

2014 年度 第 44 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

理論と最新観測で探る重力理論・宇宙理論

日時	7月29日 15:15 - 17:30 7月29日 16:00 - 17:00(招待講演：高橋 慶太郎 氏), 17:15 - 19:30 7月30日 9:00 - 11:15, 14:45 - 15:45(招待講演：田中 貴浩 氏), 16:00 - 19:00
招待講師	高橋 慶太郎 氏 (熊本大学)「次世代電波望遠鏡による宇宙論の新展開」 田中 貴浩 氏 (京都大学)「修正重力と重力波」
座長	北村隆雄 (弘前大 D2)、小幡一平 (京都大 M2)、小川達也 (大阪市立大 M2)、西咲音 (立教大 M2)、鈴木享昇 (名古屋大 M2)、島袋隼士 (名古屋大 D2)
概要	<p>インフレーションによって始まった宇宙は、ビッグバン元素合成の後、初代天体・銀河の形成、宇宙再電離期を経て、現在の色彩豊かな宇宙へと発展してきたというシナリオは、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の観測や宇宙の大規模構造の観測によって指示されつつある。また、宇宙論的観測の近年の発達が目覚ましく、最近では、BICEP2 の CMB 偏光観測によるインフレーションシナリオへの制限や PLANCK による宇宙の初期揺らぎの non-gaussianity への制限が記憶に新しい。しかし依然として、インフレーションや宇宙加速膨張の機構や、宇宙再電離の物理的性質には謎が多い。これらの謎に挑むために、数値計算やシミュレーションを用いた理論的研究や、より精密な CMB 偏光観測、さらに HSC (Hyper Supreme Cam) を SuMIRe を用いた大規模撮像・分光サーベイ、21cm 線観測などの次世代型観測の発展が期待されている。</p> <p>宇宙加速膨張を説明するために従来の Einstein 重力とは別に提唱されたモデルとして修正重力理論がある。修正重力理論は、宇宙論のみならず、強い重力場での天体物理現象や力の統一理論を考える上でも重要な位置を占めている。また、修正重力理論のみならず Einstein 重力理論も数値相対論の発展により、国際的に研究が進められている。</p> <p>重力理論の検証としてはブラックホールや重力波の直接検証が必要となるが、未だにこれらの観測はなされていない。しかし、現在進行中の KAGRA などの観測装置により、近い将来、重力理論の検証が可能になるものと考えられる。これらを踏まえた上で、本分科会では、研究の最前線で活躍される重力理論・宇宙理論の講師を招待し、最新の研究内容などについて講演していただく予定である。また、重力理論・宇宙理論に興味のある学生を募り、各々の研究内容や勉強内容を発表、議論することにより、本分科会が、今後の研究へとつなげていくことのできる場となることを願う。</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>

高橋 慶太郎 氏 (熊本大学)

7月29日 16:00 - 17:00 B(大コンベンションホール)

## 「次世代電波望遠鏡による宇宙論の新展開」

宇宙論はこれまでマイクロ波宇宙背景放射や光赤外による銀河サーベイによって進歩してきた。この流れは大型低周波電波望遠鏡が登場する今後数年間で大きな転換点を迎える。特に次世代電波望遠鏡 Square Kilometre Array は宇宙再電離や密度揺らぎの非ガウス性、暗黒エネルギーなど宇宙論の大きな謎を解決できる可能性がある。本講演では宇宙論の現状と将来の電波望遠鏡による展望について述べる

田中 貴浩 氏 (京都大学)

7月30日 14:45 - 15:45 B(大コンベンションホール)

## 「修正重力と重力波」

一般相対論を修正することに対する観測的制限は長い歴史の中で積み上げられてきているものであり、様々な制限がつけられている。しかしながら、ダークエネルギーやダークマターの問題の解決を目指し宇宙論的な観点から様々な修正重力理論が提案されている。それらの中には非常に巧妙な方法でこれまでの観測的制限を回避しているものもあるように思われる。いくつかの代表的なモデルを紹介する。一方で、重力波観測のような新しい観測手段が質的に新しい制限をつける可能性を秘めているということも、いくつかの例を挙げて紹介する。

1. S. F. Hassan and R. A. Rosen, JHEP **1202** (2012) 126
2. K. Yagi, L. C. Stein, N. Yunes and T. Tanaka, Phys. Rev. D **87**, 084058 (2013)
3. C. M. Will, arXiv:1403.7377 [gr-qc].

**重宇 a1 強重力場における光の曲がり角**

鈴木 聡人 (弘前大学 浅田研究室 M1)

一般相対性理論から導かれる光の湾曲は重力レンズ効果と呼ばれる。この曲がり角を求める微分方程式は厳密に解析解を求めることができない。そのため、一般的には弱重力場での近似を用いて曲がり角の計算が行われている。太陽のような一般的な天体において、この近似式は非常に良く観測結果と一致することが歴史的にも知られており、現在では宇宙における重要な観測手段として広く利用されている。

一般相対論特有の現象として、光は重力源の周りで不安定円軌道 (光球:poton sphere) を持つことが知られている。このことから重力源の近くでは、曲がり角が  $2\pi$  を超えるような軌道が考えられる。そして、さらに光球の近傍では重力源の周りを何周回もする軌道があると考えられるが、この検証には上述の弱重力場での近似計算を用いることができない。

そこで、本研究では Schwarzschild 時空中における光の曲がり角を強重力場で近似的に求めた S. V. Iyer, A. O. Petters[1] と V. Bozza[2] についてレビューを行う。さらに Maxima を用いた数値計算も独自で行い、それらについて評価した。

Schwarzschild 時空中における V. Bozza[2] の結果はよく知られている C. Darwin[3] の式と一致し、曲がり角を対数関数で表すことができることがわかった。しかし、この結果は光球のごく近傍のみでしか一致しない。

そこで S. V. Iyer, A. O. Petters[1] では第一種楕円積分の級数展開から、衝突径数  $b$  で表されるパラメータ  $b' = 1 - b_c/b$  ( $b_c$ :臨界衝突径数) を用いて曲がり角を  $O(b')^4$  まで計算すると、全範囲を数値計算との誤差が 2% 以内で表すことができた。

1. S. V. Iyer, A. O. Petters, Gen. Relativ. Gravit. 39, 1563-1582 (2007)
2. V. Bozza, Phys. Rev. D. 66, 103001 (2002)
3. C. Darwin, Proc. R. Soc. London A249, 180 (1959)

**重宇 a2 N 体シミュレーションで探る弱重力レンズ効果に対するバリオンの影響**

大里 健 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

遠方銀河からの光は、前景に銀河団などの重い天体が存在すると、地球に届くまでに軌道が湾曲する。この現象は一般相対論でも予言される重力レンズ効果である。以前より重力レンズ観測は直接観測することのできないダークマターやダークエネルギーの情報を引き出せる有力な手段であると示唆されてきた。(Hu & Tegmark 1999) 重力レンズ効果の信号自体は微弱で観測は困難であったが、近年の観測精度の向上と統計的手法の開発によって、宇宙論的な情報を引き出すことが可能になった。すばる望遠鏡に搭載される Hyper Suprime-Cam を初めとした将来観測が重力レンズ効果を利用した宇宙論の精密化を目指している。

本研究では上述の HSC 計画を念頭に置き、重力と比較して副次的な効果、特にバリオンが重力レンズにもたらす影響について議論する。以前からバリオンが重力レンズ効果に与える変化は議論されてきたものの (Yang et al. 2013)、先行研究では通常の NFW プロファイルに人為的な微調整を加えるに留まっている。そこで、我々はこのバリオンの効果を定量的に見積もるため、バリオンによる圧力を考慮した宇宙論的 N 体シミュレーションを行った。重力レンズ観測において得られる重要な物理量である convergence に関する統計量を調べ、既存の Halomodel の

拡張で対応できるか検討する。また、convergence は視線方向に投影した質量と強く相関している。N 体シミュレーションで得られたデータから convergence がピークとして現れる場所に実際にハローが存在するか (Hamana et al. 2004) を調べ、宇宙の物質が全てダークマターであった場合とバリオンが含まれている場合とで、ピークの統計性がどのように変化するか考察する。

1. Hu, W., and Tegmark, M., 1999, ApJL, 514, L65
2. Yang, X. et al., 2013, Phys. Rev. D, 87, 023511
3. Hamana, T. et al., 2004, MNRAS, 350, 893

**重宇 a3 弱い重力レンズ効果の 3 点統計による宇宙論解析**

橋本 一彦 (京都大学 基礎物理学研究所 M2)

弱い重力レンズ効果を用いた宇宙大規模構造の 3 点統計による宇宙論解析の手法とその利点について発表する。

銀河や銀河団の分布が示す構造である宇宙の大規模構造には、初期宇宙の物理や、宇宙の構成成分でできるパターンが含まれている。統計量からこのパターンを読み取れば、ダークマターやダークエネルギーの正体、一般相対論は正しいのか、といった宇宙の標準モデルが内包する謎に迫る手がかりとなる。また、すばる望遠鏡を用いた SuMIRe (Subaru Measurement of Image and Redshifts) プロジェクトなど、広視野サーベイの観測が進むことで、今後の大規模構造の宇宙論解析は、より豊富なデータで、より高精度な結果を得られるようになるだろう。

そのような状況のもとで、銀河の弱い重力レンズ効果は重要性を増していく。銀河の弱い重力レンズ効果とは、銀河から放出された光が観測者に届くまでに、その間の物質が作る重力場によって曲げられ、光源となる銀河の像が歪んで観測される現象である。弱い重力レンズ効果は、大規模構造の情報を読み取る上で、次の 3 つの利点がある。1. ダークマターなども含めた全質量に対して感度を持つこと。2. その幾何学的構造が宇宙膨張に対して感度を持つこと。3. 複数の赤方偏移で行った観測を組み合わせるトモグラフィという方法で、感度を向上できること。これらの利点を最大限活かすためには、将来観測による大規模なデータに加え、新たな解析手法を確立する必要がある。

弱い重力レンズ効果と、銀河の密度分布の 3 点統計は、弱い重力レンズ効果の持つ利点を活かしながら、従来の主流であった 2 点統計と独立な宇宙論的情報が得られる新しい手法として期待できる。この統計量を実際の観測データを用いた宇宙論解析に応用していくための理論計算や、期待される成果について説明する。

1. Jeong and Komatsu Phys. Rev. D80.123527(2009)
2. Yokoyama, Matsubara and Taruya Phys. Rev. D.89.043524(2014)

**重宇 a4 WORMHOLE SOLUTIONS IN KGB FRAMEWORK**

Rotondo Marcello (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)

In the so-called Kinetic Gravity Braiding (KGB) framework, the presence of interactions containing the second derivatives of the scalar field does not lead to additional degrees of freedom in the equations

of motion. The resulting mixing of scalar and tensor kinetic terms (kinetic braiding) results in the deviation of the scalar stress tensor from the perfect fluid form. We have tried to solve Einstein field equations for a wormhole-like solution, focusing on the simplest case of spherical symmetry and staticity. Both general and special solutions will be discussed.

1. C. Deffayet, O. Pujolas, I. Sawicki and A. Vikman, JCAP 1010, 026 (2010)

.....

### 重宇 a5 Cylindrical Thin-Shell Wormhole の安定性に関する考察

矢久間 司 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

ワームホールというのは或る時空と別の或る時空が切り替わる領域である。

時空中にあるワームホールに接近すると、最終的に別の時空に移ってしまう。

形状別に研究状況を眺めると、解析的容易さから球対称を前提にした研究がなされてきた。

一方で軸対称の研究はほとんどされていない。

しかし実際に起きている運動は、回転など特定の方向への対称性の破れを持つものがほとんどである。

ワームホールについても、アインシュタイン方程式の興味深い解の一つとして、より対称性の低いものを考慮した研究をする。

本発表ではワームホールの安定性について、半径方向の線形摂動を用いて議論する。

また著者らは今回取り上げる論文で、ワームホールを質量またはエネルギーが高密度で分布する超曲面であるとしている。

これをシェルという。

この軸対称の超曲面を境に時空が切り替わっている。

1. S. Habib Mazharimousavi, M. Halilsoy, Z. Amirabi ,arXiv:1403.2861 v1 [gr-qc] 12 Mar 2014
2. General Relativity ,Robert M.Wald ,The University of Chicago Press

.....

### 重宇 a6 高赤方偏移クェーサーが 21cm 線パワースペクトルに与える影響

前田 康太郎 (名古屋大学 C 研 M1)

宇宙はビッグバンから現在までの間に再結合と再電離という 2 回の相転移を経験してきたことが観測的事実として知られている。再結合期に関しては宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) などの観測により理解が進んでいるが、再電離期の詳細については観測的に確かめられるに至っておらず、多くの観測計画によって今後明らかになることが期待されている。

再電離期の情報を得る手段として、再電離期以前の宇宙に大量に存在した中性水素原子が持つ超微細構造のエネルギー準位間の遷移に伴って放出される 21cm 線の観測がある [1]。その 21cm 線観測の手法は主にふたつある。ひとつは、中性水素ガスから放射される 21cm 線と CMB の強度差である輝度温度の観測。もうひとつは、クェーサーなどの電波

で明るい高赤方偏移天体からの放射光が中性水素ガスを通る際に現れる吸収線 (21cm forest) の観測である。

21cm forest の観測は高赤方偏移にある強い電波源の分布に大きく依存している。理論的には、赤方偏移  $z \sim 10$  以前で 900 平方度に数百個程度存在することが示唆されているが、これらの電波源の観測には次世代観測機器で 1 年もの期間を要すると推定されるため、電波源分布に関する過去の研究では赤方偏移  $z \sim 4$  以下までしか観測的制限が得られていない [2]。そのため、高赤方偏移天体を効率よく観測するためには、より多くの高赤方偏移天体が存在するであろう領域を特定することが望まれる。

今回の発表では、高赤方偏移天体分布が輝度温度のパワースペクトルに与える影響を準解析的・数値的に考察し、直近の観測計画によって高赤方偏移天体分布を探った論文 [3] をレビューする。

1. J. Pritchard & A. Loeb (2012) arXiv 1109.6012
2. De Zotti et al (2010) The Astronomy and Astrophysics Review, 18, 1
3. A. Ewall-Wice et al (2013) arXiv 1310.7936

.....

### 重宇 a7 21cmFAST:再電離期の準数値シミュレーション

吉浦 伸太郎 (熊本大学 自然科学研究科 M1)

インフレーションに始まる宇宙の劇的な誕生ののち、宇宙のほとんどが中性水素で満たされた暗黒時代が訪れる。その時代ダークマターやバリオンが重力によってハローを形成する。やがてハローは輝く天体となって、電磁波を放射する。放射された電磁波は周囲に残る中性水素をイオン化する。これが宇宙の再イオン化であり、この時代を再電離期と言う。この時代を探るものとして最も有効だと考えられているものが、中性水素の超微細構造線である 21cm 線である。21cm 線を通してこの時代の情報は輝度温度にまとまる。輝度温度に含まれる情報には、密度場や中性度、スピン温度などがある。観測から輝度温度を通してそれらの情報を得る。そこから統計量であるパワースペクトルを扱うことで、この時代の様子を探ることができる。ただし、この時代の物理は複雑であり、シミュレーションで扱うためにはかなりの時間と労力が必要である。そこで、いくつかの近似を用いて比較的簡単にこの時代の様子を再現することのできる 21cmFAST が開発された。今回は 21cmFAST についての概要と得ることのできる結果について見る。

1. A.Mesinger ,S.Furlanetto,R.Cen.2011MNRAS,411,1403

.....

### 重宇 a8 真空の量子揺らぎと相互作用する粒子のランダム運動における熱的性質

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

Unruh 効果とは Minkowski 真空中を加速度運動する観測者は熱的励起を観測するという効果で、曲がった時空での場の量子論から予言される効果であり [1]、Hawking 放射と根深い関係がある。しかしこの Unruh 効果は未だ実験的には観測されていない。この Unruh 効果を検証するために Chen Tajima によって考案された方法が知られている [2]。加速した荷電粒子は Unruh 効果由来の量子場の熱的励起を感じて平衡状態

に達するとその荷電粒子は放射 (Unruh 放射) を出すと考えられるのでこれを観測するというのが彼らの主張である。しかし、その放射がどのような性質を持つかまで知るには励起した真空の量子場と相互作用する荷電粒子がどのように平衡状態を迎えるのかを知る必要がある。

先行研究 [3] によれば、この荷電粒子は加速する方向と垂直な向きにはエネルギー等分配則が成り立つことが荷電粒子の速度分散の期待値の近似計算 (速度分散の計算の際に量子場のノイズを近似的にホワイトノイズとして扱う) から分かっている。しかし、速度分散の加速方向の成分の期待値に対する計算には先行研究で用いられていた近似が適用できず、結局加速度運動する荷電粒子の量子揺らぎによるブラウン運動の様子は明らかになっていないのである。これが明らかになれば真空中を加速度運動する荷電粒子からの量子的放射 (Unruh 放射) がどのくらいの強度で現れるかということに対して理論的予言を与えることも可能になる。

本研究の目的はこの先行研究での問題点に取り組み、真空の量子場のゆらぎと相互作用した荷電粒子のブラウン運動の様子を完全に明らかにすることである。私は先行研究において行われた速度分散の計算は実は近似計算を用いなくても厳密に実行できることを明らかにした。その結果、真空の量子場と相互作用して加速度運動する荷電粒子は進行方向に垂直な成分には励起した量子場からエネルギーが等分配され、進行方向には全くエネルギーが分配されないという描像が見えてきた。

1. W. G. Unruh, Phys. Rev. D 14 (1976) 870
2. P. Chen and T. Tajima, Phys. Rev. Lett. 83 (1999) 256.
3. S. Iso, Y. Yamamoto, and S. Zhang, PRD 84, 025005 (2011)

## 重宇 a9 Unruh de Witt detector を用いた量子場の解析

久木田 真吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1) Hawking[1] を端緒とする重力理論と熱力学、また量子論との関連についての研究は今多様な形で花開いている。その中でもとりわけ、量子情報の分野からの重力に対するアプローチが現在、だんだんとはやってきている。それらの研究はいずれも非常に抽象的で、理解が難しい。そこで本研究では、より直感的な立場から量子情報の分野と重力をつなぐ足がかりとして、簡単な量子系 (典型的には 2 level system) を時空上の量子場などと相互作用させることで解析を行う Unruh de Witt detector の手法を用いてアプローチを行った。

このような 2 level system を用いるモデルに対して従来から知られている計算手法は通常の摂動計算、およびマスター方程式 [2] によるものがあるが、その関係性についてはあまり議論されておらず、明白でない。これに対し、最近提案された時間粗視化近似の上でのマスター方程式 [3] がある種の特異摂動計算であることを示し、通常の摂動計算との対応を明らかにした。また、その近似によって得られる長時間のダイナミクスは従来の計算手法の元での近似からは素朴には予想できない形をしていたので、その結果について報告する。

更に、現在このような簡単な量子系を用いた解析を量子宇宙論に適用するという試みも行っているので、もし面白い結果が出たならばこれについても発表する予定である。

1. S. W. Hawking Phys. Rev. Lett. 26, 1344
2. F. Benatti, R. Floreanini Phys. Rev. A 70, 012112
3. G. Schaller, T. Brandes Phys Rev A.78.022106

## 重宇 a10

寺前 柊斗 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M1)

重力場中の粒子は、重力場が十分弱く、粒子がゆっくり運動している場合、電磁場の下で運動する荷電粒子とよく似た運動方程式に従う。そのような効果をもたらす重力場のことを、gravitomagnetic field と呼ぶ。一般相対論に基づく、gravitomagnetic field による粒子への影響は、gravity probe B の実験などで実際に確認されている。一方でニュートンの重力場の下での量子系に関しても、原子干渉計に挙げられるように、多くの研究がなされている。ところが、量子系に gravitomagnetic field の及ぼす効果についてはあまり研究されていない。将来実験精度が向上されれば、そのような効果を観測する可能性があり、基礎理論の構築が必要である。本発表では Ronald J. Adler と Pisin Chen の論文 Gravitomagnetism in Quantum Mechanics を review し、gravitomagnetic field と電磁場が存在する系における量子力学的粒子の運動を取り扱う。

1. Ronald J Adler & Pisin Chen, Gravitomagnetism in Quantum Mechanics arXiv:0912.2814v2[gr-qc] 19 May 2010

## 重宇 a11 Thawing 模型の観測からの制限

田中 淳一郎 (東京理科大学 辻川研究室 M1) 1998 年の Ia 型超新星の観測データにより、現在の宇宙は加速膨張していることが示された。現在の宇宙全体のエネルギーの 70% 程度を占め、加速膨張を引き起こす未知のエネルギーは暗黒エネルギーと呼ばれている。超新星の観測以外にも、宇宙年齢、宇宙背景輻射、バリオン音響振動、大規模構造から暗黒エネルギーの存在が支持されている。暗黒エネルギーの起源として様々な模型が考えられているが、そのうちの 1 つとして、クインテッセンスと呼ばれるスカラー場を考えるものがある。その中でも、場が最初はほとんど静止しているが、やがて動き出し、 $w_{DE}$  が増加していくようなものを Thawing 模型と呼ぶ。Thawing 模型の  $w_{DE}$  は 3 つのパラメータを用いて表される [2] [3]。

本発表では、観測データから Thawing 模型に制限を付けた [1] についてのレビューを行う。Thawing 模型に観測からの制限は、3 つのパラメータを変えたときに、SNIa、CMB、BAO のデータに基づく統合解析による  $\chi^2$  を最小化する統計解析を行うことで付けられる。現状では、Thawing 模型が  $\Lambda$ CDM 模型よりも特に好まれるという統計的証拠は見つかっていない。しかし、Thawing 模型の  $w_{DE}$  の変化を観測から精度良く制限することによって、 $\Lambda$ CDM 模型との区別が将来的に可能になると期待されている。

1. T. Chiba, A. De Felice and S. Tsujikawa, Phys. Rev. D 87, 083505 (2013).
2. T. Chiba, Phys. Rev. D 79, 083517 (2009).
3. S. Dutta and R. J. Scherrer, Phys. Rev. D 78, 123523 (2008).

## 重宇 a12 ミリメートル距離での重力の逆二乗則検証

桑原 祐也 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 M1)

4つの基本的な相互作用の中で重力相互作用の大きさは他の3つと比べて非常に小さい。WS理論によって電磁相互作用と弱い相互作用の統合されるエネルギースケールが1 TeVに対して、超弦理論によって重力相互作用も統合されるスケールは $10^{16}$  TeVと桁違いに大きく、相互作用の階層問題と呼ばれている。その弱さの起源として4次元時空以外の余剰次元へ重力が逃げている可能性が指摘されており、そうであれば次元の数に対応して重力法則は逆二乗則からずれることになる。ただし超弦理論ではコンパクト化という概念があり、余剰次元はこのコンパクト化のスケールに以下に閉じ込められてしまっている。中にはミリメートル領域にコンパクト化のスケールがあるとする理論もあり、この領域において重力の逆二乗則を検証することによりコンパクト化のスケールに制限をつけることができる。

重力の逆二乗則を検証するのにねじれ振り子を用いる。アトラクタと呼ばれるソースマスを回転させることによって変調重力場を発生させ、それがねじれ振り子を励起する振動の大きさを測定する。この方法は他のグループでもしばしば用いられているが、今回私たちは逆二乗則が正しいならば信号がゼロとなるようなアトラクタを考案した。このような方法はヌル測定と呼ばれ、系統誤差が効きにくい点で有利である。

本講演では逆二乗則検証の導入から現在の進行状況までを報告する。

1. E.G. Adelberger, B.R. Heckel, and A.E. Nelson, *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* 53, 77 (2003)
2. C.D. Hoyle et al, *Phys. Rev. D* 70, 042004 (2004)
3. K. Shibata, *Andolab Master thesis* (2012)

## 重宇 a13 反ドジッター時空における非線形ダイナミクスと AdS/CFT 対応

星野 悠一郎 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)  
AdS/CFT 対応とは、1997年に Maldacena が4次元の  $\mathcal{N} = 4$   $SU(N_c)$  Super Yang-Mills 理論と  $AdS_5 \times S^5$  上の Type IIB 超重力理論が等価であることを主張したものである [1]。この対応関係を用いれば、 $N_c \rightarrow \infty$  の下で CFT (conformal field theory) 側での強結合領域の物理を重力側で反ドジッターに漸近する時空での古典論で解析することが可能となる。その応用範囲は物性物理、流体力学、非平衡系に至るまで様々であるが、ここでは非線形物理学において重要な概念の一つであるカオスを伴う系に着目する。

5次元の Kerr AdS BH において、この時空の対称性を用いて閉弦の埋め込みを考えると、系はある軌道空間上の測地線方程式に帰着され、特別なパラメータを選ぶことでこの系は可積分となるが知られている [2]。

本発表では、別のパラメータの選択においては一般にカオスが現れると予想されるので、ポアンカレ断面や Lyapunov 指数を求め、この系の特徴について述べたい。さらに、CFT 側での解釈についても議論したい。

1. J. M. Maldacena, *Adv. Theor. Math. Phys.* 2, 1998.
2. T. Igata and H. Ishihara, *Phys. Rev. D* 81 044024, 2010.

## 重宇 a14 Chern-Simons 重力理論における相対論的 Sagnac 効果

菊池 大貴 (弘前大学 浅田研究室 M1)

Einstein の一般相対性理論を修正する重力理論の一つとして、Chern-Simons (CS) 重力理論がある。この修正理論は超弦理論から示唆されるもので、Einstein-Hilbert 作用に補正項を加えることでパリティの破れを考慮している。

CS 理論のパラメータは、Okawara らによって、CS 重力における量子干渉効果から制限を与えられる可能性が示唆されている [1]。彼らは、中性子干渉計による地上実験を想定し、Alexander と Yunes によって提案された理論モデル (AY モデル) [2] を用いて計算している。なお、AY モデルでは重力源である回転天体を質点と見なしている。

本研究は彼らの研究を発展させたものである。改良点の1つとしては、カリフォルニア工科大の Smith らによって提案された、より一般的化された理論モデル [3] を用いたことである。このモデルでは、重力源を質点ではなく広がりを持ったものと考え、天体の内部と外部の重力場の両方が考慮されているため、地球重力場を記述するのにより適切である。また、中心天体の動径方向に沿って補正重力ポテンシャルが振動的であるという点で、AY モデルとは大きく異なっている。2つ目の改良点として、光を用いた Sagnac 干渉計を考えた。光干渉計のメリットは、原子炉を必要とする中性子干渉計と比較して、様々な観測地に設置できることである。

本研究では、Smith らのモデルにおいて、干渉計を置く緯度、干渉計が向く方位角、そして高度に対する依存性を調べた。

1. H. Okawara, K. Yamada, and H. Asada, *Phys. Rev. Lett.* 109, 231101 (2012)
2. S. Alexander and N. Yunes, *Phys. Rev. D* 75, 124022 (2007)
3. T. L. Smith et al, *Phys. Rev. D* 77, 024015 (2008)

## 重宇 a15 非最小結合するアインシュタイン・マックスウェル理論の安定性解析

森 友紀 (名古屋大学 C 研 M1)

現在の宇宙は加速膨張しているということが、近年の観測から示されている。アインシュタイン重力では加速膨張を説明できなかったが、新たにダークエネルギーを導入することで説明した。一方で、重力理論そのものを書き換えることで加速膨張を説明する修正重力理論も提唱されている。現在では様々な修正重力のモデルが存在している。これらの修正重力理論が物理的に可能であるためには、タキオンやゴースト場が存在してはならない。その有無を判断するためには、場の摂動に対して安定性解析を行う必要がある。

[1] の論文では、高次元の重力理論から導かれる Horndeski vector-tensor 理論において、de Sitter 時空や Schwarzschild 時空などを背景として、ベクトル場のゴースト不安定性等を議論している。この理論の特徴は、ベクトル場と重力が結合しているという点である。この結合があるため、ゴースト場等が存在する不安定なパラメータ領域がある。本発表では、まず [1] の論文をレビューし、さらに [1] の拡張として、より一般のベクトル-重力結合を考えこの理論の安定性解析を行ったので、この結果について議論する。

1. Jose Beltran Jimenez et al. *JCAP* 1310. (2013) 064

重宇 a16 Astrophysical black holes in screened modified gravity

小川 潤 (立教大学 M1)

ダークエネルギーの源を説明するために、修正重力理論が盛んに研究されている。そのなかでも特に初期段階から研究されている理論が、スカラー場と物質とが non-minimal coupling するスカラー・テンソル理論である。しかし、スカラー場がダークエネルギーの源とすると、スカラー場の質量がハッブル定数  $H_0 \sim 10^{-33} \text{eV}$  と、大変小さくなる。さらに、物質とスカラー場が結合し第 5 の力が空間を伝播するので観測と合致しない。

このような観測との不整合を修正する理論が、物質の密度によってスカラー場の寄与が「隠される」という Screened modified gravity である。この理論では、地球のような高密度領域においてスカラー場の寄与が実効的に減衰することで、観測との整合性を保っている。一方では、宇宙のような超低密度領域ではスカラー場の寄与が隠されず、これがダークエネルギーのように振る舞う。

本発表では、Screened modified gravity におけるパラメータの制限をするために、球対称ブラックホールを用いる。Screened modified gravity の代表的な例である Chameleon, Dilation と Symmetron 機構における、ブラックホール近傍の非一様な物質分布によるスカラープロファイルを求める。スカラープロファイルは、数値解析によって詳細な振る舞いを解析する。これを求めることによって、それぞれの機構の区別をより詳細につけることができる。この結果は、ブラックホール近傍から放出される重力波によって観測的制限を付けることができる。修正重力理論の強重力場におけるパラメータの制限については、ほとんどが未開拓のためこれを求めることは大変意義深い。

1. J. Khoury, A. Weltman, Phys. Rev. D, 69, 044026,(2004)
2. A. -C. Davis, R. Gregory, R. Jha, J. Muir, astro-ph/1402.4737

重宇 a17 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赤方偏移空間でのパワースペクトル

宅 嶋 祐一郎 (広島大学 宇宙物理学研究室 D1)

様々な観測から現在の宇宙は加速膨張していることが示唆されている。この加速膨張を説明する理論として、一般相対性理論に宇宙項を加えた宇宙項模型が標準模型として考えられており、これは観測をよく再現している。

宇宙項模型以外の加速膨張を説明する理論として、一般相対論を修正した修正重力理論が研究されている。本研究ではその中でも最も一般的なスカラーテンソル理論に着目した。この理論はスカラー場を 1 つ導入し、運動方程式が 2 階の微分方程式になるという条件の下で、最も一般的な理論である。また Vainshtein 機構が働きうるため、局所スケールでは一般相対論に帰着できる。この理論の作用はスカラー場とその運動項に関する 4 つの任意関数を含むため、これらの関数を適当な形に選ぶことによって、様々な修正重力理論を再現することが出来る。すなわち最も一般的なスカラーテンソル理論を調べることで多くの修正重力理論の一般的な性質を知ることが出来る。

本研究ではこの理論における宇宙論的密度揺らぎについて調べた。宇

宙論的密度揺らぎとは宇宙の平均密度からのずれとして定義され、大規模構造を特徴付ける物理量の一つである。標準摂動理論の手法を用いて密度揺らぎの 3 次までの解を求め、さらにこの解を用いて計算できる密度-密度、密度-速度、速度-速度パワースペクトルを導出した。

本発表では標準摂動理論を用いた宇宙論的密度揺らぎとパワースペクトル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)
3. Yuichiro Takushima et al. Phys. Rev. D89 104007 (2014)

重宇 a18 銀河団の多波長観測を用いた一般化されたガリレオン重力模型の制限

照喜名 歩 (広島大学 宇宙物理学研究室 D2)

現在の宇宙の加速膨張を解明するため、一般相対論を宇宙論的な長距離スケールで修正する修正重力理論がよく研究されている。一般に重力理論の修正は新たな自由度 (スカラー場) を生み出し、それにより重力ポテンシャルは変更を受けて一般相対論とのズレが生じる。ガリレオン重力模型は太陽系のような局所スケールでヴァインシュタイン機構によりスカラー場が隠され、一般相対論が回復する模型である。ここではガリレオン模型を一般化したモデルについて考察する。一般化されたガリレオン重力模型は銀河団外縁部でヴァインシュタイン機構が十分には働かず、一般相対論が回復しない可能性がある。このとき、銀河団中のガス分布は重力ポテンシャルの修正により変更され [1]、さらに、重力場中の光の軌道も修正されるために重力レンズシアー分布も変更を受ける [2]。両者の変更は独立なモデルパラメータの依存性を含んでいる。本講演ではかみのけ座銀河団の X 線温度・表面輝度、SZ 効果、重力レンズ効果の観測と理論模型を比較し、多波長観測を組み合わせることで得られるモデルパラメータの制限について議論する。

1. A. Terukina et al., JCAP 04 (2014) 013
2. T. Narikawa and K. Yamamoto, JCAP 05 (2012) 016

重宇 a19 Gravitational Baryogenesis によるバリオン数生成問題への取り組み

福島 光博 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)

本講演では H.Davoudiasl et al. によって提案された重力的効果によるバリオン数生成機構のアイデア [1] を紹介し、観測量との比較やグラビティノー問題からの制限等を通じてこのモデルの可能性について発表する。バリオン数生成問題は初期宇宙の未解決問題の一つであり、様々なモデルの検証が行われている現状である。一般的なバリオン数生成機構は Sakharov が指摘したように熱平衡状態からの離脱を必要とするが、宇宙膨張のダイナミカルな効果による実効的な CPT 対称性の破れを考慮することで熱平衡中でのバリオン数生成の可能性が示されている [2]。この中でも超重力理論を背景とした相互作用 (バリオン数カレント  $J^\mu$  と Ricci スカラー曲率の微分  $\partial_\mu R$  間の相互作用) を考慮したモデルから予想されるバリオン数非対称の大きさを議論する。本モデルでは熱平衡中におけるバリオン数破れの反応を必要とするが、この反応の脱結合時刻における温度  $T$  及び曲率の時間微分  $\dot{R}$  の値によって生成されるバリオン/エントロピー比が決定される。宇宙の支配的物質によって各時期

を分類し上記のバリオン数破れの反応の脱結合時刻と比較することで、得られるバリオン非対称性の大きさを議論する。

1. H.Davoudiasl, R.Kiyano, G.D.Kribs, H.Murayama and P.J.Steinhardt, Phys. Rev. Lett. **93**, 201301 (2004).
2. A.G.Cohen and D.B.Kaplan, Nucl. Phys. **B 308** 913 (1988).

.....

## 重宇 a20 超弦理論に基づくインフレーションとゲージ場

渡邊 健人 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1)  
 宇宙が一様かつ等方で、物理法則がどこでも同じであるとする自然な仮定による Big Bang 宇宙論は、Hubble の法則、CMB、宇宙初期の軽元素合成といった観測事実をよく説明するが、地平線問題や平坦性問題といった理論上の困難を抱えている。それを解決する理論として提唱されているインフレーション理論は、平坦なポテンシャルを持つスカラー場 (インフラトン) がポテンシャルの坂をゆっくりと転がることで加速膨張を十分持続させ、上記の困難を解決するというものであり、観測的にも支持される初期宇宙の標準モデルになっている。また、ポテンシャルの坂を下りた後は Big Bang 宇宙の初期状態につなげるために再加熱も必要である。これまで多くのインフレーションモデルが提唱され、近年の観測からそれらのモデルに対する制限が与えられつつあるが、素粒子基礎理論から導かれる自然なモデルはまだ存在しない。素粒子基礎理論の候補として提唱されている超弦理論や M 理論が基礎理論として正しいのであれば、その理論の下で自然なインフレーションモデルが存在すると予想されるが、超弦理論の低エネルギー有効理論である超重力理論において、ある仮定のもと宇宙の加速膨張が実現できないという禁止定理がある。[1] これを回避する方法として内部空間にブレインを導入するモデルなどが考えられている。[2] また、素粒子基礎理論にはスカラー場とゲージ場が含まれ、ゲージ場がインフラトンと結合する場合にはインフラトンの運動に影響が出る。ポテンシャルの傾きが急であっても、それを平坦にするような項を加えられればスローロール条件を満たすことができ、インフレーションを起こりやすくなる。[3] 本発表では、KKLMMT モデルにスカラー場とゲージ場が結合した項が付加された場合にスカラー場の運動がどう変わるかについて議論する。その結果、インフレーションが起りやすくなり、KKLMMT モデルの初期値の微調整の問題を解決できる。

1. J. Maldacena and C. Nunez, Int. J. Mod. Phys. A **16**, 822 (2001)
2. S. Kachru, R. Kallosh, A. Linde, J.M. Maldacena, L. McAllister, and S.P. Trivedi, J. Cosmol. Astropart. Phys. **10** (2003) 013
3. K. Maeda, K. Yamamoto, Phys. Rev. D **87**, 023528 (2013)

.....

## 重宇 a21 SUSY によるハイブリッドインフレーションモデルを用いた BICEP2 の観測結果の解析

打田 晴輝 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)  
 本発表では論文 [1] のレビューを行う。テンソルゆらぎと密度ゆらぎのパワースペクトルの比であるテンソル・スカラー比  $r_T$  はインフレーション理論に対して大きな制限を与える。Planck での観測結果では  $r_T < 0.11$  であったのに対し、BICEP2 では  $r_T \sim 0.2$  であった。これは BICEP2 の観測したスケールではテンソルゆらぎが非常に大きく、ま

た Planck での観測結果と整合するためには  $r_T$  のスケール依存性 (ランニング)  $\alpha_s$  が負の大きな値を持つ必要があることを示している。

従来の単スカラー場によるモデルでは e-fold Number  $N \sim 50$  の元でこの結果を再現するためにはインフレーション中は場が超プランクスケールのエネルギーを持っていないとてはならない。(laege field model)

しかし 2 回インフレーションが発生したモデル (double inflation scenario) を考え、さらに一回目のインフレーションを超対称性理論 (SUSY) から予言される複数スカラー場による短いハイブリッドインフレーションを考えることでこの問題は解決される。つまり最初にハイブリッドインフレーションが発生し強いテンソルゆらぎが作られ、しかしすぐに ( $N \sim 10$ ) インフレーションが終了することでその強さは保たれる。次に二回目のインフレーションが発生して古典ビッグバン理論での地平線、平坦性問題が解決されるまで膨張したと考える。

ここでは一回目のインフレーションに焦点を当て、超対称性の崩壊から  $r_T$  及び  $n_s$  が様々な  $N$  に対しどのような値を取るかを考察し、ある  $N$  のもとではプランクスケールでのインフレーションであっても BICEP2 と Planck との観測結果の整合性が取れることを見る。

1. K.Tatsuo and S.Osamu. 2014.arXiv:1404.3102 [hep-ph]
2. 佐藤勝彦、二間瀬敏史 (2008) 『宇宙論 1-宇宙の始まり』(シリーズ <現代の天文学> 2) 日本評論社
3. Andrew,R,L and David,H,L.(2000).*Cosmological inflation and large-scale structure*.University Press.

.....

## 重宇 a22 Wiggly Whipped Inflation

森 太朗 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

インフレーション理論とは地平線問題や平坦性問題などを解決するために、極めて初期の宇宙が急速な加速膨張をしたと仮定する理論である。この理論により従来の膨張宇宙論の問題点は解決されるが、現在ではインフレーションを起こすための具体的なモデルが数多く提唱され、どのモデルが現在の宇宙論そして観測に最も整合的であるのかは、はっきりとした決着がついていない。

今回の発表では、Dhiraj Kumar Hazra らによって提唱された Wiggly Whipepd Inflation と呼ばれる、インフレーション中にある種の転移が生じるようなモデルを紹介する。このモデルではインフレーションが大統一理論のエネルギースケールで起こり、その理論の対称性の破れに起因する転移を起こすようなポテンシャルを仮定する。具体的には最初は比較的大きな勾配 (faster-roll) で始まり、その後小さな勾配 (slow-roll) へと転移するようなポテンシャルを考えていく。

Planck や WMAP による観測から、CMB の温度揺らぎは、大角度において単純なインフレーションモデルで予言される初期曲率揺らぎからの寄与との間にわずかにズレがあると示唆されているが、このモデルではそのズレを自然に説明できる可能性がある。さらに最近の BICEP2 によって観測されたと言われる比較的大きなインフレーション起源の重力波がある場合にも、観測と整合的な予言をすることができる。またこのモデルは、初期曲率揺らぎのパワースペクトルに振動するような特徴的な波数依存性を生じさせ、この特徴は将来的に銀河の大規模構造の観測によって測定できると期待される。

今回の発表では、Dhiraj Kumar Hazra らの論文 “Wiggly Whipped Inflation” (arXiv:1405.2012) の概要の紹介、及び観測結果との比較や将来の観測による制限の可能性についても触れたいと思う。

1. Dhiraj Kumar Hazra, et al. “Wiggly Whipped inflation”; arXiv:1405.2012
2. Dhiraj Kumar Hazra, et al. “Whipped inflation”; arXiv:1404.0360

## 重宇 a23 PLANCK と BICEP2 の観測結果による single field inflation モデルへの制限

大石 直矢 (京都大学 基礎物理学研究所 M1)

今年南極のアムンゼン-スコット基地にある望遠鏡 BICEP2 (Background Imaging of Cosmic Extragalactic Polarization) で宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) を観測してきた研究チームが CMB の偏光を解析した結果、インフレーション由来の原始重力波が時空を歪めることにより生じるとされる B モードのパワースペクトルが発見された。そしてその観測によると、B モードのパワースペクトルは  $1\sigma$  のレベルで  $r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$  のテンソル・スカラー比を与え、さらに  $r = 0$  は  $7\sigma$  のレベルで棄却されることが分かった。これは原始重力波の存在を強く支持する結果を示している。これらの結果を受けて、今回の発表では、主に [1] の論文を参考にして、chaotic inflation、natural inflation の 2 つの single field inflation モデルについて slow-roll 近似を用いて、テンソルスカラー比とランニングを理論計算し、PLANCK と BICEP2 の観測結果からそれぞれどのような制限を受けるのかを考察する。また観測結果によるとテンソル・スカラー比とランニングは大きいので、single field inflation モデルを考えるにあたって課題を与える。そのことについても考察する。

1. Qing Gao and Yungui Gong (2014) arXiv:1403.5716v2[gr-qc]
2. Kazumori Kohri, C.S.Lim, and Chia-Min Lin (2014) arXiv:1405.0772v1[hep-ph]

## 重宇 a24 インフレーション理論を検証する POLARBEAR-2 実験

瀬川 優子 (総合研究大学院大学高エネルギー加速器科学研究所 M1)

POLARBEAR-2 はインフレーション理論の精密検証を目的とした実験である。宇宙マイクロ波背景放射 (Cosmic Microwave Background, CMB) を高精度で測定し、インフレーション重力波から発生する B モードと呼ばれる CMB 偏光パターンを見つけようとする地上実験である。観測装置は標高 5200m のチリ・アタカマ高原に設置する。POLARBEAR-2 では、7588 個の TES (transition edge sensor) ボロメータを搭載し統計感度を向上させるとともに、95GHz、150GHz の同時計測により背景放射に強い観測を実現する。これらは世界随一の挑戦であり、加えて、大型の光学系を冷却することにより熱的ノイズを抑制するという特徴も備えている。CMB の精密測定では、赤外線からの輻射を抑えることが重要である。7588 個の TES を配置するためには大きな窓を設計しなければならないが、窓が大きくなればなるほど窓からの

輻射は大きくなる。POLARBEAR-2 実験開始に向けて、現在我々は、特に影響の大きい 300K 層からの輻射を抑制するという課題に取り組んでいる。目標温度まで下げるためには現状より赤外輻射を低減する必要がある。そのために新しい方式の赤外輻射フィルターを導入し、冷却性能と光学性能を評価した。本講演では POLARBEAR-2 実験の概要と、300K 層の熱設計と光学性能について報告する。

1. P.A.R. Ade et al. (POLARBEAR Collaboration) PhysRevLett.112.131302 (2014)
2. Yuki Inoue et al. Appl. Opt. 53, 1727-1733 (2014)
3. Takayuki Tomaru et al. Proc. SPIE 8452, Millimeter, Submillimeter, and Far-Infrared Detectors and Instrumentation for Astronomy VI, 84521H (2012)

## 重宇 a25 インフレーション宇宙における原始磁場形成

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

ボイド領域に存在する大スケール磁場の起源は、これから解明されるべき課題の一つである。本公演では、インフレーション中における磁場形成を議論する。特に、強い電場による Schwinger 効果が磁場形成論で果たす役割を調べた。

1. A. Neronov, I. Vovk, Science, 328, 73 (2010)
2. J. Schwinger, Phys. Rev. 82, 664 (1951)
3. J. Martin, J. Yokoyama, JCAP 01 025 (2008)

## 重宇 a26 Generalized Galilean Genesis

西 咲音 (立教大学 M2)

初期宇宙では一般的にはインフレーションが起きていたと考えられているが、現在様々なインフレーションの代替モデルが考えられている。その一つに Galilean Genesis というモデルがあり、このモデルは Horndeski 理論から与えられるものである。Horndeski 理論は単一スカラー場で記述されるスカラーテンソル理論を一般化したものであるため、今までモデルにより個別に行われてきた研究を包括的に行うことができるという特徴がある。Genesis モデルのシナリオでは、ミンコフスキー時空から始まる宇宙膨張が放射優勢期へとつながるため、宇宙のはじまりに特異点が存在しない。このモデルでは、Null Energy Condition を安定のまま破ることが知られている。本研究ではこの Genesis モデルの一般化を行い、インフレーションで解決される平坦性問題などの諸問題が Genesis モデルにおいても同等に解決されるかどうかを調べた。さらに、この時期に生じる一次ゆらぎについての振る舞いを調べた。

1. P. Creminelli, A. Nicolis and E. Trincherini, JCAP 1011, 021 (2010) [arXiv:1007.0027 [hep-th]]
2. G. W. Horndeski, Int. J. Theor. Phys. 10 (1974) 363-384.

**重宇 a27**     **ストカスティック- $\delta N$  形式による曲率ゆらぎへの非摂動的アプローチ**

多田 祐一郎 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D1)  
 我々は前回の論文 (JCAP 1312,036(2013)) で、ストカスティック形式でインフレーション中に作られる曲率ゆらぎのパワースペクトルを計算する手法を提唱した。この手法はスーパーホライズンスケールでインフラトン場についての摂動展開を必要としないので、例えば曲率ゆらぎが非常に大きかったり、非ガウス性が無視できなかつたりする場合などにも適用可能だ。今回我々はこの手法をカオティックインフレーションとハイブリッドインフレーションに適用した。特にハイブリッドインフレーションでは、臨界点付近でポテンシャルが非常に平らで標準的な摂動計算がうまく行かないが、我々は曲率ゆらぎを計算するのに成功した。

1. T. Fujita, M. Kawasaki and Y. Tada, arXiv:1405.2187 [astro-ph.CO]
2. T. Fujita, M. Kawasaki, Y. Tada and T. Takesako, JCAP 1312, 036 (2013)

**重宇 a28**     **講演キャンセル**

**重宇 a29**     **原始重力波と B-mode 偏光の生成**

大場 淳平 (名古屋大学 C 研 M1)

ビッグバンモデルは数多くの観測との一致により標準宇宙モデルとして広く受け入れられているが、同時にいくつかの宇宙論的問題を生み出す。その解決案の 1 つとして、宇宙初期に加速的な膨張が起こったとされるインフレーション理論が提唱されている。インフレーション理論は現在までに様々な観測的証拠が見つかっており、強く支持されている。さらなる観測的証拠を得るためにも、インフレーション理論の重要な帰結として生成される原始重力波の検出が強く待ち望まれている。重力波は CMB の B-mode 偏光として痕跡を残すため、世界的に CMB の B-mode 偏光の観測が精力的に進められている。

このような状況の中、2014 年 3 月に BICEP2 により CMB の B-mode 偏光が観測されたと発表され、インフレーション理論の強い証拠として注目された。しかし、観測された B-mode が重力波由来であるとする、その結果から予想される温度揺らぎの値はこれまで行われてきた観測の結果に矛盾する。

今回の発表では、並進対称性という宇宙原理を見直すことにより重力波が B-mode のみを生成し、温度揺らぎを作り出さないことを示した論文 [1] をレビューする。論文 [1] では並進対称性を破った場合に B-mode のみが生成される機構を導入することで、これまで観測されてきた温度揺らぎの値を変更することなく、今回の BICEP2 の観測結果を説明することについて議論している。この論文は現在の宇宙論の根本原理である宇宙原理を破ることで観測結果を説明する非常に野心的な研究である。

1. M. Kamionkowski, L. Dai and D. Jeong, (2014); arXiv:1404.3730
2. L. Dai, M. Kamionkowski and D. Jeong, Phys. Rev. D 86, 125013 (2012)

**重宇 a30**     **重力波検出器が量子重力を明らかにする!?**

小森 健太郎 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 M1)

重力波とは、一般相対論から予言される時空の変動が光速で伝播することである。1974 年、ハルスとテイラーにより連星中性子星が発見され、その公転周期の変化が重力波によって放出されるエネルギーから計算される値と一致していることから、重力波の存在は揺るぎないものとなっている。また、今年の 3 月には BICEP2 による原始重力波の存在証明というビッグニュースがあった。銀河系内ダストの影響を考慮していないという指摘がありプランク等による追試が待たれるところではあるが、重力波という分野は大きな盛り上がりを見せており、アメリカ、日本、ヨーロッパでの次世代重力波検出器による直接観測も目前に迫ってきた。

さて、実は宇宙で最も激しい現象 (インフレーション、コンパクト連星合体、超新星爆発) を捕まえようとする重力波検出器の開発に伴って発達してきた技術を用いることで、量子の世界の根本を明らかにできるかもしれないという話がある。

重力波検出器の開発とは、重力波振幅の微小さゆえに極限的な感度を追い求めることと等価であり、古典な究極の壁である熱雑音を超えた先には量子雑音が残っている。この量子雑音、検出器にとってみれば beat すべき雑音なのだが、ミラーが量子雑音に制限されるということは、レーザー光の量子性がダイレクトに巨視的な物体に焼かれているということであり、巨視的量子状態の実現が可能となる。本発表では、いかにして巨視的量子現象が達成されるか、さらにはその先にある、巨視的エンタングルの生成、重力デコヒーレンスの観測等について発表する。

1. N Matsumoto et al 'Classical Pendulum Feels Quantum Back-Action' arXiv:1312.5031
2. Helge Mller-Ebhardt et al 'Entanglement of Macroscopic Test Masses and the Standard Quantum Limit in Laser Interferometry' Phys. Rev. Lett. 100, 013601 (2008)

**重宇 a31**     **クラスタリング解析で探る初期銀河形成**

播金 優一 (東京大学宇宙線研究所 M1)

銀河のダークハロー質量を観測的に明らかにすることは、銀河の形成や進化を解明する上で重要である。直接観測できないダークハローの質量を測定することは一般に困難であるが、銀河のクラスタリング解析によって推定できる。これは銀河のクラスタリング強度を構造形成モデルの予言と比較することでダークマター質量を推定するという方法であり、これまでに近傍だけでなく、赤方偏移  $z$  が 3 を超えるような遠方の銀河に対してもこの方法でダークハロー質量が見積もられてきた。しかし  $z > 5$  については、統計数が足りないためにダークハロー質量を精度よく求めることは出来ていない。

我々は現在、ハッブル宇宙望遠鏡 (HST) によって新しく取られた撮像データの解析を進めている。これらのデータは限界等級が 29 と非常に深く、 $z \sim 5$  を超える遠方の暗い銀河が大量に検出されると期待される。一方、この春から本格的な探査が始まった Subaru/Hyper Prime-Cam (HSC) の撮像データは空間的に非常に広範囲領域をカバーしており、遠方の明るい銀河のサンプルを大量にもたらすと期待される。HST と HSC のデータを組み合わせることで、幅広い明るさの銀河をカバーすることができ、銀河のクラスタリング強度を精度よく決め

ることが出来る。本講演では、これらの研究手法や現在の研究状況を紹介・報告し、遠方銀河の形成・進化やダークマター質量について議論する。

123526 (2013)

### 重宇 a32 ALTB 宇宙における非一様性の観測的制限

徳竹 真人 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)  
宇宙モデルを考える上では、「宇宙は大域的に一様等方である」とする宇宙原理を仮定し、一様等方な宇宙として Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) モデルを考えるのが一般的であり、実際に FLRW モデルはこれまでに多くの観測事実を説明することに成功している。特に、宇宙マイクロ背景放射の観測によって、宇宙の等方性については高い精度で確かめられている。

しかし、球対称な非一様性の観測的制限については十分に研究されていない。この制限を与えるためには、球対称で非一様な宇宙モデルを仮定し、実際の観測量と宇宙の非一様性との間にどのような関係があるのか知ることが必要となる。

ここでは、宇宙項入りの球対称非一様ダスト宇宙モデルである ALTB モデルを考える。観測量としては距離-赤方偏移関係を与え、その距離-赤方偏移関係を再現するような ALTB の非一様性を表すパラメータ  $k(z), m(z)$  を得る手法を与える。また、それを用いて距離-赤方偏移関係と球対称な非一様性の関係について調べた。

1. Chul-Moon Yoo Prog. Theor. Phys. 124 (2010), 645-665

### 重宇 a33 標準光源の観測に対する局所的な非一様性の影響

岩田 健吾 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M1)  
我々の宇宙は 100Mpc 以上のスケールでは一様等方的であるとされ、Friedmann-Lemaître-Robertson-Walker (FLRW) model によって良く記述できる。しかし、それ以下のスケールでは非一様な構造が存在し、距離と赤方偏移の関係はそのような局所的な非一様性の影響を受ける。局所的な非一様性を観測から直接的に評価することは難しいが、超新星の観測から得られる距離と赤方偏移の関係には非一様性の情報が含まれており、非一様性を考慮した理論と比較することで、その情報を得ることができる。

ここでは、非一様性の影響を考慮に入れるための最も簡単な方法として Dyer-Roeder (DR) 近似を用いた。DR 近似では角直径距離に対する非一様性の影響を表すパラメータとして、赤方偏移  $z$  の関数  $\alpha(z)$  を導入する。小さいスケールでの非一様性が主に銀河などの構造に起因することから、 $\alpha(z)$  は構造形成の歴史を表していると考えられる。宇宙マイクロ背景放射 (CMB) の観測は局所的な非一様性の影響を受けにくいので、その観測から得られる宇宙論パラメータの値を用いて、超新星の観測から得られる角直径距離を再現するように  $\alpha(z)$  を決定した。

特定の条件の下では、構造形成の歴史を表すような  $\alpha(z)$  が得られたので、DR 近似を用いることで超新星の観測データから局所的な非一様性を評価できることが分かった。この結果は CMB の観測と超新星の観測から決定された宇宙論パラメータの値が異なる場合には、そのずれを局所的な非一様性の影響により説明出来るということを示している。

1. C. C. Dyer and R. C. Roeder, ApJ, **180**, L31 (1973)
2. P. Fleury, H. Dupuy and J. Uzan, Phys. Rev. D **87**, no. 12,

### 重宇 a34 FRB を用いた宇宙論モデルの検証手法

廣島 渚 (東京大学宇宙線研究所 M1)

FRB (Fast Radio Burst) は系外に由来するとみられている突発的な電波放出現象である。観測される電波の継続時間がミリ秒オーダーと短く、かつ非常に明るいという特徴を持つ。現在確認されているものは数個と少ないが、今後さらなる観測の報告が期待されている。

プラズマ中での電磁波の伝播速度が周波数の二乗に反比例するという性質を用いると、パルスの多周波観測から dispersion measure (DM) と呼ばれる量が決定できる。DM は視線にそって積分した自由電子柱密度であり、光学観測とは異なった手段で観測者と天体の間にある物質の量を決定する。電波域かつパルスのという FRB の性質は DM を求めるのに適している。

多数の FRB から DM の分布を決定し、宇宙論的なモデルから計算される DM の分布と比較することでモデルの妥当性を検討できる。本講演では McQuinn の論文 [1] のレビューを行い、100 個程度の DM 値から DM の分布を決定すれば、光学的には観測出来ない外縁部についても銀河 halo ガスの広がりが制限できることを示す。また、まだなじみの薄い現象である FRB の概説を行い、将来的に FRB が遠方宇宙の探索に寄与する可能性について議論する。

1. McQuinn, M., 2014, ApJL, 780: L33 (5pp)

### 重宇 b1 Anti-evaporation in massive/bi-gravity

桂川 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

曲がった時空上の場の量子論の研究から、ブラックホールは、ホーキング輻射と呼ばれる熱的な放射を持つことが知られている。このホーキング輻射により、ブラックホールのホライズン半径は通常減少するが、Bousso と Hawking により、Nariai ブラックホールと呼ばれる特殊なブラックホールにおいては、量子補正により半径が増加することが示された。ここで、Nariai ブラックホールとは、de Sitter-Schwarzschild 解において、ブラックホールホライズンとコスモロジカルホライズンの半径が一致する場合の解であり、このブラックホールの半径が増加する現象を Anti-evaporation と呼ぶ。本講演では、まず、Anti-evaporation の概要をレビューし、その後に、massive gravity 理論と bigravity 理論と呼ばれる重力理論における、Anti-evaporation の可能性について発表する。Massive gravity 理論、および bigravity 理論とは、近年提唱された重力理論であり、前者は massive graviton と呼ばれる有質量スピン 2 の場を、後者は重力と massive graviton の相互作用を記述する理論として知られている。

1. R. Bousso and S. Hawking, Phys. Rev. D **57**, 2436 (1998)
2. C. de Rham, G. Gabadadze and A. Tolley, Phys. Rev. Lett. **106**, 231101 (2011)
3. S. Hassan and R. Rosen, JHEP **1202**, 126 (2012)

## 重宇 b2 Bigravity 理論の線形及び非線形解析と宇宙論的応用

青木 勝輝 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)  
本発表では発表者と前田恵一氏との共同研究である Phys. Rev. D 89, 064051 (2014) と、その後の発展について述べる。一般相対論は素粒子論的立場から見た場合、質量ゼロのスピン 2 粒子 (重力子) の理論と言える。しかし重力子が本当に質量を持たないのかは明らかにされておらず、理論と観測の両面から質量の有無を調べなければならない。特にダークマターやダークエネルギーの発見は重力の修正といった新たな物理を示唆している可能性があり、これらと関連して massive な重力理論の関心は高い。我々は Hassan, Rosen により提案された bigravity 理論に注目する [2]。これは massive gravity の拡張の 1 つとして提案されたものであり、ダークエネルギーを導入しなくても、加速膨張解が存在することが知られている。特に我々は加速膨張解がアトラクターとして得られることを示している [1]。

Bigravity 理論は摂動を非線形まで解析すると、Vainstein 機構により一般相対論を回復すると言われている。しかし時間依存する系などにおいて Vainstein 機構が働くかは調べられていない。我々はいくつかの時空において非線形解析を考えた。球対称静的時空においてはある半径の内側で一般相対論を回復する。一方で宇宙膨張の効果を考え、宇宙の地平線スケールが massive graviton の Compton 波長より大きい時代には一般相対論を回復する。

次に線形摂動に基づくことにより bigravity 理論を用いて我々の宇宙のダークマターを説明できることを示す。上記の論文においては宇宙論スケールでのみダークマターを説明できることを示した [1]。これを発展させ、銀河スケールや大規模構造スケールにおいてもダークマターを説明できることを示す。

1. K. Aoki and K. Maeda, Phys. Rev. D **89**, 064051 (2014).
2. S. F. Hassan and R. A. Rosen, J. High Energy Phys. **02** (2012) 126.

## 重宇 b3 Probing EoR information using 21cm bispectrum

島袋 隼士 (名古屋大学 C 研 D2)

インフレーションに始まる宇宙が、現在の彩り豊かな宇宙へと進化してくる過程で、初期天体や銀河からの紫外光によって宇宙に広がっている中性水素が徐々に電離させられていく時期が存在する。この時期のことを宇宙再電離と呼び、現在の宇宙論のトピックの中でもホットな分野の一つとなっている。現在、再電離期中の宇宙まで観測が届いていないが、今後の大型電波望遠鏡の発展により近い将来、観測が可能になるものと考えられている。この宇宙再電離期に存在する中性水素から発せられる 21cm 線を用いて、再電離期を特徴付ける物理的パラメータについて調べる方法についての発表を行う。再電離期の 21cm 線の揺らぎは非ガウス分布になるため、従来用いられる、21cm 線の揺らぎのパワースペクトル以外にも、バイスペクトルを考えることができる。本研究では特に、この 21cm 線バイスペクトルに注目して、その再電離期の物理的パラメータへの依存性や時間発展、パワースペクトルとの比較について現在得られた結果を報告する。

## 重宇 b4 Higgs Inflation による原始宇宙磁場生成

小幡 一平 (京都大学 天体核研究室 M2)

インフレーションを引き起こすスカラー場「インフラトン」の正体は未だに確かめられていない。これまで様々なインフレーションモデルが提案されてきたが、その中でもインフレーションを素粒子の標準模型の枠組みで与える「ヒッグスインフレーション」は非常に魅力的なモデルである。

今回我々は、ヒッグスインフレーションのもとの電弱理論のゲージ場の振る舞いに着目した。本研究では  $SU(2)_L \times U(1)_Y$  ゲージ場のヒッグスインフレーションにおける宇宙論的進化を追った。その結果、インフレーション終了後にゲージ場はヒッグス場との結合を介して共鳴を起こし、振幅が増大することが確かめられた。更に、この過程で生じた磁場は宇宙初期の原始磁場として、現在観測などから指摘されている銀河間磁場の起源になる可能性があることを指摘した。

1. F.L.Bezrukov and M.Shaposhnikov, Phys.Lett.B 659, 703 (2008) [arXiv:0710.3755 [hep-th]]
2. H.Emoto, Y.Hosotani and T.Kubota, Prog. Theor. Phys. 108, 157 (2002) [hep-th/0201141]
3. I.Obata, T.Miura and J.Soda [arXiv:1405.3091 [hep-th]]

## 重宇 b5 宇宙論的位相欠陥による初期磁場生成

堀口 晃一郎 (名古屋大学 C 研 M2)

宇宙は現在までに四つの力の分離などの様々な相転移を経験してきたと考えられている。加えて、大統一理論から初期宇宙には様々なスカラー場が存在していたことが示唆されている。これらのスカラー場の大半は相転移を起こしたと考えられている。相転移を起こしたスカラー場にはその数に応じて対称性を回復する領域が現れる。これが宇宙論的位相欠陥である [1]。スカラー場が一つのときはドメインウォール、二つのときは宇宙ひも、四つ以上のときはテクスチャーという位相欠陥が現れる。

初期磁場は現在銀河間などの大スケールで観測されている種磁場を説明する有力なモデルの一つである。初期磁場生成のモデルの一つとして宇宙初期の光子速度とバリオン速度の間に相対速度を生み出す [2] というモデルがある。テクスチャーはこれを通して初期磁場を生成することができる。本研究ではテクスチャーに対応するスカラー場のモデル、Non-Linear Sigma Model (NLSM) による初期磁場生成を議論する。NLSM に起因する初期磁場のスペクトルを解析的手法とシミュレーションの双方を用いて求めた。本発表ではその結果を紹介する。

1. Alejandro Gangui arXiv:astro-ph/0110285
2. K.Ichiki et al Phys.Rev D85,043009

## 重宇 b6 講演キャンセル

**重宇 b7** Instability of Black Holes immersed in magnetic fields

野田 宗佑 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)

外部磁場中でのブラックホールのスカラー摂動に対する不安定性について議論する。

1957 年の Regge-Wheeler 方程式の発見以来、ブラックホールの摂動に対する安定・不安定性については多くの議論がなされてきたが、今のところブラックホールの周辺環境を考慮した議論はあまりされていない。磁場などの外部変数も含めたブラックホールのスカラー摂動の計算には次の 2 つの意義があると思われる。

1. ジェットなどの高エネルギー現象の発生機構の解明。
  2. ゲージ重力対応の場の理論側で外部変数を扱うこと。
- しかし、外部磁場がある場合には解くべき方程式が変数分離不可能な形となり、動径方向の方程式には落ちない為にこれまでに確立している方法では安定・不安定性の計算を行うことができない。そこで、本発表ではブラックホール摂動の方程式が変数分離不可能な場合の安定・不安定性の計算方法を提案する。

1. R. M. Wald, Phys. Rev. D 10, 1680 (1974).
2. Richard Brito, Vitor Cardoso, Paolo Pani arXiv:1405.2098

**重宇 b8** 講演キャンセル

**重宇 b9** インフレーション中に崩壊を伴う重い場による密度ゆらぎへの影響

佐藤 正憲 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ M2)

本発表では、インフレーション中に崩壊を伴う重い場による密度揺らぎへの影響を考察する。

最も単純なインフレーション理論のモデルは、1 つの軽いスカラー場 (インフラトン) がゆっくりとポテンシャルを転がることによって引き起こされる slow-roll インフレーションモデルである。このようなモデルでは、断熱的でスケール不変な密度揺らぎが予言され、得られるパワースペクトルは宇宙マイクロ波背景放射の観測とよく一致している。

一方、超弦理論や超重力理論などの高エネルギー物理理論は、インフラトンを含む複数のスカラー場の存在を予言している。これらが整合するために、通常他の重い場の効果は無視され、インフラトンとして振舞う一つの軽い場の効果だけが考えられている。しかしながら、重い場の質量がハッブルパラメータと同程度以上のときには、インフラトンと重い場の相互作用を必ずしも無視することができない。その例として、軽い場の軌跡の急激なターンを引き起こすポテンシャル (sudden turning potential) が存在する場合や、重い場の方向への相転移がある場合が考えられ、これらは実際に超弦理論や超重力理論でしばしば起こる。重い場がパワースペクトルに影響を与えることから、初期宇宙の観測を用いて高エネルギー物理の情報 (重い場の質量や崩壊幅など) を引き出すことができる。

本発表では sudden turning potential が存在した場合について考察を行う。先行研究によると、sudden turning potential が存在した場合、重い場の影響によってパワースペクトルは特徴的な振舞いを持つことが明らかになっている。しかしながら、ほぼ全ての先行研究では、重い場

の崩壊の効果が考慮されていない。一般に重い場は寿命が短く崩壊するので、この効果を取り入れて密度揺らぎへの重い場の影響を調べる必要があった。

1. Gao, X., Langlois, D., & Mizuno, S. (2012). Influence of heavy modes on perturbations in multiple field inflation. Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 2012(10), 040.

