果、円盤風の効果によって分子の多い円盤中層領域から分子の少ない円盤上層領域にかけて分子の存在量が増加した。これは、円盤上層の高温領域に中層からの水素分子が供給され、これにより中性-中性反応が進んだためである。また、その結果を用いた放射輸送計算の結果、円盤風の影響を受ける輝線は主に高励起の赤外線として観測される輝線であった。これは、赤外線を主に放射する高温領域において分子量が増加したためである。また、輝線強度は大きくなるが、速度プロファイルはあまり大きな変化は見られなかつた。最近の CO4.7 $\mu$  m 輝線の高分散赤外線観測により示唆された、高速度でワイドアングルの円盤風の速度分布を用いて輝線の放射輸送計算を行った結果、円盤風の影響が無い場合には円盤のケプラー回転のためにダブルピークの速度プロファイルを持つものが、シングルピークになるという結果になり、高分散赤外線観測を再現する結果となった。さらに、同じ速度分布を用いて (サブ) ミリ波輝線の計算を行った結果、(サブ) ミリ波輝線もシングルピークとなることが分かった。(サブ) ミリ波輝線は赤外線輝線よりも赤道面に近い領域をトレースするため、本研究の結果と今後の電波干渉計 ALMA の観測結果を比較することにより、円盤風駆動

点付近の速度構造や、ひいては円盤風による円盤ガス散逸率に制限が与えられると期待される。

1. Heinzeller, D., Nomura, H., Walsh, C., & Millar, T. J. 2011, ApJ, 731, 115
2. Suzuki, T. K., & Inutsuka, S. 2009, ApJ, 691, L49
3. Walsh, C., Millar, T. J., & Nomura, H. 2010, ApJ, 722, 1607

## 星惑 27c 高空隙率ダストの光学特性計算と原始惑星系円盤表層部におけるダストのダイナミクス

田崎 亮 (京都大学 M2)

彗星には非常に高温を経験したダストが含まれているということが様々な観測によって示唆されている。それらのダストは原始惑星系円盤の内縁部で形成され、その後、彗星が形成されるような円盤外縁部まで運ばれたと考えられている。そこで本研究では、中心星輻射圧によって高空隙率ダスト(アグリゲイト)が外側に向かって移動する効果について調べた。まずアグリゲイトに働く輻射圧を求めるために、アグリゲイトの光学特性について計算を行なった。光学特性は Effective Medium Theory(EMT) 及び、T-Matrix method for Clusters of Spheres(CTM) の2つの数値計算法を用いた。その結果、モノマーのサイズが  $r_0 = 0.01\mu\text{m}$  の時、EMT と CTM による結果はほぼ一致し、輻射圧と重力の比  $\beta \sim 0.04$  程度となった。しかし、モノマーのサイズが  $r_0 = 0.1\mu\text{m}$  の場合、CTM による計算は  $\beta \sim 0.2$ 、EMT は  $\beta \sim 0.04$  となり、2つの計算法に差が現れることがわかった。さらに講演においては、得られた結果を元に原始惑星系円盤上層部におけるアグリゲイトの運動について議論する。

## 星惑 28c ダスト成長を考慮した低金属量の星形成ガス雲の進化

千秋 元 (東京大学 D1)

天文学では、炭素や酸素など、ヘリウムより重い元素を「金属」と呼び、それら金属はガス雲の放射冷却率に大きく寄与している。ガス雲が重力収縮をして星が形成される時、ジーンズ質量の議論から、ガス雲の温度によって星の典型的な質量が決定される。従って、金属を含まないガスから形成された第一世代星は典型的に大質量(太陽質量の数十から数百倍)であったと考えられている。そして、宇宙空間の金属量が上昇して行く過程で、現在のように典型的な星質量が小さく(太陽質量程度)になったと考えることができる。近年、銀河ハロー中に発見された星(SDSS J102915+172927) [1] は非常に低金属量(太陽金属量の  $4.5 \times 10^{-5}$  倍以下)ながら質量は小さい(太陽質量の 0.8 倍以下)ことが分かった。このような非常に低金属量の環境でも、低質量星は形成されるのか。

金属量が非常に低いとき、低質量星形成の条件として、ダスト冷却が効果的かどうかは鍵となると考えられている。ダスト冷却はガス雲が高密度になると作用するので、ジーンズ質量をより小さくすることができるためである。ダスト冷却を求めるためには、今考えている初期宇宙におけるダスト量が分かっているとイケない。初期宇宙では、ダストは主に超新星によって供給されるが、超新星ではダストを破壊する作用も働く。超新星によるダスト破壊の影響を大きく受け、ダスト量が小さく

なったガス雲中では、ガスの冷却が不十分である可能性がある。先行研究 [2] では、SDSS J102915+172927 の金属量(太陽金属量の  $4.5 \times 10^{-5}$  倍以下)に対して、ダスト量が小さいモデルではガスが十分冷却されないことが示唆されていた。しかし彼女らは、ガス雲の重力収縮中でダスト量が一定であると仮定していた。それに対して、[3] は、ガスの重力収縮に伴って密度が上昇すると、ダストがガス中の金属原子を取り込むこと(ダスト成長)で、ダスト量が上昇する可能性があることを示唆した。

本研究では、ダスト成長とガス雲の温度進化を同時に計算することで、ダスト成長によってガス雲中のダスト冷却率がどれほど影響を受けるかを調べた。その結果、SDSS J102915+172927 の金属量に対し、[2] ではダスト量が小さいためにダスト冷却が十分に起きないとされていたモデルでも、ダスト成長を考慮することで、ダスト冷却が効果的となることが分かった。

1. Caffau, E., Bonifacio, P., François, P., et al. 2011a, Natur, 477, 67 Initial condensation factor
2. Schneider, R., Omukai, K., Inoue, A. K., & Ferrara, A. 2006, MNRAS, 369, 1437
3. Nozawa, T., Kozasa, T., & Nomoto, K. 2012, ApJL, 756, L35

## 星惑 29c Direct Collapse Black Hole

鄭 昇明 (東京大学 M2)

近年、 $z > 7$  において非常に大質量なブラックホール ( $\sim 10^9 M_\odot$ ) が観測された [1]。宇宙初期にできた初代星(Pop 3 star)と呼ばれる星は現在の星に比べて非常に質量が大きいと考えられている ( $40 \sim 100 M_\odot$ ) が、それでもこのような大質量なブラックホールの形成を説明する事には未だ成功していない。本研究ではこのような大質量ブラックホールができる一つのシナリオとして有力視されている Direct Collapse について考える。Direct Collapse とは、宇宙初期に周囲の初代星からのフィードバックによってジーンズ質量が大きくなり  $\sim 10^5 M_\odot$  程度の非常に重いブラックホールの種がまず形成される。これがどんどん成長して大質量ブラックホールを形成する、というシナリオである。

1. Fan X. et al., 2003, AJ, 125, 1649

## 星惑 30c 散逸円盤中の円盤温度変化による惑星の獲得大気の応答

廣瀬 翔 (東京大学 M1)

多数の発見報告がある低密度スーパーアースは、様々な内部組成モデルが議論されている。観測の進展により、質量と半径がともに分かった惑星も増えており、組成に対する議論も可能となった。しかし、質量-半径の関係のみでは、H-He 大気存在量によって岩石主体惑星と水分主体惑星のどちらかを区別することができず、組成が縮退してしまうことが知られている。本研究では、従来の固体コア質量と獲得大気質量比計算では考慮されていなかった固体コアの熱進化を考慮することを目的とし、円盤温度に対する獲得大気量の応答を調べた。結果、主星から遠い位置で形成されたスーパーアースほど、大気質量が小さいことが分かった。今後固体コアの熱進化も入れて計算することで、さらに正確に内部組成に制約が与えられ、惑星形成への理解が進むと期待される。

.....