**重宇 b10** domain wall cosmology

樋口 将文 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) D1)

2 種のスカラー場を用いて任意の scale factor と warp factor を解に持つ 5 次元宇宙模型を構成することができる。この方法は再構築と呼ばれる。この方法を用いて 5 次元時空に 4 次元 domain wall 宇宙が埋め込まれた模型を構成することができる。一般に再構築による domain wall 解には ghost 場が現れるが scale factor と warp factor を適切に選べば ghost 場が現れない模型を作ることができる。

本公演では 4 次元 domain wall 上で一般の FLRW 宇宙が再現されるような模型における 4 次元重力子の局所化可能性について説明する。つづいて scale factor と warp factor を上手く選んで ghost 場が現れない特別な時間発展をする模型を構成し、さらに共形変換を行うことで任意の時間発展を記述する ghost が現れない Brans-Dicke 型の模型を構成できることを示す。

**重宇 c1** Simulating Anisotropic Clustering of LRGs with Subhalos

岡 アキラ (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

銀河クラスタリングに観測されるバリオン音響振動 (BAO; 100[Mpc/h]) は、視線方向とそれに垂直な方向での距離測定が異なる宇宙論パラメータに依存するため、宇宙論の仮定の誤りにより非等方性が生まれる (AP 効果; e.g., [1])。また、分光サーベイにより得られる銀河のパワースペクトルは、銀河自身の持つ特異速度場の影響で非等方性を帯びる (Redshift-Space Distortion(RSD); e.g., [2])。その非等方性の強さは、大スケールでは密度ゆらぎの重力的な成長率と密接に関係しており、BAO の観測を組み合わせることで宇宙論的スケールでの重力理論の検証が可能となる。ただし、銀河サンプルから宇宙論的な情報を得るためには、理論で予言されるダークマター (DM) と観測される銀河の間の関係の理解が不可欠である。

そこで、本研究 [3] では、DM 粒子の N 体シミュレーションから作られたハロー・サブハローカタログをもとに、Sloan Digital Sky Survey II DR7 Luminous Red Galaxy (LRG) の非等方パワースペクトルの多重極成分 (P0,P2,P4) を再現するカタログを得るための条件を調べた。

1. Alcock and Paczynski (1979)
2. Kaiser (1987)
3. Nishimichi and Oka (2013) arXiv:1310.2672

**重宇 c2** Expanding universe with non-linear gravitational waves

池田 大志 (名古屋大学 QG 研 (旧 CG 研) M2)  
 Isaacson の短波長重力波の研究によると、短波長重力波の有効的なエネルギー運動量テンソルはトレースレスになり、その結果短波長重力波のみで満たされた宇宙の膨張則は放射成分で満たされた宇宙と同じになることが示される。しかし、この先行研究では重力波の振幅が小さい等の仮定や短波長重力波の平均化が入っており、これらの計算がどこまで妥当かどうかは再確認が必要である。

そうした中で本発表では、重力波だけで満たされた宇宙 (重力波宇宙) の膨張則について議論する。重力波宇宙の時間発展は数値相対論を用いて、フルな Einstein 方程式を解くことで得る。この膨張則を調べること、Issacson の研究結果を再確認するとともに、Issacson の計算では追うことのできない長波長領域での宇宙の膨張則を明らかにする。

1. R.A.Isaacson, Phys.Rev.166,1263(1968)
2. R.A.Issacson, Phys.Rev.166,1272(1968)

**重宇 c3** DI-SPH を用いた宇宙論的シミュレーション

小野間 章友 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M2)  
 宇宙物理学で用いられる流体力学のシミュレーションの手法としては、メッシュ法の他に、粒子をベースとした Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) という手法がある。これは、ガリレイ変換に対して不変であることや、同じ粒子を扱う N 体の重力計算と相性がいいという利点がある。しかし、体積要素の見積もりとして質量密度を用いているので、接触不連続面での計算がうまくいかないという欠点があった。そこで、Saitoh & Makino (2013) によって、体積要素の見積もりとして質量密度を陽に用いない、Density Independent SPH (DI-SPH) が提案された。そこで、今までの SPH (Standard SPH) と、DI-SPH の計算結果の比較を行った結果を示す。

(ただし、本研究で用いた formulation は、Hopkins(2013) のものである)

さらに、この DI-SPH を用いて、宇宙の再結合時に、バリオンとダークマターの間に数 Mpc 程度の規模で超音速の相対速度があった場合に、バリオンガスを含んだハローの形成がどの程度抑制されるかを示した、Naoz et al.(2012) の論文の再検証を行った結果を示す。

1. Saitoh, T. R. and Makino, J. ApJ, 768, 44-. (2013)
2. Philip F. Hopkins. MNRAS 428, 28402856 (2013)
3. Naoy, S. et al. ApJ, 747, 128 (2012)

**重宇 c4** 重力波データ解析における Short time fourier 変換の可能性

若松 剛司 (新潟大学宇宙物理学研究室 M2)  
 重力波は今まで直接検出されていない。重力波は一般相対性理論によりその存在を予言され、The Hulse-Taylor binary pulsar (PSR B1913+16) の観測により間接的に示されている。

レーザー干渉型重力波観測装置において出力は時間スケールで変化

する。そこで時間周波数解析が要求される。重力波の波形は、主に連星合体 (Compact Binary Coalescence: CBC) と重力崩壊型超新星爆発 (Supernova: SN) で区別される。連星合体の場合は周波数が増大していき、合体後に減衰するような波形である。SN はバースト的な波形である。さらに、出力にはノイズが含まれるので、その影響もある。今回の発表の内容は Short time fourier 変換である。この解析法は現信号に窓をかけ、その窓を移動することによって、周波数の成分の度合いを三次元的に表すことができる。この解析法の特徴を考慮し、様々な波形でテストしてみる。そして、重力波の実際の波形に近いものではどのようになるか考察してみる。

1. 時間-周波数解析 著者 L. コーエン (1998) 発行元朝倉書店

**重宇 c5** 重力凹レンズを起こす球対称モデルにおける光の伝播時間の遅れ

中島 昂己 (弘前大学 浅田研究室 D1)

我々は重力レンズの研究において従来の凸レンズ型重力レンズだけでなく凹レンズ型重力レンズを起こす球対称モデルを考察した。このモデルは時空の歪みが  $\epsilon$  と距離の逆  $n$  べき乗に依存していて、Schwarzschild ブラックホール以外にも Ellis ワームホール等、様々なモデルを再現することが可能である。

我々はこれまでこのモデルにおける重力レンズによる光の曲がり角、像の歪み、マイクロレンズによる像の増光率、光中心について計算し、 $\epsilon$  と  $n$  の依存性を調べ、観測によって  $\epsilon$  の正負と  $n$  の値が判別可能かどうか理論的に予測してきた。

今回我々はこのモデルにおける光の伝播時間の遅れと一定間隔で放射されるパルス波の frequency shift を計算した。天体の重力場によって光の伝播時間が平坦時空を通る場合より遅れることは太陽系の観測で確かめられている。連星パルサーの伴星の重力場によってパルサーからのパルス波の間隔が変化することも確かめられている。

今回の研究で我々は光の伝播時間の遅れが  $n$  の値に依存することを示し、凹レンズ型のモデル ( $\epsilon < 0$ ) では、重力レンズにおける光の曲がり角が負になるのと同様に光の伝播時間の遅れが負になることを示した [1]。さらにパルサータイミング観測において frequency shift が観測可能になるパラメータの範囲を求めた。光の伝播時間の遅れは異なるモデルでも研究されている [2],[3]。

1. K. Nakajima, K. Izumi, and H. Asada, arXiv:1404.2720 [gr-qc]
2. J. P. DeAndrea and K. M. Alexander, arXiv:1402.5630 [gr-qc]
3. K. S. Virbhadra and G. F. R. Ellis, Phys. Rev. D 62, 084003 (2000)

**重宇 c6** Brans-Dicke 理論における重力波の解析

小川 茂樹 (東京理科大学 辻川研究室 M2)

重力波は一般相対性理論から予言される時空の歪みが空間を伝播する現象である。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が、未だ直接的な観測はされていない。しかし、近年、重力波の観測技術は著しく発展し、衛生型レーザー干渉計 DECIGO などの直接観測の計画が進められている。もし重力波を直接観測する事が出来れば、スカラー・テンソル理論などの修正重力理論では重力波の位

相が一般相対論からずれるため、重力理論の検証及びモデルの制限が可能となる。

スカラー・テンソル理論とは重力が Einstein の計量テンソル場だけでなくスカラー場によっても媒介されると考えるものであり、現在の宇宙の加速膨張を説明することが出来ることから活発に研究されている。

今回は代表的なスカラー・テンソル理論の 1 つである Brans-Dicke 理論における重力波に注目し、波形の解析及び Brans-Dicke パラメータにどの程度の制限を与える事が出来るか解析した。

1. Kent Yagi. Int.J.Mod.Phys. D22 (2013) 1341013
2. Michele Maggiore and Alberto Nicolis. Phys.Rev. D62 (2000) 024004

### 重宇 c7 宇宙マイクロ波背景放射のスペクトル歪みと原始重力波

太田 敦久 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ D1) テンソル由来の密度ゆらぎを  $\mu$ -distortion のソースとして考えた場合の寄与を計算した。CMB の  $\mu$  歪みの主な寄与は、密度ゆらぎに蓄えられていた光子が、音響減衰で散逸し、それが Compton 散乱によって熱平衡化されたものだと考えられており、典型的な宇宙論的パラメータのもとで  $\mu \sim 10^{-8}$  の寄与があるということが既に知られている。この文脈では、音響減衰のスケールにおいてテンソルゆらぎは既に減衰してしまっているという事情から、テンソルゆらぎをソースとした  $\mu$ -distortion は注目されなかった。しかし、このことは音響減衰のスケールよりも大きなスケールでテンソルゆらぎがならされているということであり、エネルギー保存則の観点から言えば、これもまた歪みのソースとなりうる。その大小はともあれ、テンソル由来の光子のゆらぎは必ず存在すると考えられるから、テンソル由来の  $\mu$  を知っておくことは重要であると考え、与えられたテンソルスカラー比  $r$  とテンソルスペクトル指数  $n_T$  に対して、生成される  $\mu$ -distortion の値を計算した。その結果、 $r = 0.1$ 、 $n_T = 0$  の場合には  $\mu^T \sim 10^{-13}$  であることがわかり、ブルーなスペクトルに対しては、より寄与が大きい事がわかった。

### 重宇 c8 原始ベクトルモードの性質と CMB からの制限

嵯峨 承平 (名古屋大学 C 研 D1)

宇宙論摂動論を考えた場合、摂動のモードがスカラー、ベクトル、テンソルモードと分解される。完全流体を仮定したアインシュタイン重力のもとで、ベクトルモードは膨張とともに薄まっていく減衰解しか存在せず、標準的な宇宙論を考える場合は無視される。ところが非等方圧を持つ、例えば無質量ニュートリノなどが存在するとベクトルモードに成長解が現れる。一般的にベクトルモードが存在すると、宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) の B-mode 偏光を作ることが知られており B-mode 観測によって原始ベクトルモードを制限することが可能となる。本研究では、このベクトルモードが作る CMB のゆらぎからどのような制限がなされるかを示したためその一連の結果を発表する。

1. S. Saga, M. Shiraishi and K. Ichiki, arXiv:1405.4810
2. BICEP2 Collaboration Collaboration, P. Ade et. al, arXiv:1403.3985

### 重宇 c9 世界の重力波望遠鏡

加藤 準平 (東京工業大学 宗宮研究室 M2)

重力波は一般相対性理論から予言される時空のさざなみであり、大規模な天体現象に伴い、重力場が変動すると放射される。重力波は未発見であるが、この発見により、これまで電磁波などではわからなかった新たな宇宙物理学、天文学が切り拓かれると期待される。

現在、世界で大型の干渉計型望遠鏡が建設中であり、数年内に観測開始を予定している。本発表では世界の重力波望遠鏡の紹介をし、特に日本の KAGRA について説明する。

### 重宇 c10 光学浮上鏡を用いた重力デコヒーレンスの観測実験

牛場 崇文 (東京大学 理学系研究科 物理学専攻 安東研究室 D2)

宇宙物理学において量子論と重力論の統一は非常に重要な未解決問題である。初期宇宙に置いては重力も他の三つの力と同様に量子化されていたと考えられており、量子論と重力論の統一は初期宇宙の減少に対して非常に大きな示唆を与えてくれる可能性を持つ。また、ブラックホールの内部では一般相対性理論が破れており、内部状態の記述に量子重力理論が必要となる可能性が示唆されている。

しかしながら、量子重力理論の検証実験・観測は非常に困難で、あまりなされていないのが現状である。この原因は重力相互作用が他の相互作用に比べて非常に小さいために、観測系の量子状態が重力相互作用以外の相互作用によって崩壊してしまうからである。しかし、近年の技術的な進歩によって、重力相互作用の影響の強い巨視的な系での量子エンタングルメント生成が現実味を帯びてきた。これにより、テーブルトップの実験系で量子重力理論の検証が可能になることが期待されている。

当日のポスターでは重力でコヒーレンスの観測のための先行研究の紹介を交えながら、現在私たちが計画している重力デコヒーレンスの観測のための実験に関して説明する。

1. Roger Penrose: General Relativity and Gravitation Volume 28, Issue 5, pp 581-600 (1996)
2. G. Guccione, et al.: Phys. Rev. Lett. 111, 183001(2013)
3. Rainer Kaltenbaek, et al.: Experimental Astronomy Volume 34, Issue 2, pp 123-164(2012)

### 重宇 c11 RXJ1131-1231 の重力レンズモデル

高橋 誠 (近畿大学 宇宙論研究室 M1)

重力レンズから光の経路の重力ポテンシャルとその重力を作る質量分布を知ることができるが重力レンズを記述する方程式はパラメータが多いため解析的に解くことができない。そこで重力レンズをモデル化してパラメータを数値的に決定しなければならない。

重力レンズでフィットする物理量は、フラックス、像の位置、時間遅延である。そのうち位置がよくフィットする重力レンズモデルでもフラックス比が合わない場合をフラックス比異常と呼ぶ。本研究のターゲット天体は 4 重像クエーサー RXJ1131-1231 である。このクエーサーは像の位置は求められているが輝度分布が未だ不明である。フラックス比異

常の有無を確かめるにはクエーサーのコア部分のフラックスが必要だがコア部分の光とホスト銀河の光が混ざってしまうので分離する必要がある。

今回は HST で観測されているレンズ像とレンズ銀河の光重心から求められた SIE(Singular Isothermal Ellipsoid) に ES(External Shear) を足したレンズ銀河モデルを用いてソースプレーン上の輝度分布を求めた。その結果について報告する。

.....  
**重宇 c12      Stabilization of higher derivative gravity with constraints**

秋田 悠児 (立教大学 M1)

Linear instability in non-degenerate higher derivative theories, which is known as Ostrogradski's instability, can be removed by the addition of constraints. These constraints must reduce the dimension of original phase space. In other words, instabilities are removed only if constraints reduce the dynamical degrees of freedom(d.o.f) from original ones. Also, theories with curvature invariants such as  $R_{\mu\nu}R^{\mu\nu}$ ,  $R_{\mu\nu\rho\sigma}R^{\mu\nu\rho\sigma}$ ,  $C_{\mu\nu\rho\sigma}C^{\mu\nu\rho\sigma}$ , have the Ostrogradski's instability because they contain higher derivatives of the metric with respect to time.

I will start with a review about the stabilization of higher derivative gravity models. I consider the Lagrangian of the form  $\mathcal{L} = \sqrt{-g}(R - 2\Lambda + \alpha R^2 + \beta R_{\mu\nu}R^{\mu\nu})$ . First, I give the second-order action for metric perturbations on a general background. Then, I focus on the Minkowski background, and demonstrate how the instabilities appear in each type of perturbations (i.e. scalar, vector, and tensor modes.) by constructing the Hamiltonian. I show that those instabilities can be removed by imposing constraints on the theory. Finally, I will give some comments on cosmological implications of the constrained theory.

1. T. -j. Chen and E. A. Lim, JCAP **1405**, 010 (2014) [arXiv:1311.3189 [hep-th]].
2. T. -j. Chen, M. Fasiello, E. A. Lim and A. J. Tolley, JCAP **1302**, 042 (2013) [arXiv:1209.0583 [hep-th]].

.....  
**重宇 c13      HSC の観測領域内における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 高橋研究室 M2)

本研究の目的は、HSC-Wide による観測領域内での弱い重力レンズ効果による 2 点相関関数から宇宙論パラメータ  $\Omega_m, \sigma_8$  がどれだけ制限できるかを求める事である。

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、HSC-Wide の観測領域内における弱い重力レンズ効果によるコンバージェンス  $\kappa$  のパワースペクトルの 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。

1. HSC Science White Paper (2012)
2. L.Fu et al.A&A,479,9(2008)
3. The HSC collaboration team. Wide-field imaging with Hyper Suprime-Cam:Cosmology and Galaxy Evolution

.....  
**重宇 c14      6次元位相空間における無衝突ボルツマン方程式による自己重力系の数値シミュレーション**

土屋 将太郎 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

DIRECT INTEGRATION OF THE COLLISIONLESS BOLZMANN EQUATION IN SIX-DIMENSIONAL PHASE SPACE;SELF-GRAVITATING SYSTEM のレビューを行う。6次元位相空間における無衝突ボルツマン方程式を数値的に解くことで自己重力系の数値シミュレーションコードを開発し、重力不安定性、ランダウダンピング、キング球の安定性を含むいくつかのシミュレーションを行い、線形予測理論と比較することでそのコードの精度を確かめた。更に、N体シミュレーションと比較することでN体シミュレーションに対する長所・短所を調べ、宇宙の大規模構造形成の数値シミュレーションにおいてのN体シミュレーションとの妥当性を調べる。

1. K. Yoshikawa, N. Yoshida and M. Umemura ApJ, 762, 116 (2013)

.....  
**重宇 c15      Large tensor mode and sub-Planckian excursion in generalized Galileon**

國光 太郎 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D2)

宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測から初期宇宙におけるゆらぎのテンソル・スカラー比  $r \simeq 0.2$  という結果が報告された [1]。このような大きなテンソル・スカラー比をインフレーションでつくるためには、インフレーション中のスカラー場の場の値の変位がプランクスケールよりも大きい必要がある。この制限は Lyth bound とよばれる [2]。

一方、非正準運動項や高階微分相互作用を許せば、大きなテンソル・スカラー比を実現しながら場の値の変位をプランクスケールよりも小さい値に抑えることは可能である。この発表では Generalized G-inflation の枠組み [3] を用いて、どのような場合に Lyth bound から逃れることができるのか、分類の上、明らかにする。

ただしそのような非自明な運動項や相互作用項を持つ場合、有効ポテンシャルに対する量子補正が低エネルギーで効いてきて、プランクスケールよりもはるかに低いスケールで有効ポテンシャルが大きな変更を受ける可能性もある。実際 Lyth bound が問題とされるのは、プランク

スケールで有効ポテンシャルに対する大きな補正が期待されるからである。そのような補正がどのような場合に抑えられるのかについても議論する。

1. P. A. R. Ade *et al.* [BICEP2 Collaboration], arXiv:1403.3985 [astro-ph.CO]
2. D. H. Lyth, Phys. Rev. Lett. **78**, 1861 (1997) [hep-ph/9606387]
3. T. Kobayashi, M. Yamaguchi and J. Yokoyama, Prog. Theor. Phys. **126**, 511 (2011) [arXiv:1105.5723 [hep-th]]

**重宇 c16 Spacetime approach to force-free magnetospheres**

小笠原 康太 (立教大学 M1)

force-free 電気力学 (Force-Free Electrodynamics, FFE) は、磁気圏の相対論的プラズマを記述し、パルサーやブラックホールを扱う際に重要な役割を担っている。扱う主な式は Maxwell 方程式、及び force-free 条件  $F_{\nu\mu}\nu_{\mu}j^{\nu} = 0$  である。FFE は ADM 形式で扱われることが多いが、今回は wedge 積、外微分を用いて、FFE を記述する。これによって計量に依らず式を記述する事が可能になる。

1. Gralla, Samuel E., and Ted Jacobson. arXiv:1401.6159 (2014)

**重宇 c17 反 de Sitter 時空の不安定性**

古賀 泰敬 (立教大学 M1)

反 de Sitter (AdS) 時空は曲率が負の極大対称な時空であり、宇宙項が負の Einstein 方程式の真空解である。AdS 時空が、同じく極大対称時空である Minkowski 時空と de Sitter 時空 (それぞれ曲率が 0, 正) と大きく異なるのは、空間的な無限遠が時間的な面になっている点である。この性質により、無限遠からのフラックスがないとする境界条件における AdS 時空は漸近的に不安定である。この発表では、漸近的に AdS 時空である時空の不安定性を、球対称、負の宇宙定数のゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式の数値シミュレーションによって調べた、Piotr Bizon と Andrzej Rostworowski の研究 [1] をレビューする。

ここで与える仮定により、ゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式は一次元の波動方程式に帰着する。モデルは、初期値として原点にガウス型波束のスカラー場を置いて時間発展させるものを考え、これをさまざまな振幅でシミュレーションする。このシミュレーションにおいて、原点の曲率は一定の大きさの振動ののちに指数関数的に成長する、この振る舞いは、スカラー場の初期値の振幅を任意に小さくしても保たれ、任意に小さい摂動に対する AdS 時空の不安定性を示唆する。

ゼロ質量スカラー場の Einstein 方程式を、真の AdS 時空をバックグラウンドとした非線形な摂動方程式として解くと、スカラー場の各振動モードのエネルギーがより高振動数のモードへと移行することがわかる。この研究における AdS 時空の不安定性はこの振る舞いによって引き起こされる。

1. P. Bizon and A. Rostworowski, Phys. Rev. Lett. **107**, 031102 (2011)

**重宇 c18 コンパクト天体の存在下におけるカメレオン場の宇宙論的進化**

高橋 一史 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター M2)

修正重力理論の一つに、 $f(R)$  重力理論という枠組みがある。これは一般相対論の Einstein-Hilbert 作用に含まれるリッチスカラー  $R$  を、 $R$  の一般の関数  $f(R)$  に置き換えるというものである。 $f(R)$  重力理論は、共形変換によって Einstein-Hilbert 作用にスカラー場を含んだ理論の形に書き換えることができる [1]。このとき、スカラー場  $\phi$  のポテンシャル  $V(\phi)$  は関数  $f(R)$  から決まる。さらに、 $\phi$  は通常の物質とも相互作用するため、実効的には物質密度  $\rho$  の寄与が加わったポテンシャル  $V_{\text{eff}}(\phi)$  中で運動することになる。物質密度の時間変化に伴って  $V_{\text{eff}}(\phi)$  も変化し、 $\phi$  は基本的にはその極小を追って時間発展する。この新しい系は Einstein フレーム、元の系は Jordan フレームと呼ばれ、数学的には等価である。

Einstein フレームで見ると、このスカラー場  $\phi$  がスローロールすることにより宇宙の加速膨張が説明される。しかし、 $\phi$  と物質とが結合しているため、物質に働く力は逆 2 乗則からずれてしまう (「第 5 の力」)。この問題は、スカラー場にカメレオン機構が働くことにより解決される [2]。カメレオン機構とは、周囲の物質の密度が大きいほど  $\phi$  の実効的な質量が大きくなり、第 5 の力の到達距離が小さくなるため、これまで行われてきた地球スケールでの一般相対論の検証実験には抵触しなくなるというものである。関数  $f(R)$  の形は、カメレオン機構が機能するように選ばれる。

本研究では、結合した Einstein, Klein-Gordon 方程式に対し、天体の外側で宇宙論的な解と問題なく接続するような解を構成した。ここで得られる結果は  $f(R)$  理論だけにとどまらず、一般にカメレオン機構が実現するような、物質場と非最小結合したスカラー・テンソル理論においても成り立つものである。

1. K. Maeda, Phys. Rev. D **39**, 3159 (1988)
2. J. Khoury and A. Weltman, Phys. Rev. D **69**, 044026 (2004)

**重宇 c19 スカラー場ゆらぎが作る初期重力波**

藤田 智弘 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構 D3)

インフレーションを起源とする背景重力波は、その測定を目的とした観測が多数運用中又は計画中であることに加え、今年 4 月に BICEP2 実験が初めての検出を発表したことで非常に注目を集めている。今後、重力波を詳細に観測できる時代がやってくることを鑑みると、理論面でもこれまで以上に精密に重力波を解析することが求められる。

スカラー・ベクトル・テンソルの 3 種類の宇宙論的ゆらぎは、ゆらぎを摂動として扱ったとき、摂動の 1 次ではお互いに独立である。つまり 1 次のオーダーでは重力波は他のゆらぎと無関係に生成し、進化していく。しかし、摂動の 2 次オーダーでは 3 種のゆらぎはお互いにカップルする。具体的には、スカラーゆらぎ・ベクトルゆらぎの寄与は重力波の運動方程式にソースターム、すなわち重力波生成を誘起する項として入ることが知られている。

他の場の効果を見捨てた場合、重力波の大きさ (正確にはパワースペクトル) はインフレーションのエネルギースケールに比例するため、重力波を観測することでインフレーションエネルギースケールが決まると考えられてきた (BICEP2 の報告から約  $10^{16}$  GeV と求まる)。ところが

インフレーション時空によって生成されるのは重力波だけでなく、スカラー・ベクトルゆらぎも作られる。そして、それらが重力波を誘起するという効果が常に存在する。他のゆらぎによる重力波生成が無視できない場合、重力波の大きさとインフレーションとの関係は大きく変更され、 $10^{16}\text{GeV}$  という値は変わりうる。

本発表では、インフレーション中にインフラトン以外のスカラー場のゆらぎによって生成される重力波を見積もり、その影響を議論する。特に、超弦理論や超重力理論から予言されるように、スカラー場の作用が変更を受けた場合、スカラー場が誘起する重力波振幅は非常に大きくなり得る。その場合、観測から何が言えるのかを説明する。

1. M. Biagetti et al., Phys. Rev.D88 103518 (2013) [1305.7241]
2. P. Adshead et al., Phys. Rev.D80 083521 (2009) [0904.4207]

.....

## 重宇 c20 Fisher 行列解析を用いた宇宙論パラメータの制限の推定

平川 拓実 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

宇宙の平坦性問題や地平線問題を解決する方法として、初期宇宙でインフレーションという指数関数的な宇宙の加速膨張が考えられている。これは WMAP や Planck 衛星で観測された宇宙背景放射 (CMB) の異方性についてうまく説明している理論モデルである。しかしながら、その理論モデルは未だに決定しておらず現在も様々なインフレーションモデルが研究されている。インフレーションモデルを決定するためにはインフレーションを引き起こすポテンシャルを決める必要があり、CMB や銀河大規模構造 (LSS) の大規模サーベイ観測はこれに制限を与える。また、これらの観測については Fisher 行列解析を用いて、将来のサーベイ観測によってインフレーションに関わる宇宙論パラメータをどの程度制限することができるか見積もることができ、それによってインフレーションのポテンシャルの形をどの程度制限できるか予想することができる。

Fisher 行列解析を用いると実際に観測実験を行う前に、その観測実験によって得られる宇宙論パラメータの誤差を推定することができる。そのため、将来の観測実験のセットアップを探索することができ、観測を最大限に利用することができる。その上、全く異なり、独立で、無関係な観測での補完性についても同様に探索することができる。このような有用性から Fisher 行列解析は宇宙論パラメータを推定するために幅広く利用されている。今回は Fisher 行列解析の理論と宇宙論への応用についてレビューする。

1. Z.Huang ,L.Velde and F.Vernizzi arXiv:1201.5955v2(2012)
2. L.Velde arXiv:0911.3105v1(2009)
3. K.Yamamoto ApJ 595:577-588(2003)

.....

## 重宇 c21 量子場の真空について-アンルー効果-

清田 哲史 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

ブラックホール時空上の場の量子論は、ホーキング放射と呼ばれる熱的放射の存在を予言する。一般相対性理論の等価原理によると、ブラックホールにおける重力による加速度と、ミンコフスキー時空中の加速度運動を結びつけることができる。アンルー効果とは一様な加速度で運動する観測者が、場が真空状態であったとしても有限温度 (ウンルー温度)

の放射を見ると予言する効果である。本発表ではアンルー効果について説明する。まずミンコフスキー時空において静止している観測者  $a$  と、一様な加速度で運動している観測者  $b$  について考える。観測者  $a$  には実験室系  $(t, x)$ 、また観測者  $b$  には固有座標系  $(\tau, \xi)$  (加速度運動する観測者  $b$  が周りに張る座標系) を用いる。ミンコフスキー計量を固有座標系で表すことで得られる新たな計量をリンドラー計量と呼ぶ。次に、質量 0 のスカラー場を考え、それぞれの座標系において量子化を行うことで、ミンコフスキー時空であらわれる生成消滅演算子と、リンドラー時空の量子場にあらわれる生成消滅演算子がボゴリューボフ変換で結びつくことを見る。それぞれの量子場の真空状態は異なった状態であると示すことができる。そして、一様な加速度で運動する観測者がミンコフスキー時空の真空状態を観測すると、励起された状態として観測することが示される。この励起は加速度を  $\alpha$  として、温度  $T = \alpha/2\pi$  の熱的ボーズ・アインシュタイン分布と同じ励起スペクトルを持つことがわかる。最新の研究として、超高強度レーザーの電磁場を用いることでアンルー効果を検証する試みが議論されている。

.....

## 重宇 c22 修正重力の可否性を問う新たな手法

松原 元気 (立教大学 M1)

概要

1. レビューを發表します。
2. 内容は『修正重力の可否性を問う新たな手法について』です。

修正重力理論によって宇宙の第二次加速膨張、つまりダークエネルギーの問題を解決しようとする際、そのような理論では、例えば太陽系のような小さい領域でおかしな事が起きないか、などを調べる必要もある。たいていの重力理論では gravitational ghost が発生しないようにすることが、修正重力理論が生き残るための最低条件としている。

ghost とは、端的には負の運動エネルギーを持つ場である。このような場合は、エネルギー的安定を求めて無限の負の運動エネルギーを得ようとするため安定しないことから、その修正重力理論が安定な理論でないことの証拠として扱われてきた。

しかし、今回レビューする論文では、ghost が発生しても、物理的に意味を持たない ghost ならば修正重力理論として生き残る可能性はある、と考える。

ghost が物理的に意味を持たないとは、ここでは、ghost の質量が  $M_{\text{cutof } f}$  という質量よりも大きくなることを指す。これはプランク mass ではないが、ある観測スケールから見出される閾値のようなものである。

今回の論文では、簡単のために以下の場合に考察の範囲を限定する。

- 修正重力を与えるラグランジアンは

$$S = \frac{M_{Pl}^2}{2} \int d^4x \sqrt{-g} f(R, G) \tag{1}$$

という形に限定する。ただし、 $f$  は任意関数であり  $R$  は Ricch S-calar、 $G = R^2 - 4R_{\alpha\beta}R^{\alpha\beta} + R_{\alpha\beta\mu\nu}R^{\alpha\beta\mu\nu}$  は Gauss-Bonnet Combination を表す。

- 背景時空となるメトリックは

$$ds^2 = -A(r)dt^2 + \frac{dr^2}{B(r)} + \frac{r^2 dz^2}{1-z^2} + r^2(1-z^2)d\phi^2 \tag{2}$$

$$z = \cos \theta \tag{3}$$

という、一般球対称時空の場合を考える。

これらの限定の下、修正重力を与える  $f(R;G)$  から現れる ghost の質量が  $M_{\text{cutoff}}$  を超えるか否かを考察していく。

1. Rev.D83:104035,2011

### 重宇 c23 3.5 keV X 線輝線が示唆する Mixed Dark Matter モデルにおける Substructure 問題

原田 了 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)  
 $\Lambda$ CDM モデルは銀河団程度以上の大規模構造の観測結果を説明するが、銀河程度以下の小規模構造の観測との間には矛盾が生じている。そのような矛盾として、天の川銀河周辺に存在する矮小銀河の最大回転速度に対する分布が食い違う Substructure 問題や、中心密度が食い違う Too Big To Fail 問題が知られている。

これを Warm Dark Matter (WDM) の自由流減衰により小規模構造を均すことで解決しようとする、Lyman- $\alpha$  の森の観測結果から加わる WDM モデルへの制限と矛盾する。ところが、WDM と CDM を混ぜた Mixed Dark Matter (MDM) モデルなら Lyman- $\alpha$  の森からの制限を緩和し、この矛盾を解消できる可能性がある。また、最近 Andromeda 銀河や Perseus 銀河団などから起源が不明な 3.5 keV の X 線輝線が検出された。これは Dark Matter 粒子の崩壊した信号である可能性がある。我々は、この信号を説明できる素粒子モデルは自然に MDM モデルとなることに注目した。

我々は、この 3.5 keV 輝線を説明できる MDM モデルにおける構造形成について調べた。N 体シミュレーションを実行すると、MDM モデルでの天の川銀河サイズ ( $\sim 10^{12} M_{\odot}$ ) のハロー中のサブハローの数は CDM モデルの場合より  $\sim 30\%$  から  $\sim 50\%$  程度減少した。特に最大回転速度に対する分布を調べると、MDM モデルの方が CDM モデルよりも観測をよく説明し、Substructure 問題の解決に近づくことを発見した。

1. A. Kravtsov *Advances in Astronomy* (2010)
2. A. Schneider, D. Anderhalden, A. V. Macciò & J. Diemand *MNRAS*, 441, L6 (2014)
3. A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy & J. Franse *arXiv:1402.4119* (2014)

### 重宇 c24 FastSound 計画: $H\alpha$ 輝線の同定方法について

岡田 裕行 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D1)

FastSound 計画は、すばる望遠鏡 FMOS を用いた大規模銀河赤方偏移サーベイで、 $1.2 \lesssim z \lesssim 1.5$  における銀河の 3 次元分布を用いて構造形成の成長率を表す  $f(z)\sigma_8(z)$  を測定することで、重力理論に制限を与えることが最終目標である。

FastSound の分光候補天体は CFHTLS による測光カタログの photo-z, color および輝線フラックスの推定値から適切な条件により選択される (Tonegawa *et al.* 2013). FMOS により分光観測された銀河から、自動輝線検出ソフト FIELD (Tonegawa *et al.* 2014) によって  $H\alpha$  輝線

を検出し、約 3,500 天体の赤方偏移などの物理量の推定した。

FIELD による自動検出で得られた銀河カタログのなかでも複数の輝線が検出されている天体については輝線波長比から  $H\alpha$  輝線の確実な同定が可能であり、カタログの信頼度を検証することができる。上記の複数輝線天体の解析により全カタログ中の非  $H\alpha$  輝線の混入率の推定結果を発表する。すなわち  $f(z)\sigma_8(z)$  の測定にも非  $H\alpha$  の混入率と同じだけの系統誤差を生じることになるが、これは FastSound 計画の統計誤差に比べて十分に小さいことが示される。

### 重宇 c25 一般の基準計量の dRGT massive gravity における Stückelberg 解析

吉田 大介 (東京工業大学宇宙物理学理論グループ D1)  
 現在の宇宙の加速膨張を説明する候補として、グラビトンが質量を持っている可能性 (massive gravity) が盛んに研究されている。massive gravity の理論は BD ゴーストと呼ばれる非物理的な自由度が生じてしまい、長年の間問題となってきたが、近年 BD ゴーストの現れないグラビトンの質量ポテンシャルが明らかになった (dRGT 理論)。dRGT 理論は初め、平坦な基準計量が用いられてきたが、Hassan,Rosen はこれを一般の基準計量に拡張し、この理論でも BD ゴーストは現れないことを、ADM-正準解析によって証明した。しかしながら、この証明はとて形式的で、BD ゴーストが消える物理的な背景はあまり明らかとならない。

BD ゴーストが消える物理的なメカニズムは、Stückelberg 解析により明らかになる。この方法では理論の持つ自由度を helicity 分解するのだが、BD ゴーストは helicity-0 モードの高階微分運動方程式が原因で生じていることが知られている。平坦な基準計量の dRGT 理論の場合、helicity-0 モードの作用は Galileon 型と呼ばれる特殊な形となり、運動方程式は 2 階の微分方程式となり、BD ゴーストは現れないことが理解されている。

このような状況の中、私はこの Stückelberg 解析を一般の基準計量の場合に適応した。平坦な場合との大きな違いは、helicity 分解を共変な方法で行わなければならないことである。私は共変な方法で helicity-0、helicity-2 モードの作用を 4 次まで計算した。結果、平坦な基準計量の作用で偏微分を共変微分に置き換えた項だけでなく、基準計量の曲率による補正項が現れることが明らかになった。特に、helicity-0 モードの運動項に曲率の補正項が現れ、helicity-0 モードの正準規格化ができず、基準計量が平坦な場合に行われてきた脱結合極限が取れないという問題が明らかになった。

1. C. de Rham, G. Gabadadze and A. J. Tolley, *Phys. Rev. Lett.* **106**, 231101 (2011)
2. S. F. Hassan, R. A. Rosen and A. Schmidt-May, *JHEP* **1202**, 026 (2012)
3. C. de Rham and S. Renaux-Petel, *JCAP* **1301**, 035 (2013)

### 重宇 c26 連続重力波のデータ解析手法

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

非軸対称に回転する中性子星は、周波数がほぼ一定の重力波を放出すると予想されており、日本の重力波検出器 KAGRA の有望な重力波源の

一つと期待されている。連続重力波の周波数はほぼ一定であるので、出力データ中の連続波信号を雑音の中から抜き取るには、ただ単にフーリエ変換を利用すればよいと思うかもしれない。しかし、事態はそう単純ではなく、地球の運動によるドップラー変調の補正や、感度を稼ぐための1年以上にも及ぶ長時間積分を必要とする。さらに連続波源が連星中に存在する場合には、軌道運動によるドップラー変調も考慮しなければならない。このとき、重力波検出器を用いて全天にわたって電磁波で観測されないダークなパルサーを探索する場合には、計算資源の問題が生じる。本講演ではそのような困難を解決するために考案された連続波のデータ解析手法の紹介を行う。

1. P. Jaranowski, A.Krolak, and B.F.Shutz, Phys. Rev. D 58, 063001 (1998)
2. E. Goetz and K. Riles, Classical and Quantum Gravity 28, 215006 (2011)
3. L. Sammut, C. Messenger, A. Melatos and B. J. Owen arXiv:1311.1379 (2013)

### 重宇 c27 超巨大ブラックホールと恒星質量ブラックホールの比較

本田 扶紀 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙物理学研究室 M1)

超巨大質量ブラックホールや恒星質量ブラックホールなど、様々な質量のブラックホールが存在すると考えられている。この研究の目的は、それらブラックホール天体が示す観測の特徴が、ブラックホールの質量にどのように依存するのかを明らかにすることである。そこで、強度変化とそれに伴うスペクトル変化に着目し、それらの関係を相互相関関数を用いて定量的に評価する。現在、相互相関関数のプログラムと shot-noise などのシミュレーションのデータを作成し、プログラムとその結果を検証している。しかし、実際に観測されるデータは非周期的で離散的であるので、離散相関関 (Discrete Correlation Function, Edelson & Krolik 1988) を用いて、解析を行う。今後は、ISS 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 や NASA の X 線天文衛星 RXTE で観測された非周期的で離散的な実際のデータを使い、質量依存性を明らかにしていく。

1. S.Shapro & S.Teukolsky 『Black holes, White Dwarfs, and Neutron Stars』, A Wiley-Interscience Pub.(1983) Shakura & Sunyaev
2. H.Negoro 『Hard X-ray Time Lags in Accreting Black-Hole Systems』
3. 福江純 『輝くブラックホール降着円盤』 プレアデス出版

### 重宇 c28 FastSound 計画：サーベイの進展状況

舎川 元成 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 D1)

FastSound 計画は、すばる望遠鏡の近赤外分光装置 FMOS を用いた宇宙論を目的とした大規模銀河サーベイである。本サーベイは地球上の合計約 30 平方度の領域で、赤方偏移  $z=1.2-1.5$  の約 5,000 の星形成銀河を分光観測し、 $H\alpha$  輝線により赤方偏移を測定することで、銀河の三次元地図を作成する。この銀河三次元分布から赤方偏移空間歪み (RSD)

効果を検出し、大規模構造の形成のスピード  $f\sigma_8$  を測定することで、加速膨張の起源の可能性である修正重力理論を観測的に検証することが最大の科学目標である。

本講演では、FastSound 計画の進展状況を報告する。本計画では、CFHTLS Wide の可視 5 バンドを用いた photometric redshift および  $H\alpha$  flux 推定を基にした分光ターゲット選択を行い、35 夜の観測を行った。観測は 2014 年 7 月をもって完了し、FIBRE-pac(Iwamuro et al. 2012), FIELD(Tonegawa et al., 2014) によるデータ処理を行った結果、 $S/N > 4.5$  の輝線天体を約 4,000、 $S/N > 3.0$  の輝線天体を約 6,000 得ることができた。起こりうる系統誤差の可能性を検討し、現在最終的な  $f\sigma_8$  測定結果に向けて精密な統計解析を行っている。本講演では、最終的に得られた輝線銀河カタログの詳細と、可能であればパワースペクトルや二点相関関数についての preliminary な解析結果などを報告する予定である。

### 重宇 c29 Langevin description of gauged scalar fields in a thermal bath

宮本 裕平 (東京大学大学院理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター D3)

We study the dynamics of the oscillating gauged scalar field in a thermal bath. A Langevin type equation of motion of the scalar field, which contains both dissipation and fluctuation terms, is derived by using the real-time finite temperature effective action approach. The existence of the quantum fluctuation-dissipation relation between the non-local dissipation term and the Gaussian stochastic noise terms is verified. We find the noise variables are anti-correlated at equal-time. The dissipation rate for the each mode is also studied.

1. Y. Miyamoto, H. Motohashi, T. Suyama and J. Yokoyama, Phys. Rev. D 89, 085037 (2014)

### 重宇 c30 ブラックホールからのエネルギー抽出について

中川 智希 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

非常に明るい活動的銀河中心核には大質量ブラックホールが存在すると考えられている。その活動性のエネルギー源の一つの可能性としてブラックホールの回転エネルギーを電磁的に抽出するという考えが提出されて久しい。Brandford と Znajek (1977) は特殊な状況でブラックホールの地平面に向かい側のエネルギーが流れる、つまり、ブラックホールから外向きにエネルギーが流れるモデルを示した。現在ではその過程を調べるために、そのブラックホール磁気圏を相対論的MHD数値計算コードを用いて調べられている。相対論的な重力のもとでの電磁気学の基本方程式とプラズマの運動を数値的に取り扱うことが可能になった現在でも不明な点が多い。Brandford-Znajek過程はブラックホールの磁気圏がプラズマで満たされ、電磁場が優勢である場合、ポインティングフラックスが生成される過程である。さらにパルサー (回転する中性子星) と似たふるまいの数学的モデルとして議論されるが、ブラックホールの地平面と星の表面との境界で物理的条件が異なる。そのため、Brandford-Znajek (あるいはそれを発展的に論じたMacdonald & Thorne (1982)) の状況設定を疑問視する考えがある。(例えば、Punsly & C

oroniti (1990))。これらの点を明らかにすることが数値計算の物理的状況設定(境界条件)においても重要となる。本研究発表ポスターでは軸対象で定常的な過程で起こると仮定する。一般相対論で記述される曲がった空間での電磁気学をまとめたうえで、Brandford-Znajekのモデルとその不都合な点を紹介する。さらにその問題点を克服するために現在進行中の我々の研究の目標とその手法を述べる。これらの理論的解析はBrandford-Znajek過程がいかなる状況で働くのかの考察として役立てたい。

重宇 c31 位相欠陥を源とする重力源

小川 達也 (大阪市立大学大学院 宇宙物理・重力研究室 M2)

我々の宇宙には基本的な相互作用が4つあることが知られている。その4つとは、「強い相互作用」「弱い相互作用」「電磁相互作用」「重力相互作用」である。現在の素粒子標準模型では、これらの相互作用の内、弱い相互作用と電磁相互作用はSU(2) × U(1)の対称性を持つゲージ理論であるワインバーグ・サラム理論によって統一されており、強い相互作用はSU(3)対称性を持つゲージ理論である量子色力学によって記述される。残る重力相互作用を記述するためには、量子論的に重力を取り扱う理論、すなわち量子重力理論が必要となるがこれは未完成の理論である。重力相互作用を除く、3つの相互作用を、より高い対称性を持つゲージ理論により統一しようとする試みは盛んにおこなわれている。この理論が大統一理論(GUT)である。初期宇宙のような非常に高温な状態では、大統一理論で考えられているような相互作用の統一が起こり、真空は高い対称性を持っていたと考えられる。この高い対称性を持つ真空は、宇宙が進化し、温度が下がるにつれて、ある種の相転移を起こし、より低い対称性を持つ真空に変化したと考えられる。この、真空の相転移が起きる際に、位相欠陥と呼ばれるソリトンがヒッグス機構に伴い生成される。位相欠陥は未だに観測されていないが、特徴を持った重力場のソースとなることが知られている。この重力場によって起こされる重力レンズの効果は理論的に予言することが出来、観測結果がこの予言と一致するならば、位相欠陥が存在する、と言うことが出来る。例えば、宇宙ひもについて考えたとき、我々が頭に思い浮かべる「ひも」の形以外にも、ひも内部に構造を持った様々な宇宙ひもを考えることが出来る。この宇宙ひもにより生成される重力場は、通常の形状の宇宙ひもにより生成される重力場とは異なる。このようにして考えた、修士論文の研究である「位相欠陥を源とする重力場」について、経過報告を行う。

1. Cosmic Strings and Other Topological Defects

重宇 c32 一般相対論的な三体問題に対する三角解の線形安定性

山田 慧生 (弘前大学 浅田研究室 D3)

我々は、一般相対論的な任意質量の三体問題に対する三角解の線形安定性を議論する。

現在、日本のKAGRAをはじめとして世界中で次世代の地上重力波検出計画が盛んである。これらの重力波検出器では、重力波の波形を予測していなければ実際の検出が困難であり、そのため、重力波の源となる天体ダイナミクスの理解は必要不可欠である。実際、有望な重力波源である連星ブラックホール等の軌道運動や合体によって放出される重力波の理論予測が活発に行われている。

他方で、一般相対論的な三体系ダイナミクスの理解の重要性が増している。最近、重力波源となり得る一般相対論的な三体系が発見され、また、連星の外側に第三体が存在する場合、それによる三体相互作用が連星のダイナミクスや重力波放出に強く影響することが指摘されている(Ransom *et al.* 2014; Wen 2003; Seto 2013)。

本研究では、Newton 重力におけるLagrangeの正三角解に対応する、一般相対論的な任意質量の三体問題に対する三角解(Yamada & Asada 2012)の線形安定性を調べた。Lagrangeの正三角解が線形安定であるための条件は天体の質量比に対するそれとして与えられる。今回、三体のうち一つを質量ゼロのテスト粒子とする制限三体問題における先行研究(Douskos & Perdios 2002)と比較し、一般相対論的な三体相互作用がこの条件に如何に影響するかを議論する。

1. S. M. Ransom *et al.*, Nature **505**, 520 (2014); L. Wen, ApJ **598**, 419 (2003); N. Seto, PRL **111**, 061106 (2013).
2. K. Yamada & H. Asada, PRD **86**, 124029 (2012).
3. C. N. Douskos & E. A. Perdios, Celest. Mech. Dyn. Astron. **82**, 317 (2002).

重宇 c33 ダークマターハローの速度分散の非等方性に関する考察

浅羽 信介 (名古屋大学 C研 D1)

超新星の観測より現在の宇宙は加速膨張していることがわかっている。この加速膨張を説明する理論としてダークエネルギーモデルと修正重力理論がある。両者の理論では、物質の密度揺らぎや速度の発展が違うことが知られている。よって、観測から銀河の空間分布の情報を得ることで両者の理論を区別することができる。特に、分光観測から得られる赤方偏移空間の銀河分布が銀河の固有速度によって歪む効果(赤方偏移変形)の情報が修正重力理論の制限において有用であることが知られている[1]。その一方で、銀河の固有速度を直接観測することで密度揺らぎの線形成長率のスケール依存性を測定することができるようになってきた[2]。線形成長率がスケールによって変化することは修正重力理論の一つの特徴であり、固有速度の直接観測は修正重力理論の制限において重要である。しかし、固有速度の測定において非線形効果の理解は完全ではなく、大きな不定性となっている。宇宙論的N体シミュレーションから銀河の固有速度の方向の並び方と大規模構造には相関があることが確かめられており[3]、これは固有速度の非線形性の理解の手助けになると考えられる。今回は、ダークマターハローの速度分散の非等方性に着目する。ダークマターハローの速度分散も修正重力理論の影響を受けるため、修正重力理論の制限に使える。また、速度分散の非等方性と大規模構造の相関を調べることで銀河の固有速度の非線形効果を理解することができ、更なる重力のテストをすることができる可能性がある。

1. S. Asaba, C. Hikage, K. Koyama, et al. 2013, jcap, 8, 29
2. A. Johnson, C. Blake, J. Koda, et al. 2014, arXiv:1404.3799
3. J. E. Forero-Romero, S. Contreras, & N. Padilla, 2014, arXiv:1406.0508

# 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 9:57 - 10:00, 14:45 - 15:45(招待講演:大平 豊 氏), 16:00 - 16:15 7月30日 17:15 - 18:15(招待講演:吉田 滋 氏)
招待講師	大平 豊 氏 (青山学院大学)「宇宙線の起源と加速と伝搬」 吉田 滋 氏 (千葉大学)「高エネルギーニュートリノ天文学の幕開け」
座長	土屋優悟 (京大 M2)、高橋光成 (東大 M2)、佐々木健斗 (東大 M2)、猪目祐介 (甲南大 M2)
概要	<p>地球に降り注ぐ宇宙線は、遠い宇宙のかなたの様々な情報を我々にもたらしてくれます。その起源としては超新星残骸 (SNR) や活動銀河核 (AGN) などが候補に挙げられていますが、非常に高エネルギーの粒子を実現する物理過程については、未だ明確な解が得られていません。また、ガンマ線バースト (GRB) のようにその正体が謎に包まれたままの現象も存在しています。さらに、宇宙線の研究は、それが伝播してきた空間の様子やダークマターの正体となる新たな素粒子の探索においても重要な役割を果たします。</p> <p>「宇宙素粒子」とはニュートリノやガンマ線、ダークマター候補の粒子など、あらゆる観測粒子を扱う意味から名づけられています。理論面からはこれらの謎に関して日に日に新たなモデルが提唱されており、非常に活発な状況にあります。</p> <p>一方実験的には、近年高エネルギー宇宙線やガンマ線、ニュートリノ、そして未知のダークマター粒子を狙ったプロジェクトが次々と始動、または数年以内の観測開始を予定しており、これから大きく謎の解明が進むと期待されています。過去も将来も宇宙を見る基盤となるであろう宇宙素粒子について、観測・理論の分け隔てなく活発な議論や交流が交わされることを期待しています。</p> <p>たくさんの方々の参加をお待ちしております。</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>

大平 豊 氏 (青山学院大学)

7月29日 14:45 - 15:45 B(大コンベンションホール)

## 「宇宙線の起源と加速と伝搬」

宇宙線が発見されて100年が経つが未だその起源と加速機構、銀河内の伝搬については未解明である。本講演ではまず、宇宙線の加速・起源・伝搬についての標準シナリオを紹介する。その後、その標準シナリオと最近の観測との矛盾や最新の理論的研究について紹介する。地球で観測される宇宙線のエネルギースペクトルはベキ型であるが、 $10^{15.5}$  eV と  $10^{18.5}$  eV と  $10^{20}$  eV 付近に折れ曲がりのような構造がある。 $10^{15.5}$  eV 以下のエネルギーの宇宙線は銀河宇宙線と呼ばれ、銀河系内の超新星残骸が起源と考えられている。 $10^{18.5}$  eV 以上の宇宙線は、銀河系外に起源を持つと考えられている。あいだの  $10^{15.5}$  eV から  $10^{18.5}$  eV の宇宙線は、系内か系外の議論が盛んに行われている。またどのエネルギーで宇宙線の起源が系内と系外に切り替わるかもよくわかっていない。最近では、観測された宇宙線陽電子のスペクトルがこれまでの標準シナリオで説明できず、ダークマターによって説明しようという試みも盛んに行われている。これらの内容についても紹介したい。

吉田 滋 氏 (千葉大学)

7月30日 17:15 - 18:15 B(大コンベンションホール)

## 「高エネルギーニュートリノ天文学の幕開け」

電荷を持たず弱相互作用にのみ感応する素粒子ニュートリノは宇宙論的な距離を粒子・輻射場との相互作用をせずに伝搬します。このためニュートリノは高エネルギー宇宙線が支配する超高エネルギー帯の宇宙のダイナミクスを解き明かす強力なスモーキングガンとして期待されてきました。天体起源の高エネルギーニュートリノ検出をめざし、現在までに多くの実験が行われてきたなかで、南極点で完全観測を2011年5月より開始した国際共同実験 IceCube は、日本グループの主導で大気ニュートリノから予想されるエネルギーを大きく越える PeV エネルギーの事象を2例検出することに成功しました。バックグラウンドから期待される事象数に対して  $2.8\sigma$  のエクセスに相当し、カミオカンデによる超新星ニュートリノ以来、太陽ニュートリノを除けば、最初の宇宙ニュートリノ事象である。エネルギー閾値を下げた追加解析では、 $4.1\sigma$  のエクセスを確認し、宇宙ニュートリノの存在は確実なものとなりました。実験の概観、データ解析手法について詳細に報告し、現時点の観測結果がもたらす高エネルギー宇宙線起源に関する知見について議論します。これからのニュートリノ天文学の行く末についても私見を披露します。

1. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.111.021103>
2. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevD.88.112008>

## 宇宙 a1 Fermi Bubble の放射スペクトルの空間変化

佐々木 健斗 (東京大学宇宙線研究所 M2)  
Fermi-LAT 衛星による高エネルギーの  $\gamma$  線領域 ( $\geq 1\text{GeV}$ ) での観測データを分析した結果、我々の天の川銀河の中心において、銀河面から南北約  $50^\circ$  (10kpc) に渡って広がる巨大な双極構造が存在することが明らかになった [1]。"Fermi Bubble" (以下 FB) と呼ばれるこの巨大構造は、WMAP・Planck 衛星によるマイクロ波領域での観測や、ROSAT 衛星による X 線観測で確認されていた銀河中心での巨大構造との相関があり、天の川銀河中心での高エネルギー現象の存在を示唆していると考えられている。FB の  $\gamma$  線放射を説明する機構としては、加速された陽子が生成する  $\pi^0$  の崩壊時に  $\gamma$  線を放つ"ハドロンモデル"や、加速された電子が周囲の光子を逆コンプトン散乱によって叩き上げて  $\gamma$  線を放つ"レプトンモデル"などが提唱されている。また FB の特徴としては、境界での急激な明るさの変化に加えて、 $E^{-2}$  のように銀河面からの  $\gamma$  線に比べて hard なスペクトルを持つことと、全体的に一律な表面輝度であることが指摘されていた [1]。

しかし、詳細な分析の結果、特に FB の南側の領域において、低緯度側に比べて高緯度側で低エネルギーの放射が減少するという特徴があることが Yang らによって指摘された [2]。Yang らは GALPROP を用いて様々な銀河のパラメータの下で解析を行い、この特徴が有意なものであることを明らかにした。さらに、ハドロンレプトンモデルの両方について、陽子や電子がどのようなエネルギー分布を持てばこの特徴を説明できるかを示した。

本講演では、まずこの Yang らの論文 [2] のレビューを行い、その上で彼らが示した荷電粒子のエネルギー分布を再現するような粒子加速モデルについて議論を行うことを目指す。

1. Su et al. ApJ,724,1044(2010)
2. Yang, Aharonian, Crocker arXiv:1402.0403(2014)

## 宇宙 b1 次世代ガンマ線観測計画 CTA の大口径望遠鏡に搭載するカメラの設計

掃部 寛隆 (甲南大学 M1)  
活動銀河中心核や超新星残骸をはじめ、宇宙における高エネルギー現象はガンマ線の放射を伴う。このガンマ線を高精度で測定することは、宇宙の高エネルギー現象の解明だけでなく、ガンマ線が伝搬する宇宙空間の測定につながる。

宇宙から飛来するガンマ線は地球大気と相互作用を起し空気シャワーを生成する。空気シャワー中の荷電粒子はチェレンコフ光と呼ばれる紫外線を前方に放射する。このチェレンコフ光を集光しガンマ線を観測する装置が大気チェレンコフ望遠鏡である。

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画は大、中、小口径 3 種類の大気チェレンコフ望遠鏡を南北両半球に合計約 100 台設置し、ガンマ線の高精度観測を行う国際共同実験である。

この計画で合計 8 台建設する大口径望遠鏡は直径 23m のパラボラ鏡を搭載し、観測可能なガンマ線のエネルギーを 20GeV まで下げることを目指している。このエネルギー領域はこれまで人工衛星でしか測定できなかったが、これを地上に展開した望遠鏡アレイで観測することにより、巨大な検出面積を実現する。

この大口径望遠鏡の焦点面に搭載するカメラにはガンマ線を低エネルギーまで観測するために高い性能が要求される。そのため検出器

は浜松ホトニクスと共同で開発した 40mm 口径光電子増倍管 (PMT) R11920-100 を採用している。この PMT はチェレンコフ光に対して高感度になるように設計され、紫外線に対する量子効率が 40 % をこえている。この PMT を 1855 本並べて全体で 2.3m 口径の焦点面検出器にしている。ピクセルサイズは 0.1 度で、全体で 4.5 度の視野になる。

各 PMT からの信号は後段の高速回路により処理される。信号処理の時間分解能は 3ns である。空間的かつ時間的に固まった信号が検出されると、その情報が周辺の望遠鏡に送られる。同時に複数の望遠鏡で信号が検出されたとき、ガンマ線が検出されたと判断しデータを収集する。このとき信号は 1GHz の高速サンプリングでデジタル変換される。

本講演では CTA 大口径望遠鏡カメラ設計について報告する。

1. 「Design concepts for the Cherenkov telescope array CTA: an advanced facility for ground-based high-energy gamma-ray astronomy」Experimental Astronomy, 32 "193-316" 2011
2. 今野裕介著、修士論文「次世代ガンマ線天文台 CTA のためのアナログメモリ DRS4 を用いた高速波形サンプリング回路の改良」 2012年
3. 「ASTROPARTICIE PHYSICS」"43, March 2013"

## 宇宙 c1 チベット実験での knee 領域鉄スペクトル測定のためのデータ収集システム

山内 紘一 (横浜国立大学大学院 工学府 M2)  
我々はチベット高原の羊八井 (標高 4300m、606g/cm<sup>2</sup>) でエネルギー  $10^{15}\text{eV}$  付近 (knee 領域) の宇宙線化学組成の研究を行っている。knee 領域の組成は未だ解明されていない宇宙線原子核の加速機構や起源を強く反映しており、詳細な観測によりこれらの解明が期待されている。超高エネルギー宇宙測定のため、チベットに設置した空気シャワー観測装置と空気シャワー中心の粒子密度分布を測定するコア検出器を連動し一次宇宙線のエネルギーと核種選別を行っている。これまでの研究で、宇宙線の全粒子スペクトルと陽子成分、ヘリウム成分のスペクトルが測定された。これら測定は、knee 領域における宇宙線の主な成分が重い核子であることを示している。

現在、宇宙線を構成する核子の中で最も重い鉄成分のスペクトルを測定するため、新しい空気シャワーコア検出器 YAC (Yangbajing Air-shower Core detector) の準備を進めている。空気シャワー中心部は一次粒子によって粒子数密度分布に特徴を持つため、YAC により中心部の粒子数密度と広がりを測定することで鉄成分の選別が可能となる。さらに Air-shower Array と連動し一次粒子のエネルギーを測定することで、鉄成分のスペクトルを明らかにする。

YAC 1 台は、50cm×40cm プラスチックシンチレーター、シンチレーター上部に厚さ 3.5cm の鉛板、PMT 2 つ (高ゲイン、低ゲイン) で構成されている。これを 3.75m 間隔で 400 台 (計 0.2m<sup>2</sup>) を用いることで鉄成分の選別を行う。1 台の YAC で測定するシャワー粒子数は 1 粒子から  $10^6$  粒子であり、読み出し回路にも広い測定レンジが必要である。このため 1fc から 20000fc まで測定可能な電荷時間変換 ASIC (WDAMP) をこれまでに開発した。YAC データ収集システムは WDAMP からの時間パルスを、FPGA を使った TDC でデジタル化し VME バスにより取得する予定である。本発表では、YAC のデータ収集システムの開発状況について報告する。

## 宇素 c2 IceCube に用いる PMT の"Double pulse" に対する応答検証

上山 俊佑 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1)

現在行われているアイスキューブ実験は、南極点直下の氷中 1500m から 2500m の深さに 5160 個の光検出器を埋め込んで宇宙から飛来する高エネルギーニュートリノを観測する、日本・アメリカ・ドイツ等 8 ヶ国からなる国際共同プロジェクトです。この実験で、世界初となる 1PeV 以上の高エネルギー宇宙ニュートリノを観測しました。さらに、このアイスキューブ実験の 100 倍の面積を持つ拡張実験「ARA」の建設を予定しており、超新星爆発やガンマ線バースト等の天体現象の解明や長年の謎である超高エネルギー宇宙線の起源に迫ります。

このような非常に高いエネルギー領域を考える際に重要となるイベントとして、2つの事象がほぼ同時 ( $< 150ns$ ) に検出器に到達する 'Coincidence' や 'Double bangs' 等があげられます。'Double bangs' は、1PeV 以上のエネルギーを持つ  $\nu_\tau$  に見られる現象で、氷中で cc 反応をした直後に、 $\tau$  粒子が崩壊することで検出器内で 2 度光ります。

今回私は、この 2つの現象を想定して、IceCube で用いている光電子増倍管 (PMT) に連続的な光を 2 発入れたときのレスポンスに関する研究をしました。具体的には、バルサーと LED を光らせ、それらをディレイニウムモジュールを使い、0~124ns まで間隔を変えていき、1~2ns ごとにフォトエレクトロン数を計算し、1 発目と 2 発目の光の間隔とフォトエレクトロン数の関係について調べました。また、2つの光量を大きくしていくと、ある点を境にして PMT にサチュレーションが起きるので、そのサチュレーションカーブを描くと共に、シミュレーションと値を比較し、サチュレーションカーブのアルゴリズムについて考察しました。

1. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment
2. IC22 UHE Tau Neutrino Search IceCubeWiki
3. Diffuse neutrino fluxes and GZK neutrinos with IceCube

## 宇素 c3 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA の大口径望遠鏡開発における較正用パルサー開発

猪目 祐介 (甲南大学 M2)

高エネルギー宇宙物理学の更なる発展を目指して、現在 Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画が国際共同実験として行われている。この計画には世界約 30 カ国、1200 人以上が参加しており、3 種類の大きさのチェレンコフ望遠鏡を複数設置して高エネルギーガンマ線源を観測する計画である。

日本グループは中でも大口径望遠鏡 (LST) の開発に関わっており、焦点面光検出器の開発を行っている。この焦点面光検出器には LST1 台につき 1855 本の光電子増倍管 (PMT) が検出素子として搭載される予定であり PMT を要求される増幅率に揃えて動作させる必要があるため、全ての PMT に対して性能評価を行い、較正を行う必要がある。大気チェレンコフ光は約 1 ns の超短光であるため、PMT の性能評価にはこれ以上の超短光が必要になる。しかしこのような超短光を出力可能な装置は大変高価であるため、我々は安価で高速な電子部品を用いて、チェレンコフ望遠鏡の性能評価に特化したピコ秒の超短光を出力可能な高速パルサーを開発した。本講演では上記の高速パルサーの開発について報告する。

1. Wilfield Uhring, Chantal-Virginie Zintta & Jeremy Bartringer, A low cost high repetition rate picosecond laser diode pulse generator., SPIE 2004.
2. B.S.Acharya et al. Astropaticle Physics 43(2011).

# 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28日 16:30 - 18:45, 20:15 - 21:15 7月29日 9:00 - 10:00 (招待講演: 河合 誠之 氏), 10:15 - 11:15 7月30日 9:00 - 11:15, 13:30 - 14:30 (招待講演: 永井 洋 氏), 14:15 - 15:45
招待講師	河合 誠之 氏 (東京工業大学)「ガンマ線バーストの観測について」 永井 洋 氏 (国立天文台)「活動銀河核ジェットの電波観測レビュー」
座長	堀貴郁 (京大 M2)、川口恭平 (京大 D1)、藤林翔 (京大 D1)、中田めぐみ (日大 M2)、 山田美幸 (お茶大 M2)、矢田部彰宏 (早稲田大 M2)、中原聡美 (鹿児島大 M2)
概要	<p>ガンマ線バーストなどの高エネルギー天体现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。</p> <p>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。</p> <p>注) 超新星爆発や中性子星はコンパクトオブジェクト分科会で扱いますが、激変星 (新星や矮新星など) や白色矮星は太陽・恒星分科会で扱います。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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现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。</p>

河合 誠之 氏 (東京工業大学)

7月29日 9:00 - 10:00 B(大コンベンションホール)

## 「ガンマ線バーストの観測について」

ガンマ線バーストについて基本的な観測事実、標準的な描像、そして、現在の観測的課題を紹介する。「長い」ガンマ線バーストは大質量星の終焉の中心核崩壊によって発生する相対論的ジェットから放射されると考えられており、極めて強い $\gamma$ 線の爆発的な放射に引き続き、数時間、場合によっては数週間以上かけて減光する残光をしばしば伴う。このジェット生成と $\gamma$ 線放射の過程はまだ解明されていない。明るい残光は、高赤方偏移宇宙を探る光源として有用である。一方、「短い」ガンマ線バーストに対しては、中性子星連星の合体によって発生するという説が有力視されている。間もなく次世代重力波望遠鏡が稼働し始める。この説が実証されるのか非常に興味深い。重力波直接検出とその対応天体の同定は今後10年間の天体物理学における最も重要な研究課題である。

永井 洋 氏 (国立天文台)

7月30日 13:30 - 14:30 B(大コンベンションホール)

## 「活動銀河核ジェットの電波観測レビュー」

宇宙ジェットは多くのコンパクトオブジェクトに共通する現象で、宇宙で最も活動的な現象の一つだ。ホスト天体の質量によって規模の差はあるものの、その観測的特徴には多くの共通点が見られることから、コンパクトオブジェクト分野の研究者の知力を結集することで、各々の研究の進展が期待される分野である。

本講演では、自身の専門分野である活動銀河核 (AGN) ジェットの電波観測を中心にレビューをする。AGN ジェットの発生メカニズムは高エネルギー天体物理学の最重要課題の一つであり、銀河とブラックホールの共進化、AGN フードバック、銀河団ガス加熱などの様々な研究とも密接にリンクする。電波観測はジェット自身のモロフォロジー、固有運動、電波スペクトル、偏波、周辺の低温 (分子) ガスの物理状態などの情報を提供することができ、特に干渉計観測による高分解能電波イメージを提供できる点に特色がある。

(i) ジェットの駆動メカニズム、(ii) 高エネルギー放射、(iii) 様々な AGN 種族におけるジェット性質の違い、といったテーマを中心に、電波観測の最新研究成果と未解決問題を紹介する。また、いよいよ本格稼働を始めるアルマ望遠鏡によって進展が期待されるテーマについても紹介する。

## コン a1 明るいショックブレイクアウトが見られた IIb 型超新星 SN 2013df の測光分光観測

川端 美穂 (広島大学 高エネルギー宇宙可視赤外線天文学研究室 M1)

重力崩壊型超新星とは、初期質量が 8~10 倍以上の恒星の進化最終段階において引き起こされる宇宙最大規模の爆発現象である。その中で、IIb 型超新星は、その初期スペクトル中に、水素とヘリウムの吸収線が見られる、外層剥ぎ取り型の超新星である。外層構造は親星の質量や進化段階に関する情報を含んでいると考えられているが、過去画像から直接的に親星が同定された例は 3 例しかないこと、多様性に富んでいることから、親星の正体に関して不明瞭な点も多い。

SN 2013df は近傍銀河 NGC4414 で 2013 年 6 月 7.8 日に 14.4 等で発見され、10.8 日には IIb 型超新星と同定された (CBET 3557)。6 月 11 日より広島大学 1.5m かなた望遠鏡及び大阪教育大学 51cm 反射望遠鏡で測光分光観測を開始し、初期にはショックブレイクアウトの減光フェーズを捉えることができた。可視光でショックブレイクアウトの減光フェーズを捉えた例は極めて稀である。また、ハッブル宇宙望遠鏡の過去画像から、親星が同定されており ( $M_{\odot} = -6.89 \pm 0.10$  等; Van Dyk et al. 2013)、ショックブレイクアウトの光度は親星半径に強く依存するというモデル (Rabinak&Waxman 2011) と比較することが可能となった。その結果、このモデルだけでは光度曲線を再現することは難しいことが判った。

また、時間が経つにつれて外層が希薄となり、コアを直接見ることができるよう、後期観測では親星についての情報が得ることが可能となる。極大から約 180 日後にすばる望遠鏡によって得られたスペクトルでは、酸素輝線が弱く、カルシウム輝線が強いという特徴を示した。これは爆発した星が低質量星であったことを示唆しており、低質量星から水素外層を剥ぎ取るためには、連星系による相互作用が必要であると考えられる。本講演では、初期観測及び後期観測から、SN 2013df の親星の形態について議論する。

## コン a2 超新星爆発からの赤外線放射

長尾 崇史 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超新星爆発がどのようにして起るかについて、その物理機構には未だ不明な点が多い。例えば、超新星爆発を起こす星が、爆発直前にどのような進化を経て爆発するのかということは未だ良くわかっていない。この事を知る上で、超新星爆発を起こした星の星周物質を理解することは大切である。星周物質は超新星爆発を起こす前の親星の質量放出の情報を持っているからである。さらに、宇宙線やダストの起源やその周辺へのフィードバックを明らかにする上でも重要である。

本発表では Tanaka et al. 2012 の紹介を行う。この論文では、超新星爆発における赤外線放射機構を詳細に考え、観測と比較することで、これまでほとんど調べられていなかった超新星爆発の中期段階の観測から超新星に関する情報を引き出した。具体的には、星間物質、星周物質、衝撃波、新しく作られたダストからの赤外線放射の機構のモデルを仮定し、観測結果との比較を行った。その結果、赤外線で見える超新星 1978K の放射がシリケートダストで説明でき、また質量放出率に制限を得た。さらに次世代の赤外望遠鏡 (JWST, SPICA など) を使えばさらにどのような事が分かるようになるのかを議論する。

また、発表者の今後の展望について述べる。Tanaka et al. 2012 で用いたモデルでは、輻射輸送の取り扱い、星周物質の初期構造などの単純化を行っている。これらは、超新星爆発からの赤外線放射に大きく影響

を与え、星周物質の性質の見積りに影響してくると思われる。我々はこれらの効果を新たに組み込むことを考えている。また、これまでは星周物質のダストの研究は赤外域での理論・観測研究に限られてきたが、星周物質の構造やダストの組成により可視域にも大事な情報が含まれると考えられる。さらに偏光により新たな情報が得られると考えられる。今後は、多波長・多モード観測を念頭に置いた輻射輸送モデルを構築し、観測との包括的な比較から星周物質の性質を解明することを目標にしたい。

1. Tanaka, M., et al. 2012, ApJ, 749, 173
2. Dwek, E. 1983, ApJ, 274, 175

## コン a3 極超新星爆発と非球対称性

松尾 直人 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

超新星爆発は重い星の最後の姿であり、星の進化過程や爆発時の高熱によって合成された重元素を宇宙空間に放出し宇宙を化学進化させる。このように超新星爆発は元素の起源を理解する上で重要な役割を担う。しかし長年研究されているが、その爆発機構は分かっていない。

本発表は Maeda et al. 2002, 2003 のレビューである。近年の精密な数値計算により球対称な爆発モデルでは爆発を再現できない事が分かってきている。また超新星の観測からも爆発が非球対称であることが示唆されている。今回紹介する論文では親星が比較的重く、爆発のエネルギーが大きい超新星爆発 (極超新星爆発) について、双極的な爆発モデルと球対称な爆発モデルでの計算結果を、観測データを用いて比較した。具体的には、計算で得られた元素の存在比と宇宙初期に形成された金属欠乏星の表面元素の存在比との比較を行った。また計算で得られたスペクトルと実際の極超新星で観測されたスペクトルとの比較を行った。以上により双極モデルであれば観測を再現できる事が分かった。また本発表では最近の進展についても述べる。

上記の論文では非球対称性を、計算が簡単な双極型にすることで実現させた。しかし比較的軽い星での超新星爆発や、重い星でも爆発エネルギーが小さい超新星爆発が双極的になるかは自明ではない。また、実際には磁場や対流、自転などの要素が絡み合い、より複雑な形状を持つ爆発を生じる可能性が指摘されている。そこで私は将来、提案されている爆発機構をより詳細に反映した初期条件や、親星の質量や進化過程の違いを反映するような計算を行い、その結果と観測との比較を行おうと思っている。この比較から超新星爆発で合成される元素の量や物質の混合の様子などを調べ、爆発の理論に制限をつけたいと思っている。

本発表では論文のレビューと、私がこれから行おうと思っている研究の内容について述べる。

1. Maeda, K. and Nomoto, K. 2003, ApJ, 598, 1163
2. Maeda, K., Nakamura, T., Nomoto, K., Mazzali, P. A., Patat, F. and Hachisu, I. 2002, ApJ, 565, 931

## コン a4 大質量連星系における超新星爆発とその伴星への影響

平井 遼介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 D1)

重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) は、 $M_{\odot}$  以上の質量を持つような大質量星がその進化の最後に起こす現象ということは広く知られている。一

方、そのような大質量星の大半(約 69%)が、2 つ以上の星が互いの重心周りを公転する「連星系」という系を組んでいることが観測事実として知られてきた。以上より、CCSN の大半が連星系内で起きているということが予想される。実際にここ数年の観測技術の発達により連星系内で CCSN が起きているような候補天体がいくつも見つかってきており、特に昨年見つかった iPTF 13bvn という Ib 型超新星に関しては親星が連星であることが裏付けられ、約 3 年後には残骸の中で伴星の存在が直接確認されると予測されている。このようなことから、連星系の進化が超新星爆発に与える影響が注目を浴びてきている。連星系内での CCSN が注目されてきているもう一つの理由として、コンパクト連星の存在がある。コンパクト連星とは、中性子星 (NS) やブラックホール (BH) などの高密度な星同士の連星系であるが、近年、日本の KAGRA などに代表される重力波検出器の筆頭観測ターゲットとしてコンパクト連星の合体が挙げられており、コンパクト連星がどのように形成されるかを探ることが急務となっている。コンパクト連星を形成するためには、大質量星同士の連星系内で両方の星が CCSN を起こし、NS を残すという過程を経る必要がある。その第一歩として、連星系内で一度目の SN が起きた場合にどのような系が残されるかについて数値シミュレーションを用いた研究を行った。今回はその結果及びパラメータ依存性について議論する。

### コン a5 超大質量星の重力崩壊に伴う爆発現象

松本 達矢 (京都大学 天体核研究室 M2)  
宇宙初期 ( $z \sim 7$ ) に存在する質量  $10^9 M_{\odot}$  の超巨大ブラックホール (BH) の起源として、近年、超大質量星の重力崩壊シナリオが有力視されている。ほとんどの銀河の中心には質量  $10^{6-9} M_{\odot}$  の超巨大ブラックホール (SMBH) が存在する。これらは、銀河形成期に恒星の重力崩壊でできた恒星質量 BH が、ガス降着で質量を獲得し進化したと考えられている。しかし、近年、 $z \sim 7$  の初期宇宙にも  $10^9 M_{\odot}$  の SMBH が発見された。初期宇宙の SMBH の形成は、恒星質量 BH のガス降着では質量獲得には時間が足りないため、他のシナリオを考えなければならない。

最近、 $10^5 M_{\odot}$  の質量をもつ超大質量星 (SMS) の重力崩壊によってできた大質量 BH がガス降着で成長するというシナリオが有力視されている。SMS の形成・進化の研究によって、SMS は存在可能であるが [1]、このシナリオは観測的に検証されなければならない。SMS は  $z \geq 7$  の遠方に存在するため観測には大光度で輝いている必要がある。このような観測に適した現象として、SMS の重力崩壊に伴う爆発現象が考えられる。特に、重力崩壊で中心に BH と降着円盤が形成されると、それを中心エンジンとして相対論的ジェットが形成される可能性がある [2]。本講演では SMS の重力崩壊によってジェットを伴う爆発現象を考え、その観測可能性と特徴を調べる研究の経過を発表する。

1. Hosokawa, T., et al. ApJ, 778: 178 (2013)
2. Bromberg, O., et al. ApJ, 740: 100 (2011)

### コン a6 超新星ニュートリノの観測予測と衝撃波復活時間の評価

谷貝 麻純 (東京理科大学 鈴木研究室 M2)  
質量が  $8 M_{\odot}$  より重い星はその一生の最期に重力崩壊型超新星爆発を起こすことが知られている。しかし、詳細な物理を考慮した数値計算により、観測に合うような爆発は再現できていない。爆発はコア内部で生じ

た衝撃波が星の外層に向かって伝播し、星を吹き飛ばすことで引き起こされる。しかし、原子核の光分解や電子捕獲により生じたニュートリノがエネルギーを持ち出してしまうため、衝撃波の勢いは一度弱まってしまふと考えられている。弱まってしまった衝撃波を復活させる要因としていくつかの効果が考えられており、それぞれ衝撃波が復活するまでのタイムスケールに違いがみられると思われる。そこで私の研究では、様々な親星が爆発した時のニュートリノのイベント数の観測予測をし、そのデータから衝撃波の復活タイムスケールを評価できるか統計的な議論を行った。その際、親星モデルは Ken'ichiro Nakazato et al. 2013 ApJS 205 2 のものを用い、超新星爆発は銀河中心で起こったと仮定した。検出器はスーパーカミオカンデを想定した。

1. Ken'ichiro Nakazato et al. 2013 ApJS 205 2

### コン a7 超新星背景ニュートリノと宇宙の化学進化

持田 恵里 (東京理科大学鈴木研究室 M1)  
初期質量が  $8 M_{\odot}$  以上の大質量星は恒星の進化の最後に重力崩壊型の超新星爆発を引き起こす。これにより超新星ニュートリノが放出され、超新星爆発が近傍の銀河で起こった場合、ニュートリノ検出器によって観測され得る。一方、宇宙が誕生してから現在までの間、近傍銀河以外でも超新星爆発は起こっており、それらの超新星爆発によって放出された超新星ニュートリノは背景放射として現在の宇宙を満たしていると考えられている。これを超新星背景ニュートリノと言い、ニュートリノ検出器ではバックグラウンドとして検出される。超新星背景ニュートリノは様々な親星を起源とする超新星ニュートリノの重ね合わせであるため、本研究では親星モデルの多様性も考慮し、Super-Kamiokande での超新星背景ニュートリノの検出数を計算した。重力崩壊する星の数は宇宙全体で生まれる星の質量に依存する。そして、重力崩壊した星が超新星爆発をするかブラックホールになるかは星の含む金属の量によって決まり、宇宙全体の金属の量は宇宙の進化に伴って増加する。そのため、採用する宇宙の星形成史や化学進化のモデルの違いによる影響についても調べた。また、超新星爆発のメカニズムにおいても未だ解明されていないため、コア内部で衝撃波が復活するタイミング (shock revival time) の不定性についても調べた。その結果、現在観測可能な 18 ~ 26 MeV のエネルギーレンジでは、採用する星形成史のモデルによる違いや shock revival time の不定性が大きく影響し、それよりも低いエネルギーレンジでは採用する星形成史のモデルによる違いが大きく影響することがわかった。こうした低いエネルギーのニュートリノは、一般に、検出器にガドリニウムを入れることで観測可能になると考えられている。

1. K.Nakazato Phys. Rev. D88 083012 (2013)
2. K.Nakazato et al. Astrophys.J. 205,2 (2013)

### コン a8 大質量中性子星からの neutrino-driven wind における重元素合成過程

藤林 翔 (京都大学 天体核研究室 D1)  
我々や、我々の身の周りの物質を形作る数多くの元素は今までの宇宙の歴史の中で作られてきた。太陽系の元素組成の多くを占める水素やヘリウムはビッグバン元素合成によって、炭素・酸素などの比較的軽いもの

から鉄までの元素は星の中の核融合反応によって、そして金・銀・鉛などの鉄より重い元素は、一部を除いて超新星や中性子星連星の合体などの爆発的な天体現象によって作られたと考えられている。しかし、数々の元素合成計算を用いた研究の結果は太陽系の重元素組成を完全に再現するには至っておらず、これらの重元素を生み出した天体について追求することが現在重要な課題となっている。

近年発展した数値相対論による大質量星の崩壊の数値シミュレーションによると、大質量星の崩壊時、その中心には太陽質量の3倍に達する質量の大きな中性子星が一時形成される可能性があることが示唆されている。

本研究では、そのような大質量中性子星における重元素合成の可能性を調べた。質量放出機構として neutrino-driven wind を考え、構成した流体の解での温度・密度の時間発展の上で元素合成計算を行い、パラメータによる依存性を調べた。

本講演では、neutrino-driven wind での元素合成について簡単に説明した後に、 $\nu p$ -process による重元素合成に焦点をあてて研究内容を紹介する予定である。特に、通常の超新星における  $\nu p$ -process では達成が難しい大きな質量数の元素が、大質量中性子星の wind において生成される可能性があることを説明する。

1. Y.-Z. Qian and S. E. Woosley ApJ 471 331 (1996)
2. K. Otsuki, H. Tagoshi, T. Kajino, and S. Wanajo ApJ 533 424 (2000)
3. J. Pruet, S. E. Woosley, R. Buras, H.-T. Janka and R. D. Hoffman ApJ 623 325 (2005)

## コン a9 collapsar モデルにおける磁気粘性アウトフローと $r$ -process

福田 遼平 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M2)  
 $r$ -process とは中性子捕獲過程の一つで、中性子捕獲のタイムスケールがベータ崩壊のそれより短い、つまり速い (rapid) 合成過程である。B2FH 論文で  $r$ -process が提唱されてから半世紀以上がたったが、 $r$ -process サイトは未解明である。長年、超新星爆発がそのサイトと信じられてきたが、近年の研究により、 $r$ -process に適さない環境になることがわかり、サイトとして疑問視されるようになった。現在有力視されているのは中性子星の合体であり、その極端な中性子過剰性によって重い  $r$ -process 元素の太陽系組成比を再現している (e.g. Korobkin et al. 2012)。ところが Argast et al. (2004) で示されているように、中性子星合体では低金属量星での  $r$ -process 元素の存在を説明できないという問題があり、銀河の化学進化の面から考えると超新星は必要ということになる。

この矛盾の解決策は、多様な超新星爆発メカニズムでの  $r$ -process の実現可能性を探究することである。たとえば Winteler et al. (2012) では磁気駆動型爆発における bipolar なジェットによって中性子過剰物質をくみ出し、太陽系組成の再現に成功している。そして今回  $r$ -process サイトとして提案する爆発メカニズムは collapsar とよばれるものである。collapsar は Woosley (1993) によって GRB の中心エンジンとして提唱された爆発モデルで、高速回転する星の重力崩壊によって降着円盤を形成しジェットを放出するというのがそのシナリオである。Ono et al. (2012) ではジェットでの  $r$ -process がシミュレーションされているが、本研究では降着円盤からの粘性アウトフローに着目する。降着円盤内は電子捕獲が一方向的に進み、中性子過剰な環境を生み出すことができる。25 太陽質量の星の重力崩壊からアウトフロー放出までを 2 次元流

体計算で追い、collapsar 降着円盤での  $r$ -process の可能性を議論する。

1. Argast, D., Samland, M., Thielemann, F.-K., & Qian, Y.-Z. 2004, A&A, 416, 997
2. MacFadyen, A. I., & Woosley, S. E. 1999, ApJ, 524, 262

## コン a10 ガンマ線望遠鏡による gamma-ray burst の観測と現状

深見 哲志 (東京大学宇宙線研究所 M1)

ガンマ線観測によるデータをもとに提案された、Gamma-ray burst (GRB) の起源や発生の仕組みについての議論の現状をレビューする。GRB とは、既知の天文現象のうち最も明るい現象であり、数十ミリ秒から数十秒の短時間に大量のガンマ線が放出される現象のことである。ガンマ線を放出した後に、非常に広い範囲の波長にわたって残光が観測されるのが特徴である。GRB は天の川銀河の外にある遠方の天体から放出されたという事はほぼ確定しているが、GRB の起源となる現象については、その莫大なエネルギーから超新星爆発や、中性子星またはブラックホールなどのコンパクト天体同士の衝突などが有力視されているものの、依然として断定されていない。

近年主流となっている GRB のモデルは、最初のジェットがそのままガンマ線のバーストとなり、その後周囲の物質と衝突したジェットの作る衝撃波により加速された荷電粒子が、シンクロトロン放射によってエネルギーの低い残光を放出する、というものである。しかし、今年1月に発表されたガンマ線望遠鏡 Fermi-LAT による観測結果により、未だかつてない高エネルギーでかつ長時間持続する GRB を発する GRB 天体 130427A の発見が報告され、上記の理論ではこの GRB をうまく説明できないことが判明した。

この講演では現在の GRB に関する議論をまとめ、考察する。また、現在開発中の大気チェレンコフ望遠鏡である CTA (Cherenkov Telescope Array) では、従来のガンマ線観測を牽引している人工衛星に比べ有効面積が1万倍以上大きく、10 GeV 以上の高エネルギーガンマ線に対する感度において非常に優れているため、CTA の開発によって GRB に関する種々のパラメータが制限される今後の展望についても言及する。

1. A. Pe'er et al., MNRAS, 420, 469 (2012)
2. M. Ackermann et al. Science 343, 42 (2014)
3. B. Zhang and P. Meszaros, Int. J. Mod. Phys. A 19, 2385 (2004)

## コン a11 重力波源としての短時間ガンマ線バーストの発生率

鳥屋 あすか (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)

ガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts: GRBs) とは、大質量星の崩壊や、中性子星連星の衝突・合体により、短時間に  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象である。その中でも2秒以内でエネルギーの放出を終える Short Gamma-Ray Bursts (SGRBs) は中性子星連星が衝突したときに発生すると考えられており、重力波発生源の有力な候補天体である。重力波とは、光速で伝播する時空のゆがみである。まだ、重力波の観測は実現していないが、2018年頃からの重力波観測装置の稼働に向けて KAGRA、A-LIGO、A-VIRGO などの建設が進んでいる。

本研究では重力波の本格的な観測に先がけて、重力波発生源としての SGRB の発生率について発表する。Tsutsui et al. (2013) により、SGRB のガンマ線スペクトルと光度の間に  $E_{peak}$ -光度関係が成立することが分かっている。これを利用し、コンプトン衛星の BATSE 検出器で観測された SGRB の赤方偏移 (距離) と光度を推定した。ここで得られた赤方偏移分布から SGRB の発生率を求めたところ、近傍における SGRB の発生率は  $6.3 \times 10^{-10}$  events Mpc $^{-3}$ yr $^{-1}$  と予想した。さらに、ジェット幾何学補正を行った場合、重力波観測施設がターゲットとしている 300 Mpc 以内においては少なくとも年間  $\sim 3.8$  イベント以上の重力波が検出されると予想している (Yonetoku et al. 2014)。もし、中性子星とブラックホールの合体によるものならば観測範囲は大きくなり、年間  $\sim 146$  イベント程度と考えられる。現在、フェルミ衛星の観測 GBM 検出器のデータに対しても同様の解析を進めており、先の結果と合わせてより精度の高い推定を行う予定である。

1. R. Tsutsui et al., MNRAS, 431, 1398 (2013)
2. D. Yonetoku et al., ApJ, accepted (2014)

## コン a12 バイナリーブラックホールによる重力レンズ撮像

伊地知 翔真 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河の中心部には、太陽質量の数十万～数百億倍もの超大質量のブラックホールが存在する。その形成過程は詳しくは分かっておらず、様々な形成モデルが提唱されている。有力なモデルに、ブラックホールの合体モデルがある。それは、銀河同士が衝突した際にブラックホール同士の連星系「バイナリーブラックホール」が作られ、周囲のガスによる粘性や重力波の放出によって角運動量を失い、最終的に衝突してひとつの大きなブラックホールが作られるというモデルである。一方、近年の観測技術の向上によって、近い将来には直接ブラックホール近傍の撮像も期待されているため、ブラックホールの撮像シミュレーションは急務の課題となっている。そこで本研究では、もしバイナリーブラックホールが存在し、実際に撮像されたらどのような性質が得られるのかを数値シミュレーションを行い検証した。

具体的には、一般相対論による測地線方程式をもとにシュバルツシルトブラックホール近傍の光子の軌道を調べ、降着円盤画像のシミュレーションを行った [1][2]。先行研究ではバイナリーブラックホールも降着円盤を持つことが分かっている [3] ので、お互いの重力レンズ効果により像を歪め合うはずである。数値シミュレーションによって検証した結果、重力レンズによる歪みに加えて、像の位置変化や最大 10 倍もの光度変化も生じることが分かった。これは先行研究で予言されていない増光であり、ブラックホールが重力レンズによってもう片方のブラックホール降着円盤の光度を見かけ上大きくしていると思われる。今後はスペクトルでの変化も調べていきたい。

1. J. -P. Luminet, A&A. 75 228 (1979)
2. J. Fukue & T. Yokoyama, PASJ. 40 15 (1988)
3. K. Hayasaki, S. Mineshige & H. Sudou, PASJ. 59 427 (2007)

## コン a13 「すざく」を用いたソフト状態とハード状態における LMXB の統一的な研究

小野 光 (東京大学牧島中澤研究室 M2)

LMXB (Low Mass X-ray Binary) は、弱磁場 ( $\leq 10^8$  G) 中性子星と低質量星 ( $\leq 1 M_{\odot}$ ) の近接連星系で、スペクトルは、光度が高い時は  $\sim 15$  keV 以下が卓越するソフト状態、光度が低い時は  $\sim 100$  keV が卓越するハード状態となる。Transient である Aql X-1 の「すざく」データから、ハード状態のスペクトルもソフト状態のものと同じく、円盤からの多温度黒体放射と、中性子星表面からのコンプトン化された黒体放射との和で再現でき、主に後者に対するコンプトン化が強い点だけが、ソフト状態と比べて時に異なることがわかった [1]。このことから、ソフト状態とハード状態を通して、LMXB のスペクトルを統一的に記述できる可能性が浮上した。この撮像の一般性を確かめるために、Aql X-1 ( $\sim 10^{36}$  erg/s) に比べて光度の高い ( $\sim 10^{37}$  erg/s)、GS 1826-238、4U 1608-52 を解析したところ、同じ撮像で説明され、パラメータの値がやや異なることがわかった。

ソフト/ハード状態の大きな違いは黒体放射のコンプトン化の強さであり、それは  $y$  パラメータだけでは表現しきれない。そこで我々は独立な新しいパラメータとして、電子温度  $T_e$  と黒体温度  $T_{bb}$  の比、 $Q \equiv T_e/T_{bb}$  を導入し [2]、 $Q-y$  面上でコンプトン過程を表すことを試みた。Aql X-1 を含め、我々が解析した結果を用いると、 $(Q, y)$  平面上で、ソフト状態は  $Q \leq 10$ 、ハード状態は  $10 \leq Q \leq 10^3$  に分布し、ほぼ連続的に 1 つの 1 次元曲線を描いた。

このように、LMXB のスペクトル状態の違いは、コンプトン過程の連続的な変化で説明されることがわかった。また、複数の異なる天体が 1 つのモデルで説明され、 $Q-y$  プロット上で 1 つの曲線を共有していることから、すべての LMXB を統一的に記述する手がかりを得ることができた。

1. S. Sakurai Astr.Soc. Japan 66, No1 (2014)
2. Makishima et al. Suzaku-MAXI (2014)

## コン a14 「すざく」による大質量星と中性子星との連星系 4U 1700-37 の解析

室田 優紀 (東京大学牧島中澤研究室 M1)

中性子星と恒星との連星系は、恒星の質量によって大きく特徴が異なる。大質量星 ( $> 10 M_{\odot}$ ) と連星をなす中性子星の多くは強い磁場 ( $\sim 10^{12}$  G) を持ち、磁極に絞られて物質が降着するため、自転に伴い X 線帯域でパルスが観測される。また、大質量星からの星風が降着物質の起源であることから、短時間での激しい変動を示すものが多い。今回は中性子星近傍での降着物質の分布を調べるため、X 線スペクトルの時間変動を用いて 4U 1700-37 を解析した。

4U 1700-37 は、長年の探査にも関わらず未だにパルス周期が検出されておらず、はっきりとした磁場強度も報告されていないものの、主星である超大質量星 HD 153919 からの星風捕獲によって X 線で明るく光っている。さらにスペクトルは非常に硬く、べき関数型の連続成分と強い鉄輝線、吸収で理解され、強度が激しくランダムに時間変動するという典型的な中性子星連星系の性質を持つ [2]。

4U 1700-37 の連続スペクトル、鉄輝線、および吸収を調べるには、広帯域を観測できエネルギー分解能が良い「すざく」衛星が適している。「すざく」はこの天体を 2006 年 9 月に観測した。積分時間は 107 ks で、

1 ~ 150 keV での平均フラックスが  $9.0 \times 10^{-9} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  と極めて高く、統計の良いデータが得られた。また 2 桁にもわたる強度の変動が観測された。

観測時間を細かく区切って解析した結果、吸収は 2.7 ~ 7.3  $\times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ 、鉄輝線の等価幅 (EW) は 55 ~ 110 eV の範囲で変動し、さらに吸収に対する EW の変化はほぼ独立であるという結果を得た。中性子星近傍のガスが等方的に分布する場合には、EW は吸収に比例するはずであり、これは中性子星近傍のガスが非一様に分布していることを示唆している [1]。

1. Inoue, H. 1985, Space Sci. Rev., **40**, 317
2. Reynolds, A. P., Owens, A., Kaper, L., Parmar, A. N., & Segreto, A. 1999, A&A, **349**, 873

## コン a15 全天 X 線監視装置 MAXI による Cygnus X-1 のハード状態、ソフト状態のパワースペクトル解析

杉本 樹梨 (立教大学 D1)

ブラックホール連星 Cygnus X-1 は、ミリ秒から 10 年まで様々なタイムスケールでの激しい変動をする天体として知られている。本研究では、ハード状態、ソフト状態での変動性をパワースペクトル (PSD) を用いて調査した。Cygnus X-1 の長期間の PSD に関しては *RXTE/ASM* の 1.3–12.2 keV のデータを用いた先行研究 (Reig et al. 2002) があり、エネルギーが低いほど全体的にパワーが大きいという結果が報告されている。MAXI 観測以前はハード状態が長く続いており、ソフト状態における長期間の PSD 解析は MAXI により初めて可能となる。

解析には全天 X 線監視装置 MAXI の 2009 年 8 月 15 日から 2013 年 6 月 12 日までの観測データを用いた。エネルギー帯は、MAXI/GSC の 2–4 keV、4–10 keV、10–20 keV を使用した。まずハード状態とソフト状態 (各 4 期間) に分けるため、全観測期間の光度曲線から硬度比を計算した。観測開始 (55058 MJD) からハード状態が約 10 ヶ月続いた後状態遷移し、約 10 ヶ月ソフト状態が継続した。その後は各状態を約 1~3 ヶ月で繰り返し、56107 MJD 以降はソフト状態が継続している。各状態の PSD を作成した後、各状態の期間の平均強度の二乗で割って「規格化した PSD (NPSD)」を求め、エネルギー帯ごとに比較を行った。その結果、ソフト状態、ハード状態において、変動のエネルギー依存性に明らかな違いが見られた。さらに、各状態でスペクトル解析を行った結果、ソフト状態においては、降着円盤からの熱的放射によるソフト成分よりも、コンプトン放射によるハード成分の方が変動が大きいということがわかった。

1. Reig P. et al., A&A, 383, 202 (2002)
2. Yamada S. et al., PASJ, 65, 80 (2013)
3. Churazov E. et al., MNRAS, 321, 759 (2001)

## コン a16 降着駆動型 X 線パルサーの連続 X 線放射機構の新モデル

近藤 恵介 (宇宙科学研究所 D1)

降着駆動型の X 線連星パルサーは、強磁場中性子星と通常の恒星からなる近接連星系で、周期的に強度変動する X 線が中性子星 (パルサー)

から放射される天体である。この系では、恒星からのガスが中性子星の磁極に向かって流れ込んでおり、定衝撃波面以降に形成される柱状の高温プラズマ (降着柱) から X 線が放射されている。一般に中性子星の磁軸と回転軸は一致しておらず、観測者からは回転に合わせて降着柱が見え隠れするので、X 線は中性子星の自転周期に合わせて規則的に変化する X 線パルスとして観測される。パルサーからの X 線は降着柱からの放射が支配的であり、そのスペクトルは、ベキ関数に指数関数的なカットオフを掛けた連続成分モデル (ECUT model) で表現できることがわかっている (N. E. White, et al., 1983, ApJ., 270, 711)。しかし、ECUT model は、観測結果と良く合うというだけの理由で使われ続けてきた経験的なモデルで、物理的な根拠は無い。それに代わるモデルとして、正負の二種類のベキ関数を用いたモデル (NPEX model) が存在するが、これも、負のベキを持つ成分の説明は経験的なものにとどまっている (K. Makishima, et al., 1999, ApJ., 525, 978)。

本研究では、X 線連星パルサーの降着柱からの連続 X 線成分を、多温度黒体放射モデルを応用した新モデルで説明することを試みた。そこでまず初めに、代表的な降着型 X 線連星パルサー Hercules X-1 の、「すざく」衛星による観測データを解析した。その結果、我々の新モデルでデータをよく再現できることが判った。講演では、今回の解析結果について報告し、新モデル構築の今後の展望について議論する。

1. N. E. White, et al., 1983, Astrophys. J., 270, 711-734
2. K. Makishima, et al., 1999, Astrophys. J., 525, 978-994

## コン a17 マグネターのバースト現象とレーザー実験 に実現する強い電磁場の非一様性に関する基礎的研究

矢田部 彰宏 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M2)

マグネターは中性子星の中でも特に強い磁場を持つ天体である。マグネターは大規模なバースト現象を起こすことが観測されているが、バーストの理論的な解明はされていない。バーストを解明するためには、バーストのもとになるエネルギーを発生させる過程と発生したエネルギーを放射に変換する過程の両方を解明しなければならない。本研究では、後者の変換過程を扱い、変換過程の先行研究の一つに [1] がある。これは、マグネター周辺の強い磁場中を進行する電磁波が、量子電気力学的な過程により、衝撃波を生じることで、火の玉が発生し、そこからの放射がバースト現象として観測されるというモデルである。この先行研究では、電磁場の非一様性を無視しているが、衝撃波に対して電磁場の非一様性を無視することはできない。そのため変換過程を議論するためには、電磁場の非一様性を扱わなければならない。そもそも、電磁場の非一様性の研究自体があまり行われていない。そのため、本発表では電磁場の非一様性を扱う。電磁場の非一様性に関わる系は、マグネターのバーストにおける変換過程の他にも、高強度レーザーでの実験がある。本研究では高強度レーザーによってできた電磁波の外場中を光が進行したときに、どのような進行をするかを議論する。具体的には、強い電磁場の有効作用を求めた先行研究 [2] と強い磁場中を光が進行した場合の有効作用の補正を求めた先行研究 [3] に基づいて、高強度レーザーによる強い電磁波の外場中を光が進行する系の有効作用を求め、その光に対する屈折率を求める。これにより、将来のレーザー実験の実験結果を予想することができる。また、マグネターのバーストにおける変換過程に電磁場の非一様性をふまえるための重要な研究である。

1. J. S. Heyl and L. Hernquist, *Astrophys. J.* 618, 463 (2005)
2. J. Schwinger, *Phys. Rev.* 82, 664 (1951)
3. S. L. Adler, *Ann. Phys.* 67, 599 (1971)

## コン a18 「すざく」衛星による MAXI J1659-152 の広帯域 X 線スペクトル解析

宮崎 直人 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

恒星と連星系をなしているブラックホールは周りに降着円盤が形成され、そこからの X 線放射を観測することができる。この放射は降着円盤の温度に依存する熱的な放射とべき関数型の非熱的成分で構成される。また、その強度には非周期的な時間変動が見られる。

MAXI J1659-152 は ISS に設置された X 線観測装置、MAXI によって 2010 年 9 月 25 日に発見されたブラックホール候補星である。その後わずか数日間の内に XMM-Newton、INTEGRAL、RXTE、AGILE 衛星で次々と追観測が行われた。「すざく」衛星でも 9 月 29 日から 10 月 1 日の 3 日間観測が行われた。この天体にはブラックホール連星に類似した時間変動が見られ、その周期はこれまで発見されているブラックホール連星の中で最短の約 0.1 日であった。その強度変化といくつかのモデルから次のことが推定されている。この連星系はブラックホールと M5 矮星の連星であり、伴星の質量は  $0.15-0.25 M_{\odot}$ 、半径は  $0.2-0.25 R_{\odot}$  である。この天体までの距離はおおよそ 8.6 kpc で、銀河面から 2.4 kpc はなれた所にある。また、減光の様子から傾斜角は  $65-80^{\circ}$  である。

この天体は、非常に明るいため、「すざく」に搭載された CCD 検出器 (XIS) の検出限界に達してしまっており、これの適切な評価を行った。また、観測中に衛星の姿勢が数 10 分角ほど動いており、姿勢の補正も行った。こうして、X 線スペクトルを抽出することに成功した。得られたスペクトルは 3 日間の観測で大きな変動はみられず、スペクトルの形は一般的なブラックホール連星のものであった。本講演では、この天体の解析結果、および物理的な解釈について紹介したい。

1. Kuulkers, E et al. 2013, A & A
2. Kuulkers, E et al. 2011, eprint arXiv:1102.2102

## コン a19 ブラックホール連星の短時間での X 線スペクトル変動

水本 岬希 (宇宙科学研究所 M2)

世界初の X 線天文衛星「ウフル」により、Cyg X-1 から 0.1 秒スケールの X 線の光度変化が検出されて以来、ブラックホール連星は、X 線で短時間変動を示す天体として特徴付けられてきた。また、「あすか」衛星に搭載された X 線 CCD カメラにより、複数のブラックホール連星から青方遷移した吸収線が検出され、ブラックホール周辺から物質の放出 (アウトフロー) が起こっていることが明らかになった。だが、装置的な制約ゆえに、吸収線を検出できる程度の高エネルギー分解能で、X 線スペクトルの短時間変動を追った例は乏しい。

「すざく」衛星搭載の X 線 CCD カメラ「XIS」は、観測対象の明るさや時間変動に応じて、観測モードを使い分けて観測を行っている。そのうちのひとつである Parallel-sum clocking (P-sum) モードでは、通常の観測モードでは 8 秒ごとにイベント付けされるところ、7.8 ミリ秒刻みでイベントを得ることができる。P-sum モードは通常モードに比べ

経年劣化が速く、独自の較正が必要であったため、我々はまず、P-sum モードの較正用観測データを網羅的に解析し、打ち上げ以来のエネルギースケールと分解能を決定した。本講演では、P-sum モードの観測によって得られたブラックホール連星の短時間での X 線スペクトル変動の様子を示すと同時に、2015 年打ち上げ予定の次世代 X 線天文衛星「ASTRO-H」で解明されると期待されるブラックホールからのアウトフローの描像についても議論する。

1. Oda, M., Gorenstein, P., Gursky, H., et al. 1971, *ApJ*, 166, L1
2. Ueda, Y., Inoue, H., Tanaka, Y., et al. 1998, *ApJ*, 492, 782
3. Yamada, S., Negoro, H., Torii, S., et al. 2013, *ApJ*, 767, L34

## コン a20 ブラックホール候補天体における熱伝導を考慮した明るいハードステート円盤のモデル

谷田部 紘希 (千葉大学 宇宙物理学研究室 M1)

ブラックホール候補天体には、高温かつ光度が低く光学的に薄いハードステート、低温かつ光度が高く光学的に厚いソフトステートという二つの状態が存在することが知られている。さらに、X 線観測から、ソフトステートとハードステートの間で相互に状態遷移が起きていることも知られており、明るいハードステートと呼ばれる、光度の高いハードステートが存在することが観測されている。この明るいハードステートの光度はエディントン光度の 10% 程度であることも観測から知られている。熱平衡な定常解としてのこの明るいハードステートの存在を、理論モデルにより説明する、ということがモチベーションとなり本研究を行った。Abramowicz et al.(1995) による降着円盤の定常モデルでは、明るいハードステートに対応する熱平衡解が得られていなかった。これは、この領域では輻射冷却が粘性加熱を凌駕するためである。しかし、この定常解は、エネルギー方程式において熱伝導項を考慮せずに導かれたものである。高温の円盤コロナからの熱伝導が輻射冷却とつり合えば定常解が存在し得る。熱伝導を考慮した鉛直方向 1 次元定常解を求めた結果、ハードステートからソフトステートへ伸びる、新たな熱平衡解の存在を確認することができた。この新たな熱平衡解の光度がエディントン光度の 10% 程度まで大きくなる可能性を示し、明るいハードステートを説明することができることを報告する。

1. Abramowicz, M. A., Chen, X., Kato, S., Lasota, J. P. & Regev, O. 1995, *ApJ*, 438, L37

## コン a21 超臨界降着流の数値シミュレーション

小川 拓未 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

宇宙空間において、高エネルギーを発生させる現象の多くは、周りの円盤からブラックホールへのガス降着が関与していると考えられている。このような現象は機構が解明されておらず、円盤降着流について調べることが必要である。本発表では、円盤降着流の中でもガス降着がエディントン限界を超える、超臨界降着流に着目した。

超高光度 X 線源やマイクロクェサー、恒星がブラックホールに近づくすぎたために起こるとされる潮汐破壊による突発的増光現象などのコンパクトな天体現象が存在しており、その機構は分かっていない。これらの天体現象はエディントン光度以上の光度を持つことから、超臨界降着流で説明出来ると考えられる。本発表では超臨界降着流について、

国立天文台の大須賀氏のシミュレーション結果を用いながら説明する。また、超臨界降着流の広域シミュレーションによって最近新たに見つかったクランピーアウトフロー (Takeuchi et al. 2013: 参考文献 [1]) についてのレビューも行う。

超臨界降着流が起こると、円盤が輻射圧優勢になる。その為、超臨界降着流をシミュレーションする際は流体計算だけでなく、輻射を考慮する必要がある。輻射流体シミュレーションにより、エディントン限界を下回る亜臨界降着流とは異なる様々な構造が見えてきている。その一つがクランピーアウトフローである。クランピーアウトフローは円盤上空の噴出流が2つの不安定性の効果から1光学深さ程度の大きさのクランプ状に分裂することで形成される。クランピーアウトフローは物理的対象として興味深いというだけでなく、活動銀河核などの光度の時間変化や中心部に見られる大きな速度分散の形成に新たな解釈の可能性を与えてくれるという点で興味深い。

1. Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. PASJ 65 88T (2013)
2. Takeuchi, S., Ohsuga, K., & Mineshige, S. PASJ tmp 40T (2014)
3. Ohsuga, K., & Mineshige, S. SSRv tmp 88O (2013)

## コン a22 全天 X 線監視装置 MAXI が観測した X 線バーストの探査

大槻 光 (青山学院大学大学院 M1)

Monitor of All-sky X-ray Image (MAXI) は 2009 年 8 月に国際宇宙ステーション日本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全天 X 線監視装置である。MAXI に搭載されている X 線検出器、Gas Slit Camera (GSC) は 2-30keV の X 線領域に感度を持っており、約 90 分毎にほぼ全天を走査することができる。長年人類が憧れてきた静かに見える宇宙だが、X 線やガンマ線で見ると活発に活動をしている。例えば、中性子星やブラックホールに代表される高密度天体はその活動の起源の一部である。このうち、中性子星と恒星の連星系が起こす活動の一種に X 線バーストという突発的な爆発現象がある。この連星系において、恒星の一部が降着ガスとなって中性子星表面に堆積し、やがて高密度な堆積物は非常に強い重力によって臨界状態に到達し、熱核融合反応を起こす。この熱核融合反応の暴走をきっかけに表面層は加熱され、X 線を放射して、X 線バーストの起源となる。一般に人工衛星に搭載された X 線望遠鏡による観測では、ある一つの天体に対して感度の良い観測を長い時間行なうことができるが、視野が狭いため、観測対象外の天体の活動性を監視することはできない。これに対し MAXI は 1 日に約 16 回の全天観測を毎日行なっているため、一つの天体のみでなく多くの天体の活動性を一定の時間間隔で監視することができ、いつ起こるか分からない X 線バーストのような突発的に明るさが変動する現象を検出する機会が多いと考えられる。本研究では MAXI/GSC が観測した約 4 年分のデータの中から、X 線バーストを起こす天体のバーストごとの情報をまとめ、カタログにすることを目標にしている。そこでカタログ作成に向けて、H1636-536 という低質量 X 線連星をサンプルに MAXI/GSC の観測データから X 線バーストの情報を抜き出す手法を確立した。本発表では、この H1636-536 についてカタログのサンプルを報告する。カタログに載せる項目としては、天体名、天体位置、バーストの発生時刻、継続時間、ピークフォトンフラックス、ライトカーブ、スペクトルを考えている。

1. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー

現象

2. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 7 恒星
3. 吉田研究室 山崎 修 2009 年度 修士論文

## コン a23 Ultra Luminous X-ray source の $T_e/T_{in}$ 比による統一的理解

小林 翔悟 (東京大学牧島中澤研究室 D1)

Ultra Luminous X-ray source (ULX) は X 線で異常に明るい天体で、その光度は恒星質量 ( $10M_{\odot}$ ) ブラックホール (BH) のエディントン限界光度 ( $L_{\text{edd}}$ ) を 1-3 桁も上回る。ULX は未発見である中間質量 ( $10^2-3M_{\odot}$ ) BH からの  $\sim L_{\text{edd}}$  の放射と解釈できる [1] が、未だ議論が続いている [2]。

ULX は BH 連星 (BHB) と同様に、光度変化に伴い異なるスペクトル状態 (Power Law; PL 状態と Disk 状態) を示す。PL 状態は冪関数的に伸びる硬いスペクトルで、 $\sim 7-9$  keV で緩やかに折れ曲がっており、BH 連星でも一般的な、円盤の多温度黒体放射と逆コンプトン散乱を組み合わせた (THC) モデルでよく説明される。一方で高光度になると、ULX は軟かい上に凸な Disk 状態となり、これらは標準降着円盤に修正を加えた Slim disk モデルで解釈されてきた。しかし宮脇らは、代表的な ULX である M82 X-1 の Disk 状態が、むしろ PL 状態と同様の THC モデルで、より自然に解釈できることを指摘した [3]。そこで我々はこの THC モデルを、スペクトル状態に関わらず複数の ULX に適応し、ULX の状態変動を統一的に描像することを試みた。

我々は「すざく」、NuStar、XMM-Newton、「あすか」の4つの衛星の公開データ中で、代表的な ULX である Holmberg IX X-1、NGC1313 X-1/X-2、M33 X-8、IC342 X-1/X-2 のデータを解析した。THC モデルはいずれのスペクトル状態でも、全てのスペクトルをよく説明でき、2 状態は最内縁温度が  $T_{in} = 0.2-0.5$  keV の降着円盤と、電子温度  $T_e = 2-4$  keV、光学的厚み  $\tau \sim 10$  という「薄く厚いコロナ」を共通にもつことがわかった。また、温度比  $Q = T_e/T_{in}$  と光度  $L_x$  の相関をとると、PL 状態はみな  $Q > 10$  のグループに属し、一方で Disk 状態は  $Q < 5$  のグループを形成し、この温度比  $Q$  が ULX のスペクトル状態を区別するよい指標となることを発見した。このプロットに BH 連星である XTE J1550-564 の Very High state ( $L_x \sim L_{\text{edd}}$ ) を加えると、PL 状態と同じ  $Q > 10$  のグループに属する。これは ULX が、中間質量 BH からの  $\sim L_{\text{edd}}$  の放射で解釈できるという説をより強化するものである。

1. Makishima, K. et al. 2000 ApJ., 535, 632
2. Mineshige, S. et al. 2007 ASP., 373
3. Miyawaki, R. et al. 2009 PASJ., 61, S263, S278

## コン a24 セイファート I 型活動銀河核 IC4329A の新たな硬 X 線成分とスペクトル描像

三宅 克馬 (東京大学牧島中澤研究室 M2)

活動銀河核 (AGN: Active Galactic Nuclei) の X 線スペクトルは、降着円盤からの紫外線光子がコロナで逆コンプトン散乱を受けて生成される光子指数  $\Gamma \sim 2$  の Power-Law (PL) 型の一次放射成分、その反射によって生じる鉄輝線や硬 X 線ハンプなどの二次成分から成ると考えられている [1]。しかし、観測されるスペクトルは連続成分が主体で構造に

乏しいため、様々な理論モデルによって同一のスペクトルを説明できてしまい、その解釈は一意に定まっていなかった[2]。そこで我々は今回、時間変動を利用したモデル依存しない方法で AGN の X 線スペクトルの成分分解を行った。用いた天体は、明るく時間変動の大きいセイファート I 型 AGN、IC4329A で、この天体は「さざく」により 2007 年 8 月に 5 回、2012 年に 1 回観測されており、2-10 keV のフラックスはおよそ  $7.0 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  であった。これらの観測間や一観測内で、差分スペクトル法と Noda et al. (2013) [3] の成分分解手法を適用したところ、変動成分は形を変えずに強度のみ変動し、その光子指数は  $\Gamma \sim 2.1$  であることが明らかになった。しかし、時間平均スペクトルは  $\Gamma \sim 2.1$  の PL 成分とその反射成分だけでは再現できず、 $\Gamma \sim 1.5$  のよりハードな一次成分を必要とすることがわかった。この成分は、 $\Gamma \sim 2.1$  の PL に比べて変動のタイムスケールが長く、強い吸収を受けており、それに伴う鉄 K エッジ ( $\sim 7.2 \text{ keV}$ ) も見られる。またスペクトルへの寄与は大きいものの、変動が小さいためにスペクトルの差分を取ったときには打ち消される。さらに、この成分はその形と変動性から、部分吸収された  $\Gamma \sim 2.1$  の PL や反射などの二次成分ではなく、それとは別の一次放射成分であることが明らかになった。IC4329A において、この描像は数百 ksec から数年という異なるタイムスケールでも成り立っている。以上のように、この AGN の一次 X 線放射は、実は 2 つの異なる連続成分から成ることがわかった。これは他のセイファート銀河でも成り立つと考えられる。

1. A. C. Fabian and G. Miniutti arXiv:astro-ph/0507409 (2005)
2. M. Cerruti et al. A & A, 535, A113 (2011)
3. H. Noda et al. ApJ, 771, 100 (2013)

## コン a25 狭輝線 1 型セイファート銀河 PG1244+026 の X 線時間変動解析

桑原 啓介 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

この宇宙に存在する銀河の多くはその中心部に活動銀河核 (AGN) と呼ばれる大質量ブラックホールを持つ。AGN は単体で銀河そのものに匹敵する明るさで輝き、恒星の進化の果てに生まれるブラックホールより質量が 6 桁以上も大きい。X 線スペクトルは様々な形に分解され、ブラックホール本体近傍のコロナの逆コンプトン散乱が起源とされるベキ乗成分、低エネルギー側での軟 X 線超過が考えられている。

AGN のうち、セイファート 1 型はトーラス面に垂直な方向から観測できる銀河である。その中でも、狭輝線 1 型セイファート銀河 (NLSy1) は非常に高い質量降着率と狭い輝線を持つ。軟 X 線帯域では、超過成分が非常に強く、未だにその起源ははっきりとはわかっていない。また、他セイファート銀河と比べて激しい時間変動を持つことも知られており、その起源も不明である。今回、XMM-Newton 衛星の 120 ks の観測データを用いて NLSy1 である PG1244+026 の解析を行った。

先行研究ではスペクトル解析・変動の周波数解析を用いて軟 X 線超過の起源が調べられている。高周波数スペクトルと低周波数スペクトルとを比較することで、放射源毎の変動のタイムスケールの違いから、各成分を起源毎に識別しようとしていた。NLSy1 の放射が主に降着円盤からの放射・ベキ乗成分・軟 X 線超過で構成されていると考えて矛盾がないと報告されている (Jin C. et al. 2013)。

本研究ではより直接的に物理量を抽出するため、時間軸に着目した解析を行った。明るい時間帯と暗い時間帯に数 ks のタイムスケールで分け、それぞれのスペクトルを比較した。その結果、明るくなるとスペク

トルがわずかに軟 X 線側に傾くことがわかった。今後はより短いタイムスケールでの変動を調べることで軟 X 線超過や激しい強度変動の起源に迫りたい。

1. Jin C., Done C., Middleton M, Ward M., 2013, MNRAS, 436, 3173
2. Done C., Davis S.W., Jin C., Blaes O., Ward M., 2012, MNRAS, 420, 1848

## コン a26 VLBI モニター観測による電波銀河 3C 84 の長期変動

千田 華 (国立天文台三鷹 M2)

3C 84 は、 $\gamma$  線で明るい電波銀河の典型例である。本天体では、2012 年までに 2 度の  $\gamma$  線フレアが報告され、電波帯ではジェット成分において 2005 年頃より増光が見られている。その活動の活発さから  $\gamma$  線フレアとジェットの活動の関係を調べるのに最適な天体である。ブレーザーでは、突発的なフレアに伴いブラックホールから強いジェットが噴出することで  $\gamma$  線が生成される。一方電波銀河では  $\gamma$  線フレアの観測例の少ないことから、ブレーザーで見られる様に強いジェットの噴出が  $\gamma$  線放射と関係しているのかははっきりしていない。3C 84 の過去 2 度の  $\gamma$  線フレアではいずれもフレア前後で強いジェットの噴出は観測されなかった。しかし 2013 年 1 月に過去最大の  $\gamma$  線フレアが発生し、ジェットの噴出規模の変化との関係を探る好機が訪れた。

GENJI プログラムでは、2010 年 11 月より 3C 84 を国立天文台 VLBI 観測網 VERA を用いた 22 GHz 帯での 1-2 週間という高頻度な VLBI モニター観測を行ってきた。約 3 年に渡るモニター観測によって、サブパーセクスケールでは、2005 年に出現した成分が、速度は光速の約 20 本講演では GENJI プログラムを通して観測された 2011 年 1 月から 2013 年 12 月における全 65 エポックの観測結果を報告する。その結果をもとに、 $\gamma$  線フレアと電波ジェット活動の相関関係と、3C 84 の電波帯での増光源がサブパーセクスケールのホットスポットである可能性について議論する。

1. H. Nagai et al., MNRAS, 423, L122, (2012)
2. R. C. Walker et al., ApJ, 530, 233, (2000)
3. L. Stawarz et al., ApJ, 680, 911, (2008)

## コン a27 楕円銀河におけるブラックホールへの Bondi 降着率とジェットパワーの相関

国沢 佑介 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

一般に銀河の中心には巨大ブラックホールがあるとされており、この巨大ブラックホールへ周りのガスが降着することで、ジェットが噴出されると考えられている。このガス降着とジェットに関するメカニズムは今も活発に議論がされている。このメカニズムを確かめるためには、ブラックホールへのガスの降着率と、そこから噴出されるジェットのパワーの間に相関があることを調べればよく、そのような考えに基づき、ごく近傍の楕円銀河について、X 線観測データを解析したところ、Bondi 降着率とジェットのパワーに相関があったという報告がなされている (Allen et al. 2006)。しかしながらこの観測では、Bondi 半径を分解で

きていない。そのため Bondi 降着率を見積もるのに必要な、Bondi 半径でのガスの温度と密度を推定するのに、単純なべき則での外挿を行っており、不定性が大きいと考えられる。実際、いくつかの研究では、その相関関係から外れているものがあり、他のメカニズムの存在も議論されている (McNamara et al. 2011)。そこで本研究では、単純なべき則での外挿ではなく、ガスの静水圧平衡を仮定して Bondi 半径でのガスの温度と密度を推定し、その結果から Bondi 降着率を見積もり、ジェットのパワーと比較する。この方法は、近傍の楕円銀河以外についても適用可能なので、Allen et al. よりもより大きなサンプルで、Bondi 降着率とジェットのパワーとの相関について議論できる。

1. S. W. Allen, R. J. H. Dunn, A. C. Fabian, G. B. Taylor and C. S. Reynolds MNRAS, 372, 21 (2006)
2. B. Balmaverde, R. D. Baldi, and A. Capetti A&A, 486, 119 (2008)
3. B. R. McNamara, Mina Rohanizadegan, and P. E. J. Nulsen MNRAS, 432, 530 (2011)

## コン b1 超新星前の親星からのニュートリノ放出とその観測可能性

加藤 ちなみ (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1) 初期質量が  $8M_{\odot}$  以上の星は、進化の最後に超新星爆発を起こす。しかし、その爆発機構や爆発前の親星の構造については未だに多くの謎を残している。恒星進化理論によれば、星の進化過程は初期質量によって異なり、超新星爆発においても鉄コア崩壊型と ONeMg 崩壊型の 2 種類があると考えられている。これらの謎を解明するためには観測が必要であり、今現在期待されているのがニュートリノ観測である。ニュートリノは、星の進化が進むと中心核で多く生成され、大量にエネルギーを持ち去る。そして、ニュートリノの反応断面積は非常に小さく ( $\sim 10^{-42}[\text{cm}^2]$ )、物質とほとんど相互作用せずに観測地点まで届く。よって、星の内部情報を直接観測でき、親星の中心核における熱力学的構造を明らかにできるのではないかと期待される。超新星前のニュートリノに関する先行研究としては、A.Odrzywolek et al. による初期質量が  $20M_{\odot}$  の鉄コア崩壊型超新星爆発を起こす親星における対消滅ニュートリノのエネルギー放出率の計算及びその観測可能性を調べた論文がある。本研究では、先行研究と異なり K.Takahashi et al. による初期質量  $10.8M_{\odot}$  の ONeMg 崩壊型超新星爆発を起こす親星をモデルとする。そして、この進化モデルの密度・温度で支配的なニュートリノ生成過程である対消滅とプラズモン崩壊による生成過程と、進化の後半で中心部が高密度になることによって起こる電子捕獲反応によるニュートリノのエネルギー生成を計算することにする。(Itoh et al.) そして、現在稼働中であるニュートリノ観測装置 (Super-Kamiokande, KamLAND など) でこれらのニュートリノ観測の情報 (ニュートリノ光度の時間発展) から初期質量によって異なる親星の構造の違いがみられるかどうかを議論する。

1. A.Odrzywolek, 2004, arxiv:astro-ph/0311012v2
2. Koh Takahashi, 2013, arxiv:1302.6402v3
3. N. Itoh, Astrophys. J. Supplement Series 102 (1996) 411

## コン b2 輻射場中の Rayleigh-Taylor 不安定

笹平 琳子 (国立天文台三鷹 M1) ブラックホールや中性子星等のコンパクトな天体について、ガスが天体に落ちているときに天体周辺で降着円盤と呼ばれる円盤を形成する事が知られている。実際に、X線連星や活動銀河核などでこの円盤が発見されている。このうち、ブラックホールの降着円盤はアウトフローやジェットといった形で物質を円盤外へ掃き出していることが確実であると、昨今の観測結果から考えられている。しかし、輻射によるアウトフローについては未だ不明な点が多く、日夜様々な理論的・観測的研究が行われている。そのような中で、超臨界降着流において、アウトフローが粒状の構造を形成する事が二次元の輻射磁気流体シミュレーションによって明らかになった [1]。この粒状の構造は主として Rayleigh-Taylor 不安定性によるものだと考えられており、広輝線領域における強度の時間変動などを解決すると期待されるため、その三次元構造の解明が待たれている。

Rayleigh-Taylor 不安定性とは、重力場中で密度の小さな流体の上に密度の大きな流体が存在している状況において、密度の大きな流体が密度の小さな流体に潜り込んでいくようにして成長していく不安定性であり、輻射場中においても同様の不安定性が存在する事が知られている。そこで本発表では、アウトフローの粒状構造を理解する上で不可欠である輻射場中の Rayleigh-Taylor 不安定性について、輻射流体の基礎方程式の線形摂動解析を行った論文「Radiative Rayleigh-Taylor Instabilities」(Jacquet & Krumholz 2011)[2]を紹介する。この論文では 2 流体間の境界面に注目し、輻射が存在しない場合、optically thin な場合、optically thick な場合の三種類の極限を考え、それぞれについて流体が安定する条件を議論する。特に optically thick な場合について、実際に Rayleigh-Taylor 不安定性が存在していると考えられている天体現象に注目し、解析の結果とシミュレーションから得られている結果の比較を行う。

1. S.takeuchi et al PASJ 65 88 (2013)
2. E.Jacquet and M.Krumholz ApJ 730 116 (2011)

## コン b3 重力崩壊型超新星における acoustic mechanism の研究

犬塚 慎之介 (早稲田大学 前田研究室・山田研究室 M1) 重力崩壊型超新星が爆発を引き起こすシナリオとして、星の中心部で生成され外向きに伝播する衝撃波によって外層に運動エネルギーを輸送するシナリオが有力視されている。しかし、多くのシミュレーションでは衝撃波はコアを伝播する際に熱的なニュートリノの生成や外層原子核の分解によりエネルギーを消費して減衰してしまうため、爆発を再現できない。この停滞した衝撃波にエネルギーを与えて復活させることが理論上の課題である。

本研究では音波によりエネルギーを輸送し衝撃波を復活させる機構 (acoustic mechanism) に着目する。原子中性子星内部のコアの g モード振動の励起と減衰により生成される音波が停滞衝撃波にエネルギーと運動量を輸送することでバウンスの約 500ms 以上後の遅い段階で爆発を引き起こすのである。コアの振動は降着流のエネルギーとコア周辺の乱流によって励起されるので、降着が続く限り音波は放出され続け、爆発を起こすまでエネルギーを供給し続ける。ニュートリノ加熱のようなより早い段階で爆発を開始させる機構が働かなければ、acoustic

mechanism は超新星爆発の有望な機構となりうる。

本研究では、acoustic mechanism が本当に有効か調べるため、コアの内部領域、すなわち原子中性子星表面から衝撃波まで伝播する音波について以下の二つの数値計算を行った。

1. 超新星内部で定常解、波長・周期が十分小さい場合を仮定し、原子中性子星表面で与えた速度の揺らぎの音波の伝播に伴う進化を計算した (Jacques 1977)。
2. 流体力学の方程式を線形化し、密度・速度の揺らぎに対する方程式を得る。1. と同じ定常解に対してこの方程式を解き、衝撃波半径における揺らぎの時間変化のデータを得る。計算には Laplace 変換を応用したコードを用いた。

以上の二つの計算結果を比較すると、与えた揺らぎの成長が 1. は 10 倍程度、2. は 40 倍程度となった。これについて考察する。

1. A. Burrows et al. ApJ, Vol. 640, pp. 878-890, 2006.
2. S. A. Jacques. ApJ, Vol.215, pp. 942-951, 1977.

## コン b4 ガンマ線バーストの中心エンジン

西野 裕基 (京都大学 天体核研究室 M1)

ガンマ線バースト (GRB) は宇宙最大の爆発現象である。その光度は  $L \sim 10^{50}$  erg/s で、太陽の約  $10^{17}$  倍にもなる。現在、GRB に関する最も重要な問題は中心エンジンである。本発表では論文 [1] のレビューを行う。GRB の中心エンジンの有力な候補に、回転するブラックホールまわりの降着円盤がある。Shakura と Sunyaev の提案した円盤モデル [2] を採用した。アルファ粘性によって物体は角運動量を失って降着が起こり、降着による加熱と輻射・移流による冷却が釣り合った定常状態を簡単のために考える。ディスク内部の圧力と釣り合う程のポロイダル磁場を持つとすると、Blandford-Znajek (BZ) 機構 [3] によって相対論的なジェットが生成される。BZ 機構は磁場によりブラックホールの回転エネルギーを引き抜くペンローズ過程の一種である。質量降着率が大きい ( $0.003 - 0.01 M_{\odot}/s$ ) ときには、主にニュートリノ輻射によって冷却され、Neutrino Dominated Accretion Flow (NDAF) となる。そして、ディスクがニュートリノに対して光学的に薄い場合、BZ 機構で放出されるジェットの光度は GRB を駆動させるのに十分であることを紹介する。

1. Norita Kawanaka, Tsvi Piran, and Julian H. Krolik. 2013, ApJ, **766**, 31
2. Shakura, N. I. and Sunyaev, R. A. 1973, Astronomy and Astrophysics, **24**, pp.337-355
3. Blandford, R. D. and Znajek, R. L. 1977, MNRAS, **179**, pp.433-456

## コン b5 降着円盤を伴った回転駆動型パルサーモデルからの多波長放射

石崎 渉 (東京大学宇宙線研究所 M1)

ミリ秒パルサー (MSP) とは弱い磁場を持ちミリ秒スケールの電波パルスを放射する天体であり、放射のエネルギーを自転から供給する回転駆動型のパルサーである。MSP は古い天体であると考えられているにも

かかわらず速い自転周期を保っていることから、MSP は進化のある段階で伴星からの質量降着によって角運動量を受け取り自転速度が速まるというリサイクルシナリオが提唱されている。

近年、伴星からの降着によって駆動される降着駆動型パルサーのうち、回転駆動型へと移行しているものがいくつか観測された。PSR-J1023+0038 はその例の 1 つである。後に、PSR J1023+0038 から (1) 降着円盤起源であると考えられる可視光の放射が確認され (2) 電波パルスが消えたことから、再度降着駆動型に移行したものと考えられていた。しかし、本講演で紹介する J. Takata et al. (2014) [1] は、(1)(2) と同時期に降着駆動型では説明できない  $\gamma$  線の増光があることを報告した。[1] はこの  $\gamma$  線の増光を説明するために、パルサー風による降着円盤からの放射の逆コンプトン散乱を考えた。パルサー風は回転駆動型に期待されるものであるため、PSR J1023+0038 は降着円盤を持ちつつも、回転駆動型として放射し続けているとした。このとき電波パルスは、パルサー磁気圏からの  $\gamma$  線によって電離された降着円盤に遮られているとして説明した。

1. J. Takata et al., 2014, ApJ, 785, 131

## コン c1 ブラックホール中性子星連星合体のスピンの傾きに対する依存性の研究

川口 恭平 (京都大学 基礎物理学研究所 D1)

ブラックホール中性子星連星合体は有望な重力波源であるとともに、降着円盤形成や質量放出によって sGRB や Kilonova といった電磁波対応天体の源となり得る。こうしたコンパクト連星合体の、特に合体過程において放出される重力波の波形や、形成される降着円盤の質量、放出される質量を理論的に予想するためには数値相対論によるシミュレーションが必要である。特にブラックホール中性子星連星合体においては、合体時中性子星が潮汐破壊を起こすかが重力波波形や降着円盤質量といった量を大きく左右し、また、中性子星の潮汐破壊の度合いはブラックホールスピン、質量、中性子星の質量、半径 (状態方程式) に依存することが先行研究によって明らかになった。これまでのブラックホール中性子星連星合体に対する研究はブラックホールスピンの方向と系の軌道角運動量の方向がそろっているものについて主に行われてきた。ブラックホールスピンの方向が系の軌道角運動量の方向からずれている場合、連星の軌道は時空のひきずりの効果により歳差運動を起こすことが知られており、こうしたダイナミクスの変化は重力波波形や降着円盤質量といった量を定性的に変え得る。そこで本研究ではブラックホール中性子星連星の合体過程の、特に今まであまり議論されてこなかったブラックホールスピンの傾きに対する依存性を、中性子星の状態方程式の不定性も考慮して系統的に数値相対論シミュレーションによって調べた。本発表ではその得られた結果と、観測においてどのような影響があるかについて議論する。

1. K. Kyutoku, et. al., Phys. Rev. D84 064018 (2011)
2. K. Kyutoku, et. al., Phys. Rev. D82 044049 (2010)

## コン c2 重力崩壊型超新星爆発の爆発メカニズム

荒木 惟 (福岡大学 理学研究科 応用物理学専攻 M1)

一つの大質量星による重力崩壊型超新星爆発はその親の銀河の光量に匹

敵するほど大きなエネルギーを生み出す現象である。1930年に発見された時から現在に至るまでその爆発メカニズムは観測と理論によってかなり解き明かされた。しかし完全には分かっておらず今なお研究が続けられている。また超新星爆発はガンマ線バーストや重力波の最先端の研究にも繋る重要な現象である。

恒星は内部からの圧力と自己重力でその形を保っているが大質量星の場合、核融合の最終段階で星の中心部の鉄コアによる電子捕獲反応と鉄の光分解によって星が不安定になり重力崩壊をし始める。その後ニュートリノトラッピングを経て内部コアでバウンスした衝撃が外部コアを通過し爆発に至る。本発表では重力崩壊から爆発に至るまでの理論的なシナリオを星の中心密度や温度、質量に注目しながら整理し、過去のシミュレーション結果や現在の研究について発表する。

1. Shoichi Yamada and Katsuhiko Sato, (1994) Numerical study of rotating core collapse in supernova explosions, *Astrophys*, 434, 268-276(1994)
2. Kei Kotake, Katsuhiko Sato and Keitaro Takahashi, (2006) Explosion mechanism, neutrino burst and gravitational wave in core-collapse supernovae, *Rep. Prog. Phys.*, 69, 971-1143(2006)

### コン c3 Rapidly rotating star vs Non-rotating star

漆畑 貴樹 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

現在では高速回転している金属欠乏の Wolf-Rayet star が「長い」ガンマ線バースト (LGRB) を伴う重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) の progenitor として考えられている。その為、この種の CCSN の数値シミュレーションを行う際の初期値設定には大質量星の進化を追い、その終状態を求める必要がある。しかし、多くの恒星の進化計算は形状を球対称に仮定する 1 次元計算である。高速回転という条件が入ってくると、遠心力の性質により星は歪み楕円球状になる。つまり、高速回転星は本質的に多次元であり、球対称仮定は正しい描像との著しい乖離をもたらす可能性がある。その為、恒星進化計算を多次元で行い終状態を求める必要がある。現在までの多次元的恒星進化計算は、諸物理量の角度方向の依存性を撰動的に取り入れる、言わば 1.5 次元計算まで進んでいる。ただし形状を解いていないので依然として、星の形状においては球対称仮定を含んでいる。よって、この 1.5 次元計算においても高速回転星の正しい内部構造や進化の描像はわからない。しかし、多次元的に諸物理量、特に回転、を取り入れている為、高速回転星の定性的な性質を見出す事は可能である。したがって本講演では、1.5 次元計算によって得られた高速回転星と球対称星の性質を比べる事により、LGRB を伴う CCSN の progenitor として重要である高速回転星の内部構造や進化の違いを見ていく。

1. A. Maeder and G. Meynet, *Reviews of Modern Physics*, volume 84, January-March 2012

### コン c4 階層的 3 体と連星合体

岩佐 真生 (京都大学 天体核研究室 M2)

階層的 3 体とは 3 天体の軌道が内側の 2 体の運動と、その 2 体の重心と外天体の 2 体運動に分解して記述できる系である。この系における特

徴的な現象として古在機構が挙げられる。この現象は内連星に対して外天体の軌道の傾斜角  $I$  が  $39.2$  度より大きい時、内連星の離心率と軌道傾斜角が振動する現象であり、離心率が 1 に近づくことが可能である。古在機構は太陽系に存在する小惑星の軌道を説明するために用いられたが、近年の観測により 3 体系は全体の 10 本発表では階層的 3 体におけるコンパクト連星の重力波放出による軌道進化についての発表を行う。コンパクト連星は重力波を放出しながら合体するが、連星の軌道が離心率を持つときの合体時間は離心率に強く依存しており減少関数となっている。従って階層的 3 体において古在機構が働くとき、重力波放出による合体時間が短くなる可能性があるため重力波観測において階層的 3 体は重要な役割を果たす。

1. Blaes et al, 2002, *ApJ*, 578, 775
2. Kozai, Y. 1962, *AJ*, 67, 591

### コン c5 中性子星連星合体の残光放射

杜 驍 (東京大学宇宙線研究所 M2)

中性子星連星合体 (Neutron Star Binary Coalescence, NSBC) は来る重力波観測のメインターゲットである。数年後には NSBC 重力波が受かると期待されているが、強度が感度限界付近であることと波形が理論的予測のみによることから、重力波観測のみで NSBC であると断定するのは難しい。従って、裏付けとして電磁波での NSBC 対応天体の観測とその理論的研究が重要となる。そのような NSBC 対応天体のひとつとして、合体の際の質量放出による残光放射が挙げられる。シミュレーション [1] によると合体に際し、潮汐崩壊などによって速度が  $0.1 - 0.3 c$  程度の質量が放出される。この質量が周囲の物質と衝突して衝撃波を形成し、非熱的放射によって電波から  $\gamma$  線にかけて数ヶ月から数年の間放射すると考えられている。Piran [1] らは簡単なモデルによって、重力波イベントの数ヶ月後に電波帯域での残光が観測できる可能性を示した。本研究では先行研究において簡略化されていた電子分布の詳細な時間発展および爆風との相互作用を考慮した数値計算を進めている。発表では Piran et al. 2013 などの先行研究をレビューし、そこで自らの研究経過もあわせて発表する。

1. Piran, T., Nakar, E., & Rosswog, S. 2013, *MNRAS*, 430, 2121
2. Takami, H., Kyutoku, K., & Ioka, K. 2014, *PhRvD*, 89, 063006

### コン c6 超新星爆発超新星爆発における放射性元素 $^{26}\text{Al}$ , $^{44}\text{Ti}$ , $^{60}\text{Fe}$ の合成

堤 陵 (甲南大学 M1)

100 万年程度の半減期を持つ短寿命放射性同位体核種である  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  は INTEGRAL や RHESSI などの衛星によって放射性崩壊によって放射される  $\gamma$  線の観測が行われている。その中でも、特に  $^{26}\text{Al}$  は天の川銀河の中心部に分散する様に分布し、現在も活発に元素合成が行われていることを明確に示している。しかしながら、これらの核種の生成源としては、重力崩壊型超新星、Wolf-Rayet 星、AGB 星などが提案されているものの未だ決着がつかない。そこで、私は重力崩壊型超新星における  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  の生成に注目し研究を行う予定であり、本講演ではそれらの生成量の核反応率に対する依存性を調べた Tur et al. *ApJ*, 718, 357 (2010) についてのレビューを行う。彼らは

$15M_{\odot}$ ,  $20M_{\odot}$ ,  $25M_{\odot}$  の星について、その進化および超新星爆発における元素合成計算を行い、特にトリプルアルファ反応および  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  に対する  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{44}\text{Ti}$ ,  $^{60}\text{Fe}$  の生成量の依存性を調べた。その結果、彼らは核反応率の不定性の範囲でこれらの核種の生成量が一桁程度変化することがあることを明らかにし、また核反応率に対する依存性は  $^{60}\text{Fe}$ 、 $^{26}\text{Al}$ ,  $^{44}\text{Ti}$  の順で大きいことを示した。その一方で、生成量と核反応率の関係は単調ではなく、生成量の最大値と最小値を見積もることは可能であるものの、その不定性の範囲を簡単な統計に基づいて明らかにすることは困難であることを示した。そのため、トリプルアルファ反応と  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma)^{16}\text{O}$  核反応率をより正確に求め、さらにそれを用いて実際に星の進化計算、超新星爆発計算を行うことが必要であると考えられる。

1. Tur et al. ApJ, 718, 357 (2010)

### コン c7 Possible Indirect Confirmation of the Existence of Pop III Massive Stars by Gravitational Wave

衣川 智弥 (京都大学 天体核研究室 D2)

We perform population synthesis simulations for Population III (Pop III) coalescing compact binary which merge within the age of the universe. We found that the typical mass of Pop III binary black holes (BH-BHs) is  $\sim 30 M_{\odot}$  so that the inspiral chirp signal of gravitational waves can be detected up to  $z=0.28$  by KAGRA, Adv. LIGO, Adv. Virgo and GEO network. Our simulations suggest that the detection rate of the coalescing Pop III BH-BHs is  $140(68) \text{ events/yr} (\text{SFR}_p / (10^{-2.5} M_{\odot}/\text{yr}/\text{Mpc}^3)) \cdot \text{Err}_{\text{sys}}$  for the flat (Salpeter) initial mass function (IMF), respectively, where  $\text{SFR}_p$  and  $\text{Err}_{\text{sys}}$  are the peak value of the Pop III star formation rate and the possible systematic errors due to the assumptions in Pop III population synthesis, respectively.  $\text{Err}_{\text{sys}} = 1$  correspond to conventional parameters for Pop I stars. From the observation of the chirp signal of the coalescing Pop III BH-BHs, we can determine both the mass and the redshift of the binary for the cosmological parameters determined by Planck satellite. Our simulations suggest that the cumulative redshift distribution of the coalescing Pop III BH-BHs depends almost only on the cosmological parameters. We might be able to confirm the existence of Pop III massive stars of mass  $\sim 30 M_{\odot}$  by the detections of gravitational waves if the merger rate of the Pop III massive BH-BHs dominates that of Pop I BH-BHs.

1. Kinugawa et al.(2014) arXiv:1402.6672

### コン c8 相対論的アウトフローの輻射流体モデル

中田 めぐみ (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙物理学研究室 M2)

銀河の中心部の非常に狭い領域から銀河全体を凌駕するような強い電磁波を放射する活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGNs) や、宇宙最大の爆発現象だといわれ強烈なガンマ線を放射するガンマ線バースト (Gamma-Ray Bursts; GRBs) などの天体現象がある。これらの中心天体から双方向に細く絞られたプラズマのアウトフローが存在することが知られている。観測より光速の 99% ( $\gamma = 10 \sim 100$ ) の相対論的速

度で噴出していると推定されている。ジェットの加速機構は大きく分けて、ガス圧、輻射圧、磁気圧の勾配によるものが提唱されている。

本研究では、ブラックホールなどの中心天体近傍から噴出するガスと輻射からなるアウトフローを放射流体として考察をする。アウトフローの開き角が一定であると仮定し、光学的に厚い、球対称定常な流れを考える。中心天体がつくる重力場を Schwarzschild 時空で表現し、この時空中での一般相対論的流体の式と輻射輸送モーメント方程式を解き、定常解を求めた。ガスの速度が光子気体の音速 ( $\beta = 1/\sqrt{3}$ ) になる臨界点を通過する加速解を求めるため、臨界点において内側と外側の解を滑らかに接続した。 $\gamma \sim 10$  程度のローレンツ因子が得られる解の具体例を示し、速度、圧力、光度、光学的厚さ、終端ローレンツ因子について考察する。

1. Akizuki and Fukue, PASJ, 61, 543 (2009)
2. Lindquist, R. W., Ann. Phys., 37, 487 (1966)
3. Mihalas, D., ApJ, 237, 574 (1980)

### コン c9 超相対論的流体におけるガンマ線放射過程の輻射輸送シミュレーション

石井 彩子 (東北大学工学研究科 航空宇宙工学専攻 D1)

ガンマ線バースト (GRB) の起源として、大質量天体の重力エネルギーの解放に伴って形成される相対論的ジェットが考えられている。ローレンツファクター  $\Gamma = 100$  を越えるような極めて光速に近い流速を持つジェットからは、物質の温度があまり高くない状態でもガンマ線が放射される可能性がある。ジェットを起源とする GRB の可能性を検証するには、相対論的速度で動いている物質中の電子と光子の衝突を適切に評価しなければならず、したがって相対論的流体と輻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って、背景場が相対論的流体である場合、放射、吸収、散乱を評価する共動系と、流体計算における慣性系の間の変換を矛盾なく取り扱える計算手法については十分に検討されていない。本研究では、輻射輸送計算手法としてモンテカルロ法を用い、相対論的流体場とのカップリング計算を念頭に、異なる慣性系間でも同等の結果が得られる計算手法を構築してきた。相対論的ランキン-ユゴニオの関係式を用いて、同等な衝撃波について衝撃波が静止している系と動いている系を考え、各系において 3 次元モンテカルロ計算を行った。さらに、計算から得られた光子の方向分布やスペクトルの結果を同一の系へと変換し、比較検討を行った。トムソン散乱およびコンプトン散乱を考慮し、散乱優位な流体場を想定して計算を行った。その結果、適切な計算条件を選ぶことにより、異なる慣性系で計算した光子の方向分布およびスペクトルであっても同一の系へと変換すると一致することや、衝撃波をまたいで輸送され急激な流速の変化を経験した光子が相対論的電子と衝突し、逆コンプトン散乱を起こすことによって高エネルギー光子が生成される過程を再現できることがわかった。また、信頼性の高い計算結果を得るために必要な時間幅や解像度などの計算条件について検討した。

1. H. Nagakura, H. Ito, K. Kiuchi, and S. Yamada, "Jet Propagations, Breakouts, and Photospheric Emissions in Collapsing Massive Progenitors of Long-Duration Gamma-Ray Bursts," *Astrophysical Journal*, Vol. 731, No. 2, 2011, pp. 80–97.
2. 水田晃, "相対論的流体方程式の数値的解法 I," *原子核研究*, Vol. 55, No. 2, 2011, pp. 60–74.