## 星惑 31c 原始惑星のガス捕獲による軌道進化

菊地 章宏 (東京工業大学 M1)

近年、直接撮像によりほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星が発見されている。惑星形成の標準理論であるコア集積モデルでは、コアの形成時間を考えると、巨大ガス惑星が中心星から遠い場所で形成されたとは考えにくい。そこで本研究では、大きな離心率の楕円軌道にある原始惑星のガス捕獲による軌道進化を考え、ほぼ円軌道の長周期惑星の形成が可能かどうかを調べた。質量増加率が1公転周期の間で一定である場合について、軌道進化の式を解析的に導出し、それを数値的に解くことで、軌道要素と質量の関係を求めた。ガスを捕獲することで、離心率は効率的に減少する一方、軌道長半径はあまり減少せず、初期の半分が限度であることがわかった。また円盤の大きさが有限の場合の数値計算を行い、円軌道化したときの軌道長半径と円盤の大きさに関係があることを示した。

1. Ikoma, M. and Nakazawa, K. and Emori, H. 2000. ApJ, 537, 1013

# 観測機器分科会

～観測機器開発の最前線～



日時	7月30日 10:30 - 12:30, 13:30 - 14:30, 14:30 - 15:30 (招待講演：秋山 正幸氏) 7月31日 9:00 - 12:30, 14:30 - 15:45, 16:00 - 17:00 (招待講演：都丸 隆行氏), 18:00 - 19:00
招待講師	秋山 正幸氏 (東北大学)「補償光学系の可能性」 都丸 隆行氏 (高エネルギー加速器研究機構)「宇宙マイクロ波背景放射偏光望遠鏡の 先進テクノロジー」
座長	牛場 崇文 (東京大学 D1)、徳田 一起 (大阪府立大学 M2)、夏目 典明 (京都大学 M2)
概要	<p>観測機器分科会では電波・赤外線・可視光線・紫外線・X線・<math>\gamma</math>線・ニュートリノ・重力波など、天文学で観測の対象となるすべての分野の研究者が集まり、観測機器開発という共通のテーマを持って議論を行います。他分野・他派長における最先端技術の話の聞き、それに携わる研究者と交流することにより、自らの分野の観測機器への応用を考えたり分野内の議論だけでは得られない貴重な意見を得たりすることが可能です。観測機器分科会では天文観測を主眼としている方はもちろんのこと、理論分野の方も歓迎します。当然のことですが、機器開発は新しいサイエンスを切り開くために行われます。したがって、理論・観測分野の研究者が参加することは、観測機器に関する要求を取り入れることができるという点で非常に重要です。また、機器開発によるサイエンスが魅力的なものであればあるほど、機器開発に携わる人のモチベーションの増加にもつながります。さらには、理論・観測分野の研究者が最新の機器開発状況に触れることは、新しいサイエンスの可能性を探るきっかけになり得るものです。観測機器分科会で多くの分野の研究者が情報交換をし、自らの研究や他の研究に関する知見を広められることを期待します。是非、ご参加ください。</p> <p>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。取り扱う分野は以下の通りです。 「電波」「赤外」「可視光」「紫外線」「X線」「ガンマ線」「重力波」 注) 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>

秋山 正幸 氏 (東北大学)

7月30日 14:30 - 15:30 B(エメラルド)

## 「補償光学系の可能性」

現在の8-10m級の地上大型望遠鏡では補償光学系が観測に定常的に使用されている。2020年代のThirty Meter Telescopeをはじめとする30m級の次世代超大型望遠鏡の時代には、その大口径の空間分解能や集光力を最大限に生かす上で、補償光学系は必須の技術となる。補償光学系による観測は天空にある星を用いて補償を行う自然ガイド星補償光学系から始まり、観測対象を広げるためにレーザーガイド星補償光学系へと発展し、またさらに多層共役補償光学系、極限補償光学系、多天体補償光学系、地表層補償光学系などいろいろな形で特化した補償光学系の検討や実現へと広がってきた。この講演ではまず大気揺らぎの性質と補償光学系を用いた観測の基本的な性能や制約について紹介する。その後で、世界の様々な天文台で現在進行している次世代の補償光学系の開発について紹介する。最後に我々のグループで行っているTMTの多天体補償光学系やすばる望遠鏡の地表層補償光学系の開発や検討の状況を紹介します。この講演からぜひすばる/Keck/Geminiに補償光学系を用いた観測のプロポーザルを出すことや補償光学系を開発することに興味を持ってもらえればと思います。

都丸 隆行 氏 (高エネルギー加速器研究機構)

7月31日 16:00 - 17:00 B(エメラルド)

## 「宇宙マイクロ波背景放射偏光望遠鏡の先進テクノロジー」

宇宙マイクロ波背景放射(CMB)は初期宇宙を探る有力なツールであり、WMAPやPLANK衛星による観測結果から高精度な宇宙論パラメータ決定がなされている。現在CMB観測でもっとも注目されているのは、B-modeと呼ばれる鏡非対称な偏光パターン探査であり、特に空間スケールの大きなB-modeパターンは原始重力波により生成され、インフレーションモデルを決定できる可能性が指摘されている。このため、世界中で熾烈な競争が行われている。

我々のグループでは2012年からチリ・アタカマ高地でCMB偏光望遠鏡POLARBEAR(PB-1)を運用しており、またそのアップグレードレシーバーであるPOLARBEAR-2(PB-2)を開発中である。POLARBEAR実験では、極めて高感度な超伝導Transition Edge Sensor( TES)ボロメータアレイを導入している。超伝導の転移端を用いた高感度光センサーは1940年代には提案されていたが、あまりに転移幅が狭いため実用化していなかった。しかし、1990年代に伝熱フィードバック法が開発されて実用化がすすみ、PB-1では世界最多の1274コのTESボロメータを搭載するに至っている。(PB-2では7588コのTES搭載を目指している。)PBのTESボロメータは転移温度が約500mKであり、ソーブション冷凍機を用いて冷却されている。ソーブション冷凍機は冷凍能力が小さいため、光学ウィンドウからの熱侵入を押しやるための赤外線カットフィルターや断熱シールドなどにも先進技術が用いられている。また、低インピーダンスのTESを機能的に読み出すために、SQUIDアンプおよび周波数ドメインマルチプレキシングといったreadout技術も研究されている。本講演では、CMB偏光観測について概要を述べると共に、その中で用いられている先進技術について講演する予定である。

## 観測 01a TES 型 X 線マイクロカロリメータ読み出し系のデジタル化に向けた研究

千葉 旭 (東京大学 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 dark baryon 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 カロリメータを  $16 \times 16$  素子ほど並べる必要がある。TES カロリメータの信号は超伝導量子干渉計 (SQUID) で負のフィードバックのもとで読み出す。TES カロリメータは  $\sim 100$  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が大きな問題となる。したがって複数素子からの信号を 1 つの SQUID で読み出す信号多重化が必須課題である。我々は各 TES を異なる周波数 (MHz 帯) で駆動して振幅変調をかけた信号を多重化する研究開発を進めてきた。しかし位相回りによって正常にフィードバックがかからないという課題があった。我々は位相調整をした外部信号を参照することによって復調と再変調をする BBFB 回路を実用化することでこれを解決した。BBFB 回路はアナログ回路で構成されているが、読み出し系の小型化や再現性の確保のみならず、位相調整の自動化のために将来的にはデジタル化する。BBFB 回路のデジタル化では、復調時に位相調整が不要な 2 位相フィードバックの開発を視野に入れている。本講演ではこれまでの TES カロリメータ読み出し系の研究経緯を説明し、BBFB 回路のデジタル化に向けた 2 位相フィードバックの検証実験の結果について発表する

## 観測 02a 次世代 X 線衛星搭載を目的とした TES 型 X 線マイクロカロリメータの製作

林 佑 (東京大学 M1)

宇宙の大部分は X 線によって観測可能である。X 線は主に高温プラズマによって放射され、精密なプラズマ診断を行なうためには各輝線について微細構造を十分に分離できる分解能と  $0.1\text{keV} \sim 10\text{keV}$  の広いエネルギーバンドを観測できる X 線分光観測器が必要である。そのためには開口率を大きくするために吸収体を横に広くとることと、Wide Energy Band で観測するために、吸収体を縦にのばしていくことが求められている。しかし吸収体を大きくするとエネルギー分解能が劣化してしまう。そこで横方向に吸収体を大きくするのにマッシュルーム型にすることで解決をはかった。また縦方向には TES を重ねて配置することで吸収体を厚くすることなく、幅広いエネルギーバンドの実現に向けた X 線照射試験を行った。

1. K Nagayashi. 2012. Master's thesis, University of Tokyo.
2. H Yoshitake. 2009. Master's thesis, University of Tokyo.
3. Renyue Cen and Jeremiah P Ostriker. 2006. ApJ, 650(2):560-572.