3. B. シュッツ 著, 江里口良治, 二間瀬敏史 共訳, シュッツ相対論入門, 丸善, 2010.

### コン c10 MAXI で求めた 4U 1626-67 のパルス周期 の変化率と光度を用いた距離の推定

高木 利紘 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙物理学研究室 D1)

全天 X 線監視装置 MAXI が観測している 20 個余りの X 線連星パルサーのパルス周期をモニタするために、MAXI のデータからパルス周期の検出を試みた。まず手始めに、MAXI のスキャン時間 (60 秒) より十分短いパルス周期 (7.6 秒) をもち、30mCrab と暗いが定期的に輝く天体である、4U 1626-67 のパルス探査を行った。4U 1626-67 は 7.6 秒のパルス周期を持つ低質量 X 線連星パルサーである。エネルギースペクトル中にサイクロトロン共鳴が発見され、この天体の中性子星の磁極の磁場強度は  $B = 3.2 \times 10^{12} (1+z_g)$  G であることが求められた。 $z_g$  は重力赤方偏移を表す。パルス周期が発見されてから 30 年以上にわたって周期がモニタされており、その間パルス周期が短くなる Spin-up 期間と逆に長くなる Spin-down 期間を繰り返している。Spin-up と down を行き来することから、ほとんど降着加速の平衡状態にあると考えられる。天体までの距離は、X 線で降着円盤が加熱されて放射される可視光と降着円盤の X 線反射率を用いて 5-13 kpc と推定されているだけで、詳細な距離はまだ求められていない。我々は、MAXI のデータを用いた解析では初めてこの天体のパルス周期 ( $P$ ) とその変化率 ( $\dot{P}$ ) を検出することに成功し、 $P$  と  $\dot{P}$  の経年変化も得ることができた。また、この天体は約 30mCrab で定期的に輝いているが、わずかな光度の増加に伴い  $\dot{P}$  の絶対値が増加していることがわかった。 $B$  が既知であり、MAXI では  $P$ 、 $\dot{P}$  と光度が求められるので、 $\dot{P}$  と光度の関係を表す Ghosh and Lamb (1979) の式を 4U 1626-67 に適用することができる。そこで、唯一精度よく定まっていない距離の推定を行い、約 9 kpc と求めることができた。

### コン c11 超新星ニュートリノのニュートリノ振動

横地 沙衣子 (東京理科大学 鈴木研究室 M1)

超新星爆発は元素の起源や銀河進化とも関連する重要な天体現象であり、超新星ニュートリノの検出は超新星を研究する有効な手段である。一方ニュートリノには 3 つの世代が存在し反粒子である反ニュートリノを含めて 6 種類存在する。それぞれの状態は異なる 3 つの質量基底の重ね合わせであり、時間が経過するとその重ね合わせの状態は変化してくる。そのために例えば初めは電子型だったニュートリノの一部がタウ型やミュー型のニュートリノに変化するような現象が起こる。このような現象をニュートリノ振動と呼ぶ。ニュートリノは超新星で生成されてから地球に到達するまでにニュートリノ振動を起こすのでその効果を考慮しなければならない。本研究では重力崩壊型超新星内部でのニュートリノ振動を数値計算し、ニュートリノの生き残り確率を調べる。今回超新星内部における物質密度と電子存在率の値は菊地の SN シミュレーションの値を使用した。これは超新星の非球対称性がもたらすニュートリノ加熱率の上昇の効果を、球対称一次元に取り込んだモデルで計算されている。

### コン c12 ブラックホール周辺の時間の遅れの検出

藤田 麻希子 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙数理解析研究室 M1)

ブラックホールに自由落下する物体の運動やそこから放射される光の赤方偏移については解析的に求められるが、観測データと直接比較出来るような角運動量を持った物体の落下運動を解析的に解くのは困難である。そこで本研究では、観測データと直接比較が出来るような角運動量をブラックホールに落ちていくガスの運動方程式に与えて時間の遅れを計算し、観測データと比較する事を目的とした。

具体的には、様々な角運動量をもつガスの運動を数値計算で求め、その場その場で発せられる黒体放射の分布を求めると重力赤方偏移していることが確認出来る。これより、実際どれ程の時間で X 線が可視光領域、電波領域まで赤方偏移するか知ることが出来る。今回は、時間が遅れる原因として重力赤方偏移のみを考慮しているが、運動による特殊相対論効果もあるので、今後取り入れていく。また観測との比較は、ブラックホール近傍で発せられた X 線の観測データを用いて行う。そのデータを解析することにより光の波長の長さの時間変化が分かり、その変化から時間の遅れが理解できることを期待している。

現在、数値計算を行うプログラムを作成し、計算を行っている。今後は、X 線観測衛星によって得られた観測データも解析し、計算結果と比較する予定である。

### コン c13 ブラックホール降着流の 3 次元シミュレーション

辻 雄介 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M2)

ブラックホール周辺のガスの運動は、初期条件・基礎方程式 (連続の式・運動方程式・エネルギー式)・状態方程式が決まれば原理的に解くことができる。そしてこれらを解析的に解くことは一般に難しいため数値的に解くこととなる。数値計算の手法には種々あり、私の研究のベースとなる Barai, Proga & Nagamine (2011) (以下 Paper I), Barai, Proga & Nagamine (2012) (以下 Paper II) では SPH (Smoothed Particle Hydrodynamics) 法を用いている。Paper I, Paper II にはまだ達成されていない長期的な目標があり、それは Kurosawa & Proga (2009) の結果を再現することである。Kurosawa & Proga (2009) では、数値計算の手法として有限差分法を用い、さらに輻射の効果・回転の効果を加味して計算されている。Paper I, Paper II ではまだこの目標は達成されていない。私の研究目標は、Paper I, Paper II では成し得なかった輻射の効果・回転の効果を取り入れた数値シミュレーションを SPH 法によって成し遂げることにある。今回は、私の研究において極めて重要なこの Kurosawa & Proga (2009) の論文の Review を行う。

この論文は、輻射の効果と弱い回転の効果を加味したブラックホール降着流の 3 次元シミュレーションに関する論文である。この論文の主たる目標は 3 つあり、(1) 2 次元シミュレーションと 3 次元シミュレーションに違いはあるか、(2) 先行研究の 2 次元シミュレーションでは回転を加味した場合に挙動は安定していたが、3 次元でも果たして安定なのか、(3) シミュレーションと観測を比較することで、AGN (Active Galactic Nuclei) 中のガスの力学を理解したい、である。

1. Kurosawa, R. & Proga, D. 2009, ApJ, 693, 1929
2. Barai, P., Proga, D. & Nagamine, K. 2011, MNRAS, 418, 591
3. Barai, P., Proga, D. & Nagamine, K. 2012, MNRAS, 424, 728

## コン c14 X線観測衛星「すざく」による very high state にあるブラックホール X線連星 4U1630-47 の観測

堀 貴郁 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

ブラックホール (BH) への高質量降着流の理解は、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の解明につながる重要な課題である。このための最適な研究対象は、BH 連星と呼ばれる、3 ~ 10 太陽質量のブラックホールと恒星からなる近接連星系である。

BH 連星の X 線スペクトルは大きく分けて 2 つの状態をとることが知られている。降着率が低いときは、降着円盤上のコロナからの逆コンプトン散乱が支配的なスペクトルを示し、降着率が高くなると円盤からの黒体放射が支配的なスペクトルを示す。さらに質量降着率が大きいところでは、very high state (VHS) という、強い円盤放射と強いコンプトン散乱が同時に観測される状態をとる。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がほとんど理解されていない。また、近年この状態で相対論的ジェットが放出されていることが確認された [1] が、それは VHS において定期的に放出されているのかは分かっていない。

我々は、2012 年 10 月、X 線天文衛星「すざく」を用いて、VHS にあった 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 X 線スペクトルを、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、BH 周りの降着円盤は標準円盤を保っておらず、コロナなどの密度の低い状態に遷移していることを発見した。また、この観測の 4 日前に相対論的ジェット [1] が観測されていたが、本観測ではジェットは確認されなかった。ポスターでは、VHS の物理状態・ジェットの放出について議論する。

1. M. Díaz Trigo et al. Nature 504 260 (2013)
2. C. Done, M. Gierliński, & A. Kubota A&ARv 15 1 (2007)

## コン c15 巨大ブラックホールによる星の潮汐崩壊

牟田口 舞 (広島大学 宇宙物理学研究室 M1)

数多くの銀河中心核には、太陽の百万倍あるいはそれ以上の質量をもつ巨大なブラックホールが存在しており、非常に明るく輝いている。そのような巨大な質量をもつブラックホールの十分近いところに恒星が通りかかると、そのブラックホールの非常に強い潮汐力が星の自己重力を上回り、恒星はばらばらに破壊される。その後、恒星の破片の一部は外部に放出されるとともに残りはブラックホールまわりの束縛楕円軌道となる。その後、相対論的効果により近日点移動がおり、破片物相互の摩擦がより有効となりブラックホールの周りに降着円盤が形成されるとともに、数百万度の高温に達し相対論的ジェットを放射する。その後ブラックホールの質量降着率は減衰し、形成されたフレアは徐々に消滅すると考えられる。このことは、Rees(1988) にその観測可能性が指摘され、Evans ら (1989) による数値シミュレーションで、その過程を調べられているとともに、最近では観測的な確からしい出来事も見つまっている (Burrows et.al(2011))。今後このような観測例が増えることを期待し、潮汐崩壊過程をより詳しく理論的に解析し、そこからのより詳しい情報が得られるかどうかを将来的に検討する。 本講演ポスター

では、以上に述べたブラックホールによる潮汐崩壊イベントについて Smoothed Particle Method に基づく数値計算法で研究を紹介する。特に、ブラックホールと恒星の間に生まれる相対論的効果をもたらす影響を取り入れ、観測的に予想される質量降着率の時間変化を求めることを目指している。研究は現在進行中であり、用いる手法と結果の一部をポスターで報告する。

## コン c16 ペルセウス座銀河団における鉄の一様性の原因とその化学進化

山田 美幸 (お茶の水女子大学 宇宙物理研究室 M2)

太陽程度の比較的小質量の星が連星からの質量降着により爆発する Ia 型超新星の観測では、炭素や酸素はほとんど燃え尽きて外には放出されず、かわりに鉄族元素を多く放出することがわかっている。近年、ペルセウス座銀河団内の銀河団ガスにおいて、太陽における鉄の約 0.3 倍程度の量の鉄が一様に分布していることが X 線天文衛星「すざく」により報告がなされた。

この一様な鉄の起源を探るため、私は宇宙誕生初期の暗黒物質の収縮、および初代星の爆発に関わるシナリオを提案した。またそれぞれの過程において起こりうる超新星爆発の種類とそれによる元素組成分布を観測と照らし合わせることによって、銀河の構造形成と化学進化を大域的に考察する。

シナリオ検証のための最初のステップとして、宇宙初期に冷たい暗黒物質が一様に、かつ部分的に密度ゆらぎを持ちながら存在していたと仮定し、相対論的にその時間発展を追った。次第に密度ゆらぎが大きくなり、暗黒物質が自己重力により宇宙膨張に逆らって収縮していくと、それらはガウス型に収縮していったのちに跳ね返り、衝撃波のようなものを形成して初代星形成のトリガーになると思われる。

本講演では、これまでの計算結果および今後の展望について発表する。

1. Norbert et al. 2013, Nature, 502, 656

## コン c17 MAXI 突発天体発見システムにおけるガンマ線バースト発見の為の新たな閾値の調査

南波 拓也 (日本大学大学院理工学研究科物理学専攻宇宙数理解析研究室 M1)

本研究室では全天 X 線監視装置 (MAXI) の観測データを解析し、突発天体の発見、速報をするシステムの開発を行っている。速報システムはノバサーチとアラートシステムと呼ばれるシステムで構成されている。ノバサーチは、MAXI が観測したデータを描画、解析を行い、設定した閾値を超える強度変動があったデータをアラートシステムへと送信する。アラートシステムは、受信したデータを再解析し、天体現象だと判断したイベントの情報をフラッシュレポートというウェブインタフェースへと送る。そして、MAXI チームがフラッシュレポートのイベントの情報を本物の天体現象であると判断した場合、MAXI のメーリングリストに登録している世界中の科学者へ速報を行う。また、速報システムがイベントをガンマ線バーストのように緊急度が非常に高いイベントと判定した場合、速報システムから直接メーリングリストに速報を行う機能がある。しかし、これまでに同システムで発見した約 30 個のガンマ線バーストのうち、速報システムが信頼度が高いイベントと判定し、直接速報を行ったのは 1 件だけであった。そのため、システムの閾値を再設定する必要がでてきた。そこで、ガンマ線バーストの特徴を捉える

ための観測データを解析するプログラムを作成し、それを用いて速報システムが発見したガンマ線バーストが信頼度が高いと判定しなかった原因を調査した。現在は速報システムの判定の正答率（速報したイベントが天体の現象であった比率）などを調査中である。

.....

## コン c18 かに星雲からのガンマ線放射の研究

萩原 佳太 (立教大学 M1)

かに星雲の中心には自転周期 33ms で回転する、強い磁場を持つかにパルサーがある。かにパルサーの周期はわずかではあるものの次第に増大し、回転エネルギーを周囲の環境に解放している。また、かにパルサーの周囲にはプラズマで満たされた磁気圏と呼ばれる構造が形成されており、粒子の加速現場の一つとなっている。一方、パルサー風と周囲の超新星残骸物質との相互作用から、かに星雲が形成され TeV を超えるエネルギーを持つガンマ線の放射が行われている。エネルギースペクトルは数百 MeV でカットオフのあるシンクロトロン成分と、数百 GeV にピークを持つ逆コンプトン成分とから成る。しかし磁気圏モデルは複数存在しており、未だ放射領域・放射過程の同定には至っていない。2010 年、2012 年のフェルミ衛星チームによる論文をレビューすることでかに星雲の研究状況に関して議論し、そして現在我々が進めているガンマ線データ解析の現状を報告する。

1. A.A.Abdo et al. *Astrophys.J.* 708:1254-1267, 2010
2. R.Buehler et al. *Astrophys.J.* 749:26(8pp), 2012

.....

## コン c19 VLBI による低光度 AGN M84 の観測的研究

中原 聡美 (鹿児島大学 M2)

活動銀河核 (Active Galactic Nucleus; AGN) は現代天文学の未解決問題が多く残されている天体である。AGN の中心には巨大なブラックホール (BH) が存在し、BH への質量降着機構、相対論的速度で BH から脱出するプラズマのジェット生成・収束・加速機構といった究極の謎を解くべく様々な理論モデルが提唱されている。そしてその謎の検証には、既存の観測装置で最高の空間分解能を誇る超長基線電波干渉計 (VLBI) を用いた中心電波放射領域 (電波コア) の調査が重要である。

申請者の研究対象は、AGN の中でも特に暗く質量降着率の小さな低光度 AGN である。近年の観測により、近傍 AGN の約 95% はこの低光度 AGN である事が明らかになっている。従って、AGN や近傍銀河の一般的な描像を知る上で低光度 AGN は特に重要な天体である。しかし、低光度 AGN は暗いため観測が難しく、VLBI で観測される電波コアの放射起源がわかっていないという大問題があり、前述した BH 近傍の構造について、理論モデルの検証に踏み込めないのが現状である。

本研究では全天でも 5 番目に BH 視半径の大きい低光度 AGN M84 について、日本の VLBI 装置 VERA を用いて世界初 2 周波 (22/43 GHz) 同時モニター観測を行い、M84 中心核の電波放射の特徴を調べた。その結果 M84 中心核の電波放射起源はジェットによるものであると結論づけられた。

1. Ho et al. 1997
2. Doi et al. 2005
3. Hada et al. 2014

.....

## コン c20 低密度領域を含むレーザープラズマのハイブリッドシミュレーション

大西 和夫 (東北大学工学研究科 航空宇宙工学専攻 M2)

宇宙空間で見られる衝撃波の多くは無衝突衝撃波であり、粒子間衝突ではなく磁場を介した散逸によって衝撃波が維持される。無衝突衝撃波では、フェルミ加速などにより高エネルギー粒子が生成されると考えられており、そのような加速現象は地上で観測される高エネルギー宇宙線の起源を知る上でも重要である。

近年、高強度レーザーを用いて地上で無衝突衝撃波の実験を行う試みがなされている。現在提案されている実験では、高強度レーザーを真空中に配置した 2 枚の平行平板ターゲットに照射することで高速の対向流プラズマを生成し、これらの干渉によって無衝突衝撃波を発生させようとしているが、実験で用いるパラメータを定めたり、実験結果の解析を行う上では数値シミュレーションが必要不可欠である。無衝突プラズマでは流体近似が成り立たないため、本来は粒子計算による予測が必要であるが、レーザープラズマ実験では高密度プラズマも同時に発生しており、粒子計算を用いてプラズマの流れを予測することは現実的に不可能である。したがって、現在は流体近似による実験デザインを余儀なくされている。

我々はこれらの問題を解決すべく、粒子計算と流体計算をハイブリッド化したシミュレーションコードを開発し、無衝突衝撃波の地上実験をデザインすることを目指した研究を行っている。低密度領域ではモンテカルロ直接法を用いた粒子計算、高密度領域では有限体積法を用いた流体計算を試みる。ハイブリッド化は領域分割によって行い、粒子計算のミクロな物理量と流体計算のマクロな物理量を交換するための緩衝領域を設ける。これまで、粒子計算を流体計算に組み込むため、粒子コードの開発を行った。今後は流体計算と粒子計算をハイブリッド化した後、散逸モデルを組み込むことで無衝突衝撃波の模擬的な再現を可能にし、高エネルギー粒子発生メカニズムの解明を念頭に置いた実験提案を目指す。

.....

## コン c21 自由歳差運動する中性子星からのパルス放射

村上 浩章 (東京大学牧島中澤研究室 D1)

銀河系やマゼラン雲では、通常の電波パルサーよりも長い 2-12 秒というパルス周期をもつ、特異な孤立 X 線パルサーが見つかっている。推定される双極子磁場の強度は、通常の中性子星を 2 桁以上もしのぐ  $10^{10-11}$  T に達し、莫大な磁場エネルギーを解放して輝く中性子星 “マグネター” であると考えられるようになった。

牧島他は 4U 0142+61 と呼ばれるマグネターを X 線観測衛星「すざく」で観測することで、軟 X 線帯域では 8.69 秒のパルス周期が見られるのに対して、硬 X 線ではパルスの到着時刻が約 15 時間かけて 0.7 秒ほど進み遅れしていることを発見した (牧島他 2014)。これは、自身の強力な内部磁場によって軸対称変形した中性子星が自由歳差運動を行っている結果と考えられる。軟 X 線は軸近傍から放射されるためパルス間隔は一定であるが、硬 X 線は軸から少し外れた場所で放射されており、自転と歳差のビートによる長い周期変調を受けるのだ。本講演では、以上の描像を剛体力学に基づいて定式化し、観測されたパルス変調が単純な数理モデルによって再現されることを示す。

また本描像は、他の中性子星についても放射の正体をつきとめる手がかりとなる可能性がある。その一つが、超新星残骸 RCW 103 の中心に存在する長周期パルサー 1E 161348-5055 である。この天体は 6.67 時間というパルス周期をもつことが知られているが、RCW 103 から推定

される 2000 年という年齢を考慮すると、 $P \sim 10$  ms で生まれた中性子星をここまで減速するのは不可能に近いと、その起源が長らく議論されてきた。我々の自由歳差運動の考えにたてば、この謎めいたパルス周期を説明することができる。例えば、首振り角と X 線放射領域の自転軸からの傾きがともに 30 度ほどの中性子星では、自転と歳差のビートによる長い周期が強調され、1E 161348-5055 のようなパルス放射を再現される。

1. K. Makishima et al. Phys. Rev. Lett. 112 171102 (2014)

.....

## 銀河・銀河団分科会

銀河・銀河団に眠る無限の神秘 \*+:。。。。。: +\*

日時	7月28日 17:45 - 18:45, 20:15 - 21:15 7月29日 16:15 - 17:00, 17:15 - 18:15 (招待講演: 小波 さおり 氏), 18:30 - 19:30 7月30日 13:30 - 15:45, 16:00 - 17:00 (招待講演: 小山 佑世 氏)
招待講師	小波 さおり 氏 (首都大学東京)「X線でさぐる銀河の重元素合成」 小山 祐世 氏 (宇宙科学研究所)「マクロとミクロな視点で解き明かす銀河進化と環境効果」
座長	堀内貴史 (信州大 D1)、水野翔太 (京大 M2)、佐野圭 (東大 M2)、加藤裕太 (東大 M2)、桐原崇亘 (筑波大 D1)、玉沢裕子 (東大 M2)
概要	<p>本分科会では、銀河系、近傍銀河、遠方銀河、AGN 及び銀河団全般について、観測・理論の両面において活発な議論を行うことを目的としている。近年の観測技術の発展、理論研究に必要な計算機の性能の向上は非常に目覚ましい。地上の大型望遠鏡、宇宙望遠鏡の活躍や SDSS 等の大規模サーベイにより銀河・銀河団の物理や描像の検証・理解が大幅に進んだ。さらに今後は、次世代望遠鏡 (HSC、GAIA、JWST、TMT、GMT や ASTRO-H など) の運用により 現段階では観測できない銀河・銀河団の新たな描像の理解が、急?に発展することが予想される。</p> <p>一方で、理論的研究も計算効率の向上と計算機の性能向上とが相まって急?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底知れない。そのため、若い我々が近傍・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ある。</p> <p>本分科会が、参加者にとって銀河・銀河団研究の現状を把握し、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) 降着円盤からのアウトフローは銀河・銀河団分科会で扱います。 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。 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。 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。 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。 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>

小波 さおり 氏 (首都大学東京)

7月29日 17:15 - 18:15 B(大コンベンションホール)

## 「X線できぐる銀河の重元素組成」

宇宙に存在するほとんどの重元素は、宇宙が誕生したビッグバン当時は存在せず、ほぼ水素とヘリウムだけでした。炭素より重い元素は星や星が進化の最後に起こす大爆発「超新星爆発」によって生成され、宇宙に拡散されてきました。さらに、超新星爆発によって供給される元素は、元となる星の質量によって組成が異なります。これらのことから、元素組成/組成比を調べることは宇宙の化学進化、星形成史を調べる強力なツールとなっており、我々は宇宙に広がる高温ガス中の元素組成をX線観測で調べています。

銀河には可視光で観測される星やガスだけでなく、高温(数百-1千万度)のガスが付随しており、X線で観測することができます。より大きな構造である銀河団や大規模構造にもX線を放射する高温ガスは存在し、宇宙に存在する大部分のバリオンはX線でのみ観測可能です。2005年に日本が打ち上げたX線天文衛星「すざく」により、銀河の高温ガスやより薄く広がった領域の元素組成を詳細に調べることが可能になりました。本講演では、「すざく」が明らかにした銀河の元素組成の結果を中心に紹介し、銀河から銀河団への元素流出や、さらに広がった空間での元素分布の調査についても、次世代の衛星の話を変えながらお話しします。

1. S. Konami et al. ApJ, 783, 8 (2014)
2. S. Konami et al. PASJ, 63, 913 (2011)

小山 佑世 氏 (宇宙科学研究所)

7月30日 16:00 - 17:00 B(大コンベンションホール)

## 「マクロとミクロな視点で解き明かす銀河進化と環境効果」

銀河は宇宙のもっとも基本的な構成要素であると同時に、我々自身も銀河系という銀河の住人である。銀河進化の研究とは、銀河の過去の姿を知ることであり、究極には我々のルーツを探る研究であるともいえるだろう。観測によって明らかになる遠方宇宙(すなわち過去の宇宙)の銀河のスナップショットから、現在の宇宙の銀河へと進化する過程を読み解くのが銀河進化研究の基本である。近年の観測技術の向上によって、遠方銀河の研究も単に銀河を「検出」する段階から、銀河がいつ・どこで・どのように進化したかを詳細に研究するフェーズへと移行しつつある。平方度スケール(あるいはそれ以上)の大規模なサーベイが行われ、だれでも比較的簡単に遠方銀河の統計的なサンプルを得ることができるようになった。一方で、地上の大望遠鏡や宇宙望遠鏡を利用して、0.1秒角スケールのミクロな視点で遠方銀河の内部構造を明らかにする研究も最近では急ピッチで進んでいる。講演では、このような新時代の銀河サイエンスを見据えながら、特に私たちが注目する銀河を取り巻く環境と銀河進化の関係(いわゆる「環境効果」)に焦点を当て、私たちがすばる望遠鏡などを用いて取り組んでいる遠方宇宙の星形成銀河サーベイの成果を紹介したい。単なる研究結果の羅列ではなく、特にこれから銀河の研究を本格的にスタートさせたいと考えている皆さんの少しでもヒントになるように、銀河の研究がいかに多様で戦略性に富んだものであるかを実感できるよう努めたい。

## 銀河 a1 高赤方偏移におけるクェーサー光度関数の導出に向けたコンプリートネスの評価

仁井田 真奈 (愛媛大学 M1)

超巨大ブラックホールの形成進化を明らかにするためには、各時代におけるクェーサーの光度関数 (単位体積、単位等級あたりの個数分布) を求めることが重要である。これまでの研究により、近傍のクェーサーの個数密度の進化は明らかになってきたが、遠方の特に低光度のクェーサーの個数密度の進化については、観測の難しさからまだ分からないことも多い (e.g., Ikeda et al. 2011, 2012)。したがって、幅広い光度範囲におけるクェーサーの個数密度の進化を正しく理解するためには、まだ分かっていない高赤方偏移の光度関数を正確に求めることが重要である。

光度関数を正確に求めるための重要な要素の一つにコンプリートネスが挙げられる。本研究では、コンプリートネスは実際のクェーサーを候補天体の中から二色図上で選出できる割合として定義している。従来の光度関数の導出方法では、光度に依らず一定の形状のクェーサーズベクトルを用いてコンプリートネスの計算が行われてきた。しかし、クェーサーズベクトルには低光度のものほど、C IV 輝線等の等価幅が大きいという光度依存性がある (e.g., Croom et al. 2002)。この光度依存性を考慮すると、光度によって二色図上での選出条件に対するカラーの振る舞いが異なるため、コンプリートネスも光度ごとに異なることが予想される。したがって、より正確なクェーサーの光度関数を導出するためには、コンプリートネスの光度依存性も考慮に入れる必要があると考えられる。そこで、我々はスローン・デジタル・スカイ・サーベイ (SDSS) で観測されたクェーサーサンプルを用いて光度ごとに二色図上でのカラーの振る舞いを調べると共に、COSMOS 天域の画像を用いて赤方偏移 4 及び 5 におけるコンプリートネスの評価を行なうことでこの問題の解決を試みた。本講演では、クェーサーズベクトルの光度依存性がコンプリートネスに与える影響について報告する。

1. Ikeda et al. 2011, ApJ, 728, L25
2. Ikeda et al. 2012, ApJ, 765, 160
3. Croom et al. 2002, MNRAS, 337, 275

## 銀河 a2 クェーサーに対するダスト減光効果

白方 光 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M1)

我々は準解析的手法を用いてクェーサー (QSO) の B バンド光度関数を求め、観測と比較した。その目的は以下の 3 つについて考察することである；①ダスト減光効果、②銀河合体から超大質量ブラックホール (SMBH) への質量降着が起こるまでのタイムスケール、③ハローからの cold gas 降着を止めるフィードバック効果である。本研究では準解析的銀河形成モデル  $\nu$ GC (Nagashima et al.2005) に QSO のモデルを導入 (Enoki et al. 2003) したものをを使う。このモデルでは銀河の major merger によって爆発的星形成が引き起こされ、それによって出来た星の質量に比例する質量が major merger と同時に SMBH に降着し始めて QSO 活動が引き起こされる。①を考えるにあたり、ダスト分布は銀河のバルジ半径に一樣分布したものを考える。これは QSO 光度に最も弱い効果しか与えないダスト分布であるため、得られる QSO の放射能率は実際の QSO の放射能率の下限を与えるものである。しかし、得られた放射能率は理論的に考えうる値の上限ぎりぎりであった。そのためモデルの修正が必要で、②について考察する必要が出てきた。cold gas がある程度爆発的星形成で消費されてから QSO が光り始めるモデ

ルに修正したところ、 $z \simeq 1.5$  での光度関数は再現できたが、low  $z$  で明るい QSO が出来すぎている。ここまでのモデルでは、巨大銀河の形成を避けるために、ハローの cooling はハローの回転速度  $V_{\text{circ}}$  が  $V_{\text{circ}} \leq V_{\text{cut}}$  を満たすハローのみに適用されていた。我々はその条件を  $V_{\text{circ}} \leq V_{\text{cut}}(1+z)^\alpha$  に変更し、B バンド光度関数の変化を調べた。

1. Enoki et al 2003, PASJ, 55, 133
2. Nagashima et al 2005, ApJ, 634, 26

## 銀河 a3 アウトフローガスとクェーサー光度の時間変動の関連性

堀内 貴史 (信州大学大学院総合工学系研究科 D1)

クェーサーの降着円盤からは、主に輻射圧によって、アウトフローガスが高速度で放出されている。アウトフローガスは降着円盤から角運動量を取り除き、中心部への新たなガスの降着を促進するため、クェーサーの成長には欠かせない重要な要素である<sup>[1]</sup>。

アウトフローガスの研究ではスペクトル上の幅の広い吸収構造 (BAL)<sup>[2]</sup> が従来用いられてきた。しかし近年では、アウトフローガス由来の線幅の狭い吸収構造 (NAL) や、BAL と NAL の中間的性質を有する mini-BAL も用いられている。アウトフローガスの吸収線は一定の時間間隔をあけて観測したときに、変動を示す場合があるが、その原因は解明されていない。時間変動の原因として、現段階で最も有力な機構が、電離状態変動シナリオである。この機構はクェーサーの光度変動がアウトフローガスの電離状態に変化を及ぼした結果、アウトフローガスに変動をもたらすというものである。激しい時間変動を示す BAL に関しては、このシナリオの正当性は賛否が分かれている。

そこで、本研究では電離状態変動シナリオの検証を、mini-BAL, NAL クェーサーに対して行った。mini-BAL, NAL クェーサーの光度変動をモニターするために、木曾 105cm シュミット望遠鏡/KWFC を用いて、mini-BAL の典型的な変動期間 (数週間から、数ヶ月) を上回る、2 年間に渡り年に 4 回の頻度で行った。その結果、mini-BAL, NAL クェーサーともに同程度の光度変動がみられたが、上記のシナリオをサポートするほどではないことが判明した。またこの結果は、電離状態変動シナリオの補助的な機構の存在を示唆するものである。補助機構の有力な候補は、降着円盤内縁に存在する warm absorber<sup>[3]</sup> の光学的厚さの変動である。

1. Proga et al. 2000, ApJ, 543, 686
2. Weymann et al. 1991, ApJ, 373, 23
3. Krongold et al. 2007, ApJ, 659, 1022

## 銀河 a4 短時間変動選択による低光度 AGN の同定

松本 恵未子 (甲南大学 M2)

活動銀河核 (AGN) の中でも比較的暗い AGN を低光度 AGN と呼ぶ。近年の深探査では、時間変動を示すが、X 線を含むその他の観測では AGN の兆候を示さないものが数多く存在している。しかし、こういう天体は遠方に存在し追観測が難しいため、謎が多く残っている。そこで本講演では低光度 AGN 候補天体の詳細についてと現在の観測状況について発表する。私は、木曾 105cm シュミット望遠鏡での超新星探査 KISS で取得したデータを用いて見つかった近傍における低光度 AGN 候補天

体を時間変動等の情報から低光度 AGN 候補天体を選び出した。候補天体の追観測は岡山 188cm 望遠鏡可視分光装置 KOOLS にて行った。その結果 H $\alpha$  の広輝線は検出されているが、AGN に見られる [OIII] $\lambda$ 4363 等の輝線は検出出来ていない。今後は H $\alpha$  が検出された天体をより詳しく調べると共に、観測を行っていく。

1. Sarajedini, et al. 2006, ApJS, 166, 69
2. Cohen, et al. 2006, ApJ, 639, 731
3. Maoz et al. 2005, ApJ, 625, 699

## 銀河 a5 1 型活動銀河核からの中性鉄 K $\alpha$ 輝線放射スペクトル解析および ASTRO-H 衛星による観測シミュレーション

伊藤 由裕 (東京理科大学 松下研究室 M1)

宇宙に存在する大多数の銀河はその中心部に超巨大なブラックホールを有しており、特に活動性の激しい銀河中心部を活動銀河核とよぶ。活動銀河核の X 線スペクトルには狭い輝線幅をもつ中性鉄 K $\alpha$  輝線 (6.4 keV) が存在し、可視光に比べてダストによる吸収の影響を受けにくい利点がある。したがって活動銀河核と銀河が互いに影響を与え合いながら進化してきたとする共進化現象の解明のために、狭い輝線幅をもつ中性鉄 K $\alpha$  輝線は重要なツールの一つである。

しかしながら、実は中性鉄 K $\alpha$  輝線の放射領域の場所は未だに不確かである。そこで本研究では輝線幅から速度を決定することで、中性鉄 K $\alpha$  輝線の放射領域の推定を目指した。輝線幅の正確な決定には輝線の高精度な観測が求められるため、現行の X 線天文衛星の中で 6.4 keV 付近のエネルギー分解能に優れた Chandra 衛星の高エネルギー回折格子 (HETG) 観測データを使用した。複数の 1 型活動銀河核についてスペクトル解析をおこなった結果、個々の天体について全 HETG 観測データのスペクトルを全て足し合わせることで、個々の観測データと比較して輝線幅の精度を大幅に向上させることに成功した。さらに、可視光観測との比較や観測データから X 線光度を求めて輝線幅と X 線光度の相関についての議論もおこなった。また、2015 年度に打ち上げが予定されている次世代 X 線天文衛星 ASTRO-H の観測シミュレーションをおこなって HETG 観測結果と比較した。ASTRO-H 衛星に搭載予定の SXS 検出器は HETG 観測に比べて有効面積・エネルギー分解能ともに一桁近い向上が見込まれており、HETG 観測と比べてより高精度な中性鉄 K $\alpha$  輝線の観測が可能であると予想される。シミュレーション結果から、SXS による観測では HETG 観測の 1/20 程度の観測時間でも HETG 観測を上回る精度で輝線幅を決定することが可能であると分かった。

1. Yaqoob, T., & Padmanabhan, U. 2004, ApJ, 604, 63
2. Mitsuda, K., Kelley, R. L., Boyce, K. R., et al. 2010, SPIE, 7732,

## 銀河 a6 $z \sim 2$ の Ly $\alpha$ 輝線銀河 (LAEs) のダスト放射の性質とその応用

日下部 晴香 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

銀河のダスト吸収量や星形成率を正確に求めるには、可視紫外だけでなく赤外の放射も調べる必要がある。しかし、小質量の星形成銀河である LAEs の赤外放射は、 $z \gtrsim 1$  ではスタッキング解析を行っても

検出されず、大きな上限値しか得られていなかった (wardlow+13)。そこで我々は、GOODSS 領域の  $z \sim 2$  の LAEs の大きなサンプルに Herschel/PACS と Spitzer/MIPS の深い公開データのスタッキング解析を行なった。これらの LAEs の平均的な紫外線光度は  $L_{UV} \sim 5e9L_{\odot}$ 、星形成率は  $SFR_{UV} \sim 1.4M_{\odot}/yr$  と同時代の典型的な紫外連続光銀河の 1 割程度しかない (Reddy+12)。平均的な赤外光度の  $2\sigma$  上限値は  $L_{TIR} \sim 7e9L_{\odot}$  と強い制限を得ることに成功し、星形成率は  $SFR_{IR} \lesssim 1.2M_{\odot}/yr$  と  $SFR_{UV}$  と同程度以下であることがわかった。IRX $^{\text{def}} = L_{TIR}/L_{UV}$  は 1.5 以下となり、紫外連続光銀河の  $\sim 8$  (Reddy+12) や同時代の cosmic average の  $\sim 5$  (Burgarella+13) よりも遥かに小さい。対応する減光量は  $A_{1600} \lesssim 0.9$  である (Buat+05)。Ly $\alpha$  光子の脱出率は  $0.23 \lesssim f_{\text{esc}} \lesssim 0.43$  となり同時代の典型的な銀河の 0.03 (Hayes+11) と比べて極めて大きい。本サンプルの IRX と  $f_{\text{esc}}$  は、 $z \sim 5-6$  以遠の cosmic average の値 (Burgarella+13, Hayes+11) に相当する。つまり、本研究の結果はダスト放射を観測することがより困難な更に遠方の LAEs への応用や、Ly  $\alpha$  の輻射輸送の理論モデルの議論にも有用である。本講演では、Nebular Emission 入りの SED fitting から得られる物理量も合わせて、LAEs の性質とその応用可能性について議論する。

1. Wardlow et al.2014,ApJ,787,9
2. Reddy et al.2012,ApJ,744,154
3. Burugarella et al.2013A&A 554,70

## 銀河 a7 $z \gtrsim 7$ での Ly $\alpha$ 光度関数の加速的進化とその物理的描像

今野 彰 (東京大学宇宙線研究所 D1)

遠方の星形成銀河の 1 つである Ly $\alpha$  輝線銀河 (LAE) の Ly $\alpha$  光度関数 (LF) の進化を探ることは、宇宙再電離と銀河進化を調べる上で重要である。近年では  $z \sim 7.3$  LAE 探査が精力的に行われている。しかし  $z = 6.6$  と  $z \sim 7.3$  の間で、Ly $\alpha$  LF は無進化であるという研究と、減少しているという研究があり、両者は対立していた。すばる望遠鏡を用いた  $z \sim 7.3$  LAE 探査の研究もあるが、それらの研究では Ly $\alpha$  LF の明るい側しか観測することができず、 $z = 6.6-7.3$  での Ly $\alpha$  LF の進化に明確な結論が出せなかった。そこで本研究では、独自の狭帯域フィルター NB101 を開発した。NB101 をすばる主焦点カメラに搭載し、合計 106 時間の撮像観測を行った。この観測で我々は暗い  $z = 7.3$  LAE を探査し、 $z = 7.3$  の Ly $\alpha$  LF をこれまでに無く高い精度で求めた。その結果、我々は  $z = 6.6-7.3$  で Ly $\alpha$  LF は  $> 90\%$  の信頼性で有意に進化していると結論づけた。さらに我々は、 $z \gtrsim 7$  での Ly $\alpha$  LF の加速的進化を初めて明らかにした。宇宙の星形成率の進化を表す UV LF は  $z \sim 8$  で急速に減少している。従って我々は、Ly $\alpha$  LF の加速的進化は星形成率の進化とは異なるメカニズムで生じている可能性を示した。本講演では、Ly $\alpha$  LF の加速的進化を宇宙再電離で説明できるかを考察し、Ly $\alpha$  LF の加速的進化の物理的描像について議論する。

1. A. Konno et al. arXiv:1404.6066 (2014)

## 銀河 a8 ALMA アーカイブデータを用いたミリ波輝線 銀河光度関数の制限

山口 裕貴 (東京大学理学系研究科付属天文学教育研究センター M1)

近年の研究により宇宙の星形成率密度が宇宙年齢にわたりどのように変遷してきたかが明らかになりつつある。次のステップとしてその原因を理解するには星の材料となる分子ガス量の変遷を調べることが不可欠であり、その方法として無バイアスなミリ波分子輝線探索による分子輝線光度関数の測定が重要である。これまでも CO 分子輝線の偶然検出や原始銀河団をプローブにした CO 分子輝線探索などが行われてきたが、CO 輝線光度関数により強い制限を付けるためには広く深い観測が必要である。本研究では新手法として、ALMA アーカイブデータの利用を提案している。本研究で用いたのは ALMA cycle 0 で行われた銀河団 Abell 1689 の band 6 (230 GHz 帯) による観測である。広さはおよそ 5 平方分にわたり、深さは連続波で  $\sigma \sim 90\mu\text{Jy}/\text{beam}$  を達成している。速度分解能を変えて再解析したところ、観測周波数 241GHz 付近に輝線天体を検出した。再解析後は約 30km/s の速度分解能で  $\sigma \sim 2.5\text{mJy}/\text{beam}$  を達成している。検出した輝線を同定するため、可視光から近赤外線での対応天体をハッブル宇宙望遠鏡の画像で調べたところ I バンドで検出されていた。このため  $z=6.88$  にある [CII] 輝線の可能性が棄却され、CO 回転遷移輝線である可能性が高いことが分かった。この天体の分子ガスの質量は  $10^9 M_\odot$  程度と推定されたが、これは近傍スターバースト銀河 M82 と同等である。これは検出された天体がより一般的な星形成銀河であることを示唆している。検出された天体は 1 つだが ALMA の高い感度を活かし、CO 光度関数に上限を与え、準解析的銀河形成モデルからの予言や従来の観測と矛盾しない値であることが確かめられた。以上より本研究では ALMA アーカイブデータの利用がミリ波分子輝線光度関数の測定に有用であることを示すことができた。

1. Tamura et al. 2014, ApJ, 781, L39
2. Aravena et al. 2012, MNRAS, 426, 258
3. Walter et al. 2002, ApJ, 580, L21

## 銀河 a9 銀河の化学力学進化シミュレーションから探る r プロセス起源天体 I: 銀河系 vs. 矮小銀河

平居 悠 (国立天文台三鷹 M2)

銀河の化学力学進化シミュレーションは、元素の起源を探る有力な手段である。近年の大型望遠鏡を用いた観測により、局部銀河群に存在する矮小銀河中の星の運動、星形成史、化学組成が明らかになりつつある (e.g., [1])。星の化学組成には、その星が誕生するまでに銀河が経験してきた元素合成イベントの痕跡が残されている。銀河の元素分布は、力学進化に由来する星形成史を反映している。したがって、元素の起源を明らかにし、化学進化と力学進化の関係を理解するためには、銀河の化学進化と力学進化を同時にシミュレーションする必要がある。

近年、鉄より重い核種の合成過程である r プロセスの研究が盛んに行われている。r プロセス由来の元素 (r プロセス元素) の起源としては、重力崩壊型超新星爆発と中性子星合体が考えられている。しかし、どちらが有力な起源か明らかになっていない。本研究は、N 体/Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) コード、ASURA[2, 3] に超新星爆発、中性子星合体の化学進化モデルを導入し、銀河の化学力学進化シミュレーションを行うことで、r プロセス元素の起源天体を制限することを

目的とする。

本講演では、超新星爆発で r プロセスが起こったと仮定した場合について化学力学進化シミュレーションを行った結果を報告する。まず、重力崩壊型超新星爆発の内、親星の質量が 9-10  $M_\odot$  または、30  $M_\odot$  以上の超新星で r プロセスが起こったと仮定して銀河系モデルで計算した場合について報告する。9-10  $M_\odot$  の超新星や中性子星合体では、r プロセスに富んだ星の観測結果を説明できるが、30  $M_\odot$  以上の超新星では難しいことを示す。続いて、矮小銀河モデルで r プロセスの進化を計算した結果を示し、低質量な銀河における r プロセス元素の進化と力学進化の関係を調べる。さらに、銀河系及び矮小銀河中の r プロセス元素組成比の観測結果と本シミュレーション結果を比較することにより、r プロセス元素の起源を制限する。

1. E. Tolstoy, V. Hill, and M. Tosi ARA&A 47 371 (2009)
2. T. R. Saitoh et al. PASJ 60 667 (2008)
3. T. R. Saitoh et al. PASJ 61 481 (2009)

## 銀河 a10 Gas-rich な矮小銀河内の HII 領域の形態と 分布

高橋 晴香 (東京大学大学院理学系研究科天文学教育センター M1)

銀河は金属元素をほとんど含まない原始銀河ガス雲から誕生し、星生成を繰り返しながら進化してきたと考えられている。金属元素は星の内部で作られるため、銀河中の金属量はその銀河の星生成、すなわち進化を反映している。銀河の金属量はその質量と強い正の相関をもつことが知られているが (mass-metallicity relation ; Tremonti+2004, ApJ, 613, 898)、その背景にある物理は未だ説明されていない。

Mass-metallicity relation においては、銀河の質量が減少するとともに金属量が急激に落ち込むので、低質量銀河である「矮小銀河」を観測することは問題解決の糸口となる。この金属量の急激な落ち込みは、超新星爆発によって放出された金属濃縮ガスが、矮小銀河の小さな重力ポテンシャルには捕まらずに銀河の外に流出するという解釈によって説明されてきたが、観測的な実証はないのである。

この矮小銀河における金属量汚染のメカニズムを明らかにするため、近傍の 3 つの低金属量の gas-rich 矮小銀河について H  $\alpha$  輝線の深撮像データを解析し、HII 領域の形態と分布を調べた。観測は「すばる」望遠鏡 FOCAS を用いて 2011 年 6 月に行われた。本発表ではプレリミナリーな解析結果について紹介し、H  $\alpha$  輝線の分布について議論する。

1. Tremonti+2004, ApJ, 613, 898

## 銀河 a11 空間分解された近傍銀河における星形成則 の研究

照屋 なぎさ (名古屋大学、銀河進化学研究室 (Q 研) M1)

銀河の進化を考える上で、星形成に関わる量を正確に評価することは本質的に重要である。単位時間あたりに作られた星の総質量を星形成率 (SFR) といい、星形成の活発さを表す指標の 1 つである。

銀河の星形成率を知るためには、寿命の短い大質量星 (寿命  $10^{6-8}$  yr) がよい手がかりとなる。この大質量星は、紫外線 (UV) 領域にピークを持つ光を放射する。そのため、初期質量関数 (IMF) を仮定することに

より、観測された紫外線量からその領域の大質量星の数を推測することができる。

一方で、星形成を活発に行っている領域ではダストと呼ばれる  $1\mu\text{m}$  以下の固体微粒子が形成されており、そのダストが UV を吸収し遠赤外線 (FIR) で再放射する。そのため UV の観測データのみから星形成率を推定すると過小評価になってしまう可能性があり、星形成率は UV と FIR の両方の効果を考えて見積もる必要がある。

本研究では、GALEX (UV) と Herschel SPIRE (FIR) の撮像データを使用し、空間分解された銀河について星形成率を見積もった。また SDSS (可視光) と 2MASS (近赤外) の撮像データを用いて、星質量の密度と星形成率の密度の関係を調べ、グローバルな銀河の性質 (形態) との比較を行った。

## 銀河 a12 「すざく」衛星によって観測されたアンドロメダ銀河の重元素組成比

長谷川 俊介 (東京理科大学 松下研究室 M1) 渦巻銀河には広がった高温ガスが付随している場合があり、X 線で観測することによって高温ガス中に含まれる元素やその分布等を調べることができる。高温ガス中の元素はその銀河内の星が最期に起こした超新星爆発や星からの質量放出によって供給されたと考えられていて、酸素やマグネシウムは主に重力崩壊型超新星爆発から生成されるが、鉄やケイ素は重力崩壊型と炭素爆発型の両方の超新星爆発によって生成される。よってこれらの元素比は現在の星形成活動を反映した 2 種類の超新星爆発の回数の割合を表すため、銀河の星形成史及び進化過程を知るうえで重要な役割を持つ。これまでの研究によって、楕円銀河や S0 銀河のような星形成活動があまり活発ではない早期型銀河の高温ガスからは炭素爆発型超新星爆発の割合が多いという結果が得られているのに対し、星形成活動が活発な銀河の高温ガスには重力崩壊型超新星爆発により合成された元素が多く含まれると予想されている。例えばスターバースト銀河 M82 から吹き出す銀河風領域の高温ガスに含まれる酸素、ネオン、マグネシウムの元素組成比は、我々の銀河のものより 2~3 倍ほど高く、活発な星形成活動で生まれた多くの大質量星による重力崩壊型超新星爆発の寄与が大きいという結果が報告されている (Konami et al. 2011)。

アンドロメダ銀河は我々の銀河系近傍 (~800kpc) に位置する大型の渦巻銀河である。私は X 線天文衛星「すざく」を用いて、アンドロメダ銀河の中心部とその周辺の領域の高温ガスに含まれる元素量を決定した。本講演では、酸素、ネオン、マグネシウム、ケイ素の各元素量と鉄の元素量の比を取って超新星爆発の理論モデルや他の渦巻銀河の結果と比較し、アンドロメダ銀河での元素合成において 2 種類の超新星爆発がどのように寄与したか、また他の渦巻銀河との違いが元素組成比に見られるかどうかについて議論する。

1. Konami, S. et al., 2011, PASJ, 63, 913

## 銀河 a13 近傍渦巻銀河における星形成効率と高密度分子ガスの関係

武田 美保 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1) 宇宙には様々な銀河が存在している。これらの銀河の多様性を理解するためには、その進化の素過程である星形成を理解することが重要である。近年、特に星形成効率と高密度分子ガス存在比の関係が注目されており、例えば M 83 で詳しく研究された例がある (Muraoka et al.2007)。この

研究から、棒渦巻銀河 M 83 では中心領域と円盤領域では星形成のモードに違いがあること、そして高密度ガス存在比が星形成効率を支配している可能性が示唆されている。そこで中心領域で星形成が活発な M 83 とは異なって、中心領域で星形成が活発でない渦巻銀河 NGC 628 において高密度ガス存在比と星形成効率の関係を調べた。すると NGC 628 では、銀河中心からの距離に対する星形成効率と高密度分子ガス存在比の分布は共に一定となった。このことから、中心領域と円盤領域では星形成のモードに違いが無いことがわかった。また、M 83 と NGC 628 の星形成効率と高密度分子ガスの関係を比較すると、高密度分子ガス存在比が星形成効率を支配するという関係は、銀河一般で見られる可能性が示唆された。そこで近傍の渦巻銀河・棒渦巻銀河を対象として、高密度分子ガスと星形成効率の関係をさらに詳しく調べた。

1. Muraoka et al.2007

## 銀河 a14 弱い重力レンズ効果を用いた銀河のバリオン質量直接測定への展望

小林 将人 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (Ω研) M2) 銀河形成・進化を研究するにあたり、バリオンとダークマターの相互作用を明らかにすることは非常に重要である。特に銀河とその周囲におけるバリオンとダークマターの分布は、銀河形成・進化の歴史を反映していると考えられる。弱い重力レンズ効果は、そうした銀河周囲の質量分布を探索できる強力なツールである。しかし現在、弱い重力レンズ効果の測定はダークハローの質量分布探索 (数百 kpc 以上のスケール) に限定されていることが典型である。もし弱い重力レンズ効果の測定を、より小さなスケール (特に銀河近傍の数十 kpc スケール) まで推し進めることができれば、弱い重力レンズ効果から銀河のバリオン質量を直接捉えることも可能となる。

バリオン質量の中でも、特に星質量は銀河の性質を評価するために基本的な物理量である。星質量は通常、銀河の年齢や金属量、初期質量関数などの仮定をもって、光度から換算して算出される。しかしこれらの仮定の取り方次第で、算出される星質量も異なってしまう (参考:文献 [1],[2])。仮に弱い重力レンズ効果の測定から、こうした仮定を含まずに星質量の直接推定が実現すれば、これらの仮定へ制限を付けることも期待できる。

本発表では、ハッブル宇宙望遠鏡 HST で観測された COSMOS 領域のデータから得られた、弱い重力レンズ効果の解析結果を紹介する。特に 1) 弱い重力レンズ効果を、どの程度小スケールまで測定できるか、2) 将来観測による、弱い重力レンズ効果を用いた銀河の星質量測定の可能性、に着目して報告する。

1. S. Courteau, et al. Reviews of Modern Physics, **86**, 47, (2014)
2. C. Conroy, et al. ApJ, **699**, 486 (2009)
3. A. Leauthaud, et al. ApJ, **744**, 159 (2012)

## 銀河 a15 表面測光による $z\sim 1$ の楕円銀河の詳細な形状分析

満田 和真 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

我々は Hubble Space Telescope (HST) Cluster Supernova Survey で

得られた  $z \sim 1$  の銀河団の楕円銀河の等面輝度形状の詳細な分析を行っている。近傍の楕円銀河は等面輝度線 (コントラ) の歪みから Boxy 型, Disky 型に分類され, その違いは楕円銀河の形成過程に起因すると考えられている。Boxy 型は質量が大きく速度分散が卓越するが, Disky 型は比較的軽く回転運動が卓越するなど質量や力学構造との関係があり, Boxy 型には X 線放射が付随する。このようなことから, Boxy 型はガスの少ない merger で速度分散が卓越することで形成され, また Disky 型はガスの多い merger でガスの角運動量で回転が卓越することで形成されるという説が有力である。ところが遠方において, 近傍の観測結果と比較できる詳細な分析結果がなく, 楕円銀河の形状や力学構造がいつ, どのようにして形成され, 進化してきたかはよくわかっていない。遠方銀河は視直径と面輝度が小さく, 詳細に形状を分析できる質の高いデータを取得するのが難しかったためであり, また遠方銀河詳細な形状を分析するのに最適化された手法がなかったためである。しかし, 我々のチームは HST の撮像データの中でも, 何枚もの画像を他の HST データよりも精度よく足し上げ, 詳細な形状の分析に耐えうる高品質のデータを作成した。そこで我々は, 赤方偏移 1 程度の楕円銀河について詳細な形状を分析するために, 遠方楕円銀河の形状分析に最適化された表面測光の手法を開発した。前述の HST データで, 分光で赤方偏移が決定している  $z \sim 1$  の楕円銀河について, 明るめのを開発中の表面測光の手法でコントラの歪みを測定し Boxy 型, Disky 型に分類した。現在得られているのは preliminary な結果であるが, 明るめサンプルについては  $z \sim 1$  でも Boxy 型, Disky 型に分類できることがわかった。今後, 暗めのサンプルについても表面測光によって Boxy 型, Disky 型に分類し, 近傍の楕円銀河や理論モデルと比較することで Boxy 型, Disky 型の形成過程を探っていく。今回は, これらの楕円銀河を Boxy 型と Disky 型に分類した結果を, 近傍との比較や近傍楕円銀河の面分光観測による Slow Rotator や Fast Rotator という分類との関係とともに報告する。

1. J.Kormendy & R.Bender 1996, ApJ.464.L119
2. S.Khochfar & A.Burkert 2005, MNRAS.359.1379
3. E.Emsellem et al. 2011, MNRAS.414.912

## 銀河 a16 miniTAO/ANIR, UH88/WFGS2 を用いた LIRG ダスト減光量の測定

小早川 大 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

宇宙の星形成活動は  $1 < z < 3$  の時代にピークを迎え, それらの活動の大部分が Ultra/Luminous Infrared Galaxy (U/LIRG) によって担われてきたと考えられている。そのため, U/LIRG の観測によって宇宙の星形成活動を明らかにできると考えられるが, 遠方宇宙の観測では空間分解能が悪く, それらの詳細な物理過程の解明は難しい。一方, 近傍宇宙の観測では空間分解能が十分に与えられるため, 本研究では  $z < 0.1$  の近傍の U/LIRG を観測することによりその過程に迫ろうとしている。

現在, 南米チリ・アタカマのチャナントル山頂 (標高約 5600m) には東京大学アタカマ天文台 (TAO) があり, 口径 1m の赤外線望遠鏡 (miniTAO) が運用されている。miniTAO には近赤外線カメラ ANIR (Atacama Near-infrared Camera) が搭載されており,  $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  の波長域での撮像が可能である。TAO サイトは赤外線を吸収する水蒸気の量が少ないため, 他のサイトでは観測が困難な Pa $\alpha$  輝線のデータを取得することができる。Pa $\alpha$  は水素の再電離結合線で, 可視域の H $\alpha$  に比べダスト減光に強く, 銀河の中心部などの星形成活動が活発な領域を

見通すことができる。

これまでの ANIR による Pa $\alpha$  観測では LIRG の星形成領域の分布において中心集中度 (C-index) に 2 つのモードがあることがわかっている。しかし, ダストによる Pa $\alpha$  の減光量に不定性があり, 正確な C-index の値を求めることが困難であった。

発表者は, H $\alpha$  輝線の観測により Pa $\alpha$  との比較からダスト減光量を見積もることを目標にした。そのため, ハワイ大学 88 インチ望遠鏡 (UH88) の分光器 Wide Field Grism Spectrograph 2 (WFGS2) を使用して LIRG の H $\alpha$  観測を行った。本講演では, UH88 の観測データを用いた LIRG ダスト減光量の測定結果について発表する。

## 銀河 a17 Measuring galaxy environment at $z \sim 1.6$ with Subaru's FMOS

柏野 大地 (名古屋大学 C 研 D1)

本発表ではすばる望遠鏡ファイバー多天体分光器 (FMOS) による近赤外分光観測 (FMOS-COSMOS サーベイ) の最新の成果を発表する。我々はこれまでに 2000 個を超える  $z \sim 1.6$  の銀河を観測し, 約 1000 個について H $\alpha$ , [OIII] 輝線などから赤方偏移を測定した。このカタログに基づいて高赤方偏移の 3 次元銀河地図及び密度マップを作成した。我々のマップは同程度の赤方偏移における銀河地図の中では特に高密度であり, サブ Mpc スケールでのクラスタリングシグナルを高い SN で検出した。また, 局所的な銀河密度と星形成率などの内的性質との相関の有無について調べた。これらの結果を考察し, 環境が銀河進化に与える影響について議論する。

1. Kashino et al. 2013, ApJ, 777, L8

## 銀河 a18 Extended Study of Faint Submillimeter Galaxies with Multifield Deep ALMA Data

藤本 征史 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

Submillimeter Galaxies (SMGs) はその発見以来 (Smail, Ivison, & Blain.1997), 現在の大質量楕円銀河の祖先として考えられており, 宇宙初期の星形成や銀河進化を考える上で重要である (e.g., Baugh+2005)。それらの銀河進化状態を知る上で遠方銀河の分子ガスの研究というのは一つの有用な手段である。

一般的に SMG は  $100 - 1000 \text{ Mo/yr}$  程度の高い星形成率を持つ大質量の遠方銀河として知られている一方で, 星形成率が  $100 \text{ Mo/yr}$  かそれ以下の SMG についてはその個数密度や宇宙星形成率, 宇宙赤外線背景放射への寄与などは良くわかっていない。また遠方銀河の分子ガスの研究に関して, 高い星形成の性質から来る UV や FIR の放射を利用し選出された  $\sim 200$  個の遠方銀河について CO 放射を検出してきているが (e.g., review by Carilli & Walter 2013), 選択バイアスのない分子輝線サーベイはその観測効率の面からまだまだあまり行われていない (e.g., Decarli et al. 2014, Ono et al. 2014)。

これらの問題を解決するため, 我々は ALMA アーカイブデータを利用した。Ono et al.(2014) で用いた 10 領域の深い ALMA データに新たな ALMA データを加え暗い SMG の個数密度を求め, これらがもたらす宇宙星形成率, 宇宙赤外線背景放射への寄与を示す予定である。また, Kurono et al. in prep による独自のアルゴリズムを用いた, ALMA の深い 3 次元データに対する効率的な分子輝線サーベイの可能性について

でも議論したい。

1. Ono, Y.; Ouchi, M.; Kurono, Y.; Momose, R. 2014 arXiv:1403.4360
2. Decarli, R.; Walter, F.; Carilli, C.; Riechers, D. et al. 2014 ApJ, 782, 78D

## 銀河 a19 重力レンズで探る形成初期の銀河の性質と進化

川俣 良太 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

形成初期の銀河の性質や、現在の銀河までの銀河進化の過程を追うためには、銀河のサイズや形態の進化を知ることが重要となる。これまでの研究 (e. g., Ono et al. 2013) では、過去ほどサイズが小さい傾向が見られているが、 $z > 6$  の銀河に対しては、精度良くサイズを測ったサンプルの数は乏しく、サイズと光度の関係や星形成率面密度を議論するには十分ではない。この問題を解決するため、我々は Hubble Frontier Fields (HFF; PI: J. Lotz) のデータを利用し、形成初期の銀河のサイズを測定した。HFF は、重力レンズ効果の強い 6 つ銀河団を深く撮像し、背景にある高赤方偏移銀河の性質を探ることを目的としている。重力レンズ効果には、暗い銀河を明るくする効果だけではなく、銀河の像を拡大する効果もあり、レンズ効果を受けた銀河はサイズの研究に適したものである。我々は、重力レンズ効果を受けた銀河の撮像データから、その銀河の真の明るさとサイズを求めるコードを構築した。レンズされた銀河の画像に最もよく合う真の等級と有効半径を、暗い銀河の測光において避けて通れない系統誤差も考慮して推定するものである。このコードの中核を成すものは、共同研究者の大栗真宗が開発し公開している `glafic` というレンズ効果を扱うソフトウェアである。作成したコードを現時点で観測が完了している Abell 2744 に適用した結果、サイズが測定された銀河の数を先行研究から倍増させることに成功した。そのサンプルから、(1) サイズと明るさには相関があるが、先行研究が示唆するよりも弱いこと、(2) サイズが銀河の進化段階のよい指標となっていること、(3)  $z \sim 7-8$  の銀河の星形成の様子は、中心核付近で爆発的に星形成している現在の特殊な銀河の中心領域でのそれと似ていること、(4) 銀河のサイズとハローのサイズの比は、 $z \sim 4-8$  で約 3.5% で一定であることを明らかにした。本講演では、これらの結果を報告し、それに基づいて議論する。

1. Ono, Y., Ouchi, M., Curtis-Lake, E., et al. 2013, ApJ, 777, 155
2. Oesch, P. A., Bouwens, R. J., Carollo, C. M., et al. 2010, ApJL, 709, L21
3. Behroozi, P. S., Wechsler, R. H., & Conroy, C. 2013, ApJ, 770, 57

## 銀河 a20 VIPERS を用いた、 $0.5 < z < 1.3$ の銀河の質量分布、速度分散分布の解析

吉田 博哉 (名古屋大学、銀河進化学研究室 (Q研) M1)

現在、様々な大規模サーベイや N 体シミュレーションにより宇宙の大規模構造を形成する天体の分布が明らかになってきている。大規模構造の中で重力でまとまった天体をダークハローと呼び、その内部には星や星

間物質 (バリオン) から成る銀河が存在する。N 体シミュレーションからはダークハロー分布の統計的性質が得られており、サーベイからは銀河の性質が追求されている。ここで、ダークハローと銀河の分布を比較することでダークマターとバリオンの分布が関連づけられる。今回、私は銀河の質量分布と銀河団や銀河群に存在する銀河の速度分散分布を推定した。特に観測データから速度分散分布を測定する研究は発展途上であり、これに関連した未解決問題が多く存在している。

本研究では過去にない高赤方偏移かつ大規模の観測から銀河分布を求めるために、The VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS) の 53,608 個の銀河データを解析した。VIPERS は  $24\text{deg}^2$  という広大な観測範囲にて  $i_{AB} < 22.5\text{mag}$ ,  $0.5 < z < 1.3$  の高赤方偏移かつ暗い銀河を分光及び赤外線から可視光の 5 バンドの測光で観測している。このサーベイは大規模構造や銀河進化の問題解決を目的としているため、本研究に最適な観測データである。

この VIPERS の測光観測データから、スペクトルエネルギー分布 (SED) フィッティングを行い、個々の銀河の星質量を推定した。更に銀河の星質量関数を算出し、銀河の星質量分布の赤方偏移進化を追った。また分光観測のデータを用いて銀河団、銀河群のメンバー銀河の速度分散を算出して、速度分散分布関数を推定した。更にシミュレーションを用いて観測データを再現したモックカタログを用いて質量分布と速度分散分布を独自に算出した。そしてこの結果を観測データから得られた結果と比較した。本発表では、これらの研究成果を発表する。

## 銀河 a21 銀河団外縁部のエントロピー異常の原因の検証

栗山 翼 (東京理科大学 松下研究室 M1)

銀河団は力学的に束縛された宇宙最大の天体である。小さな構造の衝突合体によって成長したと考えられ、現在も大規模構造から質量降着を受けている。質量降着時に外縁部の高温ガスは銀河団自身の重力に応じた衝撃波加熱を受けるため、加熱の指標であるエントロピーパラメータは外側ほど最近の強い衝撃波加熱によって上昇すると考えられていた。しかし「すざく」衛星を用いて銀河団の半径であるビリアル半径まで観測した結果、エントロピーパラメータは 0.5 ビリアル半径までしか上昇せず、それより外側ではほぼ一定の値となることが確認された (e.g., Sato et al. 2012)。エントロピーパラメータは密度の  $2/3$  乗に比例するため、異常の原因の一つとして外縁部の高温ガスの密度むらによって密度を過大評価していることが挙げられている (Simionescu et al. 2011)。

降着してきたガス塊が銀河団ガスと十分混ざっていない場合、外縁部のガス密度にむらが出来ると考えられる。そのため、ガス塊の存在が確認出来れば密度が受ける影響を評価することが出来る。このガス塊が十分大きく明るい場合、周囲よりも明るい X 線源として観測出来る可能性がある。我々は近傍の中規模銀河団である Abell 2199 銀河団の外縁部について「XMM-Newton」衛星と「すざく」衛星を用いて観測した。検出された個々の X 線源についてスペクトル解析を行い、X 線強度と個数密度の関係 ( $\log N - \log S$  関係) から数を評価した。銀河団内外の活動銀河核等も点源として同時に検出される。そのためスペクトルの調査による点源の種類の確認、明るい X 線天体のいない領域との  $\log N - \log S$  関係の比較、の二つを行い銀河団内のガス塊の数を評価した。本講演ではこのガス塊が存在するのか、ガス塊による密度むらがエントロピーにどれだけ影響し得るのかについて議論する。

1. Sato et al. PASJ, 64, 95S (2012)

2. Simionescu et al. Science, 331, 1576 (2011)

2. K. Mawatari et al. ApJ, 759, 133 (2012)

3. M. Kubo et al. ApJ, 778,170 (2013)

## 銀河 a22 高赤方偏移原始銀河団候補のダークハロー質量

玉澤 裕子 (東京大学宇宙線研究所 M2)

形成中の銀河団である原始銀河団は、主に赤方偏移  $z > 2$  に存在し、やがて現在の銀河団に進化すると考えられている。そのため、原始銀河団は、銀河団の形成過程を解明するのに重要な天体である。銀河団の形成過程に関して、高赤方偏移の原始銀河団がどの程度のダークハロー質量を持ち、将来どの程度の質量を持つ銀河団に進化するか未解明であるという問題が存在する。高赤方偏移での銀河団の質量集積史を観測的に解明することを目標に、SXDS で  $z \sim 4-6$  の原始銀河団候補を同定した所、 $z \sim 5$  で原始銀河団候補が 1 つ見つかった。Millennium Simulation[1] と、この同定した原始銀河団候補を比較することで、そのダークハロー質量を推定した。さらに、その原始銀河団候補が現在までにどの程度の質量を持つ銀河団に進化するか議論する。

1. Springel V. et al., Nature, 435, 629 (2005)

## 銀河 b1 $z = 2.4$ の 53W002 原始銀河団における大質量銀河探索

濱口 恵梨香 (愛媛大学 M1)

現在の宇宙では、大質量の早期型銀河は銀河団に多く見られる。また、これまでの観測から、これらの早期型銀河は比較的古い星から構成されていることがわかっており、 $z > 2$  の昔の時代に形成されたと考えられている。したがって、高密度領域での早期型銀河の形成過程を明らかにするためには、 $z > 2$  の原始銀河団を直接観測することが重要となる。本研究では、近赤外撮像観測を用いて、 $z = 2.4$  の 53W002 原始銀河団において大質量銀河探索を行った。

53W002 領域は、電波銀河 53W002 の周辺に 5 Mpc にわたる LAE の高密度構造が発見されており (Mawatari et al. 2012)、原始銀河団であると考えられている領域である。その LAE の構造をカバーするように、すばる/MOIRCS を用いて近赤外線撮像観測 ( $J, H, K_s$  バンド) を行った。まず、 $z = 2-3$  の銀河が Balmer / 4000 Å ブレイクによって特徴的な  $JHKs$  カラーを示すことを利用して (Kajisawa et al. 2006)、 $z \sim 2.4$  の銀河候補を選び出した。これらの天体は、 $z \sim 2$  の銀河だとするとその等級から  $10^{10}$  太陽質量以上の星質量を持つと期待される。この  $JHKs$  選択銀河を用いて、大質量銀河がどこにどのくらい存在するのか、数密度は一般領域と比較してどのくらいなのかを調べると、LAE の構造に沿って大質量銀河の密度超過が見られる。次に、その  $JHKs$  選択銀河の  $B, J, H, K_s, IRAC [3.6\mu m]$  の SED を用いて、星質量や星生成率を調べた。その結果、大質量銀河の中には星形成銀河だけでなく、passive な銀河も存在することがわかった。このことから、銀河団としての構造が完成する前の段階で、若くて星質量の小さい LAE が密集した領域に、既に大質量で passive な銀河がある程度存在している可能性が示唆された。また、講演では、個々の天体では近赤外線では検出されない LAE の星質量や星の種族を調べるために行った、 $J, H, K_s$  バンドの stacking analysis の結果も紹介する予定である。

1. M. Kajisawa et al. MNRAS, 371, 577 (2006)

## 銀河 b2 ダスト減光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、銀河進化学研究室 (Q 研) M2)

銀河の構成要素である星は、その内部で核融合反応により重元素を形成している。それらの重元素が星間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。銀河の化学進化はその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。

星間空間に放出された重元素の大部分は、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、そのエネルギー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減光と、ダスト粒子から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。

これらのモデルを用いて、銀河の様々な進化のシナリオについて SED の時間進化を計算した。その結果から以下の 3 点を導いた。

1. スペクトルの形や時間に関する振る舞いは、銀河進化のシナリオに依らず定性的に類似している。
2. 一般的な渦巻き銀河では、年齢が 500 Myr から 1 Gyr の時に、減光の割合が最大になる。
3. 現在可視光で観測できる銀河は、過去に一度赤外線では明るい状態を経験している。

今回構築したモデルを用いることで、銀河年齢の関数として銀河内の重元素量が求まり、ダストの減光や再放射も重元素と整合的に計算できる。さらにこれを発展させることで、高赤方偏移銀河の星形成率や金属量、ダスト量など、重要な物理量の推定に利用できる。

本発表ではこれらの結果について報告する。

## 銀河 b3 ALMA アーカイブデータによる近傍銀河 NGC253 の回転曲線および質量分布の導出

内間 克豊 (明星大学大学院理工学研究科物理学専攻 M2)

銀河の回転曲線は、渦巻銀河の運動学的特徴を表す重要な観測の一つであるとともに、ダークマターの質量を求めるうえでも大切な観測である。祖父江ら (2003) による先行研究では、野辺山ミリ波干渉計を使用して 12CO(J=1-0) 輝線の分子ガスの観測をおとめ座銀河団の銀河 (距離  $\sim 16$  Mpc) で行い、そこから回転曲線を描いて中心部の回転速度や質量分布を求めている。可視光や中性水素ガス (HI) 21cm の輝線ではなく一酸化炭素 (CO) 2.6mm 輝線で行うのは、一酸化炭素分子が銀河中心部に多量に存在し、かつ精度のよいドップラー速度の観測が可能だからである。

野辺山ミリ波干渉計の分解能は 6arcsec ( $\sim 500$  pc) 程度だったが、ALMA のデータを使用することでより精度が高く詳細な情報が得られる。とくに、NGC3079 やおとめ座銀河団において、銀河中心部に存在

が確認されている大質量のダークマターコア ( $\sim 10^7 M_\odot$ ) に関連した詳細な情報を得ることが可能である。

本研究では、ALMA データアーカイブの中から Band3 の 12CO(J=1-0) 輝線に絞込み、そこからちょうこくしつ座方向にある NGC253 をピックアップした。NGC253 は距離が 3.5Mpc と近いので、より高い空間分解能で中心部の情報を得られる。このデータから回転曲線を求め、そこから中心部の質量分布を導出した。本講演ではこの結果について報告する。

1. Sofue et al. PASJ 55 59 (2003)

## 銀河 b4 Herschel Protocluster Survey at $z = 2 - 3$

加藤 裕太 (国立天文台三鷹 M2)

初期宇宙において発見される原始銀河団では、銀河の衝突合体を 1 つの要因として平均的な数密度を持つ一般天域と比べて星形成活動が活発であることが予想されている。しかしながらこれまでの原始銀河団の研究は静止系紫外・可視光に基づくものが多く、最も激しい星形成活動を示す爆発的星形成銀河が原始銀河団にどれくらい出現するかははっきりしていないため [1]、原始銀河団の星形成活動を議論することが難しかった。爆発的星形成銀河では大質量星から放射された紫外光がダストに吸収され、結果的に赤外～ミリ波・サブミリ波帯でダストの再放射が顕著になるため、遠赤外線からサブミリ波での観測を行えば、宇宙初期の爆発的星形成銀河の”ダストに隠された星形成”を捉えることができる。我々は、SSA22, HS1700, 2QZ Cluster ( $z = 3.1, 2.3, 2.2$ ) という原始銀河団をハーシェル宇宙望遠鏡で観測し、爆発的星形成銀河の個数や空間分布、赤外線光度を、一般天域と比較した。その結果、HS1700, 2QZ Cluster において静止系紫外・可視光で見つかった原始銀河団銀河の数密度ピークの近傍に、爆発的星形成銀河の高密度領域を発見した。しかし、今回捉えた爆発的星形成銀河は SPIRE バンド (250/350/500 $\mu\text{m}$ ) の色が  $z \sim 2$  と合うように選択されたものであり、そのすべてが原始銀河団に付随しているかを確かめるには正確な赤方偏移を測る必要がある。本講演ではこれらの初期結果と今後の展望について議論する。

1. Casey et al. 2014
2. Valtchanov et al. 2013
3. Rigby et al. 2013

## 銀河 b5 銀河中心の YOUNG STELLAR DISK の二体緩和による進化

伊藤 勇太 (国立天文台三鷹 M1)

我々の銀河中心には約 200 もの若い星が存在し、それらは巨大質量ブラックホール (SMBH) 周りを回転し、ディスク様構造を形成している事がわかっている。ディスク上の星の密度プロファイルは  $\Sigma \propto R^\beta$  ( $\beta = -2$ ) のべき法則に従うと考えられていたが、最近になって Broken power-law の方がディスクの密度プロファイルを上手く説明できる事がわかってきた。本講演では、この Broken power-law の密度プロファイルが二体緩和によるディスクの進化の帰結として説明出来る事を示した最新の論文のレビューを行う。

SMBH 周りのディスクはコヒーレントに回転しており、星同士の相対速度が小さくなる。それ故、二体緩和のタイムスケールは短くなり、そ

の効果はディスクの進化に十分に効いてくる。ディスクの密度プロファイルの進化を N 体計算により調べた結果、内側、つまりディスクの最も高密度な場所では、プロファイルは平ら ( $\beta \approx -1$ ) となり、一方、外側では初期の状態を維持した。また、観測的に予測されるディスクの密度プロファイルと数値モデルを比較することにより、観測データは初期の密度プロファイルが  $-2 \lesssim \beta \lesssim -1.5$  のべきで記述出来る場合の二体緩和によるディスクの進化の結果として説明できる事を示した。更に、二体緩和により若い星の SMBH 方向への移動が引き起こされることから、二体緩和が SMBH 近傍 ( $\lesssim 0.04pc$ ) の星、つまり S-star の形成について重要な役割を担っている可能性を提示した。

銀河中心の星の軌道を調べ、緩和過程などによるその変化を知る事は、ディスクの進化を含めた様々な銀河中心での物理を調べる上で重要である。その為には、近赤外線による銀河中心の星の高精度位置天文観測が必要であり、中型 JASMINE などの次世代位置天文衛星の打ち上げが期待される。

1. Suber.L. and Haas.J. 2014,ApJ,786,121

## 銀河 c1 銀河風の高精度流体シミュレーションに向けて

結城 文香 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

宇宙では銀河から星間ガスが高速で流出する銀河風という現象が観測されている。銀河風は銀河の進化・形成に大きな影響を及ぼす現象なので、様々な観点から研究が行われている。これまで銀河風は近傍の銀河 M82 などで観測されてきたが、近年高赤方偏移の銀河でも銀河風の痕跡が確認されている。星間物質を構成する分子の平均自由行程は対象とする現象の典型的尺度より十分小さな場合が多く、流体近似がよい近似である場合が多い。そのため流体シミュレーションを用いた研究が盛んに行われている。宇宙では衝撃波を伴う現象が起こるため、衝撃波を高精度で計算することができるスキームは重要である。今回の研究では衝撃波を高精度にとらえることのできるスキームとして、数値流束を Riemann 初期値問題の解析解を使って構成する Godunov 法 (Godunov 1959) を取り上げ、その概念とコード制作の経過を発表する。今後の目標としては、作成したコードを使って高赤方偏移で観測されている銀河風の理論モデルを構築したいと考えている。

1. Godunov, S.K. , MathmaticheskiiSbornik , 47,271-306(1959)
2. 坂下志郎, 池内了,[宇宙流体力学], 培風館,1996

## 銀河 c2 衝突銀河団 CIZA J1358.9-4750 の観測

加藤 佑一 (東京大学牧島中澤研究室 M2)

銀河団の衝突は宇宙における最大のエネルギー解放イベントである。その際には衝撃波が発生し、その結果として高温プラズマが加熱されるとともに、乱流が励起される。衝撃波と乱流は、粒子を加速し、また磁場増幅を引き起こす。しかし、乱流、粒子加速、磁場増幅といった「非熱的エネルギー」のどれにどれだけの重力エネルギーがとぎ込まれるかは、わかっていない。

この問題を知るには、衝突速度や元の銀河団の質量などのパラメータを正確に求める必要がある。2つの銀河団が互いの中心を通り過ぎる前の衝突始めであれば、ジオメトリが簡単であり、パラメータを精度よく

決めることができる。ところが、衝突が始まったばかりの例は数少なく、さらに明白な衝撃波がある天体は存在していなかった。

そこで、我々は銀河面に近く、観測が進んでいなかった領域の銀河団を集めた CIZA カタログ (CIZA: Clusters in Zone of Avoidance) に着目し、CIZA J1358.9-4750 を選出した。この天体は2つの X 線ピークとその間を結ぶ明るい“ブリッジ”のような構造を持つ。我々は「すざく」による観測を提案し、その観測データの解析により、“ブリッジ”領域の温度が2つの X 線ピークよりも1.6倍以上高くなっていることを明らかにした。この温度分布や X 線画像を、銀河団衝突の数値シミュレーションと比較することで、衝突が始まったばかりであることが分かった。次に、「すざく」よりも一桁近く角分解能が高い XMM-Newton の輝度の解析を行った。その結果、「すざく」で温度が急激に変化する位置に明らかな輝度のジャンプがあった。これは圧力のジャンプを意味し、“ブリッジ”領域に衝撃波が発生していることも明らかとなった。このように、CIZA J1358.9-4750 は衝突初期で、しかも衝撃波が明瞭に生じている、きわめて貴重な例であることがわかった。

1. Ebeling et al. ApJ 580, 774, 2002
2. Takizawa, M. ApJ 556, L91 2001

### 銀河 c3 近赤外線分光観測に基づく AGN の狭輝線領域における電離メカニズムへの制限

寺尾 航暉 (愛媛大学 M1)

活動銀河核 (AGN) の狭輝線領域 (NLR) からは様々な元素から多様な輝線が放射されており、銀河における電離ガスの状態や化学進化を深宇宙から現在の宇宙まで系統的に探るために非常に有用な道具として利用されてきた (e.g., Nagao et al. 2006)。この NLR の電離メカニズムは、中心核からの電離光子による光電離であるとする考えが広く支持されているが、電波ジェットによる衝撃波が電離に影響を及ぼしている可能性も指摘されている (e.g., Fu & Stockton 2007, ApJ, 666, 794)。

NLR の電離メカニズムの研究は、輝線強度比による診断によって行われてきたが、一般には光電離と衝撃波による電離を切り分けることが困難であった。その中で、Oliva et al. (2001) が NLR の電離メカニズムを調べる有用な手段として、近赤外線に見られる輝線  $[\text{Fe II}]\lambda 1.257 \mu\text{m}$  と  $[\text{P II}]\lambda 1.188 \mu\text{m}$  の強度比を用いる方法を提案している。衝撃波によって電離されたガスでは、輝線強度比  $[\text{Fe II}]\lambda 1.257 \mu\text{m} / [\text{P II}]\lambda 1.188 \mu\text{m}$  が大きく ( $> 20$ )、光電離されたガスでは小さい ( $< 2$ ) ことが期待され、実際の NLR では衝撃波の寄与の違いによって、 $2 < [\text{Fe II}]\lambda 1.257 \mu\text{m} / [\text{P II}]\lambda 1.188 \mu\text{m} < 20$  の範囲に分布すると考えられる (Hashimoto et al. 2011)。ところが、AGN におけるこの輝線強度比はあまり調査されておらず、サンプル数が少ないために統計的な議論はほとんど進んでいない。

本研究では、岡山天体物理観測所の近赤外線分光装置 ISLE を用いて近傍宇宙の AGN (計 27 天体) の中心核領域を分光観測したデータの解析を行う。そこから  $[\text{Fe II}] / [\text{P II}]$  輝線比を求めることにより、先行研究で予想された輝線比との比較から観測した AGN の NLR の電離メカニズムを切り分ける、あるいは制限を付け加えることを目的としている。本講演では、その結果について報告する。

1. Oliva, E., et al. 2001, A&A, 369, L5
2. Hashimoto, T., et al. 2011, PASJ, 63, L7
3. Nagao, T., Maiolino, R., & Marconi, A. 2006, A&A, 447, 863

### 銀河 c4 広がったように見える鉄輝線構造を持つセイファート銀河の X 線スペクトルと時間変動

山崎 廣樹 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 海老沢研究室 (ISAS/JAXA) M1)

セイファート銀河は活動銀河核の一種で、中心に超巨大ブラックホール (SMBH) があり、中心付近に降着円盤が、外側にトラス状の吸収体が存在する構造をしていると考えられている。この SMBH が存在する証拠の候補として、X 線天文衛星「あすか」はセイファート銀河 MCG-6-30-15 の X 線スペクトルから一般相対論的な効果を受けて広がった降着円盤からの鉄輝線と解釈できる構造 (ディスクラインモデル) を検出した。その後、同様の鉄輝線構造を持つセイファート銀河が複数見つかった。しかし、広がった鉄輝線スペクトルの形状は、連続成分のモデルに大きく依存し、光電離した複雑な吸収成分も考慮しなければならない。そこで、この吸収成分を説明するために、視線上の X 線源を吸収物質が部分的に覆い隠す部分吸収モデルが提案されてきた。これまでに述べた 2 つのモデルは、スペクトルの形状だけでなく、時間変動の解釈も含めた議論がされており、現在においてもどちらかのモデルを棄却するには至っていない。

本講演ではまず、スペクトルの形状や時間変動が 2 つのモデルによってどのように解釈されるかについて述べ、最後に我々が部分吸収モデルを用いてセイファート銀河の解析を行った結果について述べる。

1. Tanaka, Y., et al., 1995, Nature, 375, 659

### 銀河 c5 銀河へのガス降着モードについて

小谷 和也 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M1)

SPH を用いた非粘性粒子の流体シミュレーションでは、銀河形成が起きるときに降着するガスの温度の変遷に 2 つのモードが見られる。1 つはガスが銀河に降着する際に一度ビリアル温度程度 ( $T \sim 10^6 \text{K}$ ) にショックヒーティングされてから冷却・凝縮されて星を形成する従来考えられていた通りのモード (hot mode) であり、もう 1 つはより低い温度 (典型的には  $T < 10^5 \text{K}$ ) でその重力エネルギーを放出しショックヒーティングされることなく降着するモード (cold mode) である。“hot mode” の降着流が準球状であるのに対し、“cold mode” の降着流はフィラメントを形成することで遠い距離から効率的に降着することができると考えられている。低質量の銀河 (バリオンの質量が  $M_{\text{vir}} \sim 10^{10.3} M_{\odot}$  またはハロー質量が  $M_{\text{vir}} \sim 10^{11.4} M_{\odot}$ ) の場合は“cold mode” が支配的で、高質量ハローの場合は従来の“hot mode” が支配的となっていることが知られている (e.g., Keres et al. 2005)。また各モードの銀河とハローの質量に依存することから、その降着流率が赤方偏移にも依存することになり、赤方偏移が大きいと“cold mode” での降着がより効きやすくなる。しかしこれらのシミュレーションはまだ解決すべき問題を抱えている。それはシミュレーションが  $z=0$  において高質量の銀河と低質量の銀河を観測結果よりも多く生成してしまうことだ。この問題を解消するために AGN や超新星爆発などによるフィードバックをシミュレーションに組み込む試みが成されているが、まだそれらの扱いは完全とは言えない (cf. Okamoto et al. 2014; Vogelsberger et al. 2014)。この現状を受け、上に挙げた問題解決の一

助となるよう、“cold mode”でのガス降着の流体力学的構造を調べた。

1. Dusan Keres, Neal Katz, David H. Weinberg and Romeel Dave, 2005, MNRAS, 363, 2-28
2. Dusan Keres, Neal Katz, Mark Fardal, Romeel Dave and David H. Weinberg, 2009, MNRAS, 395, 160-179
3. Dusan Keres, Neal Katz, Mark Fardal, Romeel Dave and David H. Weinberg, 2009, MNRAS, 396, 2332-2344

## 銀河 c6 Scientific Prospects of the SWIMS-18 survey on Subaru and TAO

山元 萌黄 (総合研究大学院大学 光赤外研究部 M1)

我々のグループでは現在 SWIMS-18 サーベイというプロジェクトを計画し推進している。これはチリに建設する TAO 望遠鏡に載せる SWIMS-18 という近赤外線撮像分光装置をすばる望遠鏡に搭載し、 $1.5 < z < 5$  という銀河形成の最盛期を時間と環境軸で網羅し、合計 18 枚のフィルターを駆使して超多色の大規模銀河サーベイを行おうというものである。

大きな特長として、マゼラン望遠鏡で行われている同種の ZFOURGE プロジェクトが 5 枚の medium-band filter を使っていたのに対し、SWIMS-18 では 9 枚の medium-band filter を用いることで、より photo-z の精度を高め、更に  $z \sim 5$  までの観測が可能になる。また、遠方銀河で特に強い H $\alpha$  輝線と [OIII] の輝線を共に捕らえる 4 組のペアをなす計 6 枚の narrow-band filter を用いることで、high-z における確実かつユニークな輝線銀河サンプルを構築することができる。今回は ZFOURGE の論文である Adam.R et al.2014(APJ..783..85T) のレビューを通して、SWIMS-18 プロジェクトのユニークな特長やそれによって拓けるサイエンスの展望を述べる。以下に論文の概要を示す。

ZFOURGE による観測結果から、 $0.2 < z < 3$  において最も精度の高い銀河の星質量関数 (SMF) が得られた。ZFOURGE では、medium-band filter を用いることで、 $1 < z < 3.5$  の約 30000 個もの銀河の photo-z を 1-2% の精度で求めることが可能になった。さらに CANDELS の HST imaging を合わせ、星形成を終えた銀河 (赤) と星形成中の銀河 (青) のどちらにおいても、 $z=2.5$  までかつ星質量が  $10^{9.5}$  太陽質量ほどの低質量銀河まで有用な SMR を得ることができ、今回初めて低質量の星形成活動を終えた銀河の急速な増加 (成長) の様子を確認できた。その結果、宇宙における銀河の星質量密度の  $z=2.5$  から現在までの進化は、星形成銀河については約 2.2 倍の増加となっているが、星形成を終えた銀河については約 12 倍もの大きな増加を示すことが分かった。

1. Adam.R et al.2014(APJ..783..85T)

## 銀河 c7 VERA を用いた銀河系中心 300 pc 領域に付随する水メーザー源の固有運動測定

酒井 大裕 (国立天文台三鷹 M2)

銀河系中心領域は円盤部とは異なり、卓越した非円運動を示している事が知られている。この非円運動を説明するシナリオとして、銀河系のバーポテンシャルによる共鳴軌道や中心ブラックホールの過去の活動による膨張運動などが提案されている。これらのシナリオは銀河系中心部の分子雲の視線速度情報に則ったものであり、そのような 1 次元的な速度情報からだけでは 2 つのシナリオを分離する事は出来ず、その実態の

解明には至っていない。

これら 2 つの可能性を切り分けるために、我々は国内の VLBI 観測網 VERA を用いて、銀河系中心から約 300 pc の距離に存在する Central Molecular Zone に付随する 22 GHz 帯の水メーザー源を長期間観測し、その固有運動を測定した。これにより、今までにない 3 次元的な速度情報を得る事が出来るため、運動の解明というここでの目的に対して非常に適している。本講演では、この研究の一例目として行った銀河系中心方向の明るい電波連続波源、Sgr D 領域に付随する水メーザー源の固有運動測定結果について発表する。また、今後の観測計画や、2 つのシナリオの切り分けについても議論する。

1. J. Binney et al., MNRAS, 252, 210, (1991)
2. T. Sawada et al. MNRAS, 349, 1167 (2004)
3. D. Mehringer et al. ApJ, 493, 274, (1998)

## 銀河 c8 矮小銀河の化学進化

岡安 優佑 (東北大学天文学専攻 M1)

MW の伴銀河の一つである Sculptor dSph (dwarf spheroidal) に化学進化モデルを適用し、Sculptor dSph の金属量分布関数 (MDF) を再現した。さらに、モデル計算をする中で平均金属量や星質量に影響するパラメータを探ったところ、星形成効率が平均金属量に影響し、星質量に関しては銀河風による質量流出よりも降着質量の影響が大きかった。また以前までは、ガスがほとんどない d Sph の金属量は星から、ガスが多く星形成を現在も行っている d Irr (dwarf irregular) の金属量はガスから測られていたが、近年は d Irr においても星から金属量を測ることができるようになり MDF を直接比較できるようになった。その結果得られた MDF をみると一般に dSph と dIrr は MDF の形や傾向が異なっているので、化学進化過程が異なっていると考えられているが、質量金属量関係 (MZR) でみると dSph と dIrr、さらにより重い銀河と同じ関係に乗っている。今後の研究課題としては、星形成史 (SFH) をより再現できるような SFR をモデルに組み込めるようにし、さらに low mass な uFd (ultra-faint dwarf) や dIrr に対して化学進化モデルを使って観測的事実を再現し、その上で MZR を有意に決めているパラメータがあるならばそれは何かを探っていくことである。また、最近の研究により、M31 の衛星銀河においても同じ光度の MW の矮小銀河と比較すると MDF の広がりや違いがあるにも関わらず MW とほぼ同一の MZR に乗っていることがわかった。M31 の衛星銀河の SFH もわかってきているため、今後は M31 の衛星銀河についても化学進化モデルを適用し、どのような化学進化過程を経てきているのかを考えていくと共に MW の矮小銀河との比較を行って母銀河や周りの環境による進化の違いなどを議論していく必要が生じてくるだろう。そのような、最近の研究結果についてのレビューを行い、現状考えられている問題点とその解決に必要な研究などを議論していく予定である。

## 銀河 c9 数値シミュレーションで探る宇宙背景ガンマ線放射

早津 夏己 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

extragalactic gamma-ray background (EGB) は Fermi 衛星観測の解析により確認されている (Abdo et al. 2010)。しかし最近まで、考えられるガンマ線源の寄与を観測的・理論的に見積もっても、Fermi 衛星の結果を再現することが出来なかった (Ackermann et al. 2012)。例え

ば、ガンマ線源のうち星形成活動が盛んな銀河の寄与が大きいとされるが、Ackermann et al. (2012) による赤外線観測の結果を用いた見積りは Fermi 衛星の結果より一桁程度小さい。

ところが、Tamborra et al. (2014) による最新の赤外線観測の結果 (Grupponi et al. 2013) を用いた見積りは Fermi 衛星の結果を再現した。合うようになった理由には、Ackermann et al. (2012) では考慮できなかった遠方宇宙 ( $2.5 < z < 5.0$ ) の銀河の寄与が入ることや、新たに複数の銀河種族の寄与を考慮したことなどが挙げられる。

本研究では、まず Ackermann et al. (2012) の見積り法を参考に、Shimizu et al. (2012) による大規模数値シミュレーションの結果から EGB を計算し、Fermi 衛星の結果と比較し考察する。シミュレーションから得た遠赤外線光度分布は、未だ観測されない暗い銀河の寄与まで計算されている。それらの EGB への寄与によって、本研究の計算結果は  $E > 10$  GeV の EGB の観測結果を再現した。そのうち、 $0.6 < z < 1.0$  の銀河の寄与は 60 ~ 70 % 程度であった。本講演では  $E < 10$  GeV の EGB の寄与は銀河種族の違いによるものか、その可能性も考察する予定である。

1. M. Ackermann et al. ApJ, 755:164 (2012)
2. C. Grupponi et al. MNRAS, 432:2 (2012)
3. Shimizu et al. MNRAS, 427:2866 (2012)

## 銀河 c10 大質量楕円銀河の形成段階を探る

木村 勇貴 (東北大学天文学専攻 M1)

Oser et al (2010) によると、楕円銀河の中の星は、 $z > 2$  のときにはその銀河の中で形成されたもの (in situ) と銀河の外で形成されたもの (ex situ) の 2 つの段階があり、銀河の外で形成されたものが後に内側へ降着することで現在近傍で見られるような楕円銀河が形成されたということが数値シミュレーションによって示唆されている。大質量楕円銀河の場合、それらのほとんどの星は  $z > 2$  で星形成が起きたものであると考えられている。

そのような銀河の中の星と外の星の 2 つの段階が確認できるような系というものは、現在の観測でも実際に発見されており、例えば Uchimoto et al (2012) によると全体で 180kpc の中に photo-z で選ばれた天体が 5-6 個付随している。その中には  $z > 2$  で星形成をしてきたとされる DRG 天体 (Franx et al. 2003) が何個か確認されており、これらの系を見つけるには DRG が密集しているような領域を探すことが非常に有力な手がかりになると考えられる。

そこで私はまずその DRG に着目しそれらが密集している系を、最も一般的な領域である GOOD-N 領域で調べることにした。方法としては、まずその領域内に任意の座標点を設定してやり、その点を中心としてある半径とある  $z$  の幅を設定してやり、その中に DRG 天体が何個密集しているか、その個数の統計を調べた。それらが実際にポアソン分布と仮定した場合にどれだけ確率が低いか、つまりランダムで DRG をばらまくことを考えた時にそれらが密集していることがどれだけ珍しいのかを調べた。その中から特に確率的に低いものを抜き出してやり、実際に DRG 以外の天体で他にどのような天体があるかという環境も調べた。今回のポスターではこれらの中で確率が特に低かった系を紹介する。また今後の展望も少し揭示する。

1. Oser et al.(2010)

2. Uchimoto et al.(2012)
3. Naab et al.(2007)

## 銀河 c11 アンドロメダストリームを用いたダークマターハローの外縁構造の探査

桐原 崇亘 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 D1)

階層的な構造形成理論に基づいた宇宙論的な構造形成の数値シミュレーションによると、銀河や銀河団に付随するダークマターハローは特徴的な密度構造をもつと予言されている。その密度分布は、一般に中心からの距離のべき乗で表現されている。分布の内側のべき構造については活発に議論がなされているが、外縁部については中心からの距離の  $-3$  乗で密度が変化することではほぼ一致している。一方で、観測的にハロー外縁部の密度構造を探ることはその密度の低さから困難であり、その検証はほとんどなされていない。

近年の高精度な観測により、すぐ隣りの巨大銀河であるアンドロメダ銀河 (M31) のハロー領域には複数の矮小銀河衝突の痕跡が発見された。特に、アンドロメダストリームと呼ばれる M31 中心から帯状に伸びる星の構造は、100 kpc を超えるような巨大な構造であり、その空間構造・速度構造が観測されている。また、理論面からも  $N$  体シミュレーションによって、衝突した矮小銀河の質量や軌道が調べられてきた。本研究では、M31 のダークマターハローの外縁部密度のべきを変えて銀河衝突の数値シミュレーションを行った。そして、アンドロメダストリームと東西に広がる貝殻状の星分布を再現するという条件から M31 のダークマターハローの外縁部密度構造に対して、理論予言の検証を行った。得られた結果は、標準理論で示唆されるよりも、遠方で急に密度が小さくなることを示している。

1. J. F. Navarro, C. S. Frenk & S. D. M. White, ApJ, 462, 563 (1996)
2. M. A. Fardal et al., MNRAS, 380, 15, (2007)
3. M. Mori & R. M. Rich, ApJ, 674, 77 (2008)

## 銀河 c12 初期宇宙における超大質量ブラックホールの種形成

鄭 昇明 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)

$z \sim 7$  という非常に初期の宇宙において、すでに  $10^9 M_{\odot}$  の質量を持った超大質量ブラックホールが存在する事が最近の観測により分かってきた。宇宙が始まってわずか 0.8Gyr までの間にこのような大質量の天体が形成されるプロセスは未だ知られていない。近年、初期宇宙において非常に特殊な環境下に存在するガス雲から超大質量星を経て  $\sim 10^5 M_{\odot}$  のブラックホールが形成されるという「Direct Collapse」シナリオが提唱されており、出来たブラックホールは観測されたような超大質量ブラックホールの種として期待されている。本研究では、以上の「Direct Collapse」現象が宇宙論的な環境下で起こりうるかを検証した。

「Direct Collapse」現象は非常に低金属なガス雲が非常に強い輻射を受けているような状況下で起こると考えられている。このためにも計算においては、(1) 星形成活動による金属汚染の進行過程、(2) 近傍銀河からの輻射強度の計算、(3) 輻射場のもとでのガス雲の進化の過程を考慮する必要がある。本研究においてはまず、(1)、(2) を宇宙論的  $N$  体計算

によりモデル化し Direct Collapse の候補となるガス雲を見つける。次に、得られたガス雲の進化を流体計算にすることで (3) の過程を追う。それにより、ガス雲から超大質量星が形成される可能性を議論する。

1. V. Bromm and A. Loeb Apj 592 34 (2003)

## 銀河 c13 Physical properties of $z > 3$ [OIII] emitters in SXDF-CANDELS field

鈴木 智子 (総合研究大学院大学 D1)

宇宙の大局的な星形成活動がピークを迎えた赤方偏移 2 から 3 にかけての時代は銀河形成・進化の最盛期にあたり、現在までに数多くの研究がなされている。そしてその最盛期の前夜とも言える  $z \sim 3 - 3.6$  の時代は、そもそも何故  $z \sim 2 - 3$  で銀河形成が最盛期を迎えたのかということを理解する上で鍵を握る、非常に重要な時代であると言えることができる。すばる望遠鏡の近赤外線撮像装置 MOIRCS と多数の狭帯域フィルターを用いて行われた遠方の星形成銀河探査プロジェクト (Mahalo-Subaru; Kodama et al. 2013) では、 $z \sim 2.5$  までの様々な環境下に存在する H $\alpha$  輝線銀河の大規模な探査が行われた。これらの一連の観測では、ターゲットとなる H $\alpha$  輝線銀河だけでなく、異なる赤方偏移に存在するその他の輝線銀河も同時に観測され、SXDF-CANDELS フィールドにおいては  $z \sim 3.2$  と  $z \sim 3.6$  にある [OIII] 輝線銀河が 40 天体ほど観測されている (Tadaki et al. 2013)。

本研究では、 $z > 3$  の時代の星形成銀河がどのような物理的特性を持っているのかを明らかにするために、これらの [OIII] 輝線銀河に着目し、それらの星質量や星形成率といった基本的な物理量を調べた。また、HST による観測から得られた画像から個々の銀河の形態を調べ、それらのサイズの見積もりを行った。その結果、[OIII] 輝線銀河が示す星質量-星形成率関係は  $z \sim 2$  の H $\alpha$  輝線銀河よりも高い比星形成率を示す傾向にあること、形態に関しては比較的コンパクトなものが多く、クラumpy な構造を持つものはあまり見られないことなどが分かった。本講演では、これらの結果の報告と、サンプルの選択方法による影響を考慮した上で  $z > 3$  の星形成銀河が  $z \sim 2$  のものと比べてどのような性質、関係になっているかを示すとともに、今後の展望について述べる。

1. Kodama, T. et al., 2013, IAUS, 295, 74
2. Tadaki, K. et al., 2013, ApJ, 778, 114
3. Maschietto, F. et al., 2008, MNRAS, 389, 1223

## 銀河 c14 宇宙大規模構造における高温水素ライマンアルファ吸収体の物理的性質

渡邊 歩 (筑波大学 大学院 数理物質科学研究科 物理学専攻 宇宙物理学理論研究室 M2)

CMB および Ly $\alpha$  吸収線を用いた高赤方偏移 ( $z \gtrsim 3$ ) の銀河間ガスの観測より、バリオンが宇宙のエネルギー成分に占める割合はおおよそ 5% 程度であるという結果がそれぞれ独立に得られている。一方で、近傍宇宙での観測データからバリオン成分を見積もるとその半分程度の値であり、宇宙進化に伴ってバリオンの一部は観測が難しい物理状態に変化したと考えられる。この観測されていないバリオン成分はダークバリオンと呼ばれている。

ダークバリオンの有力候補と考えられているのが、中-高温銀河間物質

(Warm-Hot Intergalactic Medium) WHIM である。 $\Lambda$ CDM モデルに基づく宇宙論的な構造形成シミュレーション [1],[2] によると、ガスが重力崩壊する際に衝撃波加熱されることによって、密度の非常に薄く (宇宙平均密度の数〜数千倍)、温度の高い ( $10^5\text{K} \lesssim T \lesssim 10^7\text{K}$ ) 銀河間ガスである WHIM が生じることが示唆されており、 $z = 0$  ではバリオンの 30 - 50% が WHIM として存在するという結果が得られている。

現状では、WHIM を観測しようとする試みは多数あるものの、観測精度の問題で同定できた例はまだ数例しかない。本研究では、中性水素の Ly $\alpha$  吸収線を用いた観測方法に注目する。

先行研究 [3] として、構造形成シミュレーションのガスのデータを用いた Broad Ly $\alpha$  線による擬似観測の研究がある。しかし、この研究では水素の電離度を電離平衡の仮定に基づいて計算しているが、この取扱いは不十分である。WHIM のような希薄なガスでは、再結合時間が電離時間に比べて非常に長く宇宙年齢程度であるため、電離と再結合が釣り合うような電離平衡状態からのずれが大きく、電離度の時間発展を考慮に入れた計算をすることが望ましい。そこで、本研究では宇宙論的構造形成シミュレーションコード Gadget をベースにして電離度の時間発展を取り入れたガスの進化を計算し、そのガスのデータを用いて、先行研究と同様に Broad Ly $\alpha$  線による擬似観測を行い、スペクトルとその吸収体のガスの物理状態の関連を調べることを目指す。

1. Cen, R. & Ostriker, J. P., 1999, ApJ, 514, 1
2. Dave, R. & Hernquist, L., 1999, ApJ, 511, 521
3. Richter, P., Fang, T. & Bryan, G. L., 2006, A&A, 451, 767

## 銀河 c15 Evaluating star formation surface density and stellar mass density of galaxies in the local universe

Abdurrouf Abdurrouf (東北大学天文学専攻 M1)

In order to understand how the stellar mass are distributed within the galaxies in the local universe, where the stars are being made in high star formation rates in them, and relation between their morphology to their activities in making stars, we are going to investigate the surface density of star formation rates (SFRs) and stellar mass surface density by analyzing the resolved stellar population properties of 462 massive galaxies at  $0.01 < z < 0.02$ . The galaxy images will be taken from SDSS DR10 for stripe82 region. Only galaxies with stellar mass more than  $10^{10} M_{\text{solar}}$  will be selected. The sample will be differentiated according to their morphology (elliptical, spiral, and irregular) and each galaxy's surface will be divided into inner (center) and outer region. Resolved stellar population properties, that is star formation rate, age, stellar mass, and extinction, will be derived by modelling the spectral energy distribution (SED) for each spatial bin of galaxy images. Then we will analyze variations in stellar mass density, density of star formation rate, age, and extinction as a function of galactocentric radius.

1. Wuyts, S. et al. ApJ, 753,114 (2012)
2. Wuyts, S. et al. ApJ, 779,135 (2013)
3. Zibetti, S., Charlot, S., and Hans-Walter Rix, Oxford Journal. 1181,1198 (2009)

## 銀河 c16 無衝突重力多体系の力学進化を計算するための N 体計算コードの開発

加藤 一輝 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M2)

本研究の目的はコンピュータシミュレーションを用いて銀河スケールにおけるコールドダークマター理論の諸問題に挑戦することである。そのための無衝突重力多体系の力学進化を計算するための N 体計算コードを作成した。各粒子間の重力相互作用は、何も工夫しないで計算すると演算数のオーダーが粒子数の 2 乗となり、計算コストがかかってしまう。本研究では計算コストを削減するために、Particle-Mesh(PM)法を採用した。この方法は、粒子分布から密度分布を求め、ポアソン方程式解き、重力ポテンシャルを求める。そして、その重力ポテンシャルを使って新たな粒子分布を求める方法である。ポアソン方程式を解くのに高速フーリエ変換を用いた結果、演算数のオーダーがメッシュ数  $M$  に対して  $M \log M$  となり大幅に計算コストを削減することができた。また、原始銀河の収縮過程である cold-collapse モデルのテスト計算を行い、銀河の力学的な準平衡状態を求めた。そして、エネルギー保存の誤差評価より、十分な解像度を得られる最大粒子数は 3 次元で  $M/8$  程度であることを確認した。

1. R, W, Hockney. and J, W, Eastwood. 1998 Computer simulation using particles, Taylor and Francis Group
2. Binney, J. , and Tremaine, S. 2008, Galactic Dynamics 2nd ed, Princeton University Press,

## 銀河 c17 銀河系中心における広がった Fe XXV 輝線と星数密度分布の比較

長友 竣 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河系の銀河面では、点源に分解できない広がった X 線が観測される。この X 線中にあるヘリウム状鉄 (Fe XXV) の輝線が銀河系中心部において周囲とは異なる特異なピークを持つことから、周辺部と中心部で放射源が異なる可能性が示唆されている。X 線衛星 Chandra によって高分解能での観測が可能になり、周辺部の X 線 (GRXE) は激変星 (CV ; 白色矮星が主星の連星系) をはじめとした点源から放射されていることが分かったが、中心部の放射はいまだ分解できていない。そのため中心部の放射については、点源説と超新星爆発等で生じた真に広がった高温プラズマ説の 2 つの説があり、議論が続いている。

この放射源に制限を与える方法の一つとして、X 線の観測領域と同じ領域を赤外線観測し、得られた星数密度分布を X 線の強度分布と比較することが挙げられる。激変星は片方が白色矮星であるため、その分布は白色矮星と相似である。白色矮星は比較的質量の軽い星の最終段階であり、赤外線観測によって得られた星数密度分布は激変星の分布と相似であると考えられ、X 線強度分布と比較することによって、その分布が激変星のみで説明できるか、放射源が他に必要であるかを見ることが出来る。本研究では 2 つの分布の比較を行い、銀河系中心の拡散 X 線 (GCDX) における点源からの放射の寄与の割合を考える。GCDX 領域の、銀河面  $|l| < 2^\circ$  における近赤外線データ、Fe XXV 輝線データは取得済みである (Nishiyama et al. 2013 and references therein)。そこで今回は、Fe XXV 輝線強度が観測されている GRXE 領域  $|l| \sim 8^\circ$  の 2

箇所 (Yamauchi et al. 2009) をスケールリングに用いた。星数密度分布のため、我々は IRSF/SIRIUS を用いて、1 領域あたり 10 秒積分  $\times 10$  dithering (有効積分時間 100 秒)  $\times 9$  視野の観測を新たに行い、その領域の J, H, K バンド撮像データを得た。これらのデータは、1 視野あたり約 9000 個の星 (飽和した星を除く) を含んでいる。これらの観測から得られた星数密度分布と Fe XXV 輝線分布を比較して得られた点源からの寄与への制限、および点源以外の放射源の可能性について議論する。

1. S. Nishiyama et al. ApJ, 769, L28 (2013)
2. S. Yamauchi et al. PASJ, 61, S225 (2009)

## 銀河 c18 銀河系核周円盤の分子輝線 OTF マッピング観測

竹川 俊也 (慶應義塾大学 M2)

コンパクトな電波源 Sgr A\* として認識される銀河系中心核は、400 万太陽質量の超巨大ブラックホール (SMBH) を内包していると考えられている。Sgr A\* を取り囲むように 1 pc から数 pc の距離にわたって広がるトラス状の高温・高密度ガス雲は核周円盤 (circumnuclear disk; CND) と呼ばれ、中心核への質量供給を担う一方で、その化学組成は過去の中心核活動を反映していると考えられている。さらに CND の外側には 2 つの巨大分子雲 (GMC;  $+20 \text{ km s}^{-1}$  cloud および  $+50 \text{ km s}^{-1}$  cloud) が存在しているが、CND との物理的関連については未解明な部分が多い。CND の起源および実体を把握することは中心核の活動性を理解する上で極めて重要である。しかし、近年の CND の観測は電波干渉計を用いた高分解能観測が主流であり、見落とされ議論から外されてしまっている成分も少なくはない<sup>[1]</sup>。

そこで私たちは干渉計観測では見落とされてしまっている広がった成分に着目し、2014 年 2 月および 3 月に野辺山 45 m 電波望遠鏡を利用して、CND 全体を含む銀河系中心  $6' \times 6'$  の領域について、HCN  $J=1-0$ 、 $\text{HCO}^+ J=1-0$ 、 $\text{SiO } J=2-1$  などの CND をよくトレースする輝線<sup>[2]</sup>を用いた詳細な OTF マッピング観測を行った。その結果、GMC と CND の物理的な接触を示す構造がいくつか見出され、 $+20 \text{ km s}^{-1}$  cloud から CND への質量供給の重要な証拠を新しく発見した可能性がある。また、私たちのグループは ASTE 10 m 鏡による HCN および  $\text{HCO}^+$  の  $J=4-3$  輝線のデータも取得済みである。本講演では、これら単一鏡による観測結果を総合し、銀河系中心核環境への質量供給過程について新たに得られた知見を紹介する。

1. Oka, T., et al. 2011, ApJ, 732, 120
2. Takekawa, S., et al. 2014, ApJS, submitted

## 銀河 c19 銀河系核周円盤の $\text{HCO}^+ J=4-3$ のイメージング観測

鈴田 春奈 (慶應義塾大学大学院 M1)

銀河系の中心核は電波源 Sgr A\* として認識されています。その外側には電離ガス mini-spiral が付随し、それらは核周円盤 (circumnuclear disk; CND) に取り囲まれています。CND は中心核活動の燃料貯蔵庫と考えられており、高速で回転し、動径方向にも運動しています。近年、私たちの研究グループは国立天文台野辺山 45 m 望遠鏡と ASTE 10 m 望遠鏡を用いて、CND をよく反映すると考えられる分子輝線<sup>[1]</sup>を含む

複数のスペクトル線によるイメージング観測を行いました。その結果、CND とそれに関連する分子雲 (C1 cloud)<sup>[2]</sup> において、1 を超える高い HCN  $J=1-0$ /HCO<sup>+</sup>  $J=1-0$  強度比が得られました。この強度比は活動銀河核 (AGN) では 1 より大きく、スターバースト銀河では 1 より小さいということが、いくつかの観測的研究により示唆されています<sup>[3]</sup>。

今回私たちは、CND の起源や性質を探るとともに、銀河系中心領域での高い HCN/HCO<sup>+</sup> 強度比の原因を調べるために、2014 年 5 月および 6 月に ASTE 10 m 望遠鏡を用いて、HCO<sup>+</sup>  $J=4-3$  による CND の OTF マッピング観測を行いました。HCN、HCO<sup>+</sup> の  $J=1-0$  と  $J=4-3$  の 4 つの輝線強度を用いることで、CND およびその周辺の物理状態や、HCN/HCO<sup>+</sup> の存在量比を決定することができます。この存在量比を調べることは、CND の形成過程を明らかにし、銀河系中心核の過去の活動の理解の鍵となるかもしれません。また、本研究は AGN における高い HCN/HCO<sup>+</sup> 強度比の理解にも役に立つと考えられます。本講演では、今回の観測によって新しく得られたデータの解析結果を紹介し、CND およびその周辺で高い HCN/HCO<sup>+</sup> 比の原因について議論します。

1. Takekawa, S., et al. 2014, ApJS, submitted
2. Oka, T., et al. 2011, ApJ, 732, 120
3. Kohno, K., et al. 2004, Berlin: Springer, 349

## 銀河 c20 ダスト進化を考慮した宇宙論的銀河形成モデル

吉原 健太郎 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

ALMA などでの観測データから、赤外サブミリ領域におけるダストの continuum など重要なデータが得られることが期待されているが、銀河のダスト SED に関する詳細なモデルは多くない。

一方で、最近の観測から、メタリシティの小さい銀河ではメタル量に対してダストがあまり検出されないという結果が出ている。

この原因として有力なものの一つに ISM 中での dust grain growth があり、これを取り入れたダスト進化モデルを宇宙論的銀河形成モデルに取り入れることで、

銀河のダスト特性を予言する新たなモデルを考案し、今後出てくる観測結果へ示唆を与えることを目指す。

1. Asano R. S., Takeuchi T. T., Hirashita H., Inoue A. K., Earth Planets Space, 65, 213 (2013)
2. Rémy-Ruyer A. et al., A&A, 563, A31 (2014)

## 銀河 c21 ブラックホール降着流における輻射場の効果

佐塚 達哉 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M2)

今回の発表は Barai, Proga, Nagamine(2012) のレビューである。

活動銀河核 (AGN) のまわりのガスが中心からの放射を吸収することにより、幅の広い吸収線 (BAL) を作る。BAL が観測されるほとんど全ての AGN で、BAL が青方偏移していることが知られている。このことから AGN まわりのガスがアウトフローしていることが予想される。このアウトフローは中心からの放射に起因すると考えられ、アウトフローのメカニズムを解明するには、ガス中の輻射場の取り扱いが非常に重要

になってくる。この研究では AGN の中心から放射される X 線のみを考え、それによる輻射圧と加熱、冷却の効果を考えることで、輻射の効果をとり入れたガスの降着を 3D シミュレーションした。その結果、中心から放射される X 線の光度  $L_X$  によってガスの構造が変化することが分かった。 $L_X$  が小さい極限ではガスは、球対称かつ定常的に降着し、 $L_X$  が大きい極限では中心付近のガスが放射によって温められることで膨張し、ほとんどのガスがアウトフローとして外部に流出した。また、二つの中間の  $L_X$  では、フィラメント状の高密度で低温な領域と、低密度で高温な領域からなる非球対称な構造を形成し、低密度高温の領域の一部でアウトフローが形成された。このような構造は、最初に球対称な構造をしていたガスが放射によって温められ、それによって生まれた摂動が熱的不安定によって成長したことで形成されたと考えられる。

1. Paramita Barai, Daniel Proga, Kentaro Nagamine 2012, MN-RAS, 424, 728
2. John I. Castor, David C. Abbott, and Richard I. Klein, 1975, ApJ, 195, 157

## 銀河 c22 遠方銀河における赤方偏移 z の決定

倉橋 拓也 (明星大学 M1)

我々は極めて明るいサブミリ波銀河の CO 輝線観測を行い、赤方偏移  $z$  を決定する研究を行っている。本講演では候補天体である USS1558 と J1344 について発表する。USS1558 は星形成銀河が数多く群れている原始銀河団であり、H $\gamma$   $\alpha$  輝線を強く放射している非常に活発な銀河団であることを示す ( $z=2.53$ )。J1344 は Herschel で検出された明るい天体であり、赤方偏移  $z$  が未詳である。これらの天体からの赤方偏移  $z$  から分子ガスの分布や運動状態について報告する。

## 銀河 c23 近赤外線域における宇宙背景放射の再測定

佐野 圭 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 D1)

近赤外線域の宇宙背景放射には遠方の銀河から来る光や、未知の素粒子の崩壊によって放出される光などが含まれていると考えられている。この波長域には、黄道光、銀河系内の星の光などの強い前景放射が存在しており、これらを高い精度で除去しなければ宇宙背景放射を検出することは困難である。

我々は COBE(COsmic Background Explorer) 衛星に搭載されていた観測装置 DIRBE(Diffuse Infrared Background Experiment) によって得られた全天マップを用いて J、K バンドにおいて宇宙背景放射の再測定を試みている。DIRBE のデータを用いて宇宙背景放射を測定した例はあるものの、いずれの研究においても星の光が星間ダストに散乱された成分である銀河拡散光を無視していたという問題があった。我々は黄道光モデルを用いて黄道光を除去し、星のカタログである 2MASS(2 Micron All Sky Survey) を用いて DIRBE のマップから星の光を除去した。その後に残った拡散光成分のうち、銀河拡散光の成分を銀河系内の遠赤外線拡散放射との一次相関を利用して除去した。これによって、存在すると考えられる前景放射をすべて除去して、等方放射成分を求めることができたが、それは黄道光のスペクトルに似る。この結果は黄道光モデルで引き切れていない黄道光の成分が存在することを示唆するものである。

## 銀河 c24 VERA による IRAS07024-1102 の年周視差測定

松尾 光洋 (鹿児島大学 D1)

我々は VERA を用いた IRAS 07024-1102 の年周視差測定を行ったので報告する。この天体は Outer Rotation Curve (ORC) プロジェクトの一つであり、銀河系回転曲線をより正確に求め、銀河系の質量分布や力学、構造を明らかにすることを目的としている。

この天体は  $(l, b) = (224^\circ 3, -2^\circ 1)$  に位置しており、Canis Major 領域に存在する。光度が小さい ( $570 L_\odot$ ) のに対し線幅は大きい ( $1.99 \text{ km s}^{-1}$ ) ため pre-ultra compact (UC) H II より早期の大質量天体だと言われている。また  $^{13}\text{CO } J = 2-1$  で  $V_{\text{lsr}} = 16.9 \text{ km s}^{-1}$  であり、運動学的距離で太陽から 1.64 kpc 離れている (Wang et al. 2009)。

我々は年周視差を測定することで距離をより正確に求めるため VERA を用いて IRAS07024-1102 の水メーザー観測を行った。2010 年 5 月から 2014 年 3 月までの 18 epoch について解析を行った。3 epoch 以上で検出されたスポットを用いて年周視差フィッティングを行った結果、年周視差は  $1.28 \pm 0.08 \text{ mas}$  であり、それに相当する距離は  $0.78_{-0.04}^{+0.05} \text{ kpc}$  となった。また水メーザーの固有運動は  $\mu_\alpha \cos \delta = -0.03 \pm 1.66 \text{ mas year}^{-1}$ ,  $\mu_\delta = 0.67 \pm 1.59 \text{ mas year}^{-1}$  と求まった。

本ポスターでは新たに求まった距離にもとづいて銀河系外縁部における回転速度について議論する。

1. Wang et al. 2009, A&A, 507, 369

## 銀河 c25 遠赤外線 spectral Energy Distribution による銀河の活動の分類

古地 千尋 (宇宙科学研究所 M2)

銀河の活動には主として星形成と銀河核がある。これらはしばしば厚いダストに覆われた領域で行われており、この場合ダストからの赤外線再放射を観測することがその活動を知る方法である。この再放射フラックスの波長依存性から、銀河の活動の特徴を探る事ができる。そのための有効な手段のひとつが、異なる波長のフラックス比の相関 (color-color diagram) を描くことである。従来の研究ではその多くが IRAS の 4 バンドのフラックスデータを用いていた。しかし銀河の活動は複雑であり、IRAS のデータのみでは情報量の不足が問題であった。

そこで本研究では、IRAS の 4 バンドに「あかり」の 9, 18, 65, 90, 140  $\mu\text{m}$  の 5 バンドのフラックスデータを加えて解析を行った。解析のサンプルには IRAS Revised Bright Galaxy Sample 中の 315 個の銀河を用いた。これらと「あかり」IRC と FIS のデータとで座標マッチングを行い、各銀河の可視光のフラックスデータを加えたデータセットを作成した。このデータセットから、各波長のフラックスと可視光のフラックスの比、赤外フラックス同士の比を計算し、解析のパラメータとして設定した。そして、これらのパラメータについて主成分分析を行った。

その結果、第 1 主成分は赤外フラックスの和と可視フラックスの比、第 2 主成分は IRAS と「あかり」のビーム径の違いに起因する銀河の大きさを示すパラメータを表していることが分かった。この結果から分かる銀河の活動の特徴について、本講演では議論する。

## 銀河 c26 Subaru/XMM-Newton Deep Survey 領域における X 線選択された活動銀河核の空間相関

水野 翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

銀河と銀河中心超巨大ブラックホール (SMBH) は共進化している (e.g. Magorrian et al. 1998)。その共進化を理解する上で、SMBH の成長過程である活動銀河核 (AGN) の進化を解明することは重要である。しかし、何が AGN 現象をトリガーするのかという基本問題は、未だによくわかっていない。AGN 空間相関 (3 次元自己相関関数) の測定は、AGN の存在するダークマターハローの質量を推定し、その環境を明らかにするために非常に有効である。

AGN の主要な種族は、塵やガスに隠された AGN (2 型 AGN) であることが分かっている。吸収に強い X 線サーベイは、隠された AGN も含めた完全性の高い AGN サンプルを用いた空間相関の調査を可能にする。この目的のためには、cosmic variance の影響を避けるための十分な広さと深さを同時に達成した、赤方偏移の分光同定率の高いサーベイデータが必要である。

我々は、このような条件を満たすサーベイの一つとして、Subaru/XMM-Newton Deep Survey (SXDS) に着目した。1 deg<sup>2</sup> という連続領域から、0.5-2 keV と 2-10 keV バンドで検出された 733 個と 576 個の X 線 AGN のうち、それぞれ 514 個および 397 個の赤方偏移が分光的に同定されている (Akiyama et al. in preparation)。また、SXDS 領域には、 $z \sim 1.5$  に大規模構造があることが分かっている。実際、Landy-Szalay estimator を用いて AGN 自己相関関数を計算したところ、強い相関信号が確認できた。本講演ではこれらの測定結果を報告し、過去の結果とも比較して議論する。

1. Landy, S. D., & Szalay, A. S. 1993, ApJ, 412, 64
2. Peebles, P. J. E. 1980, The Large Scale Structure of the Universe (Princeton: Princeton Univ. Press)

## 銀河 c27 球対称定常な BH 降着流における輻射の影響

篠田 智大 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ M2)

ブラックホールは他のコンパクト天体と異なり、エディントン効率  $\dot{M}_E = L_E/c^2$  を超えてガスを降着することができる。そのような大きな降着率  $\dot{M}$  においては、降着するガス自身が輻射を出し、降着流に影響を及ぼす。[1], [2] ではこの輻射の影響を理解するため、輻射とガスの相互作用を考慮した球対称定常なブラックホール降着流について考察している。[1] では、輻射圧優勢な降着流においてはガスの密度と圧力に特定の関係がないために、定圧のままガスが収縮でき、結果として、ガス圧のみを考慮した場合と異なり Bondi 降着率よりはるかに大きな降着率を実現されることが分かった。本発表では、[1] のレビューを行う。

1. Begelman, M. C. 1978, MNRAS, 184, 53
2. Kafka, P. and Meszaros, P. 1976. Gen. Rel. Grav., 7, 841
3. Bondi, H. 1952. Mon. Not. R. astr. Soc., 112, 195

## 銀河 c28 内部紫外線と背景紫外線が及ぼす銀河形成への影響

鈴木 裕行 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 D1)

WMAP などによる宇宙マイクロ波背景放射の観測によると、宇宙再電離は赤方偏移 10 程度にて起こったことが示されており (Komatsu et al. 2011)、多くの銀河は電離された宇宙にて、つまり紫外線放射場の影響を受けながら形成・進化するということが予想できる。紫外線は原始銀河ガス雲を電離加熱したり、原始ガスにおける重要な冷却材である水素分子を乖離する事から、銀河形成に著しい影響があることが予想され、紫外線放射輸送を考慮することは非常に重要である。放射輸送を数値計算で解くことによって矮小銀河形成に対する紫外線背景放射の影響 (Susa & Umemura 2004) などが調べられてきたが、原始銀河内部にて形成された星々が放出する紫外線 (内部紫外線という) の影響は、放射輸送計算のコストが膨大である事などを理由に今まで調べられてこなかった。

そこで本研究では、紫外線背景放射と内部紫外線のそれぞれが銀河進化にどのような影響を及ぼすかを、3次元流体計算に背景・内部双方の紫外線の放射輸送効果を物理モデルとして取り入れて計算することによって調べた。このようにモデル化して計算を行うことによって、多くのパラメータ領域において計算を可能にし、また、それぞれのフィードバックを ON/OFF した数値実験を行うことを可能とした。

本研究の結果として、内部紫外線は進化の初期段階に星形成を抑制する働きがあり、高赤方偏移の銀河の形成・進化に関して非常に重要なフィードバックであることを確認することができた。背景紫外線は、比較的進化の後期段階に影響が大きく、光蒸発を起こすことで最終的な銀河の星質量を低下させる働きがあることが分かり、内部紫外線・背景紫外線それぞれのフィードバックの役割、効果を知ることができた。また、これらのフィードバックは低質量 ( $M_{\text{gas}} \lesssim 10^9 M_{\odot}$ ) の系やコラプス時期の遅い系において特に効果が顕著であり、銀河形成を考える際にこれらのフィードバックを考えることは必要不可欠であると言える。

1. Tajiri Y., Umemura M., 1998, ApJ, 502, 59
2. Susa H., Umemura M., 2004, ApJ, 600, 1
3. Komatsu E., et al., 2011, ApJS, 192, 18

# 太陽・恒星分科会

誰が為に星は光る

日時	7月28日 17:45 - 18:45 (招待講演: 飯田 佑輔 氏) 7月29日 9:00 - 10:00 7月30日 9:00 - 10:00(招待講演: 菅原 泰晴 氏), 10:15 - 11:15
招待講師	飯田 佑輔 氏 (宇宙科学研究所)「画像認識手法を用いて迫る太陽表面对流の磁場輸送」 菅原 泰晴 氏 (中央大学)「X線で見える恒星」
座長	須田武憲 (京大 M2)、三舛慧人 (九州大 M2)、川越淳史 (中央大 M2)、新井信乃 (お茶大 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。</p> <p>本分科会では太陽・恒星の幅広いテーマを取り上げ、広い角度から太陽・恒星の全体像を把握することを目指します。この試みにより専門分野を越えて多くの議論が行われ、知識の共有や新たな発見が生まれることを期待しています。さらに招待講演では太陽・恒星分野の第一線で活躍されている研究者を 2 名招待し、最新の研究を紹介していただきます。最先端の研究を肌で感じ、参加者のさらなる研究意欲をかきたてられることでしょう。皆が持っている太陽・恒星に関する知識やアイデアを結集し、本分科会が日本における太陽・恒星の研究をさらに加速させる エネルギー源となるよう期待しています。</p> <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>

飯田 佑輔 氏 (宇宙科学研究所)

7月28日 17:45 - 18:45 B(大コンベンションホール)

## 「画像認識手法を用いて迫る太陽表面对流の磁場輸送」

画像認識手法と太陽観測衛星ひのでのデータを用いた太陽表面における磁場輸送過程の解析を紹介する。

私達の最も身近な恒星である太陽は、11年の周期でその磁気活動を周期的に変化させるが、そのメカニズムにはまだ謎が多い(太陽ダイナモ問題)。標準的な太陽ダイナモシナリオでは、表面对流による磁場の輸送係数が重要なパラメータに挙げられる。太陽表面对流による磁場の輸送は、古く Leighton(1965) で提案されたように、磁場発展方程式における拡散項として取り扱われてきた。しかしながら、そのような取り扱いは理論・観測のどちらからもサポートはなく、“太陽表面对流による輸送をどう扱うべきか”という問題は、未解決であると言える。本研究は、この問題を解決すべく観測データ内の各磁場要素移動の統計性質を調べた。

近年の観測技術の進歩、特に宇宙からの衛星観測技術によって、太陽表面の多くの対流要素や磁場要素が安定して捉えられるようになってきた。このことは、各磁場要素の移流素過程からグローバルな取り扱いが可能であることを意味する。しかしながら、これらの構造は太陽全球スケールに比べて小さく、決定的な結論を得るためには莫大な数についての解析が必要がある。このような解析を人の目だけで行うことは、現実的に不可能に近い。本研究では画像の自動認識を利用してこの困難を解決したことを強調したい。

発表では、太陽ダイナモ問題や太陽表面磁気対流について丁寧なイントロダクションを行い、これらの解析結果とそこからダイナモ問題への議論について紹介する。

1. A. Nordlund, R. F. Stein and M. Asplund Living Rev. Solar Phys. 6 2 (2009)
2. V. I. Abramanko, V. Carbone, V. Yurchyshyn, P. R. Goode, R. F. Stein, F. Lepreti, V. Capparelli and A. Vecchio ApJ 743 133 (2011)
3. R. B. Leighton ApJ 140 1547 (1964)

菅原 泰晴 氏 (中央大学)

7月30日 9:00 - 10:00 B(大コンベンションホール)

## 「X線で見える恒星」

恒星は質量によって、異なる物理現象を起こし、異なる進化を辿る、多種多様な天体である。この恒星で起きる物理現象(例えば、フレアのような爆発現象)は、地上ではできないプラズマ実験場として最適である。また、恒星進化の理解は、銀河、しいては宇宙の進化そのものの解明に直結する天文学の最重要命題の一つである。

本講演では、恒星のX線観測結果に関するレビューを行い、「恒星からどんな情報を引き出せるか？」にフォーカスを当ててお話しする。本講演でお話するトピックとして以下のものを予定している。(1) X線観測のメリット・デメリット、(2) 小質量星からのX線：フレアとコロナ、(3) 大質量星からのX線：星風とそれらの衝突、(4) Astro-Hを用いた次世代のX線観測について。恒星は多種多様であり、講演時間が限られているが、できるだけ参加者の方々が専門分野を越えて多くの議論が行われるような講演にしたい。

### 恒星 a1 黒点ライトブリッジのダイナミクス

加納 龍一 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)  
 コロナ加熱問題を解決するにあたって、光球とコロナをつなぐ彩層のダイナミクスを理解することは重要である。そこで、彩層と光球の関係を調べるために、太陽黒点を裂くようにしばしば現れるライトブリッジという領域に着目して解析を行った。ライトブリッジの特徴として光球で超音速のダウンフローやライトブリッジに沿った電流が観測されることが知られているが、ダウンフローや電流が生じる原因、タイムスケール、彩層との対応関係はよく知られていない。

本会では参考文献に挙げた Shimizu(2011) の論文を基盤にしつつ、先行研究で調べられたものとは別の、短い撮像間隔で幾つかの衛星が同時観測を行ったライトブリッジの解析結果を紹介する。

1. Shimizu, T. 2011, ApJ, 738, 83S

### 恒星 a2 太陽フレアのトリガとなる磁気中性線付近の磁場構造

川畑 佑典 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)  
 太陽フレアは蓄積された磁気エネルギーが突然解放されて熱エネルギーや運動エネルギーに変換される現象である。フレアは黒点群が存在する活動領域において観測され、エネルギー解放メカニズムとしては磁力線が繋ぎかわる磁気リコネクションによるものであると考えられているが、フレアのトリガのメカニズムについてはよくわかっていない。

活動領域には磁場の極性が正から負に切り替わる地点である磁気中性線 (PIL) が存在し、フレア発生前にはこの磁気中性線に沿って長時間持続する (少なくとも5時間) シアの流れが観測されている (Na Deng et al. 2006)。また Kusano et al.(2012) ではこの磁気中性線において、シアの流れが存在するという条件に加え、ある特徴を持った磁場擾乱が局所的に存在する事でフレアが発生するというモデルを提案した。つまりフレアのトリガを調べるには、磁気中性線付近の磁場、及びシアの流れを詳細に解析する必要がある。

本発表ではフレアのトリガメカニズムに関わるこれらの論文を基に、太陽観測衛星ひのでに搭載された SOT により得られたデータの解析結果について報告する。

1. K. Kusano, Y. Banba, T.T Yamamoto et al. ApJ, 760, 81 (2012)
2. B. W. Lites, H.Socas-Navarro and A.Skumanich Apj, 1131, 43 (2002)

### 恒星 a3 スーパーフレアを起こした太陽型星の高分散分光観測

野津 湧太 (京都大学宇宙物理学教室 M1)  
 我々は、Kepler 宇宙望遠鏡の測光データの解析により、太陽型星 (G型主系列星) におけるスーパーフレア (最大級の太陽フレアの  $10 \sim 10^4$  倍、 $10^{33} \sim 10^{36}$  erg のエネルギーを放出) を多数発見した ([1] ほか)。太陽フレアは、黒点周辺の磁気エネルギーが突発的に解放される爆発現象である。スーパーフレアも同様の現象と仮定すると、そのエネルギーを説明するには、巨大な黒点の存在が必要である。一方、多くのスーパーフレア星では、準周期的な明るさの変動が観測されている。その振幅は、

黒点の影響による太陽の明るさの変動の振幅と比べてはるかに大きい。このことも、巨大黒点を持つ星が自転しているとすれば、説明が可能である ([2])。しかし、本当に太陽のような星で巨大黒点は存在するのか、分光観測による詳細な探査が重要である。

そこで我々は現在、すばる望遠鏡 HDS を用いて、スーパーフレア星の高分散分光観測を行っている (初期成果: [3] ほか)。本講演では、スーパーフレア研究全体の概要とともに、これまでに分光観測した 50 星について報告する。

観測の結果、50 星中 34 星では、連星の証拠は見られなかった。これら 34 星について、詳細な解析を行った。まず、自転の効果による吸収線の広がりや測定し、星の射影自転速度を求めた。求めた値は、星の自転軸の傾斜角の影響を考慮すれば、明るさの変動 (上述) の周期から推定した自転速度と矛盾しなかった。次に、Ca II の吸収線の強度 (星の彩層活動を反映する) を測定し、星の他の性質と比較した。その結果、明るさの変動振幅との間に相関が見られた。特に、大黒点の存在が予想される明るさの変動振幅の大きな星は、例外なく高い彩層の活動性を示した。これら 2 点から、上記の明るさの変動は、巨大黒点を持った星の自転で説明できることが支持される。

1. Maehara, H. et al. 2012, Nature, 485, 478
2. Notsu, Y. et al., 2013, ApJ, 771, 127
3. Nogami, D. et al., 2014, PASJ, 2014, 66, L4

### 恒星 a4 中質量星からの恒星風駆動と質量放出率の決定機構を理解するための数値シミュレーション研究

西澤 淳 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M2)

宇宙空間のあらゆる恒星は恒星風を吹き出して質量放出をしている。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、恒星の質量放出率がどのように決定されているかを規定するために、数値シミュレーションを用いて恒星風の運動エネルギーを計算している。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調べた。磁気流体力学を用いて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、磁気流体シミュレーションを行った Suzuki et al.2013 によると、太陽型星 (太陽と同じ質量、半径、有効温度を持つ主系列星) から吹き出る恒星風の運動エネルギーと質量放出率の大きさは、光球表面における摂動速度の二乗と磁場に比例することが分かっている。

本研究では太陽よりも質量が小さい中質量星に注目して、同様のシミュレーションを行っている。中質量星における恒星風の運動エネルギーと質量放出率の各パラメーターに対する依存性について、太陽型星と比較したときの類似点と相似点を議論する。

1. Suzuki, T.K.&Inutsuka, S.2005, ApJL, 632, L49
2. Suzuki, T.K.&Inutsuka, S.2006, J. Geophys. Res., 111, A06101
3. Hakamada, K., Kojima, M., Ohmi T., Tokumaru, M., & Fujiki, K. 2005, Sol. Phys., 221, 111

**恒星 a5 成長過程の superhump を用いた AM CVn 型 激変星の質量比の初めての推定**

磯貝 桂介 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

AM CVn 型激変星の連星の質量比はこれまで推定が不可能だった。しかし、理論的な推定方法が確立されたことを受け、初めて AM CVn 型の質量比を推定することが出来た。質量比を知ることは、連星の進化モデルを検証する上で非常に重要な意味を持つ。

激変星は白色矮星を主星に持つ近接連星系であり、軌道周期は数時間と非常に短い。その1つ AM CVn 型の特徴は、水素スペクトル線の欠乏と、普通の激変星よりも更に短い1時間未満の軌道周期である。また、伴星はヘリウム白色矮星であると考えられている。激変星では伴星から主星へと質量輸送が行われており、主星の周りには降着円盤と呼ばれる円盤状のダストが形成されている。降着円盤から主星への質量降着が原因で、激変星は outburst と呼ばれる突発的な可視の発光現象を示す。大規模なものは superoutburst と呼ばれ、このとき、同時に superhump という現象を起こす。superoutburst が最大で数等級の増光をして1~2週間続くのに対し、superhump は1時間ほどの軌道周期よりも数%長い周期で0.3~0.5等の光度変動を行う。superhump は連星の潮汐力が降着円盤に作用して引き起こす現象だと考えられている。そのため、superhump の周期は連星の質量比の関数となっている。これまでも superhump の周期から質量比を求める方法はあったが経験式であった。近年、superhump の中でも周期の変動があることが分かり、比較的周期の長い成長過程の superhump を使うことで、質量比を理論的に求める方法が確立された。今回、変光星 CR Boo の観測を通じて、AM CVn 型としては初めて成長過程の superhump を観測することに成功した。その結果、得られた質量比は激変星の進化モデルから予測される結果となった。

**恒星 a6 明らかになってきた激変星進化の最終段階**

中田 智香子 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

激変星とは、軌道周期が数時間程度の、白色矮星を主星とする連星系である。伴星から主星への質量輸送により、主星の周りには降着円盤が形成されている。標準的な激変星の進化理論では、激変星は質量輸送を進めながら、軌道周期が短い方向に進化する。その後質量輸送が進んで伴星の縮退が始まる時、系は最小軌道周期に達し、それ以後は軌道周期が長くなる。これが激変星進化の最終段階であり、この状態に達した系を”period bouncer”と呼ぶ。激変星進化のタイムスケールは数十億年であり、現在の宇宙年齢を考慮すると、多くの系が period bouncer として存在しているはずである。しかし、現在の観測では period bouncer 候補の天体はほとんど見つからない。

最小軌道周期周辺の天体は、ほとんどがこの SU UMa 型矮新星とそのサブグループに属する天体となっている。矮新星とは、アウトバーストという3~5等程度の振幅で数日間続く増光を示す天体である。このうち、SU UMa 型は通常のアウトバーストに加え、スーパーアウトバーストと呼ばれるより明るく持続時間の長い増光を示す。スーパーアウトバースト中には、スーパーハンプという微小な光度変動がみられ、その変動周期は、系の軌道周期よりも数%長いことが分かっている。

近年、period bouncer の有力候補とされる2天体が発見された。これらの測光観測では、スーパーハンプの成長段階が長く続く、スーパーハンプの周期変化が大きい、減光速度が遅い、といった共通の性質が見られた。さらに我々は、それぞれ2011年と2013年に増光が観測された2天体も同様の性質を示すことを発見した。これにより、現在と同様

の手法で過去5年間行われてきた観測では、計4天体の有力な period bouncer 候補が観測されたと言える。また、最終進化段階にある天体は増光頻度が非常に低いとされている。これを考慮に入れて、我々はおおまかに period bouncer の密度を推定した。その結果、我々が period bouncer 候補とした天体により、理論と観測の乖離を埋められる可能性がでてきた。

**恒星 a7 鹿児島大学 1m 光赤外線望遠鏡における観測データの自動解析パイプライン構築と脈動変光星の周期解析**

山下 智志 (鹿児島大学 M1)

ミラ型変光星には、変光周期と絶対光度が比例するという周期光度関係がある。この関係を用いることで、天体までの距離推定が出来ることから、ミラ型変光星の天の川銀河系内立体分布の解明を目指している。鹿児島大学 1m 光赤外線望遠鏡では近赤外線カメラを用いて、現在350天体以上の脈動変光星のモニター観測をしている。とくにミラ型変光星は、国立天文台 VERA プロジェクトの年周視差による距離測定が行われている。近赤外線観測では、天体の明るさと変光周期が求まることから、VERA と協力し周期光度関係の高精度化を目標としている。

私達は、J,H,K' バンドの視野5.5分角を有する近赤外線カメラで観測を行い、画素数512×512のHAWAIIアレイを用いて撮像されるデータが得られる。今までの解析手順として、各個人が画像処理から測光までを手動で行っていたため、膨大なデータ解析に多大な時間が掛かり、結果にばらつきが生じていた。私はこの問題点を解決するために、自動解析パイプラインを構築した。解析パイプラインは観測終了後の毎朝8時00分に、自動的にデータ転送・画像処理・天体検出・測光を行っている。さらに、視野に写り込んでいる天体を2MASSカタログ(Two Micron All-sky Survey)と比較・同定することによって、等級較正やアストロメトリの解析を自動で行うことが出来る。これらの解析パイプラインは8スレッドの並列処理をさせることで、解析に要する時間は約10分程度で行われるようになり、変光星の予想周期を求め、周期を決定するために必要な観測を判断することが出来る。また、従来の解析やパイプラインによる解析の結果として、約600天体についての変光周期や光度曲線が得られており、VERA で得られている暫定的な周期光度関係を用いて、ミラ型変光星の天の川銀河系内立体分布を調査している。今後の開発として、検出天体のデータベース化を進めており、新規変光天体の発見に応用していく予定である。

**恒星 b1 中間赤外線で大きく増光した天体について**

小野里 宏樹 (東北大学天文学専攻 M2)

宇宙において、中間赤外線の主な放射源は温度が数百K程度のダストである。YSO や終末期の恒星の周辺にはしばしば大量のガスやダストが存在し、それは恒星の進化、銀河内の物質循環、化学進化の重要な要素である。現在までの研究で、中間赤外線の光度の時間変化は、晩期型星の脈動や原始星の間欠的増光に付随して起こりうるということがわかっている。比較的定常な状態のダストに関しては様々な研究が行われ、大きな成果が挙げられてきた。しかしながら、晩期型星内部の熱パルス、原始星の周りの降着円盤の不安定性などが原因となる恒星の大規模構造の変化は数年から数百年という天文学的には非常に短期間に生じると考えられている。そのような恒星進化の決定的な場面を直接観測することはその物理的背景を明らかにするためにきわめて重要であるが、そのような観測はほとんどない。そこで、IRAS、AKARI、WISE とい