## 観測 03a DIOS 衛星搭載へ向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータの開発

山口 静哉 (首都大学東京 M1)

私は次世代 X 線天文衛星 DIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Sur-

veyor) 搭載へ向けた X 線分光素子、TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータの開発を行っている。宇宙の進化や大規模構造などを解明していく上で、宇宙の高エネルギー現象をとらえる事は重要である。そのために X 線輝線や吸収線を用いた詳細な分光は必須である。TES カロリメータは  $5.9\text{keV}$  の X 線に対して数 eV という高いエネルギー分解能を達成できる超精密分光器である。

X 線マイクロカロリメータは、入射 X 線光子の 1 つ 1 つのエネルギーを素子の微小な温度上昇として測る検出器である。入射する X 線の温度上昇は極めて小さいものであるが ( $\sim$ 数 mK)、素子を  $\sim 100$  mK と極低温で動作させ、また高感度の温度計を用いることで、微小な温度上昇を計測できる。TES はカロリメータの中の温度計の役割を担っており、超伝導物質を使用している。超伝導-常伝導遷移端での数 mK という非常に狭い領域内で急激な抵抗-温度変化により素子の温度上昇を計測する。

TES 温度計には超伝導金属 (Ti) と常伝導金属 (Au) の二層薄膜を使用しており、現在は衛星搭載へ向け密集したアレイ素子の開発を進めている。アレイ化へ向けた課題として、従来のデザインでは大きく 2 つの問題がある。1 つは基板上のスペースの問題である。また、2 つ目の問題点は、ピクセル間のクロストークである。そこで、積層配線という折り返し配線の技術に取り組んでいる。これは  $\sim 10\ \mu\text{m}$  幅の Al や Nb の配線を電流の行きと帰りの配線を上下で重ね、間に絶縁体入れて酸化膜を挟みこんだデザインである。今回は、 $3.5\text{cm}$  角の基板上に  $20 \times 20$  の 400 ピクセル分の配線を形成し、下部配線に Al (厚み 100 nm)、上部配線に Nb または Al (厚み 50 nm または 100 nm) を使用して配線基板を製作した。

1. T. Ishida, T. Kanda, H. Akamatsu, T. Enoki, K. Henmi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, K. Shinozaki, K. Mitsuda, H. Ohashi, L. Liu, J. Wang, H. Tanuma: Soft X-ray emissions related to the solar wind charge exchange observed by the X-ray satellite observatories, Journal of Physics: Conference Series, 388, Issue 8, article id. 082021 (2012)
2. T. Ohashi, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, Y. Tawara, K. Mitsuda, N. Y. Yamasaki, Y. Takei: Status of the Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor (DIOS), Space Telescopes and Instrumentation 2012: Ultraviolet to Gamma Ray. Proceedings of the SPIE, 8443, article id. 844319, 10 pp. (2012)

## 観測 04a 科学衛星 HiZ-GUNDAM 搭載を目的とした X 線撮像検出器開発

高田 俊介 (金沢大学 M1)

我々は宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst: GRB) を用いた初期宇宙探査のための科学衛星 HiZ-GUNDAM 搭載を目指した撮像検出器開発を行っている。現在発見されている GRB の大半は  $z < 7$  のイベントである。これは赤方偏移の影響により GRB のエネルギーが低い方へシフトし、運用中の GRB 検出器の観測エネルギー帯では捉えきれない可能性が高いためである。GRB は発生位置に偏りが無いため、初期宇宙探査の光源として用いるには撮像検出器のような装置で広視野をモニターし、発生位置を特定しなければならない。特に  $z > 7$  で発生した GRB を捉えるには数 keV 帯で感度を

持つ検出器が必要とされる。

開発中の検出器は電極がストリップ状のシリコン半導体検出器と符号化マスクを用いて GRB の発生方向を決定するが、シリコン半導体についてはまだ一つの電極からしか信号を読み出せておらず、分解能も FWHM で  $\Delta E = 2.85\text{keV}$  と我々の要求値には達していない。しかし、それは素子の静電容量が大きいためであり、静電容量が 1/10 になるように設計を行えば  $\Delta E \approx 0.86\text{keV}$  まで改善すると考えられる。

また、開発中の検出器の GRB に対する感度を見積もり、他の検出器との比較を行った。結果、1keV からの読出しを行うことができれば運用中の GRB 検出器の中で最も低エネルギーに感度を持っている検出器に比べ、有効面積が 2 割程度でも 10 倍の感度を有することがわかった。

## 観測 05a モンテカルロシミュレータを用いた新型偏光検出器の性能評価

瀬田 大樹 (金沢大学 M1)

ガンマ線バースト (GRB) は数十秒間に  $10^{52} \sim 10^{54}\text{erg}$  ものエネルギーをガンマ線として放出する宇宙最大規模の爆発現象である。理論的には相対論的な速度を持ったジェットの中で、シンクロトロン放射によってガンマ線が作られると考えられており、そのガンマ線は強く偏光しているはずである。我々の研究グループでは GRB からの偏光の直接観測を目的としてコンプトン散乱の散乱異方性を利用した GRB 偏光検出器 GAP (Gamma-ray burst Polarimeter) を開発し、2010 年 5 月に打ち上げられた小型ソーラーセイル実証機「IKAROS」に搭載し観測を行なっている。その結果、3 例の極めて明るい GRB から偏光を検出し、シンクロトロン放射で輝いている可能性が極めて高い事を実証した。現在、ジェット内部の詳細な磁場構造の解明を目指し、より高性能な GRB 偏光検出器の開発を行なっている。新型偏光検出器には光電子増倍管にかわり MPPC (Multi-Pixel Photon Counter) を使用している。また円筒形で散乱体が 1 つしかなかった GAP と異なり、散乱体と吸収体を格子状に複数配置する形状となっている。これにより、より詳細な散乱角度の測定が可能になり検出感度が向上するはずである。本研究ではモンテカルロシミュレータである Geant4 を用いてシミュレーションを行い新型偏光検出器の性能評価を行った。その結果、GAP に比べ GRB の年間検出個数が約 3 倍向上することを明らかにした。講演では、偏光検出器の開発状況、現在開発した散乱体 4 本、吸収体 12 本配置した基礎モデルの実験結果。基礎モデルを拡張、改良したモデルのシミュレーション結果などについて紹介する。

## 観測 06a MeV ガンマ線観測実験に用いる次世代コンプトンカメラの開発

小田 真 (京都大学 M1)

MeV ガンマ線に関わる天体や現象は、超新星爆発時の元素合成過程、MeV 領域だけに特徴的な光度曲線をもつバルサー、ブラックホール存在の証拠となりうる  $\pi_0$  中間子の崩壊による放射線、など多数ある。MeV  $\gamma$  線を観測することで多くの重要な天体現象の解明につながる事が期待される。

しかし MeV 領域のガンマ線については他の領域に比べて観測された天体数が少ないというのが現状である。MeV 以下のエネルギーである紫外線や X 線と比べてフォトンのカウントレートが小さく、なおかつ透過性の強さから遮蔽によるバックグラウンド除去が難しい。さらに原子

核反応による放射線はエネルギーが MeV あたりの  $\gamma$  線が多く、宇宙線と検出器筐体との相互作用で生じるガンマ線などのバックグラウンドは特に MeV 領域の観測を制限してしまっている。

そのため我々のグループは次世代の検出器として、効率的にバックグラウンドを除去できる電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を進めている。ETCC は  $\mu$ -TPC という高空間分解能ガス飛跡検出器とその周りの無機シンチレータで構成される。検出器内でコンプトン散乱が起こると、シンチレータによって散乱ガンマ線のエネルギーと散乱方向が、 $\mu$ -TPC によって反跳電子のエネルギーと飛跡が測定可能になっており、光子毎にコンプトン散乱を完全に再現することができる。さらにコンプトン散乱の運動学と幾何学的な関係式が一致するイベントだけを選ぶことによってバックグラウンドを除去、MeV 領域における高感度な観測が可能になっている。