う中間赤外線全天サーベイを行った人工衛星のカタログデータを用いてそのような非常にまれな天体を検出できないかを調べることにした。IRAS とその他の衛星の観測時期には 20 数年の間隔がある。この時間間隔は恒星の内部構造の急激な変化と再調整が外部への質量放出や増光として反映される最小の時間間隔に相当すると考えられる。このような天体を探すため、 $F_{\nu, \text{AKARI } 9 \mu\text{m}} / F_{\nu, \text{IRAS } 12 \mu\text{m}} > 10$ ,  $F_{\nu, \text{WISE } 12 \mu\text{m}} / F_{\nu, \text{IRAS } 12 \mu\text{m}} > 10$ ,  $F_{\nu, \text{AKARI } 18 \mu\text{m}} / F_{\nu, \text{IRAS } 25 \mu\text{m}} > \sqrt{10}$ ,  $F_{\nu, \text{WISE } 22 \mu\text{m}} / F_{\nu, \text{IRAS } 25 \mu\text{m}} > \sqrt{10}$  のように条件を設定し、1 つ以上を満たすものをターゲットとした結果、11 天体が選出された。本講演では、これらの天体とその正体を探るための自身の観測の結果について報告する。

1. Habing 2004, Obs, 124, 393
2. Hartmann, L. 2009, Accretion Processes in Star Formation (2nd ed.; Cambridge Univ. Press)

## 恒星 b2 太陽フレア開始時における不安定性とカストロフ

石黒 直行 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)  
 太陽の研究、特にフレアトリガー問題に関してこれから研究を進めるにあたって、今回 Bernhard Kliem の Catastrophe versus instability for the eruption of a toroidal solar magnetic flux rope という論文の紹介を行います。この論文では、太陽表面での爆発現象の始まりが磁場の不安定性として、もしくはカストロフとして形成され（ここでカストロフというのは、主に考えている変数とは別のパラメーターの変化によって、平衡条件が変化することを表しています）、その両方が平衡下での力のつりあいに関する同じ方程式から出発していることを述べています。このときに、外部の 2 重極もしくは四重極内部のトロイダルフラックスロープを電流を輸送するフラックスのモデルとして用いると、パラメーター空間における安定な領域中での平衡消失のために、代表的な発展過程でのカストロフの折りたたみが生じることを説明しています。さらにこのカストロフとトーラス不安定性は同じ点で生じ、そのために太陽爆発の始まりの状況下で同様の描像になる、と示しています。

1. B. Kliem et al., 2014

## 恒星 b3 鹿児島大学 1m 光赤外望遠鏡の現状と今後の展望

林田 健三 (鹿児島大学 M1)  
 我々鹿児島大学は、1m 光赤外線望遠鏡を用いて、主に晩期型星の観測を行っている。この中で特に、ミラ型変光星は周期光度関係をもつことが知られている。周期光度関係とは、天体の絶対光度と変光周期が比例関係にあり、絶対光度が明るいものほど周期が長くなる、という関係のことである。この関係について、

- 1) 天文広域精測望遠鏡 VERA が年周視差で求めた距離を用いて、より信頼性の高い周期光度関係を構築する
  - 2) 多数のミラ型変光星での距離を光度周期関係から求めて、天の川銀河の三次元立体構造を明らかにする
- ということを目標にして研究活動を行っている。鹿児島大学の 1m 光

赤外線望遠鏡は視野  $5.5' \times 5.5'$ 、限界等級  $K' \sim 13.5\text{mag}$ (1 分積分,  $10 \sigma$ , Seeing=1.3") この観測装置を使ってモニター観測した結果得られた変光曲線や、観測視野の中で見つかった新たに変光が確認された天体なども結果として出てきている。現在 350 天体以上の脈動変光星をモニター観測しており、その中で変光曲線が求められたものもあり、今回報告する。

さらに、鹿児島大学は現在新たに装置開発などを行っている。具体的には、

- 1) 観測データを翌日の朝 8:00 に自動的に解析し、解析結果を翌日の観測に反映させる自動解析システムの構築
  - 2) 明るい天体の観測手段として、従来の全面減光フィルターよりも高精度な観測を実現する部分減光フィルターの導入
  - 3) J,H,Ks バンドを同時に撮像することにより、観測時間を短縮する、より短い時間間隔で天体の変光を追うことを可能にする、といったことでより高度な観測が可能となる 3 バンド同時撮像赤外線カメラの開発
- などを行っている。これらの開発状況などを含め、鹿児島大学の現在、および今後の活動について総括的に紹介していく。

## 恒星 b4 可視光望遠鏡による II Peg 及び EV Lac の観測

三宅 梢子 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)  
 当研究では、可視光望遠鏡を用いて RS CVn 型星の II Peg 及び dMe 型星の EV Lac の観測、解析を行った。フレア星として知られるこれら 2 天体は過去に X 線衛星で何度もフレア報告がある。太陽フレアにおいては、その発生機構は黒点に由来すると言われているが、太陽以外の恒星ではどうなるのか。それらを可視光によってアプローチできないかと考えた。

観測期間は 2013 年 11 月～翌年 1 月である。この観測で、どちらもフレア現象を確認することはできなかった。2 つの目標天体は、それぞれ相対測光で解析し光度変動を調べ、ライトカーブから星表面に対する黒点割合を算出した。さらに既知の周期でフィッティングを行った。EV Lac はひとつのサインカーブで表すことができたのに対し、II Peg はふたつのサインカーブの和で表された。光度変動は天体の自転による黒点の見え方が大きく影響している。異なるサインカーブで表されたということはつまり自転周期の異なる黒点がふたつ存在する、ということになる。II Peg は特に高頻度でフレアを起こしている。頻繁なフレア現象は、この異なる自転速度の黒点から出る磁場が度々リコネクションをしているからと考えられる。EV Lac においては、過去文献よりも黒点割合が大きいものに対してフレア検出ができなかったことから、過去データと照合した結果、現在その天体は過去とは異なる挙動を示していることが分かった。

## 恒星 b5 宇宙天気予報における太陽風の MHD シミュレーション

山野内 雄哉 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)  
 太陽フレアや磁気嵐、太陽風などの宇宙環境の擾乱は、放射線帯にある衛星の損傷や、船外活動をしている宇宙飛行士の被ばく、さらには地上での通信障害など、我々の生活に大きな影響を与える。これらの擾乱を把握し、それに対する影響を予報することを宇宙天気予報という。宇宙天気予報では太陽フレアや磁気嵐、太陽風などによる様々な擾乱を予報するが、本発表では太陽風に焦点を当てて議論を行う。宇宙天気予報のための太陽風の観測は地球から 150 万キロ離れたラグランジュポイント

で ACE 衛星が行っている。ここで観測された擾乱を電波によって地球に伝えることで、その擾乱が到達する前に我々はそれによる影響がある程度予想することができる。しかし、この方法のみでは ACE 衛星に到達する前の太陽風の情報は知り得ないため、比較的近い未来の予報を行うことしかできない。そこで、ACE 衛星に到達する前の太陽風の情報を MHD シミュレーションによって予想し、補完することで、この問題が解決できる。現在まで、MHD を使った太陽風のモデルは、地球などの惑星の軌道におけるリアルタイムの宇宙天気予報の実用的利用に向けて発展してきている。本発表では、名古屋大学で行われている宇宙天気予報モデリングの最新の論文である Shiota et al.(2014) を紹介する。2007 年から 2009 年の 3 年間のシミュレーションを実行し、その結果を地球軌道での太陽風の観測値や、Venus Express (VEX) や Mars Express (MEX) による金星と火星での観測値と比較したところ、ある程度的一致を得ることができた。また、このような比較によって、数値結果から太陽風の stream interface を検出することができ、このことはヴァン・アレン帯の外側のキラークラウドについての宇宙天気予報を行おうとするときに大変便利である。本論文紹介を通して、太陽風のモデリング研究の到達点と今後の方向性を考察する。

恒星 c1 1m 光・赤外線望遠鏡で新しくモニター観測すべきミラ型変光星の選出

坂田 脩一郎 (鹿児島大学 M2)

鹿児島大学 1 m 光・赤外線望遠鏡ではミラ型変光星の距離を測定してきた。これまでは赤外線天文衛星 IRAS のデータから候補天体を選んできたが、IRAS の感度が不十分であるため、特に遠方のミラ型変光星を大量に見落としている可能性が高いことがわかってきた。そこでミラ型変光星と同定された 3450 天体を可視光変光星カタログ GCVS から選び、2MASS の 2 色図上での分布を調べたところ、特定の範囲に集中していることがわかった。2MASS は IRAS より高い感度を持つので、そのデータから可視光で見える範囲より遠くのミラ型変光星を効率よく見つけることが可能になった。

恒星 c2 Semiconvective Zone の形成のされ方

中村 健太郎 (新潟大学宇宙物理学研究室 M2)

大質量星 ( $M \gtrsim 10M_{sun}$ ) の主系列段階でエネルギー輸送が放射優勢である Envelope と対流優勢である Core の間に平均分子量に勾配のある領域 (Semiconvective Zone) が形成される。Semiconvective Zone では特殊な混合 (Semiconvection) が発生し、最終的にはある一定の値の平均分子量の領域になるように均される。Spruit(1992) では Overturn という断熱的な混合により平均分子量が一定の狭い領域が形成され、その領域が拡散により周囲の領域に浸透し Semiconvective Zone が均されるとして平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールが計算された。

しかし、Spruit(1992) では 1 つの狭い平均分子量が一定の領域についてのみでしか議論がされていなかった。Semiconvective Zone の形成のタイムスケールよりも平均分子量が一定の狭い領域が広がるタイムスケールの方が長い場合、平均分子量が階段状の構造が形成され、そこから最終的な平均分子量が一定の領域になっていく。逆の場合は平均分子量が一定の 1 つの狭い領域が広がって最終的な平均分子量が一定の領域になる。2 つの場合に対して最終的な平均分子量が一定の領域になるまでの時間が変わってくるので、過去の恒星進化の計算の論文を参考にし Semiconvective Zone の形成のタイムスケールを計算し、平均分子量

が一定の狭い領域が広がるタイムスケールと比較を行った。

1. H.C.Spruit, A&A, 253, 131 (1992)
2. R.J.Tayler, ApJ, 120, 332 (1954)
3. R.Stothers, ApJ, 138, 1074 (1963)

恒星 c3 極域コロナホールにおける Alfvén 波によるエネルギー散逸の観測的定量化

藤下 祐人 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

Alfvén 波は、彩層およびコロナ加熱のエネルギー源と考えられている。この機構を対象として、分光観測やその他のデータ解析を用いて研究を進めるにあたり、その基本的な知見を得るために以下の論文 M.HAHN, D.W.SAVIN (2013) を紹介する。この研究では、極域コロナホールにおいて、Alfvén 波によって伝播・散逸されるエネルギーの測定し、それを数値化している。Alfvén 波は、コロナ加熱や fast solar wind 駆動のエネルギー源として考えられてきた。これまでの研究で、コロナホールの高度に伴うライン幅の減少、つまり Alfvén 波の減衰は指摘されているが、実際に波によるエネルギー損失の定量化はできなかった。これはライン幅が non-thermal velocity と ion temperature (thermal velocity) の両方に依存することによる。これを解決するために、wave damping が起こらず、高度に対して ion temperature が不変である低高度の観測を用い、 $v_{[nh]}$  と  $T_{[i]}$  の寄与を分離する方法を実行した。これにより、低高度での波によるエネルギー伝播量 ( $v_{[nt]}$  に比例) を決定することができる。結果として、initial energy flux density が  $6.7 \pm 0.7 \times 10^{15} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$  存在することがわかり、これは、2007 - 2009 の太陽活動極小期におけるコロナ加熱や太陽風加速に十分な値となっている。加えて、 $T_{[i]}$  についての解析から、イオン種に依存するものの、その値が 1 - 2MK の範囲にあることも導いている。

恒星 c4 光度の中間値比を用いた食連星のタイプ分類

三舛 慧人 (九州大学 宇宙物理理論研究室 M2)

公転軌道面が視線にきわめて近い連星系は、両星が互いに隠し合う食現象が起き、周期的な減光が観測されるため食連星と呼ばれる。ケプラー観測機は大量の恒星データを観測し、2000 個を超える食連星を発見した。それらの食連星は光度曲線の形を決めるパラメータによって 4 タイプ (detached, semi-detached, overcontact, ellipsoidal) に分けられ ([1]、Kepler Eclipsing Binaries に連星の一覧とパラメータの値が公開されている。

我々はケプラーで観測された食連星 2023 個の光度曲線について、光度の最大値  $L_{max}$ 、最小値  $L_{min}$ 、中間値  $L_{med}$  を算出し、中間値比  $((L_{max} - L_{med}) / (L_{med} - L_{min}))$  と主極小の周期との関係を調べた。その結果、周期が 0.5 日以下の食連星について、算出した中間値比の大きさによって overcontact と ellipsoidal の 2 タイプを分離できることが分かった。また分離できないものもあったが、元の光度曲線のエラーが原因であることが分かった。本研究の紹介と食連星が分離できる理由について議論を行い、さらに今後の展望について述べたい。

1. G. Matijević et al., 2012, AJ, 143, 123
2. A. Prša et al., 2011, AJ, 141, 83
3. J. L. Coughlin et al., 2011, AJ, 141, 78

6700 の各吸収線の深さから化学組成比、広がりから自転速度、ドップラーシフトから視線速度の上限を得た。これらの結果から考察されるこの星の正体について議論する。

.....  
**恒星 c5 ミラ型変光星のスペクトル分類**

岩崎 仁美 (東北大学天文学専攻 M1)  
 仙台市天文台 1.3m ひとみ望遠鏡を使用し、ミラ型変光星のスペクトル分類を行う。ミラ型変光星とは脈動変光星の一種で、変光の周期が 100 日より長く光度変化が大きい AGB 星のことである。このミラ型変光星はスペクトルによってさらに分類することができる。表面組成で炭素過多な場合 (C/O  $\geq$  1)、炭素星 (または C 型星)。酸素過多な場合 (C/O  $\leq$  1)、酸素星 (または M 型星)。観測天体は GCVS でミラ型星だと分かっている天体の中で、SIMBAD ではスペクトル型が決まっていない天体を選出した。さらに仙台で観測できる天体かつ等級が 10 等より明るいものに絞ると計 80 個のミラ型変光星が該当した。これらの天体について分光観測を行い、スペクトルから C 型星、M 型星に分類する。表面化学組成が酸素過多の場合は主に TiO のバンド吸収、炭素過多の場合は主に CN 等のバンド吸収が見られる。それぞれ特徴的な分子の深い吸収バンドが見られるので、低分散のスペクトルが得られれば、分類することが可能である。現在、GCVS で観測され、ミラ型だと分かっている天体の中でスペクトル型が決定されているのは、7835 星のうち 2459 星 (約 31 ミラ型変光星の表面化学組成は、星の初期質量や金属量に依存して決まる。太陽程度の金属量の場合を考えると、初期質量がおおよそ 2~4 太陽質量程度の星のみが最終的に炭素過多なミラ型星となりうる。従って、C 型星と M 型星の空間分布及び存在比は、恒星種族や天の川銀河の構造を考える上で重要な情報をもたらす。また、将来アストロメトリ衛星 (GAIA, JASMINE) のデータが出てきた時に、今回の表面化学の情報を組み合わせる事で、C 型星と M 型星で周期光度関係がどのように異なるかを調べることができる。

.....  
**恒星 c6 ぐんま天文台 GAOES 巨大フレア天体 HD347929 の高分散可視分光観測**

川越 淳史 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M2)  
 HD347929 は可視光の帯域で 0.5 等の変光幅をもつ K2 型星である。変光は自転によって黒点が見え隠れすることにより発生するが、このように大きな変光幅を持つ天体は、磁場活動が活発な RS CVn 型連星や T Tauri 型星の中でも数天体しかない (RS CVn 型連星では UX Ari や II Peg など、T Tauri 型星では V773 Tau など)。  
 HD347929 は全天 X 線監視装置 MAXI/GSC により 2010 年 6 月 27 日と 2013 年 5 月 20 日にフレアが観測されたことから、その磁場活動性の大きさが改めて認識された。2-20 keV のエネルギー帯域での X 線フラックスは 2 回のフレアとも  $1 \times 10^{-9}$  ergs  $s^{-1} cm^2$  を記録している。ROSAT Bright source catalog にも記載されており、活発な磁場活動の証拠は矛盾なく得られていた。しかし、34 日という変光周期は、MAXI で検出される巨大フレアを起こす RS CVn 型連星や T Tauri 型星の典型的周期である数日に比べ明らかに長い。またヒッパルコスで測定された距離の不定性も大きく (214(+215,-92)pc)、どのような星として分類できるのか、全くわかっていなかった (2014 年秋天文学会川越淳史他として発表)。

我々は HD347929 の正体を突きとめるため、ぐんま天文台の 150 cm 望遠鏡にとりつけた高分散分光撮像装置 GAOES にて、2013 年 7 月 19 日から 11 月 8 日までの 4 ヶ月で計 16 回、連続分光観測を行った。総露出時間は約 1800 秒、波長分解能は R~45000 であった。スペクトルの解析には、SPTOOL (Takeda et al. 1995) を用いた。結果、5600~

.....  
**恒星 c7 磁気リコネクションによる二重スピキュールの発生モデル**

須田 武憲 (京都大学宇宙物理学教室 M2)  
 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ってきた。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ペア (二重構造) で現れることが示唆された (Suematsu et al 2008)。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起こ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。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中間衝撃波と遅延衝撃波がスピキュールを発生させると考えた。そして 1.5 次元 MHD シミュレーションによって、磁気リコネクション後を想定した折れ曲がった磁場の時間発展を追い、生じた中間衝撃波と遅延衝撃波が実際にスピキュールを発生させることを確認した。本発表では我々の仮説と、数値シミュレーションの詳細な結果について解説する。

1. Suematsu, Y., Ichimoto, K., Katsukawa, Y., et al. 2008 in ASP Conf. Ser. 397

.....  
**恒星 c8 コロナ加熱・太陽風加速問題の理論的展望**

庄田 宗人 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)  
 光球表面はおおよそ 6000K であるのに対し、上層に存在するコロナは 100 万 K ほどの高温プラズマにより構成される。その詳細な加熱機構は未だに完全には分かっていない。この問題はコロナ加熱問題として古くから議論されており、太陽物理学における最も重要な未解決問題のひとつである。現在では磁気エネルギー解放による DC 加熱と磁気流体波動エネルギーの散逸による AC 加熱がもっとも有力な加熱機構として理論・観測の両面から研究されている。また、太陽から恒常的に放出されるプラズマ流である太陽風にも同様に研究すべき課題が残っている。Parker により理論的に予言された太陽風の存在はその後の観測により確かめられたが、そのバルク速度は速いもので 500km  $sec^{-1}$  から 1000km  $sec^{-1}$  に達し、Parker 理論 (熱エネルギー加速) では説明できない。この高速太陽風を説明するには別のエネルギー供給機構が必要となる。コロナ加熱問題と太陽風加速問題は長らく別々の問題として扱われてきたが、近年では両問題を統一的に説明するモデルの研究がなされている。本講演ではまず磁気流体波動 (アルフベン波) のエネルギーの散逸によりコロナ加熱・太陽風加速に関する観測事実を説明するモデル、およびそのシミュレーション結果に関する論文をレビューする。その上でアルフベン波のエネルギーの散逸に関してその素過程について考察し、より具体的に各々の散逸機構 (モード変換、位相混合、乱流散逸) のうち、どの機構がもっとも主要に働いているか独自の考察を交えて発表する。

1. T. Kudoh and K. Shibata ApJ 514 493 (1999)
2. T. Matsumoto and T. K. Suzuki ApJ 749 8 (2012)

.....

### 恒星 c9 軟 X 線トランジェント MAXI J0158-744 のモデル計算

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

2011 年に MAXI によって発見され、Swift による追観測が行われた、SMC における軟 X 線トランジェント MAXI J0158-744 を説明するモデルを構築することを目的としている。付近では Be 型星が発見されており、この現象は、Be 型星-白色矮星連星での特殊な新星ではないかと推測されている。しかし新星として考えると、1. 可視光が観測されていない、2. とても明るい(最大光度  $2 \times 10^{40} \text{ergs}^{-1}$ )、3. 継続時間がとても短い (1300s)、といったたぐいまれな特徴を有しており、特に、白色矮星の質量に対して、エディントン光度の 100 倍を超えるような光度について、未だ理論的な説明がなされていない。この研究ではこの現象を、チャンドラセカール限界と同等か、これを超えるような非常に重い白色矮星での新星と考え、また、光学的に薄い領域で新星風の加速が起きることで、輻射のエネルギーが失われず、高い光度が実現されていると推測し、モデルの構築を試みている。計算の詳細と、応用の可能性などについて紹介したい。

1. Morii et al., ApJ 779, 118, (2013)
  2. Kato & Hachisu, ApJ, (1994)
- .....

## 星間現象分科会

多波長観測とシミュレーションが解き明かす星間現象

日時	7月28日 15:15 - 16:15(招待講演：田中 孝明 氏) 7月29日 10:15 - 11:15, 13:30 - 14:30(招待講演：福井 康雄 氏), 14:45 - 15:45
招待講師	田中 孝明 氏 (京都大学)「X線・ガンマ線で探る超新星残骸における宇宙線加速」 福井 康雄 氏 (名古屋大学)「星間物質による宇宙進化の探求」
座長	馬場達也 (鹿児島大 M2)、島和宏 (北大 M2)、高田明寛 (京大 M2)
概要	<p>星間空間には、原子ガス、分子ガス、電離ガス、ダストなど様々な状態の物質が存在しています。これらは加熱と冷却、磁場、乱流、重力相互作用、衝撃波、天体からのフィードバックなどの物理過程を経て、高温希薄なガス、低温高密度な分子雲、惑星状星雲、超新星残骸といった多彩な姿を見せます。したがって、星間現象を理解することは物質の進化過程を理解することにつながります。そのため、系内を中心に電波、赤外線、可視光、X線、<math>\gamma</math>線など、多波長で観測を行うことで星間現象を理解する試みがなされています。 今後は TMT(可視光、赤外線)、SPICA(赤外線)、ALMA(サブミリ)、ASTRO-H(X線)、CTA(<math>\gamma</math>線)などの次世代望遠鏡によってさらに進展することでしょう。さらに、理論分野からは高性能計算機を用いて、磁場の影響や分子雲の衝突、不安定性の非線形解析などの複雑なシミュレーションが行われています。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>

田中 孝明 氏 (京都大学)

7月28日 15:15 - 16:15 B(大コンベンションホール)

## 「X線・ガンマ線で探る超新星残骸における宇宙線加速」

地球に降り注ぐ宇宙線が、どこで加速されているのかという問題は長い間未解決であった。宇宙線加速源としては、超新星残骸が有力な候補であると考えられてきた。超新星残骸で形成される衝撃波において、フェルミ加速と呼ばれる機構で粒子がエネルギーを得るという考えである。近年、X線・ガンマ線帯域での観測により、超新星残骸で宇宙線が加速されていることが観測的にも立証されつつある。日本の「すざく」衛星などのX線帯域での観測により、衝撃波で加速された電子からのシンクロトン放射が検出されている。これにより、超新星残骸において電子がTeVを超える高エネルギーにまで加速されていることが明らかになっている。さらにフェルミ・ガンマ線宇宙望遠鏡によるGeV帯域のガンマ線観測によって、宇宙線の大部分を占める陽子も加速されていることが明らかになった。超新星残骸の衝撃波において加速された陽子は周囲のガスと相互作用することにより中性パイ中間子を生成し、これが2つのガンマ線光子に崩壊する。フェルミ衛星は、複数の超新星残骸から、この放射に特有なスペクトルを検出し、陽子加速の証拠を得ることに成功した。

本講演では、上に挙げたような最近の観測結果を紹介するとともに、そのデータがどのように解釈できるのか、放射過程などの基礎的事項を説明しながら解説する。さらに、2015年に打ち上げが予定されている日本のX線天文衛星ASTRO-Hなど、次世代の観測機器によって期待される進展についても話す予定である。

福井 康雄 氏 (名古屋大学)

7月29日 13:30 - 14:30 B(大コンベンションホール)

## 「星間物質による宇宙進化の探究」

星の形成、宇宙線加速などの宇宙の基本過程を解明する上で、分子雲・原子雲の深い理解は不可欠である。星間物質の素過程を含めて、大質量星の雲衝突による形成、宇宙線の起源などの最新の研究成果を解説する。

1. Fukui et al. 2014arXiv1403.0999F
2. Fukui et al. 2014ApJ, 780, 36F

## 星間 a1 X線天文衛星「すざく」による超新星残骸 G304.6+0.1(Kes17)の観測

鷲野 遼作 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

超新星爆発では星の構成物質が飛び散り、星間物質と衝突することによって衝撃波が形成される。衝撃波は星からの噴出物や星間物質を加熱して高温のプラズマを形成する。この痕跡が超新星残骸 (SNR) である。SNR はその形状から分類があり、その 1 つに電波ではシェル状に広がり、X 線では中心に集中している混合形態型 SNR がある。近年、混合形態型 SNR から過電離状態にあるプラズマがいくつか見つかった [1]。過電離プラズマとは電離過程より再結合過程が優勢なプラズマで、従来の SNR の進化的理論では説明できないと考えられている。今後より多くの過電離 SNR を発見し、観測することが SNR の進化を系統的に理解するために必要である。

G304.6+0.1(Kes17) は銀河系内に存在する比較的古い混合形態型 SNR で、1970 年に電波によって見つかり [2]、赤外や X 線など多波長で観測されてきた [3]。我々は Kes17 が混合形態型 SNR であることから、附随する X 線プラズマが再結合過程優勢である可能性を考えている。そこでエネルギー分解能に優れ、広がった天体に対する低いバックグラウンドレベルを持つ X 線天文衛星「すざく」を用いて Kes17 の長時間露出観測を行った。今後はプラズマの電離状態を精度よく測定するためにスペクトル解析を行う予定である。本講演ではその解析結果について報告する。

1. e.g. Ozawa et al. 2009, ApJ, 706, L71
2. Shaver, P. A., & Goss, W. M. 1970, AuJPA, 14, 133
3. e.g. Combi, et al. 2010, A&A, 523, A76

## 星間 a2 SNR3C397 の観測と解析

小池 貴之 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

3C397 は天の川銀河内に存在する超新星残骸 (SNR) である。5000 年程度の若い SNR であると推定されており、電波シェルに X 線プラズマが内在する複合型である [1]。その最大の特徴は突出した鉄の K 輝線である。その等価幅は 5 keV 以上にもなり、銀河系内 SNR の中で最も大きい。さらに、2010 年のすざくによる観測からクロム、マンガンの K 輝線も検出された [2]。しかし、これまでの研究では 7 keV 以上の高エネルギー帯域の統計不足により連続成分に不定性があり、元素組成量の推定に大きな誤差が残っていた。そこで我々は 2013 年 10 月にすざくによる追観測 (露光時間 105 ks) を行った。2010 年の観測 (露光時間 70ks) と合わせた解析により、これまでで最も高い統計のスペクトルを取得した。

3C397 を解析する上でのポイントは、バックグラウンドとして大きく寄与する銀河面拡散 X 線放射 (GRXE) をいかに精度よく推定し、引くことができるか、という点にある。我々は SNR 周囲のデータを調べ、GRXE が過去に報告されているパラメータ [3] と矛盾しないことを明らかにした。さらに、本講演では SNR の高エネルギー帯域のスペクトルから鉄族元素の組成量を求め、3C397 の爆発の型について議論する。

1. Safi-Harb et al. 2005
2. Yang et al. 2013
3. Uchiyama et al. 2013

## 星間 a3 Central Compact Object 1E 161348-5055 を伴う超新星残骸 RCW 103 の「すざく」による観測的研究

古田 禄大 (東京大学牧島中澤研究室 M1)

重力崩壊型 (II 型) の超新星残骸 (SNR) は、中心に中性子星 (NS) やブラックホールを伴って生み出されると考えられており、実際にかに星雲などでは活動的な電波パルサーが見つかっている。また近年、SNR の中心付近から軟 X 線点源が相次いで発見されており、これらは Central Compact Object (CCO) と呼ばれている [3]。CCO は若い孤立 NS と考えられており、電波放射がなく周期変化率が小さいなど、これまでよく知られていた NS とは異なる性質をもつ。その起源はまだまだ謎が多いが、CCO は若い NS のかなりの部分を占める可能性がある。私はそうした CCO を生み出した超新星爆発の特徴を調べるために、CCO を中心天体にもつ II 型の SNR を研究することにした。

このような II 型 SNR の一つが RCW 103 である。これは 2000 歳程度 [1] の若い SNR で、中心に 1E 161348-5055 と呼ばれる CCO をもつ。距離約 3.1 kpc、視直径約 11.9 分で、2005 年 8 月の XMM-Newton 衛星による観測から、CCO (NS) の X 線放射に 6.67 時間の周期変動が見つかった [2]。しかし、周期が数 msec から数十 msec の高速回転で誕生するはずの NS を、わずか 2000 年でここまでスピンドダウンさせることは不可能に近く、その起源が議論されている。

私はこの SNR の特徴を調べるために、X 線天文衛星「すざく」の公開データを解析した。観測は 2009 年 8 月 16 日から 17 日に行われ、XIS 検出器で得られた exposure は 66 ksec であった。0.5–5.0 keV における flux は  $1.4 \times 10^{-10}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> で、その X 線スペクトルは電離非平衡プラズマモデルを使って、温度およそ 0.2 keV と 0.6 keV の二成分で説明できた。この二成分は SNR の shell を成す星間物質成分と内部の ejecta 成分と考えられる。この解析結果から、爆発前の周囲の星間物質密度は  $\sim 2$  cm<sup>-3</sup>、爆発のエネルギーは  $\sim 10^{51}$  erg と推定され、RCW 103 は重力崩壊型として典型的な SNR だとわかった。このことから、CCO を作る II 型の超新星爆発は特殊なものではないことが示唆される。

1. Carter, L. M., Dickel, J. R., & Bomans, D. J. 1997, PASP, 109, 990
2. De Luca, A., Caraveo, P. A., Mereghetti, S., Tiengo, A., & Bignami, G. F. 2006, Science, 313, 814
3. Pavlov, G. G., Sanwal, D., & Teter, M. A. 2004, Young Neutron Stars and Their Environments, 218, 239

## 星間 a4 X線天文衛星「すざく」による超新星残骸 RCW 86 での宇宙線加速の系統的研究

坪根 義雄 (青山学院大学大学院 M2)

銀河系内宇宙線の加速メカニズムとして超新星残骸衝撃波での Diffusive Shock Acceleration (DSA) が広く受け入れられている。しかし、加速効率を決めているパラメータが何なのかはよく分かっていない。その候補として残骸衝撃波の周辺環境が考えられるが、加速効率と周辺環境との関連を調べた研究はあまり無かった。

RCW86 は視直径約 1 度、距離約 1 kpc、年齢約 2000 歳の系内超新星残骸である。この残骸の X 線スペクトルは加速電子からのシンクロトロン X 線とプラズマからの熱的 X 線の両方を示しており、場所によって

シンクロトロン X 線が優勢なところと熱的 X 線が優勢なところがある。シンクロトロン放射強度は加速電子の密度に比例し、熱的 X 線強度は加熱された周囲のガスの密度の 2 乗に比例する。したがってこれらと比較することで、どのような環境で効率よい加速が行われているかを明らかにできる可能性がある。

本研究ではすざくの XIS により観測された合計 6 観測を用いて、残骸全面を 44 の小さな領域に分割し、領域ごとのスペクトル解析を系統的に行った。それぞれのスペクトルは  $\sim 0.3$  keV の星間物質と  $\sim 2$  keV の鉄イジェクタからなる 2 成分プラズマモデルと、シンクロトロン放射を表すべき型分布の重ね合わせで再現することができた。宇宙線加速の環境依存を調べるため、我々はシンクロトロン X 線強度と熱的 X 線強度の相関を調べた。シンクロトロン X 線強度は 3.0–5.0 keV の積分強度で、熱的 X 線強度は低温プラズマ成分の Emission Measure で評価した。その結果熱的 X 線が暗い領域ほど (1) シンクロトロン X 線がより卓越し (2) その放射が硬くなることを明らかにした。この結果は周辺の星間ガス密度が低い領域ほど宇宙線の加速効率が良いことを示唆している。

### 星間 a5 AKARI FIS データを用いた系外銀河のスタック解析によるダスト減光マップの補正

岡部 泰三 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

我々の銀河内にはダストが広く分布しており、あらゆる銀河系外の観測はこのダストを通った光を見ることになる。ダストは可視光線を吸収し遠赤外線 (FIR) を放射している。そのため、銀河系外の観測においては、銀河系内のダストによる減光の補正が本質的となる。現在最も広く使われているダストの減光マップは、1998 年に Schlegel, Finkbeiner, Davis (SFD) により発表されたもので、COBE と IRAS という二つの赤外線観測から作成された。SFD マップは FIR の放射量をもとにして作成されており、本来必要とされる可視光の吸収量を直接測定している訳ではない。これは SFD が可視光の吸収量と FIR の放射量に線形な関係を仮定し、FIR の放射量から可視光の吸収量を見積もるという構成方法をとっているからである。従ってこの仮定が妥当なものであるか検証することが重要となってくる。Yahata et al. (2007) は SDSS の銀河カタログの個数面密度を測定し、ダスト減光の値と比較することで SFD マップの信頼性を検証した。その結果 SFD マップはダスト減光が小さい領域で、僅かながら系統誤差が存在することを示した。しかしながらこのダスト減光が小さい領域は SDSS 観測領域のおよそ 7 割を占めており、系統誤差が小さいとはいえ精密宇宙論では有意に効いてくる可能性がある。この論文では系統誤差の原因を系外銀河の FIR フラックスによるものだと結論しているが、状況証拠のみで直接的な証拠は示されていない。そこで Kashiwagi et al. (2013) はスタック解析を用いてこの系外銀河の FIR フラックスを直接測定した。ここでは SDSS 銀河が存在する点を中心として SFD マップをスタックしていくことで有意なシグナルをとらえている。この結果、SFD マップの系統誤差が系外銀河の FIR 放射に起因することは確認されたと言える。しかしながら、IRAS の角度分解能は 3 分近くあり、さらなる定量的な解析は困難である。そこでこの講演では系外銀河のフラックスをより詳しく見るため、分解能のいい AKARI FIS データを用いてスタックした結果を発表する。

1. Schlegel, D. J., et al. 1998, ApJ, 500, 525
2. Yahata, K., et al. 2007, PASJ, 59, 205
3. Kashiwagi, T., et al. 2013, PASJ, 65, 43

### 星間 a6 NH<sub>3</sub> と H<sub>2</sub>O メーザーによる M17SW の観測

馬場 達也 (鹿児島大学 M2)

鹿島 34m 電波望遠鏡および国立天文台 VERA 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と H<sub>2</sub>O メーザーの VLBI モニター観測を行った。観測によって得られた NH<sub>3</sub> の輝線強度比より、星形成が活発に行われている場所を推測することができた。また、H<sub>2</sub>O メーザースポットの動きを見ることによって、原始星の存在しうる場所を推測することができた。

### 星間 a7 宇宙ダスト上におけるアミノ酸生成の理論的研究

木立 佳里 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

宇宙における化学進化については未だ不明な点が多く、模擬実験や宇宙観測により分子生成を明らかにする研究が盛んに行われている。宇宙空間において、すでに有機物や高分子が生成されていることが明らかになってきている。地球に飛来した隕石からはアミノ酸やアミノ酸前駆体 (ヒダントイン) が検出されている (G. W. Cooper et al. 1995)。また、観測では他のアミノ酸前駆体が見つかったことから、ALMA によるアミノ酸の検出が期待されている。

宇宙でのアミノ酸生成過程については様々な反応経路が考えられる。本研究では、その中でも一般的な生成過程に対して反応物及び中間体の生成エネルギーの安定性を評価することで、宇宙におけるアミノ酸生成の仕組みの解明を試みた。ヒダントインやアミノニトリルを経由する、グリシン及びアラニンの生成過程について高精度な第一原理計算 (密度汎関数法) により検討を行った。また、水溶液中での反応経路の解析には、Polarizable Continuum Model (PCM) による溶媒効果を考慮した計算を行った。

真空中では、計算した全ての反応過程の中ではグリシンが最も安定であり、過剰に安定な中間体は存在しなかった。アラニンについても同様の傾向が見られた。水溶液中でもグリシンが最も安定であったが、ヒダントイン形成は起こりにくい可能性があることがわかった。以上より、構成要素となる反応物があればグリシン、アラニンは容易に起こりうるようになった。

1. G. W. Cooper and J. R. Cronin, Geochim. Cosmochim. Acta. 59, 11003 (1995)

### 星間 a8 乱流分子雲におけるフィードバックのシミュレーション

島 和宏 (北海道大学 宇宙物理学研究室 M2)

観測される星形成率は、重力崩壊による星形成率に比べると数桁低いという問題がある。この問題を解決するのがフィードバックであると考えられる。30 Doradus のように多数の OB 星を含む星形成領域では、HII 領域、winds, jets, Supernova といった OB 星からのフィードバックが次世代の星形成に影響を与えその結果形成が阻害される。だが、その詳細は明らかでない。よってフィードバックを含めたシミュレーションによって理解することを目的とする。

本研究では Enzo コードを使用して、乱流分子雲でのフィードバック

をとまう星形成の AMR シミュレーションを行った。今回取り扱ったフィードバックは Photoionizing radiation と Supernova の 2 種類である。Photoionizing radiation は ray-tracing アルゴリズムにより輻射輸送方程式を解いて計算している。

Probability Density Function(PDF) や星形成率などの結果から、フィードバックが分子雲や星形成に与える影響を報告する。

1. Dale J.E., Ercolano B., Bonnell I. A., 2012a, MNRAS, 427, 2852
2. Dale J.E., Ercolano B., Bonnell I. A., 2012b, MNRAS, 424, 377

## 星間 c1 大小マゼラン銀河における孤立した大質量原始星の観測的研究

原田 遼平 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)  
観測的研究から大質量原始星は巨大分子雲の中で形成されると考えられていた。しかし、最近の観測から巨大分子雲 ( $10^5 M_{\odot}$  以上) から離れている孤立した大質量原始星が見つかったが、それらの起源はまだ知られていない。大小マゼラン銀河において、過去の観測では、これらの原始星の周りに分子雲が見つかっていなかったため、本研究でより高空間分解能の Mopra 望遠鏡を用いて、大小マゼラン銀河の 10 個の孤立した大質量原始星に付随する領域を観測した。その結果、大マゼラン銀河の 4 つの領域で CO の放射を検出し、そのうち 2 つの領域は原始星のある場所のみで放射が見られた。このことは、非常に小さな分子雲 (7 pc 以下、 $10^4 M_{\odot}$  以下) が存在したことを示しており、この領域において小さな分子雲から大質量星が生まれた可能性が極めて高いことが示唆される。今後はより高感度・高空間分解能の ALMA 望遠鏡で観測を行い、分子雲の物理的性質を求め、そのような大質量星がどのように生まれるのかを調べる予定である。

## 星間 c2 大気吸収線の環境依存性

高橋 一馬 (信州大学 理工学系研究科 M1)  
私の研究での主目的は比較的地球に近い星雲である、オリオン大星雲方向の星間物質によって分光スペクトル中に現れてくる吸収線の分析である。この中でも特に、まだ吸収物質が明らかになっていない 4000-13000Å の領域に約 600 本発見されている吸収線 (DIB) について詳細に分析したいと思っている。現在この DIB の吸収物質として最有力な候補としてフラレーンが挙げられている。しかし、フラレーンと DIB の同定を行う上で大きな障害となってくるのが地球大気吸収線である。大気吸収線のノイズを除去しきれないために DIB が大気吸収線の中に埋もれてしまっているという現状がある。現在でも、大気吸収線の除去作業は行われている。その手法としては、DIB が写り込んでいる対象星からのスペクトルデータと DIB が写っていない対象星近くの標準星からのスペクトルデータを割り算することで DIB だけを残そうとするものである。しかし、これは完全には上手く行っていない。対象星と標準星のデータを取った時の大気状態は異なっており、その違いにより 2 つのデータ上での大気吸収線スペクトルが異なってしまう、割り算をしても除去しきれずに残ってきってしまうという問題がある。この大気吸収線の除去精度の向上を目指して、標準星と対象星のデータ取得時の大気の違いに着目し、大気状態の違いによる吸収の違いを補正するために吸収線と大気状態の環境依存性を調べた。

本研究では、すばる望遠鏡で取ったデータについて、私が主に調べたいと思っている近赤外領域 (9000-10000Å) にある二本の大気吸収線について、データ取得日時での地表での気象データ (気温、湿度、大気圧) と比較して大気吸収と大気状態との相関を調べた。

## 星間 c3 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 宇宙線研究室 M2)  
G337.2-0.7 は銀河系内の若い超新星残骸である。これまでの観測で X 線スペクトルは光学的に薄い熱的プラズマと重元素からの輝線で再現できることが示された。高い重元素量 (Ca 12 solar) からはこのプラズマが Ia 型超新星の爆発噴出物起源であることが示唆される。それにもかかわらず、これまで Fe-K 輝線は見つかっていなかった。そこで私たちはすざく衛星を用いて 300 ks の長時間観測を行った。G337.2-0.7 は銀河面上に位置するため銀河リッジ X 線放射が主な X 線バックグラウンドである。また、明るい X 線連星 4U1630-47 からの迷光も無視できない。私たちはこれらのバックグラウンドを注意深く見積もり差し引くことで、エネルギーが 6.4-6.5 keV の低電離 Fe-K 輝線を発見した。超新星残骸全体のスペクトルは 1 成分のプラズマでは再現できず、少なくとも 2 成分の電離非平衡プラズマが必要であることが分かった。

## 星間 c4 スタック解析による銀河遠赤外放射量測定が与えるダスト分布への示唆

柏木 俊哉 (東京大学 宇宙理論研究室 D3)  
Ménard et al. (2010, 以下 MSFR) は SDSS 測光銀河の分布と遠方クエーサーの色との角度相関を用いて、銀河周辺での平均的なダスト赤化量を測定し、銀河の中心から数 Mpc のスケールにまでクエーサーの赤化が見られることを示した。この赤化が中心の銀河に付随するダストのみによるものとするれば、ダストの分布が普遍的に、銀河ディスク (~10kpc) をはるかに超えた銀河団スケールまで広がっていることを意味する。

一方で我々はこれまでに、SDSS 銀河を IRAS の全天遠赤外放射マップ上でスタックすることで、銀河の平均的な遠赤外放射を検出・測定することに成功している (Kashiwagi et al. 2013, 以下 KYS)。遠赤外放射の主な寄与はダストによるものと考えられるため、MSFR と KYS はそれぞれダストの吸収量と放射量という独立な物理量を通して、本質的には同等の観測結果を示したものと期待される。ただし、MSFR での解釈はダストは個々の銀河というよりも、むしろそれらを包むより大きなスケールの親ハローに広がって分布しているという描像であるのに対して、KYS ではクラスタリングした銀河内のダストが統計的に重なり合うことによる見かけ上の広がりであるとしており、両者の物理的解釈は全く異なっている。

本講演では、MSFR によるダスト赤化と、我々のスタック解析により得られたダスト放射のプロファイルを定量的に比較する。まず、2 つの観測結果から得られるダストモデルを、銀河系やマゼラン雲の減光曲線と比較することで、両者の整合性を検証する。さらに、KYS で提案した銀河内ダストの統計的重ね合わせという解釈のもとで、MSFR の観測結果がどの程度説明可能かについても議論する。

1. B. Ménard, R. Scranton, M. Fukugita, & G. Richards, MNRAS, 405, 1025 (2010)
2. T. Kashiwagi, K. Yahata, & Y. Suto, PASJ, 65, 43 (2013)

## 星間 c5 CIP 法による数値流体計算

柴野 祥平 (筑波大学、宇宙物理理論研究室 M1)

銀河は恒星をはじめとする天体及び星間ガスによって構成されている。星間ガスは銀河全体の質量と比べると小さいが、星間ガスは星の誕生プロセスに密接に関わっている。星間ガスの運動を記述する際には系の典型的尺度が物質を構成している分子の平均自由行程より十分小さいことが多く、星間ガスは流体とみなすことができる。本研究では宇宙空間で起こる流体現象を数値計算によって解析することを目的とし、CIP 法 (Constrained Interpolation Profile Scheme) による数値シミュレーションを行った。

本研究ではシミュレーションは一次元で考えた。まず、速度場が時間・空間的に一定の場合で、移流方程式を差分法の一つである一次風上差分法、Lax-Wendroff 法及び本研究のメインである CIP 法により数値シミュレーションを行った。次に精度評価を上記の三種類の手法について行った。また速度場が一定でない場合について、数値シミュレーションを行った。最後に CIP 法を用いて、実際に流体についてテスト計算を行った。

1. 矢部孝, 内海隆行, 尾形陽一: CIP 法-原子から宇宙までを解くマルチスケール解法 (森北出版株式会社, 2003)
2. 坂下志郎, 池内了: 宇宙流体力学 (培風館, 1996)

## 星間 c6 VERA で観測した星形成領域 ON2N での水メーザーの内部運動

濱畑 秀峰 (鹿児島大学 M1)

光領域のレーザーと同じ原理で電波領域で放射されるものにメーザーがある。メーザーは温度が 400 K の比較的高温高密度な領域で励起されるため、ジェットがディスクや周囲のガスと衝突する衝撃波領域で発生すると考えられている。特に水メーザーは、大質量原始星をとりまくガスと、大質量原始星に由来する分子流やジェットとの境界領域に位置すると考えられている (中小質量星形成領域や晩期型星の周囲などでも検出されるため、必ずしも大質量星形成の指標とはならない)。メーザーの増幅は特定の物理条件の領域でのみ起こり、ビーミングにより非等方的に放射され、強く偏波しているという特徴がある。放射領域はサイズが 1 AU 程度とコンパクトであり、メーザー源を VLBI の高分解能で観測して固有運動を測定することにより、ジェットの運動やディスクの回転を直接測定することが可能である。そこで我々は VERA を用いて Onsala 2 North (ON2N) の水メーザーの VLBI 観測を行った。ON2N は星形成領域の 1 つで、ウルトラコンパクト HII 領域や水メーザーが付随する。VERA を用いることで、相対 VLBI の手法により銀河系のメーザー源の位置と運動を高精度に測り、水メーザーの分布と内部運動を詳細に調べた。9 観測分のデータを解析し、視線速度幅 60km/s 内にあるメーザースポットを 1000 個ほど検出できた。また、メーザーの固有運動を測定し、原始星周りでは膨張円盤と双極流が形成している様子が明らかになった。

## 星間 c7 チャンドラ衛星による超新星残骸 RX J1713.7 - 3946 北西領域のスペクトル解析

荒川 真範 (立教大学 M1)

RX J1713.7-3946 は距離 1 kpc、年齢 1600 years 程度の若いシェル型の超新星残骸である。この天体からシンクロトロン放射による非熱的 X 線があすか衛星で観測され、高エネルギー電子の存在が示された。すざく衛星による観測から、シンクロトロン放射は 10 keV でカットオフが存在し、RX J1713.7-3946 の衝撃波における磁場の乱れが非常に大きいことが示された。また、チャンドラ衛星による解析では RX J1713.7 - 3946 が 1 年スケールの X 線強度変動を持つことが発見された。これは加速された電子によるシンクロトロン冷却と考えられ、磁場が 1 mG 程度まで増幅されていることが示唆されている。

本研究では 2006 年から 2011 年の間で我々がチャンドラ衛星によって行われた RX J1713.7-3946 の北西領域の 5 回の観測データを用いて、残骸の北西領域を 40 分割しスペクトル解析を行った。今回は、すざく衛星によるスペクトル解析によって確認されている 10 keV でのカットオフを各領域で検証した結果について報告する。

1. Koyama, K., et al. 1997, PASJ, 49, L7
2. Tanaka, T., et al. 2008, ApJ, 685, 988
3. Uchiyama, Y., et al. 2007, Nature, 449, 576

## 星形成・惑星系分科会

作ろう星・惑星！探そう系外惑星！

日時	7月28日 15:15 - 16:15, 16:30 - 17:30 (招待講演: 大向 一行 氏) 7月29日 13:30 - 14:30, 17:15 - 18:15, 18:30 - 19:30 (招待講演: 佐藤 文衛 氏) 7月30日 18:30 - 19:30
招待講師	大向 一行 氏 (東北大学)「宇宙初期の星形成」 佐藤 文衛 氏 (東京工業大学)「系外惑星を見つけるには」
座長	小野智弘 (京大 M2)、増田賢人 (東大 D1)
概要	<p>本分科会では分子雲コアからの星や円盤の形成、星周円盤内で起こる惑星形成を代表とする物理現象、太陽系内惑星・系外惑星の観測から表層環境に至るまでの惑星系研究といった広い領域を取り扱います。これらの分野では近年観測技術の進歩が著しく、原始惑星系円盤の非軸対称構造の検出や、直接法と間接法の双方による多種多様な系外惑星の発見、系外惑星大気分光観測等の驚くべき観測結果が報告されています。こうした詳細な観測はまた、理論研究の進展にも大きく寄与することが期待されます。これからの星形成・惑星系分野において、観測と理論が緊密に情報交換を行いながら研究を進めることの必要性は疑いようがありません。ALMAをはじめとした最新鋭の観測機器が登場し、TMTを用いた地球型惑星観測の計画(SEIT)も近い将来実現される今、星形成・惑星系研究は新たな時代を迎えつつあります。本分科会に参加される新時代を担う皆様には、夏の学校での発表や議論を通して観測や理論といった枠に囚われず知識を深め、今後の研究の発展と自身の成長のために役立てて頂くことを期待します。</p> <p>注) 水素燃焼する質量の星は太陽・恒星分科会で扱います。 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>

---

大向 一行 氏 (東北大学)

7月28日 16:30 - 17:30 B(大コンベンションホール)

## 「宇宙初期の星形成」

星形成全般について概観したうえで、宇宙初期の星形成過程がどう違うのか、その結果、生まれてくる星の性質がどう変わるのかについて講演する。また宇宙初期の超大質量BHの起源となりえる超大質量星の形成の可能性についても考察する。

---

佐藤 文衛 氏 (東京工業大学)

7月29日 18:30 - 19:30 B(大コンベンションホール)

## 「系外惑星を見つけるには」

系外惑星の発見から約20年経った。この20年間に観測精度は大幅に向上し、地上及びスペースからの大規模な探索によって候補天体を含めると数千個もの系外惑星が現在までに発見されている。地球質量、地球サイズの惑星も発見され、最新の統計によると太陽に似た恒星が何らかの惑星を一つでも保有する確率は約70%以上とも言われている。宇宙で惑星はありふれた存在と言えるだろう。

こう聞くと、系外惑星を見つけるのはたやすいことのように思えてくるが、実際には一つの系外惑星をきちんと発見するのはそう簡単ではない。観測誤差は言うまでもなく、親星があの手この手で惑星の発見を邪魔するので、惑星を見つけるにはまず親星のことをよく知る必要がある。

本講演では、系外惑星検出法の一つである視線速度法の場合を中心に、系外惑星がどのようにして「発見」されるのかを解説する

## 星感 a1 低金属量ガス雲の重力収縮シミュレーション

千秋 元 (東京大学 宇宙理論研究室 D2)

宇宙で最初の星 (初代星) は大質量 (数  $10\text{--}1000$  太陽質量) であったと考えられている [1] 一方、現在の星の平均質量は太陽質量以下である。典型的な星の質量はいつ、どのようにして小さくなったのか。初代星は金属 (ヘリウムより重い元素) を含まないガス雲で形成されるため、金属がその鍵を握っている。特に最近の研究 [2] では、金属が凝縮してできる固体微粒子 (ダスト) が星質量の遷移にとって重要であることが示唆されている。ガス雲の重力収縮過程でダストによる冷却が働くと、ガスは不安定になり、分裂するからである。本研究では 3 次元流体シミュレーションを用いて、初期宇宙でのガス雲の重力収縮過程を追い、形成される星の質量を求める。特にここでは、ダストの取り扱いを厳密にすることを試みる。

まず、先行研究 [3] では、ダスト量として近傍宇宙での値を用いている。しかし、現在の宇宙では様々なダストの供給源がある一方で、初期宇宙では超新星に限られてしまう。さらに、超新星内ではダストを破壊する効果もある。したがって、初期宇宙におけるダスト量は現在の値に比べて小さい。また、ガス雲が重力収縮して密度が上がっていく過程では、ガス中の金属原子がダストに取り込まれていく現象 (ダスト成長) が起き、ダスト量が増えるが、先行研究では考慮されていない。本研究では、超新星でのダスト形成/破壊の計算から得られたダスト量を用い、分子雲中でのダスト成長も考慮した。本講演ではその結果得られる星質量について発表する。

1. Hirano, S., Hosokawa, T., Yoshida, N., et al. 2014, ApJ, 781, 60
2. Omukai, K., Tsuribe, T., Schneider, R., and Ferrara, A. 2005, ApJ, 626, 627
3. Dopcke, G., Glover, S. C. O., Clark, P. C., and Klessen, R. S. 2011, ApJL, 729, L3

## 星感 a2 パースト降着下での超大質量星形成過程計算

櫻井 祐也 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

近年の可視光・赤外光観測から、宇宙が 10 億歳以下の時に、質量が 10 億  $M_{\odot}$  程度の超巨大ブラックホール (SMBH) が約 20 個存在していることが示された。この SMBH 形成過程を明らかにすることが、現代天文学の課題の一つとなっている。従来の SMBH 形成理論では、 $100 M_{\odot}$  程度の BH が種となり、これが降着・BH 合体を繰り返して SMBH になると考えられていた。しかしこの理論の問題の一つとして成長時間が足りないということが挙げられている。この問題を解消する理論として有力なものに、 $10$  万  $M_{\odot}$  程度の超大質量星から、SMBH の種となる同質量程度の BH が直接崩壊によりできるという direct collapse 理論の一種が考えられている [1]。

超大質量星が形成されるダークマターハロー中のガス雲では、ガスの星への急速降着が起きると考えられている。星が形成される過程でも星が縮むと、星が熱くなり、そこから多量の紫外線が出る。それが周辺ガスを電離し (フィードバック)、ガスの急速降着を妨げる。超大質量星ができるためには、星進化の過程でフィードバックが起これないことが重要であり、これを探究するためには星進化の数値計算を行う必要がある。従来の研究では、周辺ガスの質量降着率を一定とした星進化の計算が行われてきた [2]。0.1  $M_{\odot}/\text{yr}$  以上の一定降着率では、フィードバックが起きずに星が大質量になるまで進化できる可能性が示された。しか

し現実的な状況では降着率は時間変動する。本研究では、時間変動降着としてより現実的なパースト降着 [3] を考え、 $2 M_{\odot}$  の星が数百~数万  $M_{\odot}$  程度になるまで 1 次元の星進化の計算を行った。本研究で、平均降着率が 0.1  $M_{\odot}/\text{yr}$  以上の場合にも、フィードバックが起きる可能性があることが示された。

1. Haiman, Z., ASSL, 396, 293 (2013)
2. Hosokawa, T., Yorke, H. W., Inayoshi, K., Omukai, K., Yoshida, N., ApJ, 778, 178 (2013)
3. Vorobyov, E. I., Desouza, A. L., Basu, S., ApJ, 768, 131 (2013)

## 星感 a3 講演キャンセル

## 星感 a4 ALMA による原始星形成初期段階の高密度分子ガス観測

徳田 一起 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 D1)

原始星は分子雲コアが重力的に収縮することによって形成される。しかし、星形成の研究において、形成される星の質量分布や連星の形成機構など、本質的な課題が未解決である。これは、分子雲コア中で原始星が形成される直前と直後に対応する星形成の最初期状態が観測的に明らかになっていないことに対応する。MC27 (=L1521F) という天体は、おうし座星形成領域において最も進化した分子雲コアであり、重力的に収縮する様子が示唆されていた (e.g., Onishi et al. 1999)。さらに、Spitzer 望遠鏡の観測により、中心に超輝度の原始星および、その原始星からのアウトフロー起因と考えられる散乱光が確認されており、星形成の極めて初期段階にあると示唆されている (e.g., Bourke et al. 2006)。しかし、この原始星周辺のダイナミクスを調査するために、分子雲コアから原始惑星系円盤のスケールである (0.1 pc-100 AU) までの空間分布を明らかにできる観測が要求されていた。

本研究では ALMA (Cycle 0) を用いて MC27 を分子輝線 (e.g.,  $\text{HCO}^+ (J=3-2)$ ,  $\text{H}^{13}\text{CO}^+ (J=3-2)$ ) およびダスト連続波による観測を行った。その結果、(1) 非常にコンパクトで若い (~200 年) アウトフロー、(2) 原始星とは離れた (~100 AU) 位置に極めて密度の高い (~ $10^7$   $\text{cm}^{-3}$ ) 星なし分子雲コア、(3) アーク構造 (~2000 AU) や複数の分子雲コアの存在等が明らかになった。これらは進化段階の異なる構造体が動的に相互作用し、連星形成を進行させるといった描像を提案するものであり、本研究で初めて明らかにできたものである。

1. Bourke, T. L., et al., ApJL, 649, L37 (2006)
2. Onishi, T., et al., PASJ, 51, 257 (1999)

## 星感 a5 回転不安定から考える原始惑星系円盤の外側領域の構造

小野 智弘 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

1990 年代初頭に太陽系外惑星が初めて発見されて以後、2014 年 5 月の段階で 1700 個以上の系外惑星が発見されている。これらの中には、巨大惑星にもかかわらず短周期軌道を持つ短周期巨大惑星などの太陽系内惑星とは異なった性質を持つ惑星が多数存在する。このように、系外惑

星は軌道や質量における多様性を持つ。しかし、系外惑星が持つ多様性の成因は未解決な問題である。この問題を解決する為に、惑星形成の場である原始惑星系円盤の構造や進化を従来研究に比べ、より詳細に調べることが必要である。

ケプラー回転円盤の気体面密度分布の解析解として、自己相似解がある (Lynden-Bell & Pringle 1974)。最近が高感度電波観測によって原始惑星系円盤の測定が成されており、観測は原始惑星系円盤の気体面密度分布が自己相似解であることを示唆している。また、この気体面密度分布が自己相似解であることを仮定することで、原始惑星系円盤の大きさや質量などを観測結果から得ている。つまり、自己相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として利用されている。

我々は自己相似解が円盤外側領域において、重力に比べ圧力勾配力が無視できなくなる点に着目した。回転円盤内の圧力勾配力が無視できない領域では、回転不安定がおこることが理論的に知られている (Chandrasekhar 1961)。自己相似解の安定性について解析的に調べた結果、中心星の質量が小さく、かつ円盤外側で高温な場合には、自己相似解が回転不安定性の為に円盤外側領域で破綻することを発見した (Ono et al. 2014)。

この結果は、自己相似解は円盤の諸性質を測る為の定規として、常に有用であるわけではないことを示唆する。また、円盤外側の面密度分布は ALMA 等の高感度電波観測により、近い将来詳細な観測が可能であると考えられる。これらの観測を本研究の結果と比較することで、回転不安定性の観測的検証が期待される。

1. Ono, Nomura and Takeuchi, 2014, ApJ, 787, 37

## 星惑 a6 原始惑星系円盤の化学反応と H<sub>2</sub>O スノーラインの検出に向けて

野津 翔太 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

原始惑星系円盤において、中心星近傍は高温のため H<sub>2</sub>O はダスト表面から脱離し気体となるが、遠方では低温のためダスト表面に凍結する。この境界が H<sub>2</sub>O スノーラインであり、ダストの合体成長で惑星を作る際 H<sub>2</sub>O スノーラインの内側では地球型の岩石惑星が形成される。一方外側ではダストの総量が増加する。このため重力で周りのガスを大量に集める事が可能となり、木星型のガス惑星が形成される。太陽質量程度の前主系列星周りの円盤の温度分布を計算すると、H<sub>2</sub>O スノーラインは中心星から数 AU 程度に存在するとされている。しかし系外惑星系の場合空間分解能が足りず、撮像観測による H<sub>2</sub>O スノーラインの検出は困難であった。

一方最近 Spitzer や Herschel で円盤から放射される H<sub>2</sub>O 輝線を検出できるようになった。異なる波長の H<sub>2</sub>O 輝線の強度比を用いて H<sub>2</sub>O スノーラインの位置を見積もる研究もなされつつあるが [1]、円盤の温度分布のモデルに依存するものであった。しかし今後波長分解能の高い分光観測が可能になれば、輝線スペクトルの速度プロファイルを解析することで、モデルに依存せず H<sub>2</sub>O スノーラインを同定できると考えられる。

そこで本研究では、このような観測で H<sub>2</sub>O スノーラインを同定する方法を提案する。具体的にはまず原始惑星系円盤の化学反応計算を行い、H<sub>2</sub>O の存在量とその分布を調べた。すると H<sub>2</sub>O スノーラインの内側の円盤赤道面付近だけでなく、円盤上層部の高温領域でも H<sub>2</sub>O ガスの存在量が多い事が分かった。またその結果を元に、円盤から放出される H<sub>2</sub>O 輝線のプロファイルを、近赤外線からサブミリ波までの複数の輝線について計算した。すると放射係数が小さく励起エネルギーが高い

複数の輝線のプロファイルを分光観測で調べる事で、H<sub>2</sub>O スノーラインを検出できると分かった。講演ではこの解析結果、及び将来の分光観測との関係について議論する。

1. Zhang, K., et al. ApJ, 766, 82 (2013)

## 星惑 a7 乱流が存在する原始惑星系円盤中の固体微粒子の動力学

三宅 智也 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) M1)

乱流が存在する原始惑星系円盤中の固体微粒子の動力学について調べた、Youdin & Lithwick(2007)を紹介し、さらに、この論文においても考慮されていなかった円盤風の効果を取り入れた場合の固体微粒子の分布について論じる。

原始惑星系円盤中には乱流が存在しており、その乱流は磁気回転不安定性 (MRI) によって発生すると考えられている。乱流ガスによる粒子の攪拌の状況を決めることは、惑星形成の分野、特に微惑星の形成を研究する上で重要な研究課題である。具体的には、粒子同士の衝突時の相対速度を決定することにより、衝突合体もしくは破碎の条件の規定や、非弾性的なエネルギー散逸を見積ることが可能になる。

この論文では、周転円振動と垂直振動の両方を含むケプラー円盤の動力学の効果を取り入れ、固体微粒子に及ぼすガスの乱流運動による力を確率的扱った上で、固体粒子の拡散と、そのランダムな速度の時間発展を計算している。

方法としては、等方的な乱流を仮定しており、ブラウン運動を記述するランジュバン方程式を用いて、粒子のランダムな速度と拡散について解析的に求める。その結果、以下のような固体微粒子の拡散に関する結果が得られた。(i) 動径方向の粒子の拡散に対するガスの拡散の割合は乱流の最も大きい渦の回転時間によらず、粒子の大きさに依存する。(ii) 垂直方向の粒子拡散から、円盤の粒子層は大きな粒子になるほど赤道平面に沈殿するため薄くなる。(iii) 同じ粒子の大きさでも、乱流の渦の回転時間が軌道振動する時間よりも大きいと薄くなる。

一方、MRI によって円盤風が駆動されることが指摘されている。しかしながら、固体微粒子の動力学に与える円盤風の影響はこれまで調べられていない。そこで、円盤風の効果を取り入れた場合の固体微粒子の運動についても議論する予定である。

1. Andrew N. Youdin & Yoram Lithwick. 2007, Icarus, 192, 588.  
2. Takeru K. Suzuki and Shu-ichiro Inutsuka. 2009, ApJ, 691, L49

## 星惑 a8 原子惑星系円盤の磁気乱流による電子の加熱と電離度の減少

森 昇志 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

現在、原始惑星系円盤の中心星への降着は、磁気回転不安定性に起因する磁気乱流によって、円盤の角運動量が外側へ輸送されることで起きると考えられている。しかし、実際に磁気回転不安定性がおきるかどうかは、そこでの電離度に依存しており、原始惑星系円盤は低電離であるために、磁気回転的に安定な領域が存在する (Sano et al., 2000)。原子惑星系円盤で起きる乱流はサブミクロンサイズのダストからキロメートルサイズの微惑星まで、その成長に影響を及ぼす。そのため、円盤の乱流

状態を知ることは惑星形成を考える上で非常に重要である。

本研究では電子の電場加熱による電離度の変化に着目する。これまでの原始惑星系円盤の磁気乱流に関する研究は、電子の温度は中性ガスの温度に等しいとしていた。しかし、磁気乱流が成長すると強い電場を作り、電場による電子の加熱が無視できないかもしれない (Inutsuka & Sano, 2005)。電子の熱速度が大きくなるとダストに吸着されやすくなるために、ガス中の電子の数密度は減少する。これらの結果として、ある程度強い電場では電場の上昇に伴い電離度が減少する (Okuzumi & Inutsuka, in prep)。電離度は磁気乱流の強さに影響するため、電子の電場加熱の重要性を検討する必要がある。

本研究では、原始惑星系円盤で電子の電場加熱による電離度の減少がどこで起こるかを求めた。磁気回転不安定な領域で、磁気乱流と共に発達する電場に対する電離度の値を計算した。そして、低電離度のために磁気乱流が弱まるかを調べた。その結果、ダストサイズ  $0.1\mu\text{m}$ 、ダストガス質量比  $0.01$  の最小質量円盤では、 $20\sim 70\text{AU}$  まで電場加熱によって電離度が減少することを明らかにした。この領域では磁気乱流が成長することで電離度が減少するため、従来考えられていた値よりも非常に低い値で乱流が飽和状態に達すると考えられる。

1. Sano, T., Miyama, S. M., Umebayashi, T., & Nakano, T. 2000, ApJ, 543, 486
2. Inutsuka, S., & Sano, T. 2005, ApJ, 628, L155
3. Okuzumi, S., & Inutsuka, S. in prep

## 星惑 a9 擬物理量を用いた SPH 法の開発

山本 智子 (東京工業大学 地球惑星科学専攻 牧野研究室 M2)

天文学および惑星科学の研究において、流体シミュレーションは大きな役割を果たしている。このため、高精度な流体数値計算手法の開発は研究分野の発展に大きく貢献する。計算手法には様々なものが、構造変化が大きい場合には、ラグランジュ的流体計算手法である Smoothed Particle Hydrodynamics (Lucy, 1977; Gingold & Monaghan, 1977, 以下 SPH 法) を用いる事が有利である。しかし、従来の SPH 法 (以下、SSPH 法) では、密度が不連続もしくは、0 となるような、接触不連続面や自由表面を適切に扱えないという問題がある。これは、SSPH 法において、密度の微分可能性と正值性を仮定して、流体の基礎方程式の定式化を行なっている為である。そのため、接触不連続面や自由表面でこの仮定に矛盾が生じ、適切な計算ができていなかった。そこで、Saitoh & Makino (2013) では、密度の代わりに圧力の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なった SPH 法である DISP 法が開発された。DISP 法は接触不連続面を扱うことに優れている。しかし、圧力が 0 になる自由表面では、圧力の正值性の仮定と矛盾が生じ、適切な計算が出来ない。そのため、接触不連続面と自由表面で適切な計算をするには、これらの面で、微分可能かつ正值である量の導入が必要である。しかし、そのような物理量は存在しない。そこで、本研究では、新たに、オイラー方程式に現れない擬密度  $y$  と擬質量  $Z$  を導入し、 $y$  の微分可能性と正值性を仮定して、基礎方程式の定式化を行なった。(この SPH 法を SPSPH 法と呼称する。) 我々は、この  $y$  に人工的な拡散を施す事で、 $y$  がいたるところで、微分可能かつ正であることを保証する。また、 $Z$  は、 $y$  の拡散が、ラグランジアンに影響しないように、 $y$  と共に変化する量である。

1. Gingold R. A., Monaghan J. J. 1977, MNRAS, 181, 375
2. Lucy, L. B. 1977, AJ, 82, 1013
3. Saitoh, T. R., & Makino, J. 2012, arXiv:1202.4277

## 星惑 a10 SPH 法による天体の衝突破壊の数値シミュレーション

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

天体同士の高速衝突による破壊や合体は惑星系の形成の際に非常に重要な役割を果たす。たとえば地球と月のような惑星・衛星系の形成や小天体の形成などは天体同士の衝突によって生じたと考えられている。衝突により天体がいくつもの小さな欠片に破壊されて元に戻らなくなる臨界衝突の運動エネルギーを決定することは、衝突破壊による惑星系形成のモデルの構築や天体の質量分布の見積もりの為に必須である。しかしながら惑星系に存在する天体のサイズは  $\mu\text{m}$  サイズから  $10000\text{km}$  サイズまで非常に幅がある上に、衝突の速度も  $\text{km/s}$  程に及ぶ。一方実験室での直接の衝突実験により調べられるのは非常に狭い範囲に限られており、破壊プロセスの詳細を解明できる理論はまだない。

そこで本講演では Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) 法と呼ばれるラグランジュ的な流体力学の数値計算方法を弾性体のモデルに適用し、さらに変形によるひびの形成や成長による破壊という効果をモデル化して取り入れ、衝突破壊に必要な運動エネルギーを数値シミュレーションによって求めた方法を紹介する (Benz and Asphaug 1999)。

この方法により、衝突天体のサイズが数百 m より小さい場合自己重力よりも物質の微視的結合強度の方が重要なため、サイズが大きくなるにつれて破壊しやすくなるのが分かった。一方数百 m よりサイズが大きい天体では、自己重力の効果によりサイズが大きくなると破壊しにくくなった。この結果、数百 m サイズの天体が衝突により最も壊れやすいこともわかった。

しかしながら、上記の解析で仮定したモデルの妥当性や、シミュレーションに用いた計算法の精度に対しては慎重な吟味が必要である。例えば、SPH は接触不連続面や衝撃波面において物理量の空間微分の記述精度が低く、解析に誤差を与えることが懸念されている。そこで講演では、解析で仮定したモデルの問題点や SPH 法の改善方法についても論じ、今後の発展について議論する。

1. Willy Benz and Erik Asphaug, Icarus 142,5-20 (1999)
2. Willy Benz and Erik Asphaug, Icarus 107,98-116 (1994)
3. Shu-ichiro Inutsuka, Journal of Computational Physics 179,238-267 (2002)

## 星惑 a11 巨大ガス惑星の形成初期光度の推定

青山 雄彦 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)

近年、観測技術の発展に伴い系外惑星の赤外放射を直接観測した例がいくつか報告されている。これらはどれも長周期の巨大ガス惑星である。TTVなどで質量を求めることができる短周期の巨大惑星とは異なり、長周期ガス惑星の質量推定には惑星の光度と年齢の関係を用いる。赤外放射が検出される巨大ガス惑星は若い(数百万年から数千万年)。そのような若い惑星では、理論的な光度進化は初期条件として与える光度(初

期光度)に大きく依存する。つまり、仮定する初期光度によって質量推定の結果が異なってくる。従って、形成論から初期光度を推定することは、長周期巨大ガス惑星の質量推定・進化を議論する上で重要である。

Marley et al. (2007) ではガス惑星の光度進化に対する初期光度の影響について議論しているが、初期光度の起源については定量的な考察を行っていない。そこで本研究では、惑星への円盤ガスの降着過程を精査することによって現実的な初期光度の定量化を目指す。惑星の初期光度は、惑星に降着するガスの持ち込むエントロピー量に依存する。惑星に降着するガスは超音速であり、惑星周りで衝撃波を形成して加熱され、放射冷却でエントロピーを失う。この衝撃波の効果を定量的に扱うために、放射の効果を加味した流体シミュレーションを行う必要がある。Tanigawa & Watanabe (2002) によると、惑星に降着するガスはコリオリ力と惑星重力の釣り合いによる円運動をしており、その運動は球対称ではない。また、衝撃波の一部は円盤のスケールハイトよりも惑星に近い領域で発生するので2次元近似も適当ではなく、衝撃波による加熱と放射冷却の効果を正確に見積もるためには3次元で計算する必要がある。従って、FLASHコードを用いて3次元の放射流体シミュレーションを行い、惑星に持ち込まれるエントロピー量を求め、初期光度への影響を議論する。

1. Mark S. Marley, Jonathan J. Fortney, Olenka Hubickyj, Peter Bodenheimer, and Jack J. Lissauer ApJ 655 (2007)
2. Takayuki Tanigawa and Sei-ichiro Watanabe ApJ 580 (2002)

## 星惑 a12 ケプラー宇宙望遠鏡を用いたトランジット系外惑星の質量推定

仲谷 峻平 (東京大学 宇宙理論研究室 M1)

2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、太陽系外の惑星によるトランジット(主星に蝕を起こすこと)の際に引き起こされる主星の減光を観測するものである。減光が観測されると、太陽系外の星に惑星が存在するという間接的な証拠となり、実際に1000近くの系外惑星がこのトランジット法により発見されてきた[1]。

しかし、減光を観測した時点では、トランジット天体は系外惑星「候補」とされるに留まる。蝕を起こす連星系がトランジット惑星の減光シグナルを模している場合もあるからである。したがって、系外惑星候補が真に惑星であるという確証を得るためには、その質量が惑星質量程度であることを示す必要がある。

これまで、質量をはじめとした系外惑星のパラメータは、主に分光観測から求まる主星の視線速度により決定されてきた。しかし、ケプラーのターゲットには暗い星周りの惑星系が多く、このような系では各波長に分けて光子数を測定する分光観測は困難である。そこで近年、ケプラーによって発見されたトランジット惑星の質量推定法としてよく用いられるのが Transit Timing Variation (TTV) の解析である。TTVとは、複数惑星系における惑星同士の重力相互作用に起因するトランジットの一定周期からのずれのことを指す。この TTV をモデル化することで、惑星の質量などのパラメータを精密に決定することができる[2]。TTVのデータは、トランジットの減光のみを解析して得られるため、視線速度とは異なり分光の必要がない。したがって、特に暗い星周りの惑星系において、TTVによる質量推定法は大変有用なものとなる。

このような質量推定法により、ケプラーのデータから多くの惑星が発見されてきた一方で、まだ質量が決まっていない惑星も数多く残っている。そこで今回は、これら未解析の系のうち、複数の惑星(候補)を持

ち、かつ顕著な TTV が予想される系 (KOI-935 など [3]) を選び、TTV による質量推定法を適用した結果を議論する。

1. Borucki, W.J. et al., Science 327, 977(2010)
2. Holman, M.J. et al., Science 330, 51(2010)
3. Fabrycky, D.C. et al., ApJ 750,114(2012)

## 星惑 a13 Direct Imaging Constraints on the Tidally Heated Exomoons

鶴山 太智 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M1)

20世紀には太陽以外の恒星も惑星を持っているだろうと考えられ始めていたが、太陽系外の惑星が初めて発見されたのは1995年とつい最近のことである。しかし、それ以降現在までの20年弱で候補天体も含めると4000個以上も報告され、歴史が浅いながらも系外惑星天文学は非現実的なものから一気に天文学の「ホットスポット」にまで上り詰めた。

系外惑星を検出するといっても方法は複数あり、ケプラー宇宙望遠鏡をはじめ、現在までに発見されている系外惑星の大多数は間接的手法によるものである。しかし今回は、直接惑星を撮像するという検出方法で、更に系外惑星ではなく「系外衛星」について議論していく。現在のところ系外衛星の存在は一つも確認されていないが、理論上では潮汐力によって暖められた衛星 (Tidally Heated Exomoons、通称 THEMs) は直接撮像で検出できる可能性があるという論文 (Mary Anne Peters and Edwin L. Turner 2013 ApJ 769 98) が発表された。この論文では主に理論的な議論をしておりデータ解析をしていなかったため、実際に近傍の  $\tau$  Cet、 $\epsilon$  Eri という二つの天体についてすばる望遠鏡を用いて撮像し、データ解析を行った。その結果、主星回りに伴星と思われる点状天体は検出できなかったが、すばる望遠鏡 HiCIAO の検出限界から THEMs の存在範囲に制限をつけることができた。

もし系外衛星を直接撮像できるようになれば、地球型惑星を検出するよりも用意に地球型の天体を検出することができるかもしれない。そうなれば地球外生命についての議論も活発になり、これまで以上に系外惑星天文学の発展に繋がるだろう。

1. Mary Anne Peters and Edwin L. Turner 2013 ApJ 769 98

## 星惑 a14 フレアが惑星大気に及ぼす影響の解析

上原 翔 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

1990年代までは存在しないとさえいわれていた太陽系外惑星は、今や3000個以上の候補が発見され、宇宙には惑星が無数に存在することがわかってきている。いくつかの惑星検出方法のうち、2009年に打ち上げられたケプラー宇宙望遠鏡は、恒星の可視光の明るさを高精度で測定でき、惑星が主星を隠す時に生じる周期的な明るさの変化を検出できる。惑星による主星の掩蔽をトランジットと呼び、この手法をトランジット法という。惑星がこのような軌道を持つ確率は低い、ケプラー衛星は一度に10万個の恒星を一度に観測することができるので、トランジットをする惑星を多数検出できる(惑星候補数2362個、2012年1月現在)。

ケプラー衛星により得られた膨大な系外惑星データのうち、私は主星がフレアを起こす場合に注目した。先行研究として、軌道周期が1日未満である惑星 Kepler Input Catalog (KIC)12557548b (Rappaport+12,

Kawahara+13) では、トランジットの際の光度変化が一定でない点から惑星の大気が蒸発していることを発見した。私は、大気が定期的に蒸発する場合に限らず、例えばフレアといった主星に大きな光度変化がある時に、惑星大気が瞬間的に大きな変化を示すのではないかと考えた。

我々は、Kepler データから、スーパーフレアが検出される恒星で、トランジットを起こしている惑星候補を探し、数個の候補を発見した。今回は、そのうちのスーパーアースサイズの候補天体について解析を報告する。

1. S.Rappaport Volume 752, Issue 1, article id. 1, 13 pp. (2012)
2. H.Kawahara Volume 776, Issue 1, article id. L6, 6 pp. (2013)

.....

### 星惑 a15 冥王代における後期重爆撃による大陸の破壊と溶融

芝池 諭人 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

冥王代すなわち約 40 億年前より以前にできた岩体は世界中のどこにも見つかっていない。しかし近年、冥王代の放射性年代をもつジルコンを含む堆積岩が発見され、冥王代にはすでに大陸地殻があったと考えられるようになった。この大陸地殻は、いったいなぜ消えてしまったのだろうか。消失の原因として冥王代末期の天体衝突の集中、後期重爆撃 (Late Heavy Bombardment) による破壊や溶融が挙げられるが、定量的な推定はあまりなされていない。

本研究ではこれを解析的に計算する式を導出し、後期重爆撃による大陸地殻消失の説明が、困難であることを明らかにした。具体的には、後期重爆撃を Cataclysm, Soft-Cataclysm, Standard の三つのモデルで表し、衝突天体のサイズ分布を変化させ、冥王代の大陸地殻が掘削される量と溶融する量を推定した。

まず、地球に衝突する総質量、月面への最大衝突および月面のクレーター数密度をそれぞれ固定し、後期重爆撃の大陸に与える影響を見積もった。このとき、衝突天体とされる小惑星のサイズ分布を、実際の観測によって与えられた分布の累乗近似とし、そのベキ指数をパラメータとして変化させた。次に、月面の巨大衝突盆地 (Cataclysm モデル) のデータと、力学的数値シミュレーション (Soft-Cataclysm モデル) および月面のクレーター数密度 (Standard モデル) を定式化したものから、後期重爆撃の規模と大陸への影響の時間推移を推定した。なお、大陸地殻への影響として、総掘削体積、総溶融体積、掘削および溶融領域による地球表面のカバー率、の四つを推定した。

結果としては、後期重爆撃のいずれのモデルであっても、いくつかの巨大衝突によって大陸成長曲線と同程度の体積を溶融する可能性はあるが、溶融領域が地球表面を覆うことはできないとわかった。冥王代の大陸地殻は地球表面に点在していたと想像されるため、これら全てが溶融されるとは考えにくい。すなわち、後期重爆撃によって冥王代の岩体の消失を説明することは困難である。ただし、サイズ分布や大陸の分布によっては、大陸の大部分を掘削あるいは溶融した可能性があるとわかった。

.....

### 星惑 b1 トランジット時刻変動を用いた低密度惑星系の発見

増田 賢人 (東京大学 宇宙理論研究室 D1)  
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の

質量推定法として近年よく用いられるのが、TTV (Transit Timing Variation; 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) の解析である。TTV は、視線速度とは異なり基本的に測光データのみを用いて解析可能である。そのため、ケプラーのターゲットに数多く含まれる暗い星の周りの惑星系において、TTV の解析は特に有用である。

このような複数トランジット惑星系のうち、本研究では Kepler-51 (KOI-620) という系に着目した。この系は、力学的安定性から質量の上限値 [1] が与えられている 2 つのトランジット惑星 Kepler-51b (周期 45.2 日)、Kepler-51c (周期 85.3 日) およびトランジット惑星候補 KOI-620.02 (周期 130.2 日) の 3 つのトランジット天体を有しており、これらは 1 : 2 : 3 の平均軌道共鳴近くに存在している。本研究ではこれら 3 惑星の TTV を解析することで、各惑星の質量をそれぞれ  $2.1_{-0.8}^{+1.5} M_{\oplus}$  (Kepler-51b)、 $4.0 \pm 0.4 M_{\oplus}$  (Kepler-51c)、 $7.6 \pm 1.1 M_{\oplus}$  (KOI-620.02) と決定し、KOI-620.02 もまたこの系に属する惑星 (Kepler-51d) であることを立証した。さらに、トランジットから求めた惑星半径を上記の結果と組み合わせると、3 つの惑星全てがこれまで発見された中で最も低い密度 ( $0.05 \text{ g cm}^{-3}$  以下) をもつことが明らかになった [2]。この値は太陽系で最も密度が低い土星 ( $0.7 \text{ g cm}^{-3}$  程度) のさらに 1/10 以下であり、Kepler-51 系は現在の理論では形成が非常に難しい特異な惑星系であることが示された。

上記の結果は、「短周期の複数トランジット惑星系に属する惑星は、それ以外の惑星と比べて密度が低くより多くのガスを含む」という近年指摘され始めた傾向 [3] を支持する新たな証拠となった。この差異は、短周期の複数トランジット惑星系における他とは異なる形成・進化の経路の存在を示唆するものである。

1. Steffen et al., 2013, MNRAS, 428, 1077
2. Masuda, 2014, ApJ, 783, 1
3. Jontof-Hutter et al., 2014, ApJ, 785, 15

.....

### 星惑 b2 NGC2264 における原始星の X 線長期変動

兼藤 聡一郎 (中央大学 天体物理学 (坪井) 研究室 M1)

NGC2264 は巨大分子雲 Mon OB1 の中で赤外線帯域で最も明るい活発な星生成領域である。電波の連続波での観測ではたくさんのコアが確認されており、まさに今、星が生成されていることを表している。X 線帯域では、角度分解能、エネルギー分解能の良い X 線観測衛星 Chandra が 2002 年に 1 観測、2011 年に 4 観測のモニター観測を行っていた。

そこで我々は、この全てのデータを解析し、300 以上の X 線ソースの検出を確認した。視野内には Peretto et al.(2006) で発見されたダストコアの集団、領域 C と D が含まれていた。これらの領域にはたくさんの Class 0 天体が含まれている。このダストコア周辺部に我々は複数の X 線源を検出し、それらの長期的時間変動を捉えた。さらに X 線源の進化段階を Spitzer および 2MASS のデータを使ってクラス分けを行った。発表では X 線源が、赤外線、電波においてどのように検出されているかを報告し、それぞれの進化段階などの詳細についても報告する。

.....

### 星惑 b3 暗黒星雲コアにおける化学進化の観測的研究

種倉 平晃 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)  
暗黒星雲コアの化学組成は、コアの物理・化学的環境、進化・形成過程を理解する上で重要な知見を与えてくれる。牡牛座分子雲は 150 pc 程

度の距離にある小質量星形成領域であり、現在、大質量星などの活動の影響を受けていないことから、暗黒星雲コア自身の進化・形成過程を述べるのに適した領域といえる。L1544 領域はこの牡牛座分子雲の北東に位置し、比較的進化の進んだ pre-stellar コアとして知られている。その中心では CCS や CO などの分子で depletion が進んでおり、また 0.1 pc スケールの円盤状構造の回転や infall などを示唆する速度プロファイルも報告されている。我々は野辺山 45 m 望遠鏡を用いて 10 種類近くの分子輝線を用いた L1544 コアのマッピング/ストリップ観測を行った。その結果、CCS 分子と SO 分子が反相関するように分布しながら、かつ、コアの中心では SO 分子も depletion していることが分かった。このことは、CCS と SO は暗黒星雲においてそれぞれ化学進化の前半と後半に豊富となり、SO はさらに密度が上昇していくと気層からダストへの depletion が進み、存在量は減少していく、という数値化学進化のモデルの描像と良く一致している。一方で我々はさらに、このコアの中心から北東に約 0.1 pc 離れた場所に、L1544 領域において最も SO 強度の強い clump 状構造が存在することを発見した。この clump では、高密度コアの化学進化の後半をトレースする  $\text{NH}_3$  や  $\text{N}_2\text{H}^+$  といった分子は検出できていない。さらにハーシェル衛星の 250  $\mu\text{m}$ 、500  $\mu\text{m}$  などのダスト放射などから導出した温度環境は、L1544 コア中心と同程度であった。また clump において算出した可視減光度 (ないし  $\text{H}_2$  柱密度) は 4 等程度と translucent cloud のレベルであり、少なくともコアの中心よりも 3 倍程度は少ないものと見積もられる。このように密度・柱密度の少ない領域で、なぜ化学進化の後半をトレースする SO 分子が豊富に存在しているのだろうか。L1544 コアの物理状態 (ダイナミクス、構造、密度、温度) や化学状態を多角的に探り、その原因について迫る。

1. N. Ohashi and Siow Wang Lee ApJ 518 (1999)
2. Y. Aikawa and N. Ohashi ApJ 552 (2001)
3. M. Tafalla and D. Mardones ApJ 504 (1998)

## 星惑 b4 Ophiuchus North region における分子雲の観測的研究

松本 貴雄 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

Ophiuchus North region における分子雲は、距離 $\sim$ 130pc に位置しており、トータル質量は  $4 \times 10^3 M_\odot$  である。また、この領域は星形成がほとんど行われておらず、約 0.3 % の低い星形成効率が見積もられている (Nozawa et al. 1991)。ただし、周辺に  $\text{Oph}$  (O 型星) が存在しており、分子ガスはそれによる紫外線の放射の影響を受けていると考えられている (Tachihara et al. 2000)。我々は、この領域の分子ガスの物理的性質、O 型星・HII 領域による分子ガスへの影響、将来の星形成の可能性等を探るため、1.85m 電波望遠鏡を用いた  $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=2-1$ ) の 3 スペクトル同時観測によって、この領域の一部観測を行った。2014 年 1 月から 4 月の期間で、 $l=4^\circ \sim 12^\circ$ ,  $b=17^\circ \sim 23^\circ$  に対応する 20 平方度をカバーし総観測点数は 72000 点である。3.35 分角の有効空間分解能に対し、1 分角グリッドにて OTF (On the Fly) 観測を実施した。得られたスペクトルの平均雑音温度は、速度分解能 0.08 km/s で  $T_{\text{rms}}=0.6\text{K}$  であった。

フィラメント構造の分子雲 L204 において  $^{13}\text{CO}$  ( $J=2-1$ )/ $^{12}\text{CO}$  ( $J=2-1$ ) 比が高いところで、 $\text{C}^{18}\text{O}$  輝線が見られることが分かった。また、 $^{12}\text{CO}$ ,  $^{13}\text{CO}$ ,  $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J=1-0$ ) のデータと 1.85m 電波望遠鏡のデータの比較により、分子雲の密度や温度の物理量の導出を行った。講演ではこれらデータ比較の結果について報告する。

1. S., Nozawa, et al., ApJ, 77, 31 (1991)
2. K., Tachihara, et al., ApJ, 528, 24 (2000)

## 星惑 b5 原始惑星のガス捕獲による軌道進化

菊地 章宏 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M2)

近年の直接撮像観測により、ほぼ円軌道で長周期 ( $\sim 30-1000\text{AU}$ ) の巨大ガス惑星が発見されている。長周期では惑星形成時間が円盤ガスの散逸時間よりも長く、その場で形成されたとは考えにくい。本研究では、ガス捕獲によるコアの軌道進化の式を解析的に導出し、それらを数値的に解くことで、以下のコア集積モデルに基づいた形成シナリオで観測を説明しようか調べた。1)  $< 30\text{AU}$  で微惑星が集積してコアができる。2) 近くのガス惑星によってコアが散乱されて高離心率になる。3) 遠点近くで大きな角運動量のガスを捕獲することで、軌道長半径はあまり減少せずに円軌道化する。4) 結果として、ほぼ円軌道の長周期巨大ガス惑星になる。結果、以下のことが分かった。質量が 10 倍増加する間に離心率は 1/5 になる。軌道長半径は、離心率が 1 から 0 に減少する間に多くて 1/2 しか減少しない。ゆえに、このシナリオは観測された円軌道長周期巨大ガス惑星の形成を説明しよう。もし散乱されたコアの遠点距離が円盤サイズよりも大きければ、軌道長半径は円盤サイズの約 1/4 になる。ホットジュピターの軌道長半径が円盤の内縁を示しているのと同様、長周期ガス惑星の軌道長半径は円盤の外縁を反映していると言える。

1. Ida, S., Lin, D. N. C. & Nagasawa, M. 2013, ApJ, 775, 42

## 星惑 c1 二重拡散対流による乱流混合と層形成

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

二重拡散対流は、熱と組成の拡散によって起こる対流であり、地球の海洋ではよく知られた現象である。二重拡散対流は、熱的・組成的に成層化された系において、Ledoux の条件では安定であるが、Schwarzschild の条件では不安定な領域で発生し、天体物理学においても二重拡散対流が熱や組成の輸送を担っている状況は幅広く生じている可能性がある。例えば、中質量星では平均分子量の勾配が対流コアの端で大きくなる。この平均分子量の勾配が十分大きくなった領域は二重拡散対流領域になる。また、巨大ガス惑星の内部において、エンベロープの水素とヘリウムが分離して存在している領域や、岩石コア近傍の金属量の多い領域について、二重拡散対流の熱や組成の輸送に果たし得る役割が議論されている。さらに、白色矮星の脈動のメカニズムや、トランジットしている系外惑星の異常に大きな半径を説明するメカニズムとしても提案されている。しかし、この二重拡散対流の性質はよく分かっていない。

Rosenblum et al. (2011) では、二重拡散対流の 3 次元シミュレーションを行っている。ある場合では、二重拡散対流は一樣な乱流状態になることが分かった。しかし、乱流によるフラックスは組成勾配のない通常の対流よりも小さい。別の場合では、系は熱と組成による多数の薄い層を形成する。その後、形成した多数の薄い層は合体して一つの層になる。この結果を海洋学分野の層形成の理論と比較すると、よく一致することが確認された。熱と組成の混合率は、層が形成されるときに大きく増加し、それぞれの層が合体するときさらに増加する。多層構造の中の熱

フラックスは、層の高さの簡単な関数になっていることが分かった。

今回は、Rosenblum et al. (2011) のレビューを行う。さらに、これまでの研究の問題点を論じ、今後の発展についても議論する。

1. Rosenblum et al. ApJ 731 66 (2011)

## 星惑 c2 M 型星周りの惑星形成シミュレーション

磯江 麻里 (国立天文台三鷹 M1)

近年、観測技術の発展に伴い太陽型星よりも小さい質量を持つ M 型星の周りにおいても系外惑星が発見されている。M 型星は中心星近傍にハビタブルゾーンを持つのでハビタブルプラネットの観測可能性が太陽型星よりも高い。また、中心星の断面積が小さいので太陽型星よりも小さい惑星をトランジット法で検出することができる。一般に、地球型惑星形成は暴走的成長/寡占的成長と、それに続く円盤ガス散逸後の巨大衝突段階の 2 段階で記述される。惑星形成の軌道構造 (平均運動共鳴、離心率、軌道長半径) に大きな影響を及ぼすものとして惑星を中心星方向に移動させる効果 (タイプ I 惑星移動) が重要だと考えられてきた。しかし、タイプ I 惑星移動の効果だけでは説明できない平均運動共鳴に捕獲されていない系外惑星が最近の観測で発見された。そこで本講演では、M 型星の中心近傍での地球型惑星形成を、円盤ガスを考慮に入れた N 体シミュレーションによって、最新の観測結果の説明を試みた “N-body simulations of planetary accretion around M dwarf stars” (Ogihara & Ida 2009) を紹介する。この論文では、タイプ I 惑星移動がある場合とない場合に巨大衝突段階までの地球型惑星形成シミュレーションを行った。その結果、惑星移動が遅いと始めに平均運動共鳴に捕獲された状態で並ぶ惑星の数が増え、円盤ガスの散逸後に巨大衝突を起こし平均運動共鳴から外れることを明らかにした。つまり、先述した観測された惑星は惑星移動速度が遅い状況で形成されたことが示唆された。しかし、共鳴に入った惑星系の円盤散逸後の安定性はまだわかっていないため更なる研究が必要とされる。本講演では地球型惑星形成について調べた論文を紹介し、観測結果との整合性をふまえ最新の研究成果と問題点を挙げ、今後の研究課題を示す。

1. M.Ogihara, & S.Ida, 2009, ApJ, 699, 824

## 星惑 c3 星と惑星形成の初期段階

鈴木 匠 (新潟大学宇宙物理学研究室 M1)

本発表では、Zhi-Yun Li, Robi Banerjee, Ralph E. Pudritz, Jes K. Jorgensen, Hsien Shang, Ruben Krasnopolsky, Anaelle Maury arXiv:1401.2219 [astro-ph.SR] についてのレビューを行う。星形成と惑星形成は、原始惑星系円盤を通して繋がっている。原始惑星系円盤の理論的理解は、近年急激な進展を見せている。ここで、初期の原始惑星系円盤の形成とアウトフローの理論とその観測、また、それらと惑星形成の初期段階の繋がりに注目した。円盤の形成は、流体力学的なコアの収縮の間、角運動量は保存するというシンプルな結果で考えられていたが、磁化したガスの中では、より捉えにくいものになっている。この場合、その rotation は、磁力によって崩されうる。この「magnetic breaking catastrophe」について知られていること、その解決方法、初期の原始惑星系円盤の現在の状態の観測をこの論文により理解する。また、アウトフローについても、円盤の形成に深く関係しており、これは、星形成の

重要な手がかりでもある。この初期の円盤とアウトフローの特性は初期段階の惑星形成の鍵となっている。

1. Zhi-Yun Li, Robi Banerjee, Ralph E. Pudritz, Jes K. Jorgensen, Hsien Shang, Ruben Krasnopolsky, Anaelle Maury arXiv:1401.2219 [astro-ph.SR]

## 星惑 c4 回転分子雲コアの分裂条件

福島 肇 (京都大学 天体核研究室 M1)

星の質量分布は初期質量関数 (IMF) として与えられるが、理論的に分布の説明はなされていない。しかし、観測的に星形成の初期条件である分子雲コアの質量分布と IMF に相関があると示唆されているため、分子雲コアの重力崩壊の過程を調べる事は重要である。ここでは、等温、等密度の一樣回転している回転楕円体分子雲コアの収縮を扱う。回転しない場合は自己相似的な収縮が見られるが、回転が加わると分子雲の収縮には三つの結果があり、(1) 自己相似的な収縮を行い中心に一つの断熱的なコアを作る (2) 細長い形状に収縮するが分裂しないもの (3) 等温収縮の段階で分子雲コアが分裂するもの、と分けることがわかった。特に角速度が小さい極限では、初期の熱エネルギーと重力エネルギーの比によって分裂が起こるかどうかが決定できる。本発表は [1] のレビューである。

1. T.Tsuribe and S.Inutsuka Apj, 526, 307 (1999)

## 星惑 c5 降着衝撃波による初代銀河中での超巨大質量ブラックホールの形成

森田 一平 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M1)

初代銀河の中心付近の衝撃波が発生する場所での超巨大質量星の新しい形成シナリオの提案をする。ピリアル温度以上の初代銀河の集合体は冷たく、密度が高いガスの流入をよって成長する。衝撃波後面では Ly  $\alpha$  放射と等圧収縮で 8000K 程度まで冷える。衝突波後面の等圧収縮が続くかどうかは次の条件による。もし、密度が水素の回転を励起するほど高ければ、高くなった水素分子の分裂が冷却よりもガスを圧縮するかどうかということである。この場合、衝突波後面は巨大質量の分子雲をつくり、これは分裂せずに、Ly  $\alpha$  の冷却によって等圧的に崩壊する。結果として超巨大星が形成し、超巨大質量ブラックホールの種として進化することが予測される。熱進化を計算することで超巨大質量星の形成条件を定めることができる。これは初期のイオン化度に依存する。また、金属量が 1000 分の 1 以下であれば、超巨大星の形成に影響を及ぼさないことが分かった。今までの超巨大質量星の形成シナリオと異なる点は、強力な放射が必要でないということである。新しく提案するシナリオであれば、強い放射なしに超巨大質量ブラックホールの種となるブラックホールの初代銀河中での形成を説明することができる。

1. Kohei Inayoshi and Kazuyuki Omukai. Soc.422,2539-2546 (2012)

## 星惑 c6 異なる金属量における星形成後期段階の進化

中村 鉄平 (九州大学 大学院理学府 地球惑星科学専攻 M2)

星形成後期段階を金属量  $0 \leq Z \leq Z_{sun}$  で変化させシミュレーションを行った。静水圧平衡状態のクラウドからスタートし、原始星誕生後 100 年までを計算した。星形成プロセスは  $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  と  $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  で大きな違いが見られた。 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  では分裂が頻繁に起こり、安定した円盤は形成されずに多くの原始星が形成される。それと同時にいくつかの原始星が原始星同士の相互作用によってクラウド中心から射出され、最終的に多くの原始星がクラスター状に形成される。 $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  では原始星がひとつ形成され、周囲には安定した円盤が形成される。円盤内で時折分裂が起き、最終的に中心の原始星に落ちてくる。これらの違いは熱進化と質量降着率の違いによって生じる。クラウドの熱進化はファーストコアの生存時間を決定する。 $Z > 10^{-4} Z_{sun}$  の場合には原始星が形成される前にファーストコアが発生するが、 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  ではファーストコアは発生しない。ファーストコアは次第に円盤に成長し、円盤は角運動量輸送を起し、分裂を抑制する。 $Z \leq 10^{-4} Z_{sun}$  の場合は質量降着率が高く円盤の表面密度は短時間で増加し、円盤は重力的に不安になる。結果的に活発な分裂が引き起こされると考えられる。

## 星惑 c7 星周円盤における分裂片の破壊

加藤 広樹 (大阪大学 理学研究科 宇宙進化グループ D1)

星間空間中にある分子雲が収縮して、原始星が形成されるという過程において、分子雲は角運動量を持っている為に、原始星の周りには円盤が形成される。形成された円盤の質量が原始星質量と比べてある程度重い場合、円盤内で重力的に不安定になり、円盤の分裂片が形成されると考えられている。形成された分裂片は、周りの円盤との相互作用により中心の原始星へと落下していき、円盤の寿命と比べて早く落下する場合は中心の原始星と衝突をする可能性がある。この時、分裂片は自己重力により形状を保っているが、中心にある原始星による重力の寄与も受けており、分裂片の中心から見て、分裂片の重力が支配的に作用する境界領域を表す Hill 半径と呼ばれる半径が存在する。Hill 半径の大きさは両者の質量比と中心星からの距離で決まる為、中心星へと分裂片が落下する事により変動し、分裂片の大きさが Hill 半径を上回ると、分裂片の一部が剥ぎ取られていき、結果として分裂片が破壊されることがあり得る。しかし、この破壊にかかる時間と落下の時間との詳しい関係は不明であり、中心にある原始星へと落下しきる前に全て壊されるのか、ある程度の形を保って落下するのか等はわかっていない。

今回、我々は原始星周りを回転する薄い円盤を考え、その中で形成された分裂片の二次元平面内の流体運動を SPH 法を用いて計算した。分裂片の面密度分布としてポルトローブ球による断熱状態のものを考え、これに中心星が及ぼす重力の影響を加えて、中心星周りをケプラー速度で周回させた時の分裂片の時間進化を追った。結果として、分裂片の大きさが Hill 半径と同程度になる位置に達すると、中心星へとガスが剥ぎ取られていき、その一部が分裂片の運動に寄与して、クランプの中心星への落下が早まるという結果が得られた。落下の加速によって、分裂片が Hill 半径に達する位置よりも、さらに中心星に近づいた位置に落ちて行きながら破壊されることがわかった。

1. Nayakshin S.2010,MNRAS.408.36
2. Vorobyov E.I.,&Basu S.,2005,ApJ,633,137

3. Toomre A.,1964,ApJ,139,1217

## 星惑 c8 重力マイクロレンズ法による惑星イベント MOA-2012-BLG-527 の解析

越本 直季 (大阪大学 芝井研究室 M2)

我々 MOA(Microlensing Observations in Astrophysics) グループではニュージーランドの Mt.John 天文台において、重力マイクロレンズ現象を利用した系外惑星探査を行っている。重力マイクロレンズは観測天体(ソース天体)の光がそれより手前の天体(レンズ天体)の重力によって曲げられることで、増光して観測される現象である。レンズ天体が一つの場合は増光の時間変化(光度曲線)は対称的になるが、伴星を伴う場合はその形がずれ、光度曲線に特徴的な形(anomaly)が見られる。得られた光度曲線を解析することにより質量比などがわかり、惑星を検出する。今、ある天体がマイクロレンズ現象を起こしている確率は  $10^{-6}$  で、惑星を検出できるのはさらにその数%と低い。また、伴星が惑星質量程度の場合には anomaly が数時間~数日程度と非常に短い。これらの要求を満たすため、我々は口径 1.8m、視野 2.2 平方度の広視野望遠鏡 MOA-II を用いて、銀河系中心領域の星約 5000 万個を対象に 15 分-90 分に 1 回という高頻度で毎晩観測を行っている。一つの望遠鏡では 24 時間カバーできないが、MOA と同程度の高頻度サーベイ観測をチリで行っている OGLE-IV との連携により、光度曲線を連続的にカバーできるようになってきている。さらに、データをリアルタイムで解析することで、anomaly が見つかり次第、世界中のフォローアップグループにアラートを出し、高頻度追観測を行っている。

本研究では 2012 年の重力マイクロレンズイベント MOA-2012-BLG-527 の解析を行った。このイベントはフォローアップグループの小さな望遠鏡で観測するには暗かったため、MOA と OGLE の両サーベイグループによるデータ点しか得られていない。惑星モデルフィッティングの結果、質量比が  $2 \times 10^{-4}$  であることがわかった。レンズ天体は M 型、K 型などの低質量星である確率が高いため、この質量比は氷惑星~土星質量程度に相当する。サーベイグループのデータのみから木星質量以下の惑星が検出できたのは本イベントで 2 例目である。また、銀河の密度分布などを仮定した銀河モデルを事前確率としたベイズ解析によりレンズ天体の質量や軌道長半径の確率分布が得られる。本講演ではそれらの詳細な解析結果を報告する。

## 星惑 c9 自己重力不安定な円盤における巨大ガス惑星の軌道進化

植田 高啓 (東京工業大学地球惑星科学専攻井田研究室 M1)

惑星形成理論には大きく分けて 2 つのモデルが存在する。1 つは、原始惑星系円盤内でダストが合体して微惑星を形成し、微惑星が集積して惑星を形成するコア集積モデルである。もう 1 つは、円盤が自身の重力によって分裂し、分裂したガス球が収縮して惑星を形成する円盤自己重力不安定モデルである。近年、直接撮像法によって、離心率が小さく軌道長半径が数十 AU を超えるような長周期巨大ガス惑星が発見されてきている。コア集積モデルでは、遠方領域ほど惑星コアの成長が遅いため、このような長周期巨大ガス惑星をその場で作るのは困難であると考えられる。一方で、円盤の自己重力不安定は遠方領域ほど起こりやすいため、このような長周期ガス惑星が形成される可能性がある。本研究では、自

己重力不安定な円盤内で形成された巨大ガス惑星の軌道進化を、円盤ガスとの重力相互作用と乱流の効果を考慮して、運動方程式を数値的に解くことによって調べた。その結果、中心星から 100AU 程度離れた場所で形成されたガス惑星は、 $10^4$  年程度という比較的速いタイムスケールで円盤内側 (-10AU) まで移動することがわかった。この結果から、観測で見つかっているような長周期円軌道ガス惑星を自己重力不安定モデルで形成するのは困難であることが予想される。

1. Forgan, D., & Rice, K. 2013, eprint arXiv:1304.4978
2. Muto, T., Takeuchi, T., & Ida, S. 2010, ApJ, 737, 37
3. Tanaka, H., & Ward, W. R. 2004, ApJ, 602, 388

.....

### 星惑 c10 Kepler-51 系における形成時の水素ヘリウム大気量推定

黒崎 健二 (東京大学地球惑星科学専攻 D2)

Kepler 宇宙望遠鏡の活躍により多数の系外惑星系が発見されてきており、複数惑星系も多く確認されるようになってきた。特に、複数惑星系はトランジット法のみでの観測でも TTV 法によって惑星質量を推定することができる。複数惑星系は形成時期に加え、軌道進化によって複雑な形成プロセスをたどることが考えられ、形成過程を制約することは、惑星形成を議論する上で重要である。

複数惑星系のうち、本研究では Kepler-51 系に焦点をあてる。Kepler-51 系は 3 つの惑星を 0.5AU 以内持ち、トランジット法で半径を、TTV 法によって質量をそれぞれ決定されているが、それらの平均密度が  $0.05\text{g cm}^{-3}$  以下と低密度な惑星系であることがわかっている (Masuda 2014)。これらの惑星は中心星近傍のコンパクトな系であることから、質量散逸の影響を強く受け、形成時の水素ヘリウム大気量は現在のそれよりも多いことが予想される。しかし、初期に大量のエントロピーを保持していた hot start と、形成時から冷却していた cold start の違いにより、その後の熱進化および惑星放射強度が異なることは知られている (Marley et al. 2007)。質量散逸を含めた熱進化は hot start に該当する進化のみ扱われており (Lopez & Fortney 2013, Owen & Wu 2013), cold start の場合について言及した研究はこれまでなかった。

本研究では Kepler-51 系をモデルケースに、熱進化と質量散逸計算を行い、惑星が形成直後に持っていたと考えられる水素ヘリウム大気量の推定を試みた。その結果、現在の惑星放射強度の違いで、形成初期に保持する水素ヘリウム大気量が異なることがわかった。また、それら形成初期における水素ヘリウム大気量に最小値が存在することもわかった。

1. Masuda, K. 2014, ApJ, 783, 53
2. Lopez, E. D., & Fortney, J. J. 2013, ApJ, 776, 2
3. Owen, J. E., & Wu, Y. 2013, ApJ, 775, 105

.....

### 星惑 c11 乱流の効果を考慮した重力不安定モデルによる微惑星形成過程

白井 陽祐 (東京大学地球惑星科学専攻 M1)

惑星系の形成過程において、地球型惑星・巨大ガス惑星ともに 1km から数百キロメートルサイズの微惑星が元になると考えられている。微惑星そのものは原始惑星系円盤内の  $1\mu\text{m}$  以下のダストから形成される。

この微惑星の形成シナリオについて、ダストの自己重力不安定による収縮によって形成される「重力不安定モデル」と、ダストどうしの衝突の連続によって形成される「連続合体成長モデル」の 2 つが有力である。今回は前者のプロセスに注目した。自己重力による収縮を引き起こすためにはダストの密度がロッシュ密度をこえる必要があり、赤道面へのダストの沈着によるダスト層の形成、円盤の径方向へのダストの移動、円盤ガスの光蒸発などによる密度増大の要因が考えられてきた。これらの見積もりは多くにおいて静的な円盤状態を仮定としており、円盤内に乱流が多く存在する場合を考慮すると乱流がそれらの要因を妨害し、ダストの局所的な密度増加を妨げると考えられていた。しかし、近年の研究 (Youdin and Goodman(2005), Cuzzi et al(2001) など) によって、乱流の効果による重力以外の要因でダストの高密度領域ができる可能性が示唆されている。ダストの組成に関わらない微惑星形成プロセスを説明できるという意味で重力不安定モデルの理解を深めることが重要であると考え、Youdin and Goodman(2005) を基に議論する

1. Youdin and Goodman(2005)
2. Cuzzi et al(2001)

.....

### 星惑 c12 Pop III/II Transition 低質量星形成の条件について

宮澤 航平 (東北大学天文学専攻 M1)

初代星 (Pop III star) 形成の理論的な研究によると、これらの星の典型的な質量は  $10\text{-}100M_{\odot}$  と考えられている。その一方で太陽近傍の種族 I の星 (Pop I star) や金属量が太陽の 1% 程度の種族 II の星 (Pop II star) の星の典型的な質量は太陽質量程度であり、小質量である。このことから宇宙の星形成の歴史の中で星の典型的な質量が大質量から小質量へと遷移が起こったと考えられている。(Pop III/II Transition)

星の質量は母体となるガスの分裂スケールと原始星へのガスの降着により決定するが降着するガスは原始星となった中心コアの周りを取り残されたエンベロープであるので、ここではできる星の質量スケールを考える上で母体のガスの分裂スケールに注目する。フラグメントの質量スケールはジーンズ質量程度であり、これはガスの温度と密度で決定される。したがって分裂片の質量スケールの見積りにはガスの熱進化を追うことが重要である。このガスは cosmic web を通して初期銀河に流入した後、冷却に伴い定圧で進化すると考えられている。ガスの冷却には原子・分子・金属イオンによる放射冷却や高密度ではダストの熱放射が寄与する。従って冷却の効率は分子生成やガスの金属量によって大きく影響される。また外部輻射が存在すると、それに伴う加熱や分子生成への影響によりガスの冷却に影響を及ぼす。ガスの熱進化を正確に追うためには、これらの効果を総合して計算を進める必要がある。

今回はこの遷移が起こった理由、及び星の母体となるガスの分裂スケールを決める条件について、ガスの熱進化に注目して研究した論文についてまとめ、レビューを行う。

1. Safronek-Shrader, Bromm & Milosavljević, 2010, ApJ, 723, 1568
2. Omukai, Schneider, Haiman, 2008, ApJ, 686, 801
3. Inayoshi, Omukai, 2012, MNRAS, 422, 2539

## 星惑 c13 コア形成過程におけるガスの状態

水野 友理那 (東北大学天文学専攻 M1)

S.Inutsuka & M.Miyama (1998) では、等温フィラメントからの分裂・収縮・合体等について、非線形解析の数値的シミュレーションを使って調べている。非摂動状態には自己相似的な収縮を与えている。シミュレーションの進化過程では等温としている。シミュレーションにおいて等温状態を考えたが、加熱と冷却が釣り合って、等温が保たれるかどうか調べている。結果は以下のようである。a) 球対称で暴走的に収縮する解が見つかった。b) フィラメントの軸方向に収縮し、分裂せずに細長くなる解もあった。c) 典型的なガス塊の密度・長さ・質量のスケールがわかった。一方で、T.Hanawa (2000) では、ポルトロップガス球の安定性を調べている。安定性を調べる上で、摂動は bar/Ori-Piran/spin-up の 3 種類を与えている。この結果で、最も注目すべきは、断熱比熱比  $\gamma$  が 1.097 以下なら bar mode の摂動に対して不安定であるということだ。収縮している等温ガス塊 ( $\gamma = 1$ ) を考えると、bar mode の摂動が成長し、さらにフィラメントが出来てしまう。回転に対する摂動の不安定性も起こるが、等温付近を考えると摂動の成長率は、bar mode の方が大きい。これではガス塊が階層的に分裂し続けてしまう。私のポスター発表では、この 2 つの論文をレビューし、それぞれの論文の解析の過程で考えられた状況や条件の対応について言及し、収縮して星になる前のコアについての考察する。

1. S.Inutsuka and M.Miyama ApJ. 480.681I(1997)
2. T.Hanawa PASJ 52.241H(2000)

## 星惑 c14 磁気流体波動駆動型の巨大ガス惑星からの質量放出と大気構造

田中 佑希 (名古屋大学理学研究科素粒子宇宙物理学専攻 Ta 研 (理論宇宙物理学研究室) D2)

近年は多数の太陽系外惑星が発見されており、その中には中心星に極めて近接した軌道を公転している巨大ガス惑星も多く存在している事が分かっている。このような惑星はホットジュピターと呼ばれており、中心星からの強力な輻射を受けて表面は 1000K 程度の高温に加熱されている。また様々な観測から、ホットジュピターが持つ大きく膨張した水素大気の大気存在や、大気からの大量の質量放出現象の存在も分かっている。ホットジュピターからの質量放出については、大気上層部から高速で流れ出す水素大気の大気存在が観測から明らかになっており、モデル依存性はあるものの質量放出率の推定値も得られている。しかし、このような大量の質量放出現象の詳細なメカニズムは未だにはっきりとは解明されていない。

そこで我々がホットジュピターからの質量放出のメカニズムとして提案しているのが、磁気流体波動によって駆動される太陽風の質量放出現象である。巨大ガス惑星が固有磁場を持っており、惑星表面に乱流が存在している場合は、表面で磁気流体波動が励起される。さらにその波が上空へ伝播し散逸することによって大気の運動エネルギーとなり、質量放出を駆動する事が考えられる。本研究では、太陽風と同様の数値計算を、ホットジュピターに関して典型的だと考えられるパラメータを用いて行った。

その結果、磁気流体波動によって引き起こされた質量放出の値は、観測から推定されている質量放出率を説明出来る事が分かった。また、発見されている惑星の半径や質量、推定される表面温度などは様々である

ため、これらをパラメータとして計算を行った。計算の結果から、ガス流は大気上層で超音速まで加速され、さらに高層大気は数万 K にまで加熱されることも示した。

本講演では、ホットジュピターだけではなく巨大ガス惑星全般における質量放出の可能性や大気構造への影響についても議論したい。

1. Y. A. Tanaka, T. K. Suzuki & S. Inutsuka, arXiv (2014)
2. Vidal-Madjar et al. 2003, Nature

## 星惑 c15 Direct Imaging Exoplanet Searching of the Nearby Solar-type Star Epsilon Eridani

Nugroho Stevanus Kristianto (東北大学天文学専攻 M1)

Epsilon Eridani is one of the nearest stars to the Sun. From indirect method it has been reported for the existence of its giant planet companion and also a lot of direct imaging observation have been made but none of them detected imaging confirmation of its existence. It is one of the most popular targets to study with direct imaging. So far most of the direct imaging observations yields no detection result at any wavelength except for H-band and CH4R12-band direct imaging with Subaru HiCIAO+AO188 in SDI mode which have been analyze with LOCI subtraction algorithm by Fuji et al. (2012). The S/N ratio was 2-3 and it has been done with several statistical methods to reject the possible feature from the image. However it is not so strong enough to reject or to accept the possible result. The most recent direct imaging data was obtained for H-band with Subaru HiCIAO+AO188 in ADI mode. In this poster we will present the detection limit of the observation and the minimum mass that can be detected with present data.

1. Fujii et al. 2013 Master Thesis Tohoku University
2. Lafreniere et al. 2007 ApJ, 660, 770
3. Baraffe, I., Chabrier, G., Barman, T. S., Allard, F., & Hauschildt, P. H. 2003, A & A, 402, 701

## 星惑 c16 高速自転星と超短周期惑星からなる系の角運動量の力学進化

上赤 翔也 (東京大学 宇宙理論研究室 M2)

PTFO 8-8695 系は、周期 0.67 日以下という高速で自転する T タウリ型星と、それを 0.44 日という短周期で公転するホットジュピターからなる。高速自転により、主星の赤道付近の光度は極付近と比べ低下している (重力減光)。この系に対しては 2009 年と 2010 年の 2 回トランジット観測が行われているが、それらの光度曲線の形状は互いに大きく異なっていた。これは、主星が非球対称であることで惑星との間にトルクが働き、主星の自転軸と惑星の公転軸が互いに 1 年程度の周期で歳差運動していることに起因する。つまり、惑星が緯度によって光度の異なる主星の表面を、時間によって様々な方向から通過すれば、それに応じて光度曲線の形状も時間変化する。先行研究はこの歳差運動をモデル化し、観測データから主星の自転軸と惑星の公転軸の傾き ( $\psi$ )、歳差周期など系のパラメータを決定している。しかし、この理論モデルは主星の自転周期と惑星の公転周期の同期という仮定の下で導出されている。

一般に主星と近傍の惑星の間には潮汐力が働き、系は自・公転軸が揃い ( $\psi \rightarrow 0$ )、自・公転周期が同期する方向に進化する。しかし先行研究では  $\psi$  は  $70^\circ$  と 0 から大きく外れており、自・公転が同期している必然性はない。そこで本研究では、より一般的な理論モデルの下で系の角運動量の力学進化を計算した。このモデルの下では、自・公転周期の同期の仮定なしに、主星の自転、惑星の自・公転という 3 つの角運動量の時間進化を計算できる。結果、系の歳差周期は主星の自転周期に応じて有意に変化することを見出した。この依存性を踏まえた上で、本発表では将来のトランジット光度曲線の形状予測を行う。この系の歳差周期は 1 年程度と短い故に、この予測の妥当性は観測により直接確認できる。つまり、将来の観測でその時期の光度曲線の形状を見ることで、モデルの妥当性の確認と、 $\psi$  を含む系の様々なパラメータのより高精度での決定が可能となる。

1. Barnes, J. W., et al. 2013, ApJ, 774, 53
2. Correia, A. C. M., et al. 2011, CeMDA, 111, 105

## 観測機器分科会

天文学を、開発する。

日時	7月28日 20:15 - 21:15 7月29日 9:00 - 10:00, 10:15 - 11:15(招待講演：栗田 光樹夫 氏), 13:30 - 17:00 7月30日 13:30 - 14:30, 16:00 - 18:15, 18:30 - 19:30(招待講演：和田 武彦 氏)
招待講師	栗田 光樹夫 氏 (京都大学)「京大 3.8m 望遠鏡計画とものづくり」 和田 武彦 氏 (宇宙科学研究所)「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」
座長	長友竣 (京大 M2)、服部有祐 (名古屋大 M2)、西嶋颯哉 (東大 M2)
概要	<p>今日の天文学は電波、赤外線、可視光、X線、<math>\gamma</math>線、重力波、ニュートリノといった様々な観測手法で研究が進められています。これらの研究では常にハードウェアとソフトウェア両面での観測機器開発が重要な役割を担っています。</p> <p>本分科会では、開発分野に携わる様々な立場の研究者が一同に会し、議論を行います。異なる分野で開発をしている研究者が交流し、互いに刺激しあうことで、視野を広げてさらなる開発につながる場になることを期待しています。観測系、さらには理論系の研究者の参加ももちろん歓迎です。開発の立場からは、開発分野で認識されていなかったニーズの発見につながり、また観測・理論の立場からは、観測手段の幅が広がることで、新たなサイエンスの開拓につながることを期待できます。</p> <p>天文観測で良いサイエンスを行うためには、観測機器を「Enter キーを押したらデータが出てくる」ブラックボックスとして利用するのではなく、その原理と構造、仕組みを理解することが欠かせません。観測機器開発やそれを用いた観測、ひいては観測機器の根底にある理論についての相互理解のために忌憚なき活発な議論ができることを期待します。是非ご参加ください。</p> <p>注) 装置開発に関するものは基本的に観測機器分科会で扱います。開発する装置が目指す科学目標に話の重点を置く場合は、それに該当する分科会で扱います。</p>

---

栗田 光樹夫 氏 (京都大学)

7月29日 10:15 - 11:15 B(大コンベンションホール)

## 「京大 3.8m 望遠鏡計画とものづくり」

2015年完成予定の光赤外線望遠鏡計画とその望遠鏡計画を通して開発した技術を紹介する。この望遠鏡は日本初となる分割鏡方式の光赤外線望遠鏡で複数の技術開発を要した。主なものは、1) CGH 干渉計を用いた機上鏡面計測、2) 機械式計測とデータステッチング技術による機上鏡面計測、3) 鏡の高速研削加工と修正研磨、4) 遺伝的アルゴリズムによる軽くて固い望遠鏡構造の最適設計である。その他にも18枚の分割鏡の制御や鏡同士の段差を計測する精密センサなど多くの技術開発を行っている。講演者のものづくり経験のエピソードを交えつつ、これら望遠鏡に関連する技術を紹介する。

---

和田 武彦 氏 (宇宙科学研究所)

7月30日 18:30 - 19:30 B(大コンベンションホール)

## 「赤外線画像センサの基礎と開発の実際」

赤外線画像センサーの概論を述べるとともに、開発の実例として、BIB型ゲルマニウム遠赤外線検知器とFD-SOI CMOS読み出し集積回路(ROIC; readout integrated circuit)を組み合わせた次世代遠赤外線画像センサーを紹介する。

## 観測 a1 NANTEN2 マルチビーム受信機の光学系設計

望月 沙也可 (名古屋大学大学院理学研究科 天体物理学研究室 (A 研) M1)

我々は南米チリ・アタカマ高地にて設置・運用しているミリ波・サブミリ波望遠鏡 NANTEN2 を用いて超高域分子雲サーベイ NASCO(NAnten2 Super CO survey) を計画している。この計画では超広域 (全天の約 70 % の領域)、高空間分解能 (2.6') の詳細な分子雲地図を作成し、星間現象の解明に貢献することが期待される。

この計画を数年で終わらせるために、現在 NASCO 用の新しいマルチビーム受信機を開発している。この受信機では 4 ビームの内、3 ビームは 100GHz 帯、1 ビームは 200GHz 帯の受信機を搭載し、それぞれのビームに対し両偏波同時受信を可能にすることで、 $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  の多遷移輝線 ( $J=1-0$ 、 $J=2-1$ ) の同時観測を行う。この結果、分子雲の温度・密度を導出することができ分子雲の物理的状態の解明に期待できると考える。

本研究では、新受信機の光学系設計を行った。この光学系の特徴は、平面鏡を四角錐の様に張り合わせたピラミッド鏡に 4 組の楕円鏡・ホーンを組み合わせた構成である。設計は準光学を用いた光学系設計、物理光学シミュレーション (GRASP) による光学系設計の検証、設計へのフィードバックの順に実施した。

結果、開口能率が平均 54.3 % と低くなった。この原因は既存のサブレフを使用すること、SMART 受信機との切替の必要性、受信機室内の空間的制約などを考慮して設計した結果、一部の鏡面で設計値であるエッジレベル 30dB が確保されておらず、ビームが蹴られていることにあると考えられる。

今後、特にピラミッド鏡の設計を見直すことで、開口能率 70 % 程度の光学系の実現を目指す。

光学系設計と並行し、本研究室ではデューワー内コンポーネントの設計開発やマルチビーム受信機での観測方法の検討などの開発も進めている。本講演では光学系設計を中心に、NASCO の設計開発の現状について報告する。

1. 黒田豊：修士論文「NANTEN2 望遠鏡マルチビーム受信機の光学系設計」、名古屋大学 (2012)

## 観測 a2 表面活性化常温ウエハ接合技術を用いた遠赤外線 BIB 型 Ge 検出器の開発

花岡 美咲 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Far-Infrared Surveyor (FIS) の LW channel に代表される圧縮型 Ge:Ga 遠赤外線検出器は、Ge に少量の Ga をドーピングした Ge:Ga を加圧することで検出限界波長を伸ばしている。そのため、大型の加圧機構を必要とし、大規模アレイ化 (多素子化) が困難であることや、素子ごとに感度のばらつきが生じることなどの問題を抱えている。これらの問題を解決し、200  $\mu\text{m}$  以上の検出限界波長を持つ大規模アレイ検出器を実現させるために、我々は Blocked Impurity Band (BIB) 型 Ge 検出器の開発を行っている。BIB 型 Ge 検出器は、Ga を高濃度ドーピングさせることで生じる不純物バンドにより、不純物深さが小さくなることを利用して検出限界波長を伸ばしている。また、バンドの形成に伴い発生する暗電流をブロックするために、高濃度 Ge:Ga ( $p^+$  層) に高純度 Ge ( $i$  層) を接合させた構造を持つ。この構造

により、加圧機構を必要としない大規模アレイ検出器が実現可能である。

これまで我々は、三菱重工株式会社を持つ表面活性化常温ウエハ接合技術を用いて、 $p^+$  層と  $i$  層の急峻な濃度勾配を持つ接合面を実現させた BIB 型素子と同等の構造を持つ  $p^+-i$  素子を試作した。それらに対し、長波長側への感度の伸長を評価するため、フーリエ分光器を用いた波長感度測定を行った。並行して  $p^+$  層と  $i$  層それぞれの物理特性を評価するため、van der Pauw 法を用いた Hall 効果測定を行った。波長感度測定の結果より、Ga 濃度が「あかり」に使用された Ge:Ga よりも 2 桁高い  $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  の  $p^+$  層を用いた  $p^+-i$  素子は 160  $\mu\text{m}$  の検出限界波長を持ち、非圧縮 Ge:Ga 検出器よりも長い波長まで感度を有することが判明した。また、Hall 効果測定から得られた各 Ga 濃度での不純物深さから、200  $\mu\text{m}$  以上に感度をもたせるためには、 $8 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$  以上の Ga 濃度が必要となることが明らかとなった。今後は、Ga を高ドーピングした  $p^+$  層を用いて  $p^+-i$  アレイ素子を作成し、その評価を進めていく。

1. Kaneda, H., et al. Japanese Journal of Applied Physics, 50, 066503 (2011)
2. Suzuki, T., et al. Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 124, 823 (2012)
3. Watanabe, K., et al. Japanese Journal of Applied Physics, 50, 015701 (2011)

## 観測 a3 大型望遠鏡光学試験のための新しい波面縫い合わせ法の開発

山中 阿砂 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

望遠鏡の光学試験方法として、一般的にオートコリメーション法が用いられる。これは、望遠鏡焦点位置に干渉計を設置し、その光軸上に望遠鏡と同じサイズの高精度平面鏡を置くことで光を折り返し、望遠鏡の透過波面誤差を一度に測定する方法である。この方法では、大型の望遠鏡 (口径  $\sim 3 \text{ m}$ ) になるほど大きな平面鏡が必要になるが、その大きさに匹敵するサイズで精度の良い平面鏡の製作は困難である。そこで我々は大型望遠鏡の透過波面を測定する手法として、波面縫い合わせ法を開発した。これは、望遠鏡開口面の一部分だけを測定できるような小さな平面鏡を用いて、開口全体を埋め尽くすように複数領域の透過波面誤差を取得し、それらを開口面全体の測定結果につなぎ合わせる方法である。波面縫い合わせ法が実際の光学試験に適用できるか検証するため、口径 80 cm の望遠鏡と 30 cm 平面鏡を用いて常温・常圧下で波面縫い合わせ測定を行った。望遠鏡光軸を中心に平面鏡を 22.5 度刻みで回転させ、合計 16 個のサブアパーチャー結果 (望遠鏡の一部分の透過波面誤差情報) を得た。これらを波面縫い合わせ法を用いて繋ぎ合わせ、望遠鏡開口面全体の透過波面誤差を取得した。一方、同望遠鏡と 90 cm 平面鏡を用い、オートコリメーション法での測定を行ったところ、結果は波面縫い合わせ測定の結果と一致したため、波面縫い合わせ法の妥当性を検証することができた。また、赤外線宇宙望遠鏡の試験では極低温・真空中で測定を行う必要があるため、冷却試験の前段階として常温・真空中 ( $1 \text{ Pa}$ ) で波面縫い合わせ測定を行った。さらに、極低温下の試験では熱収縮や重力によって小型平面鏡がゆがみ、測定結果に悪影響を及ぼすため、その影響を考慮しなければならない。本発表では、常温・真空中で得られた測定結果と、小型平面鏡のゆがみによる測定結果への悪影響を取り除く新たな手法を発表する。

#### 観測 a4 「あかり」中間赤外線全天サーベイデータからの暗い天体の検出方法の確立

中道 恵一郎 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

我々は「あかり」中間赤外線全天サーベイデータ (波長  $9\ \mu\text{m}$  帯および  $18\ \mu\text{m}$  帯) から暗い天体を検出し、カタログの作成を行っている。「あかり」は太陽同期軌道で 10 ヶ月にわたり全天をスキャン観測した。スキャン領域は次の周回で半分ほど重なり、半年ごとに同じ領域を観測するので、同じ天体を平均 6 回観測している。公開済みの「あかり」中間赤外線点源カタログ (PSC) では、各スキャン画像から天体を抜き出し、同じ領域を観測した他のスキャン画像を用いて検出した天体の信頼性を確認していた。本研究では、複数のスキャン画像を重ねあわせて深い画像を作成 (スタッキング) し、この画像から PSC で検出されている天体より暗い天体を検出する。しかし、この方法では検出天体の信頼性を評価する方法が問題となる。本研究では、初めに星形成領域 Cepheus B 周囲の  $6(\text{deg}) \times 6(\text{deg})$  の領域を用いて天体検出のパラメータの最適化を行った。また、スキャン画像を重ねあわせる前に 2MASS の PSC をリファレンスとして、個々のスキャン画像の座標較正を行うことでスタッキングの精度を向上させた。最後に、全スキャン画像を重ねあわせて作成した画像から検出した天体の信頼性を、フェイズ I, IIa, IIb の三つの季節ごとのデータを用いて確かめた。その結果、「あかり」中間赤外線 PSC に対して検出限界が 2 倍に向上し、同じ領域で PSC の 1.5 倍の天体数を検出できた。また、検出した天体の 95% 以上を WISE カタログでマッチングできた。我々はこの方法を全天データに対し適用していくつもりである。

#### 観測 a5 SPICA 中間赤外線検出器の地上実験のための低温光学系の開発

西山 美徳 (名古屋大学 理学研究科 宇宙物理学研究室 赤外線グループ (UIR 研) M1)

次世代赤外線天文衛星 SPICA に使用する中間赤外線検出器 (Si:As および Si:Sb) の波長感度依存性を測定する必要がある。しかし、目的波長 ( $20\text{--}37\ \mu\text{m}$ ) は室温のピーク波長より長いので、常温での測定が難しい。測定系全体を極低温まで冷却できれば、低背景環境で高精度な測定が可能となる。そこで、この測定に用いる低温光学系をアルミ切削鏡で製作し、性能を評価した。

低温光学系は、ランプとピンホールを用いた赤外光源からの光を軸外し放物面鏡でコリメートし、光学フィルターを通過し、検出器上で像を結ぶ設計である。異なる波長特性をもつ光学フィルターを入れかえて使用することにより、さまざまな波長における検出器の感度を測定することができる。鏡には検出器の筐体と同素材である、アルミ製の 2 枚の軸外し放物面鏡と 1 枚の平面鏡を使用する。これにより、色収差をなくし、冷却による収縮効果を最小限に抑え、アラインメントの崩れを防ぐことができる。製作したアルミ切削鏡の表面精度を、干渉計と非接触三次元測定器を利用して測定した。また、ナイフエッジ法を用いて光学系の結像性能を常温で評価し、シミュレーションで冷却時の光学性能を検証した。

各鏡の測定結果から導出した光学系の全波面誤差は  $1.63\ \mu\text{m}$  (RMS) であり、目的波長において十分な精度であることを確認した。また、常温において検出器実験において十分な結像性能を得ることができ、シミュレーション結果から、冷却時の像サイズの変化は約 3% 以下であること

を確認した。今後は、極低温における光学系の性能を評価し、この光学系を用いて、Si:As 検出器の波長感度依存性の測定をおこなう。

#### 観測 a6 HXD/GSO のバックグラウンドの新しい評価

鈴木 大朗 (立教大学 M2)

Hard X-ray Detector (HXD) は、すざく衛星に搭載されている硬 X 線検出器である。HXD は、16 本の井戸型フォススイッチカウンター (Well Unit) と、その周りを囲む 20 本のアンチカウンター (Anti Unit) で構成されている。Well Unit は、BGO 結晶による井戸型の構造の底に、入射側から PIN 型 Si 半導体検出器 (PIN)、GSO 結晶シンチレータ (GSO)、さらにその後ろに BGO 結晶を置いた構造である。PIN の観測するエネルギー帯域は  $10\text{--}70\text{keV}$  である。また、GSO と BGO がフォススイッチとして働き、GSO により  $40\text{--}600\text{keV}$  を観測する。HXD は徹底した Back Ground (BG) の低減化が行われている。さらに、落とすきれない BG はモデル化を行い差し引いている。現在、GSO の BG モデルは、SAA 通過後の時間、軌道上の宇宙線強度が主なパラメータとしてモデル化されている。我々は、2013 年秋期年会で、16 本の Well Unit のヒットパターンを利用する事で、より簡便な BG の推定方法を提案した。そこでは、BG の再現精度はおおよそ 6% であり、まだ十分ではなかった。今回、これまでの HXD チームにより研究されてきた BG の性質を吟味し、SAA 通過後の時間とエネルギー帯による BG の変化とヒットパターンの関係や、推定される宇宙線強度とヒットパターンとの関係を調査する。そして、ヒットパターンによる BG の再現精度の向上を目指した結果を報告する。

#### 観測 a7 MIMIZUKU Field Stacker で可能となるサイエンス

内山 允史 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 附属天文学教育研究センター M1)

TAO Project (The university of Tokyo Atacama Observatory Project) とは、標高 5640m の南米チリ共和国北部アタカマ砂漠チャナントル山頂に 6.5m 赤外望遠鏡を建設する計画である。これは世界最高高度の望遠鏡であり、TAO site は大気の影響が少なく乾燥していて、赤外線波長の透過率が高い。TAO にはこの優れた大気透過率を活かす 2 つの装置が搭載され、そのうちの 1 つが中間赤外分光撮像装置 MIMIZUKU (Mid-Infrared Multi-field Imager for gaZing at the UnKnown Universe) である。

MIMIZUKU は、波長  $2\text{--}38\ \mu\text{m}$  の広範囲を 1 台でカバーし、大口径 6.5m の望遠鏡によって  $30\ \mu\text{m}$  帯で 1 秒角と言う世界最高の解像度を実現する。そして世界初の試みである、中間赤外域での視野内相対測光を可能とする「Field Stacker」を搭載する。

Field Stacker は、望遠鏡内の 2 つの視野を可動式のピックアップミラーで選択し、それを 1 つの検出器上に落とし込むことにより、離れた 2 つ (以上) の天体を同時に測光することができる機構である。中間赤外域の観測では可視や近赤外域でのそれとは違い、視野内に見える星がととも少なくなり、相対測光することが困難であった。そのためこれまでの観測では対象と参照天体を往復して観測を行っていたが、その精度は良くて 5%、悪ければ 10% ほどの測光誤差を含んでいた。しかし MIMIZUKU では Field Stacker によって観測対象と参照天体を同時観測することができ、相対測光の実現によって誤差 1% 以内での観測を目指す。中間赤外域の時間変動の高精度モニタ観測はこれまで例がなく、TAO + MIMIZUKU with Field Stacker の実現によってこれまでに知

られていた変光天体の詳細な解明と新たな変光現象の発見が進むことが期待される。

今回の発表では、Field Stacker 開発の進捗状況と、それによって可能となるサイエンスについて紹介する。

1. A. Juhász et al. 2008, ApJ, 744, 118

## 観測 a8 次世代を見据えたイメージライサ型近赤外面分光ユニットの開発

北川 祐太朗 (東京大学天文学教育研究センター D1)

本講演では可視赤外天文学で近年進展のめざましい面分光 (Integral Field Spectroscopy) について、観測原理の説明から発表者の研究を交えた最先端の装置の状況までを紹介する。面分光とは、一言でいえば”視野内の空間情報を保持したまま、その波長情報も同時に取得できる”観測手法である。観測で得られる最終データは 3 次元 ( $X, Y, \lambda$ ) のデータキューブとなり、各空間領域ごとのスペクトルを詳細に調べることができる。

講演の前半では、面分光の原理とそれを実現するために用いられる面分光ユニット (Integral Field Unit: IFU) の仕組みについて説明する。現在稼働している IFU の基本的な概念は、8-10m 級の大型望遠鏡の登場にともなう 1990 年代後半から急速に発展していったものである。そこで用いられている光学系は 3 つの方式へと大別することができ、波長や目標とするサイエンスに応じて適切な方式が採用される。こうした IFU を用いることで銀河内部の力学状態や物理量 (e.g. 星形成率、電離状態 etc) の空間構造を調べることが可能になり、そこから更に銀河形成進化モデルへと制限を加えることができる。特に近年は近赤外域での観測の重要性 (e.g. 可視観測に比べてダスト減光に強く星形成の現場を深く見通せる、 $z > 1$  の遠方では静止系可視域の重要な輝線がこの波長帯に入ってくる) より、それを実現する近赤外 IFU 開発への需要が高まっているといえる。

そこで講演の後半では、発表者が現在開発を進めているイメージライサ型近赤外面分光ユニット (SWIMS-IFU) を紹介する。これは東京大学天文学教育研究センターが現在建設を進めている TAO6.5m 望遠鏡の第 1 期装置 SWIMS に搭載可能なコンパクト IFU であり、SWIMS 本来の撮像・多天体分光モードに加えて観測中にリモートで面分光モードへと移行することが可能になる。他の近赤外面分光装置と比べて広い視野 ( $14'' \times 10.4''$ ) をもち、 $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  の広波長帯の面分光データを一度に取得できるという特徴を有している。イメージライサ型 IFU は TMT でも採用され、今後重要な要素技術となるため、その設計開発の方法についても触れる予定である。

1. J. Allington-Smith, and R. Content, PASP 110, 1216 (1998)
2. Y. Kitagawa et al., in prep SPIE (2014)

## 観測 a9 近赤外多天体分光カメラ SWIMS 検出器システムの開発

藤堂 颯哉 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 天文学教室 M2)

我々は、近赤外多天体分光カメラ SWIMS (Simultaneous-color Wide-field Infrared Multi-object Spectrograph) を東京大学アタカマ天文台

(TAO) 計画で建設中の 6.5m 光赤外線望遠鏡の第 1 期観測装置として開発中である。2015 年度にはすばる望遠鏡の持ち込み観測装置として初期科学観測を予定している。SWIMS は、(i)  $\sim \phi 9'$  の広視野を (ii)  $0.9 - 2.5 \mu\text{m}$  の近赤外の全ての波長域に渡って同時に (iii) 撮像、多天体分光、または面分光することができる、という特長をもつ [1]。SWIMS では、Teledyne Scientific & Imaging 社の検出器 HAWAII-2RG (HgCdTe,  $2K \times 2K$  pixel) を 4 台 (TAO 搭載時には 8 台) 使用する。このように複数台の HAWAII-2RG を同時に駆動するような大型装置は国内では例がなく、複数台の PC を組み込んだ同時駆動ソフトウェアシステムや読み出し回路間のケーブルなど、ソフトからハードまで多様な要素開発を行った。また、同時駆動によるノイズへの影響について、独自の手法を用いて検出器システムをコンポーネントに分離し、初めて定量的に解析した [2]。本講演では、こうした SWIMS の検出器システムの開発について報告する。

1. M. Konishi et al. Proc. SPIE, 8446 (2012)
2. S. Todo et al. Proc. SPIE, 9154 (2014)

## 観測 a10 トランジット法による系外惑星観測のための赤外線単素子測光器の開発

横山 洋海 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

系外惑星を検出する方法の中に、惑星が主星の前を横切ることによる減光を測定する方法 (トランジット法) がある。トランジット法による検出は Kepler 衛星や WASP などによって宇宙、地上を問わず行われており、現在までに 1000 以上の系外惑星がこの方法で確認されている。トランジットによるわずかな減光を精度良く観測するためには、明るい参照星が必要である。トランジット観測には、2 次元アレイの検出器が良く用いられている。しかし、この方法では以下の問題が生ずる。1. 目標天体と参照星の出力値を同時に読み出すため、参照星が飽和しないように露出時間が設定される。そのため目標天体に対し、測光精度が高い明るい参照星を使えず、測光精度の向上が図れない。2. 対象となる天体と参照星を同時に観測するために、検出器の大きさによって参照星の数が制限され、精度の向上が図れない。

これに対し、我々が開発している測光器は、 $0.001\text{mag}$  の精度で M 型星の周りの惑星をトランジットにより観測することを目標としている。本装置は従来のものとは異なり、目標天体と参照星を別の単素子で計測する装置である。これにより、それぞれの星に対し最適な露出時間を選ぶことができ、参照星の明るさの制限もない。加えて、単素子を組み合わせた装置であるため、2 次元アレイの装置と比べて安価であり、視野の制限がない。

本発表では、我々の開発している装置の概要と、開発の到達状況と課題について説明する。

## 観測 a11 シャック・ハルトマン波面センサーの開発

森本 悠介 (京都大学宇宙物理学教室 M1)

太陽系惑星だけでなく、太陽系外の惑星を観測し性質や分布を調べるとは、惑星形成を論じるうえで重要である。現在までに、直接・間接撮像により、数多くの系外惑星が検出されてきたが、直接撮像による検出数は間接撮像による検出数に比べて、圧倒的に少ない。また検出された惑星の種類は木星の数倍の大きさを持つ木星型惑星や、自ら発光している惑星にとどまる。直接撮像での検出が難しい一方、分光観測技術と組