我々 SMILE グループは ETCC を衛星に搭載する前段階として気球実験を行っている。2006 年には気球実験 SMILE-I を行い、測定時間 4 時間で ETCC のバックグラウンド除去能力の証明に成功した。2014 年以降、かにバルサーや白鳥座 X-1 などの天体のイメージングを目的とした気球実験 SMILE-II を予定しており、その実現に向けて ETCC の改良を進めてきた。より大きな有効面積が必要となるため  $\mu$ -TPC を大型化、それに伴ってシンチレータを増設し、省電力・小スペースのために独自の読出基盤を開発した。また飛跡取得アルゴリズムの MeV ガンマ線観測への最適化、熱環境試験など着実に準備が進んでいる。現在は大型化によって増加したトリガーレートに対応する新しいデータ取得システムの構築など残っている問題点を改善している。

## 観測 07a 熱成形薄板ガラスを用いた薄板ガラス母型小型化への展望

岩瀬 敏博 (名古屋大学 M1)

現在、名古屋大学では多重薄板型 X 線望遠鏡の開発を行なっている。これに使用されるミラーはレプリカ法という、ガラス母型に多層膜を成膜し基板を圧着・離型する方法で作られている。こうして得られたミラーの形状はガラス母型の形状を写し取ることがわかっている。しかし我々の要求する PV 値  $10 \mu\text{m}$  未満の形状のガラス母型は数が限られており、補充に多大な時間及び人手がかかる。これに対しガラス母型の表面に厚さ 0.2 mm の薄板ガラスを巻き、それを新たなガラス母型 (GCM: Glass Coated Mandrel) とする方法が開発されている。これによって形状の悪いガラス母型でもよい形状のミラーが得ることが可能となった。しかし、GCM は小型の母型に対しては薄板ガラスが割れてしまうため GCM 化できないという欠点があった。

本研究では薄板ガラスを熱をかけることで曲率半径 100 mm 程度に曲げ、その後ガラス母型に巻き付けるという方法で GCM の小型化をはかった。その結果、現在製作中の次期 X 線天文衛星 ASTRO-H 用硬 X 線望遠鏡で用いられる最小の径とほぼ同等の曲率半径 65 mm のガラス母型において GCM を製作し、ミラーを得ることに成功した。

## 観測 08a 大気チェレンコフ望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測の原理と技術

石尾 一馬 (東京大学 M1)

1931 年に宇宙からの電波が観測されたのを皮切りに、1950 年代から

可視光以外の波長域での宇宙観測が本格的に発達し、多様な宇宙の姿が明らかになってきた。ガンマ線領域は最も短波長または高エネルギーの領域であり、宇宙の高エネルギー現象を最も直接的に調べることができる。高エネルギー宇宙の観測は、現在、銀河系内、銀河系外に、PWN、SNR、AGN など多種多様な 100 を超える最高エネルギーガンマ線源が発見されている。また、その数のみならず、近傍の明るい天体に関しては、観測の高精度化がすすみ、天体での物理現象をより詳細に研究する事が可能になってきた。今後は、超高密度物質、ブラックホールなどの極限時空、超高エネルギー宇宙線や暗黒物質粒子の対消滅ガンマ線の探索など、宇宙論や基礎物理学の発展に重大な貢献をもたらす可能性がある。本発表では、ガンマ線の中でも最も高エネルギーの TeV 領域の観測を可能にした大気チェレンコフ望遠鏡の観測原理とブレイクスルーとなった観測技術についてレビューを行い、今後の発展のために必要な技術について考察を行う。

1. A.M.Hillas, *Astroparticle Physics* 43(2013)19-43.
2. T.C.Weekes, "Very high energy gamma-ray astronomy" (2003), Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia.

### 観測 09a Cherenkov Telescope Array 計画大口径望遠鏡 用光電子増倍管の開発

永吉 勤 (埼玉大学 M1)

2015 年より建設が予定されている Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画において大口径望遠鏡に搭載される光検出器には光電子増倍管 (PMT) が採用される。PMT は浜松ホトニクス社を共同開発を行っており、現在は設計段階から量産体制へと移行しつつある。第一弾の量産分として、1000 本の PMT が納品されており、我々はこれらの性能評価を進めている。

CTA の光検出器に対する性能要求として、標準動作ゲイン  $4 \times 10^4$ 、パルス幅 3.0 ns 以下、量子効率 35 % 以上、時間分解能 1.3 ns 以下、アフタパルス発生確率 0.02 % 以下、という要求値が課せられおり、これを量産型 PMT 満たしているかを試験する必要がある。またアフタパルスとは、入射光の検出後数マイクロ秒にわたって発生する疑似信号であり、本来の信号と全く同じ波形のため後段のエレクトロニクスでノイズとして判別することが難しい。そのためアフタパルスの発生確率はガンマ線イベントに対するエネルギー閾値を劣化させる重大な要因となるため、特に慎重に評価しなければならない。

今回我々は量産型 PMT のアフタパルス発生確率に重点をおいて性能評価試験を行い、その結果アフタパルス発生確率は想定される動作状態においては要求値を満たしている事を確認出来た。本講演では PMT の開発状況と上記の性能評価試験について報告を行う。

1. M.Actis et al. 2010, *Experimental Astronomy*, 32:193-316

### 観測 10b MAXI/SSC データを用いた突発天体の解析 のための突発天体発見システム Nova Search の改良

福島 康介 (日本大学 M1)

全天 X 線監視装置 (MAXI) は、2009 年 7 月に国際宇宙ステーショ

ン (ISS) の「きぼう」日本実験棟の船外実験プラットフォームに搭載された。MAXI は広い視野によって全天から飛来する X 線の強度を観測する。この観測データを突発天体発見システム Nova Search で解析することで、突発天体を発見する。MAXI に搭載されている SSC と呼ばれる CCD カメラでは、世界で初の 2 keV 以下のエネルギー領域で全天のスキャン観測を行っている。この観測データを Nova Search で読み込み解析することで、新しい発見が期待できる。そこで、本研究では、Nova Search での解析のための、観測データの読み込み機能の改良を行っている。今回の改良では、MAXI に搭載されている GSC と呼ばれる比例計数管を用いたカメラの検出器毎に保存されたアーカイブデータの同時読み込みが可能となり、オフライン解析でリアルタイムの解析の再現が可能となった。現在は、SSC の実観測データを読み込むための改良中である。

### 観測 11b 湾曲 Si 結晶反射鏡の形状制御による X 線偏 光観測能力の改善

泉谷 喬則 (中央大学 M1)

我々は X 線撮像偏光計の新しい反射鏡開発のために高い偏光検出力を期待できるブラッグ反射の原理に着目した。X 線天文学で重要な鉄の特性 X 線に対してブラッグ反射を起こす Si(100) 結晶を反射鏡として採用し、その Si 結晶を曲げることでブラッグ反射の弱点であるエネルギー帯域の狭さを克服した偏光 X 線の連続成分も観測できる反射鏡を作成しようと考えた。

反射鏡を曲げる方法としては、プラズマ CVD 装置により反射鏡裏面に DLC (Diamond-like-Carbon) を蒸着することで DLC と基板の間に内部応力が発生することにより円筒状に曲げることができた。そして、曲げた試料の試料の高さのデータを求め、円とのフィッティングを行い残差を求めると円筒形に従っているということがわかった。また、その残差のデータから角度分解能を求めると 7.98[degree] と求まり、現在国際宇宙ステーションに搭載され観測を行っている装置 MAXI は、角度分解能およそ 1.0 degree であることと比較してみても、現時点で MAXI に桁を迫る性能を実現できていると言える。

### 観測 12b 可視撮像分光装置 NaCS の紹介と CCD 線形 性の評価

中尾 光 (北海道大学 D2)

我々は北海道大学 1.6m ビリカ望遠鏡のナスミス焦点に搭載する可視撮像分光装置 NaCS(Nayoro optical Camera and Spectrograph) の開発を行っている。NaCS は活動銀河核のモニター観測を主な目的として開発された装置であり、8.4' × 4.2'(ピクセルスケール 0''.246/pixel) の比較的広い視野を持つ。波長分解能は  $\lambda/\Delta\lambda \sim 300$  である。CCD カメラにはより広い波長域での観測ができるように、可視光域全域にわたり高い量子効率をもつ浜松ホトニクスの 2k × 1k CCD を使い、読み出しシステムには東京大学で開発された KAC(Kiso Array Controller) を採用した。

2011 年 11 月に NaCS の分光ファーストライトと試験観測を行った。試験観測では 1 次処理をしても読み出しチャンネル間の光量レベルが一致しない問題が確認された。これは、CCD の線形性が低カウント時に悪化する事によって発生しており、その原因は CCD の駆動電圧のうちパラレル転送クロック電圧とサミングゲート電圧の電圧値が CCD の動

作条件電圧値外になっていたためであった。

本講演では NaCS の紹介と CCD の線形性の測定結果と補正結果について報告する。

### 観測 13b 自作断熱消磁冷凍機上での X 線マイクロカロリメータの性能向上を目指した研究

高倉 奏喜 (金沢大学 M1)

X 線マイクロカロリメータは、入射光子 1 つ 1 つを素子の温度上昇として検出する検出器であり、0.1 K 以下の極低温での動作により  $E/\Delta E \geq 1000$  のエネルギー分解能を実現する。我々は次世代 X 線天文衛星への搭載を目指し、超伝導遷移端温度計を利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータと、無重力下で 0.1 K 以下を実現する断熱消磁冷凍機 (ADR) の開発を一体で進めている。ADR に関しては十分な冷却性能をもつ磁性体カプセルを自作出来るようになった。5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は先行研究では 90 eV (FWHM) であったが、超伝導マグネットの磁気シールドを改良することにより、17 eV まで改善した。

### 観測 14a 岡山 3.8 m 望遠鏡エッジセンサーの開発

河端 洋人 (京都大学 M1)

京都大学、名古屋大学、国立天文台、(株) ナノオプトニクスエナジーが協同で推し進める岡山 3.8 m 望遠鏡計画において、主鏡には 18 枚の扇形分割鏡を用いる。分割鏡は望遠鏡構造の重力変形と熱変形により、鏡同士の位置にずれが生じ、焦点が合わなくなる。それを補正するため、分割鏡セグメントの境界において、隣り合うセグメントの相対位置を検知するセンサーが必要になる。本計画においては日本システム開発のインダクタンス型センサーを用いるが、このセンサーは温度・湿度・圧力等の環境依存性を持ち、正確な距離測定には補正が必要になる。本講演では、これまでに行われたセンサーの温度特性を調べる実験及び補正の手法、これからの研究について述べる。

### 観測 15a 京大 3.8 m 新技術望遠鏡分割鏡制御のためのアクチュエータの特性評価

長友 竣 (京都大学 M1)

京大が現在計画中の 3.8m 新技術望遠鏡において、分割鏡制御に使用するアクチュエータの特性を測定した。3 値矩形波による測定の結果から、アクチュエータの運動方程式を用いて、特性を求める予定である。

1. 望遠鏡ワーキンググループ. 2010. 岡山 3.8m 新技術光学赤外線望遠鏡計画書

### 観測 16a 京大岡山 3.8 m 望遠鏡 分割鏡間の段差計測のための位相カメラ

上野 忠美 (京都大学 M1)

現在京都大学では様々な研究機関と共に岡山観測所に 3.8 m 望遠鏡の建設を進めている。建設予定の望遠鏡の主鏡は分割鏡であるためその分割鏡の間の段差を計測しなければならない。その理由は、星の良い像を得るためには主鏡を一枚鏡のように見せなければならないのでこの段差を小さく (数十 nm 程度) しなければならないためである。このような段差計測には位相カメラというシステムを用いた計測方法がある。ここでは新技術であるレーザーを用いた位相カメラでの分割鏡間の段差計測の説明をする。

### 観測 17a 京大岡山 3.8m 望遠鏡計画：副鏡計測技術の開発

江見 直人 (京都大学 M1)

京大岡山 3.8 m 望遠鏡計画は京都大学、名古屋大学、国立天文台および (株) ナノオプトニクスエナジーの共同により、国立天文台岡山天体物理観測所に世界初の扇形の分割鏡による光赤外線望遠鏡を建設するものである。本講演では望遠鏡製作において重要な要素となる副鏡計測技術の開発状況について説明する。

本望遠鏡の副鏡は  $\phi = 1100$  m の非球面の凸面鏡である。表面精度は  $RMS \leq 100$  nm が求められる。計測技術の仕様としては、まず第一に非球面の凸面が計測可能であること、測定精度  $RMS \leq 50$  nm が求められる。

開発中の計測技術は、変位計を 3 軸直交ステージにより鏡表面を走査させ、得られる点情報から面形状を生成することを原理とする。3 軸直交ステージとして鏡の加工機であるナガセインテグレックス製の研削盤とそれにとりつけたレーザー変位計 (プローブ) によって行う。このため加工機とプローブの再現性が計測精度を決定する。

現時点で加工機とプローブを合わせたシステムでは  $RMS = 10$  nm の再現性があることを確認した。そこで基礎実験として  $\phi = 150$  mm、曲率半径 1600 mm の球面の凹面鏡を作りプローブ付き加工機で測定をした。評価はフィゾー干渉計を使った。結果はフィゾーとの差が、 $RMS = 26$  nm となった。

1. Peng Su. 2012. Swing-arm optical coordinate measuring machine

### 観測 18a TAO6.5m 望遠鏡用近赤外線観測装置 SWIMS のための検出器評価試験

西嶋 颯哉 (東京大学 M1)

TAO 6.5m 望遠鏡が設置される南米チリ・アタカマ高地のチャナンツール山は、標高が高く (5,640m) 上空の水蒸気量も極めて少ない (可降水量 0.5mm) ために近赤外線波長域 (0.9-2.5  $\mu$ m) においてほぼ連続的な大気の窓が得られる。この利点を活かした観測を行うために、我々は近赤外線 2 色同時多天体分光撮像装置 SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) の開発を 2009 年度から進めている。

SWIMS に搭載する検出器は、Teledyne Scientific & Imaging 社の CMOS センサ、HAWAII-2RG である。デュワーの整備を行い、真空 ( $< 10^{-6}$  torr) 冷却 (液体窒素温度; 77K) 下での試験を行ってきた。これまでに、読み出しノイズ、ADU-エレクトロン変換係数、暗電流、な

どの性能評価を実施した。本講演では、検出器駆動試験の概要と測定した性能値について述べる。

1. Konishi, M., et al. 2012, Proc. SPIE, 7733, 773308-9
2. Miyata, T., et al. 2008, Proc. SPIE, 7012, 701243
3. Yoshii, Y., et al. 2010, Proc. SPIE, 7733, 773308-1

## 観測 19a 観測装置 AROMA-N における新しい観測ネットワークシステムの作成

川村 大地 (青山学院大学 M1)

青山学院大学吉田研究室では相模原キャンパス L 棟屋上に設置した口径 30cm の望遠鏡を用いて可視光領域における時間変動天体の即時追観測及びモニター観測を主目的とした、観測装置 AROMA-N を開発運用している。先行研究により GRB(ガンマ線バースト) 残光の追観測システムが導入されており、GRB の発生時には即時観測出来るようになっている。また、突発天体の発生時以外では既知の変光天体を複数のスクリプトを使用した自動観測システムを用いて観測を行っている。しかしこの自動観測システムは、望遠鏡、ドーム、CCD の冷却等の操作がそれぞれ独立したプログラムによって制御されているため、複雑な構成となっており、人間が多く作業する必要があり、観測効率を上げることが難しかった。そこでこれらの複雑なシステムを簡略化し、さらに Web 上での管理、観測を可能にすることにより容易に観測を行うことが出来るソフトウェア、ACP を使用した新しい自動観測システムの導入を行っている。本発表では観測装置の概要、システム、対象となる天体、そして ACP を使用した新しい観測ネットワークシステムの概要と導入について述べる。

1. 『ACP Observatory Control Software』  
(<http://acp.dc3.com/index2.html/>)

## 観測 20a 国際宇宙ステーション搭載 CALET ガンマ線バーストモニター開発における振動試験、熱真空試験の結果報告

井上 亮太 (青山学院大学 M1)