み合わせることで、惑星の構成物質が特定できるなど、惑星の性質を調べるうえで必要な観測方法でもある。今後、地球型惑星のような小さな惑星を直接撮像で捉えるためには、地球大気による観測光の波面揺らぎを補償する、補償光学と呼ばれる技術のさらなる向上が必要とされている。

現在、我々のグループが開発している「SEICA」という補償光学装置は、波面の揺らぎを高周波成分と低周波成分に分け、二段構えでそれぞれの成分を補償する構造になっている。これによって、望遠鏡の開口径により決まる分解能の限界値である回折限界に近いイメージングを可能にし、木星と同程度の大きさの系外惑星の直接撮像が可能となる。

この「SEICA」の装置の中で、シャック・ハルトマン波面センサーは大気による観測光の波面揺らぎを測定する装置であり、「SEICA」の性能を左右する装置の一つである。今回はシャック・ハルトマン波面センサーの設計、組み立て、実験室内で波面揺らぎの測定を行い、性能評価を行った。

## 観測 a12 木曾 105cm シュミット望遠鏡における可視光 CMOS カメラの開発

菊池 勇輝 (東京大学天文学教育研究センター M1)  
東京大学木曾観測所 105cm シュミット望遠鏡において 2011 年から運用されている KWFC(Kiso Wide Field Camera) は、 $2k \times 1k$  の CCD 8 枚を用いた  $2^\circ \times 2^\circ$  の CCD カメラであり、広視野ではあるものの、 $6^\circ \times 6^\circ$  以上の視野をもつシュミットの本来の性能を生かしきれぬものではなかった。現在我々は、このシュミット望遠鏡の視野全域を  $2k \times 1k$  の CMOS センサで覆う新しいカメラの開発を行っている。CCD と比較すると CMOS は撮像後の読み出しにかかる時間が非常に短いという特徴があり、一回の撮像ごとの読み出しに 1-2 分程度を必要とする CCD に対し、CMOS では 0.01 秒以下と圧倒的に短いため、高い時間分解能をもった動画的な撮像が可能になる。これにより可視光天文学においてあまり研究されてこなかった 1 秒前後の短いタイムスケールを持つ突発天体の観測を行うことができる。これまでに CMOS センサをモザイク化して広視野天文観測おこなう試みは他に例がないが、近年の技術革新により CCD に匹敵する低雑音、多素子の CMOS センサが作成できるようになったことで、その応用が可能になった。本装置の開発では、シュミットの類い稀な視野の広さに加えて CMOS センサを用いることで、短いタイムスケールの変動天体に対する高いサーベイ能力が期待される。今回は、開発中のカメラの概要とその開発計画、およびターゲットとなるような突発天体現象の概要を示すことで、本装置の開発およびそれによる新しいサイエンスの展望を示したい。

1. Rau A. et al., 2009, PASP, 121, 1334
2. Kulkarni, S. R. 2012, in Proceedings of the International Astronomical Union, Vol. 285, IAU Symposium, ed. E. Grifn, R. Hanisch, & R. Seaman, 55-61

## 観測 a13 宇宙 X 線偏光観測に向けた光電効果型ガス偏光計の開発

窪田 恵 (東京理科大学 玉川研究室 M1)  
宇宙 X 線の偏光観測は、検出器の技術的困難さから、観測自体が行われてこなかった。X 線偏光観測は、中性子星やブラックホール、超新星残骸などの天体の磁場や幾何構造を調べる切り札として期待されてい

る。そこで我々は、宇宙での X 線偏光観測を実現するために NASA と共同で、光電効果を利用したガス偏光計の開発を進めている。その性能評価のために我々は、衛星搭載品を簡素化した偏光計を製作し実験を進めている。ガス中に入射した X 線は、光電効果により光電子を放出する。光電子は入射 X 線の電気ベクトル方向に放出される確率が最も大きい。我々の偏光計では、ガス中での光電子飛跡を、Time Projection Chamber を用いて二次元で観測することによって、その飛跡から偏光方向を特定する。しかし、X 線が入射する事で生じる 1 次電子の数は少ないため、電子飛跡の形を保持したまま、ガス電子増幅フォイル (GEM) で増幅し、1 次元ストリップ電極で読み出す仕組みになっている。この偏光計を製作するにあたって重要な事は、電子の飛跡を崩さずにイメージを取得できるかである。そのためには、十分な増幅率、様な増幅率、時間安定性の 3 つの GEM の基本性能と、偏光計に使用するガスであるジメチルエーテル (DME) 中での電子のドリフト・拡散を含む電子輸送特性を調べる必要がある。前者は先行研究により、問題ないことが確かめられている。後者は測定した例は少なく、今までシミュレーションにより計算した値を使用していた。そこで今回タイミングの取れる X 線発生装置を使って DME 中での電子輸送特性の測定を行った。さらに鉄線源からの X 線を偏光計に照射して電子飛跡を実測する事に成功し、基本動作を確認した。本講演では、ここまでの偏光計全体の開発状況について述べる。

1. Tamagawa, T., et al. 2006, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 560, 418
2. Tamagawa, T., et al. 2009, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 608, 390

## 観測 a14 マイクロマシン技術を用いた超軽量 X 線望遠鏡の開発現状

佐藤 真柚 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)  
X 線天文学において天体からの X 線を集光・結像する光学系は必要不可欠である。X 線の物質に対する屈折率は 1 よりわずかに小さいため、全反射を用いた斜入射光学系を用いる。また X 線は大気で吸収されるため、宇宙空間にて観測する必要がある。そのため X 線光学系としてはより軽量かつ高角度分解能のものが要求されている。そこで私たちはマイクロマシン技術を用いた独自の超軽量かつ高分解能な X 線望遠鏡の開発を行っている。

製作プロセスとしては、シリコンドライエッチングにより穴幅  $20 \mu\text{m}$  深さ  $300 \mu\text{m}$  の曲面穴構造体を製作し、反射面の平滑化のためアニール加工を行う。高温プレスにより球面変形を行い、その後エネルギーバンド拡大や反射率向上のため原子層積法にて重金属を膜付けし、最終的に異なる曲率半径で曲げた 2 枚の基板をアライメントを行う。

昨年本光学系を用い、JAXA 宇宙科学研究所 30 m ビームラインにて X 線照射実験を行った。X 線は Al K $\alpha$  1.49 keV を用いた。その結果、角度分解能 (FWHM)、有効面積、焦点距離はそれぞれ 4.1 分角、 $32 \text{ mm}^2$ 、403 mm と求めた。角度分解能は将来ミッションの要求値である 5 分角以下を満たすものの、有効面積は設計値である  $162 \text{ mm}^2$  より 1/5 程度となっており、焦点距離も設計値の 250 mm に対して 1.6 倍長かった。有効面積低下の原因を調べた結果、バリと呼ばれる突起物によって入射光の一部が遮蔽されたり、アンダーカットとよばれる過剰にエッチングされている部分によって反射面の一部が平らになっていないことが分かった。焦点距離については、微細穴が表面に追従してうまく変形さ

れていないことが原因と分かった。

本講演においてはこれまでの開発現状や昨年度の X 線照射実験の結果と考察、また今後の展望や本望遠鏡搭載予定の将来衛星ミッションについて詳しく述べる。

## 観測 a15 DIOS/FXT 鏡面物質の設計

中道 蓮 (名古屋大学 Ux 研 M1)

小型衛星 DIOS(Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) は、 $10^5 - 10^7$  K 程度の銀河間中高温プラズマ (WHIM: Warm-Hot Intergalactic Medium) の観測を目的としている。面輝度が低く、数十平方度に広がったこの天体を観測する上で  $100 \text{ cm}^2 \text{ deg}^2$  の高い  $S \cdot \Omega$  (有効面積  $\times$  視野) が要求される。そこで開発されたのが 4 回反射型 X 線望遠鏡 (FXT: Four-stage X-ray Telescope) である。4 回反射を用いることで実現される短焦点距離、大口径の望遠鏡が  $S \cdot \Omega$  を向上させる。本研究は、これまでの X 線望遠鏡に用いられてきた Au や Pt の表面に、別の物質を成膜することで DIOS 衛星の観測波長帯 0.3 - 1.5 keV での反射率を向上させることを目的とする。この候補として、0.6 keV 付近で高い反射率を持つ Ni に注目した。しかし、今回用いる磁気スパッタ法で強磁性体を成膜する事は難しい。そこで、Ni の強磁性を緩和させるために、バナジウムを 10% 混ぜた NiV を成膜した。また、NiV の表面に炭素を成膜することで、Ni の L 吸収端 (830 eV) による反射率の低下を抑えた。こうして作製したサンプルの、8 keV の X 線に対する反射率の入射角依存性を測定することで、各層の界面、表面粗さと膜厚を間接的に測定した。この結果から、0.3 - 1.5 keV での反射率を計算し、Au または Pt の単層膜と比較すると、入射角が  $2.9^\circ$  となる最も外側の反射鏡では、Ni が臨界エネルギーを迎える 0.8 keV よりも高いエネルギーでは反射率が低下した。しかし、入射角が  $1.0^\circ$  となる内側の反射鏡では全観測波長帯に渡って反射率が向上した。特に、0.6 keV 付近の酸素の輝線領域では 10% の向上が期待される。

## 観測 a16 6 keV 付近に大きな反射率を持つ X 線多層膜スーパーミラー望遠鏡の開発

吉川 駿 (名古屋大学 Ux 研 M1)

本研究は天文学において重要な鉄輝線を含む 6 keV 付近の X 線に対して大面積を持つ望遠鏡開発を目標としている。鉄原子は存在量が多く、数千万 K のプラズマは強い鉄の特性 X 線を放射している。これを精密観測することでプラズマの温度、密度などがわかり、ドップラー効果を測定することで運動の様子も知ることができる。このように鉄輝線の測定は重要な意味を持つため、精密観測を行うには多くの X 線が必要となり、大有効面積の望遠鏡が必要となる。X 線は透過力が強く屈折しにくいいため反射による結像を考える。これまでの望遠鏡では反射鏡として金属の全反射を利用してきた。現実的な焦点距離を 6 m として全反射を利用した望遠鏡の口径は 0.5 m 以下に限られる。これは臨界角による制限により大角度での反射ができないためである。つまり、限られた焦点距離でさらに大口径化するには大角度で入射する X 線を反射できる鏡が必要となる。そこで、重元素、軽元素を交互に積層することでブラッグ反射を利用し、大角度入射が可能な多層膜スーパーミラーを用いる。6 keV 付近の X 線望遠鏡開発では重元素に比較的高い反射鏡が得られ表面が酸化することのない Pt を、軽元素に X 線の吸収の弱い C を用いることにした。しかし、Pt の吸収端が 2 keV 付近であるため、この付近で急激な反射率の低下を引き起こす。2 keV 付近のエネルギー帯にはこれまでの X 線衛星の観測によりブラックホール吸着円盤にて見つかつて

いる硫黄、ケイ素輝線が含まれる。そのため、このエネルギー帯でも十分な有効面積を得られるようにする必要がある。本講演では、Ni を最上層にすることにより、全反射領域での Pt 吸収端の影響を最小限にとどめることができる多層膜スーパーミラーを作成、X 線反射率について現状を報告する。

## 観測 a17 X 線望遠鏡用ガラス母型研磨の高精度化及び効率化

前島 将人 (名古屋大学 Ux 研 M1)

我々はブラックホールや  $\sim 10^7$  K の高温ガスといった高エネルギー天体を詳細に観測するために X 線望遠鏡を用いる。X 線望遠鏡の反射鏡には、非常に滑らかな表面と高い形状精度が要求される。この反射鏡の製法の一つとして、ガラス母型に金属膜を成膜し、その金属膜を基板に転写することで反射鏡を製作するレプリカ法がある。この方法で作られる反射鏡の表面粗さと形状精度はガラス母型の表面の粗さと形状に大きく依存するため、我々は表面粗さ 0.5 nm 以下の滑らかな表面と高い形状精度を持つガラス母型を製作することを目指している。ガラス管を研削加工により高い形状精度に加工した後、その表面を研磨パッドを用いて研磨加工することで、ガラス母型製作を行う。昨年度の研究で、ガラス表面の 50 mm 幅を研磨し、表面粗さを約  $1 \mu\text{m}$  から 10 nm 以下にまで低減させることに成功している。しかし、研磨に 80 時間以上を要し、作業手順も複雑であった。そこで、本研究ではガラス母型をより効率的に研磨すること、研磨したガラス母型を使って実際に反射鏡を製作しその表面粗さを測定することを目標とした。本研究では円筒ガラス研磨の効率化として、研磨剤の投入を必要としない研磨パッドを導入をした。これによって、研磨剤交換や研磨後の洗浄作業を短縮させることに成功した。また、この研磨パッドを導入することで研磨効率は落ちることなく、むしろ 1 時間あたりの研磨量を  $0.030 \mu\text{m}/\text{h}$  から  $0.147 \mu\text{m}/\text{h}$  まで増加させた。次に、レプリカ法で反射鏡を製作し、8 keV の X 線を使って反射率の X 線入射角依存性を測定し、反射鏡表面粗さを見積もることで、研磨したガラス母型の表面粗さを評価した。これは研磨後のガラス母型の表面粗さが現在使用している触針式粗さ計の測定限界に到達したためである。測定結果から、ガラス母型の表面粗さは 1 nm 以下に低減していることが分かった。

1. 中出章太. 円筒ガラス管研磨技術の開発. 愛媛大学修士論文 (2012)

## 観測 a18 ASTRO-H 搭載軟 X 線望遠鏡の地上較正試験

菊地 直道 (首都大学東京 宇宙物理実験研究室 M1)

次期 X 線天文衛星 ASTRO-H には広いエネルギー帯の X 線の結像を可能にする 4 つの X 線望遠鏡が搭載される。そのうち 0.3-12 keV の軟 X 線において、カロリメータ (SXS) と CCD カメラ (SXI) への結像を担うのが国際協力によって GSFC/NASA で作られた 2 台の軟 X 線望遠鏡 (SXT) である。

X 線は物質の吸収によってレンズのような直入射光学系を用いた結像が困難であるが、屈折率が 1 よりわずかに小さいことにより、臨界角以下での全反射を利用し集光を行うことができる。SXT では鏡面に重金属である金を成膜した薄い反射鏡を 203 層にわたって積層し、Wolter-I 型斜入射光学系を用いた 2 回反射によって焦点面への結像を可能にしている。

天体からの X 線の情報をより正確に理解するためには、望遠鏡などの衛星搭載機器の応答を把握しなければならない。そのため SXT の光学特性を把握するために、現在、JAXA/ISAS の X 線ビームラインを使用し地上較正試験を行っている。望遠鏡の特性には集光力を示す有効面積、空間分解能を示す結像性能、また視野外の天体から正常な 2 回反射以外で焦点面に侵入してしまう迷光などがある。今まで行われてきた地上較正試験の結果から、SXT-1、2 はともに望遠鏡単体での有効面積がそれぞれ、 $445 \text{ cm}^2$ 、 $454 \text{ cm}^2$  ( $4.51 \text{ keV}$ ) とすざくの X 線望遠鏡 (XRT) の  $330 \text{ cm}^2$  より 1.3 倍ほどに性能が上がっていることが確認された。さらには大口径化し焦点距離を 5.6 m (すざく 4.75 m) と長くしたことにより、 $9.44 \text{ keV}$  での有効面積は SXT-1、2 では  $270 \text{ cm}^2$ 、 $278 \text{ cm}^2$  とすざく XRT ( $175 \text{ cm}^2$ ) の 1.5 倍となっている。また、結像性能もやはり、すざく XRT ( $\sim 2.0$  分角) よりも向上し、 $4.51 \text{ keV}$  において SXT-1、2、それぞれ 1.3 分角、1.2 分角となった。迷光は off-axis において、2 段目ミラーのみの反射による漏れ込みがプリコリメータによって遮断できていることが確認された。しかし、一部プリコリメータをすり抜けてしまう迷光が存在することが分かり、軌道上での観測ではこれを考慮して行わなければならないだろう。

本講演ではこの 2 台の SXT の地上較正試験の測定結果をまとめ、その報告を行う。

### 観測 a19 ASTRO-H 衛星搭載 SXS のデジタル信号処理装置における波形分類処理の検証

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

ASTRO-H は、2015 年に打ち上げが予定されている次世代 X 線天文衛星である。この衛星には SXS (Soft X-ray Spectrometer) と呼ばれる軟 X 線分光検出器が搭載される。SXS は X 線マイクロカロリメータであり、入射光子のエネルギーを温度上昇として検出することによって、これまでの標準的な X 線 CCD の 20 倍以上高い、約  $10 \text{ eV}$  というエネルギー分解能を実現する。温度上昇として検出された信号は、アナログ/デジタル変換され、デジタル信号処理装置 PSP (Pulse Shape Processor) へと送られている。PSP では信号処理の際に数百の波形の平均をとった波形 (テンプレート波形) を用いて、最適フィルタ処理を行う。最適フィルタ処理には有限の長さを持つ波形が必要であるが、信号が重畳すると、正しいフィルタ処理ができなくなる。そのため、処理対象となる波形と、前後の信号との時間間隔によって波形をいくつかの種類に分類し、それぞれに適切な長さのフィルタ関数をあらかじめ用意する必要がある。この分類はグレード付けと呼ばれる。PSP ではこれらを時間間隔ごとに 3 種類に分類して、長い方の 2 種類に分類された信号にのみ、最適フィルタ処理を行う。間隔が広い順に High, Medium, Low の 3 種類、さらに、信号の前後関係で primary, secondary の 2 種類あり、これらを組み合わせた Hp, Mp, Ms, Lp, Ls の計 5 種類が存在する。間隔が広いものほどサンプル長さが長く、他の信号の影響が少ないため、有用な情報として扱うことができる。この最適フィルタ処理の準備としてのグレード付けが適切に行われているかを、自作プログラムで確認する。衛星搭載同等器によって処理されたデータをグレードごとに分け、その数の比 (グレード分岐比) を計算し、さらにその分類が、PSP で定義された時間間隔どおり分けられているか検証した。結果、グレード付けについて、衛星搭載同等器で正しく処理されていることが確かめられた。

### 観測 a20 ASTRO-H 衛星搭載の中央制御コンピュータにおける時刻配信性能の検証

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

ASTRO-H 衛星とは日本が開発を行っている X 線天文衛星である。ASTRO-H 衛星は、パルサーなどの時間変動の速い天体の観測を行うために、最終目標を  $\sim 30 \mu\text{s}$  とした高い時刻精度が要求されている。ASTRO-H 衛星では、GPS から受信したクロックを基に衛星内で基準となる時刻を作成、TimeCode と呼ばれる時刻情報としてネットワーク内に配信し、同期を行っている。しかし、同期を行うまでに時刻情報には遅延とジッターが生じてしまい、その結果、時刻精度が悪化してしまう。我々は、時刻精度を悪化させる要因を 7 つの項目に分け、合計で時刻精度目標である  $\sim 30 \mu\text{s}$  を達成しようと考えている。今回はその中の一項目である "中央制御コンピュータから配信される TimeCode のジッター" に関して、ASTRO-H 衛星搭載品を用いて検証試験を行い、衛星搭載品に関する重要なデータを取得するとともに、測定結果が目標値を満足する値であるという結果を得た。今回はこの検証試験について報告する。

### 観測 a21 誘電体 X 線マイクロカロリメータの開発

星野 全俊 (宇宙科学研究所 M1)

宇宙に存在するバリオンは 50% は X 線でしか観測できないとされており、その観測対象も中性子星から超銀河団にまで多岐に及ぶ。例えば、銀河団に付随する高温プラズマの熱運動や元素組成などの物理状態の解明には数 eV の分光能力とメガピクセルの撮像能力を両立した検出器が求められる。多くの X 線衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ (CCD) はメガピクセルだが、分光能力は原理的な上限である  $120 \text{ eV}$  にすでに達している。一方で X 線マイクロカロリメータ (XMC) は撮像と数 eV の分光を同時に行える検出器である。ピクセルに入射した X 線光子のエネルギーを熱に変換し、その温度上昇を測定する。数 eV の分光能力を達成するために極低温に動作温度を下げ熱雑音を抑制する必要がある。しかし抵抗を温度計として使う場合、一つのピクセルには読み出し用の配線が数本必要であり、その熱流入により極低温を維持できない。低温での信号多重化が可能な超伝導体を温度計として用いる方式でも、1000 ピクセル程度が限界といわれ CCD ほどの撮像能力は得られない。

この問題を解決するために、誘電率の変化を温度計として使用する「誘電体 X 線マイクロカロリメータ (DXMC)」を我々は考案、開発を行っている。高周波交流回路に誘電体を組み込むことで、1 本の伝送路で 1000 ピクセル以上を読み出すことができる。そのため原理的には CCD と同じ撮像能力が得られる。これまでに量子常誘電体である  $\text{SrTiO}_3$  の極低温における誘電率の温度依存性を測定した。現在は信号増幅のために新たな低温用アンプを使うことを考えている。特に 8.5 GHz までの増幅率の評価を行っている。本講演では DXMC の原理、開発状況、アンプの評価結果について発表する。

### 観測 a22 将来衛星搭載に向けた TES 型 X 線マイクロカロリメータアレイの開発

村松 はるか (宇宙科学研究所 M1)

我々は、現在提案中の X 線天文衛星 DIOS (Diffuse intergalactic Oxygen Surveyor) に向けたマイクロカロリメータ検出器の開発を行っている。近傍宇宙に存在するバリオンのうち半分以上はまだ観測にかかって

いない。宇宙流体シミュレーションよれば、このバリオンは大規模構造のフィラメントに沿って、薄くて広がった中高温のガス (WHIM: Warm/Hot Intergalactic Medium) として存在していることが示唆される。WHIM は高階電離した酸素からの特性 X 線を捉えることで観測できる。DIOS では、WHIM からの酸素輝線の赤方変位を精密に測定することで銀河系からの酸素輝線と区別し、その空間分布を探ることを計画している、そのためには、2eV のエネルギー分解能を有し、 $16 \times 16$  素子以上の TES 型 X 線マイクロカロリメータ検出器が必須である。

TES 型 X 線マイクロカロリメータとは、熱雑音の小さい極低温 ( $\sim 100$  mK) で動作し、超伝導遷移端の急激な抵抗変化を高感度の温度計として用いることで、入射 X 線による素子の温度上昇を精密に測定する検出器である。我々のグループでは、半導体技術を用いて素子を in-house 製作しており、単ピクセル素子で 5.9 keV の X 線に対し 2.8 eV、256 素子のうち 1 素子では 4.2 eV の分光性能を達成している。しかし、多素子を均一に作り込むなど技術的課題はまだ多い。

本講演では、TES アレイ製作の各段階で最大 8 素子までの超伝導特性を測定し、各プロセスが転移特性にどのような影響を与えるかを調査した結果を報告する。また高感度の宇宙 X 線観測では、宇宙線バックグラウンドの除去が本質的である。我々は TES 素子を 2 段に配置し、反同時係数法を用いることでこれを実現しようとしており、その最新の成果についても報告する。

## 観測 a23 講演キャンセル

## 観測 a24 自作断熱消磁冷凍機による TES 型 X 線マイクロカロリメータ動作環境の開発

神谷 賢太 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)  
X 線マイクロカロリメータは入射光子 1 つ 1 つを素子の温度上昇として検出する X 線検出器であり、100 mK 以下の極低温での動作により  $E/\Delta E \sim 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現する。2015 年度打ち上げ予定の ASTRO-H 衛星では世界初の X 線マイクロカロリメータによる精密 X 線分光観測が実現される。DIOS 衛星計画では超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES (Transition Edge Sensor) 型 X 線マイクロカロリメータを用いることで、さらに優れた撮像分光性能を目指している。

人工衛星の微小重力下で 100 mK 以下の極低温を実現するには、断熱消磁冷凍機 (ADR; Adiabatic Demagnetization Refrigerator) がもっとも現実的である。ADR は磁性体に磁場を印加してエントロピーを制御することで冷却を行う冷凍機である。一方、TES カロリメータは超伝導遷移端を利用するため磁場の影響を受けやすいことから、我々は TES カロリメータを ADR と一体で開発することが重要と考えて、研究を進めてきた。本講演ではその成果について報告する。

クライオスタットは液体ヘリウムタンク、蒸気冷却による 2 重の放射シールド、多層断熱材 (MLI) で構成され、極低温ステージへの侵入熱を抑える。7 リットルの液体ヘリウムを 2 日間保持できる。磁性体には鉄ミョウバンを使用し、ケースの製作と結晶成長はインハウスで実施している。無負荷時の最低到達温度は 40 mK 以下、80 mK 以下の保持時間は 20 時間以上を実現している。超伝導磁石は 9 A で 3 T の磁場を発生するが、最大磁場発生時にセンサに影響を及ぼすことを防ぐために、超伝導磁石の周りには 12 mm 厚のケイ素鋼の磁気シールドを被せ、さら

にセンサの周りには地磁場や超伝導磁石の漏洩磁場を遮蔽するために強磁性体と超伝導体の二重シールドを施している。本 ADR で TES カロリメータを動作させ、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能として  $3.8 \pm 0.4$  eV を実現している。

## 観測 a25 最遠方 GRB 観測を目指した X 線撮像検出器の開発

吉田 和輝 (金沢大学宇宙物理学研究室 M1)  
ガンマ線バースト (Gamma-Ray Burst; GRB) は  $10^{52}$  erg ものエネルギーをガンマ線放射として解放する宇宙最大の爆発現象である。短時間ではあるが極めて明るく輝き、その多くは赤方偏移  $z > 1$  で発生していることから、初期宇宙を探るための光源として利用されてきている。これまでに分光観測されている GRB の多くは  $z < 7$  の頃までのものであるが、宇宙再電離や重元素合成など宇宙が劇的に変化したのはそれ以前のことである。そこで我々は、 $z > 7$  の GRB を観測することでその当時の宇宙の物理状態を探ることを目的とした小型科学衛星 HiZ-GUNDAM を計画している。

金沢大学では、強く赤方偏移をして数 keV の X 線帯で輝く GRB を検出し、その到来方向を決定するための広視野 X 線撮像検出器を開発している。本公演ではこの X 線撮像検出器について紹介する。目標として 1 ~ 20 keV で輝く GRB を検出するため、検出器には低エネルギーに感度を持つシリコン半導体を用いる。現在は 1 次元のストリップ型の電極を 64 本配置したシリコン半導体検出器 (SSD) とその読み出しに特化した信号増幅率の高い ASIC の開発を行っている。SSD は電極の長さや幅が違う 6 種類のもので開発した。素子性能を調べるため、リーク電流、静電容量の測定、スペクトルを取得して基礎特性の評価実験を行った。ASIC は 64 チャンネルの入力を持ち、それぞれのチャンネルで電荷信号の増幅、波形整形、AD 変換を並列に行う回路を  $8 \times 9$  mm のシリコンウエハー上に集積したものである。64 チャンネルそれぞれでのエネルギー較正をとり、ノイズレベルを測定してチャンネルごとの特性を調べた。無負荷状態の ASIC 単体の性能としては、 $4\sigma$  でトリガーをかける場合、1.3 keV 相当の信号を検出できることが分かった。また、SSD による入力容量を 7 pF と想定し、5.9 keV 相当の信号を入力したときのエネルギー分解能は FWHM 換算で 2.2 keV であることを確認した。[1][2]

1. D. Yonetoku et al., SPIE, submitted, (2014)
2. D. Yonetoku et al., UNISEC Takumi Journal, 5, 19-27 (2014)

## 観測 a26 Suzaku/WAM におけるガンマ線バーストの位置決定能力の数値計算による検証

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

2005 年に打ち上げられた日本の X 線天文衛星「すざく」には硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector; HXD) が搭載され、世界最高感度で硬 X 線天体を観測している。その外周を取り巻くシンチレーター結晶は全天からの放射を受けるため、Wide-band All-sky Monitor (WAM) として全天 X 線観測に役立てられる。撮像機能はないものの、50-5000 keV 帯域で全天のほぼ半分の視野を持つ。他の観測装置に比べ有効面積が大きいため、ガンマ線バースト (Gamma Ray Burst; GRB) 等の突発天体を年間 150 イベント以上検出する。しかし、WAM 単独では突発天体の位

置を決定することができないため、解析に利用できる GRB は他衛星と同期した約 6 割の天体に限られる。残りの約 4 割の GRB を解析するためには、衛星全体を構成する物質やその密度、空間分布を再現したマスモデルを用いてモンテカルロシミュレーションを行い、様々な到来方向に対する WAM のエネルギー応答を詳細に調べることで、GRB の到来方向を推定できるようにする必要がある。

本研究では、Geant4 ツールキットを用いて「すぎく」のマスモデルを作成、モンテカルロシミュレーションツールを開発し、全天から降り注ぐ光子に対する WAM の応答を入射角度ごとに調べた。結果、各面での検出効率、光子の入射角度を反映することが再確認でき、より定量的な見積もりが可能になった。他の衛星で到来方向が既知の 30GRB に対し、WAM データから推定した位置と比較した結果、両者の差分の平均は、物質の多い冷媒タンクなどがある方向を除けば約 9 度の精度であることが分かった。より正確な位置決定をするには、更なる検証が必要である。本講演では、この手法と結果について発表する。

### 観測 a27 ガンマ線望遠鏡 CTA に用いる大口径望遠鏡用光電子増倍管の磁場依存性の検証

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

CTA (Cherenkov Telescope Array) 計画とは、次世代チェレンコフ望遠鏡を用いたガンマ線観測を目的とする、世界 28 ヶ国、約 1100 名以上が参加する国際共同計画である。望遠鏡は 2016 年に建設開始予定としている。CTA 計画では従来よりも一桁良い感度で、20 GeV から 100 TeV 以上でのガンマ線観測を達成するために、大中小の大きさの望遠鏡を用いている。CTA 日本グループは其中でも大口径望遠鏡の開発に貢献している。大口径望遠鏡の光検出器には一台につき 1855 本の光電子増倍管 (PMT) が配置される。

CTA 計画は地上でのガンマ線観測のため、PMT のゲインが地磁気により変化すると考えられる。この影響を防ぐために PMT には磁気シールドを巻いている。我々はこの磁気シールドの効果が地磁気の影響を防ぐために十分であるか確かめる必要がある。今回、我々は PMT に磁場をかけゲインの磁場依存性を検証した。その結果、地磁気の 2 倍ほどの磁場中でもゲインの変化は 1% 以下であり、CTA での要求値を満たしていることを確認した。本講演では上記の性能評価試験についての報告を行う。

### 観測 a28 CTA 大口径望遠鏡用ライトガイドの形状決定と製作方法の確立に向けた開発

小野 祥弥 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡群を用いて、これまでにない高感度で 20 GeV から 100 TeV 以上に渡る広エネルギー帯において高エネルギーガンマ線の観測を目指す国際共同プロジェクトである。この計画において CTA-Japan グループは主に大口径望遠鏡 (Large-Sized Telescope, LST) の開発に関わっている。LST の焦点面にはガンマ線によって生じたチェレンコフ光を捕える光電子増倍管 (PhotoMultiplier Tube, PMT) が 1855 個配置され、全ての PMT にライトガイドと呼ばれる光学部品が備え付けられる。ライトガイドは、観測したい光であるチェレンコフ光を効率よく集め、夜光などのバックグラウンドを軽減するという役割を担う。ライトガイドの側面形状としては、ある角度 (cutoff angle) 以内に入射した光のみを 100% 集めるという理想的な特徴をも

つ Winston Cone 形状が候補となっていた。しかし、実際に使用する PMT の入射窓は円形であり、それを敷き詰める関係上、ライトガイドの入射部分は六角形である必要がある。この場合、側面を Winston Cone 形状にしても、先に述べた理想的な特徴が実現しないことがわかったため、より理想に近い形状を探す必要性が出てきた。そこで、以前より光線追跡用のツール ROBAST (ROot BAsed Simulator for ray Tracing) を用いてシミュレーションを行い、最適な形状を探っている。形状の最適化をするには、このシミュレーションを現実と可能な限り同じ条件にする必要があるが、前年度までに行ったシミュレーションには考慮しきれていない条件があった。今後は、不足していた条件の 1 つとして考えられている反射材の反射率角度依存性などを測定し、シミュレーションに取り込んだ上でライトガイドの形状を最終決定し、実際に使用するライトガイドの製作方法を確立する予定である。

### 観測 a29 MeV ガンマ線検出を目的とした電子飛跡検出型コンプトンカメラ ETCC の性能評価

竹村 泰斗 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

MeV ガンマ線天文学はブラックホールによる重力場からの放射など様々な天体現象の観測が予想されている。しかし現在までに MeV 領域の全天を観測したのは COMPTEL のみであり発見された天体も約 30 個と非常に少ない。その原因は宇宙線と衛星本体との相互作用により生じるガンマ線や、中性子などのバックグラウンドが多く存在することにある。そのためガンマ線イメージングは非常に難しくなっている。我々のグループはバックグラウンドの高効率除去を備えた新しい検出器である電子飛跡検出型コンプトンカメラ (Electron Tracking Compton Camera, ETCC) を開発している。COMPTEL ではガンマ線の到来方向を円環へ制限するだけだったが ETCC は新たに反跳電子の方向を測定することにより高品質なガンマ線イメージを取得している。我々のグループは 2006 年にこの ETCC ( $10 \times 10 \times 14 \text{ cm}^3$ ) を用いた気球実験 SMILE-I (Sub-MeV gamma ray Imaging Loaded-on-balloon Experiment) を行い高いバックグラウンド除去能力を示しサブ MeV 大気・宇宙拡散ガンマ線フラックスの測定に成功した。我々は SMILE-I ETCC を進化させた新しい ETCC ( $30 \times 30 \times 30 \text{ cm}^3$ ) を開発した。300 keV で SMILE-I の 500 倍の  $0.5 \text{ cm}^2$  以上の有効面積を実現した。電子飛跡検出率も約 10% から約 100% へ改善することでコンプトン散乱点の決定精度を向上させることに成功した。我々はこの新しい ETCC を用いて気球実験 SMILE-II を行う予定である。この気球実験は明るい天体であるかに星雲の観測で ETCC の望遠鏡としての実証を目的としている。本講演ではこの SMILE-II の ETCC の装置性能について述べる。

### 観測 a30 電子飛跡検出型コンプトンカメラのバックグラウンド除去性能の評価

宮本 奨平 (京都大学 宇宙線研究室 M1)

現在の sub-MeV、MeV 領域における天体の観測は他の波長領域に比べて進んでいない。原因として、この領域におけるガンマ線と物質との相互作用はコンプトン散乱が優勢になるために、検出が困難であるということが挙げられる。それに加えて、宇宙線と検出器筐体との相互作用で生まれるガンマ線や、宇宙全体に広がったガンマ線がバックグラウンドとなり、本来観測したいイベントとの分離が困難であるといった問題もある。

我々のグループは、このような観測的な課題を克服し、優れた感度で

全天の観測を行うことを目指し、ガスを用いた全く新しい検出器、電子飛跡検出型コンプトンカメラ (ETCC) の開発を行っている。ETCC はコンプトン散乱によって生成される散乱ガンマ線のエネルギーと吸収点、散乱電子の三次元的な飛跡とエネルギーをそれぞれ検出する。すると、運動学的な解析から、コンプトン散乱を完全に再構成でき、入射ガンマ線のエネルギーと到来方向が得られるのである。

電子飛跡型コンプトン法はバックグラウンドを非常に強力にカットすることもできる。ETCC のバックグラウンド除去性能を評価するために我々のグループは、水に 140MeV まで加速した陽子ビームを照射し、大量のガンマ線、中性子、荷電粒子を生成することで高雑音環境を作り出し、その環境下でガンマ線源の測定を行った。本講演ではこの実験を踏まえ、高雑音環境下でも、ガス中を通過した粒子のエネルギー損失の分布から、コンプトン散乱による電子とその他の高エネルギー粒子とを分離することができ、これによってバックグラウンドを除去し、ガンマ線源の位置とスペクトルが測定できることを紹介する。

### 観測 b1 広視野多天体補償光学系

高田 大樹 (東北大学天文学専攻 M1)

地上で望遠鏡を用いて観測を行おうとしたとき、大気の揺らぎの影響を無視することはできない。特に、次世代超大型地上望遠鏡 (Extreme Large Telescope, ELT) を用いて精度の良い観測を行うためには大気の影響をなくするための技術が必要不可欠となる。この技術のことを補償光学 (Adaptive Optics, AO) と呼び、近年 ELT のための次世代補償光学の研究が盛んに行われている。ELT のひとつとして 30 メートル望遠鏡 (Thirty Meter Telescope, TMT) が挙げられる。TMT は 2020 年代に運用予定の大型望遠鏡で、AO は必須の技術である。

AO を行うには、大気の「測定」「推定」「補償」を順に行えば良い。ターゲット天体のそばにある明るい天体 (Guide Star, GS) の波面を波面センサー (WaveFront Sensor, WFS) を用いて測定し、測定結果から補償すべき大気の揺らぎを推定し、可変形鏡 (Deformable Mirror, DM) を用いて補償を行う。しかし、従来の方法ではターゲット天体付近に明るい天体が無ければならないが、都合の良い天体はなかなか無い。よって、レーザーガイドスター (Laser Guide Star, LGS) という人工的な GS を用いることでより多くの天体に AO を行うことができ、また複数の LGS を用いることで広視野を補償できる方法が生まれた。このような AO を特に広視野補償光学 (Wide Field Adaptive Optics, WFAO) と呼ぶ。WFAO は主に高度毎の大気の揺らぎを補償を行う多層共役補償光学 (Multi Conjugate Adaptive Optics, MCAO)、地表付近の全ての方向に共通の揺らぎ成分を補償する地表層補償光学 (Ground Layer Adaptive Optics, GLAO)、視野内にある複数の目標天体方向のみに補償を行う多天体補償光学 (Multi Object Adaptive Optics, MOAO) の 3 つがある。

我々の研究室では TMT に用いる広視野多天体補償光学系として、MOAO と GLAO を組み合わせた AO を考えている。MOAO を行う前に視野全体の大气揺らぎを補償する GLAO を入れることで AO の性能向上を目指している。この光学系のことを前置補償光学系と呼ぶ。今回の私の発表では、広視野多天体補償光学系中の前置補償光学系の設計について紹介する。

1. M.Hart, et al. (2010). A ground-layer adaptive optics system with multiple laser guide star. *nature*, Vol 466, 727-729.
2. Benoit Neichel, et al. (2014). Gemini multiconjugate adaptive optics system review - II. Commissioning, operation and overall

performance. *MNRAS*, 440, 1002-1009.

### 観測 b2 埼玉大学 55cm 望遠鏡用 TRIPOL の開発

潮田 和俊 (埼玉大学教育学部理科専修 天文学研究室 M1)

埼玉大学では 55cm 望遠鏡とフィルターターレットを用いた可視測光観測を行っている。しかし、各波長の観測条件が異なることや、観測時間が長くかかるという問題がある。そのため、観測効率の向上と同一観測条件による多色同時撮像を目的として TRIPOL (Triple-Range Imager and POLarimeter; 3 色同時撮像偏光装置) の開発を行う。TRIPOL の特徴は小型 (大きさ約 35cm 立方) の観測装置であり、堂平 91cm 望遠鏡 (F=18) など他の望遠鏡にも容易に取り付けられることと、レンズを通さない光学系を持つことである。

昨年度は、まず F=10 用の望遠鏡に開発された TRIPOL の組み上げを行い、撮像部において実験室での性能評価、及び試験観測を行った。埼玉大学望遠鏡 (F=6.5) に搭載した際の共通視野は  $8.93' \times 8.95'$  であり、S/N=10 の限界等級 (露出時間 10s  $\times$  5 枚) は g' バンド (15.4 等)、r' バンド (14.7 等)、i' バンド (16.3 等) であった。また、既知のトランジット天体 (WASP-12b) を観測し g' バンド (1.6%)、r' バンド (1.2%)、i' バンド (2.1%) の減光を検出できた。この天体を用いた測光安定性の評価から g' バンド (0.7%)、r' バンド (0.6%)、i' バンド (1.1%) の変動の検出が可能な事が分かった。この結果をもとに埼玉大学望遠鏡用に長波長に感度の高い CCD を新たに用いて r バンド、i バンド、z バンドの 3 バンド同時撮像偏光装置を開発中である。

### 観測 b3 1.85m 電波望遠鏡プロジェクト紹介

切通 僚介 (大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

我々は、口径 1.85m のミリ波・サブミリ波望遠鏡 (野辺山宇宙電波観測所内に設置) の開発を行っており [1]、2011 年 1 月より科学運用を開始した。本望遠鏡は ALMA 等にも採用されている 2SB ミクサや導波管直線偏波分離器 (OMT : Ortho-Mode Transducer) を開発/導入することで、 $^{12}\text{CO}$ 、 $^{13}\text{CO}$ 、 $\text{C}^{18}\text{O}$  ( $J = 2-1$ ) の 3 輝線を高感度に同時観測できることが特徴である。我々は本望遠鏡を用いて 2.7 分角の空間分解能で天の川銀河の広域観測などを推進している。2013 年度は新たに、速度幅の広い天体 (e.g. 銀河中心) の観測に対応するため分光計 XFFTS (帯域幅 2.5 GHz ; 分光点数 32768 点) を導入し、観測に耐えうることを確認した。さらに、我々が独自に開発している導波管型帯域分離フィルターを用いた新方式 2SB ミクサを搭載するなど、更なる改良を行っている。本講演では、この 1.85 m 電波望遠鏡の開発状況、今後の計画についての報告を行う。

1. Onishi et al. 2013 PASJ

### 観測 b4 スペース赤外望遠鏡のための低温可変形鏡の開発

高橋 葵 (宇宙科学研究所 M1)

地上で作られた望遠鏡を軌道上に打ち上げると、重力からの解放により鏡面が変形する。また赤外線観測の場合には、望遠鏡自身からの熱放射

を抑えるため望遠鏡全体を冷却する必要があり、このとき各 부품の熱膨張率の違いによって熱変形が起こる。従来、これらの鏡面変形に対しては設計の工夫、シミュレーション、および地上試験で可能な範囲での検証等による対策がとられてきた。しかし、もし小型の変形鏡（以下 DM）を用いて打ち上げ後に軌道上で波面の乱れを補正できれば、従来を上回る性能の望遠鏡が実現でき、またコスト削減、開発期間の短縮、およびリスクの低減において大きな効用があると考えられる。

そこで我々は、Micro Electrical Mechanical Systems（以下 MEMS）技術を用いた DM に着目した。この DM はクーロン力によって変形されるので、その効用は温度によらず低温でも働く。さらにこの技術は、軽量かつコンパクトで素子数の多い変形鏡を実現するのに適している。したがって、MEMS 技術を用いた DM（以下 MEMS-DM）には、スペース赤外望遠鏡の波面補正鏡として使用できる可能性が大いにある。

我々はこれまで、32 素子からなるプロトタイプの MEMS-DM を製作し、これが 95K で問題なく動いて冷却サイクルにも耐えうることを実証した。またこのプロトタイプは、衛星打ち上げを想定した音響試験、振動試験、急速減圧試験もクリアしている。そして現在、より高精度の波面補正のため素子数を 1020 素子に増やした、極低温（～5K）で運用できる新しい MEMS-DM を開発し、実証実験を進めている。

このような極低温 DM の本格的な開発は、世界的にもユニークである。多素子化した極低温用 MEMS-DM の開発が成就すれば、多くのスペース赤外望遠鏡に対して有効であり、特に系外惑星探査のためのコロナグラフに対して大きな役割を果たすことが期待される。

1. K.Enya et al. Proc.SPIE 8146 81460Q (2011)
2. K.Enya et al. PASP 121 260 (2009)

## 観測 b5 断熱消磁冷凍機上での TES 型 X 線マイクロカロリメータの分光性能の向上

小竹 美里（金沢大学宇宙物理学研究室 M1）

X 線マイクロカロリメータは入射 X 線光子 1 つ 1 つのエネルギーを素子の温度上昇として計測する検出器であり、100 mK 以下の極低温で動作させることにより、 $E/\Delta E > 1000$  の優れたエネルギー分解能を実現する。中でも、超伝導遷移端を高感度の温度計として利用した TES（Transition Edge Sensor）型 X 線マイクロカロリメータはエネルギー分解能の更なる向上が見込めるため、DIOS 衛星等の次世代 X 線観測衛星への搭載が考えられている。軌道上で 100 mK 以下の極低温を実現するには断熱消磁冷凍機（ADR）が最も現実的であるが、冷却サイクル中に強い磁場を発生するため、超伝導を利用した TES カロリメータとの干渉が問題となりうる。そこで、我々は冷凍機とセンサを一体のシステムとして開発している（神谷他、2014 年夏の学校）。

高倉他（2013 年夏の学校）では、自作 ADR の超伝導マグネットに対する磁気シールドの改良により急峻な超伝導遷移特性が得られたことを報告したが、5.9 keV の X 線に対するエネルギー分解能は 17 eV（FWHM）にとどまり、目標性能である数 eV には達していなかった。本研究ではさらなる分光性能の向上を目指して、クライオスタットと信号読み出し回路のヘッドアンプ、その他の駆動装置、計測装置とを接続するケーブルのシールドや各装置の接地方法を見直してノイズを低減し、センサの温度制御（温度安定度）の改善に努めた。また、センサの周囲に施した超伝導体と強磁性体の二重磁気シールドの材質・組合せを変えて性能の違いを実験的に調べ、最適化を図った。その結果、エネルギー分解能は  $3.8 \pm 0.4$  eV まで向上した。本講演ではこれらの対策と結果につ

いて、詳細に報告する。

## 観測 b6 広視野望遠鏡 WIDGET-2 の撮像画像におけるフラットフレームの評価

榎本 淳一（埼玉大学 理工学研究科 物理機能系専攻 田代・寺田研究室 M1）

WIDGET-2 とは埼玉大学と理化学研究所で共同開発したガンマ線バースト観測のための超広視野可視光望遠鏡である。可視光観測によって得られた画像は、ダークノイズや集光ムラを補正する一次処理を行う必要がある。WIDGET-2 によって撮像されたライトフレームは、自動的にダークノイズを補正するパイプラインを通る仕組みが確立されている。しかし、フラット処理は自動化されておらず、観測者各自に任されている。WIDGET-2 では、夜空の違う場所を撮影した複数枚のフレームを合成して一枚のフラットフレームにするというスカイフラットと呼ばれる手法をとっている。しかし、WIDGET-2 の撮像フレームにおいて、最適なフラットフレームの作成方法は確立されておらず、作成時に用いるフレームの選び方や枚数などはフラットフレーム制作者に依っている。そこで、フラットフレーム作成方法の確立を目指し、複数の方法でフラットフレームを作成してその評価を行った。具体的には、用いるフレームの枚数、各フレームの時間間隔、フレーム合成方法の 3 つ要素について作成条件を変化させてフラットフレームを作成し、実際の観測で得られたライトフレームに処理を施して補正の効果を評価した。本講演では、この検証方法とその結果について報告する。

## 観測 b7 CALET ガンマ線バーストモニター (CGBM) 地上ソフトウェア開発の現状報告

瀬沼 一真（青山学院大学大学院 M1）

2014 年度打ち上げ予定、現在開発中の宇宙電子線観測装置 CALET (CALorimetric Electron Telescope) 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 年間を目標として観測予定である。CALET には我々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 は宇宙で最も明るい爆発現象の一つであるガンマ線バーストなど、宇宙での突発現象を、X 線、ガンマ線の領域で観測するシンチレーション検出器である。

CGBM で観測したガンマ線バーストを解析するためには解析ソフトウェアが不可欠である。既存ソフトウェアを利用するためには共通のデータ形式への変換が必要となる。また既存のソフトウェアが利用できない場合は新たに解析ソフトウェアを開発しなければならない。そこで、既存のソフトウェアをできるだけ利用できるように FITS 形式に変換するソフトウェアの開発をした。また観測したライトカーブ及びスペクトルからバックグラウンドを差し引くための新たなソフトウェアの開発も行った。本発表では開発したソフトウェアの詳細と実際の観測されたデータに開発したソフトウェアを適用した結果について報告する。

1. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 8 ブラックホールと高エネルギー現象
2. 日本評論社 シリーズ現代の天文学 17 宇宙の観測 III 高エネルギー天文学
3. NASA CALET-Web サイト : <http://calet.phys.lsu.edu/>

## 観測 b8 Astro-H 衛星・軟ガンマ線検出器のための集積回路の最適化

木下 将臣 (名古屋大学 太陽地球環境研究所 M1)

Astro-H は非常に優れたエネルギー分解能と 0.3 から 600 keV での広帯域観測を可能にする JAXA の次期 X 線衛星である。搭載観測機器の一つである軟ガンマ線検出器 (Soft Gamma-ray Detector, SGD) は、超新星残骸での粒子加速の研究、ブラックホールへの質量降着やそれにもなうジェットによるガンマ線放射機構の解明やガンマ線での偏光観測などを科学目的とする。

SGD は、BGO シンチレーターのアクティブシールドに囲まれた、多層のシリコン (Si) とテルル化カドミウム (CdTe) 半導体検出器より構成されるコンプトンカメラである。SGD では、入射光子が Si 中でコンプトン散乱を起こした後、CdTe により光電吸収される事象を検出する。その際、散乱電子と光電吸収のエネルギーと位置情報を測定し、コンプトン運動学を利用して到来方向を逆算する。こうして逆算した到来方向とアクティブシールドによって制限される視野の整合性を要求し、視野外に起源を持つバックグラウンドを除去することで、従来と比較して感度を 10 倍以上向上させる。

SGD の実現には、コンパクトなコンプトンカメラにできるだけ多くの半導体検出器を組み込み、高い検出効率を達成することが本質的である。そのためには、半導体検出器からの信号を低雑音で処理し、デジタル化などの必要な機能をすべてかねそなえた集積回路が不可欠である。SGD で使用する集積回路は、プリアンプ、波形製型回路、トリガー回路、デジタル回路など多くの機能を有し、その性能を最大限に発揮するためには、多くの回路パラメータを調整する必要がある。現在、私は集積回路の回路パラメータと雑音性能やトリガー性能の関係を測定し、エネルギー分解能とトリガー効率を最適化することで SGD の性能のさらなる向上を目指している。

本講演では、SGD が目指すサイエンス、検出器構成の概要と集積回路の最適化について紹介する。

## 観測 b9 Fermi-LAT のイベント再構成とバックグラウンド識別

高橋 光成 (東京大学宇宙線研究所 M2)

Fermi ガンマ線宇宙望遠鏡の Large Area Telescope (LAT) は高エネルギーガンマ線観測の決定版のプロジェクトである。ガンマ線観測の最大の障害はガンマ線よりはるかにフラックスの大きい宇宙線バックグラウンドである。LAT では 3 つの検出器からの情報を元にイベントの特徴を示す多数のパラメータを導出し、モンテカルロシミュレーションに基づく Classification Tree にかけることでバックグラウンドを排除している。本講演ではこの解析がどのように行われているかについてレビューするとともに、今後数十 GeV から数百 GeV でのイベント数を増加させる解析法の研究について述べる。

1. W. B. Atwood et al. APJ. 697 1071 (2009)
2. L. Rochester et al. ArXiv 1001.5005. (2010)
3. M. Ackermann et al. APJ. 203 4 (2012)

## 観測 c1 市販冷却 CCD カメラ BN-52E の性能評価

倉橋 拓也 (明星大学 M1)

天体観測で幅広く使われる CCD カメラの原理・構造の理解と把握を前提として市販冷却 CCD カメラ BN-52E の性能評価を行い、研究対象の CCD カメラが測光観測等の天体観測に適しているか否かを判断する。精度の決定や観測方法に貢献することを目的として行うものであり屋内での測定を行い正確な観測データを得て CCD カメラの性能評価を理解していく。観測上重要になるのは、(1) 暗電流の時間安定性、(2) 暗電流の温度依存性、(3) CCD 画素の input level に対する output level の線形性、(4) 検出器の Read out Noise、gain の大きさである。(1) はダークフレームをどの程度の間隔で取得すべきか重要な情報であり、(2) は CCD 素子の冷却温度を決める際に重要な情報であり、(3) は適正な露出時間や予想される入射光子数に対する検出される光子数の線形からのずれ、(4) 観測によって得られたデータの精度の際に重要な情報である。これらはメーカーカタログ等に記載がないので独自の室内実験で確かめ、ダークフレーム・バイアスフレームの安定性、暗電流、リニアリティ、読み出しノイズがどの程度の安定性を持つかを発表する。当大学には CCD カメラ等の観測機器についての先行研究が少ないため冷却 CCD カメラの基礎実験の現在と今後について議論したい。

1. K. Matsuda, S. Narusawa and H. Naito Nishi-Harima Astron. Obs. 17, 1624 (2007)

## 観測 c2 OCTAVE システムを用いた SiO メーザー広帯域 VLBI 観測の技術開発

桑原 翔 (東京大学大学院 理学系研究科 天文学専攻 チリ観測所 M1)

SiO メーザーは漸近巨星分枝 (AGB) 星等の星周外層から生じる誘導放射であるがその励起機構はいまだ理解がされていない。今回、我々はこの励起機構の解明のために広帯域での VLBI 観測を行い、同時刻における複数の振動レベルの SiO メーザーの分布を明らかにしようとした。この観測では新しい記録装置を用いたので、位相残差補正を行うために新たに補正用スクリプトを開発した。また、野辺山 45m 電波望遠鏡 (NRO45) を広帯域観測で使用するために、私は NRO45 の GPS 測位を行って局位置誤差を改善し、更にアンテナ変形による遅延残差補正のスクリプトを開発して位相残差補正を行った。

この結果、SiO メーザーの異種 3 輝線を同時に撮像することに成功し、29SiO  $v=0(J=1-0)$  メーザー輝線を撮像することに成功した。更に、29SiO  $v=0(J=1-0)$ 、SiO  $v=3(J=1-0)$  共にメーザー輝線の他の輝線に対する相対位置については先行研究 (Soria-Ruiz et al., 2005 ; Imai et al., 2010) の結果にほぼ一致した。

1. Soria-Ruiz et al., 2005 A&A,432, L39L42
2. Imai et al., 2010,PASJ,62,431439

## 観測 c3 FFAST が切り開くサイエンス

今谷 律子 (大阪大学 常深研究室 (X 線天文グループ) M1)

FFAST 衛星の概要

FFAST(Formation Flying Astronomical Survey Telescope) プロジェクトは、2機の小型衛星にそれぞれスーパーミラーとSD-CCDを搭載し、編隊飛行(Formation Flight)技術を利用し、低高度地球周回衛星で軌道望遠鏡を成立、前例のない高エネルギー領域を広範囲で観測する計画である。理学的には10~80KeV領域で広領域にわたり隠されたブラックホールの発見を始めとする精密な観測に挑戦、工学的には世界で初めて編隊飛行によるX線望遠鏡システムを実現し、FF技術を実証する計画である。

#### 理学的な目的と価値

これまでの研究から超巨大質量ブラックホールSMBHと銀河の共進化が示唆されている。SMBH形成のプロセスが質量降着か銀河同士の合体かという謎を解くことは、銀河進化を理解する上で不可欠である。そのための観測ターゲットが活動銀河核AGNである。物質がSMBHに落ち込む際に解放する重力エネルギーによって明るく輝くAGNは、まさにBHの成長の現場である。ガスや塵に深く埋もれたAGNを観測するには、ガス等の吸収に関わりなくAGN光度を純粋に反映する硬X線領域が求められる。この領域の高感度観測には長焦点距離の望遠鏡が必要となる。これを1基の衛星で実現するには重量の増大、支持構体の柔軟性に起因する高精度制御の困難さに直面する。またBHは急成長し、埋もれたAGNの周りのガス等が晴れて吸収の少ないクエーサーになる。その数少ない高光度星を見つけるため、広範囲の観測が求められる。これらを解決するのが、FF技術を応用したFFASTである。

#### 工学的な目的と価値

FF技術は衛星サイズの物理的な制約を打破する画期的な技術である。これを観測衛星に応用し走査観測と集中的観測を行うことで、FFによる長焦点距離のX線望遠鏡の軌道上実証に加えて将来の最先端ミッションに必要な技術の実証を目指す。

### 観測 c4 宇宙観測用アバランシェフォトダイオードのシングルイベント効果のシミュレーション研究

荻田 竜平(横浜国立大学 M2)

最近の高エネルギー宇宙放射線の直接観測においては、結晶シンチレータなどを用いたカロリメータが多くの実験で使用されている。そのシンチレーション光の読み出し用光センサーとして、高いゲインをもつリバース型APD(アバランシェフォトダイオード)の開発研究が行われ使用されている。リバース型APDは荷電粒子に対しても反応し、SET(シングルイベント過渡)現象と呼ばれる現象を引き起こすことがある。これはシンチレーション光測定においてはノイズとなりうる。更に生成された電荷はデバイス内をドリフト運動し、過渡の電流増幅や、構造の破壊による故障の原因となる。これらにより、高エネルギー放射線環境である宇宙空間での、数年にわたる長期的な宇宙線観測においては、測定結果の誤差や放射線劣化によるノイズ増加など様々な悪影響が予想される。我々は荷電粒子が直接APDに入射した際の挙動を重イオン照射実験と数値シミュレーションから明らかにする研究を行っている。ビーム照射実験や電気特性測定を忠実に再現する数値モデルによる計算ができれば、装置打ち上げ後に検証が難しいさまざまな現象についても詳細な調査が可能となる。これまでにエネルギー6MeVと15MeVの炭素原子の照射実験を行いバイアス電圧とゲイン変化のSETによる影響等を調査した。重イオンエネルギーの差異は飛程として現れ、飛程の違いが増幅過程へ影響していることが分かった。この現象を更に詳しく調べるため、半導体デバイスシミュレーター(Synopsys社製TCAD)を用いて、APD内部の不純物密度構造の調査と共に数値計

算による加速器実験の検証を行っている。本発表ではこれまでに行った実験と数値計算結果の現状を報告する。

1. Quenching of impact ionization in heavy-ion induced electron-hole pair plasma tracks in wide bandwidth avalanche photodiodes

### 観測 c5 結晶反射鏡のモザイク化による積分反射率の向上

泉谷 喬則(中央大学 天体物理学(坪井)研究室 M2)

天体からやってくるX線から得られる情報のうち時間変動、スペクトル、イメージは盛んに観測が行われているが偏光X線観測はその検出器の開発の難しさから遅れており、新規開拓分野である。

我々は新しいX線偏光計開発のために高い偏光検出能力を期待できるブラッグ反射の原理に着目し、X線天文学で重要とされる鉄輝線を捉えるための反射鏡の素材にSi100を採用した。また、ブラッグ反射には反射できるエネルギーが狭いという欠点があったが、反射鏡を湾曲させることで反射できるエネルギーに幅をもたせることに成功した。

我々はさらなる反射鏡の高性能化を目指すために、湾曲結晶をモザイク化することを考えた。モザイク化した結晶は積分反射率が上がることが知られているからである。まず我々は第一段階として平らな結晶においてモザイク化を施し、その処理による表面形状の変化と積分反射率との間に関係を見いだした。本発表では、この関係について定量的に報告する。

### 観測 c6 100 GHz 帯超伝導ミクサの広帯域化に向けた開発

上月 雄人(大阪府立大学 宇宙物理学研究室 M1)

星間分子輝線の電波領域での分光観測は、ヘテロダイン受信機を搭載した電波望遠鏡によって行われる。電波望遠鏡の同時観測可能な周波数帯域が増大すると、複数の輝線を観測するために観測帯域をずらす操作が不要となるので、観測の効率が向上する。CO( $J=1-0$ )など多くの星間分子輝線の存在する100GHz帯では、受信機広帯域化への要請は極めて強かった。私は電波望遠鏡の観測帯域の広帯域化のために、広帯域デジタル分光計システムの開発および100GHz帯広帯域SIS(Superconductor-Insulator-Superconductor)ミクサの開発に取り組んでいる。

分光計の帯域を超える周波数帯を観測するには、受信信号をより低い周波数(数GHz程度)にダウンコンバートするミクサが必要となる。ミリ波・サブミリ波帯では低雑音(量子限界の数倍程度)なSISミクサが、ALMAなどの受信機にも広く用いられている。SIS素子は二つの超伝導体を1nm程度の絶縁層で隔てたサンドイッチ状の構造をしている。このSIS接合の持つ強い非線形性がミクサとして利用されている。従来のSISミクサのIF帯域は4-8GHzが主流であったが、近年では4-12GHzへの広帯域化が盛んに行われている。

現在私はRF帯80-120GHz,IF帯4-12GHzの広帯域・低雑音SISミクサの開発を行っている。新ミクサの開発では、導波管回路・平面回路での電磁界解析とSISの変換特性の計算をもとに、インピーダンス変換回路の不連続点の考慮や、SIS素子上のIF取り出し回路を設ける等の検討を行っている。本講演では新SIS素子の開発の現状について報告す

る。

## 観測 c7 鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡への減光フィルターの導入

井上 幹一朗 (鹿児島大学 M1)

鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡では VERA と連携してミラ型星の周期光度関係の高精度化を目指している。しかし、そのために観測しているレーザー源は近赤外 K バンドで 0.4 等と非常に明るい星である。しかし現在の赤外線天体観測ではとても明るい星は検出器がサチレーションを起こすため観測ができない。そこで、サチレーションを起こさないような観測手法として減光フィルターを導入した観測を検討している。

従来、鹿児島大学 1 m 光赤外線望遠鏡ではサチレーションを回避する方法として、星像をわざとぼかすデフォーカスという方法で観測を行ってきた。しかし、この方法ではサチレーションは回避できるが、同じ視野内の参照星も暗くしてしまい相対測光ができなくなることがある。その場合には別の領域の測光標準星を用いて等級の校正を行う必要があるが、この方法は天候に左右されるため、十分な精度が得られる日が限られる。また、デフォーカスをするとき星像が大きくなるため、星が混み合っている領域では星像が重なり合ってしまう。

デフォーカスをせずに明るい星を観測するための手段として、全面減光フィルターを使いサチレーションを回避させることで精度向上を見込んで試験観測を行った。しかし、視野全体を減光するため、目的星がサチレーションを起こさないような減光を施すと、多くの参照星が写らなくなってしまう、デフォーカスと同等の問題が発生した。

そこで、部分減光フィルター (視野の一部だけ減光するフィルター) を使うことを検討している。目的星のみ減光することでサチレーションを回避し、それ以外の大半の視野は一切減光されず、全面減光フィルターのように参照星を暗くしないので相対測光が可能になる。現在までに部分減光フィルターを取り付ける準備が完了している。今後、実際に部分減光フィルターを使った試験観測を行い、性能評価を行う。

## 観測 c8 「あかり」近赤外グリズム分光観測の二次光を考慮したフラックス較正

馬場 俊介 (宇宙科学研究所 M2)

赤外線天文衛星「あかり」に搭載された Infrared Camera (IRC) の近赤外チャンネルは、ゲルマニウム製のグリズムを用いた分光観測機能を持つ。観測可能な波長範囲は 2.5–5.0  $\mu\text{m}$  で、波長分解能は 3.6  $\mu\text{m}$  において  $\lambda/\delta\lambda \sim 120$  である (Ohyama et al. 2007)。

このグリズム分光観測のフラックス較正は、K 型星などの青いスペクトルをもつ標準星から求めたレスポンス曲線で行われていた。しかし、赤いスペクトルをもつ天体の観測データを解析する場合、レスポンスを介して求めたフラックスが波長 4.9  $\mu\text{m}$  以上で急激に減少する不自然な結果になると分かった。この現象は、長波長側の一次光に短波長側の二次光が混入しており、赤いスペクトルでは標準星に比べ二次光の混入が少ないため、フラックスを過小評価していると考えられる。そこで我々は、二次光の混入を考慮した新たなフラックス較正を行った。

二次光の寄与を加味して一次光と二次光のレスポンスを求めめるため、一般的な標準星に加え、滑らかで輝線や吸収の少ない赤いスペクトルをもつ活動銀河核を標準天体として利用した。ここで用いた活動銀河核のスペクトルは、2MASS (Two Micron All-Sky Survey)、WISE、Spitzer の観測結果から推測した。二次光の波長と入射するピクセルの関係を、グリズムの設計とゲルマニウムの屈折率から計算した。各ピクセルで受

かるカウント数は、フラックスとレスポンスの積を、一次光と二次光について足し合わせたものと考えられる。標準星と活動銀河核の 2 種類の観測結果から連立方程式を立てることで、一次光と二次光の 2 つのレスポンス曲線を同時に求めた。本講演では、この手法で得られた新たなレスポンス曲線と、それらを用いたフラックス較正について報告する。

1. Ohyama, Y., Onaka, T., Matsuhara, H., et al. 2007, PASJ, 59, 411

## 観測 c9 多天体補償光学系試験装置 RAVEN のすばる望遠鏡での観測における大気揺らぎ成分の解析

山崎 公大 (東北大学天文学専攻 M1)

多天体補償光学とは回折限界に迫るような星像を望遠鏡の広い視野にわたって得ることを可能にする技術であり、将来的に建設が予定されている TMT にもその概念を取り入れた装置の導入が提案されている。しかし実際にこの概念を適応するには、開ループ波面補償制御やキャリブレーションなどの技術的な課題が多く残されている。このような多天体補償光学の実証実験を実際の望遠鏡での観測を通して行うことを目的としてビクトリア大学のチームを主として開発された装置が RAVEN である。RAVEN には全部で 6 個のシャックハルトマン型波面センサーがあり、それぞれが開口部面上の異なる方向の波面揺らぎを測定している。これはトモグラフィの手法で波面補償を行うことを可能にするための設計である。また RAVEN は日本の国立天文台の協力の下、すばる望遠鏡の近赤外ナスマス架台に装着することを想定し多天体補償光学系の実証実験及び科学的対象のデータを取得することを目的として開発が進められ、今年 5 月には最初の on-sky データを取得するに至った。今回紹介するのは RAVEN で測定された実際の大气揺らぎの成分の解析である。例えば波面の Tip-tilt 成分の時間変動を解析した結果、いくつかの周期的な振動成分が存在していることが判明した。このような振動は大气由来のものではなく望遠鏡や装置自身の振動が反映されていると考えられ、そのうちのいくつかは補償光学系作動時に得られる星像に影響を及ぼす成分であることも確認された。今後は、望遠鏡による影響の検出のみならず、大気揺らぎの性質やその変動の時間スケールについて詳しい評価を行うことを目的としてより高次の成分の時間変動についても解析を進める。

1. Raven, a Multi-Object Adaptive Optics technology and science demonstrator

## 観測 c10 次世代ガンマ線望遠鏡 CTA における大口径望遠鏡の分割鏡の形状測定

長 紀仁 (茨城大学理工学研究科理学専攻物理学系 M1)

Cherenkov Telescope Array (CTA) 計画とは、大・中・小と口径が異なる 3 タイプのチェレンコフ望遠鏡群を用いて、これまでになく高感度で 20 GeV から 100 TeV 以上に渡る広エネルギー帯において高エネルギーガンマ線の観測を目指す国際共同プロジェクトである。

CTA-Japan グループが研究開発を行っている大口径望遠鏡は、CTA 計画全体で 8 台建設される予定である。この望遠鏡の 23 m の口径を実現するために、1 台あたり六角形の対辺が 1.51 m の分割鏡を約 200 枚

も使用する。この大口径望遠鏡開発に伴い、大量の大型分割鏡の形状を高精度かつ効率よく評価することが必要不可欠であり、現在この評価方法として Phase Measuring Deflectometry (PMD) 法という方法を採用している。PMD 法とはドイツのエアランゲン大学で開発された 3 次元形状測定方法で、液晶スクリーンを使い対象の鏡面に位相模様を映し、正反射によって生じた像の鏡面形状による変形を 4 台の CCD カメラでステレオ撮影した画像を解析することにより、鏡面形状、法線を測定する方法である。これまでグループでは、PMD 法で得られた鏡面情報から光線追跡シミュレーションを行い、スポットサイズや焦点距離の評価を行ってきた。

本講演では、直径 0.3 m の試験鏡を用いて、非接触 3 次元形状測定装置による測定と PMD 法の測定の比較を試みたので、その結果について報告する。また、新しい分割鏡の 2f 法による測定で得られた画像データについても解析を行う予定で、その結果についても報告する予定である。今後は、非接触 3 次元形状測定装置による測定や 2f 法によって得られたデータを解析する方法を確立し、PMD 法の結果と比較し精度を評価することを目指す。

1. 馬場浩則, 2013 年度, 茨城大学修士学位論文

## 観測 c11 京大岡山 3.8m 望遠鏡計画：副鏡計測技術の開発

江見 直人 (京都大学宇宙物理学教室 M2)

京大岡山 3.8m 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隣接地に分割鏡による光赤外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  $\phi$  1066 m の非球面の凸面鏡で、表面精度は構造関数に従うと最低でも  $\text{RMS } \leq 100 \text{ nm}$  が必要である。そのため計測技術の仕様としては、まず非球面の凸面が計測可能であること、そして測定精度が  $\text{RMS } \leq 50 \text{ nm}$  であることが求められる。開発中の計測技術は、変位計を 3 軸ステージで機械的に走査させ、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。従来この機械的な計測方法は超精密な運動を実現できる特別な機械が必要だったが、我々が開発した「引きずり逐次 3 点法」を使えば、精密な機械運動なしで計測することができる。このシステムで実際に平面上の同じ直線パスを繰り返し測定した時の出力値の再現性は、RMS で 0.2 nm という実験結果を得た。さらに得られた点群情報を面形状に生成するためのデータステッチング方法も新しく開発し、1 m の平面を本研究の方法で測定したときに推定される測定精度をシミュレーションしたところ、全面で 13.6 nm という結果となった。

## 全体企画

田中 佐代子 氏 (筑波大学芸術系)

7月31日 11:30 - 12:30 大コンベンションホール

## 「天文・天体物理若手 夏の学校参加者のためのビジュアルプレゼンテーション入門」

ビジュアルには a) 直感的な理解、b) 即時性、c) 強烈的な記憶形成など、優れた特徴があり、ことばによる伝達がむずかしい内容でも、容易に伝達できる力があります。こうしたビジュアルの特徴は科学の伝達にかつてから活かされてきました。今日ではパソコンが普及し研究発表のビジュアル化がすすんでいます。学会発表スライド、学会発表ポスター、論文、研究申請書、研究報告書など、みなさんも日々これらと格闘しているのではないでしょうか。でもデザインやイラストはちょっと苦手…。それに実験や論文執筆で忙しいから、デザインやイラストにあまり時間をかけられないし…という方々がほとんどだと思います。今回はそんなみなさんのために役立つ実践的なお話をしたいと思います。

前半は講義形式で、効果的な配色、フォントと文字組、レイアウト、パワポによる図の描き方などについて解説します。後半は、みなさんが作成したスライドやポスターを何点か用意していただき、具体的なアドバイスをしたいと思います。

全体をとおしてのポイントはふたつ、「わずかひと手間のちがいが」「シンプルの強さ」です。これを体得できれば、わかりやすく魅力的なビジュアルプレゼンテーションに変わります！