国際宇宙ステーション (ISS) 日本実験棟の船外実験プラットフォーム、第二期利用計画として高エネルギーの電子線・ガンマ線などの宇宙船を観測対象とした観測装置「CALET(CALorimetric Electron Telescope)」が 2014 年に宇宙ステーション「こうのとりのり」5 号機 (HTV5) で ISS に運ばれ、5 年間もの長期にわたって継続的に宇宙線観測を行う。現在我々の研究室では CALET 搭載「CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM)」の地上キャリブレーション段階には入っている。CGBM は 7 keV~1MeV のガンマ線を観測対象とする硬 X 線モニタ (HXM) を 2 基、100keV~20MeV のガンマ線を対象とする軟ガンマ線モニタ (SGM) 1 基を搭載する。しかし、観測を行うまでにはいくつかの要求を満たしていなければならない。まず H-2B ロケットで大気を抜けるまでに大きな振動がかかるためその振動に耐えるものでなければならない。次に CGBM が設置されるのは船外、つまり真空中である。さらに地球周回に伴って、温度は-17℃~35℃と大きく変動する。その状況下で正確にデータを取得し続けなければならないため、真空時の温度変化耐性も要求され

る。今回は SGM について、振動耐性を調べるために XYZ 方向それぞれに対し共振振動試験とランダム振動試験を、真空時温度変化耐性を調べるために、真空中で-30℃~45℃の温度サイクルをかける熱真空試験を行った。結果として試験直後では SGM の性能 (光量) に変化は見られなかった。

## 観測 21a CALET ガンマ線バーストモニター Hard X-Ray Monitor コリメータ透過率を考慮した有効面積の計算

川久保 雄太 (青山学院大学 M1)

2014 年の夏に国際宇宙ステーション日本実験棟船外実験プラットフォームに搭載予定の高エネルギー宇宙電子線ガンマ線観測装置 CALET は主検出器であるカロリメータと青山学院大学吉田研究室が中心となって開発している CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM) によって構成される。CGBM は 7 keV~1 MeV の X 線を対象とする硬 X 線モニター (HXM) と 100 keV~20 MeV のガンマ線を対象とする軟ガンマ線モニター (SGM) から構成され、現在、HXM、SGM 共にフライト品の製造が始まり、地上校正試験を行う段階にある。現在稼働中のガンマ線バースト観測衛星によるガンマ線バーストの観測では 10 keV 以下の観測データが少ない。一方 CGBM(HXM) は 10 keV 以下の X 線にも感度があるためガンマ線バーストの 10 keV 以下の観測データを得られると期待されている。しかし 10 keV 以下の X 線領域では銀河中心の明るい天体や宇宙 X 線背景放射、太陽 X 線などのバックグラウンドの寄与が無視できない。特に銀河中心の明るい X 線源からの寄与は観測への影響が大きく、HXM では対策としてコリメータによって視野を絞り大角度からのバックグラウンドの寄与を軽減している。コリメータが 10keV 以下の X 線透過率を抑え、かつ 10 keV 以上の X 線に対して可能な限り透明であるという要求を満たしているかの確認を含め、天体から来る X 線を観測する際にコリメータが与える影響を知っておくことは極めて重要である。本研究ではコリメータ素材である Vespel SP-1 の板の透過率を測定し、測定した結果を元にコリメータの入射角度毎の有効面積を計算した。計算した結果、天頂角で 60 度入射角の場合でコリメータがない場合の有効面積を 100% とした時、8.1 keV で 52%、32.1 keV で 94% となりコリメータへの要求を満たしていることがわかった。

1. 早稲田大学 CALET Web サイト  
<http://www.calet.rise.waseda.ac.jp/>
2. NASA CALET Web サイト <http://calet.phys.lsu.edu/>
3. Glen F.Knoll 「Radiation Detection and Measurement」日刊工業新聞社

## 観測 22a 国際宇宙ステーション搭載 CALET ガンマ線バーストモニター開発における硬 X 線モニターの分解能の改善

寺澤 俊介 (青山学院大学 M1)

2014 年の打ち上げ予定、現在開発中の宇宙線観測装置 CALorimetric Electron Telescope(CALET) は国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験棟「きぼう」に設置され、5 年間の観測を予定している。CALET には 青山学院大学吉田研究室が中心となり開発中である CALET ガン

マ線バーストモニター (CGBM) の搭載が決定している。CGBM は宇宙でもっとも明るい爆発現象の 1 つであるガンマ線バーストなどの天体突発現象を、X 線やガンマ線 領域で観測する事を目的とする。CGBM は 2 種類のシンチレーション検出器を搭載し、その 1 つである 7 keV - 1 MeV で感度のある硬 X 線モニター (HXM) は CALET の最終設計段階において、検出器に使用できる空間容積に限りが生じ、シンチレータに比べ口径の小さい光電子増倍管を使用せざるをえなかった。そのために単一のエネルギー源に対する応答が、本来はシングルピークで見られるものが 2 つに分裂しダブルピークで観測されるという問題が起きた。今回ダブルピークに分裂してしまう原因を追求するためシンチレータ面に対し位置依存性を測定し、応答の変化を測定した。本発表では行った実験の詳細とその結果について述べる。

### 観測 23a マイクロマシン技術を用いた次世代宇宙 X 線望遠鏡の開発

生田 昌寛 (首都大学東京 M1)

我々はマイクロマシン技術を用いて、厚さ 300  $\mu\text{m}$  の薄いシリコン基板に微細な穴を開け、その穴の側面を X 線の反射鏡として利用する、独自の超軽量かつ高性能な宇宙 X 線望遠鏡の開発を行っている。これまで我々のグループでは光学系を自作して、軟 X 線 (Al  $K_{\alpha}$  1.49 keV) を照射し、世界で初めて X 線結像に成功してきた。しかし、衛星搭載のためには、さらに結像性能の良い光学系を製作する必要がある。本講演では光学系の性能向上へ向けた取り組みについて紹介する。

1. Y. Ezoe, et al., *Microsys. Tech.*, 2010, 16, 1633.
2. Y. Ezoe, et al., *Opt. Lett.*, 2012, 37, 779.

### 観測 24a 宇宙 X 線観測に向けた次世代撮像分光器 SOIPIX の開発

松村 英晃 (京都大学 M1)

我々は、宇宙 X 線観測に向けた次世代撮像分光器として Silicon-On-Insulator(SOI) 技術を用いた Si CMOS センサー (以降、SOIPIX) を開発している。我々が開発してきた SOIPIX は XRPIX と呼ばれるシリーズで、各ピクセルにセルフトリガー機能を持ち、X 線が入射したピクセルだけを読み出すことで高い時間分解能 ( $\sim \mu\text{s}$ ) を達成できる。これによりアクティブシールドを導入することが可能となり、宇宙線による非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background: NXB) を大幅に減らし、広いエネルギー帯域観測 (0.5-40 keV) が実現できる。これまでに、試作機として XRPIX1、XRPIX1b を製作し、基本性能を確認した。そして 2012 年、従来より 10 倍高い比抵抗を持つ Floating Zone (FZ) ウェハを検出部に用いた表面照射型の素子、XRPIX1b-FZ を制作した。X 線照射試験の結果、500  $\mu\text{m}$  の完全空乏化を確認するとともに、エネルギー分解能は 14 keV の X 線に対して 7.4% FWHM、ゲインは 5.9  $\mu\text{V}/\text{e}^-$  を達成した。また、裏面照射型の素子も現在開発中である。本講演ではこれらの性能試験の結果について発表する。

1. 中島真也, SOI 技術を用いた広帯域 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, 修士論文.
2. S. Nakashima, S. G. Ryu, T. G. Tsuru, A. Takeda, Y. Arai, T.

Miyoshi, R. Ichimiya, Y. Ikemoto, T. Imamura, T. Ohmoto, A. Iwata, "Progress in Development of Monolithic Active Detector for X-ray Astronomy with SOI CMOS Technology", *Physics Procedia*, Vol. 37, pp 1373 - 1380, 2012.

### 観測 25a (講演キャンセル)

### 観測 26a SAS シミュレーションによる低周波防振評価と低周波重力波検出

小野 謙次 (東京大学 M1)

KAGRA において検出できる重力波信号は、様々なノイズによる検出限界値が存在する。それらの感度の制限において、低周波帯の感度は主に輻射圧雑音と鏡の振動により決定され、特に鏡の振動は低周波の感度に強い制限を与えてしまう。KAGRA は鏡を防振するため低周波防振装置 SAS を導入することが計画されている。これにより、より低周波側に重力波の感度が伸び、パルサー等低周波における重要な重力波信号が検出できるようになることが期待されている。

今回、KAGRA に導入される SAS のモデルをつくり、シミュレーションを行うことにより、低周波域においてノイズをどのくらい軽減できるのかを見た。それにより、防振系をなす倒立振子、GAS フィルターはより良く低周波数帯において防振されていることがわかったが、パルサーの周波数帯域においてヒートリンクの雑音が大きくなり、感度が悪化してしまうという結果を得た。

### 観測 27a 量子雑音と重力波検出器

小仁所 志栞 (東京大学 M1)

重力波は TAMA300 や LIGO など、世界中で干渉計を用いた検出を行われている。重力波は微小な波動であるため、観測するためにはさまざまな雑音を除去しなければならない。雑音源として地面振動や熱雑音、量子雑音などさまざまな雑音が検討され、除去するための研究がなされてきた。

以下では特に量子雑音について考える。量子雑音は不確定性関係から標準量子限界を持つ。より高い感度で重力波を検出するためには、標準量子限界を超える必要がある。そのための装置が QND 干渉計である。(i) スクイズド光の入力 [1]、(ii) さまざまな物理量の出力、(iii) 鏡の位置の変調、(iv) 交換する物理量の測定、を満たす [2]。

1. Shihori Sakata et al, *Journal of Physics: Conference Series* 32 (2006) 464-469
2. Thomas Corbitt and Nergis Mavalvala, *J. Opt. B: Quantum Semiclass. Opt.* 6 (2004) S675-683

### 観測 28a 大型重力波検出器 KAGRA

牛場 崇文 (東京大学 D1)



現在、日本では第二世代型重力波検出器 KAGRA の建設が進んでいる。KAGRA は地下サイトの利用や鏡の低温化などの海外の検出器にはない特徴を持つほか、防振やレーザー、鏡の製作などに世界最高水準の技術が多数使用されている。また、KAGRA では SQL と呼ばれる量子論的な測定限界に感度が制限されることが予想されており、それに関する研究も行われている。さらには、重力波検出器に使用するレーザーはハイパワーかつ安定な光源である必要があり、それらの開発も行われている。

本講演では重力波検出器 KAGRA の紹介をしたうえで、レーザー光源の開発について説明を行う。

### 観測 29a ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 2 号機の光学調整

佐治 重孝 (名古屋大学 M1)

現在、名古屋大学では 2013 年打ち上げ予定の次期 X 線天文衛星“ASTRO-H”に搭載する硬 X 線望遠鏡 (Hard X-ray Telescope, HXT) の製作を行っている。この望遠鏡の 2 号機について、光学調整を大型放射光施設“SPring-8”の BL20B2 で行った。

HXT は、硬 X 線を集光するために斜入射、2 回反射の光学系を採用している。この望遠鏡の結像性能が劣化する要因としては、大まかに 1. 光学系の形状の近似、2. 動径方向の調整誤差、3. 反射鏡の形状誤差、4. 反射鏡位置決め誤差 の 4 つが挙げられる。このうち、2 の動径方向の位置調整を行った。実際に望遠鏡に X 線を照射することで、像の位置から反射鏡の角度を求めることができる。その角度を設計値に合わせるようにして調整した。この調整は、圧電素子を利用した”ピエゾアクチュエータ”を用い、反射鏡を支持しているバーを動かすことで行った。その結果、反射角のずれは望遠鏡開口部のどの扇形の領域についてもほぼ 0.2 分角以内に収まり、HXT1(結像性能:HPD=1.9 分角)と同等の結像性能を実現した。

### 観測 30a ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 1 号機 (HXT-1) 地上較正試験

立花 献 (名古屋大学 M1)

名古屋大学 Ux 研究室では、次期 X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載する硬 X 線望遠鏡 (HXT) の開発を行っている。HXT は Pt/C 多層膜スーパーミラーを用いて、10-80 keV の硬 X 線領域まで感度を向上させた望遠鏡で、焦点面検出器 (HXI) と共に硬 X 線分光撮像観測を行う。ASTRO-H には 2 台の HXT が搭載される。そのうちの 1 台目 (HXT-1) は反射鏡全 1278 枚の搭載を完了し、大型放射光施設 SPring-8 にて X 線による光学調整が行われた。光学調整とは反射鏡を上下端から支えるアライメントバーを調整することで結像位置のばらつきを抑えるものである。その後望遠鏡は宇宙科学研究所 (ISAS) にて迷光防止用のプリコリメータが搭載され、衛星打ち上げ時の環境を模した音響試験・機械振動試験が行われた。2012 年 11 月から 12 月にかけては、天体観測データの解析に用いる応答関数の構築に必要なデータを取得するために、SPring-8 で地上較正試験を行った。具体的な測定項目は、光軸での有効面積、有効面積の入射角依存性、結像性能などである。その結果、30 keV のエネルギーで有効面積が  $170.1 \pm 1.7 \text{cm}^2$ 、結像性能が 1.92 分角、50 keV のエネルギーで有効面積が  $82.3 \pm 1.6 \text{cm}^2$ 、結像性能が 1.80

分角という値を得た。本講演では、地上較正試験の測定方法とその結果をまとめ、地上における HXT-1 の光学特性について考察する。

1. 出本忠嗣: 修士論文「ASTRO-H 搭載硬 X 線望遠鏡 (HXT-1) 地上較正試験」(名古屋大学理学研究科)(2012)

### 観測 31a 次期 X 線天文衛星 ASTRO-H における時刻配信精度の検証

井上 拓 (埼玉大学 M1)

ASTRO-H は現在開発中の X 線天文衛星である。ASTRO-H の観測対象には、パルサーなどの数 ms の周期で激しく時間変動するものも存在する。このような天体を観測するためには、X 線イベントに対して  $\mu\text{s}$  オーダーの精度で時刻付けをする必要がある。

X 線イベントに時刻付けをするためには、基準となる時刻を検出器まで配信しなくてはならない。我々はミッション要求である  $30 \mu\text{s}$  以内の時刻付け精度を達成するために、この配信経路での誤差を検証している。現在、先行研究により衛星内の SMU から各観測装置への時刻配信精度を検証する方法が確立されており、衛星搭載同等品を用いた試験では  $2 \mu\text{s}$  以下の誤差に収まっていることが確認された。ここではこの検証方法について報告する。

1. 神頭知美. 修士論文. 埼玉大学. 2010
2. 岩瀬かほり. 修士論文. 埼玉大学. 2012

### 観測 32c 京大 3.8m 望遠鏡における極限補償光学系の開発

夏目 典明 (京都大学 M2)

地上から系外惑星を観測する場合、地球大気の乱流によって光の波面は歪められてしまい、空間分解能は低下し、主星からの散乱光によってコントラストは制限される。極限補償光学とはその大気による光の波面の歪み (収差) をリアルタイムで計測・補償して、空間分解能とコントラストを向上させる装置である。地球型惑星の直接撮像を達成するためには、観測波長の 30 分の 1 まで収差を低減することが要求される。我々は、TMT と同じ分割式望遠鏡の京大 3.8m 望遠鏡に極限補償光学装置のプレカーサーを取り付けて、実証を行なう予定であり、地球大気によって生じる収差を一次、低次、高次に分けて計測・補償し、観測波長の 30 分の 1 まで収差を低減することを目指す。まず我々は、一次、低次の収差を Shack-Hartmann 波面センサを用いて計測し、最大ストローク  $35 \mu\text{m}$  の Tip/Tilt 鏡、最大ストローク  $15 \mu\text{m}$  の 88 素子可変形鏡によって補償を行なう光学系を実験室において構築した。ループを 5Hz の速度で制御し、岡山の大气を模擬した環境で、収差のリアルタイム計測・補償を行った。本稿では、極限補償光学系の概要、および室内実験の結果について報告する。

1. Neville Woolf, J. Roger Angel, 1998, AR Vol. 36: 507-537
2. Richard Davies, Markus Kasper, 2012, AR
3. Robert J. Noll, 1976, JOSA, Vol. 66, Issue 3, pp. 207-211

### 観測 33c 次世代ガンマ線観測装置のための高速波形記録集積回路

河島 孝則 (名古屋大学 M1)

宇宙に存在する高エネルギー粒子である宇宙線は、最高でおよそ  $10^{20}$  eV のエネルギーのものが見つかっているが、その加速機構については未解明な部分が多い。ガンマ線の観測による高エネルギーの宇宙現象の研究は、そうした謎に迫る手段として期待されている。これまでも地上ガンマ線望遠鏡によるガンマ線の観測が行われてきたが、高エネルギーの宇宙現象についてより深い理解を得るためには、観測装置の更なる発展が必要となってきた。Cherenkov Telescope Array (CTA) は超高エネルギーのガンマ線観測を目的とした次世代地上ガンマ線望遠鏡であり、現行の地上ガンマ線望遠鏡に対して 10 倍の感度を持ち、観測可能エネルギー帯域を 20 GeV から 100 TeV まで広げた観測が可能となる。CTA では 100 台近い非常に多くの望遠鏡を用いるため、望遠鏡 1 台あたりの建設費用低減が必須であり、望遠鏡の焦点面に設置するカメラモジュールの小型化は、その費用低減に大きな役割を果たす。そこで、副鏡を持つ望遠鏡である Schwarzschild-Couder Telescope (SCT) の専用波形記録集積回路として、TeV Array Readout with GSa/s sampling and Event Trigger (TARGET) を我々は開発している。現在は TARGET 5 を開発しており、集積回路に要求される性能、機能の多くの点を満たしている。今回はその TARGET 5 の詳細を紹介し今後の開発予定を展望する。

1. M.Actis et al. "Design concepts for the Cherenkov Telescope Array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy", *Experimental Astronomy* 32 (2011) 193-316
2. B.S.Acharya et al. "Introducing the CTA concept", *Astroparticle Physics* 43 (2013) 3-18
3. K.Behtol et al."TARGET:A multi-channel digitizer chip for very-high-energy gamma-ray telescopes", *Astroparticle Physics* 36 (2012) 156-165

### 観測 34c 小型望遠鏡を使用した太陽観測の自動化

須藤 謙人 (茨城大学 M1)

太陽活動と類似したプラズマ現象は、恒星や原始星で多く見られる。そのため地上での太陽観測を含め、太陽活動の究明は他の天体のプラズマ現象の理解に重要である。また、地上からの太陽観測は、太陽専門望遠鏡が主に活躍している。しかし専門望遠鏡での地上太陽観測では、夜間は当然不可能であり、また天候によっても左右される。日本の晴天率は低く、毎日の定常的観測は不可能と言える。そのため、各地の観測網を巡らし、比較的天候の良いときに観測を行う観測システムが必要である。そこで不可欠なのが定常観測の自動化である。本研究では太陽の望遠鏡への導入、追尾、格納までを、望遠鏡を PC により操作することで自動化を目指す。

### 観測 35c 多天体補償光学のためのトモグラフィック推定の広視野化

大野 良人 (東北大学 D1)

我々のグループでは TMT の第 2 期装置として多天体補償光学 (MOAO) を検討している。MOAO は地上観測において大気揺らぎの影響を補正する補償光学を、広視野内の 10 個以上の天体に対して同時に適用させる次世代の新しい補償光学の 1 つである。MOAO では複数のガイド星の光の位相波面の測定し、その測定値からトモグラフィック推定という技術が重要である。現在 TMT で検討されている MOAO の視野は直径  $5'$  となっているが、特に MOAO を用いた  $z \sim 6$  以上の Lyman Break Galaxy の静止系紫外線波長域の連続光スペクトルの多天体分光観測を実現するためには、天体数を稼ぐために直径  $10'$  以上の視野が必要であり、その視野に対応する広い領域の大気揺らぎを推定できるトモグラフィック推定の手法が求められる。

本研究では計算機上で多天体補償光学を再現するシミュレーションによるトモグラフィック推定の手法の開発と評価を進めており、直径  $10'$  の視野内で精度良く大気揺らぎを推定するトモグラフィック推定の新しい手法を開発した。開発した手法では風速の情報から少し前の測定値が現在のどの領域の情報かを計算し、現在の測定値と少し前の測定値の両方を用いて推定を行うことで、用いる測定値を増やし、広い視野内で推定精度を向上させることができる。シミュレーションの結果、理想的な状況では今回開発した手法により直径  $10'$  の視野で推定残差  $250\text{nm}$  以下 (ストレル比  $0.6$  以上 @Kband, Ensquared Energy  $\sim 60\%$  以上 in  $0.05'' \times 0.05''$ ) という精度で推定できることがわかった。

1. Ellerbroek, B. L., 2002., *J. Opt. Soc. Am. A*, 19, 1803-1816.
2. Wilson R. W., 2002, *MNRAS*, 337, 103
3. Bouwens, R. J. et al, 2012, *ApJ*, 752, L5.

### 観測 36c SPICA/SAFARI のための TES 型遠赤外線検出器アレイ開発

馬場 俊介 (東京大学 M1)

SPICA は日本の次世代赤外線宇宙望遠鏡ミッションであり、SAFARI は SPICA に搭載される TES 型検出器を用いたフーリエ分光器である [1]。SAFARI がカバーする波長は全体で  $34\text{-}210\ \mu\text{m}$  であるが、そのうちの  $34\text{-}60\ \mu\text{m}$  を S バンドと呼んでいる。S バンドでの赤外線検出は、超伝導体として Ti/Au 二重層を使う。SPICA 打ち上げまでに求められているのは、TES 型検出器を並べて  $43 \times 43$  ピクセルのアレイにし、分光と撮像とを同時に行える観測機器を作成することである。今回は、TES アレイの暗時特性を評価した実験 [2] を紹介し、今後の課題を述べる。

1. T. Nakagawa et al. (2012), *Proc. of SPIE*, Vol. 8442, 844200
2. P. Khosropanah et al. (2012), *Proc. of SPIE*, Vol. 8452, 845209

### 観測 37c 1.85 m 電波望遠鏡プロジェクトの進捗

徳田 一起 (大阪府立大学 M2)

我々は、口径 1.85 m のミリ波・サブミリ波望遠鏡を開発し、野辺山宇宙電波観測所に設置し運用している [1]。この望遠鏡は、 $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=2-1$ ) の 3 輝線を同時に、2.7 分角の角度分解能で観測できることが特徴であり、近傍分子雲や、銀河面のサーベイなどを推進している。2012 年度には受信機システムを両偏波観測方式にアップグレードし、観測効率を 2 倍に高めることに成功した。さらに、我々はこの望遠鏡を銀河中心など広速度幅ターゲットに対応させるため、分光計および IF 系の広帯域化を進めると同時に、受信機の更なる高感度化に向けて改良を行っている。本講演では 1.85 m 鏡における開発状況、将来計画等について報告を行う。

1. Onishi et al. 2013 PASJ

## 観測 38c 観測地としての南極環境と南極赤外線望遠鏡

小幡 朋和 (東北大学 M1)

寒冷乾燥環境かつ安定大気をもつ南極大陸は、天文学にうってつけの場所である。寒冷環境によって大気の赤外線放射が少なくなり、接地境界層よりも高い場所に望遠鏡を設置することで最高のシーイングを得ることができる (Micheal C. B. Ashley 2012)。ドーム C での平均シーイングは  $0.36''$  であり、マウナケア山頂の半分程度である。また、低可降水量による高い大気透過性も、南極大陸を理想的な観測地とする一つの要因である (Micheal G. Burton et al 2010)。このような天文学に最適な南極環境に着目し、東北大学では南極赤外線望遠鏡計画を進めている。現在、南極 40cm 赤外線望遠鏡のカセグレン焦点に設置予定の三色カメラ AIR-C (Ramsey Lundock 2012) の設計段階である。AIR-C の検出バンドは、K バンド:  $2.0 - 2.4\mu\text{m}$ 、L バンド:  $3.7 - 4.0\mu\text{m}$  および Antarctica バンド:  $2.8 - 3.5\mu\text{m}$  である。さらに計画中の 2.5m 赤外線望遠鏡は、今までにない高感度の赤外線観測を可能にするだろう。

1. Micheal G. Burton et al., 2010, A & A Rev
2. Micheal C. B. Ashley, 2012, Astrophysics from Antarctica (IAU symposium 288)
3. Ramsey Lundock and Takashi Ichikawa, 2012, Proc. of SPIE Vol. 7014 70142O-1